

T
621.14023
P298
e.2



ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA

"DISEÑO, CONSTRUCCION Y PRUEBAS DE UN TERMOGASIFICADOR
EXPERIMENTAL PARA RESIDUOS FORESTALES Y AGRICOLAS"

TESIS DE GRADO

Previa a la obtención del Título de :

INGENIERO MECANICO

Presentada por:

MARIO PATIÑO AROCA

GUAYAQUIL - ECUADOR

1.985

AGRADECIMIENTO

Al DR. ALFREDO BARRIGA RIVERA ,
Director de Tesis, por su in
valorable ayuda y colaboración
para la realización de este
trabajo.

Al I.N.E., por el apoyo brindo
dato.

Al PERSONAL DEL LABORATORIO DE
CONVERSION DE ENERGIA, por su
gran ayuda desinteresada.

DEDICATORIA

- A DIOS

- A MIS PADRES

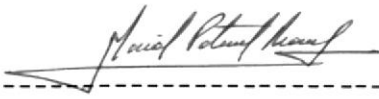
- A MIS HERMANOS

- A MI NOVIA


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 ES CUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL".

(Reglamento de Exámenes y Títulos Profesionales de la ES POL).



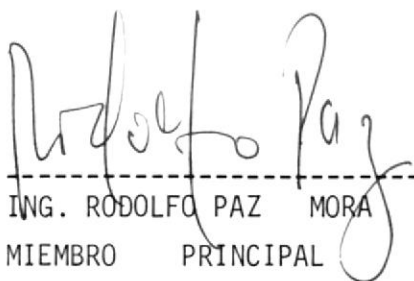
MARIO PATIÑO AROCA




ING. MARCELO ESPINOSA LUNA
SUB-DECANO DE LA FACULTAD DE
INGENIERIA MECANICA.



DR. ALFREDO BARRIGA RIVERA
DIRECTOR DE TESIS



ING. RODOLFO PAZ MORA
MIEMBRO PRINCIPAL



ING. GEORGE ASPIAZU SANCHEZ
MIEMBRO PRINCIPAL

R E S U M E N

El presente trabajo ofrece la posibilidad de conocer la tecnología de termogasificación la cual consiste en convertir un combustible sólido a gaseoso, conocido este último como "GAS POBRE", utilizando para ello un proceso -termoquímico el cual ocurre en un recipiente llamado termogasificador o gasificador simplemente. Además permite saber como esta tecnología puede ser útil en nuestro país.

Se presentan nueve capítulos. En el Capítulo I, se indican - los objetivos específicos de esta tesis, además de la importancia tecnológica y socio-económica que ella podría tener. El Capítulo II, bajo el título de Fundamentos Técnicos, muestra las propiedades de los combustibles fósiles y biomásicos, dándole mayor énfasis a los del segundo tipo, ya que son ellos a los que están dirigidos hoy en día la tecnología de gas pobre. Los tipos, principios y parámetros de operación de los gasificadores son presentados en el Capítulo III.

Conocida la parte teórica de la tecnología se procedió lue

go a diseñar un tipo específico de gasificador utilizando para ello la información disponible y adecuada; detalles del diseño forman el Capítulo IV.

En el Capítulo V, se explica cual fue el proceso de construcción del gasificador, indicando además los materiales usados y el costo de cada uno de ellos.

En el Capítulo VI, vemos que se presentan los resultados obtenidos de las pruebas experimentales realizadas.

El Capítulo VII, muestra las dos principales aplicaciones de la tecnología de gasificación que podrían implementarse en el país.

Como toda tecnología tiene sus inconvenientes, esta no podría ser una excepción y es por eso que en el Capítulo VIII, se resume los principales peligros que se presentan en la operación del gasificador y la manera de reducirlos al mínimo posible.

Finalmente, no basta un estudio técnico de cierta tecnología para ponerla en práctica, sino más bien se necesita ser complementada con un análisis económico para luego decidir si es conveniente o no implementarla. Este análisis económico es presentado en el Capítulo IX para una aplicación en particular.

INDICE GENERAL

	<u>PAGS.</u>
RESUMEN -----	VI
INDICE GENERAL -----	VIII
INDICE DE FIGURAS -----	XII
INDICE DE TABLAS -----	XVIII
INTRODUCCION -----	21
CAPITULO I	
OBJETIVOS E IMPORTANCIA DEL PROYECTO -----	23
CAPITULO II	
FUNDAMENTOS TECNICOS -----	27
2.1. COMBUSTIBLES -----	27
2.1.1. Clasificación y propiedades -----	28
2.1.2. Poder Calorífico -----	38
2.1.3. Combustibles Sólidos -----	40
2.1.4. Combustibles gaseosos -----	81
2.2. COMBUSTION.- PRINCIPIOS -----	87
2.3. COMBUSTION DE SOLIDOS -----	94
2.4. COMBUSTION DE GASES -----	95

CAPITULO III	
GASIFICADORES -----	97
3.1. TIPOS Y PRINCIPIOS DE OPERACION -----	97
3.2. COMBUSTION DE SOLIDOS EN LECHO CUASIESTATICO	113
3.3. GASIFICACION TERMOQUIMICA -----	116
3.3.1. Procesos: Descripción -----	117
3.4. PARAMETROS OPERACIONALES -----	124
CAPITULO IV	
DISEÑO DE UN GASIFICADOR DE TIPO FLUJO DESCENDEN TE -----	129
4.1. INTRODUCCION -----	129
4.2. DETERMINACION DE LOS PARAMETROS DE DISEÑO -----	131
4.3. ESQUEMA DEL GASIFICADOR -----	143
CAPITULO V	
CONSTRUCCION E INSTRUMENTACION -----	145
5.1. PASOS A SEGUIR EN LA CONSTRUCCION DEL GASIFI- CADOR -----	145
5.2. MATERIALES A UTILIZARSE Y COSTOS -----	152
CAPITULO VI	
PRUEBAS EXPERIMENTALES -----	156
6.1. DESCRIPCION -----	156

	<u>PAGS.</u>	
6.2. CONCENTRACION DE GASES -----	160	160
→ 6.3. PODER ^{ENERGETICO} DEL GAS QUE RESULTA DEL COM BUSTIBLE SOLIDO -----	163	163
6.4. ANALISIS DE RESULTADOS -----	164	164
 CAPITULO VII		
APLICACIONES DEL GAS POBRE PRODUCIDO EN UN TERMO GASIFICADOR -----	171	171
7.1. GENERALIDADES -----	171	171
7.2. OPERACION PARA APROVECHAMIENTO TERMICO EN HO GARES -----	174	174
7.3. OPERACION PARA PRODUCIR FUERZA MOTRIZ -----	177	177
7.3.1. Equipo anexo necesario para utilización del gas en motores -----	196	196
7.4. BALANCE ENERGETICO GLOBAL -----	206	206
 CAPITULO VIII		
PELIGROS EN LA OPERACION CON GAS POBRE -----	211	211
8.1. GENERALIDADES -----	211	211
8.2. PELIGROS DE TOXICIDAD -----	212	212
8.3. PELIGROS DE INCENDIO -----	220	220
8.4. PELIGROS DE EXPLOSION -----	223	223
8.5. OTROS PELIGROS -----	225	225

↓
PAGS.

CAPITULO IX

ASPECTOS GENERALES RELACIONADOS AL POSIBLE USO DEL

GAS POBRE EN EL PAIS -----	227	227
9.1. ESTUDIO ECONOMICO -----	227	227
9.2. IMPACTO ECOLOGICO POTENCIAL -----	240	240
9.3. EVALUACION SOCIO-ECONOMICA GLOBAL -----	243	243
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES -----	250	250
APENDICES -----	257	257
BIBLIOGRAFIA -----	287	287

INDICE DE FIGURAS

<u>Nº</u>		<u>PAGS.</u>
CAPITULO II		
2.1.	CLASIFICACION DEL CARBON MINERAL EN BASE AL PORCENTAJE DE CARBONO FIJO Y AL PODER CALORIFICO -----	42 42
2.2.	CONTENIDO DE HUMEDAD Vs. PERDIDAS DE CALOR PARA COMBUSTIBLES CON VARIOS PODERES CALORIFICOS SUPERIORES -----	53 53
2.3.	PODER CALORIFICO NATO DE LA CELULOSA COMO UNA FUNCION DEL CONTENIDO DE HUMEDAD -----	54 54
2.4.	COMPOSICION DEL GAS POBRE COMO UNA FUNCION DEL CONTENIDO DE HUMEDAD -----	56 56
2.5.	PROPIEDADES DEL GAS POBRE COMO UNA FUNCION DEL CONTENIDO DE HUMEDAD-----	57 57
2.6.	VARIACION EN EL CONTENIDO DE HUMEDAD DEL CARBON CON RESPECTO A LA HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE-----	58 58
2.7.	TAMAÑO APROPIADO DE COMBUSTIBLES PARA GASIFICADORES -----	62 62
2.8.	RAZON DE CONSUMO DE COMBUSTIBLE Vs. TIEMPO DE RESIDENCIA (PARA VARIAS DENSIDADES APARENTES)---	67 67

<u>Nº</u>	<u>PAGS.</u>
CAPITULO III	
3.1. REPRESENTACION ESQUEMATICA DE UN GASIFICADOR-----	98 98
3.2. ESQUEMAS DE LOS TRES TIPOS DE GASIFICADORES MAS - USADOS -----	100 100
3.3. DIAGRAMA ESQUEMATICO DE LAS ZONAS DE REACCION DE UN GASIFICADOR DE TIRO DESCENDENTE -----	104 104
3.4. TIPOS DE REACTORES Y SUS RESPECTIVOS PERFILES DE TEMPERATURA Y CONVERSION DE LA BIOMASA -----	109 109
3.5. ESQUEMA DE UN GASIFICADOR DE LECHO FLUIDIZO -----	111 111
3.6. ESQUEMA DEL PROCESO DE TERMOGASIFICACION DE MADERA EN LECHO CUASIESTATICO CON FLUJO DE AIRE ASCENDEN- TE -----	115 115
3.7. EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA COMPOSICION DEL GAS -----	126 126
CAPITULO IV	
4.1. ESQUEMA BASICO DEL CICLON -----	139 139
CAPITULO VII	
7.1. ESQUEMA DE UNA PLANTA DE TERMOGASIFICACION Y SUS - APLICACIONES -----	173 173
7.2. ESQUEMA DE UNA PLANTA DE TERMOGASIFICACION PARA USO TERMICO -----	178 178
7.3. EFICIENCIA TERMICA INDICADA DE UN MOTOR DE ENCENDI- DO POR CHISPA OPERANDO CON GAS POBRE Vs. PRESION IN DICADA MEDIA EFECTIVA -----	184 184

XIV

Nº

↓
PAGS.

7.4.	EFICIENCIA TERMICA INDICADA DE UN MOTOR A DIESEL OPERANDO CON GAS POBRE E INYECCION PILOTO DE DIESEL Vs. PRESION INDICADA MEDIA EFECTIVA-----	185	185
7.5.	EFICIENCIA VOLUMETRICA DE UN MOTOR A DIESEL OPERANDO CON GAS POBRE E INYECCION PILOTO DE DIESEL Vs. PRESION INDICADA MEDIA AL FRENO -----	186	186
7.6.	POTENCIA DE SALIDA EN FUNCION DE LA VELOCIDAD DEL MOTOR -----	188	188
7.7.	PODERES CALORIFICOS TIPICOS PARA ALGUNAS MEZCLAS ESTEQUIOMETRICAS AIRE ^{combustible.} COMBUSTIBLE A 1 ATM y 15°C.	189	189
7.8.	CANTIDAD DE CONTAMINANTES EN EL ESCAPE DEL GAS---	194	194
7.9.	ESQUEMA COMPLETO DE UNA PLANTA DE GAS POBRE PARA FUERZA MOTRIZ -----	195	195
7.10.	ESQUEMAS DE TIPOS DE FILTROS USADOS EN UNA PLANTA DE GAS POBRE -----	200	200
7.11.	ESQUEMAS DE ENFRIADORES POR CONVECCION FORZADA Y NATURAL -----	202	202
7.12.	TIPOS DE MEZCLADORES - DOSIFICADORES PARA GAS POBRE -----	204	204
7.13.	ESQUEMA TIPICO DE UNA PLANTA DE GAS POBRE DONDE SE ENCUENTRA LA DISPOSICION DE LOS COMPONENTES - PRINCIPALES Y AUXILIARES -----	205	205
7.14.	BALANCE TERMO-QUIMICO DEL PROCESO DE TERMOGASIFICACION UTILIZANDO UN DIAGRAMA DE SANKEY -----	210	210

<u>Nº</u>	<u>PAGS.</u>	
CAPITULO VIII		
8.1.	214	ABSORCION DEL MONOXIDO DE CARBONO EN LA SANGRE ----- 214
CAPITULO IX		
9.1.	249	PROGRAMA NACIONAL TENTATIVO PARA EL DESARROLLO DE LA TECNOLOGIA DE GAS POBRE ----- 249
APENDICES:		
APENDICE A		
A.1.	258	PROPIEDADES DEL GAS POBRE COMO UNA FUNCION DEL CONTENIDO DE HUMEDAD ----- 258
A.2.	259	GRAFICO PARA DETERMINAR LA ALTURA DEL PLANO DE LA TOBERA EN FUNCION DEL DIAMETRO DE LA GARGANTA ----- 259
A.3.	259	GRAFICO PARA DETERMINAR EL AREA DE LAS TOBERAS Y LA VELOCIDAD DEL AIRE EN FUNCION DEL DIAMETRO DE LA GARGANTA ----- 259
A.4.	259	GRAFICO PARA DETERMINAR EL DIAMETRO DEL GASIFICADOR A LA ENTRADA DE LA ZONA DE COMBUSTION Y LA ALTURA DEL PLANO DE LA TOBERA EN FUNCION DEL DIAMETRO DE LA GARGANTA ----- 259
APENDICE B		
B.1.	261	TANQUE SUPERIOR O CARBONERA ----- 261
B.2.	262	PLANCHA PERFORADA ----- 262

<u>Nº</u>		<u>PAGS.</u>	↓
B.3.	TANQUE INFERIOR Y TRONCO DE CONO-----	263	263
B.4.	CRISOL Y CAMARA DE AIRE -----	264	264
B.5.	TOBERA -----	265	265
B.6.	FILTRO - CICLON -----	266	266
APENDICE C			
C.1.	DESARROLLO DEL TRONCO DEL CONO INFERIOR -----	268	268
C.2.	DESARROLLO DEL TRONCO DE CONO QUE HACE DE SEGUN- DA GARGANTA -----	268	268
C.3.	CILINDRO SUPERIOR -----	269	269
C.4.	CILINDRO INFERIOR -----	269	269
C.5.	CILINDRO DEL CRISOL -----	270	270
C.6.	ESTRUCTURA DE SOPORTE -----	270	270
C.7.	PLANCHA PERFORADA Y REJILLA -----	271	271
C.8.	TOBERAS Y PLATO - GARGANTA -----	271	271
C.9.	MAQUINADO DE BRIDAS -----	272	272
C.10.	PERFORACION DE BRIDAS -----	272	272
C.11.	CAMARA DE AIRE -----	273	273
C.12.	ESCALERILLA -----	273	273
C.13.	VENTILADOR -----	274	274
C.14.	CICLON -----	274	274
C.15.	TAPA SUPERIOR -----	275	275
C.16.	AISLAMIENTO -----	276	276
C.17.	PRUEBAS -----	277	277
C.18.	PRUEBAS -----	278	278



Nº

PAGS.

C.19. PRUEBAS -----

279 279

C.20. PRUEBAS -----

280 280

INDICE DE TABLAS

<u>Nº</u>		<u>PAGS.</u>	↓
I	ANALISIS TIPICO PARA ALGUNOS TIPOS DE COQUE-----	44	44
II	ANALISIS DE ALGUNAS VARIETADES DE TURBA SECADA AL AIRE -----	46	46
III	CONTENIDO DE HUMEDAD EN COMBUSTIBLES FOSILES -----	49	49
IV	CONTENIDO DE HUMEDAD EN COMBUSTIBLES NO FOSILES---	50	50
V	TAMAÑO DEL COMBUSTIBLE RECOMENDADO PARA GASIFICADO RES PEQUEÑOS -----	61	61
VI	DENSIDAD APARENTE DE VARIOS COMBUSTIBLES -----	65	65
VII	PODER CALORIFICO SUPERIOR DE COMBUSTIBLES FOSILES-	72	72
VIII	PODER CALORIFICO SUPERIOR DE COMBUSTIBLES NO FOSI LES -----	73	73
IX	MATERIA VOLATIL DE COMBUSTIBLES PARA GASIFICACION-	76	76
X	CONTENIDO DE CENIZA EN LOS COMBUSTIBLES PARA GASI FICACION -----	78	78
XI	COMPORTAMIENTO DE LAS ESCORIAS EN RESIDUOS AGRICO- LAS Y FORESTALES -----	80	80
XII	COMPOSICION DEL GAS NATURAL -----	83	83
XIII	ANALISIS DE COMBUSTIBLES GASEOSOS DERIVADOS DEL CARBON -----	85	85

<u>Nº</u>		<u>PAGS.</u>	↓
XIV	PESOS ATOMICOS Y MOLECULARES DE LOS GASES -----	93	93
XV	ZONAS, TEMPERATURAS Y REACCIONES QUE OCURREN EN EL PROCESO DE TERMOGASIFICACION -----	121	121
XVI	COMPOSICION DEL GAS EN GASIFICADORES QUE OPERAN CON MADERA Y CARBON VEGETAL -----	123	123
XVII	DESGASTE DE LOS CILINDROS DESPUES DE 1.000 km.-----	191	191
XVIII	EFFECTOS MEDICOS PRODUCIDOS POR DIFERENTES NIVELES - DE CARBOXIHEMOGLOBINA -----	215	215
XIX	EFFECTOS CAUSADOS POR DIFERENTES CONCENTRACIONES DE MONOXIDO DE CARBONO EN EL AIRE -----	216	216
XX	TRATAMIENTO A SEGUIRSE EN PERSONAS EXPUESTAS AL MO NOXIDO DE CARBONO EN PROPORCIONES PELIGROSAS -----	218	218
XXI	CONCENTRACIONES MAXIMAS PERMITIDAS DE MONOXIDO DE CARBONO EN EL AIRE -----	221	221
XXII	VALORES EMPLEADOS EN EL ANALISIS ECONOMICO DE UN SISTEMA DE FUERZA MOTRIZ -----	230	230
XXIII	RESULTADOS DEL ANALISIS ECONOMICO DE UN SISTEMA DE FUERZA MOTRIZ (20 kw)-----	237	237
XXIV	ANALISIS CUALITATIVO DE COSTOS Y BENEFICIOS SOCIALES EN LA IMPLEMENTACION DEL GAS POBRE EN EL PAIS-----	246	246
APENDICE D			
D.1.	TABLA DE DATOS EXPERIMENTAL Nº 1 -----	282	282
D.2.	TABLA DE DATOS EXPERIMENTAL Nº 2 -----	283	283

<u>Nº</u>		<u>PAGS.</u>	
D.3.	TABLA DE DATOS EXPERIMENTAL Nº 3 -----	284	284
D.4.	TABLA DE DATOS EXPERIMENTAL Nº 4 -----	285	285
D.5.	TABLA DE DATOS EXPERIMENTAL Nº 5 -----	286	286

I N T R O D U C C I O N

La tecnología de Termogasificación que llegó a su climax durante la Segunda Guerra Mundial, especialmente en países europeos, en donde la escasez de los combustibles - convencionales impulsaron su desarrollo, consiste en convertir material carbonaceo y lignocelulósico sólido tales como el carbón, residuos forestales (madera por ejemplo), residuos agrícolas (tusas de maíz, cascarilla de arroz peletizada, etc.), a un combustible gaseoso por medio de un proceso termoquímico que se efectua dentro de un reactor - llamado gasificador. El gas así generado se denomina "Gas pobre" por su bajo poder calorífico relativo y contiene - una mezcla de gases, unos combustibles como es el caso del monóxido de carbono, hidrógeno, metano y otros que no lo son como el dióxido de carbono, oxígeno y nitrogeno.

El presente trabajo tiene su origen en un interés personal y también de la Escuela Superior Politécnica del Litoral, a través de la Facultad de Ingeniería Mecánica, en desarrollar un proyecto cuyas conclusiones y recomendacio-

nes sean útiles para el desarrollo de la tecnología de producción y uso del gas pobre obtenido en un termogasificador experimental para pequeña escala, utilizando para dicho fin la materia prima disponible en nuestro país, esto es, combustibles biomásicos como lo son los residuos forestales y específicamente para este trabajo, la madera.

Para cumplir con dicha meta, se procederá en primer lugar a diseñar un termogasificador apropiado, luego a su total construcción con material y mano de obra disponible en nuestro medio, para finalmente realizar las pruebas pertinentes de cuyos datos obtendremos, entre otros resultados, la eficiencia de la instalación haciendo uso del Balance Energético de la misma.

Gracias al apoyo económico dado por el Instituto Nacional de Energía (INE), he procedido a hacer realidad esta aspiración, bajo ciertos lineamientos específicos acordados - por ambas partes.

Finalmente, es menester indicar, que este trabajo forma parte integrante de un proyecto de gas pobre entre INE-ESPOL y de un proyecto de investigación sobre gasificación de leña y residuos agroforestales en aplicaciones rurales y de pequeña escala dirigido por la ESPOL.

C A P I T U L O I

OBJETIVOS E IMPORTANCIA DEL PROYECTO

Los objetivos específicos de este proyecto se dan a continuación:

- a. Presentar las características físico - químicas de los combustibles biomásicos e indicar los principios básicos del proceso de termogasificación.
- b. Elaborar el diseño apropiado de un termogasificador modelo, utilizando las curvas de diseño obtenidas de la experiencia en gasificadores que operan con madera.
- c. Hallar el balance energético global del gasificador para estimar la eficiencia de conversión de combustible biomásico a gas pobre, usando los datos obtenidos en las pruebas experimentales.

Este proyecto es esencialmente importante por dos razones

principales:

La primera se refiere al desarrollo tecnológico del proceso de gasificación para fines energéticos, ya que aún no han sido implementados en el país, como consecuencia de ello, la investigación en este campo llevaría a construir equipos y/o parte de este en serie, en talleres y artesanías locales, con ninguna o poca dificultad y con la ventaja de recirculación de capital en las mismas zonas.

Además, para justificar la importancia de este estudio, es necesario indicar que los procesos de termogasificación de la biomasa, alcanzan producciones más elevadas con relación a los procesos de bioconversión debido a su acelerada dinámica y mayor flexibilidad del producto obtenido. Con el proceso de termogasificación se obtiene la más alta eficiencia de conversión de la celulosa y lignina en combustibles utilizables.

La segunda razón es de tipo socio-económico. En nuestro país, como en muchos países de América Latina, el uso de la biomasa forestal es una práctica tradicional y su consumo sobre todo en forma de leña representa relativamente un alto porcentaje de energía.

Paralelamente al uso irracional de la leña sin ningún programa de reforestación apropiado como lo hay en otras partes de nuestro continente, en Brasil por ejemplo, va en aumento los problemas de reforestación y erosión del suelo que en menor o mayor grado afectan al clima de la región y al ciclo hidrológico que la naturaleza nos ofrece, planteándose la necesidad de desarrollar sistemas más eficientes de conversión de residuos forestales y por que no agrícolas, en energía utilizable con el fin de promover el uso racional de estos recursos.

La mayor atracción de la tecnología de gasificación está en la habilidad única de convertir recursos biológicos - baratos (desperdicios) en combustibles de alto valor; por lo tanto desplazan derivados del petróleo costosos y generan ahorros a quienes los utilizan.

Si se lograra en nuestro país la introducción racional de esta tecnología sería beneficiosa para el fomento del desarrollo agrícola. Permitiría generar fuerza motriz como es el caso de un sistema motor - bomba (irrigación, aspersión, etc.), en grupos electrógenos que actualmente funcionan con gasolina o diesel, en vehículos como tractores, camiones, barcos de pesca, etc., en base a combustibles generados localmente.

En resumen, la tecnología de termogasificación (gas pobre) ha despertado interés en los países que como el nuestro, necesita de ella para aplicaciones en áreas con déficit de combustible fósil (zonas rurales principalmente). Su impacto de tipo socio-económico, tecnológico, agroforestal y ecológico podría ser importante, pero debe conducirse con bases técnicas y con planificación, con mayor énfasis en lo que respecta al uso de la madera y sus derivados.

C A P I T U L O I I

FUNDAMENTOS T E C N I C O S

2.1. COMBUSTIBLES

El término combustible significa en forma general, una sustancia que contiene energía química debido a la estrutura que poseen sus átomos y moléculas, la misma que puede ser liberada ya sea mediante reacciones de combustión o nucleares.

En este trabajo, cuando se hable de combustibles, se referirá a aquellas sustancias que liberan energía debido exclusivamente a reacciones de combustión.

La mayoría de los combustibles son sustancias que contienen carbono, el cual se combustiona con oxígeno o aire.

2.1.1. Clasificación y Propiedades

Los combustibles se clasifican según ciertas características:

- a. Por su forma física a temperatura normal, en sólidos, líquidos y gaseosos.
- b. Independientemente de su fase, los combustibles pueden ser primarios o secundarios. Los primeros son los que existen naturalmente y los segundos son aquellos producidos a partir de los primarios mediante ciertos procesos que alteran químicamente el material original.
- c. Por su poder calorífico, esto es, por la cantidad de calor cedida cuando se quema - la unidad de peso o volumen del material - en determinadas condiciones (principalmente para combustibles gaseosos) en aquellos de alto B.T.U. (kcal), de medio B.T.U.(kcal) y de bajo B.T.U.(kcal).
- d. Por sus características de combustión tales como grado de combustión, facilidad de ignición,

Temperatura y luminosidad de la llama, entre otras.

- e. Según su origen, en combustibles formados en pasadas eras geológicas llamados fósiles, producidos debido al proceso de fotosíntesis; entre los principales están: los carbones, las arenas asfálticas, el petróleo y el gas natural.

Los combustibles llamados biomásicos o no fósiles que son aquellos generados por la vegetación tales como la madera y residuos agrícolas.

Las propiedades de los combustibles, ya sean físicas o químicas, se las pueden enumerar de acuerdo al estado físico en que se encuentren, y serán factores importantes en la elección del combustible a utilizar para determinada aplicación.

PROPIEDADES DE LOS COMBUSTIBLES SOLIDOS

El análisis inmediato, el análisis último, la densidad específica y bruta, y el poder calorífico constituyen

yen los datos analíticos más comunes para caracterizar este tipo de combustible.

El análisis inmediato nos da información acerca del porcentaje en masa de:

1. Humedad
2. Materia volátil, constituida por gases y vapores.
3. Carbono fijo, que consiste en el residuo carbonizado menos ceniza; y,
4. La ceniza, proveniente de las impurezas minerales.

La suma de los porcentajes de la humedad, materia volátil, carbono fijo y cenizas es igual a 100.

La humedad es la pérdida de peso resultante del secado del combustible a temperaturas que están entre 104°C y 110°C en ciertas condiciones.

La materia volátil se considera como la pérdida del peso, menos la humedad, obtenida por calentamiento del combustible, durante 7 (siete) minutos, en un recipiente cerrado a una temperatura de 950°C, en ciertas condiciones. Consta primordialmente de los gases combustibles, hidrógeno, monóxido

xido de carbono, metano, compuestos sulfurosos volátiles y algunos gases incombustibles como el anhídrido carbónico y el vapor de agua.

El carbono fijo se lo obtiene restando de 100 (cien), la suma de los porcentajes de materia volátil, humedad y cenizas.

La ceniza es el residuo inorgánico que queda después de quemar el combustible en un horno, cuya temperatura final esta entre 700° C y 750°C; está compuesta por: calcio, hierro, sílice, alúmina y en menores cantidades de magnesio, sodio, potasio, etc.

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

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

La densidad específica llamada también relativa , es la relación del peso del combustible macizo al peso de un volumen igual de agua.

La densidad bruta es el peso por pie cúbico de combustible en trozos; esta propiedad varía de acuerdo con la densidad específica, distribución de tamaño, contenido de humedad y forma.

El poder calorífico superior de un combustible, expresado en kcal/kg , BTU/lbm , corresponde al calor producido por la combustión completa de una cantidad unitaria, en un proceso a volumen constante, en una bomba calorimétrica de oxígeno en condiciones normalizadas. Incluye el calor la tente del vapor de agua en los productos de com bustión.

El calor anteriormente mencionado en muchos pro cesos no forma parte de la energía útil para producir un beneficio, se ha determinado el llamado poder calorífico inferior que se utilizan en los cálculos en donde lo anteriormente dicho ocurre.

El poder calorífico superior (P.C.S.) puede cal



cularse aproximadamente a partir de sus elementos constitutivos mediante la formula de Dulong como se indica a continuación:

$$\text{P.C.S.} = 8080 C + 34460 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 2250 S \quad (\text{kcal/kg})$$

o también:

$$\text{P.C.S.} = 14544 C + 62028 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 4050 S \quad (\text{BTU/Lbm})$$

$$\left(\frac{\text{BTU}}{\text{Lbm}} \times 2.328 = \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$$

en donde:

C, H, O y S son las fracciones en peso (tanto por uno), determinadas en el análisis último. La formula anterior supone que el oxígeno del carbón se combina con parte del hidrógeno para formar agua, quedando el resto del hidrógeno disponible para la combustión junto con el carbono y azufre.

El poder calorífico inferior es:

$$\text{P.C.I.} = \text{P.C.S.} - 92.7 \times \text{hidrogeno total}$$

$$\left(\frac{\text{BTU}}{\text{Lbm}} \right)$$

PROPIEDADES DE LOS COMBUSTIBLES LIQUIDOS

Estos combustibles son en general, de origen natural como el petróleo y su derivados, el alcohol, alquitran, zenceno, entre los más importantes, pero también los hay de origen sintético.

Los factores que influyen en la buena elección de los combustibles líquidos son : el poder calorífico, la densidad específica, el calor de vaporización, la viscosidad, el contenido de impurezas como el azufre, la ausencia de agua y sedimentos, entre otros.

NOTA:

En vista de que el presente trabajo, no requiere mayor información sobre los - combustibles líquidos, he preferido no abarcar más sobre este tipo de combustible; y, más bien extenderme en contenido en lo que se refiere a los combustibles sólidos y gaseosos, ya que forman la parte fundamental en el desarrollo - de esta tesis.

PROPIEDADES DE LOS COMBUSTIBLES GASEOSOS

Las propiedades más usadas para los análisis de este tipo de combustible son: la densidad específica, el poder calorífico, los límites inferior y superior de inflamabilidad, la velocidad de propagación de la llama, la intensidad de combustión, etc.

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.

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 fluidos, en el 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 or

dinariamente en kJ/m^3 o kcal/m^3 en condiciones específicas de presión, temperatura y contenido de vapor de agua.

La ASTM especifica 575 K cal/Kg como el calor latente de condensación del agua para ser usado en el cálculo del poder calorífico inferior (H_i) de los gases a 15.5°C y 760 mm Hg ; la fórmula a utilizar es:

$$H_i = H_s - 167 w \frac{P}{T}$$

En donde H_s es el poder calorífico superior en K cal/m^3 ; P es la presión del gas seco en mm Hg ; T es la temperatura del gas en grados $^\circ \text{K}$.

Los límites inferior y superior 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 dichos límites, se propagará, es decir tenemos mezclas inflamables.

El cálculo de estos límites se lo realiza utilizando la Ley de Mezclas de Le Chatelier, la cual es expresada en su forma más simple como sigue:

$$L = \frac{100}{\frac{P_1}{N_1} + \frac{P_2}{N_2} + \frac{P_3}{N_3} + \dots + \frac{P_n}{N_n}}$$

Donde:

L es el porcentaje en volumen del gas combustible presente en una mezcla límite de aire y gas ; $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$, son los porcentajes en volumen de cada gas combustible, calculados sobre la base de aire y materia inerte, y $N_1, N_2, N_3, \dots, N_n$ son los porcentajes en volumen de cada gas combustible presente en una mezcla límite del gas y aire.

La velocidad de propagación de la llama, se la puede calcular dividiendo el gasto en volumen, de un quemador Bunsen adecuado, para el área del cono - interno de la llama.

Los cambios en la composición del gas, de la relación aire - combustible en la mezcla quemada y de la temperatura tienen gran influencia sobre la velocidad de la llama.

La intensidad de combustión (J) se la calcula a partir de la relación

$$J = \mu \frac{H}{K}$$

En donde:

J está dado en $K \text{ cal/m}^2 \cdot \text{seg}$; H es el calor desarrollado por m^3 de mezcla de aire-gas; μ es la velocidad de la llama en m/s y K es la relación del área de la lumbrera al área del cono interno.

2.1.2. Poder Calorífico

El poder calorífico llamado también potencia calorífica, es numéricamente igual a su calor normal de combustión pero cambiado de signo.

Esta propiedad fundamental para todo tipo de

combustible, y que constituye en muchos procesos de ingeniería la energía inicialmente disponible de la cual se va a obtener cierto provecho, se la determina ordinariamente por medidas experimentales directas; también existen métodos para su cálculo a partir de la composición y calidad del combustible.

Generalmente, hay dos formas de expresar los poderes caloríficos, y que difieren en el estado elegido para el agua presente en el sistema después de la combustión.

La potencia calorífica total o superior de un combustible es el calor desprendido en la combustión completa, a presión constante y a una temperatura de 25°C (298°K), cuando toda el agua inicialmente presente en estado líquido en el combustible y la que aparece en los productos de la combustión esta condensada en el estado líquido.

La potencia calorífica neta o inferior se define de forma similar, con la diferencia de que

el estado final del agua en el sistema después de la combustión es el de vapor a 25° C.

El poder calorífico inferior se lo obtiene restando del poder calorífico superior el calor latente de vaporización a 25° C del agua formada y vaporizada en la combustión.

2.1.3. Combustibles Sólidos.

En esta sección se hablará sobre los combustibles fósiles y no fósiles, pero dedicando el mayor esfuerzo al desarrollo de la literatura de los combustibles sólidos de origen biomásico, es decir los no fósiles, ya que precisamente - el presente trabajo va a utilizar dichos combustibles como materia prima para el proceso - de gasificación propuesto en esta tesis.

En el grupo de los combustibles fósiles encontramos, entre los más conocidos y usados, al carbón mineral en sus respectivas clases, al coque y la turba.

El carbón mineral es un combustible sólido, ne-

gro, originado por la descomposición de la vegetación antigua en un proceso anaeróbico, bajo la influencia de la humedad, calor y presión. Está compuesto principalmente de carbono, hidrógeno, oxígeno y cantidades pequeñas de nitrógeno y azufre. Aparte de ser usado ampliamente como combustible, es también fuente de productos químicos orgánicos.

El carbón mineral se clasifica en varias formas, según su clase, variedad, tamaño y uso. Según su clase, esto es de acuerdo a su grado de metamorfosis, va desde lignito hasta meta antracita.

En la figura N^o 2.1., se muestra la clasificación - del carbón mineral según su clase, adoptada en forma estándar por la ASTM; esta clasificación es tá dada en base al porcentaje de carbono fijo presente y al poder calorífico.

El coque es un material sólido infusible, coherente que se obtiene del carbón, alquitran, residuos - del petróleo, entre otros. Hoy en día, otras variedades específicas del coque, se distinguen por la

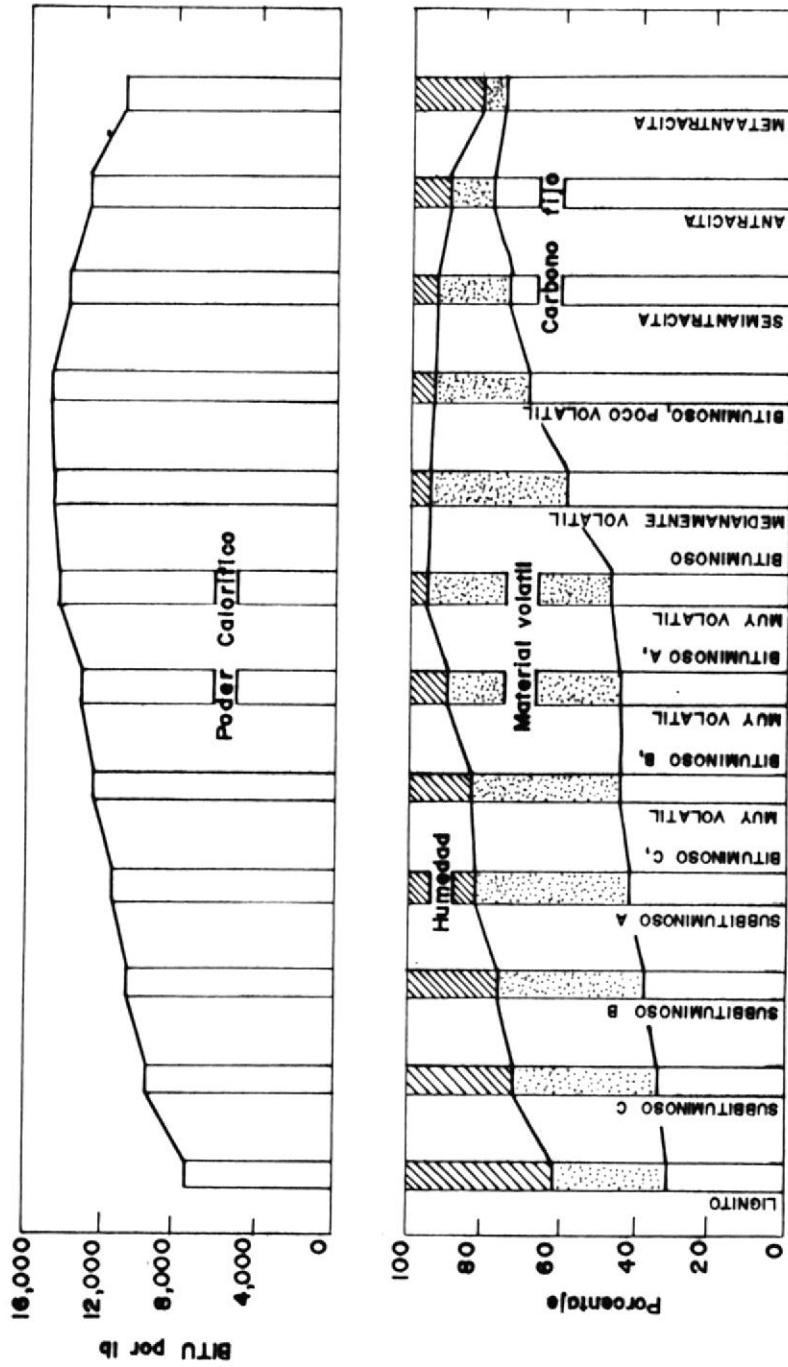


FIGURA 2-1.- CLASIFICACION DEL CARBON MINERAL EN BASE AL PORCENTAJE DE CARBONO FIJO Y AL PODER CALORIFICO.

FUENTE: REF. 9

palabra que indica su origen, como "coque del peno de abertura", etc.

Durante la formación del coque se obtienen varios productos de gran valor comercial; los productos más valiosos son el gas combustible, con un poder calorífico de 4.900 K cal/m^3 , el alquitran y los aceites ligeros, contienen benceno, tolueno, xileno y naftaleno, amoniaco, fenoles, etc.

Un análisis típico para este combustible está dado en la tabla I.

La turba representa una etapa de la metamorfosis de la materia vegetal en carbón, es originado como producto de la descomposición y desintegración parcial de plantas de pantanos en ausencia de aire.

Fisicamente, es un residuo pardo oscuro que posee de 85 a 95 % de humedad, pero se reduce del 10 % al 55 % cuando se utiliza como combustible comercial.

TABLA I
ANALISIS TIPICO PARA ALGUNOS TIPOS DE COQUE

CLASES DE PROCESO	BASE "TAL COMO SE RECIBE"									PODER CALORI- FICO SUPERIOR BTU / lb
	ANALISIS INMEDIATO %				ANALISIS ELEMENTAL %					
	HUMEDAD	MATERIA VOLATIL	CARBONO FIJO	CENIZA*	HIDROGE NO	CARBONO	NITROGE NO	OXIGENO	AZUFRE	
Coque elaborado con subproductos	0.4	1.0	89.6	9.0	0.7	87.7	1.5	0.1	1.0	13.200
Coque de colmena	0.5	1.2	88.8	9.5	0.7	87.5	1.1	0.2	1.0	13.100
Coque de baja temperatura	0.9	9.6	80.3	9.2	3.1	81.0	1.9	2.8	1.0	12.890
Coque de alquitrán	0.3	1.1	97.6	1.0	0.6	96.6	0.7	0.6	0.5	14.100
Coque de petróleo	1.1	7.0	90.7	1.2	3.3	90.8	0.8	3.1	0.8	15.050

* La ceniza forma parte del análisis inmediato como del elemental.
FUENTE: Ref. 9.-

Un análisis típico de turba secada al aire es: humedad 25.4 %, materia volátil 48,5 %, carbono fijo 21.3%, azufre 0.25 %, poder calorífico superior 3910 K cal/Kg. De este combustible se puede producir gas de gasógeno, de alumbrado y también varios subproductos valiosos.

Un análisis de diversas clases de turbas se dan en la tabla II.

Lo que resta de esta sección, estará dedicada a describir los combustibles sólidos biomásicos - con sus propiedades físicas y químicas que serán necesarias conocer para hacer la elección del tipo de combustible a utilizar en el proceso de gasificación propuestos; además ésta información es fundamental en los cálculos de diseño del gasificador previamente seleccionado así como también para poder determinar el balance energético de la instalación.

Cabe añadir, que en parte, el éxito en el diseño de gasificadores radica en el claro entendimiento de las propiedades y del comportamiento térmico del combustible biomásico elegido.

TABLA II
ANALISIS DE ALGUNAS VARIETADES DE TURBA SECADA AL AIRE

CLASE DE TURBA	ELEMENTOS CONSTITUTIVOS POR CIENTO			POTENCIA CALORIFICA ALTA CALORIA POR Kg.	
	AGUA	CENIZA	AZUFRE	SECADA AL AIRE	LIBRE DE AGUA
Parda fibrosa	7.50	6.55	0.28	5.050	5.570
Parda clara fibrosa	11.64	4.06	0.22	5.046	5.710
Parda oscura	12.70	4.12	0.24	4.772	5.166
Parda sin estructura	6.06	17.92	0.88	4.415	4.700
Parda	9.63	7.93	0.16	4.367	4.882
De pantano salino	13.50	12.64	1.94	4.056	4.761
Negra	6.62	24.14	1.01	3.992	4.275

FUENTE: Ref. A.S.T.M.

A continuación se trata de clasificar los combustibles de acuerdo a las propiedades que más influyen en el proceso de gasificación.

Entre las propiedades físicas encontramos:

1. Contenido de humedad
2. Tamaño y distribución de tamaño del combustible.
3. Forma del combustible
4. Densidad aparente

De inmediato se hablará con algún detalle acerca de las propiedades anteriormente señaladas:

CONTENIDO DE HUMEDAD DEL COMBUSTIBLE

El contenido de humedad de la mayor parte de los combustibles biomásicos dependen de su origen, tipo de combustible y procesamiento al que es sometido antes de ser usado como combustible en el gasificador. Al hablar de humedad de la biomasa podemos hacer mención a tres categorías que son:

1. Humedad de saturación o inherente: Es el contenido

de humedad que el sólido posee cuando está en equilibrio con una atmósfera de 96 - 97 % de humedad relativa. Esta humedad se encuentra en los intersticios del sólido biomásico.

2. Humedad superficial: se refiere a la humedad presente en la superficie del sólido biomásico y se encuentra por encima de la humedad de saturación.
3. Humedad de descomposición: es la humedad formada por los compuestos orgánicos del combustible al descomponerse por calor; se requieren temperaturas de 200 - 225° C, las cuales se encuentran muy por encima de la temperatura necesaria para eliminar la humedad de saturación y superficial.

Cabe indicar en esta parte, que el valor registrado en la literatura técnica, se refiere generalmente a la suma de la humedad inherente y la superficial. Las tablas III y IV, presentan valores promedio del contenido de humedad de combustibles fósiles y biomásicos de uso común:

Estos datos deben servir como una simple guía, ya

TABLA III
CONTENIDO DE HUMEDAD EN COMBUSTIBLES FOSILES

C O M B U S T I B L E	CONTENIDO DE HUMEDAD %PESO HUMEDO	
Carbón mineral, secado al aire		
Lignito	45	
Sub-bituminoso C	30	
Sub-bituminoso B	25	
Sub-bituminoso A	17	
Bituminoso C, alto contenido volátiles	17	
Bituminoso B, alto contenido volátiles	10	
Bituminoso A, alto contenido volátiles	4	
Bituminoso de contenido intermedio volátiles	5	
Bituminoso bajo contenido volátiles	4	
Semiantracita	3	
Metaantracita carbonizada	5	
Carbón bituminoso carbonizado	-	
Turba de Finlandia, promedio	40	70
Turba en polvo 40 - 50 % humedad	-	
en base seca		
Turba en tarugos, 30-40 % humedad, base seca	-	
Briquetas de Turba, 10 - 15 % humedad, base seca	-	
Pelets de turba 10 - 20 % humedad, base seca	-	
30 - 40 % humedad, base seca	-	
Gasolina	-	
Diesel	-	

FUENTE: Ref. 10.

TABLA IV
CONTENIDO DE HUMEDAD EN COMBUSTIBLES NO FOSILES

COMBUSTIBLE	CONTENIDO DE HUMEDAD %	
	PESO	HUMEDO
Paja de semilla de alfalfa seca al aire	8	
Cáscara de almendra seca al aire	7	
Paja de cebada	8 - 20	
Paja de col	-	
Cascabillo de café	70	
Olotes (tusas) de maíz	8 - 20	
Tallos de maíz	8 - 20	
Desperdicios de desmotadora de algodón	20	
Tallos de algodón	25 - 45	
Paja de lino,colectado del suelo	-	
Residuos fulfural	50	
Pepitas de aceitunas secas al aire	10	
Cáscaras de maní,secas al aire	-	
Pepitas de melocotón,secas al aire	11	
Pepitas de ciruelas,secas al aire	8	
Cascabillo de arroz	-	
Cáscaras de girasol,tipo aceite	-	
Tallos de girasol,crecidos en invernadero	-	
Aguas residuales compostadas,22% inorgánico	-	
Aguas residuales y fragmentos de madera compostados 14% inorgánicos	-	
Pajas de alazor en cubos	9	
Cáscara de nuez, fragmentada	7 - 10	
Cáscara de nuez,(6 mm.pelets)	7 - 10	
Cascabillo de nuez	25 - 45	
Paja de trigo con 50 % de tallos de maíz	8 - 20	
Paja de trigo	-	
Promedio de madera	-	
Corteza de pino	40 - 60	
Pino,acabado de cortar	40	
Abeto, acabado de cortar	37	
Abeto, de estación	15 - 20	
Abeto, secado en horno	8	
Haya acabada de cortar	40	

Viene..... Tabla IV

Abedul, acabado de cortar	31
Roble, acabado de cortar	35
Carbón de madera, mezclado con madera forestal	
Madera Yarura, Guinea Inglesa	-
Madera Dura Inglesa, retorta estacionaria	-
Madera Dura Japonesa	-
Nuez de Palma Japonesa	-
Carbón de madera promedio	2 - 10

FUENTE : Ref. 10.

que estos valores no son representativos porque dependen, como se dijo anteriormente, de la ubicación de procedencia así como de los métodos de procesamiento de secado previo. Por ejemplo, en la mayoría de las zonas húmedas, la biomasa secada al aire difícilmente será menor al 20 %, mientras que en zonas áridas, no es raro encontrar contenidos de humedad menor al 10 %.

Es recomendable usar combustibles de bajo contenido de humedad, ya que las pérdidas de energía por evaporación del agua es elevada y no es recuperable en los casos prácticos. Las pérdidas asociadas con la evaporación de la humedad inherente más superficial se da en la figura N° 2.2.

El límite teórico del contenido de humedad (88 %) de la celulosa ($C_6 H_{10} O_5$) a la cual la reacción de combustión deja de ser auto-soportante, se indica en la figura N° 2.3. Lógicamente, en la práctica dicho límite es mucho más bajo. Un ejemplo: el contenido máximo de humedad de combustibles ligno - celulosicos tales como residuos agrícolas y madera con un poder calorífico de 18.6 k J/kg en base seca , es de 70 %(Ref. 10).



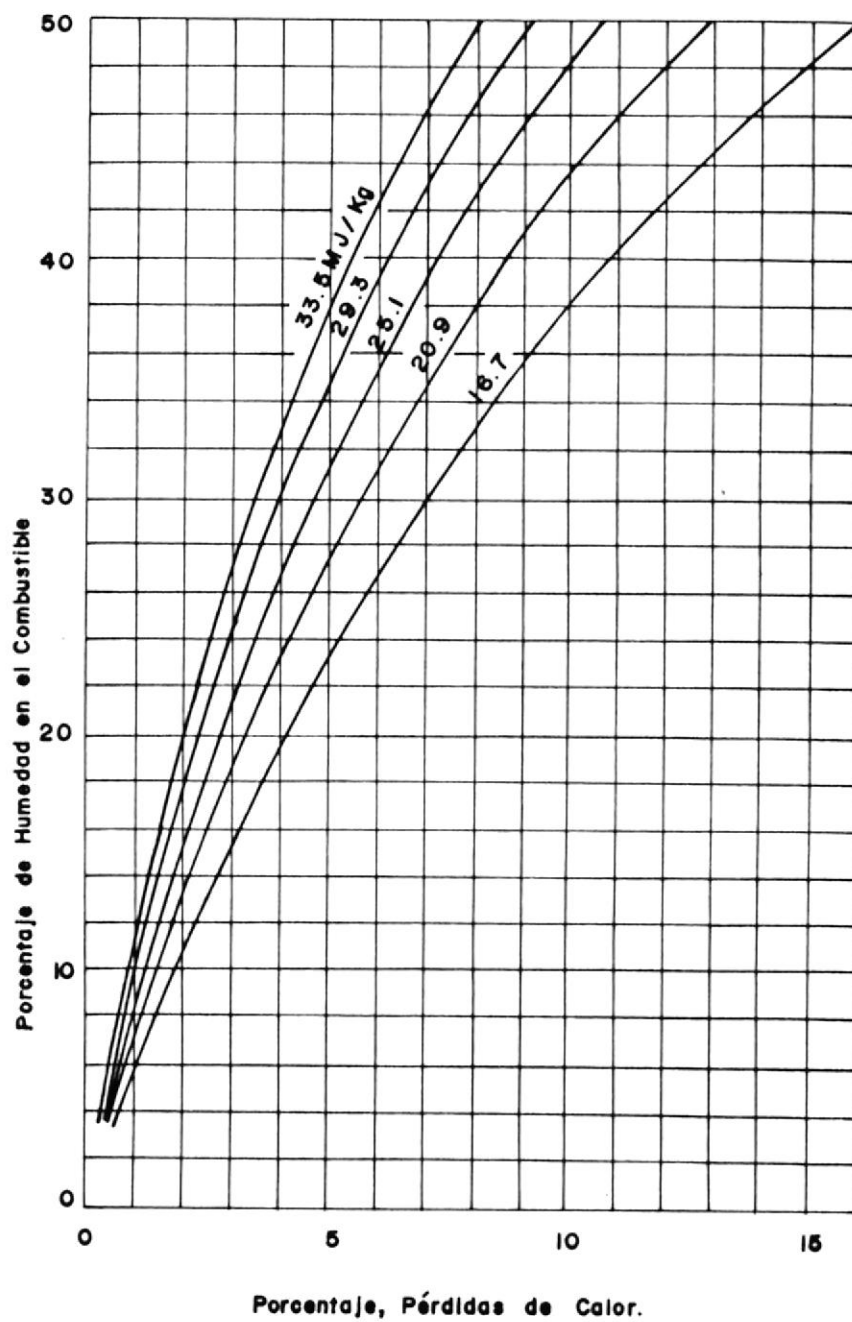


FIGURA 2-2.- CONTENIDO DE HUMEDAD Vs PERDIDAS DE CALOR PARA COMBUSTIBLES CON VARIOS PODERES CALORIFICOS SUPERIORES.

FUENTE: REF. 10

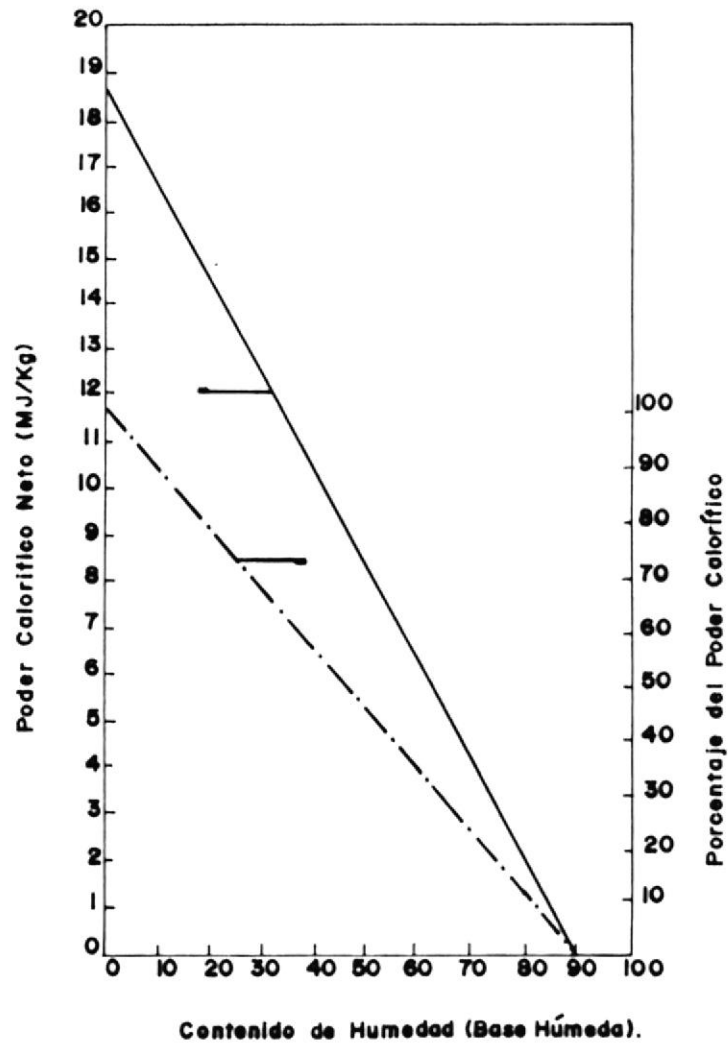


FIGURA 2-3.- PODER CALORIFICO NETO DE LA CELULOSA COMO UNA FUNCION DEL CONTENIDO DE HUMEDAD.

FUENTE: REF. 10

El encendido del combustible, por otro lado, se hace más difícil y además, factor muy importante, disminuye notablemente la producción y calidad (composición) del gas pobre.

La variación de la composición del gas y otras propiedades en función del contenido de humedad, están dadas en las figuras N^o2.4 y 2.5. Estas figuras, muestran las tendencias hacia la disminución de la producción del gas, poder calorífico, entre otras propiedades, con el incremento del contenido de humedad.

Es de interés anotar en este punto la influencia del comportamiento higroscópico del combustible biomásico en el contenido de humedad. Por ejemplo, en el carbón de leña, cuya capacidad de almacenar agua es notoria, el contenido de humedad aumenta rápidamente con la humedad ambiental tal como lo muestra la figura N^o 2.6.

La gran mayoría de la información disponible al respecto indican, que un contenido de humedad entre 10 - 20 % en peso es aconsejable para una operación rentable y sin mayores problemas.

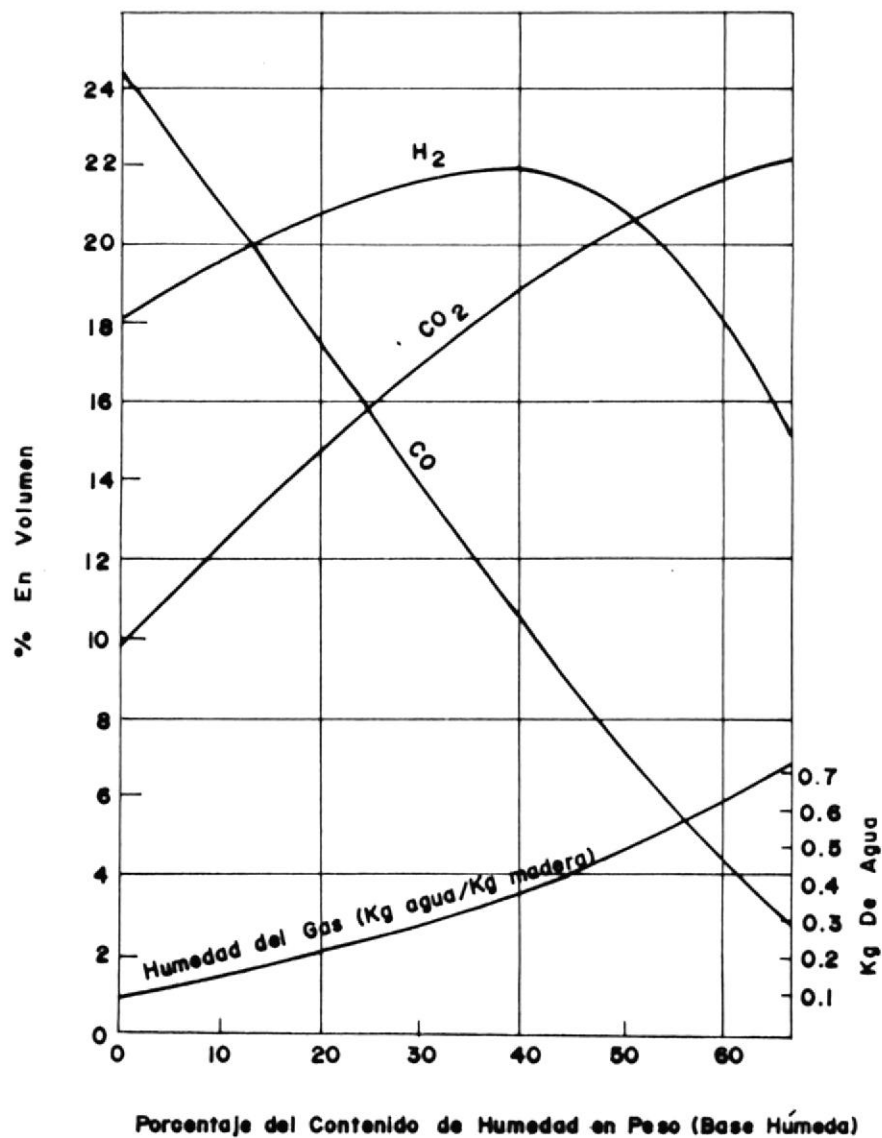


FIGURA 2-4.- COMPOSICION DEL GAS POBRE COMO UNA FUNCION DEL CONTENIDO DE HUMEDAD.

FUENTE: REF. 10

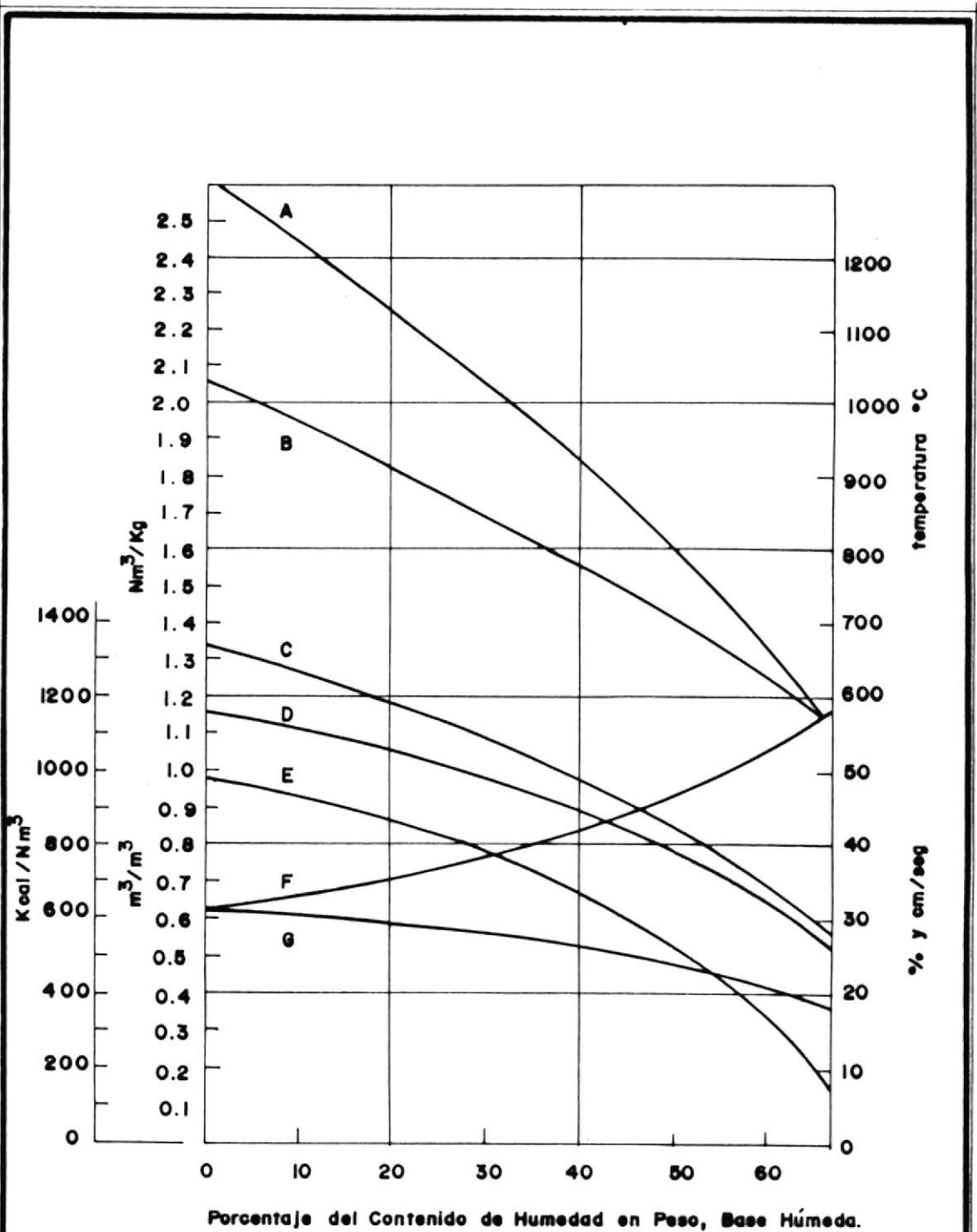


FIGURA 2-5.- PROPIEDADES DEL GAS POBRE COMO UNA FUNCION DEL CONTENIDO DE HUMEDAD.

- | | |
|---|---|
| A Producción de gas, Nm^3/Kg base húmeda | B Temperatura de reacción teórica, $^\circ\text{C}$. |
| C Poder Calorífico inferior, Kcal/Nm^3 | D Relación teórica Aire/gas, $\frac{\text{m}^3 \text{ aire}}{\text{m}^3 \text{ gas}}$ |
| E Velocidad de llama máxima, cm/seg . | F Pérdida de Potencia teórica en un motor, % |
| G Poder calorífico de la mezcla Gas-Aire a 0°C y 1 ATM, Kcal/Nm^3 . | FUENTE: REF. 10 |

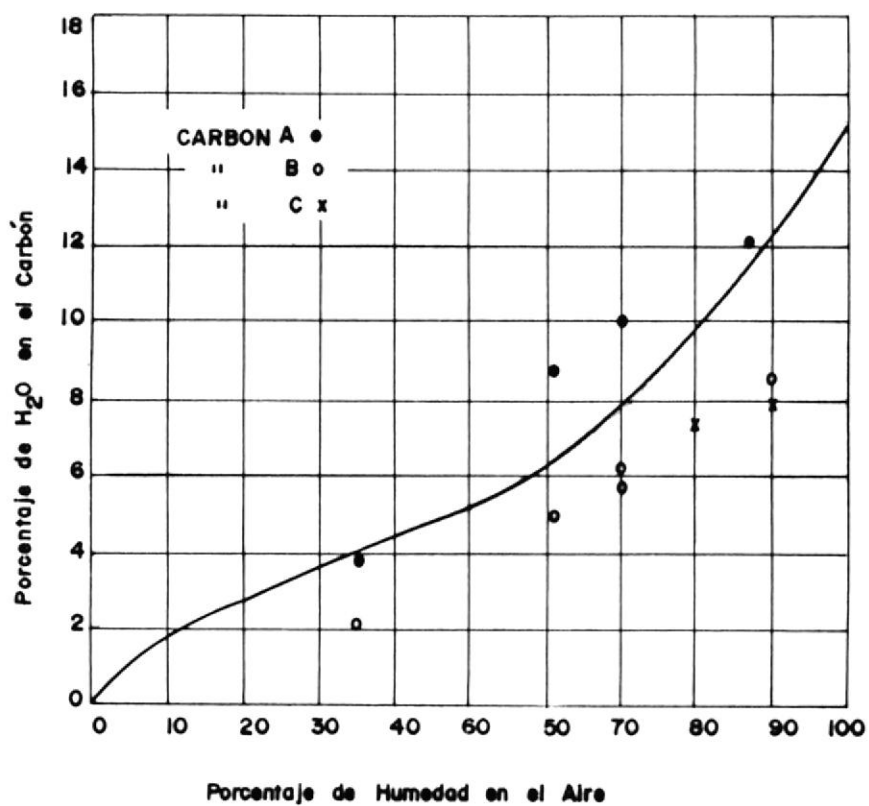


FIGURA 2-6.- VARIACION EN EL CONTENIDO DE HUMEDAD DEL CARBON CON RESPECTO A LA HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE.

FUENTE: REF. 10

En ocasiones podría darse el caso de utilizar combustible demasiado seco, dando lugar al recalentamiento del gasificador, razón por la cual en esta situación recomienda usar inyección de aire húmedo para compensar el bajo contenido de humedad del combustible y proteger de cierto modo la integridad del aparato.

TAMAÑO Y SU DISTRIBUCION

El tamaño de las partículas del combustible influye sobre la caída de presión a través del gasificador.

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

Se ha demostrado y confirmado experimentalmente - que la relación entre el tamaño de partículas - (su mayor dimensión) y el área transversal mínima -

(plato de estrangulamiento) deberá tener por lo menos un valor de 6.8 para evitar canalización de partículas, ya que esta ocasiona la formación de escoria.

Una basta experiencia con unidades estacionarias (15 - 75 kw) alimentadas principalmente con madera y carbón de leña, ha permitido establecer sugerencias para el tamaño de partículas de combustibles. En la tabla V, se relaciona el tamaño de partículas con el gasificador.

En cuanto a la variación de tamaño se refiere, esta debe ser lo más pequeña posible. Una gasificación confiable y sin mayores problemas puede obtenerse a través de un lecho de tamaño uniforme, ya que si la variación de tamaño es grande, el chorro de aire y gas se forzan a pasar a lo largo de una cama no uniforme y como resultado de aquello se generan puntos calientes y fríos que dan origen a la formación de canales de clinker.

La figura N° 2.7., ilustra en un solo esquema la configuración de un combustible para gasificación.

TABLA V
TAMAÑO DEL COMBUSTIBLE RECOMENDADO PARA GASIFICADORES PEQUEÑOS
(15 - 75 kw)

P L A N T A	C O M B U S T I B L E	TAMAÑO PARTICULAS(mm)
Malbay	Coque de baja temperatura, antracita	10 - 25
Wisco	Carbón vegetal, coque de turba, coque de baja temperatura	20 - 40 15
Gohin Poulence	Carbón vegetal	15 - 22
	Antracita	5 - 15
Brandt	Madera	80 x 40 x 40
Koala	Carbón de leña	10 x 20
	Coque de baja temperatura	10 - 15
UCD Gasificador de laboratorio	madera	20 - 40 cubos
	cubos duros de tallos de maíz, alfalfa, paja de trigo	20 x 30 x 50
	Pelets duros de cáscara de arroz	mayores que 10
	Tusas (Olote) de maíz martilladas	40
	Pepas de frutas	15 - 30
Imbert	Madera de abedul	60 - 80, longitud 50 - 60, diámetro
	Roble	20 x 40 x 60
Gasificadores suecos 1939-45	Leños serruchados y cortados	
	bloques gruesos	8 cm x 25 cm ²
	bloques finos	6 cm x 20 cm ²
	cilindros	8-9 cm, 25-75 dia.
	tiras	6 cm., 25-50 dia.
	Carbón vegetal tamaño grande	10 - 60
	carbón vegetal tamaño fino	10 - 30

FUENTE: Ref. 10.

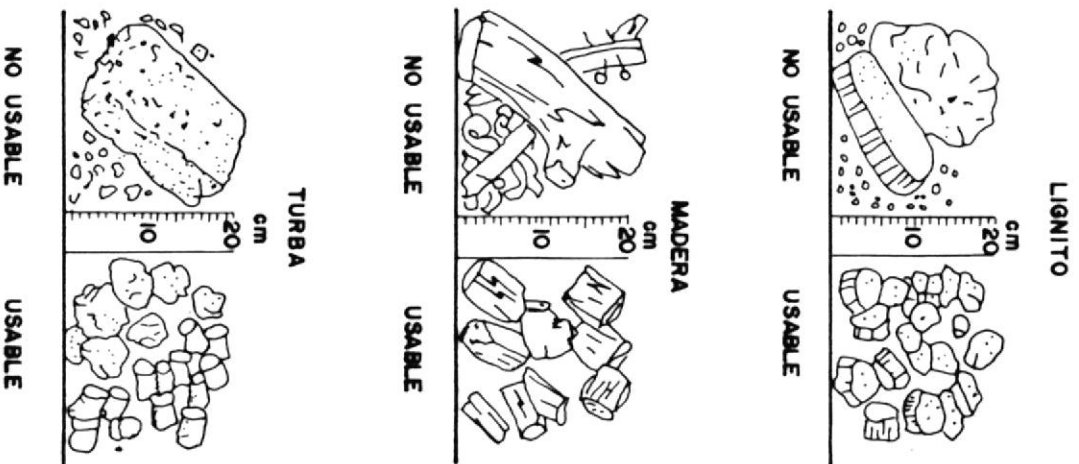


FIGURA 2-7.- TAMAÑO APROPIADO DE COMBUSTIBLES PARA GASIFICADORES.
FUENTE: REF. 10



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FORMA DEL COMBUSTIBLE

La forma que tiene el combustible que se gasifica tiene influencia sobre la rentabilidad del sistema.

La densificación de la biomasa (llamada también compactación) permite proveer de un material más homogéneo y en cierto grado más manejable desde el punto de vista de gasificación.

Los principales tipos de densificación son:

1. Cubicación
2. Briquetaje
3. Pelletización

La cubicación es una compactación simple, por medio de presiones moderadas. El proceso de briquetaje utiliza presiones medias, del orden de 10 a.t.m. y - el pelletizaje requiere presiones del orden de 100 a.t.m., que ya son elevadas, con la ayuda de un aglomerante apropiado en ciertos casos.

Uno de los principales objetivos por el cual se re

curre a esta técnica, es que el contenido energético volumétrico específico en MJ/m^3 es mucho más elevado en comparación con el que posee la materia prima original a partir de la cual se formó.

DENSIDAD APARENTE

La densidad aparente se la define como el peso por unidad de volumen del combustible en trozos. Esta propiedad varía de acuerdo con la densidad específica, su distribución de tamaño, contenido de humedad y forma.

La densidad aparente influye en forma significativa sobre la capacidad de almacenamiento del gasificador. Es por ello que el volumen ocupado por el combustible almacenado depende no solamente de la densidad específica de las partículas de combustible, sino que también del tamaño y si el combustible se encuentra suelto o compacto.

La tabla N° VI, indica el promedio de la densidad aparente de los combustibles biomásicos más usados en gasificación.

TABLA VI

DENSIDAD APARENTE DE VARIOS COMBUSTIBLES

COMBUSTIBLE	F O R M A	DENSIDAD APARENTE kg/m ³
Aserrín	suelto	177
Aserrín	briquetas 100 mm largo 75 mm diám.	555
Turba	polvo	350-440
	briquetas 45x65x60mm. cortadas manualmente	550-620 180-400
Carbón vegetal (10% de contenido de humedad)	haya	210-230
	abedul	180-200
	bloques de madera suave	150-170
	tablas de madera suave	130-150
	mezcla 60% dura/40%suave	170-190
Madera	tamaños como en tabla 16	
	madera dura	330
	madera suave	250
	mezcla 50/50	290
Paja	suelta	80
	fardos	320
Paja semilla de alfalfa	cubos 30x30x50mm7% humedad	298
Paja de cebada	cubos 30x30x50mm7% humedad	300
Paja de frijol	cubos 30x30x50mm7% humedad	440
Olotes de maíz	11% humedad	304
Tallos de maíz	cubos 30x30x50 mm	391
Desperdicios de desmon- tadora de algodón	23% humedad	343
Pepitas de melocotón	11% humedad	474
Pepitas de aceituna	20% humedad	567
Pepitas de ciruela	8% humedad	514
Cáscara de arroz	cubos 30x30x50 mm	679
Paja de alazor	cubos 30x30x50 mm	203
Cáscaras de nuez	fraccionada	336
	pellets de 8 mm.	599
Madera, bloques	17% humedad	256
fragmentos	10% humedad	167
Carbón	antracita	830 - 900
	bituminoso	770 - 930
Coque	duro	380 - 530
	suave	360 - 470
Carbón café	terrones secos al aire	650 - 780

FUENTE: Ref. 10.-

La densidad aparente tiene un gran impacto sobre la calidad del gas pobre producido ya que influye en el tiempo de residencia del combustible en el crisol, la densidad de la cama del combustible y la tasa del flujo de gas.

El tiempo de residencia determina la extensión de las reacciones de combustión parcial y reducción. Esto se establece por el grado al cual el estado de equilibrio se alcanza a una cierta temperatura. Un tiempo de residencia muy corto produce una reacción del CO_2 a CO incompleta, una calidad pobre del gas y demasiado carbón sin quemar en la ceniza; en cambio un tiempo de residencia demasiado largo, aumenta la formación de escoria.(Ref.10).

La figura N° 2.8., relaciona el tiempo de residencia con la razón de consumo de combustible para varias densidades aparentes (datos tomados en el laboratorio de gasificación de la Universidad de California).

Las propiedades químicas que influyen en el proceso de gasificación son:

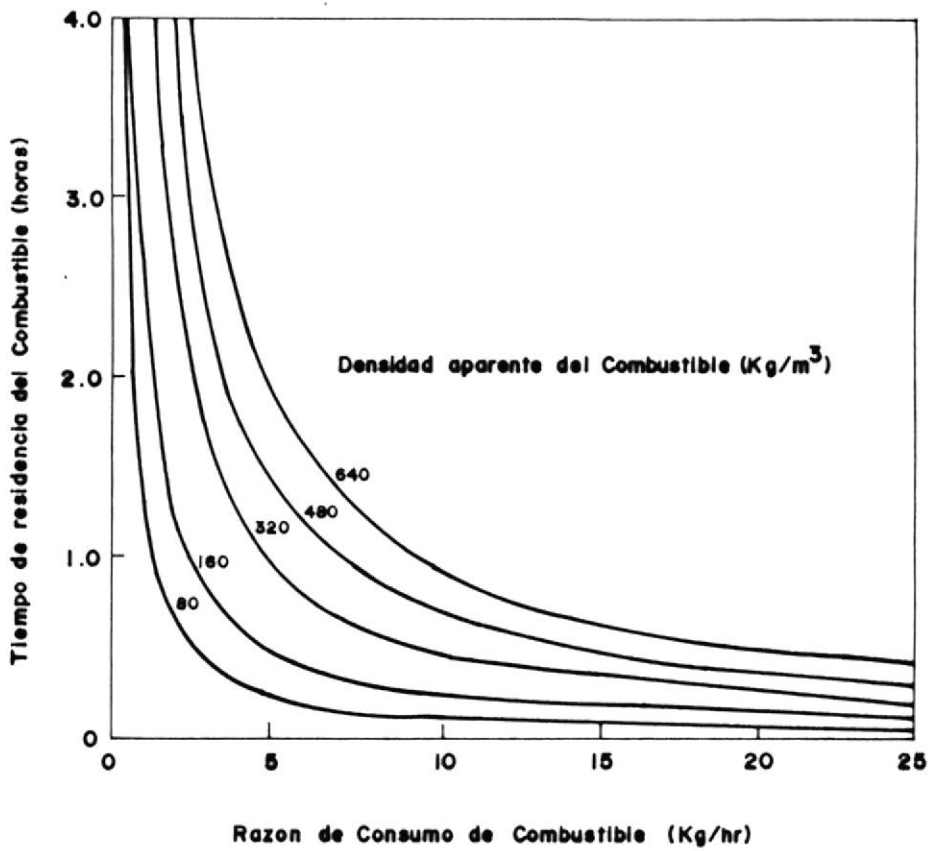


FIGURA 2-8.- RAZON DE CONSUMO DE COMBUSTIBLE VS TIEMPO DE RESIDENCIA
(PARA VARIAS DENSIDADES APARENTES).

FUENTE: REF. 10

1. Poder calorífico del combustible
2. Contenido de materia volátil y carbono fijo
3. Contenido, composición y temperatura de fusión de cenizas.
4. Análisis último del combustible.

PODER CALORIFICO

Generalmente, el poder calorífico de un combustible se lo halla utilizando un calorímetro de bomba que opera a volumen constante y adiabáticamente. Este valor, es el P.C.S., ya que incluye el calor latente de condensación del agua que se forma en la combustión.

El P.C.S., del combustible también se reporta sobre base seca. En cualquier caso, esto no representa la energía realmente disponible para el gasificador, ya que el proceso químico que ocurre en el gasificador se aproxima a uno de presión constante; además se requiere energía para evaporar el agua la cual no es recuperable en este caso. Esto quiere decir, que la energía que se puede extraer del combustible es menor que los valores reportados de poder calorífico, por lo tanto para evitar serios errores en el dimensionamiento y evalua

ción económica del gasificador, debe utilizarse para tales fines el poder calorífico neto o inferior.

El poder calorífico superior de los ligno celulósicos puede ser calculado por la siguiente fórmula: (Ref.10)

$$PCS_{\text{BASE SECA}} \text{ (kJ/kg)} = 479 C + 668 H + 59 O - 1208 S - 8420$$

Donde:

C, H, O, S representan los porcentajes gravimétricos de carbono, hidrógeno, oxígeno y azufre, respectivamente.

Así por ejemplo, la celulosa cuya fórmula química es del tipo $C_6 H_{10} O_5$ y que contiene en peso 44.4% de C, 6.2% de H y 49.4 % de O, tiene un P.C.S. de aproximadamente 20 MJ/kg en base seca. Como referencia, la madera se considera normalmente de 50% C, 6% H y 44% O.

Por otro lado, si todo el hidrógeno se combina con el

oxígeno en el proceso de combustión/gasificación en aire produciendo agua, se producirá un total de 0.56 kg de agua por cada kg de $C_6H_{10}O_5$ cuya evaporación necesita de 1.3 MJ por cada kg de $C_6H_{10}O_5$. Esto nos da un P.C.I. en base seca de 18.7 MJ/kg. (esto es para celulosa en base seca).

Es de interés anotar, la influencia que tiene la humedad del combustible sobre su poder calorífico disminuyendo su valor a medida que aumenta su humedad ya que por un lado se requiere evaporar agua contenida en los poros del sólido y por otro lado se reduce la cantidad efectiva de biomasa. Así por ejemplo, si se tiene 1 kg de biomasa con 10 % de humedad, esta tendrá 0.90 kg. de fibra y 0.10 kg de agua.

En general entonces, el poder calorífico de la biomasa en base húmeda será:

$$(PCI)_{\text{BASE HUMEDA}} = (PCI)_{\text{BASE SECA}} \times \left(\frac{\% \text{ fibra}}{100} \right) - \text{calor latente de}$$

$$\text{evaporación del agua} \times \frac{\% \text{ humedad}}{100}$$

Expresando la fórmula anterior en función de la humedad, nos queda:

$$(PCI)_{BH} = (PCI)_{B.S} \times \left(1 - \frac{\% \text{ humedad}}{100}\right) - 2.26 \times \frac{\% \text{ humedad}}{100}$$

$$- \left(\frac{MJ}{K_S}\right)_{BH}$$

Los poderes caloríficos superiores para un grupo - seleccionado de combustibles fósiles y no fósiles (biomásicos) se dan en las tablas VII y VIII, respectivamente.

CONTENIDO DE MATERIA VOLATIL

La producción de materia volátil de los combustibles lignocelulósicos es elevada. Esta propiedad se la determina colocando una muestra dentro de un horno especial. La muestra se somete a temperaturas de hasta 600° C y se determina luego de cierto tiempo la pérdida de peso en atmósfera - inerte. Como datos generales, la madera y residuos agrícolas poseen de 60 a 80 %. Para carbón mineral el rango es más amplio, esto es de 1 a 45%, dependiendo del tipo de carbón, y para carbón ve

TABLA VII

PODER CALORIFICO SUPERIOR DE COMBUSTIBLES FOSILES

C O M B U S T I B L E	P.C.S. PROMEDIO MJ/Kg BASE SECA
Carbón mineral, secado al aire	
Lignito	19.7
Sub-bituminoso C	22.1
Sub-bituminoso B	25.6
Sub-bituminoso A	30.2
Bituminoso C, alto contenido volátiles	30.2
Bituminoso B, alto contenido Volátiles	32.6
Bituminoso A, alto contenido volátiles	33.7
Bituminoso de contenido intermedio volátiles	34.8
Bituminoso bajo contenido volátiles	36.0
Semiantracita	34.9
Metaantracita carbonizada	31.4
Carbón bituminoso carbonizado	28.1
Turba de Finlandia, promedio	22.5
Turba en polvo 40-50% humedad en base seca	7.5 - 12
Turba en tarugos, 30-40% humedad, base seca	11 - 14
Briquetas de turba; 10-15% humedad, base seca	17 - 18.5
Pelets de turba 10-20% humedad, base seca	16.8 - 18.9
30-40% humedad, base seca	12.6 - 14.7
Gasolina	43.6
*Diesel	45

FUENTE: Ref. 10.-

TABLA VIII
PODER CALORIFICO SUPERIOR DE COMBUSTIBLES NO FOSILES

COMBUSTIBLE	PROMEDIO MAS ELEVADO VALOR CALORIFICO MJ/Kg BASE SECA
Paja de semilla de alfalfa, seca al aire	18.4
Cáscara de almendra,seca al aire	19.4
Paja de Cebada	17.3
Paja de col	14.6
Cascabillo de café	28.8
Olotes (tusas) de maíz	18.9
Tallos de maíz	18.3
Desperdicios de desmotadora de algodón	16.4
Tallos de algodón	15.8
Paja de lino, colectado del suelo	20.0
Residuos fulfural	20
Pepitas de aceitunas secas al aire	21.4
Cáscaras de maní, secas al aire	19.7
Pepitas de melocotón, secas al aire	23.0
Pepitas de ciruelas, secas al aire	23.3
Cascabillo de arroz	15.0
Cáscaras de girasol, tipo aceite	20.0
Tallos de girasol, crecidos en invernadero	21.0
Aguas residuales compostadas, 22% inorgánico	9.9
Aguas residuales y fragmentos de madera compostados, 14% inorgánicos	15.2
Pajas de alazor en cubos	19.5
Cáscara de nuez, fragmentada	21.1
Cascabillo de nuez	----
Paja de trigo con 50 % de tallos de maíz	16.9
Paja de trigo	18.9
Promedio de madera	20.2
Corteza de pino	21
Pino, acabado de cortar	19.9
Abeto acabado de cortar	11.4*
Abeto, de estación	14.9*

Viene Tabla VIII.....

Abeto secado en horno	17.8*
Haya, acabada de cortar	19
Abedul, acabado de cortar	19
Roble, acabado de cortar	18.3
Carbón de madera, mezclado con madera forestal	
Madera Yarura, Guinea Inglesa	30.1
Madera dura Inglesa, retorta estacionaria	32.2
Madera Dura Japonesa	31.9
Nuez de Palma Japonesa	32
Carbón de madera promedio	29

*A base húmeda , valor calorífico neto.-

getal dicho valor varía entre 3 - 30 %, dependiendo principalmente del proceso de fabricación.(Ref.10) ←

La formación de volátiles y la composición de los mismos dependen por un lado de factores térmicos como temperatura en la caja de fuego o crisol y rapidez de calentamiento; por otro lado, influye su composición lignocelulósica, esto es, su contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina.

La formula del carbono fijo es:

$$\% \text{ CARBONO FIJO (CF)} = 100 - (\% \text{ Humedad} + \% \text{ cenizas} + \% \text{ volátiles}).$$

Puede decirse que el contenido en Lignina influye la contextura del carbono fijo (remanente carbonizado), mientras que los porcentajes de celulosa y hemicelulosa influyen sobre la formación de volátiles.(Ref.10)

La tabla IX, muestra el contenido del material - volátil de combustibles usados comunmente en gasificación.

TABLA IX
MATERIAL VOLATIL DE COMBUSTIBLES PARA GASIFICACION

COMBUSTIBLE	MATERIAL VOLATIL % PESO
Residuos de cultivos	63 - 80
Madera	72 - 78
Turba	70
Carbón:	
- lignita	40
- sub-bituminoso A,B,C	45
- bituminoso altamente volátil	40 - 45
- bituminoso con poco volátil	20 - 30
- semiantracita	8
- antracita	5
- meta antracita	2 - 3
Carbón Vegetal	3 - 30 y más dependiendo fuertemente de la fa bricación.

FUENTE: Ref.10.-

CENIZAS

El contenido mineral en el combustible que permanece en forma oxidada después de la combustión, se le denomina ceniza.

En la práctica, la ceniza producida en un gasificador contiene también combustible sin quemarse en forma de carbón.

El contenido y composición de la ceniza son parámetros que influyen en el buen funcionamiento del gasificador.

El contenido de ceniza de los principales residuos lignocelulósicos fluctúa entre 0.1 - 20 %, lo que es mostrado a través de la tabla X.

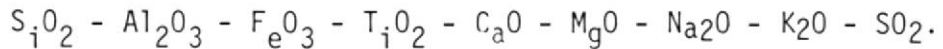
Es de gran importancia en el proceso de gasificación la temperatura de fusión de la ceniza; esta temperatura depende de la composición de la misma. De acuerdo con la referencia 10, el 95 % del material mineral está formado por óxidos minerales del sistema:

TABLA X

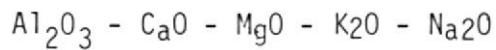
CONTENIDO DE CENIZA EN LOS COMBUSTIBLES PARA GASIFICACION

COMBUSTIBLE	%PESO CENIZA BASES SECAS	COMBUSTIBLE	%PESO CENIZA BASES SECAS
Paja de semilla de <u>al</u> falfa, cubos.	6.0	árboles de cirue <u>e</u> la municipales.	3.0
Cáscara de almendra	4.8	pepitas de aceitu <u>n</u> na.	3.2
Mezcla paja de cebada	10.3	pepitas de meloco <u>n</u> tón.	0.9
Paja de frijol	10.2	cáscara de maní	1.5
Carbón vegetal	2-5	turba(promedio)	1.6
Cascabillo de café	1.3	bloques de madera de abeto Douglas	0.2
Carbón	5-17	pepitas de ciruela	0.5
Olotes de maíz	1.5	combustible derivado desechado.	10.4
Tallos de maíz	6.4	cascarilla de arroz	16-30
Desperdicios de desmontado <u>o</u> ra de algodón.	17.6	paja de alazor	6.0
Tallos de algodón en cubo	17.2	1/4"mezcla cáscara nuez peletizada.	5.8
Residuo furfural	12	paja de trigo y ta <u>n</u> llos de maíz	7.4
Residuos de madera de fa- bricación	0.3	leños de fragmentos de madera	0.1

FUENTE: Ref.10.-



En particular, para madera los principales componentes de la ceniza son:



Las cenizas pueden fundirse principalmente formando escoria, es decir si la temperatura en el crisol se eleva sobre el punto de fusión de la ceniza, la mezcla se fundirá y el material fundido fluirá, formando clinkers, que se adhieren a las superficies internas, toberas y parrilla. El flujo de combustible será obstruido lo que producirá un aumento en la relación aire- combustible y de la temperatura. El gas como consecuencia se empobrecerá y no podrá luego ser combustionado.

Un cuadro real del potencial de formación de escoria, se lo ha obtenido gracias a las pruebas llevadas a cabo en la Universidad de California; los resultados están dados en la tabla XI.

Un porcentaje de ceniza no mayor al 5 % es aceptado como límite en la operación de gasificación sin formación de escorias. Contenidos mayores al

TABLA XI
COMPORTAMIENTO DE LAS ESCORIAS EN RESIDUOS AGRICOLAS FORESTALES

COMBUSTIBLES FORMADORES DE ESCORIAS	% CENIZAS	GRADO DE ESCORIAS	COMBUSTIBLES NO FOR MADORES DE ESCORIÁS	% CENIZA
Mezcla paja de cebada	10.3	Severo	Semillas alfalfa	6.0
Paja de frijol	10.2	Severo	Cáscaras almendra	4.8
Tallos de maíz	6.4	Moderado	Olotos	1.5
Desperdicios de algodón	17.6	Severo	Pepitas aceituna	3.2
Tallos de algodón	17.2	Severo	Pepitas melocotón	0.9
Pellets RDF	10.4	Severo	Pepitas ciruela	0.5
Cáscara arroz peletizada	14.9	Severo	Cáscara nuez fragmentada	1.1
Paja de alazor	6.0	Menor	Bloques de madera de abeto Douglas	0.2
1/4"mezcla cáscaras de nuez peletizadas	5.8	Moderado	Arboles de ciruela municipales	3.0
Paja de trigo y tallos de maíz	7.5	Severo	Leños de fragmentos de madera	0.1
			Residuos manufactura de madera	0.3

FUENTE: Ref.10.

indicado, requieren que o por un lado se limite la temperatura del crisol a no más de 1.100°C , o que se instale un sistema de drenaje de escoria líquida.

ANALISIS ULTIMO DEL COMBUSTIBLE

Este análisis de tipo químico, constituye la principal herramienta para predecir principalmente dos cosas: la composición del gas y el balance de materia y energía del sistema.

Los combustibles con contenido de carbono total elevado, tienden a formar menos alquitrán en el gas final debido a la pequeña fracción de volátiles.

El poder calorífico del combustible está relacionado directamente con el carbono total del mismo.

2.1.4. Combustibles Gaseosos

Como se indica al inicio de la sección 2.1.1. , los combustibles independientemente de su fase - pueden ser primarios o secundarios.



Los combustibles gaseosos primarios son: el gas natural y los gases licuados de petróleo.

El gas natural está asociado con el petróleo crudo en un mismo pozo o puede hallarse solo en pozos de gas que en ocasiones están lejos de los pozos de petróleo debido a la filtración de gases a través de rocas porosas. El rango de composiciones del gas natural se muestran en la tabla XII, haciendo notar que dichas composiciones varían según la localización de la fuente de gas.

Existen dos tipos básicos de gas natural que son el gas seco y humedo. El primero de ellos proviene de un pozo de gas y está constituido principalmente por metano sin aceite o hidrocarburos más pesados, y al segundo que es separado del petróleo crudo en la parte superior del yacimiento, contiene componentes como pentanos, hexanos y gasolina natural.

Los gases licuados de petróleo son producidos a partir del petróleo crudo o del gas natural mediante procesos físicos. Están formados por mez

TABLA XII
COMPOSICION DEL GAS NATURAL (EN VOLUMEN)

METANO	CH ₄	70 - 90 %
ETANO	C ₂ H ₆	0 - 20 %
PROPANO	C ₃ H ₈	0 - 20 %
BUTANO	C ₄ H ₁₀	0 - 20 %
HIDROGENO	H ₂	-
BIOXIDO DE CARBONO	CO ₂	0 - 8 %
OXIGENO	O ₂	0 - 0.2%
NITROGENO	N ₂	0 - 5 %
SULFURO DE HIDROGENO	H ₂ S	0 - 5 %
GASES RAROS	A, He, Ne, Xe	Trazas

clas de propano, butano e isobutano principalmente.

Los más comerciales son el propano, butano y la mezcla de ambos.

Los combustibles gaseosos secundarios se los obtienen a partir del carbón o a partir de los distintos procesos de gasificación y que son: gas de gasógeno (producer gas), gas de agua (water - gas), gas de alto horno (blast-furnace gas) y gas de horno de coke (coke oven gas). La tabla XIII, nos muestra un análisis de dichos gases.

Una apreciable cantidad de carbono se convierte en gases y vapores cuando se produce coke. La parte no condensable de dichos gases se llama gas de horno de coke. Este gas es de facil - combustión debido a su alto contenido de hidrógeno libre, teniendo como principal problema la formación de depósitos.

El gas de alto horno es el producido en los altos hornos de acero y tiene sus principales - aplicaciones en hornos pequeños y en generadores de vapor. El contenido de CO es alto y su poder

TABLA XIII

ANÁLISIS DE COMBUSTIBLES GASEOSOS DERIVADOS DEL CARBÓN					
GAS N°		1	2	3	4
Análisis % volumen					
H ₂	Hidrógeno	47.9	2.4	34.0	14.0
CH ₄	Metano	33.9	0.1	15.5	3.0
C ₂ H ₄	Etileno	5.2	-	4.7	-
CO	Monóxido de carbono	6.1	23.3	32.0	27.0
CO ₂	Dióxido de carbono	2.6	14.4	4.3	4.5
N ₂	Nitrógeno	3.7	56.4	6.5	50.9
O ₂	Oxígeno	0.6		0.7	0.6
C ₆ H ₆	Benceno	-	-	2.3	-
H ₂ O	Agua	-	3.4	-	-
Gravedad específica (relativo al aire)		0.413	1.015	0.666	0.857
Poder calorífico alto (BTU/pie ³)					
a 60°F y 30" Hg		590	-	534	163
a 80°F y 30" Hg		-	83.8	-	-
FUENTE: Ref.1					

Gas N°

Tipo

1

Gas del coke

2

Gas de alto horno

3

Gas de agua

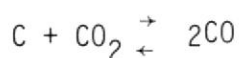
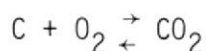
4

Gas pobre

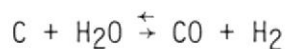
calorífico bajo. Este gas es descargado alrededor de 260° C con impurezas que causan depósitos.

En cuanto al proceso de gasificación motivo de esta tesis, creo conveniente indicar en este párrafo, algunas anotaciones preliminares acerca de dicho proceso, ya que en el siguiente capítulo se dará en mayor detalle la explicación de los procesos que en un gasificador ocurren.

En la gasificación de la biomasa ocurren dos tipos básicos de reacciones, la primera llamada reacción del gas de gasogeno y que se escribe como se indica a continuación:



La segunda es la reacción llamada del gas de agua:



Las plantas para obtener gas de gasógeno y de

agua trabajan generalmente a presión atmosférica y los gases producidos son de bajo poder calórico, razón por la cual este gas es llamado también "Gas pobre".

2.2. COMBUSTION: PRINCIPIOS

El proceso de combustión comprende un conjunto de reacciones de oxidación rápida de los componentes del combustible que pueden oxidarse, es decir, combinarse con el oxígeno, confinados a un espacio, globalmente exotérmicas y generalmente luminosas. Esta definición implica, que combustible se quema con oxígeno generando productos no oxidables liberando calor y emitiendo luz.

Combustible + Oxígeno → Productos no oxidables + Calor + Luz

En esta sección se presenta una breve revisión sobre ciertos aspectos del tema que serán utilizados más adelante cuando se hable del proceso de gasificación.

ESTEQUIOMETRIA DE LA COMBUSTION

Para que un combustible arda completamente es necesario que el carbono e hidrógeno contenidos en él, se transformen por reacción con el oxígeno, en anhídrido car

bónico y agua. La combustión se llamará incompleta, cuando la transformación de la que hablamos se realiza parcialmente, resultando en este caso como productos el monóxido y dióxido de carbono y parte del hidrógeno puede aparecer formando parte de hidrocarburos en el escape o en forma libre.

Un término utilizado muy a menudo es el de "aire teórico o estequiométrico" y es definido como la cantidad mínima de aire que suministra suficiente oxígeno para oxidar en forma completa al combustible.

En la práctica, es imposible efectuar una mezcla perfecta de los reactivos, siendo esta la razón por la cual hay que trabajar en combustión con cierto exceso de aire, siendo este valor función del grado potencial de mezcla, el cual a su vez depende principalmente del tipo de combustible.

Es por eso que la combustión de gases requiere menor exceso de aire con respecto a la combustión de sólidos, carbón por ejemplo.

La cantidad de aire realmente suministrada se expresa en términos del porcentaje del aire teórico. Así, 120% de aire teórico significa que la cantidad de aire que

realmente se suministra es 1.2 veces la cantidad de aire teórico, lo que equivale a 20 % de exceso de aire.

Otro término usado comunmente es la relación aire - com bustible (AF) pudiendo ser expresado en unidades molares de masa y volumen.

El aire, para fines de ingeniería se lo considera como una mezcla de nitrógeno y oxígeno en las siguientes - proporciones aproximadamente:

	% volumen	% peso
Nitrógeno	79	76.8
Oxígeno	21	23.2

Para la combustión, sólo el oxígeno tiene valor, siendo el nitrógeno un diluyente y además una carga térmica - que se calienta con la mezcla y abandona el sistema - llevándose energía.

La combinación del carbono y del hidrógeno de un com bustible con el oxígeno se expresa por las siguientes

ecuaciones:



Las ecuaciones (1) y (2), no solo muestran que sustancias toman parte en la reacción, sino también las proporciones en las que intervienen (estequiometría). Así de la ecuación (1) podemos decir que un átomo de carbono se combina con una molécula (2 átomos) de oxígeno para dar una molécula de dióxido de carbono (1 átomo de carbono y 2 átomos de oxígeno).

La cantidad de átomos a cada lado de la ecuación química debe ser la misma.

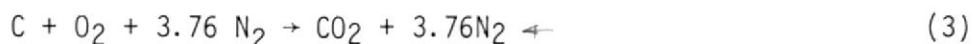
Todos los átomos de un mismo elemento se consideran como del mismo peso y los pesos relativos de los átomos de los diferentes elementos se conocen, considerando el peso del átomo de hidrógeno como la unidad.

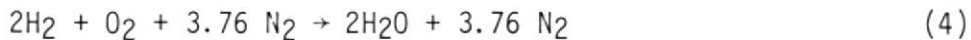
Se observa también de las ecuaciones (1) y (2) las proporciones en peso de las sustancias que forman parte de la reacción.

Por ejemplo, de la ecuación (2), puesto que el peso atómico del hidrógeno es la unidad, implica que $2 \times 2 = 4$ partes en peso de hidrógeno se combinan con $16 \times 2 = 32$ partes de oxígeno para dar $2 \times 2 + 2 \times 16 = 36$ partes en peso de agua.

Ecuaciones como las anteriores, también se usan para hallar los volúmenes relativos de los gases que forman parte en la reacción, ya que recordamos la Ley de Avogadro, "iguales volúmenes de gases diferentes a la misma temperatura y presión contienen igual número de moléculas. Así, la ecuación (1) indica que cuando se quema el carbono completamente, un volumen de oxígeno da origen a un volumen de dióxido de carbono.

Para propósitos prácticos, el aire puede considerarse formado por 21 % de O_2 y 79 % de N_2 en volumen, esto significa que un volumen de oxígeno en el aire está acompañado por $79/21 = 3.76$ volúmenes de nitrógeno, razón por la cual la fórmula práctica para el aire será $O_2 + 3.76 N_2$. Por esta razón, las ecuaciones (1) y (2) se escriben de la siguiente manera (cuando se utiliza aire que es lo más común):





De acuerdo con Avogadro, se puede concluir que los pesos moleculares de todos los gases expresados en las mismas unidades (gramos/mol, kilogramos/kilomol, libra/libra mol), ocupan volúmenes iguales.

Se ha hallado experimentalmente, que dentro de ciertos límites, el peso molecular de cualquier gas expresado así:

- a. Gramos, ocupa 22.4 litros a 0°C y 760 mm Hg.
- b. Libras, ocupa 359 pies cúbicos a 32°F y 39" Hg.

Estando en ambos casos el gas seco.

Para fines prácticos de combustión, se asume que todos los gases cumplen las leyes de los gases perfectos y se hace uso de la tabla XIV de pesos atómicos y moleculares.

Por último, es menester recordar que uno de los productos de la combustión de un hidrocarburo es el

TABLA XIV

PESOS ATOMICOS Y MOLECULARES DE LOS GASES

	SIMBOLO DE ELEMENTO	PESO ATOMICO	FORMULA DE LA MOLECULA	PESO MOLE CULAR(Aprox.)
HIDROGENO	H	1	H ₂	2
CARBONO	C	12	-	-
NITROGENO	N	14	N ₂	28
OXIGENO	O	16	O ₂	32
AZUFRE	S	32	-	-
VAPOR DE AGUA	-	-	H ₂ O	18
MONOXIDO DE CARBONO	-	-	CO	28
DIOXIDO DE CARBONO	-	-	CO ₂	44
DIOXIDO DE AZUFRE	-	-	SO ₂	64
METANO	-	-	CH ₄	16

agua. Si los productos se enfrían hasta la temperatura atmosférica normal, la mayor parte del agua formada se condensa, pero como el volumen ocupado por un componente líquido es despreciable comparado con el de un gas, se puede asumir para cálculos que el agua en estado gaseoso ocupa un mismo volumen con o sin condensación parcial del agua.

Un término muy usado en combustión y que está relacionado precisamente con la condensación del agua es "el punto de rocío" y se define como la temperatura a la cual el vapor de agua contenido en los productos de combustión se condensa, y esta equivale a la temperatura de saturación del vapor de agua a la presión parcial de la misma en los gases de escape.

2.3. COMBUSTION DE SOLIDOS

La combustión de los sólidos, tales como el carbón y la madera, se produce en varias fases. En primer lugar, existe un 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 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 su superficie.

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

2.4. COMBUSTION DE GASES

Para quemar un combustible gaseoso, es necesario tener una mezcla de gas - aire, que pueda inflamarse y a continuación llevar a la mezcla a la temperatura de ignición manteniéndola en este punto el tiempo necesario para asegurar la combustión completa.

Consideremos una cámara en donde el combustible y el oxidante ingresan separados pero se mezclan rápidamente antes de la zona de reacción, en la que debido a la

alta temperatura reaccionan generando calor, para luego abandonar la zona de combustión como gases quemados. La zona de combustión se halla en un punto en el que el calor generado es por lo menos igual al calor perdido.

Desde la llama se transmite calor por conducción y radiación hacia la mezcla fresca y corriente abajo, además existe desde esta zona convección y difusión - corriente arriba y abajo, radiación hacia los límites de la zona y desde éstos radiación o re-radiación hacia aquella.

En cuanto a la temperatura se refiere, ésta aumenta - primero gradualmente, luego en la zona de reacción sufre un gran incremento, para finalmente decaer conforme se aleja de la misma.

Lo anterior es válido para explicar el fenómeno de combustión de gases en forma teórica, ya que se ha asumido implícitamente como si la cantidad correcta de gas estuviese mezclada con la correcta cantidad de aire y la mezcla completa hubiese sido calentada y quemada en una sola operación, cosa que en la práctica no ocurre, siendo la aproximación más cercana la obtenida en un cilindro de un motor a gas.

C A P I T U L O I I I

GASIFICADORES

3.1. TIPOS Y PRINCIPIOS DE OPERACION

La gasificación de material lignocelulósico (madera, resi
duos agrícolas) se lleva a cabo en un reactor apropiado,
llamado gasificador, en el cual la madera troceada o si
milares forman un lecho compacto.

Un gasificador consiste principalmente de un recipiente
cilíndrico (carbonera o bunker) que se alimenta con el
combustible, una entrada de aire que se logra a través
de un ventilador (blower), una salida de gas y una
rejilla. Ver figura N° 3.1.

Los tipos de gasificadores existentes se clasifican de
acuerdo al proceso de gasificación pudiendo, este ser
llevado a cabo en varias formas dependiendo de la di
rección del aire que fluye a través del gasificador:



BIBLIOTECA

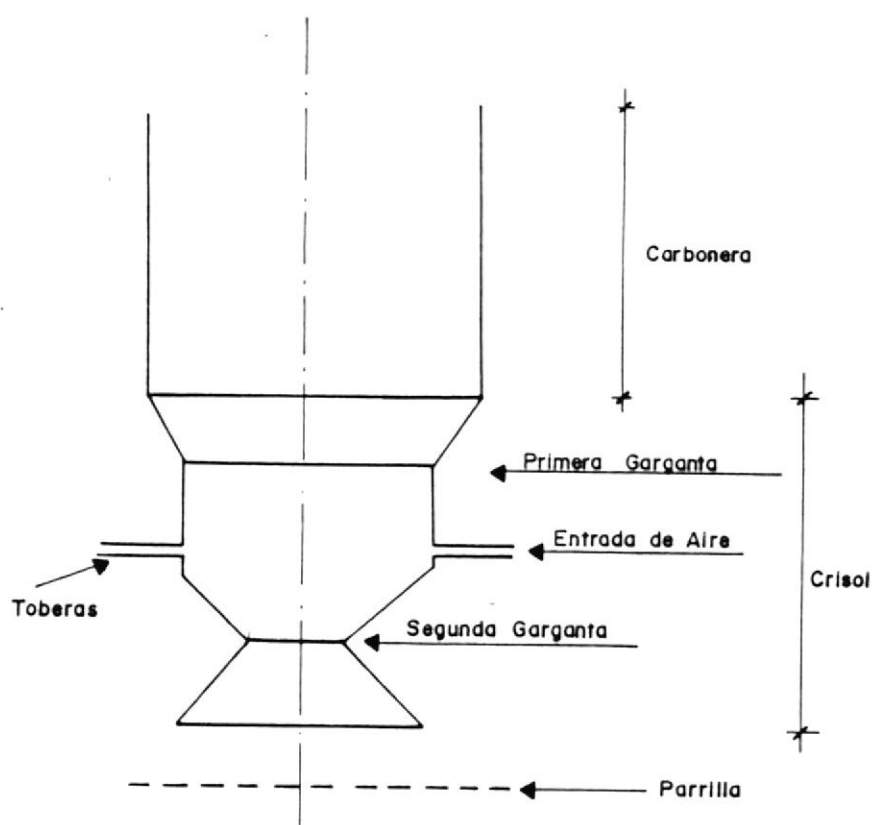


FIGURA 3-1.- REPRESENTACION ESQUEMATICA DE UN GASIFICADOR.

1. Si el aire fluye por la parte inferior del gasificador hacia arriba, la operación y por consiguiente el gasificador es de flujo ascendente llamado también de contracorriente.
2. Si el aire fluye hacia abajo a lo largo del lecho, el gasificador se denomina de flujo descendente conocido también como de corriente paralela.
3. Si el aire entra al gasificador en forma horizontal, se denomina de flujo cruzado.

Los esquemas de los tres tipos anteriormente señalados se dan a conocer en la figura N° 3.2.

Los gasificadores más comunes son del tipo 1 y 2.

A continuación se describirá con mayor detalle algunos aspectos relacionados a sus principios de operación (Tipos 1 y 2).

1. Gasificadores de flujo ascendente:

Son del tipo más antiguo y sencillo de construir. Este tipo de gasificador posee una sección transversal -

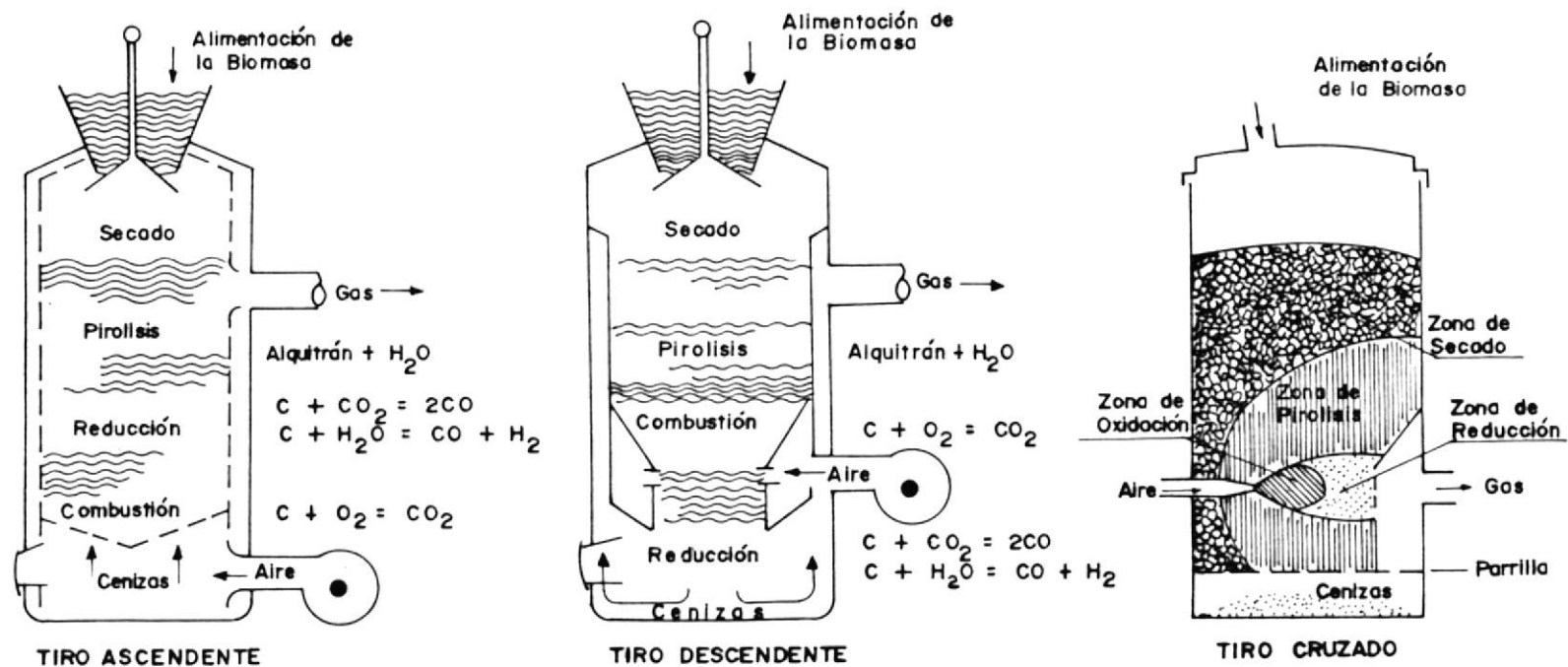


FIGURA 3-2.- ESQUEMAS DE LOS TRES TIPOS DE GASIFICADORES MAS USADOS.

FUENTE: REF. 12

más o menos uniforme. Tiene una rejilla en la parte inferior, que soporta el lecho, mientras el combustible se carga por la parte superior. El aire es inyectado por la parte inferior, pasando a través de la rejilla, el gas producido sale por la parte superior y a un lado.

La reacción de combustión se realiza cerca de la parrilla, seguida por la reacción de reducción que ocurre un poco más arriba. El proceso de secado y pirolización se realizan en la parte superior como resultado de la transferencia de calor por radiación de las zonas inferiores principalmente.

Los alquitranes y otros volátiles resultantes de este proceso se arrastran en el flujo de gas. Las cenizas son evacuadas del fondo del equipo.

La mayor ventaja de este tipo de gasificador consiste en obtener una combustión aproximadamente completa - además del intercambio interno de calor cuyo resultado es producir gas pobre a baja temperatura y alta eficiencia del equipo, así como también la posibilidad de operar con una variedad de combustibles biomásicos.

Como se había indicado anteriormente que la materia volátil que se producen en la pirolisis de la biomasa es arrastrada por la corriente gaseosa, este hecho constituye la principal desventaja para estos gasificadores ya que como parte de los volátiles son gases condensables pueden dar problemas en el uso final de dicho gas, principalmente cuando se lo usa en aplicaciones de motores de combustión, siendo dicho problema de menor importancia cuando el gas es usado en combustión directa.

Por lo tanto, los gasificadores de flujo ascendente, son diseñados principalmente para combustibles de bajo contenido de volátiles, como es el caso del carbón de leña.

2. Gasificadores de flujo descendente:

En este nuevo diseño de gasificadores se encontró una solución al problema de arrastre de alquitranes en el flujo de gas. En este tipo de gasificador, el aire es introducido al nivel de o sobre el nivel de la zona de oxidación. El gas resultante se lo colecta al fondo del gasificador de tal modo que el combustible y el gas se mueven en la misma

ma dirección.

En el descenso, los volátiles (gases y vapores generados en la pirólisis), pasan a través de una cama ardiente de carbón en donde se convierten en gases tales como hidrógeno, dióxido de carbono, monóxido de carbono y metano. Dependiendo de la temperatura de la zona ardiente y del tiempo de permanencia de los vapores. En dicha zona, se obtendrá una mayor o menor descomposición de los mismos.

Dado que el gasificador de flujo descendente es el que mejores posibilidades tiene para operar en países en vías de desarrollo por su adaptabilidad a la materia prima disponible en nuestro medio, se ha creído conveniente examinar con mayor detalle las diferentes zonas que lo componen.

En un gasificador de flujo descendente se distinguen las siguientes zonas:(Ver la figura N° 3.3.).

- Zona de Secado
- Zona de pirólisis
- Zona de oxidación
- Zona de reducción



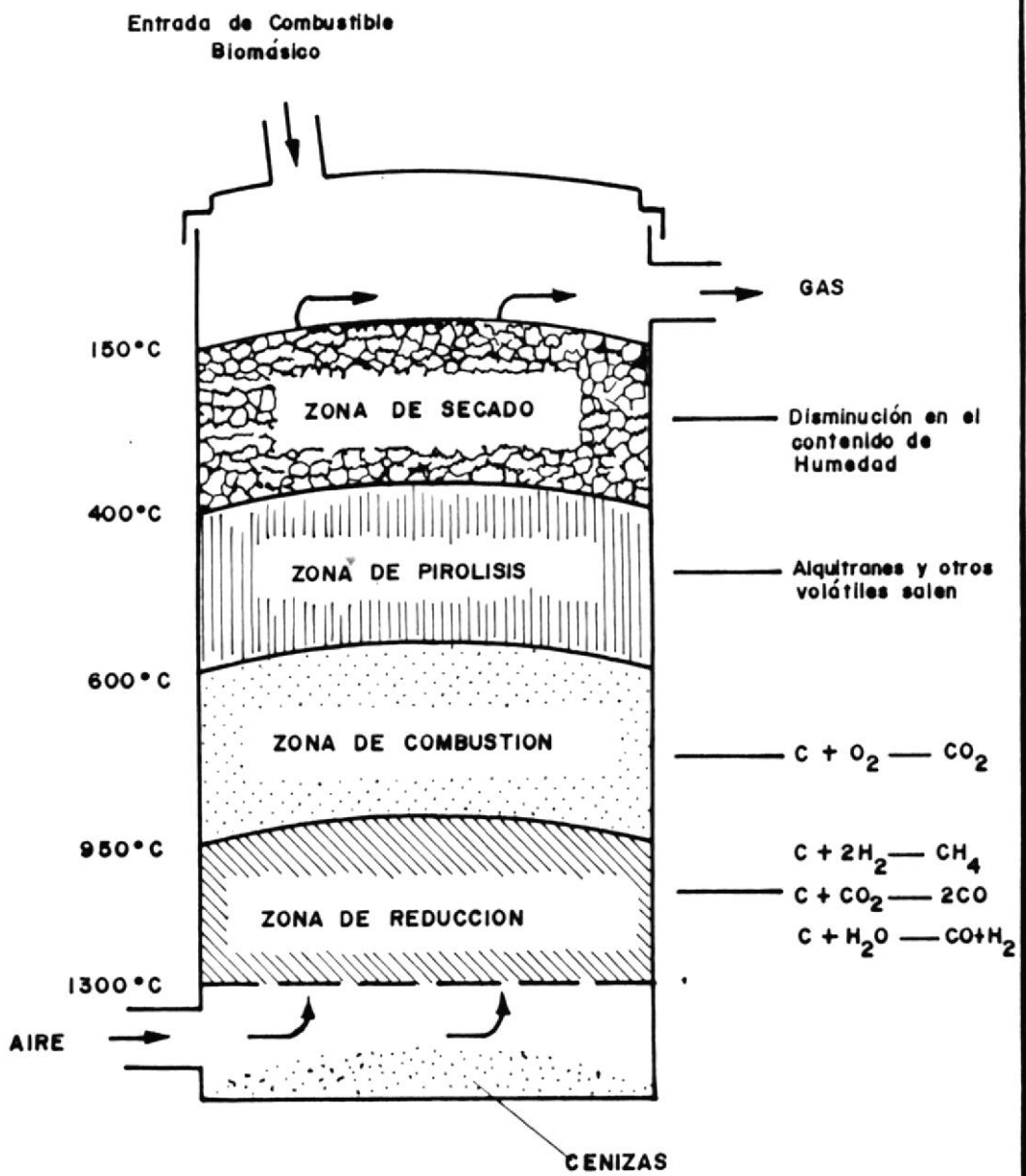


FIGURA 3-3.- DIAGRAMA ESQUEMATICO DE LAS ZONAS DE REACCION EN UN GASIFICADOR DE TIRO DESCENDENTE.

ZONA DE SECADO

En esta zona que corresponde a la parte más superior de la carbonera (bunker) se produce un proceso de secado del combustible almacenado debido a la transferencia de calor de la zona más caliente (inferior) a la de menos temperatura (superior).

ZONA DE PIROLISIS

El combustible biomásico comienza a pirolizarse a temperaturas sobre los 250° C. Se presume que las fracciones de pirolización ocurren aproximadamente así:

Durante el calentamiento del combustible, las moléculas grandes como lo son la celulosa, semi-celulosa y lignina se desintegran en moléculas de tamaño mediano y en carbón vegetal. Ahora, si estas moléculas medianas permanecen suficiente tiempo en la zona caliente, se convierten en moléculas aun más pequeñas como son hidrógeno, metano, etc. Por otro lado si el tiempo de residencia en la zona ardiente es muy corto, o si la temperatura es baja, entonces las moléculas de tamaño mediano se escapan y compensan en forma de aceites y alquitranes.

ZONA DE OXIDACION

Es una zona de combustión que se forma al nivel donde se introduce el aire (oxígeno). Las reacciones con oxígeno son altamente exotérmicas, dando como resultado que la temperatura en esta zona suba a unos 1200 - 1500° C. Dos funciones primordiales ocurren en esta zona: la primera consiste en generar calor, y la segunda convierte y oxida todos los productos condensables que provienen de la pirólisis.

Los productos de la zona de oxidación (carbones en cendidos y gases calientes) se desplazan hacia abajo por gravedad a la zona de reducción.

ZONA DE REDUCCION

En esta última zona, el calor sensible de los gases y del carbón se convierte en energía química del gas pobre. Las reacciones químicas que se efectúan en esta zona, producen un gas combustible que puede ser usado en quemadores, o previo enfriamiento y filtrado, puede ser usado en motores de com bustión interna.

Adicionalmente, se construye una parrilla que remue-

va la ceniza resultante del proceso de gasificación además la rotación de la misma evita bloqueos de carbones que pudieran producirse.

La principal ventaja de este tipo de gasificadores, es entonces según lo dicho en líneas anteriores, una producción de gas satisfactoriamente libre de alqui-
tranes que se puede usar en motores.

Una desventaja grande es que no pueden operar con una serie de combustibles no procesados. El uso de combustibles de baja densidad producen problemas de
diferenciales de presión, por lo tanto para eliminar este problema, previamente el combustible debe ser
peletizado.

En comparación con los de tipo ascendente, los des
cendentes son menos eficientes debido principalmente -
al menor valor calorífico del gas producido.

3. Gasificadores de Flujo Cruzado:

En este tipo de gasificadores al aire entra horizontalmente. La ventaja de este tipo de sistema está en la faci
lidad con que pueden operar en pequeña escala. Des

de el punto de vista económico una instalación de menos de 10 kw (potencia al eje) es factible construirlo, ya que cuando se usa este tipo de gasificador en conjunto con pequeños motores, solo es necesario un sistema muy simple para la limpieza del gas.

La principal desventaja de este gasificador está en su poca capacidad de conversión de alquitranes, razón por la cual el combustible usado debe ser de buena calidad.

Otra clasificación que a menudo es usada en gasificadores es aquella que considera el tipo de lecho del reactor, en este caso los gasificadores se clasifican en:

1. De lecho fijo
2. De lecho móvil (o cuasiestático)
3. De lecho fluidizado
4. De lecho en suspensión

La figura N° 3.4., muestra los tipos de reactores y sus correspondientes perfiles de temperatura y conversión de la biomasa.

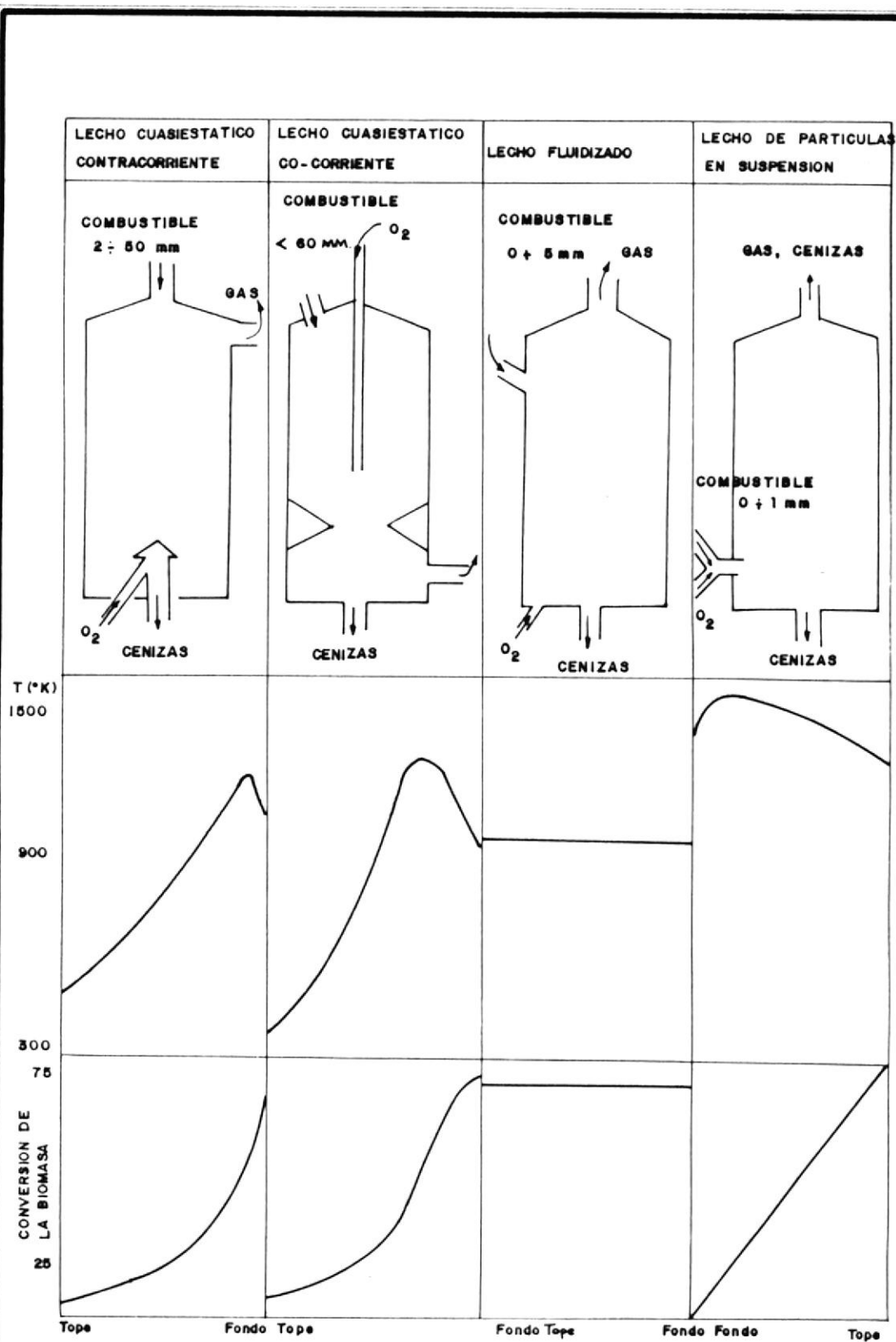


FIGURA 3-4.- TIPO DE REACTORES Y SUS RESPECTIVOS PERFILES DE TEMPERATURA Y CONVERSION DE LA BIOMASA.

FUENTE: REF. 11

En el gasificador de lecho fijo, el combustible es soportado por una parrilla. El aire pasa a través del combustible y los gases producidos salen por la parte superior del reactor.

Las principales ventajas de este tipo de gasificador son:

- Alta eficiencia de conversión del combustible sólido
- Baja producción de cenizas

Los gasificadores de lecho móvil pueden ser de flujo ascendente, descendente y cruzado, cuyas características de operación están dadas en párrafos anteriores de esta misma sección.

En los gasificadores de lecho fluidizado la materia prima (combustible) es entregada en forma de descho sólido pulverizado. Como medio de gasificación se usa aire y vapor. La figura N° 3.5., representa esquemáticamente un gasificador de este tipo.

Las ventajas son:

- Alta capacidad de conversión
- Puede aceptar mayor humedad del combustible

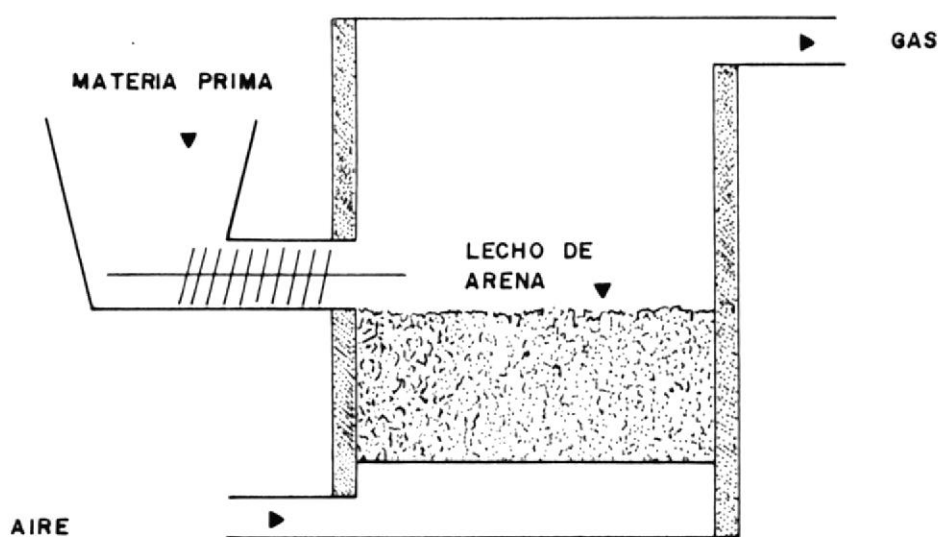


FIGURA 3-5.- ESQUEMA DE UN GASIFICADOR DE LECHO FLUIDIZADO.

FUENTE: REF. 11

- Alto grado de uniformidad
- Tiempo de residencia más bajo que los de lecho fijo
- Buen contacto gas - sólido.

Las desventajas son:

- Alto costo
- Alta pérdida de carbón en la ceniza
- Complicado distribuidor de gas

Finalmente los gasificadores de lecho de suspensión utilizan partículas finamente picadas (0 mm - 1 mm) , que entran por la parte inferior del reactor y la combustión tiene lugar con las partículas suspendidas en la fase gaseosa.

Las ventajas son:

- Buen contacto gas - sólido
- No forma alquitrán
- Producción de ceniza inerte
- Gran capacidad por volumen de reactor

Las desventajas son:

- Requiere oxígeno

- Poco control del combustible
- Requiere adoptar medidas de seguridad.

3.2. COMBUSTION DE SOLIDOS EN LECHO CUASIESTATICO

La denominación del lecho cuasiestático tiene su origen en el hecho físico de que los trozos de combustible (madera) descienden lentamente al ir sucediendo el proceso de gasificación.

Los gases producto de las reacciones que ocurren en el lecho, fluyen entre los intersticios que forman los trozos cuando se agrupan. El tamaño de dichos trozos está entre 1 a 6 cm. promedio.

Como la combustión es uno de los procesos que está involucrado en el proceso global que es la gasificación, se ha creído conveniente explicar lo que ocurre en el proceso global, refiriéndonos a la gasificación con flujo ascendente. En este caso, aire entra por la parte inferior del reactor y asciende a través del lecho.

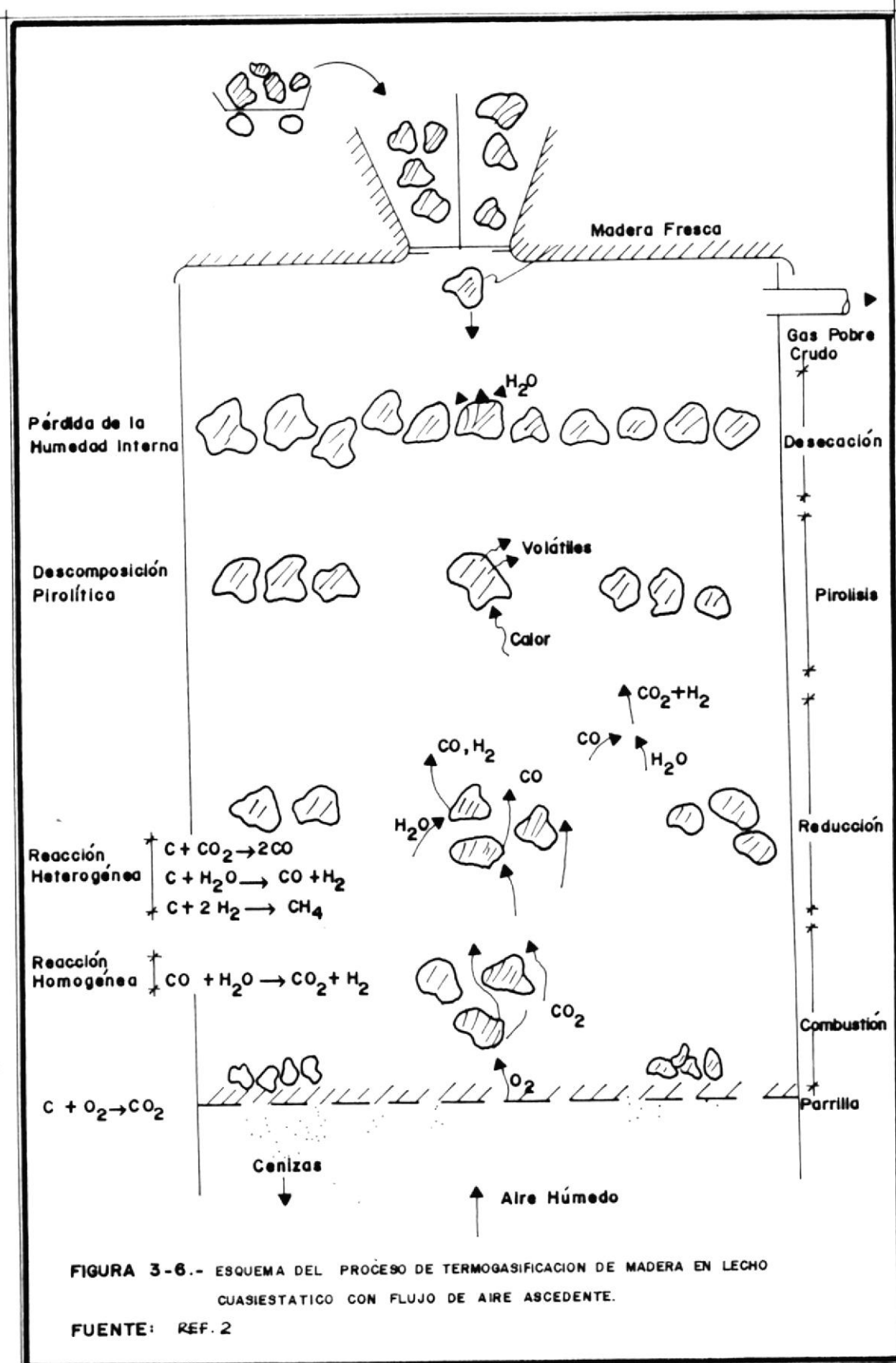
Una rejilla colocada en la parte inferior sostiene el lecho.

El aire suministrado es generalmente aire atmosférico, pero en ciertos casos en donde la humedad del com bustible es muy baja (carbón por ejemplo), se le añade humedad al aire por medio de chorro de va por con el fin de provocar la formación del hi drógeno.

En la gasificación de madera troceada en lecho cu siestático, la altura del lecho debe ser suficiente para propiciar un proceso completo de gasificación.

Durante operación normal se puede identificar va rias zonas a lo largo del lecho, tal como se muestra en la figura N^o 3.6.

Es necesario notar que la termogasificación involucra procesos de intercambio de masa y calor (energía). Desde el punto de vista térmico, la etapa de combustión produce la mayor parte del calor neces ario para iniciar el proceso global. Una parte de esta energía es usada para los procesos de seca do, reducción y destilación parcial; otra parte se pie rde principalmente por radiación, a través de las paredes del reactor; y otra cantidad es llevada co mo calor sensible en los gases de escape.



3.3. GASIFICACION TERMOQUIMICA

La termogasificación llamada también gasificación termoquímica, es un proceso complejo de dos etapas: la primera es de secado y pirólisis que se lleva a cabo a una temperatura relativamente baja ($150 - 500^{\circ} \text{C}$), en ausencia de oxígeno o aire, donde la materia orgánica compleja ($\text{C}_x \text{H}_y \text{O}_z$) es transformada a compuestos orgánicos simples (carbón y materia volátil); y la segunda es de gasificación propiamente dicha que tiene lugar a más alta temperatura ($500 - 1300^{\circ} \text{C}$) en donde se produce la reacción de la materia orgánica pirolizada con O_2 (aire), H_2O (vapor), CO_2 e H_2 para producir una mezcla gaseosa de bajo poder calorífico ($4000-5500 \text{ kJ/m}^3$ a S.T.P.) llamada gas pobre formada por gases combustibles como son el CO , H_2 y CH_4 principalmente, no combustibles como el CO_2 y N_2 y pequeñas cantidades de O_2 .

Durante la termogasificación, el combustible sólido sucesivamente se seca, pirolisa, es decir los gases y líquidos orgánicos son destilados, razón por la cual el residuo sólido posee un contenido más alto en carbón el cual finalmente reacciona con O_2 , H_2O , CO_2 y H_2 en forma compleja produciendo los gases indicados en el primer párrafo de esta sección.

3.3.1. Procesos: Descripción

Cuatro procesos diferentes ocurren en un gasificador:

1. Secado del combustible
2. Pirólisis
3. Combustión
4. Reducción

Aun cuando en realidad existe cruce de zona , puede asumirse que cada uno de estos procesos ocupan zonas independientes en las que se producen reacciones químicas y termales radicalmente diferentes.

Es menester indicar que para gasificar completamente el combustible sólido, este tiene que pasar por todos estos procesos.

1. Zona de Secado:

Esta zona está generalmente en la parte superior del gasificador, sobre la zona de pirólisis. Aquí las temperaturas no son lo suficientemente altas para propiciar reacciones quími



micas y cualquier humedad presente en el com
bustible es eliminada como vapor de agua.

2. Zona de Pirólisis:

Generalmente esta ubicada sobre las zonas de combustión y de reducción. En esta zona se extrae el calor de las zonas calientes adyacantes. Cuando la temperatura en esta zona sea de aproximadamente 400° C una reacción exotérmica autosuficiente toma lugar, en la cual las estructuras naturales del combustible biomásico utilizado, comienzan a disociarse . (Proceso análogo al que ocurre en un horno en la manufactura de carbón).

En las reacciones participan: vapor de agua , ácido acético, metanol y considerables volumenes de hidrocarburos pesados (breas). En el caso de usar madera, es importante señalar que aproximadamente el 50 % o más del peso original se emite como brea y volátiles.

El residuo sólido, después de la pirólisis, es carbón vegetal. Este atraviesa las zonas de combustión y reducción en donde se consume.

Cuando se usa carbón vegetal como combustible, muy pocos productos de pirólisis se emiten ya que previamente han sido eliminados en la producción del carbón.

3. Zona de Combustión:

La ubicación más o menos precisa de esta zona depende del tipo de gasificador a usar; si es de tipo ascendente, estará ubicada en la parte más baja del gasificador, y si es de flujo descendente estará por encima de la zona de reducción. En todo caso, es la zona en la cual se alimenta el aire al gasificador - permitiendo se realice la combustión como ocurre en un horno.

Es importante indicar en este punto, que el ingreso de aire para la combustión debe restringirse de tal manera que no se extienda a toda la masa combustible, ya que si esto llegará a ocurrir, es obvio que el gasificador se convertirá en un horno ordinario, generando calor y gases incombustibles.

4. Zona de Reducción:

De la zona de combustión los gases calientes

pasan a la zona de reducción. No está permitido que ingrese aire a esta zona, por lo tanto no hay oxígeno libre y las reacciones que se desarrollan son diferentes a las que ocurren en la zona de combustión.

Estas reacciones son llamadas de reducción y son determinantes para alcanzar el objetivo básico de la gasificación, es decir convertir los gases incombustibles producidos en la zona de combustión, en gases combustibles y consecuentemente útiles para poderlos utilizar en una aplicación específica.

En la tabla XV, se presentan los procesos (zonas) temperaturas y las reacciones más importantes que ocurren en el proceso global de termogasificación indicando en estas últimas si son de carácter exotérmicas (+) o endotérmicas (-).

La ocurrencia de estas reacciones químicas dependen principalmente del tipo de combustible usado, del diseño del gasificador y de las condiciones de operación.

El gas pobre posee un valor térmico relativamente

TABLA XV
 ZONAS, TEMPERATURAS Y REACCIONES QUE OCURREN EN EL PROCESO DE TERMOGASIFICACION

Z O N A	TEMPERATURA (°C)	R E A C C I O N E S
Secado	20 - 100	-
Pirólisis	> 120	Descomposición
Oxidación	1000 - 1600	$C + O_2 \rightarrow CO_2 (+)$ $2H + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O(+)$
Reducción	> 600	$C + CO_2 \rightarrow 2CO(-)$ $C + H_2O \rightarrow CO + H_2(-)$ $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2 (+)$ $C + 2H_2 \rightarrow CH_4(+)$

FUENTE: Ref. 14.-

bajo, un 10% al 15% con relación al gas natural. La principal razón es el efecto de dilución del nitrógeno en el aire de combustión. Como el aire que ingresa al gasificador posee un 78% de nitrógeno en volumen, y debido a que este es inerte en condiciones normales; pasa por el gasificador sin participar en ninguna reacción química principal. El gas pobre contiene por lo menos un 50 % de nitrógeno.

Si se usa oxígeno puro para la combustión, se obtendrá un gas de más alto contenido térmico, pero el costo elevado y lo completo del proceso limitan su uso y lo excluyen en las aplicaciones a pequeña y mediana escala en zonas rurales de los países en vías de desarrollo.

La tabla XVI muestra algunos datos típicos de la composición del gas pobre producido en gasificadores que trabajan con madera y carbón vegetal.

TABLA XVI

COMPOSICION DEL GAS EN GASIFICADORES QUE OPERAN CON MADERA Y CARBON VEGETAL

G A S	OPERACION CON MADERA	OPERACION CON CARBON VEGETAL
CO	17 - 22 %	23 - 33 %
H ₂	12 - 20 %	4 - 10 %
CH ₄	2 - 3 %	0 - 2 %
C _x H _y	0.2 - 0.4 %	0 - 0.1%
CO ₂	9 - 15 %	1 - 7 %
O ₂	0 - 1%	0 - 1 %
N ₂	45 - 55 %	55 - 65 %
Poder calorífico inferior	5000 - 5900 k J/Nm ³	4500 - 5600 k J/Nm ³

FUENTE: Ref. 12.

3.4. PARAMETROS OPERACIONALES

En el Capítulo II, se indicó como afecta a la producción del gas el tipo de combustible a usar. En esta sección se hablará sobre la influencia de los parámetros operacionales en el proceso de gasificación y por ende en la composición y producción del gas.

Los parámetros que definen las condiciones de operación del gasificador son principalmente:

- a. Presión
 - b. Temperatura
 - c. Tiempo de residencia
 - d. Relación aire/biomasa o relación aire-vapor/biomasa .
- a. Los gasificadores pueden ser construídos para operar a presión atmosférica o alta presión.

En la mayoría de los casos, los gasificadores son construídos para operación a baja presión.

Presiones mucho mayores a la atmosférica optimizan la reacción de gasificación, reducen el tamaño del equipo, mejora la calidad del gas pobre producido y evidentemente producen gas a presión para aplicacio-

nes como las de generación eléctrica.

Como desventajas de este sistema a alta presión tenemos la dificultad en la introducción de la biomasa y difícil control del proceso.

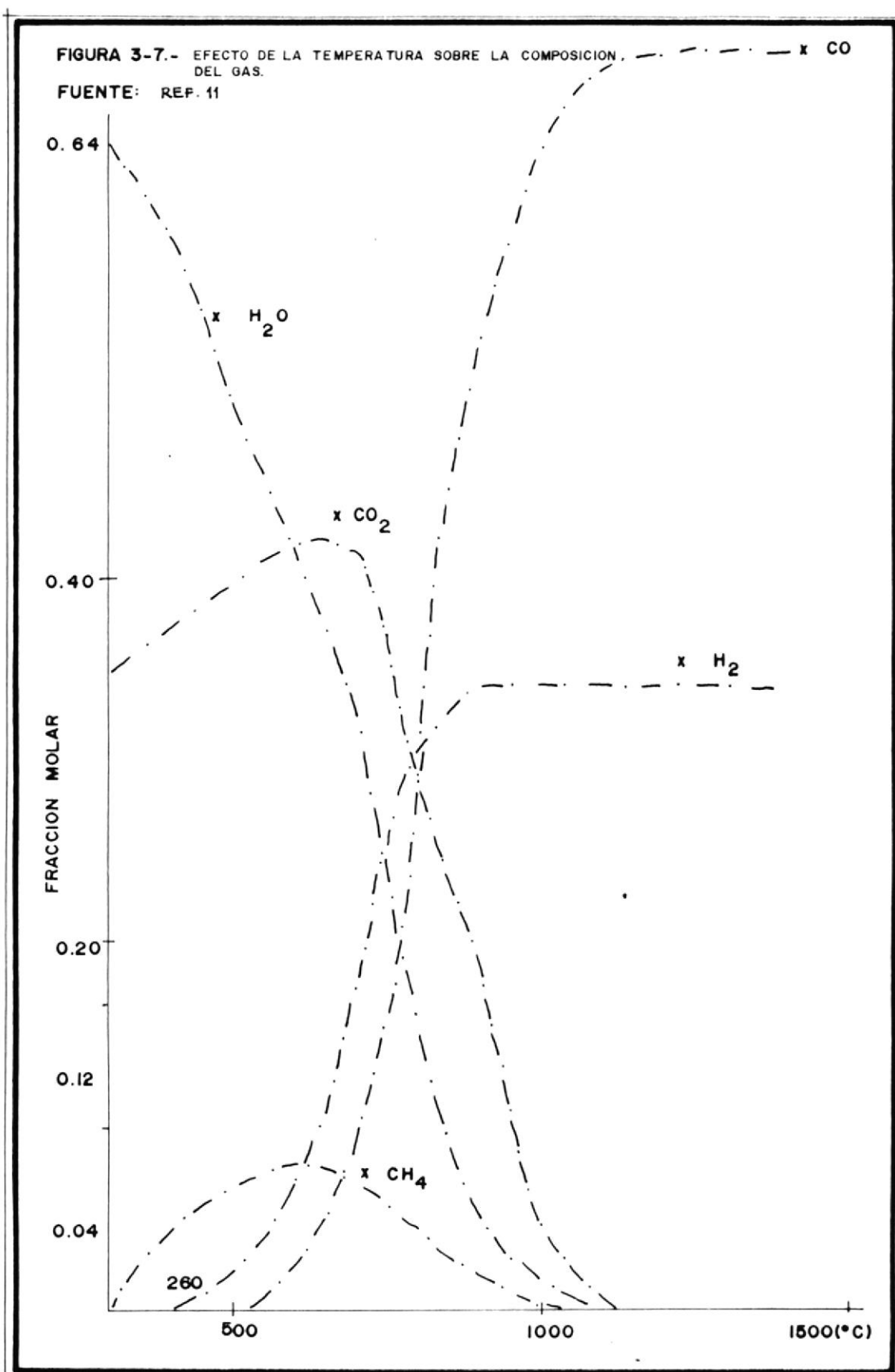
Además, se necesitaría considerar para la construcción del equipo, materiales resistentes que incrementarían el costo del equipo.

- b. La temperatura dentro del gasificador constituye un parámetro fundamental en la composición del gas deseado.

Los efectos del incremento de la temperatura por sobre los 315°C son: rápida reducción de CO_2 , H_2O , CH_4 y consecuentemente el incremento de CO y H_2 . Temperaturas mayores a 982°C eliminan la formación de CH_4 .

En cambio, a temperatura muy baja, el equilibrio químico de las reacciones termoquímicas desarrolladas en el reactor, no será alcanzado.

En la figura N^o 3.7., nos muestra el efecto de la



temperatura sobre la composición del gas pobre obtenido en la gasificación de madera.

- c. El tiempo de residencia depende del tipo de gasificador usado; por ejemplo en los de lecho en suspensión los sólidos y los gases tienen el mismo tiempo de residencia; en cambio en los gasificadores de lecho fluidizado y fijo, los sólidos tienen un tiempo de residencia mayor que lo de los gases.

El tiempo de residencia (τ) se lo define en gasificación como la relación de volumen de la zona de oxidación (v) para el flujo volumétrico de gas producido (Q), esto es:

$$\tau (s) = \frac{v \text{ (m}^3\text{)}}{Q \text{ (m}^3\text{/s)}}$$

- d. Al aumentar la proporción aire/biomasa, la calidad del carbón gasificado aumenta. En cambio si la relación vapor/biomasa es baja no se producirá suficiente hidrógeno. El flujo de aire o vapor será función del tipo de gas que se quiera obtener.

Si el objetivo es producir gas rico, el oxígeno suministrado al gasificador debe ser obtenido de una fuente

de oxígeno puro, en cambio que si se desea obtener gas pobre, puede usarse oxígeno en forma de aire con la consiguiente reducción de los costos de operación.

C A P I T U L O I V

DISEÑO DE UN GASIFICADOR DE TIPO FLUJO DESCENDENTE

4.1. INTRODUCCION

La mayoría de los expertos en la tecnología de la gasificación de madera, concuerdan que la operación de un gasificador tiene más de arte que de ciencia. Esto quiere decir, que los cambios en la calidad y dimensiones del combustible influyen sustancialmente en la operación del equipo, a tal punto, que sólo con la experiencia personal de trabajo, se logrará determinar cuantitativamente las variables que produzcan una operación satisfactoria del reactor.

En la práctica, existen dos métodos para determinar las dimensiones principales del gasificador cuando el gas pobre se lo utilizará en motores:

1. Por la potencia del motor

2. Por la capacidad del gasificador

En el primer caso, la variable independiente es la potencia del eje (kw); en el segundo caso dicha variable es la capacidad de almacenamiento por unidad de tiempo (kg/hr).

En ambos procedimientos se debe conocer adicionalmente, entre otras variables:

- Poder calorífico y humedad de la madera
- Eficiencia térmica y volumétrica del motor

Para esta tesis se decidió construir un gasificador de flujo descendente, principalmente por la mejor operación que debe tener usando combustibles locales como son la madera y ciertos residuos agrícolas, ya que ellos poseen bajo contenido de cenizas, y a pesar del alto contenido de alquitrán, cuya descomposición en fracciones útiles en el proceso de gasificación es logrado precisamente con este tipo de gasificador.

En la siguiente sección se analiza el diseño de una

parte de la planta de gas pobre (gasificador - ciclón-soplador) que permitirá alcanzar el objetivo propuesto en este trabajo, y que estará en posibilidad de accionar un motor de potencia al eje de 20 kw usando madera como combustible.

4.2. DETERMINACION DE LOS PARAMETROS DE DISEÑO

Se ha elaborado el diseño de un gasificador con las características señaladas más adelante, basado en la información disponible en referencias técnicas apropiadas, haciendo pequeñas modificaciones en base a la experiencia obtenida en la construcción y operación de un gasificador experimental hecho en los talleres de la ESPOL.

Se procederá a continuación a calcular los parámetros más importantes de diseño y selección de:

1. Sistema Gasificador - Motor
2. Ciclón
3. Soplador

1. Diseño de un sistema gasificador motor:

Las condiciones de diseño de un sistema gasificador - motor

son las siguientes:

- Combustible: tipo:	Madera
Contenido de humedad(F)	20 %
Poder calorífico infe-	
rior (H_f):	15MJ/kg
Densidad aparente(ρ_b):	300 kg/m ³
- Carga:	Potencia de diseño (P_{ot}): 20 kw
	Velocidad (N): 1500 RPM
- Motor:	Eficiencia total(η): 25 %
	Eficiencia volumétrica(η_v): 85 %
- Condiciones	
ambientales:	Presión (P_o): 1 BAR
	Temperatura (T_o): 25° C
- Condiciones	
del gas des	
pués de la	
mezcla con	
el aire:	Presión (P_{mix}): 0.9 BAR
	Temperatura (T_{mix}): 40° C

CALCULOS

1. PRODUCCION DEL GAS (w_g/q_f):

$$w_g/q_f = 2.25 \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

de la Figura N° A-1 $w_g/q_f = 2.25 \text{ Nm}^3/\text{kg}$

2. PODER CALORIFICO INFERIOR DEL GAS (H_g):

De la figura N° A-1 $H_g = 1180 \text{ kcal/Nm}^3 = 4940 \text{ kJ/Nm}^3$

3. PODER CALORIFICO INFERIOR DE LA MEZCLA (H_{min}):

$$H_{\text{mix}} = H_g \times \frac{1}{1 + \lambda \left(\frac{w_a}{w_g}\right)_{\text{est}}}$$

De la figura N° A-1 $\left(\frac{w_a}{w_g}\right)_{\text{est.}} = 1.05 \frac{\text{m}^3_{\text{aire}}}{\text{m}^3_{\text{gas}}}$

$$\lambda = \frac{\left(\frac{w_a}{w_g}\right)_{\text{real}}}{\left(\frac{w_a}{w_g}\right)_{\text{E.S.T.}}} \approx 1 \text{ (para operación en motores)}$$

$$H_{\text{mix}} = 4940 \times \frac{1}{1 + 1.05} = 2410 \text{ kJ/Nm}^3$$

4. TAMAÑO DEL MOTOR

Volumen del Cilindro (V_C):

$$V_C = \frac{\text{Pot}}{\eta_v H_{\text{min}} \frac{N}{2 \times 60} \times \eta \times \frac{P_{\text{mix}}}{P_o} \times \frac{T_o}{T_{\text{mix}}}}$$

$$V_c = \frac{20 \text{ kw}}{0.85 \times 2410 \frac{\text{kJ}}{\text{Nm}^3} \cdot \frac{1500}{2 \times 60} \times \frac{1}{\text{seg}} \times 0.25 \times \frac{0.9}{1} \times \frac{298}{313}} =$$

$$3.65 \times 10^{-3} \text{ m}^3 = 3.65 \text{ lt}$$

Flujo de la mezcla (w_{mix}):

$$w_{\text{mix}} = V_c \cdot n_v \cdot \frac{N}{2 \times 60} \times \frac{p_{\text{mix}}}{P_o} \times \frac{T_o}{T_{\text{mix}}} =$$

$$0.00365 \text{ m}^3 \times 0.85 \times \frac{1500}{2 \times 60} \times \frac{0.9}{1} \times \frac{298}{313} =$$

$$w_{\text{mix}} = 0.0332 \text{ Nm}^3/\text{seg} = 120 \text{ Nm}^3/\text{hr.}$$

Flujo de Gas (w_g):

$$w_g = w_{\text{mix}} \cdot \frac{1}{1 + \lambda \left(\frac{w_a}{w_g}\right)_{\text{est}}} = 120 \frac{1}{1 + 1.03} = 0.0162 \text{ Nm}^3/\text{seg}$$

$$= 58 \text{ Nm}^3/\text{hr}$$

5. TAMAÑO DEL GASIFICADOR:

Flujo de combustible (q_f):

$$q_f = \frac{w_g}{\left(\frac{w_g}{q_f}\right)} = \frac{0.0162 \text{ Nm}^3/\text{seg}}{2.25 \text{ Nm}^3/\text{kg}} = 0.0072 \text{ kg/seg} = 25.92 \text{ kg/hr}$$

Diámetro de la garganta (d_t):

$$\text{Dato de diseño } \frac{w_g}{A_t} = 9500 \frac{\text{Nm}^3}{\text{hrm}^2} \quad (\text{Ref. 12})$$

$$A_t = \frac{58 \text{ Nm}^3/\text{hr}}{9500 \text{ Nm}^3/\text{hr m}^2} = 0.0061 \text{ m}^2 = 61 \text{ cm}^2$$

$$d_t = 2 \sqrt{\frac{A_t}{\pi}} = 2 \sqrt{\frac{61}{\pi}} = 9 \text{ cm.}$$

Diámetro de la Tobera (d_n):

$$\text{De la figura N}^\circ \text{ A.3. } 100 \frac{A_n}{A_t} = 6.2$$

Asumimos 5 toberas, esto es:

$$A_n = \frac{n \pi d_n^2}{4} = \frac{5}{4} \pi d_n^2 = \pi d_n^2$$

$$100 \times \frac{5 \pi d_n^2}{4 A_t} = 6.2 \rightarrow d_n = \frac{1}{5} \sqrt{\frac{6.2 A_t}{5 \pi}} =$$

$$\frac{1}{5} \sqrt{\frac{6.2(61) \text{ cm}^2}{5 \pi}} = 0.98 \text{ cm. (por cada tobera)}$$

Diámetro del gasificador a la altura de las toberas (d_{r1})

$$\text{De la figura N}^\circ\text{A-4} \rightarrow \frac{d_{r1}}{d_t} = 2.25 \rightarrow d_{r1} = 2.25 \times 9 = 20 \text{ cm.}$$

Diámetro del gasificador a la entrada de la zona de combustión (d_r):

$$\text{De la figura N}^\circ\text{A-4} \rightarrow \frac{d_r}{d_t} = 3 \quad d_r = 3 d_t = 3 \times 9 = 27 \text{ cm.}$$

Distancia de las toberas a la garganta (h):

$$\text{De la figura N}^\circ\text{ A-2} \rightarrow \frac{h}{d_t} = 1.14 \quad h = 1.14 \times d_t = 1.14 \times 9 = 10 \text{ cm.}$$

Altura de la zona de reducción (h_r):

$$\text{Por regla de diseño} \rightarrow h_r \approx 2 d_t \text{ (Ref 12)}$$

$$h_r \approx 2.9 \approx 18 \text{ cm.}$$



Diámetro de la carbonera (d_b):

Por regla de diseño $\frac{q_f}{A_b} = 200 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{h}}$ (Ref.12)

$$A_b = \frac{q_f}{200} = \frac{25.92 \text{ kg/hr}}{200 \text{ kg/m}^2 \text{hr}} = 0.1296 \text{ m}^2 = 1296 \text{ cm}^2$$

$$d_b = 2 \sqrt{\frac{A_b}{\pi}} = 2 \sqrt{\frac{1296}{\pi}} = 40 \text{ cm.}$$

Altura de la carbonera: (h_b)

$$V_b = A_b h_b \rho_b = \frac{V_b}{A_b} = \frac{q_f}{\rho_b \cdot A_b} = \frac{q_f t_j}{\rho_b A_b}$$

Considerar tiempo de independencia de operación ,

$$t_j = 1 \text{ hr:}$$

$$h_b = \frac{25.92 \text{ kg/hr} \cdot 1 \text{ hr}}{300 \text{ kg/m}^3 \cdot 0.1296 \text{ m}^2} = 0.67 \text{ m} = 67 \text{ cm}$$

En el Apéndice A se encontraran las curvas de diseño para el cálculo de los parámetros mostrados en esta sección.

2. Diseño de un ciclón:

El dimensionamiento del ciclón y tuberías para una planta de termogasificación, el hecho en base a la experiencia sueca en gasificación, específicamente - tomado de la Ref. 12 .

Para calcular la dimensión principal del ciclón, es to es, su mayor diámetro (D), (Ver figura N° 4.1.), es necesario dar la velocidad de entrada al ciclón - que según Ref. 12 debe ser de 15 m/s. Conocido dicho diámetro, pueden ahora ser calculadas las - otras dimensiones ya que estas están en función - del diámetro D, como lo muestra la siguiente ta bla:

D I M E N S I O N E S		
h	=	2D
H	=	4D
b	=	D/4
a	=	D/2
s	=	5/8D
Z	=	2D
B	=	D/4
De	=	D/2

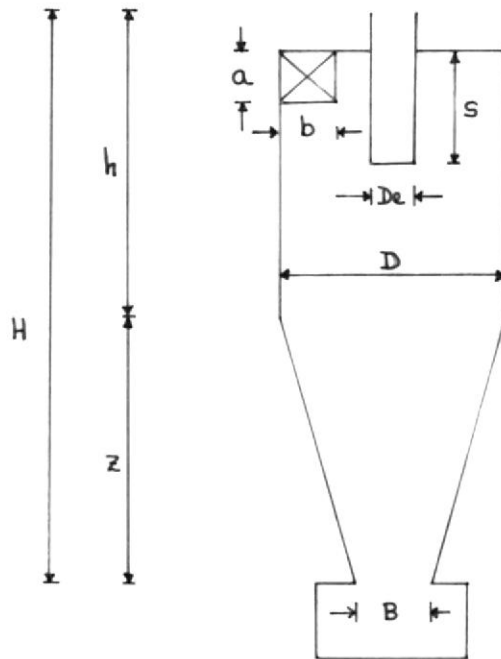


FIGURA N° 4.1. ESQUEMA BASICO DEL CICLON

$$\text{Area de entrada } (A_{in}) = a \times b = \frac{D^2}{8}$$

$$\text{Velocidad de entrada } (\mu_{in}) = \frac{w_g T_{in}/T_o}{D^2/8} \quad (1)$$

Donde:

w_g = caudal de gas (Nm^3/s): del diseño del gasificador,

$$w_g = 58 \text{ Nm}^3/\text{hr}$$

T_{in} = temperatura de entrada ($^{\circ}\text{K}$) ; asumir $T_{in} = 673^{\circ}\text{K}$

De (1) :

$$D = 2 \sqrt{\frac{2 w_g T_{in}/T_o}{\mu_{in}}} \rightarrow D = 2 \sqrt{\frac{2 \times 58 / 3600 \times 673 / 273}{15}} = 0.145 \text{ m.}$$

$$D = 145 \text{ mm.}$$

Consecuentemente:

$$h = 290 \text{ mm.}$$

$$H = 580 \text{ mm.}$$

$$b = 36.25 \text{ mm.}$$

$$a = 72.50 \text{ mm.}$$

$$b = 40.625 \text{ mm.}$$

$$Z = 290 \text{ mm.}$$

$$B = 36.25 \text{ mm.}$$

$$D_e = 72.50 \text{ mm.}$$

Como la entrada de gas es realizada a través de una tubería de sección circular, su diámetro se lo calcula de la siguiente manera (áreas equivalentes):

$$A = A_o \rightarrow a \times b = \frac{\pi d^2}{4} \quad d = 2 \sqrt{\frac{a \times b}{\pi}} = 2 \sqrt{\frac{(72.5)(36.25)}{3.1416}} =$$

$$57.9 \text{ mm} \approx 2.28''$$

Como en el mercado no hay tubería de esta dimensión, se usará tubería de 2" (diámetro interior).

En el Apéndice N° B , está dibujado el ciclón con

las normas técnicas correspondientes.

3. Selección del Soplador:

En la planta de termogasificación de esta tesis, se usa un soplador para hacer ingresar aire necesario para que tenga lugar el proceso de oxidación dentro del crisol.

Sea:

Δh_a = la caída de presión total en cm aire

G_a = el caudal de aire (Nm^3/hr)

γ_a = el peso específico del aire (kgf/Nm^3)

La potencia total del soplador se calcula mediante:

$$(\text{Pot})_I = \gamma_a G_a \Delta h_a \quad (1)$$

$$\text{como } \gamma_a = \rho_a g \quad (2) \quad , \quad \Delta h_a \cdot \gamma_a = \Delta h_w \gamma_w \quad (3) \quad \text{y}$$

$$\gamma_w = \rho_w g \quad (4)$$

Donde:

ρ_a = densidad del aire (Kg/Nm^3)

Δh_w = caída de presión total en centímetro de agua

γ_w = peso específico del agua (Kg_f/Nm^3)

De (1), (2), (3) y (4), se obtiene la expresión final para calcular la potencia necesaria para ventilar - un cierto caudal de aire, siendo esta:

$$(P_{ot})_I = \rho_a g \cdot G_a \frac{\Delta h_w \rho_w g}{\rho_a g} = G_a \Delta h_w \rho_w g$$

$$(P_{ot})_I = G_a \Delta h_w \rho_w \times g$$

Considerando un caudal máximo de aire de $G_a = 100 \text{ Nm}^3/\text{hr}$ y una caída de presión que el ventilador debe vencer de $\Delta h_w = 40 \text{ cm H}_2\text{O}$. (Ref. 12):

$$(P_{ot}) \{ \text{kw} \} = 100 \frac{\text{Nm}^3}{\text{hr}} \cdot 40 \text{ cm H}_2\text{O} \times \left(\frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}} \right) \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{Nm}^3}$$

$$\times 9.8 \frac{\text{m}}{\text{seg}^2} \times \frac{1 \text{ hr}}{3600 \text{ seg}} \times \frac{1 \text{ kw}}{10^3 \text{ w}} =$$

$$(P_{ot})_I \{ \text{kw} \} = 0.109 \text{ kw}$$

Tomando una eficiencia del ventilador (η_v) igual a 70 %, entonces la potencia del motor debe ser:

$$\eta_v = \frac{(Pot)_I}{(Pot)_r} \rightarrow (Pot)_r = \frac{(Pot)_I}{\eta_v} = \frac{0.109}{0.70} = 0.156 \text{ kw}$$

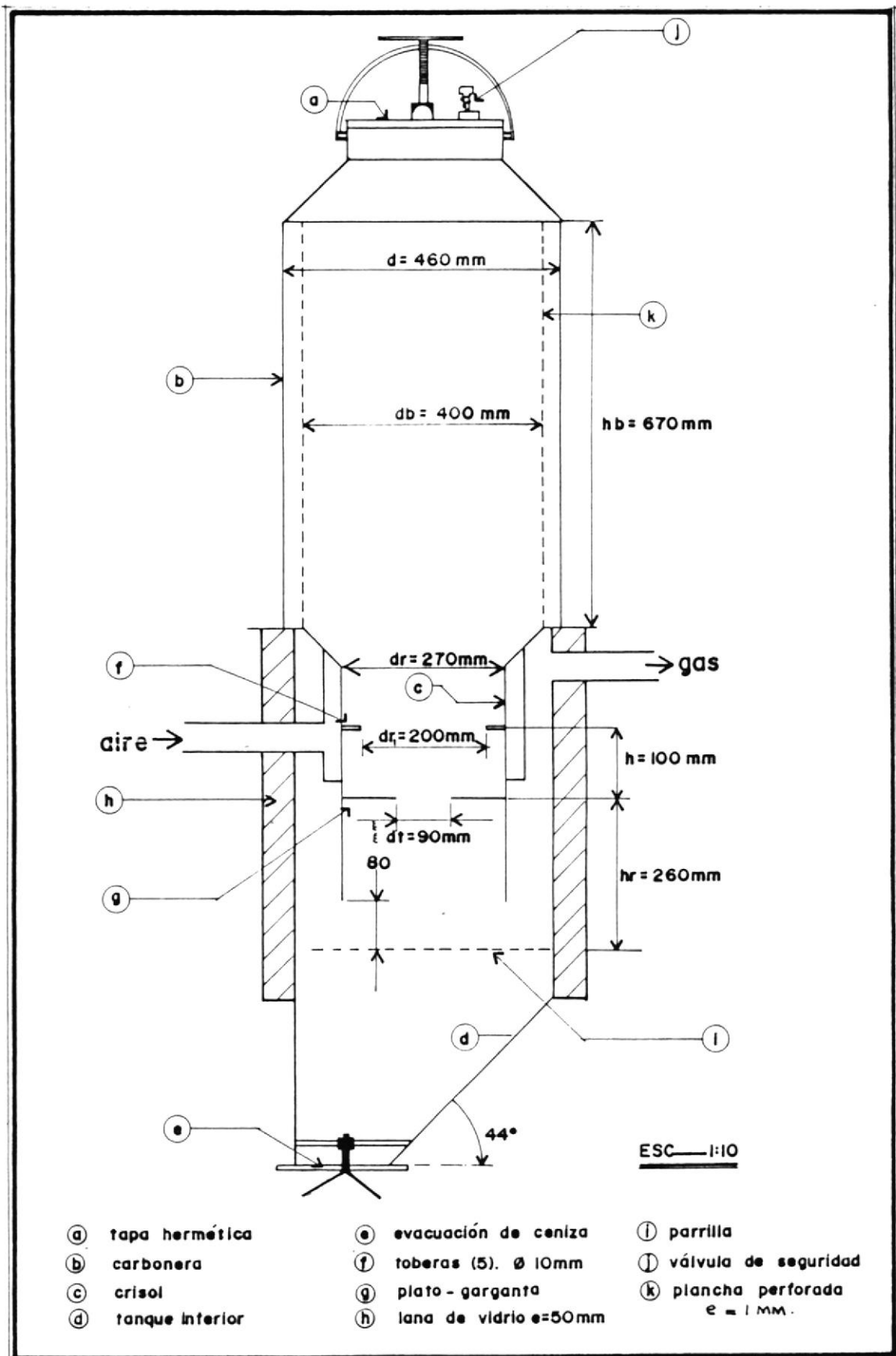
$$(Pot)_R = 0.156 \text{ kw} \times \frac{1 \text{ HP}}{0.7457 \text{ kw}} = 0.21 \text{ HP} \approx 1/4 \text{ HP}$$

$$(Pot)_R = 1/4 \text{ HP}$$

4.3. ESQUEMA DEL GASIFICADOR

El esquema que a continuación se mostrará, representa el gasificador de flujo descendente con doble garganta recomendado para operar con madera y que esta en la posibilidad de entregar 20 kw de potencia al eje de un motor. (Para mayor detalle sobre el dimensionamiento del equipo remítase a la sección 4.2.).

En el Apendice B, se presentan los planos del termo gasificador.



C A P I T U L O V

CONSTRUCCION E INSTRUMENTACION

5.1. PASOS A SEGUIR EN LA CONSTRUCCION DEL GASIFICADOR

Desde el punto de vista construccional, un sistema gasificador ciclón - soplador requiere basicamente de planchas de hierro de diferentes espesores, tuberías, aislante térmico y un ventilador.

El equipo fue construído de acuerdo a las especificaciones de diseño mostradas en la sección 4.2. Este gasificador es del tipo descendente, diseñado para operar con bloques pequeños de madera de bajo contenido de humedad, provisto de una doble garganta en el crisol y cinco toberas a la altura del mismo.

Su construcción fue integramente hecha en planchas de hierro (plancha negra), excepto las toberas y la

válvula de desfogue que se hicieron en acero de -
transmisión.

El conjunto gasificador - ciclón se hizo en un taller mecánico local con mano de obra calificada y con experiencia.

El equipo está formado basicamente de:

1. El Termogasificador, que está compuesto a su vez de:
un cilindro inferior, dentro del cual se asienta -
el crisol con un plato - garganta y las toberas; una
parrilla inferior localizada debajo del crisol hecha
de varillas cuadradas; un tronco de cono inferior
para recolección de cenizas; un cilindro superior -
llamado también carbonera, provisto de una tapa -
apropiada sobre la cual se instaló una válvula de
seguridad; una canastilla perforada que se coloca -
dentro de la carbonera; una camisa de aire coloca-
da alrededor del crisol; y una capa de aislante -
térmico (lana de vidrio) que cubre el tanque infe-
rior.
2. El filtro ciclón, construido en plancha de hierro
de poco espesor, basado en las dimensiones dadas -

en la sección 4.2., fue instalado a la salida - del gasificador y además está provisto de un tubo de salida que termina en un mechero vertical simple.

3. La estructura de soporte que está hecha con tubos y ángulos apropiados para soportar el peso del - equipo. Esta estructura está soldada al cilindro - inferior.
4. Una escalera simple soldada a la estructura de so porte que permite la facil y segura alimentación de la madera.
5. Un soplador de aire seleccionado en base a la po tencia requerida para manejar un cierto caudal de aire (sección 4.2) y comprado en un almacén de la localidad.

En cuanto al proceso mismo de CONSTRUCCION DEL GASIFI CADOR, se incluirá a continuación los pasos seguidos en dicho proceso, además en el Apéndice C , se pre sentan algunas fotos que complementan esta información.

- Compra de materiales a usar, básicamente planchas ne

gras de diferentes espesores, tuberías y un ventilador (1/4 HP).

Tiempo empleado = 1 día

- En el proceso de construcción se procedió en primer lugar a dibujar los moldes (en cartulina) del tronco de cono inferior (Ver figura N° C-1) y del tronco de cono del crisol que hace de primera garganta (ver figura N° C-2) para que luego los operarios realicen los cortes y rolados respectivos de dichas figuras - en las planchas de hierro.

Tiempo empleado : 1 día

- Teniendo como base los troncos de conos ya contruídos, se procedió a hacer el corte y rolado de los cilindros superior (ver figura N° C-3), inferior(ver figura N° C-4) y del crisol (ver figura N° C-5) para proceder a unirlos con sus respectivos troncos de cono utilizando para ello soldadura eléctrica con electrodo 6011.

Tiempo empleado: 2 días

- Después de esto, se prefirió fijar sobre el cilindro inferior, la estructura de tubos que hará de soporte a

todo el equipo (ver figura N° C-6), ya que se consigue principalmente mayor facilidad en desarmar el equipo cuando se lo requiera.

Tiempo empleado: 1 día

- Se cortó y roló el cilindro perforado a él una "ceja para recolección de condensado (ver figura N° C-7). En este mismo día se cortó y dió la forma del plato que hace de segunda garganta; además se hicieron las cinco toberas de acero de transmisión (ver figura N° C-8).

Tiempo empleado: 1 día.

- Construyeron las bridas (tres), utilizando un torno para realizar el maquinado respectivo y la taladora eléctrica para hacer las doce perforaciones por las cuales, mediante pernos se juntarán las tres - piezas principales del gasificador (ver figuras N°s. C-9 y C-10).

Tiempo empleado: 2 días.

- Se adaptó la cámara de aire soldándola al crisol -

(ver figura N° C-11) además se incorporó a la estructura de soporte una escalerilla para facilitar el ingreso del combustible al gasificador (ver figura N° C-12).

Tiempo empleado: 1 día.

- Se instaló sobre la base de la estructura, el ventilador, para luego realizar las conexiones mediante tuberías de dos pulgadas desde el ventilador hasta la cámara de aire (ver figura N° C-13).

Tiempo empleado: 2 días.

- Se construyó el ciclón que luego fue montado a la tubería de salida del gasificador (ver figura N° C-14).

Tiempo empleado: 1 día

- Se hizo la tapa buscando un sello hermético y sobre la misma se adaptó una válvula de desfogue para posibles aumentos de presión dentro del gasificador. Ver figura C-15.

Tiempo empleado: 1 día.



- En este último día se juntaron todas las partes del equipo y se procedió a pintar con pintura anticorrosiva; además se colocó alrededor del cilindro inferior una capa de dos pulgadas de aislante térmico (lana de vidrio) (ver figura N° C-16).

Tiempo utilizado: 1 día

En cuanto a los instrumentos utilizados para medir los parámetros operacionales que servirán para realizar los cálculos respectivos tenemos:

1. Aparato de Orsat, analizadores portátiles Fyrite, cromatógrafo de gases: equipos usados para medir la concentración volumétrica de los gases que componen la mezcla gaseosa.
2. Termocupla tipo K: instrumento que sirvió para medir - las temperaturas superficiales del gasificador, y la temperatura de salida del gas pobre (antes del ciclón).
3. Velocímetro: Equipo utilizado para determinar la velocidad del aire en la tubería de succión del ventilador.
4. Balanza Romana: Aparato que determinó el peso de com

bustible ingresado al gasificador, así como también el peso de cenizas, hollín y residuos sólidos obtenidos al finalizar el proceso de gasificación.

En la referencia 7 , se presenta una breve descripción de los instrumentos indicados, así como también se han incluido fotografías de los mismos.

5.2. MATERIALES A UTILIZARSE Y COSTOS

En esta sección se incluirán exclusivamente dos rubros: el primero se refiere a la lista de materiales usados en la construcción del sistema gasificador - ciclón - soplador con sus respectivos costos.

Dichos materiales fueron comprados en su totalidad en almacenes, comerciales, ferreterías, etc., de la ciudad sin haberse presentado ningún contratiempo, ya que todos ellos estaban disponibles en el mercado.

El segundo rubro incluye los tipos de trabajos hechos - con los consiguientes costos de la mano de obra calificada.

M A T E R I A L E S

CANT.	DESCRIPCION	COSTO UNIT.	COSTO TOTAL
1	Plancha negra de 2.44 m x 1.22 m x 3.175 mm.	3.300,00	3.300,00
1	Plancha negra de 2.44m. x1.22 m. x 4.7625 mm.	4.700,00	4.700,00
1/2	Plancha negra de 2.44m.x1.22 m. x 10 mm.	12.000,00	6.000,00
1	Plancha negra perforada de 2.44m. x 1.22m x 1mm.	4.500,00	4.500,00
1/4	Plancha negra corrugada de 2.44m. x 1.22m x 4 mm.	4.000,00	1.000,00
20 kg	Soldadura 6011	250,00	5.000,00
1	Torta de Ø 0.3 m x 12 mm.	800,00	800,00
3	Codos de Ø 50 mm.	300,00	900,00
1	Codo de Ø76 mm.	1.200,00	1.200,00
1	Unión Universal de Ø50 mm.	1.100,00	1.100,00
1	Reductor de Ø 76 mm a Ø50 mm	800,00	800,00
1 kg	Pernos de Ø13 mm x 50 mm	248,00	248,00
0.85kg	Acero de Transmisión circular de Ø16mm	125,00	106,00
2 kg	Acero de transmisión exagonal de 25 mm.	265,00	530,00
1/2	Plancha negra de 0.8 mm.	800,00	400,00
1/3m	Tubo de Ø 152 mm.	1.200,00	400,00
1m	Tubería de Ø50 mm.	1.600,00	1.600,00
4m	Tubo de Ø 19 mm.	450,00	1.800,00
1m	Platina de Ø 12mm	700,00	700,00
3m	Lana de vidrio	500,00	1.500,00
1	Ventilador de 1/4 HP	10.812,00	10.812,00
1/4 l	Laca azul	2.400,00	600,00
1 l.	Esmalte negro	437,00	437,00
1 gal.	Pintura anticorrosiva rojo-oxido	1.104,00	1.104,00
	Varios.....	5.000,00	5.000,00
T O T A L :			S/.54.537,00

M A N O D E O B R A

TIPO DE TRABAJO	TIEMPO EMPLEADO	COSTO POR HORA	COSTO TOTAL
Corte	17 horas	235,00	4.000,00
Rolado	11 horas	545,00	6.000,00
Soldado	20 horas	750,00	15.000,00
Maquinado	18 horas	667,00	12.000,00
Ensamblado	34 horas	250,00	8.500,00
Pintado	4 horas	250,00	1.000,00
TOTAL:	104 horas(13 días)		S/.46.500,00

R E S U M E N

C O N C E P T O	C O S T O
Materiales	S/.49.537,00
Varios	" 5.000,00
Mano de Obra	" 46.500,00
T O T A L :	S/.101.037,00

Hay que hacer notar que los costos por hora de cada uno de los tipos de trabajo realizados son solo aproximados y obtenidos en base al tiempo que tomó cada operario en hacer su trabajo y cuanto recibió por él, ya que en la práctica se cobra por el trabajo global cuyo costo es dado por el maestro, dueño del taller el cual a su vez paga a sus operarios.

C A P I T U L O VI

PRUEBAS EXPERIMENTALES

6.1. DESCRIPCION

El termogasificador fue probado exclusivamente con madera troceada de 5 cm. de dimensión promedio y obtenidas de lugares cercanos a Guayaquil.

La madera antes de ser usada fue secada al aire libre hasta obtener un rango de humedad entre 12 y 20%.

Los datos a tomarse para poder calcular la eficiencia de conversión del combustible (madera) a gas pobre son básicamente los siguientes:

- a. Condiciones ambientales: Presión y Temperatura
- b. Consumo de combustible
- c. Velocidad promedio del aire a la entrada del ventilador
- d. Concentración de gases.

- e. Temperatura de salida de los gases
- f. Temperaturas en la superficie exterior del gasificador
- g. Peso del residuo sólido
- h. Tiempo de operación

Con los datos arriba mencionados y los valores obtenidos en las referencias adecuadas, se pudo lograr el objetivo anteriormente planteado.

Para mayor información, las tablas de datos experimentales están reportadas en el Apéndice D.

A continuación se indican los pasos seguidos durante las pruebas experimentales:

1. Se hicieron seis pruebas experimentales de tipo cualitativo.- Estas fueron necesarias para evaluar la operación del gasificador para diferentes caudales de aire, ya que es éste el parámetro operacional más importante el cual determina la "bondad" en la producción del gas pobre (caudal de gas).

Se observó que entre $30 \text{ Nm}^3/\text{hr}$ y $40 \text{ Nm}^3/\text{hr}$, la operación era satisfactoria, ya que se controló no sólo la producción de gas, sino también la presencia de gases combustibles utilizando para ello un quemador

simple el cual mantenía prendida la llama aproximadamente 3/4 del tiempo de operación previsto. Para un caudal de aire menor, la presencia de la llama era muy discontinua; en cambio para un caudal mayor, no encendía el gas precisamente por la no producción de gases combustibles. Esto último se debe al ingreso al crisol de demasiado aire, lo cual favorecía las reacciones de combustión eliminando por otro lado, las reacciones de reducción de la madera que son precisamente las que generan los gases combustibles. En este momento el gasificador deja de ser tal, para convertirse en un simple horno, es decir genera calor y produce gases incombustibles.

2. Se procedió a probar el gasificador en forma definitiva para obtener los datos cuantitativos mencionados al inicio de esta sección.

Para realizar las pruebas se siguió el siguiente procedimiento:

- a. Carga parcial de la madera
- b. Encendido del combustible
- c. Pocos minutos después prender el ventilador para mejorar la combustión.

- d. Carga de la madera restante. Antes apagar el ventilador.
- e. Colocar la tapa del gasificador, observando que no haya fugas de los gases a través de las bridas y de la misma tapa.
- f. Prender el ventilador definitivamente y regular la entrada de aire hasta conseguir el caudal de aire propicio para la buena operación del gasificador.
- g. Esperar unos minutos y luego probar la presencia de gases combustible en el quemador utilizando para ello una antorcha.
- h. En el momento de la presencia de la llama, comenzar a tomar lecturas cada cierto tiempo de los parámetros experimentales tales como, temperaturas, concentración de gases, velocidad de aire, etc.
- i. Consumida la madera, lo cual se verifica con la no presencia de gases a la salida del quemador, apague el ventilador.
- j. Esperar se enfrie el equipo, para determinar el peso de residuos sólidos abriendo para ello la tapa inferior del gasificador. Retirar la ceniza depositada en la caja recolectora del ciclón. Pesar estos residuos.
- k. Desmontar el equipo para la limpieza interior correspondiente. Luego armar el gasificador, el cual estará listo para la siguiente prueba.

6.2. CONCENTRACION DE GASES

Para determinar los valores de concentración de los gases que componen el gas pobre, se uso un aparato de Orsat que mide directamente los porcentajes de CO_2 , O_2 y CO en volumen. Para encontrar los porcentajes correspondientes de H_2 , N_2 y vapor de H_2O se recurrió a la ecuación de combustión de la madera asumiendo para ello la no formación de CH_4 durante las reacciones químicas. Esto trae como consecuencia que las concentraciones de H_2 , N_2 y H_2O tengan un pequeño margen de error.

Se intento hacer un análisis completo y directo de los gases usando un cromatógrafo de gases, pero no fue posible por no haber conseguido los repuestos que se necesitaban para habilitar dicho aparato.

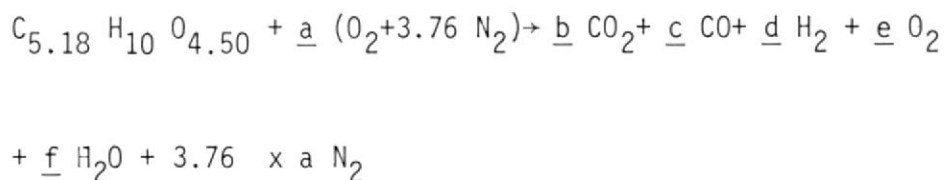
Con estos antecedentes, se presentará a continuación - los cálculos para hallar las concentraciones de H_2 , N_2 y vapor de H_2O , tomando como datos los siguientes:

- % CO_2 (promedio) = 11.4 (pruebas)
- % O_2 (promedio) = 1.3 (pruebas)
- % CO (Promedio) = 16.3 (pruebas)

- Composición de la madera con 15 % de humedad = 42.9%C -
6.9% H - 49.7% O (Ref. 6).

La fórmula química para esta madera obtenida en base al dato anterior es: $C_{5.18} H_{10} O_{4.50}$

Ecuación de Combustión:



Ecuaciones de concentraciones molares de los gases:

CO_2 , O_2 y CO :

$$(CO_2) = \frac{b}{N_T} = 0.114$$

$$(O_2) = \frac{e}{N_T} = 0.013$$

$$(CO) = \frac{c}{N_T} = 0.163$$

Donde N_T = número de moles totales de los gases de salida.

CALCULOS ARITMETICOS:

$$\frac{b}{c} = \frac{0.114}{0.163} ; b + c = 5.18 \rightarrow b = 2.13 \quad y \quad c = 3.05$$

$$\frac{c}{N_T} = 0.163 \rightarrow N_T = 18.71$$

$$\frac{\ell}{N_T} = 0.013 \rightarrow \ell = 0.24$$

De la ecuación de combustión tenemos:

$$2d + 2f = 10 \rightarrow d + f = 5 ; N_T = b+c+\ell + (d+f) + 3.76 \times a \rightarrow a = 2.20$$

$$4.50 + 2a = 2b + c + 2\ell + f \rightarrow f = 1.11$$

$$d + f = 5 \rightarrow d = 3.89$$

Ecuaciones de concentraciones molares de los gases H_2 , N_2 y H_2O :

$$(H_2) = \frac{d}{N_T} = \frac{3.89}{18.71} \rightarrow (H_2) = 0.208$$

$$(N_2) = \frac{3.76 \times a}{N_T} = \frac{3.76 \times 2.20}{18.71} \rightarrow (N_2) = 0.442$$

$$(H_2O) = \frac{f}{N_T} = \frac{1.11}{18.71} = 0.059$$

En resumen, las concentraciones en volumen promedio de

los gases de salida son:

$$\% \text{CO}_2 = 11.4$$

$$\% \text{O}_2 = 1.3$$

$$\% \text{CO} = 16.3$$

$$\% \text{H}_2 = 20.8$$

$$\% \text{N}_2 = 44.2$$

$$\% \text{H}_2\text{O} = 5.9$$

6.3. PODER ENERGÉTICO DEL GAS QUE RESULTA DEL COMBUSTIBLE SÓLIDO

Si el análisis de los gases es conocido, es decir su composición y la respectiva concentración de cada uno de ellos, el poder energético llamado también poder calorífico puede ser calculado con la ayuda de la tabla D-7 por simple proporción. La densidad promedio de los gases puede ser calculado utilizando el mismo procedimiento.

A continuación se presenta el cálculo tanto del poder calorífico del gas pobre como de su densidad, ya que este último resultado nos servirá como un dato importante en la sección 6.4:

CONCENTRACION DE GASES (%)	PODER CALORIFICO (k cal/Nm ³)	DENSIDAD (kg/Nm ³)
CO ₂ = 11.4		0.114x1.977=0.225
O ₂ = 1.3		0.013x1.429=0.019
CO = 16.3	0.163x3020=492.26	0.163x1.250=0.204
H ₂ = 20.8	0.208x2570=534.56	0.208x0.090=0.019
N ₂ = 44.2		0.442x1.251=0.553
	TOTAL: 1.026,82	TOTAL : 1,020

6.4. ANALISIS DE RESULTADOS

El número más importante para determinar la operación técnica de un sistema de gasificación es la eficiencia de gasificación.

Hay que diferenciar los dos tipos de eficiencia que se usan comunmente en gasificación. Cuando el gas pobre es usado en motores, la definición de eficiencia llamada también eficiencia en frío queda así:

$$\eta_g (\text{frío}) = \frac{H_g \times w_g}{H_f \times q_f} \times 100 (\%)$$

Donde:

$H_g =$ poder calorífico del gas (kJ/Nm^3)

$w_g =$ caudal de gas (Nm^3/hr)

$H_f =$ poder calorífico del combustible biomásico (kJ/kg)

$q_f =$ flujo másico del combustible biomásico (kg/hr)

En el caso de que el gas se use directamente para combustión, por ejemplo en un horno, la eficiencia de gasificación llamada eficiencia en caliente, se define - como sigue:

$$\eta_{g(\text{caliente})} = \frac{H_g \times w_g + w_g \times \rho_g \times C_{p_g} \times \Delta T}{H_f \times q_f} \times 100 (\%)$$

$\rho_g =$ densidad del gas pobre (kg/Nm^3)

$C_{p_g} =$ calor específico del gas pobre ($\text{kJ}/\text{kg}^\circ\text{K}$)

$\Delta T =$ diferencia de temperatura entre el gas a la toma del quemador y el combustible biomásico que ingresa al gasificador.

A continuación se presenta el procedimiento seguido para hallar tanto la eficiencia en frío como en caliente:

$$\% N_2 \text{ aire} \times w_a = \% N_2 \text{ gas} \times w_g$$

$$\% N_{2\text{aire}} = 79$$

$$w_a (\text{caudal de aire}) = 36 \text{ Nm}^3/\text{hr} (\text{pruebas})$$

$$\% N_2 \text{ gas} = 44.2 (\text{sección 6.2})$$

$$w_g = \frac{\% N_2 \text{ aire}}{\% N_2 \text{ gas}} \times w_a = \frac{79}{44.2} \times 36 = 64.3 \text{ Nm}^3/\text{hr}$$

$$H_g = 1026.82 \frac{\text{k cal}}{\text{Nm}^3} \times \frac{4.18 \text{ kJ}}{1 \text{ k cal}} = 4292 \frac{\text{kJ}}{\text{Nm}^3} (\text{sección 6.3})$$

$$q_f = 26.6 \text{ kg/hr} (\text{pruebas})$$

$$H_f = 19 - 21.4 F \left(\frac{\text{Mj}}{\text{kg}} \right) (\text{Ref.6}) \rightarrow H_f = 19 - 21.4(0.15) = 15.8 \frac{\text{Mj}}{\text{kg}} \times$$

$$\frac{10^3 \text{ kJ}}{1 \text{ Mj}} = 15800 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Donde:

F = humedad de la madera

$$\rho_g = 1.020 \text{ kg/Nm}^3 (\text{sección 6.3})$$

$$C_{pg} = 0.28 \frac{\text{k cal}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \times \frac{4.18 \text{ kJ}}{1 \text{ k cal}} = 1.1704 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} (\text{Ref.6})$$

$$T_g (\text{Temperatura de salida de los gases}) = 568^\circ\text{C} \quad (\text{Pruebas})$$

$$T_a (\text{Temperatura ambiental}) = 28^\circ\text{C} (\text{Pruebas})$$

$$\Delta T = T_g - T_e = 568 - 28 = 540^\circ\text{C}$$

$\Delta T = 540^\circ\text{C}$

$$\eta_g(\text{frío}) = \frac{4292 \text{ kJ/Nm}^3 \times 64.3 \text{ Nm}^3/\text{hr}}{15800 \text{ kJ/kg} \times 26.6 \text{ kg/hr}} =$$

$$\frac{275975.6}{420280.0} \rightarrow \eta_g(\text{frío}) = 66 \%$$

$$\eta_g(\text{caliente}) = \frac{275975.6 \text{ kJ/hr} + 64.3 \text{ Nm}^3/\text{hr} \times 1.020 \text{ kg/Nm}^3 \times 1.1704 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} \times 540^\circ\text{C}}{420.280.0 \text{ kJ/hr}}$$

$$= \eta_g(\text{caliente}) = 75.5\%$$

Según referencia 10, el valor de $\eta_g(\text{frío})$ puede variar entre el 60 y e. 75 %. En los casos de aplicaciones térmicas, el valor de $\eta_g(\text{caliente})$ puede alcanzar hasta el 93 %.

Estos valores dependerán del tipo de construcción y forma de operar el gasificador, así como también de las propiedades del combustible.

Finalmente se ha creído conveniente presentar aquí, una tabla que reúna todos los datos y resultados de las pruebas realizadas, para que se pueda hacer en ella un análisis de tipo energético.

CONDICIONES AMBIENTALES:

Presión	763.7 mm Hg
Temperatura	28°C

COMBUSTIBLE (MADERA):

Contenido de humedad	15 %
Poder calorífico inferior	15.8 Mj/kg
Forma	Bloques
Tamaño promedio	5 cm
Consumo	26.6 kg/hr

AIRE:

Caudal	36Nm ³ /hr
Relación aire-combustible	1.75 kg/kg

GASES:

Caudal	64.3 Nm ³ /hr
Relación gas- combustible	2.42Nm ³ /kg
Composición	CO ₂ = 11.4%
	O ₂ = 1.3%
	CO = 16.3%
	H ₂ = 20.8%
	N ₂ = 44.2%
	H ₂ O = 5.9%
Poder calorífico	4.292 Mj/Nm ³
Temperatura de salida	568°C

BALANCE DE ENERGIA:

Término de entrada:	
Energía química de la madera	420.28 Mj/hr
Términos de salida:	
Energía química de los gases	275.98 Mj/hr
Energía sensible de los gases	41.45 Mj/hr

Energía Química de los residuos	31.58 Mj/hr
Energía Térmica (pérdidas) (por diferencia)	71.27 Mj/hr
Eficiencia del gas frío	65.6%
Eficiencia del gas caliente	75.5%

Del análisis de esta tabla se obtienen los siguientes resultados que pueden servir como guía para trabajos posteriores en gasificación:

1. 1 kg de madera con 15 % de humedad produce un rendimiento de gas pobre de $2.42 \text{ Nm}^3/\text{hr}$.
2. Para producir este volumen de gas pobre (2.42 Nm^3), el gasificador absorbe 1.35 Nm^3 de aire.
3. Para que lo anterior ocurra, la velocidad de ingreso (toberas) deberá ser de 25.5 m/s.
4. El poder calorífico del gas es de 4292 kJ/Nm^3 .
5. Para poder ser usado el gas pobre en M.C.I., este tiene que mezclarse con un volumen equivalente de aire, razón por la cual el poder calorífico de la mezcla - gas pobre - aire en el mezclador es 2146 kJ/Nm^3 .
6. 1 kg de madera genera aproximadamente 2.86 kw-hr de energía

térmica (debida sólo a la energía térmica de los gases); o 0.72 kw - hr de energía mecánica (asumiendo una eficiencia total del motor del 25 %). Lo anterior se puede escribir también como:

$$0.36 \frac{\text{kg}}{\text{kw-hr}(\text{térmica})} \text{ o } 1.38 \frac{\text{kg}}{\text{kw-hr}(\text{mecánica})}$$

7. La eficiencia de conversión de la madera a gas pobre cuando éste último fuera usado para fines térmicos es del 76 %. En cambio dicha eficiencia para aplicaciones de fuerza motriz (M.C.I.) es del 66 %, siendo más baja que la anterior ya que el gas debe enfriarse y con ello no se aprovecha el calor sensible que corresponde al 10 % de la energía inicial.

CAPITULO VII

APLICACIONES DEL GAS POBRE PRODUCIDO EN UN TERMOGASIFICADOR

7.1. GENERALIDADES

El aprovechamiento del gas pobre está orientado hacia - dos aplicaciones fundamentales, no sólo a gran escala como lo es el sector industrial, sino también a pequeña escala, que encuentra su razón de ser principalmente en la zona rural de nuestro país. Estas aplicaciones son:

1. Planta de fuerza motriz con ciclo otto, ciclo diesel, turbina a gas; éste último no desarrollado aun en comparación con los dos primeros ciclos.
2. Utilización directa, es decir quema directa del gas pobre producido.

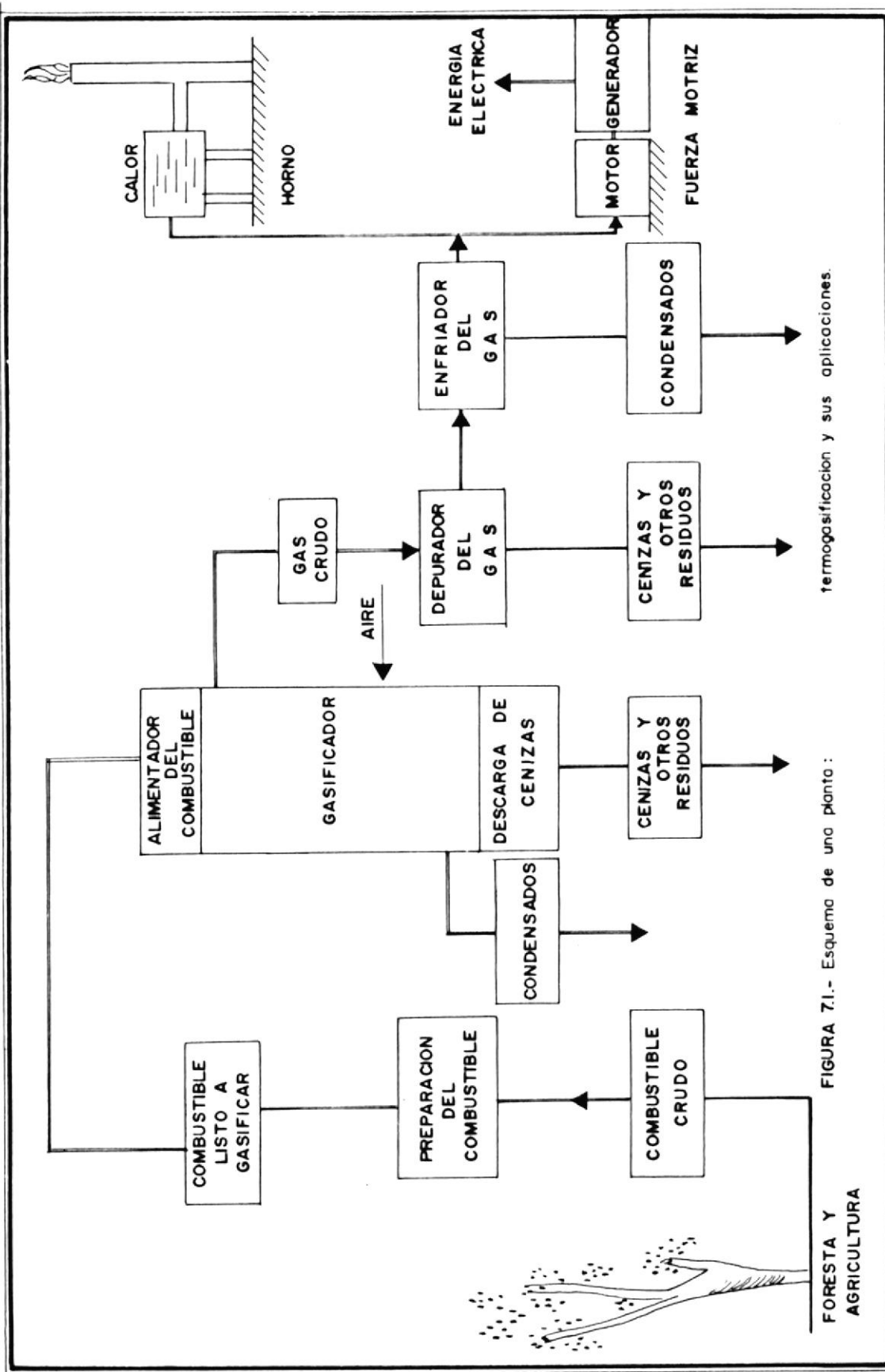
En aplicaciones a pequeña escala, los motores de como



bustión interna que trabajan con gas pobre, pueden ser usados para mover pequeñas bombas de riego que requieren pocos kw de potencia, en molinos de maíz y arroz, en plantas generadoras de electricidad para pueblos cuya demanda de este tipo de energía sea baja, en vehículos para usos forestales (tractores), autos, camiones, etc.

En cuanto a la quema directa se refiere, el gas pobre puede ser utilizado adecuadamente como combustible para quemarlo directamente, por ejemplo: En un hogar mediante el uso de un quemador especialmente diseñado para gas pobre o mezclas (gas pobre - fuel oil), en un horno que pueda servir para tratamientos térmicos de metales (en este caso es aconsejable previamente purificar el gas para luego quemarlo).

Lo anteriormente escrito, resalta la gama de aplicaciones que tiene el gas obtenido de un gasificador. Sería saludable que este trabajo tenga eco en futuros proyectos relacionados al uso del gas pobre dándole mayor énfasis según mi opinión, a aplicaciones de pequeña escala y para zonas rurales. En la figura N° 7.1., se presenta en forma esquemática una planta de termogasificación, y sus dos aplicaciones más relevantes.



termogasificación y sus aplicaciones.

FIGURA 7.1.- Esquema de una planta :

A continuación se hablará en una forma más detallada acerca de las aplicaciones tanto de quema directa - (aprovechamiento térmico en hogares) como en planta de fuerza motriz (específicamente motores de combustión interna).

7.2. OPERACION PARA APROVECHAMIENTO TERMICO EN HOGARES

Se puede definir un hogar como un espacio encerrado en el que se produce calor mediante la oxidación química de un combustible.

Es importante señalar que debe existir una combinación adecuada entre hogar y quemador para proporcionar los cuatro elementos de una buena combustión:

1. Mezcla íntima del combustible y el oxidante, la cual se la obtiene mediante un quemador apropiado siendo este un dispositivo que produce la llama. Debe mezclar el combustible (gas pobre) y el agente oxidante (aire) en proporciones que se encuentren dentro de los límites de flamabilidad para el encendido, así como también para lograr una combustión constante. Existen dos tipos comunes de quemadores, los de premezcla y los directos. En los quemadores del primer

tipo, el combustible, casi siempre gas, y el oxidante se mezclan antes del encendido; en cambio en el quemador directo, la mezcla se produce en el punto de ignición o encendido.

2. Admisión de cantidades suficientes de oxidantes para quemar por completo el gas pobre.
3. Una temperatura adecuada para encender la mezcla de gas pobre y aire. Por ello es menester tener presente que existe una temperatura mínima por debajo de la cual el combustible no se enciende aunque la cantidad de aire sea la adecuada, a esta temperatura se la denomina temperatura de encendido y que a manera de ejemplo se presenta a continuación una pequeña tabla que muestra dicha temperatura para ciertos gases combustibles:

Hidrógeno (H ₂)	580 - 560° C
Monóxido de carbono (CO)	660 - 640° C
Metano (CH ₄)	750 - 650° C
Etano (C ₂ H ₆)	630 - 520° C

4. El tiempo necesario de residencia para que la combustión sea completa, este tiempo deberá ser mayor

que el tiempo de combustión, ya que de ser menor, el combustible saldría parcialmente sin quemar. Para combustible gaseoso como es el caso del gas pobre, el tiempo de residencia es menor que el de los combustibles sólidos y líquidos y es aproximadamente del orden de 10^{-3} segundos.

Una buena operación del gas pobre producido en un gasificador para aprovecharlo como energía térmica en calderos, secadores, hornos, etc., requiere únicamente de un diseño apropiado del quemador, esto es uno que trabaje eficientemente con combustibles gaseosos de bajo poder calorífico, como es el caso del gas pobre, o un quemador de sistema dual de combustible (gas pobre/fuel oil).

Esta solución es muy simple ya que puede ser adaptada a los generadores térmicos existentes. Tal solución consistiría en usar el gas generado en un termogasificador, siendo antes necesario, limpiar el gas haciéndolo pasar por un ciclón que es un elemento en el cual se hace precipitar las partículas más gruesas que dicho gas posee. Este gas está listo para ser usado directamente, teniendo cuidado de que los condensables no se condensen en la línea, además de mantener al gas caliente para así aprovechar el calor sensible de los

gases. Para ello, la mezcla gaseosa es llevada por tuberías termicamente aisladas hasta el hogar (horno, caldero, secador, etc.) de combustión, donde se quema con aire, aprovechando el calor así generado para diversos trabajos que requieran energía térmica, tales como tratamientos térmicos de metales, secado de granos, cocción de refractarios, etc.

En la figura N° 7.2., se muestra el esquema de una planta de gas pobre para aprovechamiento térmico en un hogar.

En este punto vale la pena mencionar que el trabajo que se ha empezado y el cual consiste en determinar experimentalmente cuál es el rango de operación del gasificador para obtener la mayor conversión de energía, debería ser continuado usando dicho gas para aprovecharlo en un horno por ejemplo, el cual debe ser diseñado junto a un quemador de gas pobre para que de los resultados de las pruebas pertinentes obtener información útil sobre la factibilidad de dicha aplicación.

7.3. OPERACION PARA PRODUCIR FUERZA MOTRIZ

Una de las aplicaciones más atractivas del gas pobre,

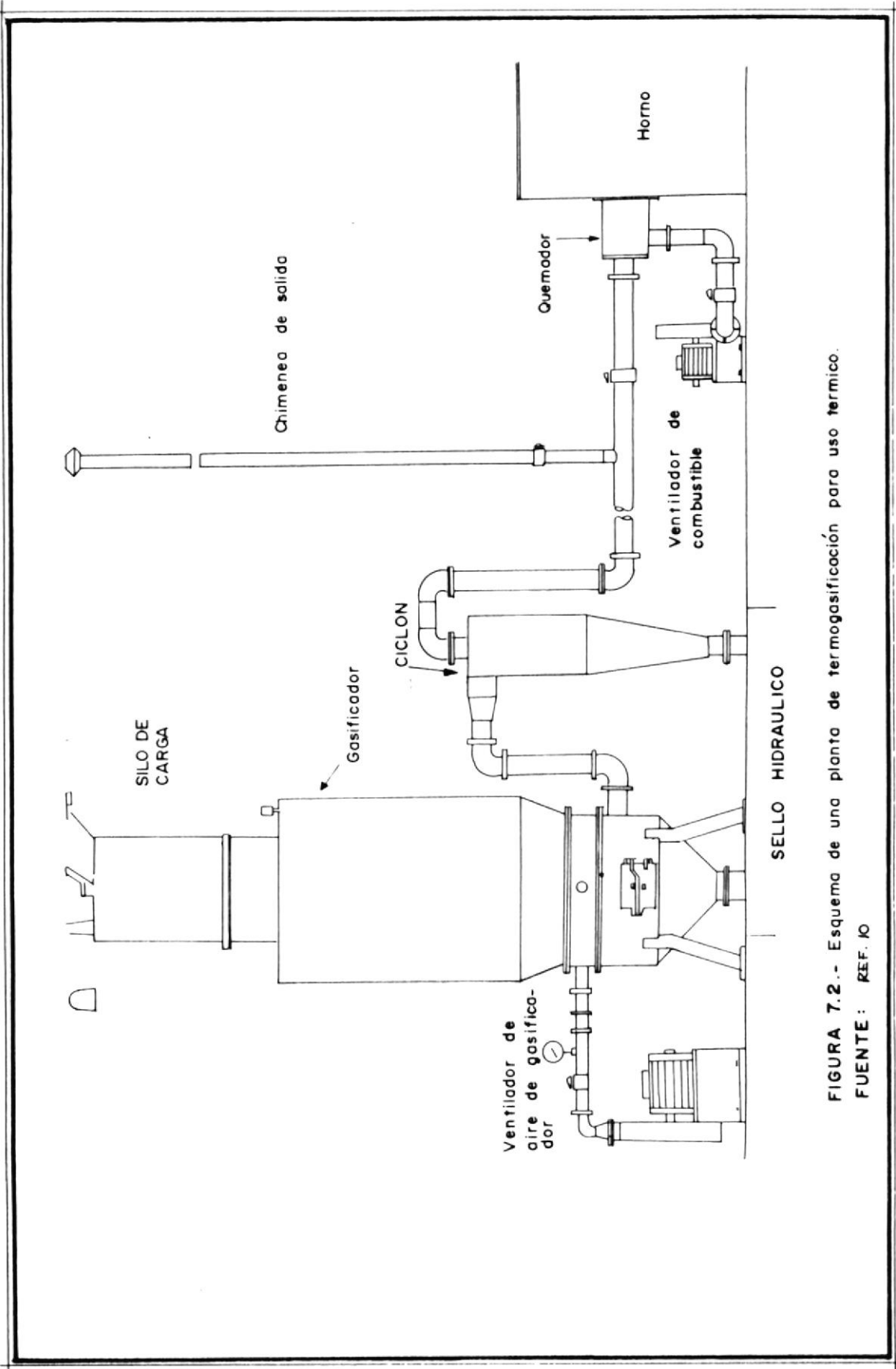


FIGURA 7.2.- Esquema de una planta de termogaseificación para uso termico.
FUENTE: REF. 10

es su uso en motores. Es así, que en el área rural - tiene un gran futuro el que pueda producirse fuerza motriz a partir de combustibles biomásicos que son producidos localmente.

En esta sección se hablará concretamente sobre los motores alternativos de combustión interna, conocidos comunmente como los motores Otto y Diesel.

Aunque el objetivo de esta tesis no es el de evaluar - el funcionamiento de un motor de combustión interna, se ha creído conveniente sin embargo, dar ciertas pautas - sobre como usar la tecnología de gas pobre en dichos motores recurriendo para esto a la literatura disponible sobre el tema (Ref. 10), y de esta manera ayudar a los futuros trabajos que se dediquen a estudiar el comportamiento de un motor usando gas pobre como combustible.

Uno de los hechos más relevantes acerca de los M.C.I. es su habilidad de operar con combustibles que no - sean aquellos para los cuales fueron diseñados y que generalmente son combustibles líquidos posibles como la gasolina y el diesel y además, con muy pocas modificacaciones. Sin embargo, es fundamental conocer las diferencias de operación cuando se usa gas pobre como com

bustible antes de intentar usar dicha tecnología en M.C.I. Por ejemplo, una mezcla de gas pobre - aire, entregada a la cámara de combustión es inferior en su contenido energético, a la mezcla gasolina - aire o diesel - aire para las cuales el motor fue diseñado. Además las propiedades físicas y químicas del gas pobre en relación a los combustibles líquidos ya mencionados son tan distintas que es necesario poseer una evaluación completa de los siguientes tópicos para así entender las diferencias operativas:

- a. Eficiencia real del motor
- b. Producción de potencia del motor.
- c. Desgaste del motor y los efectos sobre él, a largo plazo.
- d. Gases de escape del motor.

Se considera oportuno resumir las diversas definiciones de eficiencias aplicadas a un M.C.I. La eficiencia volumétrica η_v es la relación entre la cantidad de aire o de mezcla que entra efectivamente en el cilindro - por ciclo, y la cantidad de aire o mezcla teórica - que debería entrar en condiciones normales de presión y temperatura.

Este parámetro es de especial interés como medida - del rendimiento del ensamblaje válvula - pistón - cilindro. Su valor máximo oscila entre 0.70 y 0.85, según el tipo de motor.

La eficiencia térmica indicada η_t , es la relación en ← entre el trabajo realmente hecho por los pistones (trabajo indicado) y el calor suministrado por la mezcla combustible - aire. Esta eficiencia constituye un indicador de la economía del ciclo real de un M.C.I. Su valor para motores encendidos por chispa oscila entre 0.20 y 0.45 y para motores encendidos por compresión entre 0.40 y 0.65.

Finalmente, la eficiencia mecánica η_m se define como ← la relación entre la potencia desarrollada por el pistón y la potencia realmente obtenida en el eje. Este parámetro tiene en cuenta el trabajo absorbido - por los rozamientos de pistones, aros, etc., y de los órganos auxiliares propios del motor, así como el trabajo absorbido por el bombeo (aspiración y escape). El rendimiento mecánico está normalmente comprendido entre 0.8 y 0.9.

El producto η_v, η_t, η_m , constituye la eficiencia real

total del M.C.I., y ésta eficiencia combinada con la eficiencia de conversión de la biomasa a gas pobre "frio" η_c listo para ingresar al motor nos da la eficiencia global η_g de todo el sistema gasificador-enfriador - purificador - motor, esto es:

$$\eta_g = \eta_c \cdot \eta_v \cdot \eta_t \cdot \eta_m$$

La eficiencia real de conversión de los M.C.I., varía sustancialmente con el tamaño, diseño y condiciones de operación. Un valor bastante conservador es 15% para los motores a gasolina y 25 % para los motores a diesel.

En general, se puede lograr una mayor η_t con la operación a gas pobre, ya que la combustión del gas es más completa que la de los combustibles y la temperatura de la llama mucho más baja.

Con la operación a gas pobre, la η_m será menor debido a la inducción de la carga gas - aire. Además, el motor proporciona toda la succión necesaria para vencer la caída total de presión en el gasificador, sistema de purificación - enfriamiento y tuberías; esta última parte puede ser considerable y es una de las prin-

cipales causas de la baja en la η_m , ya que como la resistencia dentro del sistema de tuberías aumenta con el cubo de la velocidad media del gas, es obvio una pérdida considerable en la η_m al utilizar tubos de diámetros muy pequeños (menores a 35 mm.), conexiones largas y con muchos codos.

La η_t de un motor encendido por chispa y operado con gas pobre, se puede observar en la figura N° 7.3.

Las figuras N° 7.4. y 7.5. muestran la η_t y η_v de un motor a diesel comparado con el mismo motor pero operado con gas pobre con inyección piloto de diesel.

Un análisis sobre la eficiencia del motor es importante desde el punto de vista económico, pero se debe dar mayor atención a la caída inevitable de la potencia de un motor cuando trabaja con gas pobre. Esto se debe fundamentalmente a la composición no estable del gas pobre y a la menor densidad energética de la mezcla gas - pobre - aire.

Por ejemplo, para una composición típica del gas pobre de 27 % CO, 14 % H₂, 3% CH₄ y 4.5%CO₂ y 51.5% N₂

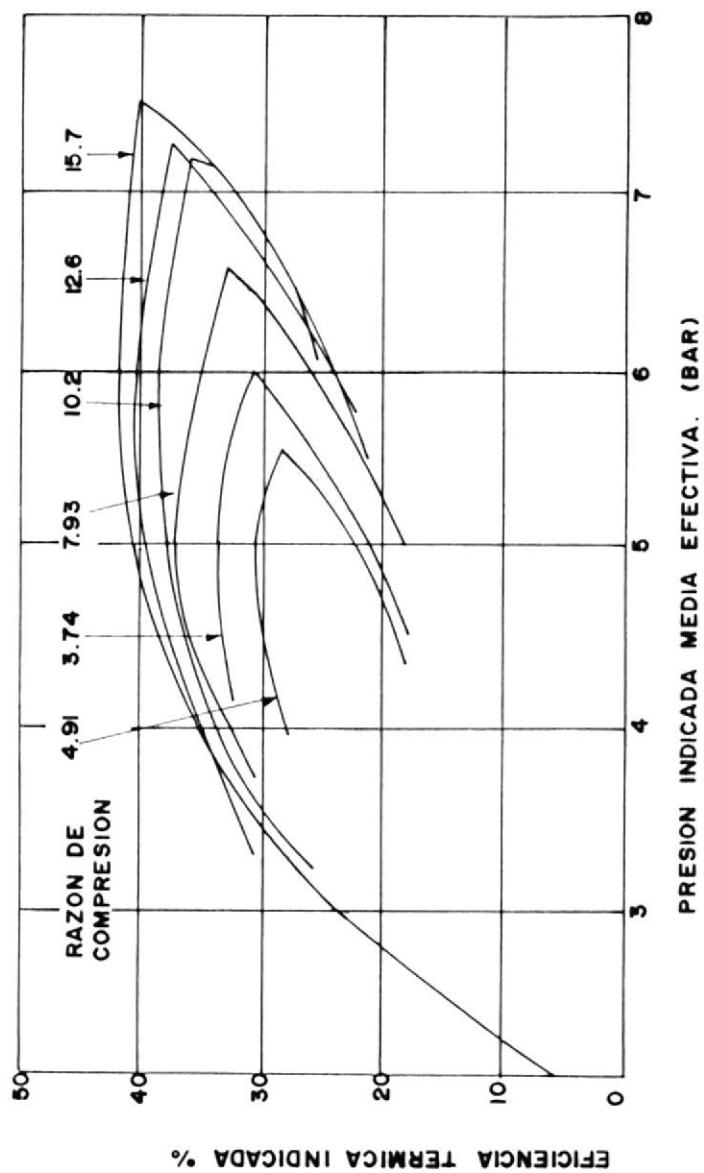


FIGURA.-7-3.- Eficiencia Térmica indicada de un motor de encendido por chispa operando con gas pobre vs. presión indicada media efectiva.

FUENTE: REF.10

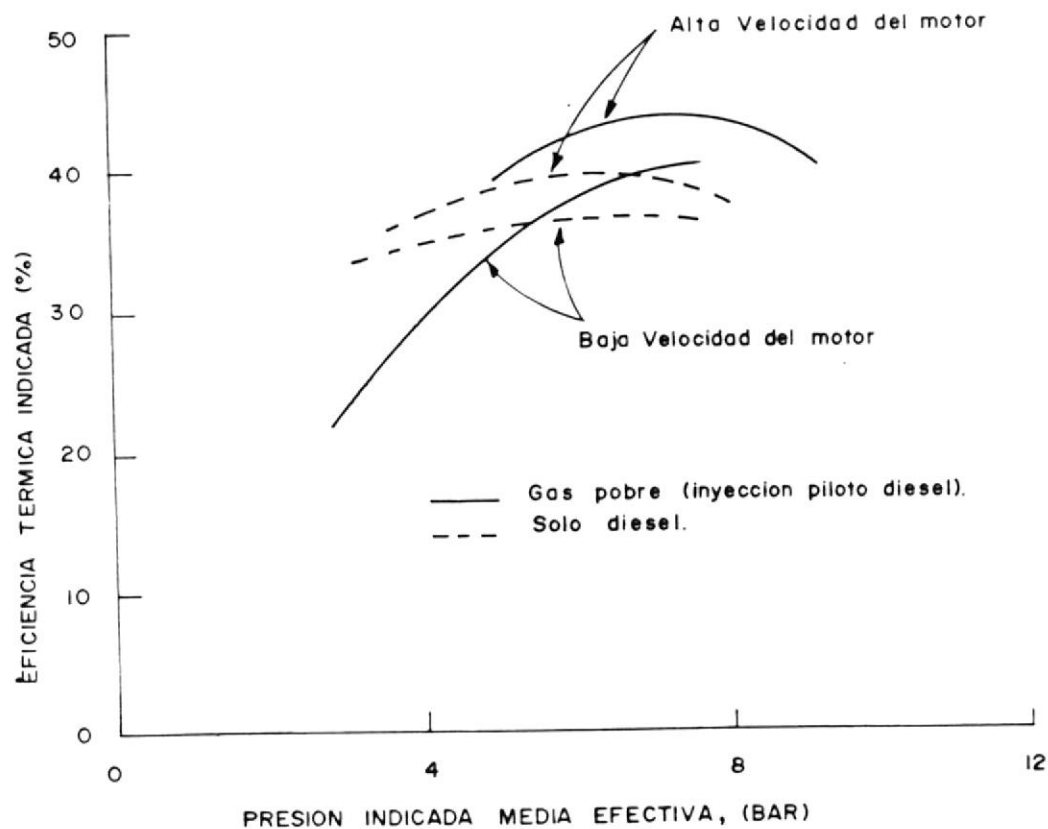


FIGURA 7.4.- Eficiencia térmica indicada de un motor diesel operando con gas pobre e inyección piloto de diesel vs presión indicada media efectiva.

FUENTE: REF.10

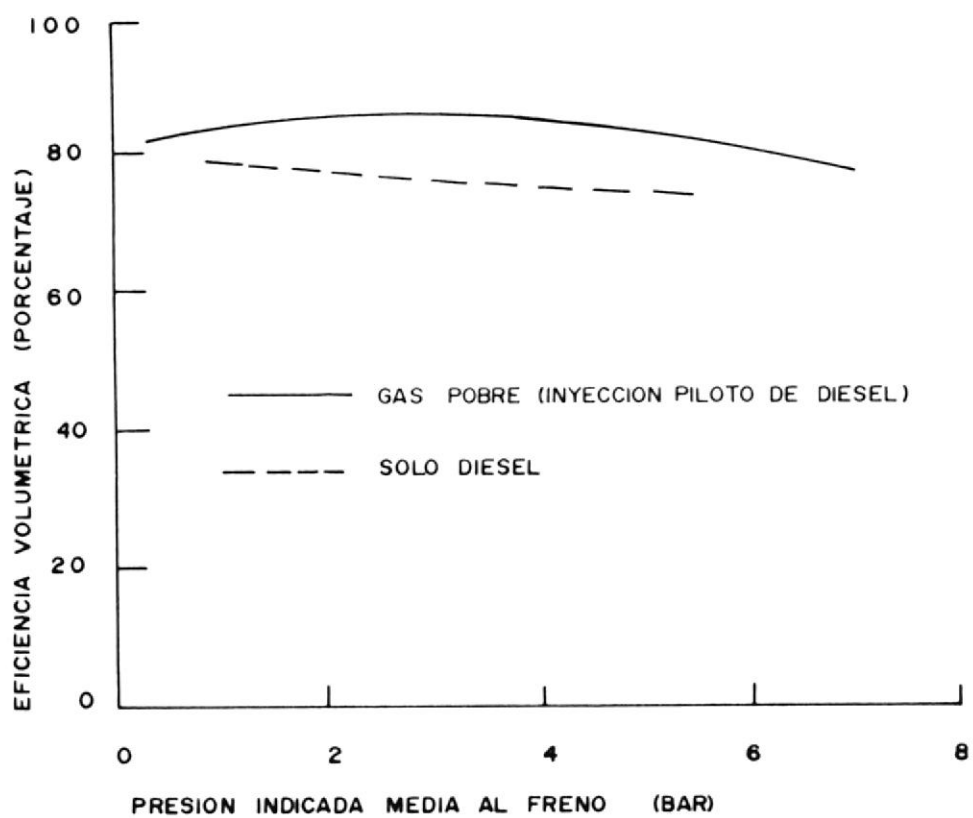


FIGURA 7-5.- Eficiencia volumétrica de un motor diesel operando con gas pobre e inyección piloto de diesel vs presión indicada media al freno.

FUENTE : REF.10

Su poder calorífico es de 5.7 MJ/m^3 , en condiciones ambientales normales de 15° C y 1 ATM . En cambio la mezcla estequiométrica de gas pobre - aire posee un poder calorífico de 2.5 MJ/m^3 que comparada con 3.5 MJ/m^3 para gasolina - aire y 3.3 MJ/m^3 para la mezcla diesel - aire, representa una disminución de la potencia en un 30% aproximadamente con respecto a la gasolina y en un 25 % con respecto al diesel. La variación de la potencia de un motor varía con su velocidad angular. La figura N° 7.6., muestra esta variación para un motor a gasolina y a gas pobre.

La figura N° 7.7., muestra los posibles combustibles gaseosos para uso en M.C.I. con la respectiva densidad energética de sus mezclas estequiométricas en comparación a la mezcla gasolina - aire.

Existe una diferencia sustancial entre los motores encendidos por compresión y el de gasolina, en cuanto a su operación con gas pobre. En los motores a diesel, aire es aspirado y comprimido en cada cilindro; el combustible es inyectado a elevada presión a través de un inyector - atomizador. La mezcla se enciende por compresión. Esto no ocurre para el caso gas pobre-aire, por lo tanto un motor a diesel no puede ser operado

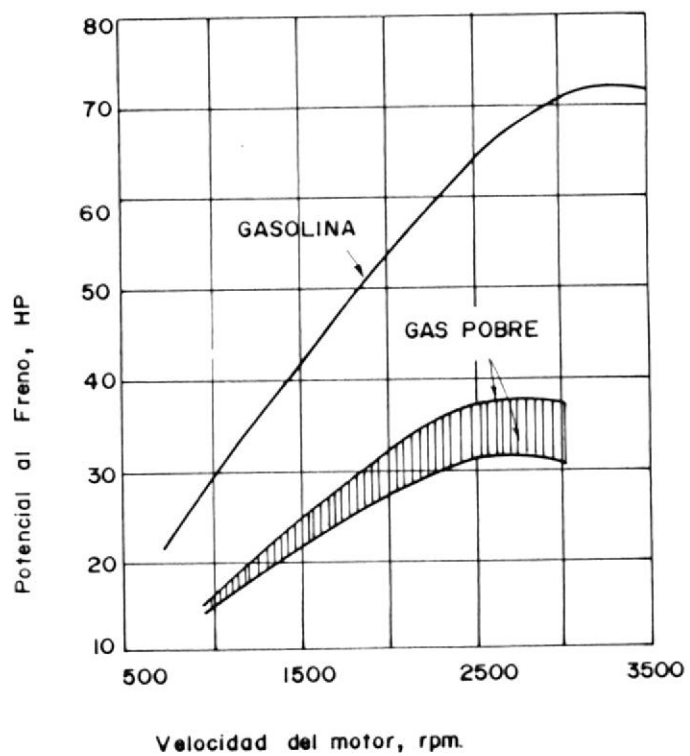


FIGURA 7.6.- Potencia de salida en función de la velocidad del motor.

FUENTE: REF. 10

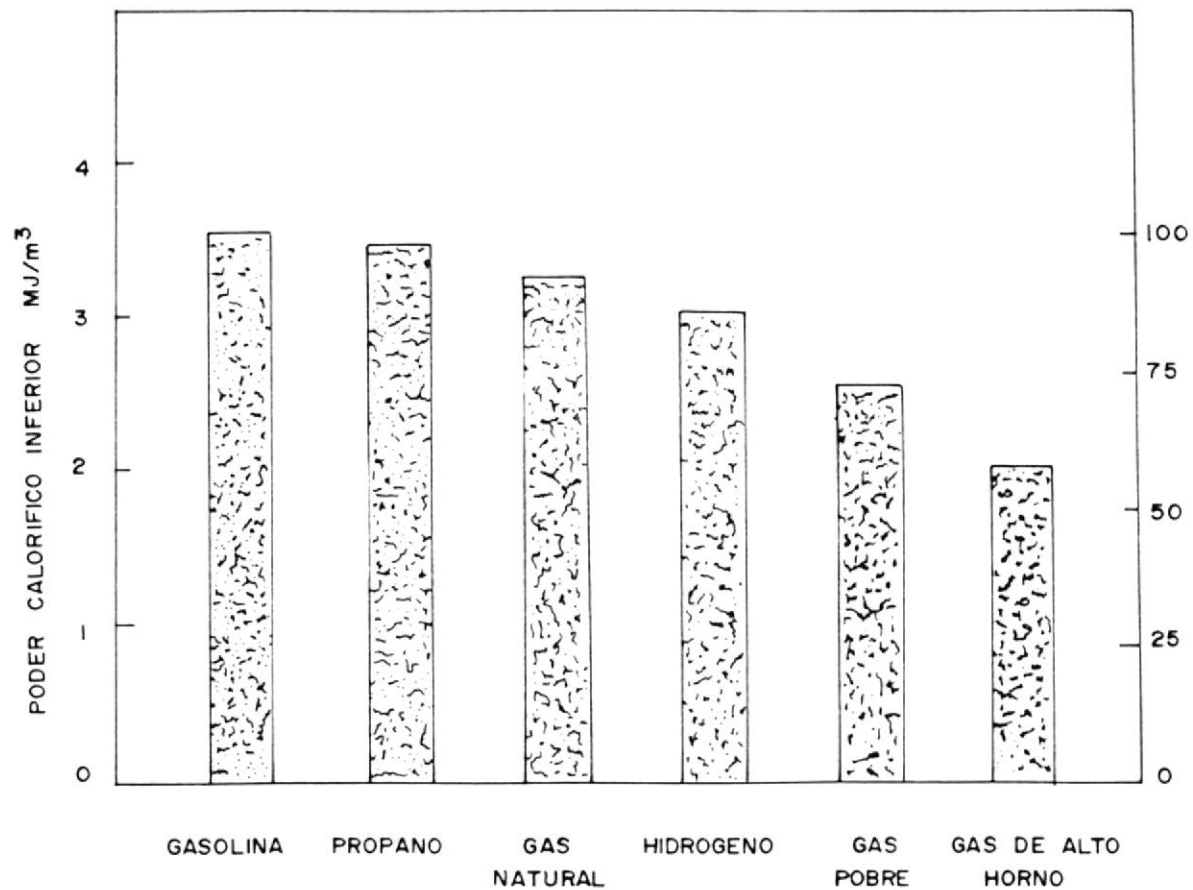


FIGURA 7.7.- Poderes calorificos tipicos para algunas mezclas estequiométricas aire-combustible a 1 atm y 15°C.

FUENTE: REF. 10

solo con gas pobre porque la mezcla gas pobre - aire, no se encenderá a las temperaturas y presiones de compresión. En cambio, los motores encendidos por chispa no poseen esa desventaja y pueden ser operados con gas pobre solamente, sin la inyección piloto de gasolina.

En cuanto al desgaste del motor se refiere, existen dos factores decisivos que influyen sobre ello, estos son: el elemento humano y la limpieza periódica y frecuente del sistema de filtros. En la tabla XVII se dan resultados promedios obtenidos con varios combustibles.

El desgaste en los componentes del motor es producido principalmente por abrasión y corrosión. El gas pobre puede contener una cantidad considerable de ácido acético, amoníaco y compuestos de azufre, dependiendo del combustible biomásico usado y de la operación del gasificador.

Como las temperaturas de las paredes de los cilindros son más bajas con gas pobre debido a la menor temperatura de llama adiabática del mismo, el desgaste por corrosión será mayor que por abrasión.

TABLA XVII

DESGASTE DE LOS CILINDROS DESPUES DE 1000 km,

COMBUSTIBLE	DESGASTE EN mm.
MADERA	0.003
CARBON VEGETAL	0.006
ANTRACITA	0.009
COQUE DE HULLA	0.018
COQUE DE TURBA	0.019
COQUE DE LIGNITO	0.022
AGLOMERADOS DE LIGNITO	0.030

Fuente: Ref.10.-

La pregunta de si la combustión del gas es el in-
terior de los cilindros de como resultado mayor -
desgaste y por lo tanto menor vida útil del motor
no puede ser contestada aun, ya que no se ha podi-
do medir con precisión la cantidad de impurezas que
entran al motor. En todo caso, la instalación de
un sistema eficiente de purificación ayudará a man-
tener el desgaste al mínimo posible.

Durante la última década la atención en relación -
con el peligro potencial de los gases de escape -
del motor ha aumentado significativamente y es por
ello que ya se han establecido normas de porcenta-
je permitidos de monóxidos de carbono, hidrocarburos
y de los óxidos de nitrógeno.

En teoría, la combustión de gas pobre debería pro-
ducir gases de escape menos contaminantes debido a
la combustión más completa y a la menor temperatu-
ra adiabática de llama que disminuiría la producción
de los óxidos de nitrógeno. Sin embargo, problemas-
relacionados con el tiempo fijo de encendido y con
la poca estabilidad en la composición del gas no
darán como efecto una combustión más eficiente.

Una prueba realizada en un motor diesel a dos combustibles mostró un escape del motor más favorable a mayor torque, como lo indica la figura N° 7.8.

En general, para poder aceptar un sistema generador de gas - motor como un sistema de conversión de energía tecnológica y económicamente factible, hay que analizar disponibilidad del combustible biomásico, las dificultades y riesgos causados por el mismo gasificador y los problemas creados por errores humanos además del conocimiento acerca del proceso de gasificación.

A continuación podemos apreciar en la figura N° 7.9. un esquema de una planta de gas pobre para uso en motores de combustión interna.

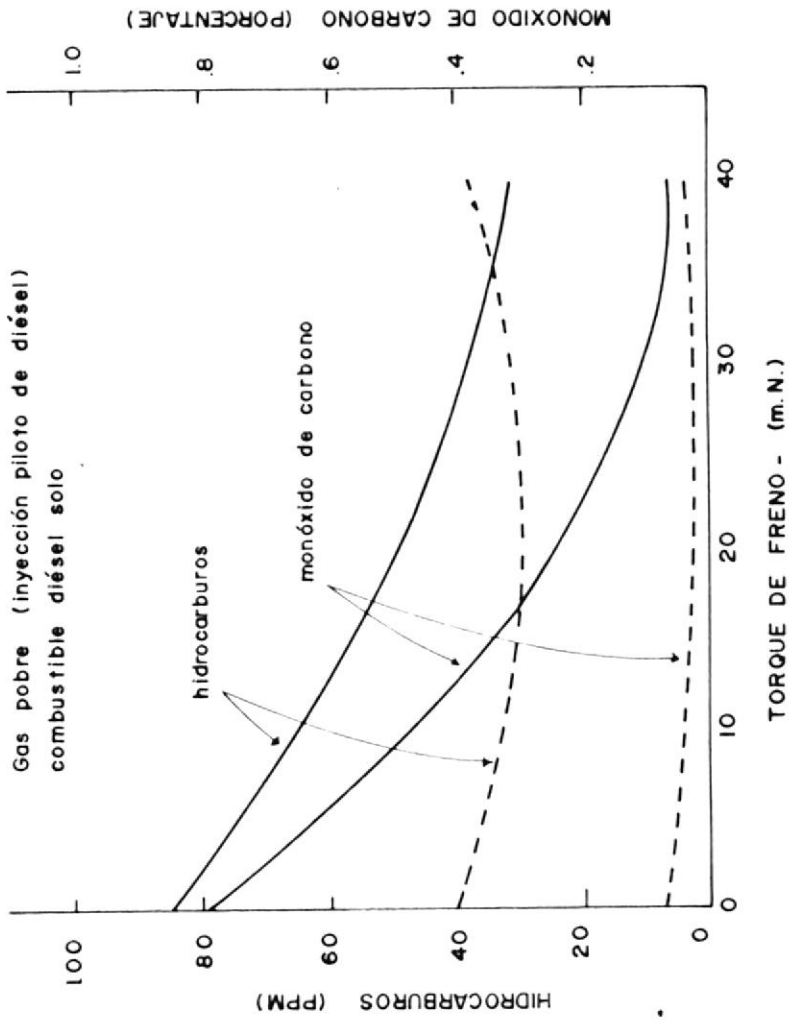


FIGURA 7.6.- Cantidad de Contaminantes en el escape de gas.

FUENTE: REF. 10

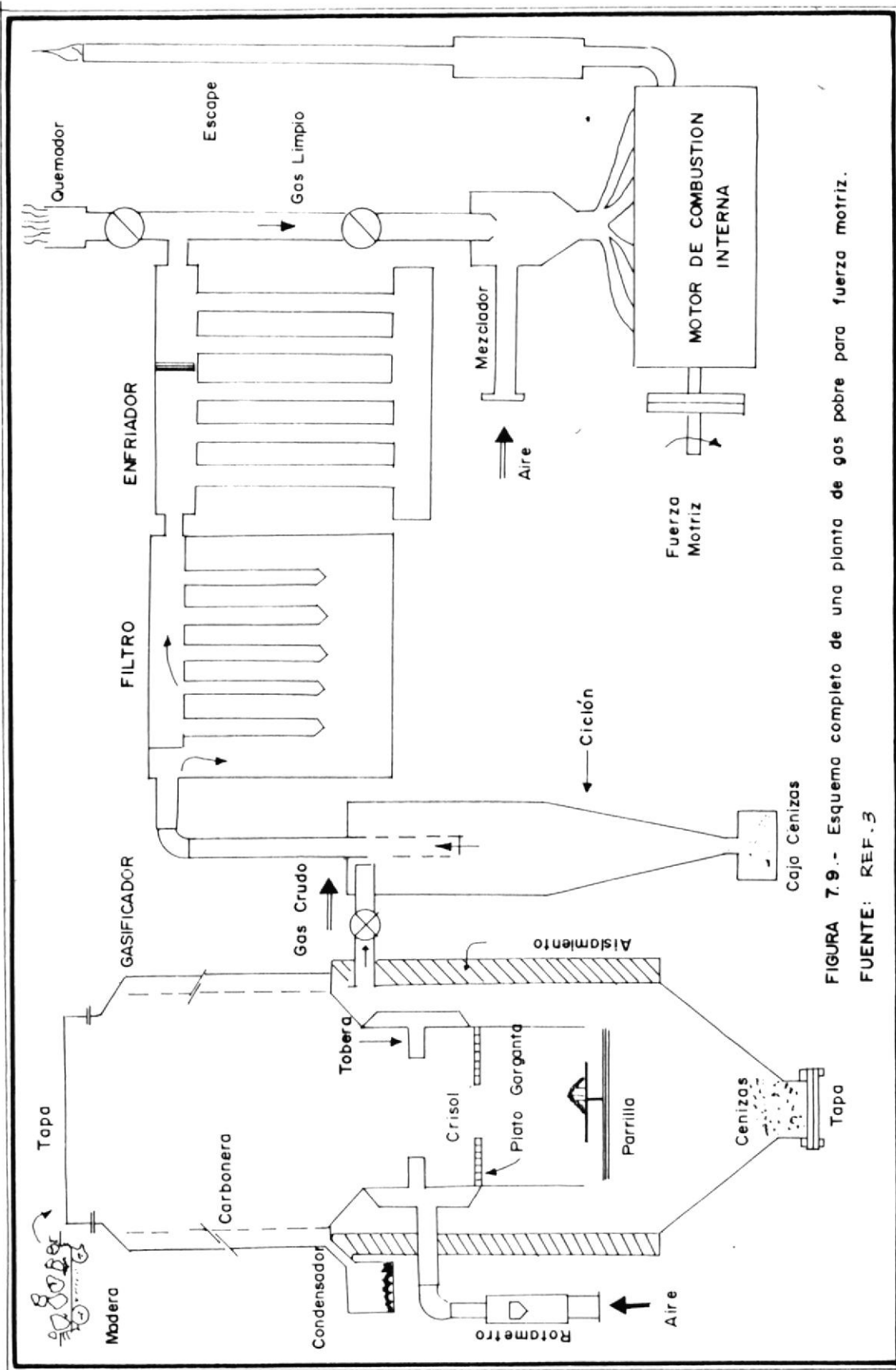


FIGURA 7.9.- Esquema completo de una planta de gas pobre para fuerza motriz.

FUENTE: REF.3

7.3.1. Equipo anexo necesario para utilización del gas en motores

En la operación de M.C.I., utilizando gas pobre se presentan ciertas restricciones diferentes a la pureza, temperatura, y presión del gas a ser combustionado en los cilindros del motor. Ciertos datos tomados de la Ref. 3 se indican a continuación:

Contenido de polvo:

Madera	5 mg/Nm ³
Carbón vegetal	20 mg/Nm ³

Nota: El gas crudo del gasificador puede traer de 800 a 3000 mg/Nm³.

Alquitrán: menor a 500 mg/Nm³

Acido Acético: menor a 50 mg/Nm³

Humedad: Se debe tener una temperatura de mezcla gas - aire, mayor que la correspondiente al punto de rocío, ya que en caso contrario se produciría condensación en el múltiple de admisión del motor. Además, puede haber problema si



el aire ambiental que ingresa al mezclador se encuentra muy frío.

Caida de presión: El recorrido del gas através del lecho del gasificador y por los componentes del sistema,tales como ciclón, filtros, enfriadores, válvulas, tuberías, etc. produce caidas de presión que deben ser vencidas por el motor. Se debe evitar que la caida de presión total no debe ser mayor a 30 cm. de agua.

Analizando los inconvenientes presentados en el párrafo anterior, se requerirá que el gas antes de ser usado en M.C.I. deba enfriarse y filtrarse de sus componentes condensables y sólidos, ya que componentes del gas tales como - ácidos, alquitran sólidos dañarían al motor por efectos de corrosión y abrasión.

A continuación, se presentarán las característi-
cas básicas de los componentes anexos de una

planta de fuerza motriz que opere con gas pobre, así como la función que realiza cada uno de ellos:

- a. Sistema de depuración o filtrado formado por ciclón, filtro de aceite y filtro de manga.

El ciclón es construido utilizando planchas de acero soldado y su función es la de retener las partículas de mayores dimensiones.

En la parte inferior tiene un recipiente pequeño removible para retirar los residuos periódicamente.

El filtro de aceite se construye en chapa de acero soldada, y su objetivo en la planta es el de retener partículas de dimensiones medias hasta 0.01 mm. Consta de un cuerpo cilíndrico dividido en dos cámaras.

En la cámara inferior el gas burbujea en el aceite, deteniendo las partículas que luego de la decantación, son eliminados usando una válvula instalada en la parte inferior de esta cámara.

En la cámara superior son detenidos los vapores y las micropartículas que hayan sido arrastradas usando para ello una malla de alambre.

El filtro de manga construido también en chapa de acero, está formado por elementos de poliester. Tiene una tapa superior que permite el retiro de los componentes para facilitar la limpieza del equipo. Detiene partículas hasta de 0.005 mm.

En la figura N^o 7.10., se muestran los tres tipos de filtros usados en una planta de gas pobre.

- b. Sistema de enfriamiento: enfriador por convección forzada y por convección natural.

El enfriador de gas por convección forzada con siste de un "radiador" de tubos con aletas y un ventilador instalado frontalmente al mismo.

Posee un drenaje con recipiente para recoger el condensado que se pueda producir.

La función de este enfriador es la de bajar

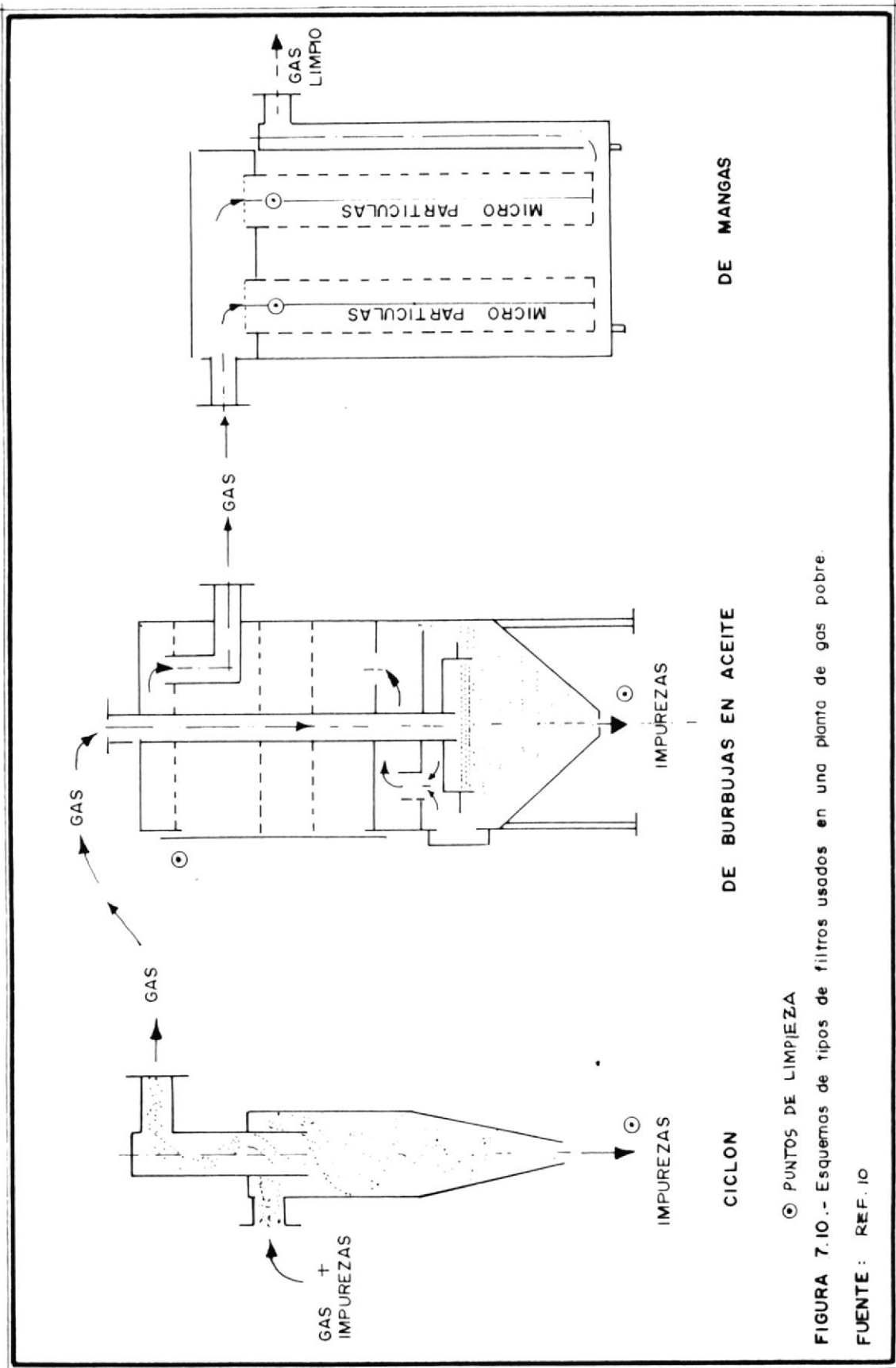


FIGURA 7.10.- Esquemas de tipos de filtros usados en una planta de gas pobre.

la temperatura del gas a una temperatura cercana a la del ambiente.

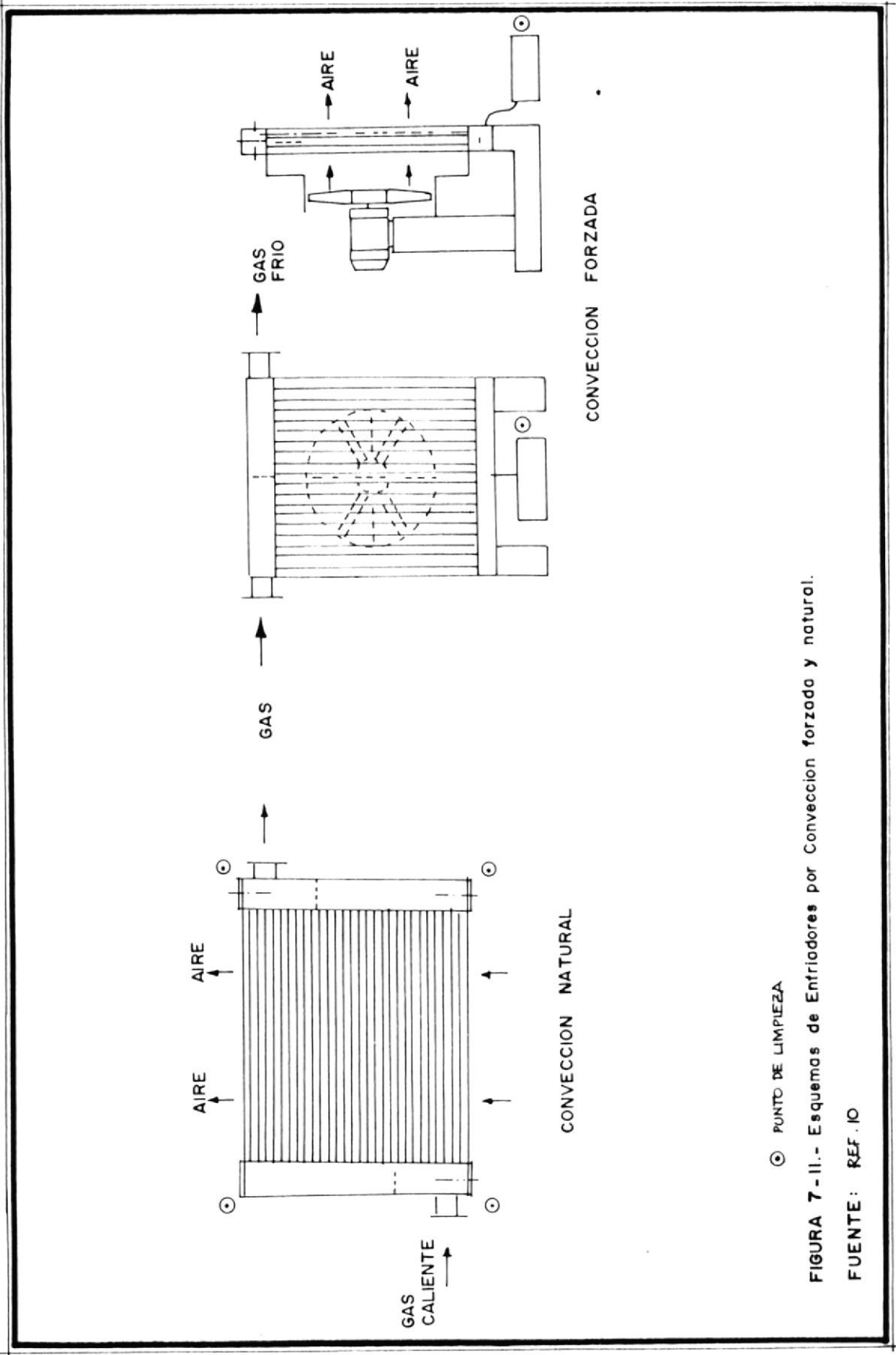
El enfriador por convección natural produce una disminución considerable de la temperatura y es instalado antes del enfriador por convección forzada.

En la figura N^o 7.11., se muestran los dos tipos de enfriadores descritos anteriormente.

- c. Los purgadores son aquellos elementos que retienen, separan y recolectan el condensado. Son contruídos de chapas de acero soldadas y galvanizadas.

- d. Como la operación con gas pobre no requiere de un carburador, ya que el combustible es gaseoso a condiciones ambientales, este debe ser reemplazado por un elemento que permita mezclar el gas pobre ya limpio y enfriado, con el aire, y que se conoce como mezclador dosificador gas - aire.

Este componente es de construcción tubular, po



© PUNTO DE LIMPIEZA

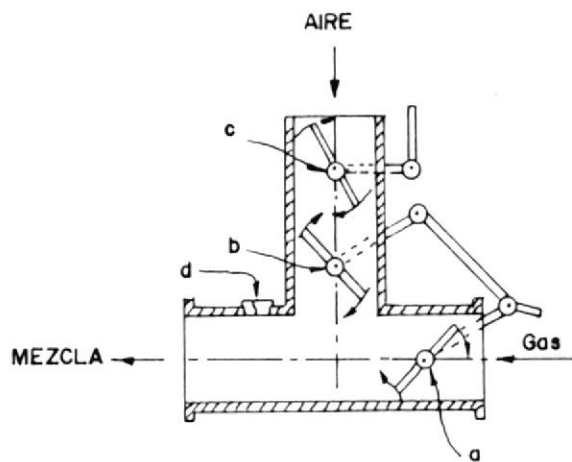
FIGURA 7-II.- Esquemas de Enfriadores por Conveccion forzada y natural.

FUENTE: REF. 10

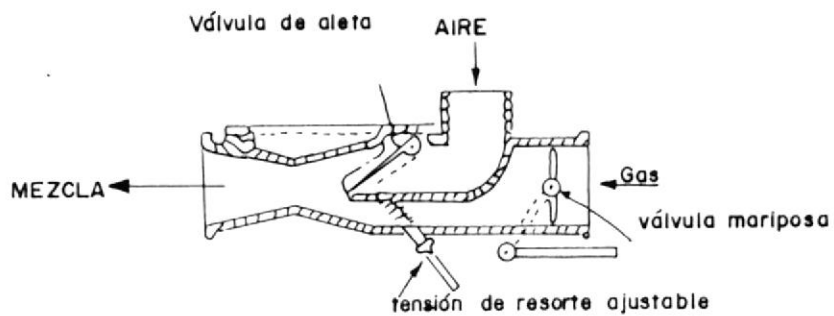
se ven dos o más válvulas mariposas que controlan la entrada de aire y gas, con el fin de obtener una mezcla en proporciones ideales para una buena combustión. El funcionamiento del mezclador puede ser manual o automático.

Tres tipos de mezcladores normalmente son presentados en la figura N° 7.12.

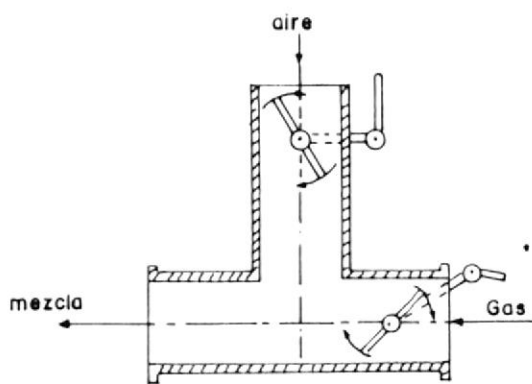
Finalmente, en la figura N° 7.13., se muestra una disposición típica de los componentes principales y auxiliares de una planta de termogasificación para producir fuerza motriz.



Válvula de mezcla semi-automática



Válvula de mezcla completamente automatizada



Válvula de mezcla operada a mano

FIGURA 7-12.- Tipos de mezcladores-dosificadores para Gas pobre.

FUENTE: REF. 10

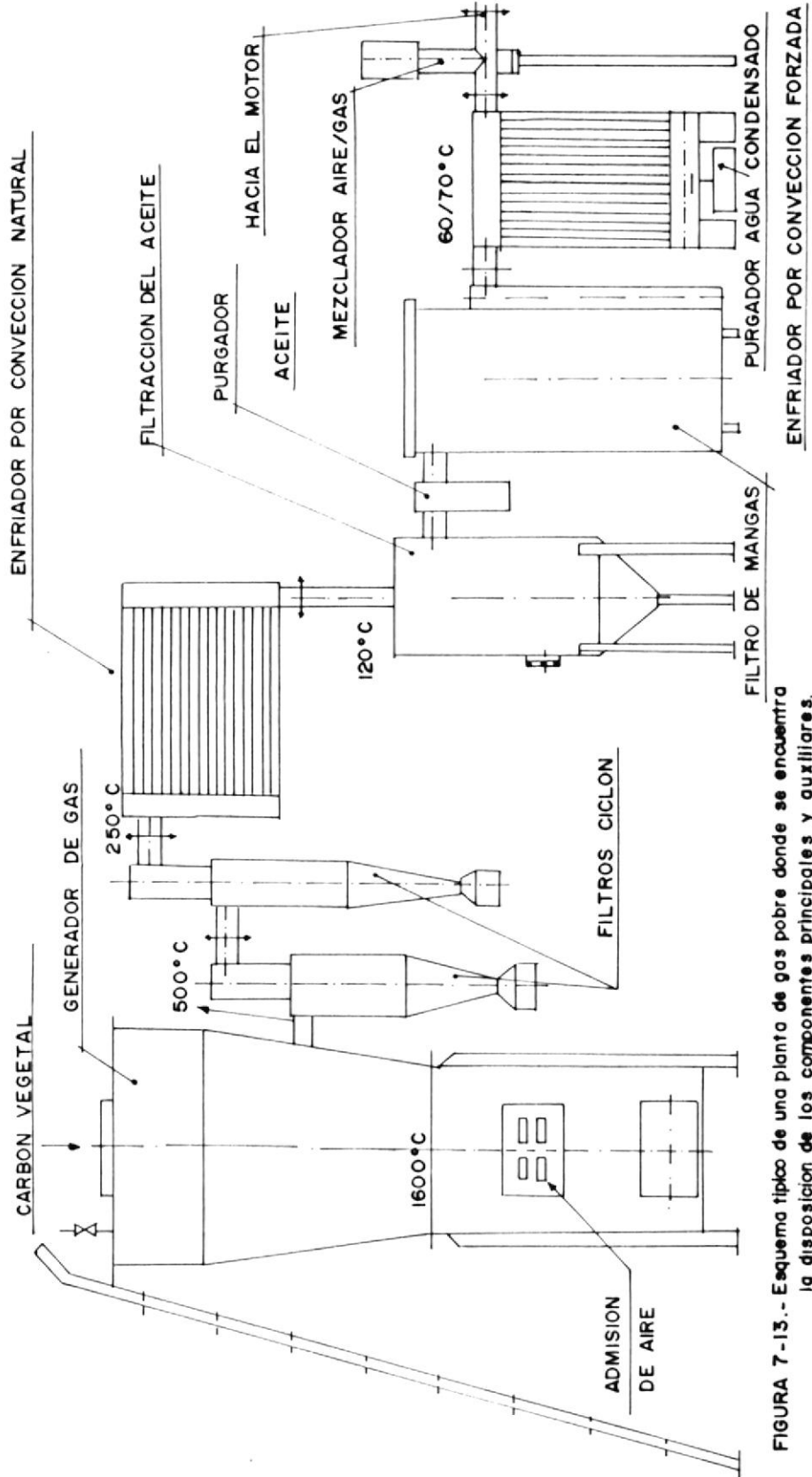


FIGURA 7-13.- Esquema típico de una planta de gas pobre donde se encuentra la disposición de los componentes principales y auxiliares.

FUENTE: REF. 10

7.4. BALANCE ENERGETICO GLOBAL

Al hablar aqui de balance energético global, se refiere a aquel obtenido de las fuentes de energía que entran y salen, exclusivamente del termogasificador.

En esta sección, se indicarán cuáles son los términos energéticos que deben considerarse para establecer un balance energético detallado del cual se puede inferir acerca de cuan eficiente es la conversión de un tipo de energía de entrada, en este caso basicamente se trata de energía química del combustible biomásico, en otro tipo de energía de salida utilizable la cual corresponde en gran medida a la energía química contenida en el gas pobre producido al final del proceso de termogasificación.

El balance de energía de un proceso de termogasificación se basa sobre una unidad de peso del combustible biomásico o sobre el peso del combustible empleado en un ciclo dado o por unidad de tiempo de operación.

En un proceso de termogasificación, el balance energético incluye la energía suministrada en el combustible



y aire y de la energía de la escoria y de los gases producidos.

A continuación se muestra en forma más detallada los términos de entrada y salida de energía que se presentan en un proceso de gasificación típica:

Términos de entrada de energía:

1. El poder calorífico del combustible biomásico, que corresponde la mayor parte de energía inicial disponible.
2. La entalpia del vapor de agua presente en el aire.

Términos de salida de energía:

1. Poder calorífico del gas pobre crudo: Este gas está constituido de dos fracciones: una no condensable formada por monóxido de carbono, hidrógeno y metano principalmente, y otra condensable que origina la fase líquida formada por alquitran, licor piroleñoso, etc.
2. Calor sensible del gas pobre debido a la alta temperatura a la cual sale del gasificador.

3. Energía residual (carbono) contenida en la escoria, formada principalmente por hollín, brea, residuo sólido y cenizas.
4. Energía calorífica producto de las pérdidas térmicas en la operación del gasificador principalmente por radiación y conducción del calor desde la instalación.

Cabe indicar aquí que la porción de energía directamente utilizable de los gases de la termogasificación, depende de la aplicación, esto es, si se requiere quemar directamente el gas en cuyo caso se aprovecha además de la energía química contenido en los gases, el calor sensible de los mismos; o si se utiliza el gas para generar fuerza motriz, por ejemplo en M.C.I., no se podrá aprovechar el calor sensible y la energía residual de los sólidos ya que se requiere que el gas pobre sea enfriado y depurado antes de entrar el mezclador - dosificador del motor, disminuyendo para esta segunda opción, la eficiencia de utilización de la energía disponible en los gases.

Un balance termo-químico apropiado del proceso de

termogasificación, se puede apreciar de manera esquemática en la figura N° 7.14., y que representa el diagrama de Sankey para las diferentes zonas del gasificador.

Cuando se recogen datos experimentales suficientes, puede utilizarse el mismo esquema de cálculos para todos los problemas de termogasificación. Sin embargo, en la práctica pocas veces se consigue una información completa, como es el caso de esta tesis, y se hace necesario idear métodos para salvar estas limitaciones. Con frecuencia, y es lo que ha acontecido en este trabajo, se puede reconstruir una información extensa a partir de pocos datos, y de esta manera establecer balances completos de energía y materia, a partir de unas pocas medidas de temperatura, el análisis último del combustible biomásico y un análisis del gas usando un Orsat o en mejor de los casos un cromatógrafo de gases.

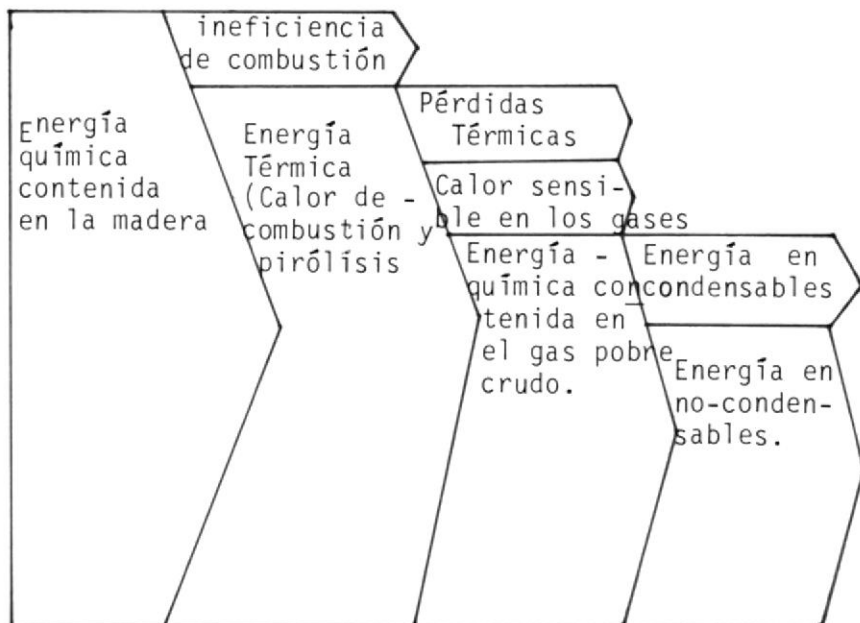


FIGURA Nº 7.14. BALANCE TERMOQUIMICO DEL PROCESO DE TERMOGASIFICACION, UTILIZANDO UN DIAGRAMA DE SANKEY

C A P I T U L O V I I I

PELIGROS EN LA OPERACION CON GAS POBRE

8.1. GENERALIDADES

El gas pobre puede ser a corto plazo una buena opción para sustituir a los combustibles tradicionales en motores de combustión interna, como es el caso de la gasolina y diesel, ya sea por motivos económicos y de política de racionalización y conservación de la energía que a juicio personal tomará en nuestro país y semejantes nuevos rumbos en la dirección de la misma. Pero lamentablemente, debe considerarse que la operación de una planta de gas pobre implica ciertos peligros para el operador y para el medio ambiente local, que de no ser evitados constituyen una amenaza a la salud del personal que trabaja en dicha planta.

Los principales peligros relacionados con el uso del gas

pobre son:

- Peligros de toxicidad
- Peligros de incendio
- Peligros de explosión

A continuación se tratará en forma más o menos detallada los peligros arriba mencionados:

8.2. PELIGROS DE TOXICIDAD

Existen dos tipos de intoxicación producidos en la operación de una planta de gas pobre:

a. Intoxicación Aguda:

La posibilidad de envenenamiento agudo debido al gas pobre se asocia con el contenido de monóxido de carbono (CO) presente en el gas. La intoxicación por CO es producida de la absorción del CO por la hemoglobina en la sangre, lo que implica la disminución del proceso de absorción del oxígeno (O_2), ya que se ha comprobado que el CO tiende a ser absorbido con 250 veces mayor facilidad que el O_2 .

Los principales factores que determinan el grado de absorción del CO en la sangre son:

Factores ambientales:

- Presión parcial del CO
- Presión parcial del O₂
- Tiempo de exposición

Factores personales:

- Volumen de sangre
- Concentración de hemoglobina en la sangre
- Frecuencia de respiración

El diagrama de la figura N° 8.1., nos muestra como el ritmo de absorción aumenta con el incremento de la concentración del CO y de la cantidad de trabajo físico (frecuencia respiratoria).

Luego de cierto tiempo se alcanza un nivel de equilibrio siendo este dependiente de la concentración de CO.

La tabla XVIII, nos muestra los efectos médicos producidos por diferentes niveles de carboxihemoglobina (CoHb).

La tabla XIX, nos indica los efectos causados por diferentes concentraciones de CO en el aire.

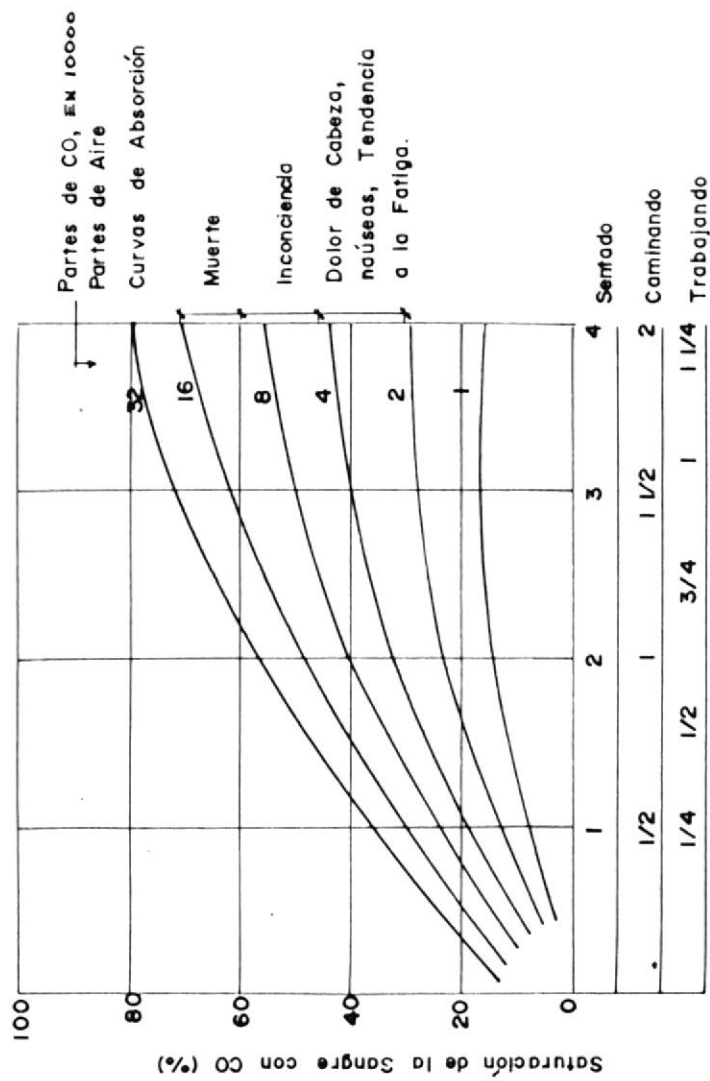


FIGURA 8-1.- ABSORCION DE CO EN LA SANGRE.

FUENTE: REF. 12

TABLA XVIII

EFECTOS MEDICOS PRODUCIDOS POR DIFERENTES NIVELES DE CARBOXIHEMOGLOBINA

0 - 5 %	Efectos no significativos
5 -15 %	Indicios de reacciones leves
15 -30 %	Posibles dolores de cabeza
30 -45 %	Dolor de cabeza, vértigos, tendencia a desmayarse.
45 -60 %	Inconciencia.
60 -70 %	Muerte

NOTA: El nivel de CoH_b para fumadores varía entre 3 y 8 % y puede alcanzar el 15 % para los que fuman exageradamente.

Fuente: Ref.12.-



TABLA XIX

EFFECTOS CAUSADOS POR DIFERENTES CONCENTRACIONES DE CO EN EL AIRE

PORCENTAJE	P.P.M.	EFFECTOS EN LAS PERSONAS EXPUESTAS
0.005	50	Efectos no significativos
0.02	200	Posible dolor de cabeza frontal en 2 a 3 horas
0.04	400	Dolor de cabeza frontal y náuseas después de 1 a 2 horas; en la parte posterior de la cabeza después de 2 1/2 a 3 1/2 horas.
0.08	800	Dolor de cabeza, mareos y náuseas en 3/4 de hora; colapso y posiblemente inconciencia en 2 horas.
0.16	1600	Dolor de cabeza, mareos y náuseas en 20 minutos; colapso, inconciencia. Posiblemente muerte en 2 horas.
0.32	3200	Dolor de cabeza y mareos en 5 a 10 minutos, inconciencia y peligro de muerte en 30 minutos.
0.64	6400	Dolor de cabeza y mareos en 1 a 2 minutos, inconciencia y peligro de muerte en 10 a 15 minutos.
1.28	12800	Efecto de inmediato, inconciencia y peligro de muerte en 1 a 3 minutos

FUENTE: Ref. 12.-

Desde el punto de vista práctico, muy rara vez - puede haber dudas acerca del diagnóstico para los efectos más graves como la inconciencia y el mareo. El color rosado pronunciado de las mejillas y labios, manchas rojas en la piel, y una mirada fija y vacía son signos de intoxicación por CO.

El mejor método para determinar si una persona ha estado expuesta a CO es un examen de sangre en donde se determina la concentración de CoHb en la sangre.

El tratamiento de la intoxicación aguda con Co se origina en el hecho de que el O₂ puede reemplazar al CO en la hemoglobina si la presión parcial del O₂ en el aire es lo suficientemente mayor que la respectiva del CO.

En caso de efectos menores, es suficiente abandonar el área con niveles excesivos de CO y respirar aire fresco.

Si el afectado pierde la consciencia el tratamiento - debería ser como el mostrado en la tabla XX.

TABLA XX

TRATAMIENTO A SEGUIRSE EN PERSONAS EXPUESTAS AL CO EN PROPORCIONES PELIGROSAS

ACCIONES A SER TOMADAS :

- 1- LLEVAR A LA PERSONA A UN LUGAR CON AIRE FRESCO
- 2- LIBERAR A LA PERSONA DE ROPAS AJUSTADAS. REMOVER OBJETOS EXTRAÑOS DE LA BOCA.
- 3- DAR INMEDIATAMENTE RESPIRACION ARTIFICIAL SI LA RESPIRACION HA PARADO O ES DEBIL.
- 4- NO ABANDONARLO SI NO HAY SEÑALES DE VIDA POR VARIAS HORAS.
- 5- SIEMPRE LLAME A UN MEDICO. INYECCION DE ESTIMULANTES PUEDEN TENER EFECTOS POSITIVOS.
- 6- MANTENER A LA PERSONA CALIENTE
- 7- VIGILAR Y CUIDAR A LA PERSONA ENVENENADA POR VARIAS HORAS DESPUES DE QUE HA SIDO RECUPERADA LA CONCIENCIA.

Fuente: Ref.12.-

b. Intoxicación Crónica:

Los síntomas originados por una intoxicación crónica con gas pobre pasan por lo general desapercibidos.

El individuo se siente cansado, irritable y con frecuencia mal genio, dificultad para dormir y dolor de cabeza continuo. Pueden surgir algunos trastornos de la vista. A nivel mental queda afectado en la capacidad para concentrarse y aprender.

Se puede ofrecer dos explicaciones para los síntomas asociados con la intoxicación crónica con gas pobre. Por un lado Hamilton y Hardy sugieren que el déficit prolongado de oxígeno en la sangre puede producir la destrucción celular; también hay la posibilidad de que sean responsables de los efectos crónicos otras sustancias presentes en el gas.

Según Salen y Almeren, la persona que sufre de una intoxicación crónica por el gas pobre debe ser relevada de todo trabajo durante todo el tiempo que persistieran problemas cardiacos. Debe evitar consecuentemente el contacto con el gas pobre durante el tiempo que permanezca hipersensible al mismo. El ejercicio al aire libre contrarresta la intoxicación crónica.

Pero como es preferible prevenir antes que lamentar cualquier accidente, se recomienda como medida fundamental para disminuir los riesgos de intoxicación ya sea aguda o crónica debido a la exposición de personas con gas pobre, hacer un monitoreo del contenido de CO en las áreas de la planta de gasificación donde estén presentes los operadores, en la cabina del chofer de los vehículos a gas pobre, en los garajes y talleres para vehículos a gas pobre, etc.

Además, es una práctica saludable hacer pruebas periódicas de sangre para las personas que trabajan con este tipo de gas.

La Tabla N° XXI .., indica las concentraciones máximas permitidas para CO en varios países para la exposición en el trabajo.

8.3. PELIGROS DE INCENDIO

Las estadísticas de accidentes por incendio en relación con la operación con gas pobre indican, que los riesgos de incendios de motores son mucho mayores durante la operación con gas pobre que utilizando diesel o gaso

TABLA XXI
CONCENTRACION MAXIMA PERMITIDA DE CO EN EL AIRE

PAIS	mg/m ³	P.P.M.	AÑO
AUSTRALIA	55	50	1.973
BELGICA	55	50	1.974
BULGARIA	20	17	1.971
DINAMARCA	40	35	1.978
FINLANDIA	55	50	1.972
HUNGRIA	30	26	1.974
ITALIA	55	50	1.975
JAPON	55	50	1.975
PAISES BAJOS	55	50	1.973
NORUEGA	40	35	1.978
POLONIA	30	26	1.976
RUMANIA	30	26	1.976
UNION SOVIETICA	20	17	1.977
SUECIA	40	35	1.978
CHECOSLOVAQUIA	30	26	1.976
U.S.A.	55	50	1.979
YUGOSLAVIA	58	51	1.971

Fuente: Ref.12.-

lina.

Los principales factores que provocan peligro de in
cendio son:

1. Altas temperaturas superficiales del gasificador y de los tubos de gas (alrededor de 150 - 300° C).
2. Llamas grandes que pueden ocurrir durante el arranque del gasificador. Estas pueden presentarse en la entrada de aire (ventilador) (si es que no funciona adecuadamente la válvula de retención).
3. Posibilidad de producción de chispas durante la reposición del combustible y también durante la extracción de las cenizas.

Los riesgos anteriormente señalados pueden ser reducidos mediante un diseño, construcción, instalación y operación adecuada de la planta de gas pobre.

Es menester indicar que además de lo dicho en el párrafo anterior, es necesario que el operador de una planta de gas pobre o el chofer de un vehículo a gas pobre deben tomar ciertas precauciones antes de

proceder a trabajar en dicha planta o vehículo con el fin de reducir los peligros de incendio.

El encendido del gasificador, la eliminación de cenizas y la realimentación del combustible constituyen operaciones particularmente riesgosas desde el punto de vista de los incendios.

Muchos incendios, por ejemplo, se han producido por -realimentar el combustible demasiado tarde, esto con lleva a la presencia de temperaturas altas en la par te superior del gasificador; cuando al fin el opera- dor abre la tapa, el gas se encenderá espontáneamen- te al estar en contacto con altas temperaturas.

8.4. PELIGROS DE EXPLOSION

Bajo operación normal, el gasificador y el sistema de tuberías entre el gasificador y el motor están llenos de gas combustible. Sin embargo, dicho gas no se en ciende por falta de aire y oxígeno.

Pero existen posibilidades de que el gas se encienda en el sistema si por algún motivo se introdujera aire, ade más debe ocurrir que la temperatura del sistema esté lo suficientemente alta para producir el autoincendio . (500-600° C).

Lo anterior podría suceder por varias razones:

1. Entrada de aire al sistema de gas
2. Aire entrando al gasificador durante alimentación del combustible.
3. Introducción de aire a un gasificador frío lleno con gas y encendido simultáneo.

En el tercer caso, la combustión del gas seguramente tendrá el carácter de una explosión. Es por ello necesario ventilar el sistema antes de encender un gasificador en frío.

No se puede evitar que ingrese aire al gasificador durante la realimentación del combustible, pero si se sigue la práctica de quemar el gas inmediatamente - después de abrir la tapa de alimentación, se disminuirá el riesgo del encendido del gas durante la realimentación.

En el caso de entradas de aire al sistema de gas, la explosión es poco probable. Sin embargo esto se puede dar en el caso de que el aire entre a la cámara de gas.

Cuando al gasificador entra aire, durante la realimentación, se producirá la combustión rápida de los gases ocasionando presurización del gasificador, razón por la cual conviene utilizar una tapa con resorte o un sistema como válvula de desfogue para aliviar este aumento de presión. Además para evitar que salgan llamas por la entrada principal de aire bajo esta situación, esta entrada de aire (ventilador) debe estar protegida por una válvula de retención.

8.5. OTROS PELIGROS

Otro peligro que valdría la pena considerar en este trabajo y que se presenta a menudo, es el de riesgo de quemaduras en la piel provocada por:

1. Superficies calientes del gasificador o de las tuberías de gas.
2. Llamas producidas en la entrada de aire o también en la apertura hecha cuando se realiza la realimentación.
3. Contacto del operador con los gases calientes o llamas en el momento de la realimentación.

El riesgo de quemaduras debido a superficies calientes se puede reducir usando aislamiento apropiado o instalación de cercas complementado con rótulos de advertencia.

Las llamas por la entrada de aire deben eliminarse utilizando válvula de autocierre como se indica en la sección anterior.

Para disminuir el tercer riesgo señalado anteriormente, se aconseja pararse bastante alejado de la apertura por realimentación cuando esté abierta la tapa del gasificador.

El tratamiento para quemaduras leves es enfriar la zona afectada con agua fría; en casos mayores transportar al operador al hospital más cercano.

C A P I T U L O I X

ASPECTOS GENERALES RELACIONADOS AL POSIBLE USO DEL GAS POBRE EN EL PAIS

9.1. ESTUDIO ECONOMICO

La conversión de motores a gasolina y diesel estacionarios, a los mismos motores pero operando con gas pobre, representa para el país una de las aplicaciones potenciales más importante y prometedora para las plantas de gasificación de fuerza motriz.

Es por ello que aquí, se hará un estudio económico de un caso típico de dicha aplicación en nuestra zona rural, para así poder determinar la rentabilidad actual o no del sistema gasificador - motor. Para lograr esto , se ha recopilado cierta información principalmente de costos reales de variables que influyen sustancialmente en este análisis.

El caso seleccionado para hacer el estudio económico, corresponde a una estación de bombeo que requiere de un motor diesel de 20 kw para accionar una bomba la cual succionará el agua de un río para entregarla a un reservorio ubicado a una cierta altura del mismo y de donde se dirigirá el agua por medio de un canal hasta los sembríos de arroz de una hacienda.

Para dicha aplicación, se hará una comparación entre una unidad diesel convencional de 20 kw y la misma - unidad, pero operando con un sistema dual de combustible (gas pobre - diesel) accionado por un gasificador. Los dos sistemas tienen el mismo rendimiento.

Las variables del costo consideradas en este análisis son:

- Costo de capital del sistema
- Costos de mantenimiento
- Lubricación
- Mano de obra
- Combustible, diesel y madera

Los precios fijados para cada uno de estos rubros se hicieron en base a la información disponible en las

referencias adecuadas y en datos dados por los fabricantes del sistema en estudio. Además, se consideraron otros factores tales como el período de funcionamiento anual, vida útil del sistema, consumo de combustible, etc.

Los cálculos se hicieron como se indicó, para una unidad de 20 kw. La cifra última obtenida es el costo por unidad de energía (sucres/kw-hr) de rendimiento de la potencia en el eje, permitiendo así una comparación directa de este costo para los dos sistemas en estudio.

Los parámetros más importantes utilizados en este análisis económico están detallados en la tabla XXII. Esta tabla contiene los valores elegidos para hacer un cálculo del cual obtengamos un resultado referencial.

Las principales hipótesis acerca de los valores de dichos parámetros y las razones por las cuales fueron consideradas, se explican a continuación:

1. Costo de Capital del equipo:

El sistema gasificador - ciclón, construido en un taller local tiene un costo de S/.101.037,00 (ver sección 5.2)

TABLA XXII

VALORES EMPLEADOS EN EL ANALISIS ECONOMICO DE UN SISTEMA DE FUERZA MOTRIZ

PARAMETROS	VALORES REFERENCIALES
Potencia mecánica	20 kw
Período de funcionamiento anual del sistema	1000 horas
Vida útil del sistema	6 años
Tasa de interés	18 %
Inflación en el precio del petróleo	0 %
SISTEMA CONVENCIONAL(DIESEL)	
Costo del motor diesel	S/.32000/kw
Costo anual de mantenimiento	5% del costo del capital
Costo de lubricantes	5% del costo de diesel
Costo de diesel	S/. 10.6/ litro
Consumo de diesel	0.4 litros/kw-hr
SISTEMA ALTERNATIVO (GAS POBRE-DIESEL)	
Costo del termogasificador	S/.7300/kw
Costo anual de mantenimiento	10% del costo del capital
Costo de lubricantes	10% del costo de diesel
Costo de madera	S/.1500/tonelada
Consumo de madera	1.3 kg/kw-hr
Sustitución del diesel	80%
Continua.....	



Viene Tabla XXII

Consumo dediesel	$0.08 \frac{\text{litros}}{\text{kw} - \text{hr}}$
Costo de mano de obra	S/.126.000/año

y es capaz, según diseño, de generar 20 kw de potencia mecánica (ver sección 4.2).

Además, como la planta requiere un sistema más fino de filtrado y un buen sistema de enfriamiento del gas pobre antes de que ingrese al motor, se pidió co ti za ci ó n del costo aproximado de materiales y mano de obra de dichos sistemas lo cual indicaba un va lo r de S/.50.000,00.

De los datos anteriores, se puede concluir que el costo del equipo (no incluye el costo del motor diesel) es de $\frac{S/.146.037}{20 \text{ kw}} = S/.7.302/\text{kw}$.

En cuanto al costo del motor diesel se averiguó - que si se comparara al contado en un almacén de la localidad, su valor estaría alrededor de casi S/.32.000/kw, siendo este precio el mismo para los dos sistemas en estudio.

2. Período de funcionamiento anual y vida útil del sis te ma:

Se supuso que los sistemas funcionarían a plena po te ncia de salida durante 1000 horas/año y que serían - re e m p l a z a d o s después de 6 años de operación. Lo

anterior equivale a 4 horas de funcionamiento en días laborables, y una vida útil de 6.000 horas. Este tipo de frecuencia de trabajo corresponde a la aplicación que se está analizando.

Para determinar con cierta exactitud la vida útil de un equipo o sistema, se requiere de cierta experiencia en cuanto a resistencia de materiales usados para cierta aplicación. Como en el país no existe todavía esa experiencia, se consultó la Ref. 12 para obtener dicho valor.

3. Consumo de combustible:

Considerando una eficiencia total del motor del 25% (sección 4.2), un poder calorífico inferior del diesel - igual a $10240 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$ y la densidad relativa del mismo - igual a 0.85, se obtiene un consumo de $0.4 \frac{\text{lt}}{\text{kw-hr}}$, para la madera se consideró que si para generar 20 kw de potencia mecánica se necesitaba 26 kg/hr de madera, esto implica un consumo de $1.3 \frac{\text{kg}}{\text{kw-hr}}$.

4. Reducción de potencia del motor:

Aunque con el uso de gas pobre en la operación de un motor de combustión interna, se provoca una reducción de la potencia del motor debido al menor poder calorífico de la mezcla gas pobre - aire con

respecto a la mezcla diesel - aire, en este análisis se desprecia dicha reducción a que en este caso como en otros similares no se trabaja con la potencia máxima sino más bien con potencias inferiores a ella.

5. Mantenimiento:

Se considera un costo de mantenimiento anual del 5 % del costo del capital del sistema diesel convencional y del 10 % del costo de capital del sistema gasificador - motor.

6. Lubricación:

Se adoptó un costo de lubricación anual del 5 % del costo total de consumo de combustible (diesel) para el sistema convencional. Para el sistema alternativo se considera el doble de la anterior, con el objeto de cambiar el aceite, y los elementos que componen el filtro del equipo de depuración del gas con mayor frecuencia.

7. Mano de Obra:

Para el caso del sistema gasificador - motor, se debe considerar el costo de la mano de obra extra - que se necesitaría en la operación del gasificador.

El valor escogido para este caso y que corresponde

a un trabajo a medio tiempo es de S/.60.000,00 anuales.

Para el sistema diesel se ha supuesto que el costo del operador del motor está incluido en el de mantenimiento.

8. Costo de combustibles:

El valor en el mercado nacional del diesel al año 1.985 es de S/.10.6 por litro. En el caso de los residuos de madera se averiguó en los aserraderos - que su costo es de S/.750,00 el metro cúbico. Tomando la densidad de la madera promedio utilizada en esta tesis de 500 kg/m^3 nos da un valor de S/.1.50/kg, que equivale a S/.1500/tonelada. No se incluye aquí el costo de los procesos de cortado y secado de los residuos de madera. Es importante notar también que el costo de la madera en cuartones es aproximadamente cuatro veces mayor que el de los residuos. Lógicamente en la posible implementación de la tecnología de gasificación, se deberá buscar la manera de usar combustible in situ para disminuir los costos del mismo.

9. Tasa de interés e inflación:

Se consideró una tasa de interés real del 18 % y se pa

so por alto el efecto de la inflación en el precio del combustible.

Sobre la base de todo lo anteriormente expuesto, se determinó los costos anuales de funcionamiento de un motor diesel de doble combustible (gas pobre - diesel) con un termogasificador de madera, para compararlo con el costo correspondiente a un motor diesel convencional.

Los resultados de este análisis están dados en la tabla - XXIII.

Del costo final de energía indicado en la misma tabla, se deduce fácilmente que en las condiciones establecidas en esta sección, un sistema convencional de fuerza motriz operando con diesel es más económico en un 30 % aproximadamente que el sistema alternativo propuesto.

A primera vista parece indicar que el sistema gasificador - motor es económicamente impracticable ya que habría la tentación de generalizar este caso a los demás. En realidad, para decidir sobre la ventaja económica entre los dos sistemas, hay que estudiar

TABLA XXIII

RESULTADOS DEL ANALISIS ECONOMICO DE UN SISTEMA DE FUERZA MOTRIZ (20 kw)

Costos anuales en sucres

CONCEPTO	SISTEMA DIESEL	SISTEMA GAS POBRE DIESEL
1. Costo del capital anual del equipo*:		
Motor -----	S/.182.982,48	S/. 182.982,48
Gasificador -----		" 41.754,32
2. Combustible:		
Diesel-----	" 84.800,00	" 16.960,00
Madera-----		" 39.000,00
3. Mantenimientos:	" 32.000,00	" 78.600,00
4. Lubricantes:	" 4.240,00	" 8.480,00
5. Mano de obra adicional:		" 60.000,00
Costo total anual:	" 304.022,48	" 427.776,80
Costo total de la energía ($\frac{\text{sucres}}{\text{kw-hr}}$)	15	21

*Los costos de capital anual, denominado anualidad (A), es el costo inicial del equipo, es decir la inversión (I), determinados anualmente para un período de t años (vida útil del sistema) con una tasa de interés anual k, calculados de la siguiente relación:

$$A = I \times \frac{k}{1 - (1+k)^{-t}}$$

cada caso por separado ya que existen ciertos parámetros como el de tiempo de operación y vida útil esperada del sistema que influyen en los costos totales de energía.

Sin embargo, es importante indicar aquí que los dos factores más decisivos en un análisis económico de este tipo son el costo de capital anual del gasificador y el costo de combustibles, tanto del diesel como de la madera.

En este momento, en nuestro país, con los costos de los derivados del petróleo relativamente más bajos que los que existen en otros países de la misma América Latina, es mi criterio que los sistemas convencionales de fuerza motriz aventajan a los sistemas gas pobre - diesel.

Es muy probable también que en varios años se revierta la situación y con costos más altos de derivados del petróleo, un buen programa de ^Rreforestación de bosques productores que haga disminuir el costo de la madera o con el diseño y construcción de un gasificador que opere con residuos agrícolas, se pueda adoptar el sistema gasificador - motor.

También es recomendable analizar las ventajas económicas del uso de gasificadores para el funcionamiento de motores a gasolina. Para ello se puede emplear un procedimiento analítico similar al hecho en esta sección, cambiando lógicamente algunas hipótesis para considerar aspectos como costos más bajos de los motores a gasolina, el hecho que se pueda sustituir el 100 % de la gasolina, costo de la gasolina con respecto al diesel, etc.

Se puede adelantar a groso modo el criterio de que los beneficios de la conversión de un motor de gasolina a gas pobre, no son muy diferentes a los que existen en la conversión de un motor diesel a gas pobre - diesel para una misma potencia. Esto se da porque el menor costo del motor se ve compensado por la menor vida útil de los motores a gasolina con respecto a las unidades diesel. Además, la ventaja de sustituir toda la gasolina por gas pobre se ve neutralizada por la reducción de potencia originada por el poder calorífico del gas pobre. Esta conclusión supone que los costos de la gasolina y diesel son aproximadamente iguales, cosa que hoy ocurre en nuestro país.

El análisis económico realizado aquí, sirve como una guía para otras aplicaciones diferentes a la indicada en esta sección. Si se desea un análisis más completo, como por ejemplo estudiar el efecto económico que pueda producir la variación de los costos de los parámetros indicados en la tabla XXII, conocido esto como "Análisis de sensibilidad", se recomienda leer la referencia 10 .

9.2. IMPACTO ECOLOGICO POTENCIAL

Se conoce que los bosques contribuyen al equilibrio de los ecosistemas que posee la tierra. Por ejemplo, los árboles influyen en el control de la temperatura ambiental, humedad, cantidad de oxígeno (O_2) y de dióxido de carbono (CO_2) en el ambiente. Los bosques disminuyen la erosión, forman la estructura de suelos adecuada y en ellos se acumulan los nutrientes necesarios para las labores agrícolas. Además del punto de vista ecológico, los bosques son también importantes para la economía de nuestro país, ya que de ellos se obtiene la madera que es la materia prima de ciertas industrias asentadas a lo largo de la costa, sierra y oriente.

El Ecuador dispone cada año de menos bosques, no so

lo por la explotación indiscriminada de los bosques productores y muchas veces protectores (estos últimos están al alcance más directo de las familias que viven en zonas rurales), sino también debido a la falta de un programa adecuado de reforestación de bosques productores principalmente.

La disponibilidad actual (1.983) de bosques productores que sirven para el consumo humano y comercial, se ha estimado en unos 7'500.000 ha, repartidas así: Sierra 3'000.000 ha, Costa: 1'700.000 ha, Oriente: 2'504.000 ha.

En cuanto a bosques protectores, el país apenas posee 402.000 ha, que como se dijo anteriormente sirven para conservar los suelos, acumular nutrientes, garantizar la vida de la flora y fauna además de regular el clima.

Según el Censo de 1.974, aproximadamente dos tercios de la población ecuatoriana usaba carbón y leña como combustible. El consumo promedio anual de cada familia era de 5 m^3 de leña o su equivalente de 0.66 ha, por año de bosques. Sin embargo, hoy en día el consumo de este tipo de energía renovable va decreciendo de

bido al aumento en la explotación del combustible fósil que se ha experimentado en los últimos años permitiendo así una relativa accesibilidad a dichos combustibles por parte del consumidor rural ecuatoriano.

Si a todo este problema existente, le sumamos el posible impacto ecológico negativo que se daría debido a la implantación de la tecnología de gas pobre en forma no planificada, se agravaría aun más el efecto desforestador. Esto se daría si hubiera un uso exagerado de la madera como combustible biomásico; el cual llegaría a ser tal si es que en nuestro país se instalaran muchas plantas de termogasificación. (al momento no existe ninguna).

Sin embargo, la tecnología de gasificación sigue siendo una alternativa adecuada en nuestro medio si es que se investigara acerca de la operación de un gasificador que use residuos agrícolas tales como, tucas de maíz, cascarilla de arroz pelletizada, etc. o en el peor de los casos residuos de madera, ya que ellos están disponibles en cantidades apreciables y sus costos son muy bajos o generalmente no cuestan nada, además de que constituyen en muchas ocasiones, desperdicios -

que se amontonan y no se aprovechan. Las ventajas están a la vista, ya que por un lado la instalación de una planta de gasificación en un molino de maíz por ejemplo, representaría un ahorro, ya que se utilizaría las tusas de maíz ya desgranadas como combustible para el gasificador, convirtiendo así este residuo (energía química) en energía mecánica para mover el molino sin mayor costo. Además de esta ventaja particular del hombre, no habría el efecto desforestados del cual hablabamos anteriormente lo cual constituye un beneficio para el país.

9.3. EVALUACION SOCIO - ECONOMICA GLOBAL

En esta última sección de la tesis, se hará una breve evaluación de los factores que inciden en el costo del sistema alternativo de energía (bio-energía) además de los factores de tipo social que pueden ser afectados al introducir la tecnología del gas pobre. Para ello, se hará referencia a la gasolina y diesel como combustibles convencionales los cuales podrían ser sustituidos con la nueva fuente de energía objeto de este trabajo, concretamente el gas pobre, y de la comparación en el costo de implementación de la tecnología alterna con respecto a la

convencional poder establecer ventajas y desventajas socio-económicas para el país

En el caso de la gasolina y diesel, los costos son directamente cuantificables debido a que tienen un precio comercial establecido. Pero en un análisis socio-económico, además de incluir los costos directamente imputables, se deberá considerar otros factores como son los costos indirectos, la existencia de subsidios, así como también otros costos y beneficios de impacto social.

Por otro lado, hay que considerar el uso del gas pobre a partir de la biomasa agrícola y forestal. En este caso, podrá fijar el costo de la producción de un metro cúbico de gas, se debe tomar en cuenta los costos de construcción, mantenimiento, lubricación, consumo y costo de la biomasa, mano de obra adicional de la planta de gasificación, en base a la vida útil estimada de la planta.

Desde el punto de vista económico, y considerando solamente el aspecto energético, el gas pobre puede competir con los combustibles convencionales (gasolina y diesel) bajo las consideraciones hechas en la sección 9.1. Además, si consideramos el uso de ga

solina o diesel en comparación con el gas pobre en zonas rurales principalmente, se puede concluir que en el primer caso, el dinero sale de la región y parcialmente del país (importaciones y subsidios del combustible fósil), mientras que el proyecto del uso de gas pobre, y a pesar del relativo costo elevado en la inversión inicial (gasificador), representa beneficios de tipo social a la comunidad como lo son, la recirculación del capital, la generación local del trabajo, independencia en el suministro de combustible ya que lo pueden obtener, en el caso de residuos agrícolas, de sus mismas cosechas, lo cual también implica economía en el combustible usado.

En la tabla XXIV se muestra cualitativamente un análisis de los costos y beneficios sociales que pueden darse en la implementación del gas pobre en el país (con la ayuda de la referencia)⁽²⁾, comparado con el uso de gasolina y diesel.

La evaluación cuantitativa de los parámetros mostrados, no es sencilla hacerla ya que se requiere - principalmente entre otras cosas, de la experiencia sólida en el uso y aplicación práctica de la tecnología de gasificación, la cual al momento de es

TABLA XXIV
ANALISIS CUALITATIVO DE COSTOS Y BENEFICIOS SOCIALES EN LA IMPLEMENTACION
DEL GAS POBRE EN EL PAIS

Costo (C)	Beneficio social (B)	
ENERGETICO PARAMETRO	CONVENCIONAL (DIESEL - GASOLINA)	ALTERNO (BIOMASA)
Perdida de divisas	Variable y significativo depende de importaciones. (C)	Casi no existe durante la vida del equipo.
Facilidad de comercialización	Pueden ser transportados facilmente. (B)	Está limitado en su transporte y distribución. (C)
Dependencia externa a la comunidad.	Varia. Depende del porcentaje de importaciones. (C)	Normalmente ninguna. Permite independencia relativa. (B)
Generación local de trabajo.	Pequeña limitada al transporte.	Genera fuentes de trabajo local. (B)
Recirculación del capital en la comunidad	Mínimo (C)	Gran circulación del capital (B)
Contaminación ambiental	La hay, aunque todavía no en gran porcentaje.	Uso de biomasa tiende a preservar el ambiente. (B)
Cambios requeridos en el uso de la energía	Ninguno	Se requiere adaptación (Uso de gasificadores, filtros, enfriadores, etc) (C)

Continua.....

Viene.....

Integración a esquema industrial actual	Inmediata. Industria actual usa energía - convencional.	A mediano plazo es muy probable que exista. (C)
Integración a esquema de producción agrícola.	Uso de combustible - en maquinaria agrícola.	Puede ser fácilmente integradas (B)

* Esto será siempre y cuando exista un programa de reforestación adecuado.

FUENTE: Ref.2.-

cribir esta tesis no existe en nuestro país.

En conclusión, proyectos energéticos de este tipo (fuentes alternas) que se desearan desarrollar, deberán ser analizados con criterios técnicos y económicos bien claros y definidos, con el fin de evitar - por un lado, el fracaso como producto del entusiasmo solo, o por otro lado ser víctimas de desprestigios producidos por intereses económicos y más no en busca de los intereses sociales que son los del hombre y consecuentemente los del país.

Finalmente, se presenta en la figura N° 9.1., un programa tentativo para el desarrollo de la tecnología de gas pobre tomado de la referencia 2 .

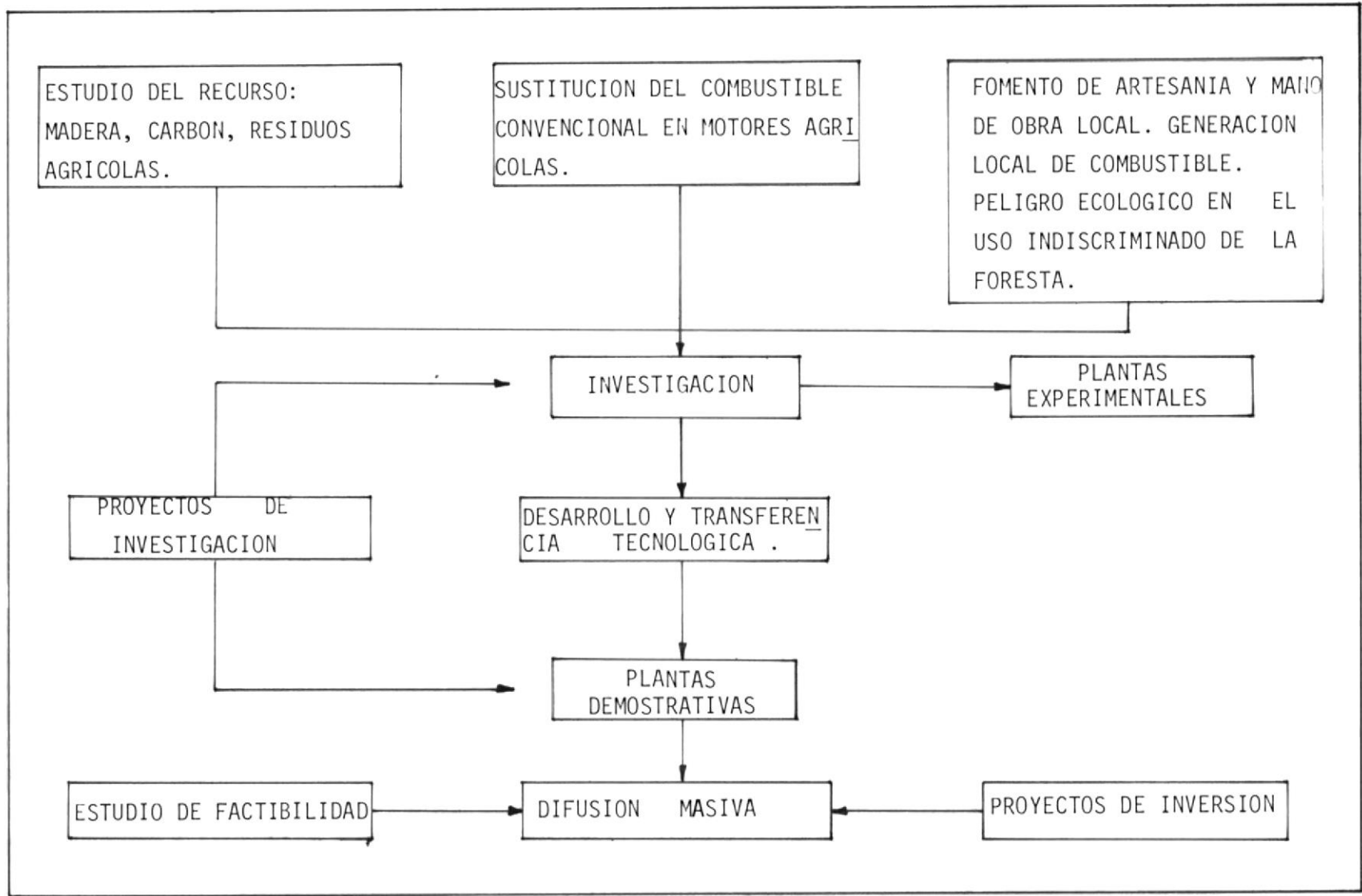


FIGURA Nº 9.1. PROGRAMA NACIONAL TENTATIVO PARA EL DESARROLLO DE LA TECNOLOGIA DE GAS POBRE EN EL PAIS
FUENTE: Ref.2.-

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

1. Un termogasificador o generador de gas tiene poca utilidad por sí mismo, es por eso que la termogasificación, debe considerarse como un todo y que comprende la planta de gasificación, el sistema de enfriamiento y depuración y el elemento final que convierte la energía, ya sea un motor de combustión interna o un quemador. En realidad luego de haber realizado las pruebas, el producir gas combustible no es algo difícil, requiriendo - principalmente tiempo y paciencia para que ello ocurra. Creo que lo complicado sería generarlo en un estado físico - químico apropiado para el funcionamiento de un motor durante un tiempo prolongado.
2. La inevitable baja de potencia en un motor de combustión interna cuando se opera con gas pobre debido a la menor densidad energética de la mezcla aire-gas pobre, no debe constituir un grave inconveniente, ya que di

cho problema puede compensarse sobrealimentando el motor o utilizando un motor más grande al diseñado originalmente con gasolina o diesel.

3. Lo más prometedor de la tecnología de gas pobre en nuestro país desde el punto de vista socio-económico, está en la aplicación de dicha tecnología en las industrias de tratamiento de cultivos y maderas, tales como aserrín, tusas de maíz, cascarilla de arroz, cáscara de cacao, etc., que necesitan energía mecánica o eléctrica.

Aunque la mayoría de estos combustibles son difíciles de gasificar debido al estado actual de conocimientos con estos tipos de residuos. Por ejemplo, se podría aspirar a una posible utilización de unidades de gas pobre en pequeñas piladoras de arroz; siempre y cuando se pueda gasificar adecuadamente las cascarillas de arroz. Las bombas de riego de baja potencia (5-20 kw) que se emplean en gran cantidad en las zonas rurales del país para la preparación de la tierra, sería también otra aplicación factible.

4. La construcción de un gasificador para pequeña escala - (hasta 20 kw), incluyendo el equipo de enfriamiento y depuración, no exige elementos mecánicos complejos ni

conocimientos técnicos muy desarrollados, por lo tanto su total construcción puede hacerse con poca o ninguna dificultad en talleres existentes en la ciudad o en el país.

5. Según las pruebas realizadas, se puede estimar que 1.38 kg de madera con 15 % de humedad sirve para generar - 1 kw-hr de energía mecánica utilizando un motor de combustión interna con eficiencia del 25 %. Así por ejemplo un "canguro" que opere con una potencia efectiva de 75 kw necesitará de 103.5 kg de madera por cada hora de operación con gas pobre. Este dato va a depender del tipo de operación del gasificador y permite establecer la cantidad de biomasa necesaria para una aplicación determinada.
6. En las pruebas de tipo cualitativo, se pudo observar - que para una satisfactoria operación del gasificador, la madera debe ser ingresada a la carbonera con un tamaño apropiado, esto es, de 4 a 6 cm., promedio y más o menos uniforme, ya que tamaños mayores no permitían una buena combustión. La humedad típica debería ser del 15 al 25 %. Para humedades mayores a esta, se observó en las pruebas realizadas gran dificultad en la producción del gas combustible.

7. Se estableció, bajo las estimaciones hechas en el Capítulo de análisis económico, que en estos momentos en que el costo del diesel o gasolina son bajos en comparación con los de otros países, no es rentable económicamente ($\frac{S/.15,00}{kw - hr}$ para el motor diesel y $\frac{S/.21,00}{kw - hr}$ para el sistema diesel - gas pobre) usar el sistema de gasificación para producir fuerza motriz. Sin embargo es muy probable que si el estudio económico se lo hace utilizando residuos agrícolas como materia prima, el sistema gasificador - motor sería una alternativa provechosa en términos económicos, ya que dicho combustible no tendría costo alguno, principalmente en aquellos lugares donde se produce y que estarían en capacidad de usarlo en un gasificador para generar fuerza motriz.

RECOMENDACIONES

1. Los dos principales problemas relacionados con el uso del gas pobre y que son, el riesgo para la salud del operador y el peligro de incendio de la planta, deberán ser minimizados en cualquier plan orientado a poner en práctica esta tecnología, mediante programas de educación e impartiendo normas de seguridad particulares y gubernamentales.



2. Es necesario también tomar en cuenta el problema de disponibilidad del combustible biomásico, principalmente la madera ya que si persiste la explotación indiscriminada de árboles, esta tecnología podría agravar aún más la situación, obviamente que esto ocurriría con la implantación de algunas plantas de gasificación. Por consiguiente, la utilización de gas pobre requerirá el uso de residuos agrícolas que en la actualidad no se utilizan, o la reducción del actual uso de madera - combustible mediante una mejor eficiencia de conversión y sumado a esto, una mayor producción de bosques.

3. La tecnología de gasificación podría tener consecuencias potencialmente benéficas, así como también efectos negativos. Ventajas y desventajas de esta tecnología deben ser analizadas bajo los siguientes aspectos:
 - Aplicabilidad del gas pobre como combustible para la zona rural principalmente.
 - Disponibilidad real de la biomasa
 - Formas de dependencia tecnológica
 - Impacto ecológico
 - Impacto socio-económico (costos y beneficios socio-económicos).

4. En cuanto al diseño del equipo se refiere, sería recomendable

mejorar el sistema de aislamiento que actualmente es de lana de vidrio y que por las altas temperaturas existentes en la pared de crisol, éste no fue el adecuado, lo cual influyó en las pérdidas de calor por radiación principalmente, y que en las pruebas alcanzaron el 15 % de la energía inicial disponible. Una alternativa viable es cubrir con ladrillo refractario al crisol y disminuir con ello las pérdidas térmicas.

5. Para futuros trabajos en gasificación sería recomendable usar como equipo analizador de gases ya sea un aparato de Orsat que además de medir los porcentajes en volumen de CO_2 , O_2 y CO también pueda determinar H_2 y CH_4 (por combustión), o un cromatógrafo de gases, ya que con ellos se obtendrá datos y resultados más confiables.

Para determinar el caudal de aire, se recomienda en vez de usar el velocímetro, construir e instalar un venturi en la tubería de entrada al gasificador.

6. Es necesario terminar esta tesis diciendo que, si bien es cierto, la producción de gas pobre es un proceso bien conocido en muchos países, principalmente utilizando como combustible la madera y el carbón vegetal, y que en el presente trabajo lo que se ha hecho es comprobar la factibilidad de generar gas pobre utili-

zando la madera disponible en el país en un gasificador que fue construido en un taller de la ciudad, es necesario entonces recomendar como el paso siguiente y fundamental de este trabajo, el uso del gas ya generado en un horno o un motor de combustión interna para lograr así la experiencia necesaria en la operación de una planta de gasificación de fuerza motriz o térmica, la cual serviría posteriormente para poner en la práctica dichas instalaciones, y procurando de esta manera que la investigación hecha, no quede solo en eso, sino más bien que sea útil para el desarrollo de esta tecnología en el país.

APENDICE A

CURVAS DE DISEÑO

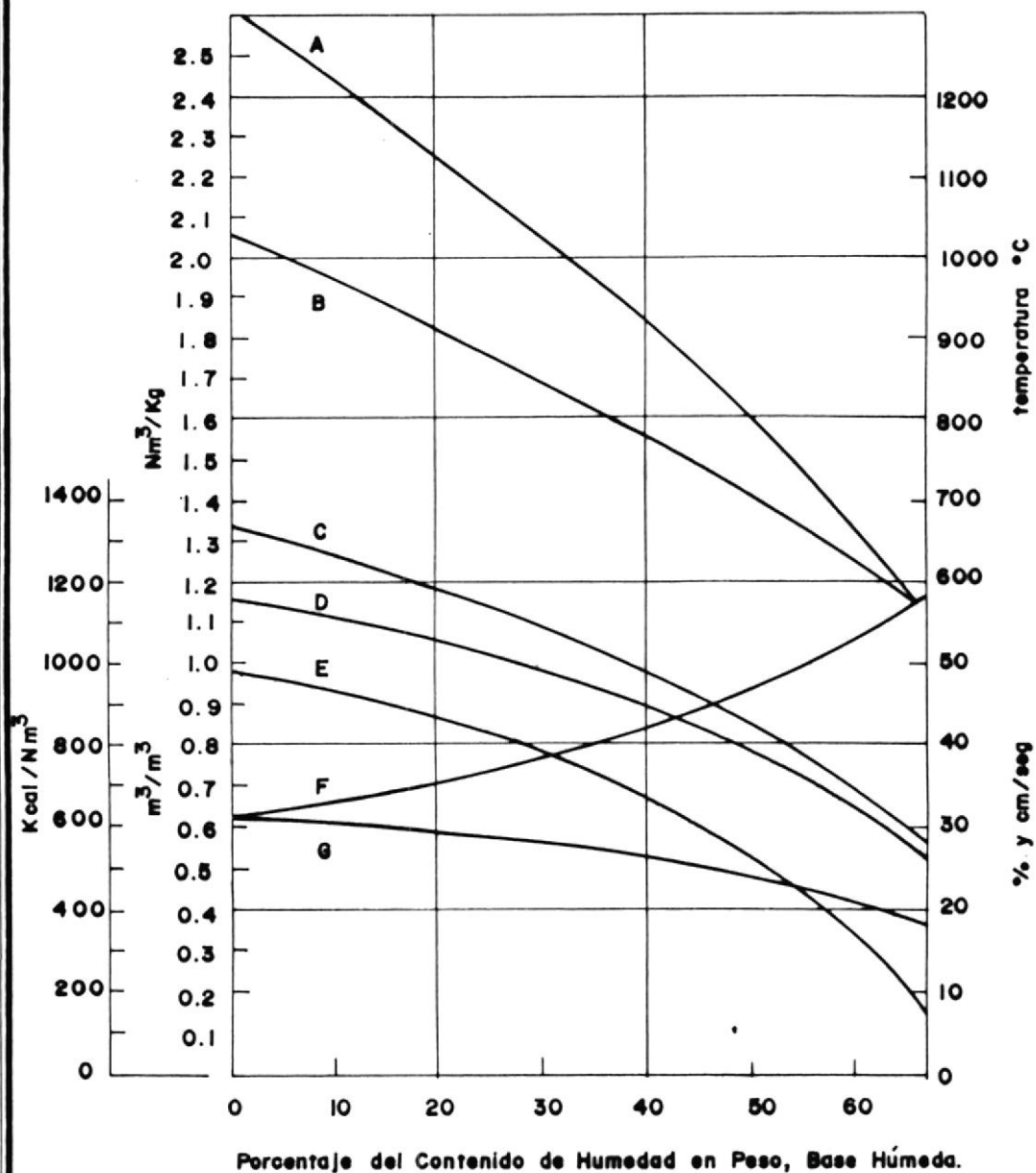


FIGURA A-1.- PROPIEDADES DEL GAS POBRE COMO UNA FUNCION DEL CONTENIDO DE HUMEDAD.

- | | |
|---|---|
| A Producción de gas, Nm^3/Kg base húmeda | B Temperatura de reacción teórica, °C. |
| C Poder Calorífico inferior, Kcal/Nm^3 | D Relación teórica Aire/gas, $\frac{\text{m}^3 \text{ aire}}{\text{m}^3 \text{ gas}}$ |
| E Velocidad de llama máxima, cm/seg. | F Pérdida de Potencia teórica en un motor, % |
| G Poder calorífico de la mezcla Gas-Aire a 0°C y 1 ATM, Kcal/Nm^3 . | FUENTE: REF. 10 |

FIGURA A-4.- Gráfico para determinar el diámetro del gasificador a la entrada de la zona de combustión y la altura del plano de la tobera para varios gasificadores en función del diámetro de la garganta.

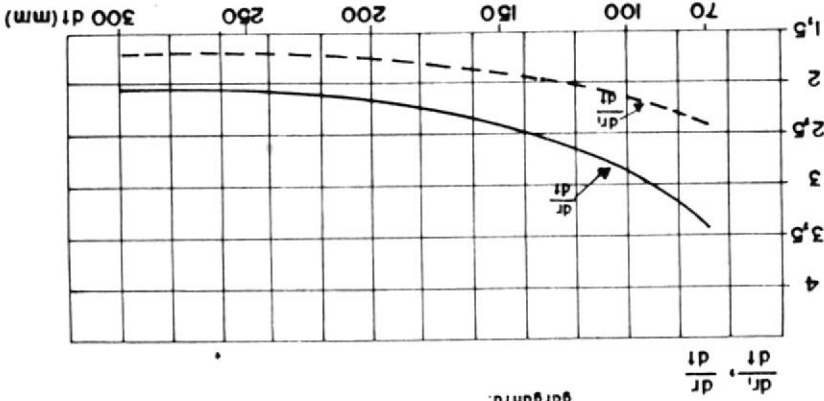


FIGURA A-3.- Gráfico para determinar el área de las toberas y la velocidad de aire en la misma para operación en motores de cuatro cilindros con varios cilindros, en función del diámetro de la garganta.

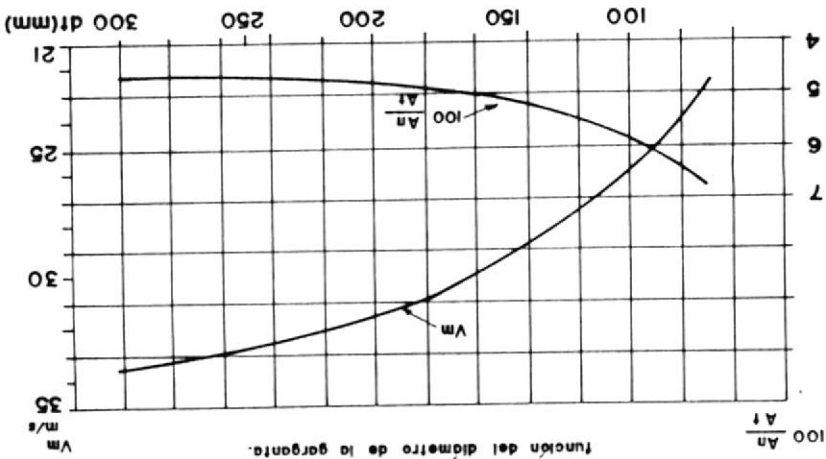
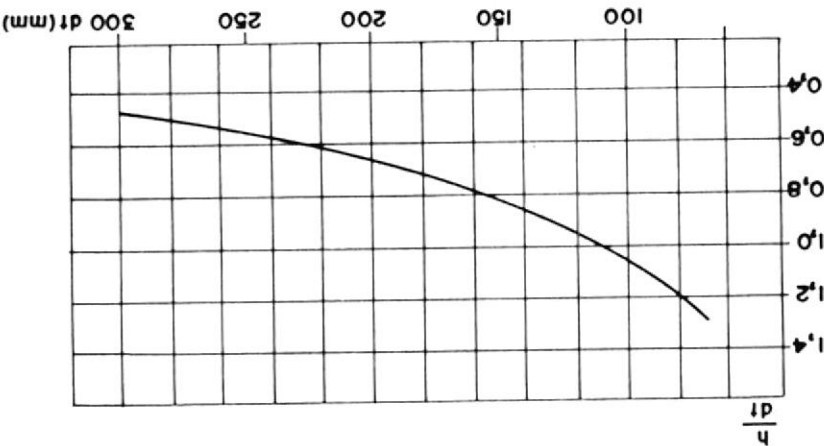


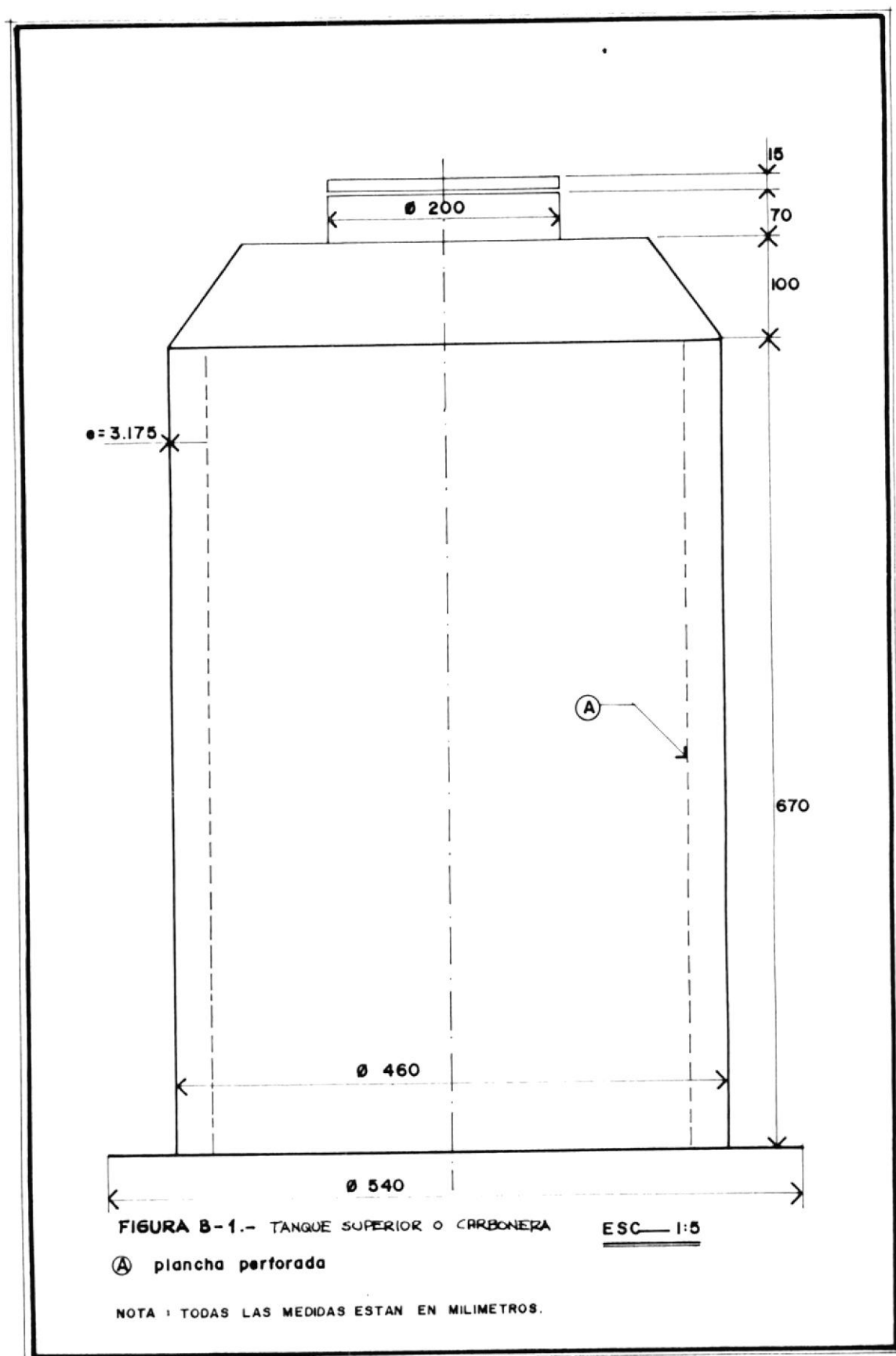
FIGURA A-2.- Gráfico para determinar la altura del plano de la tobera o la garganta para varios tamaños del gasificador, en función del diámetro de la garganta.



APENDICE B

PLANOS DEL TERMOGASIFICADOR - CICLON





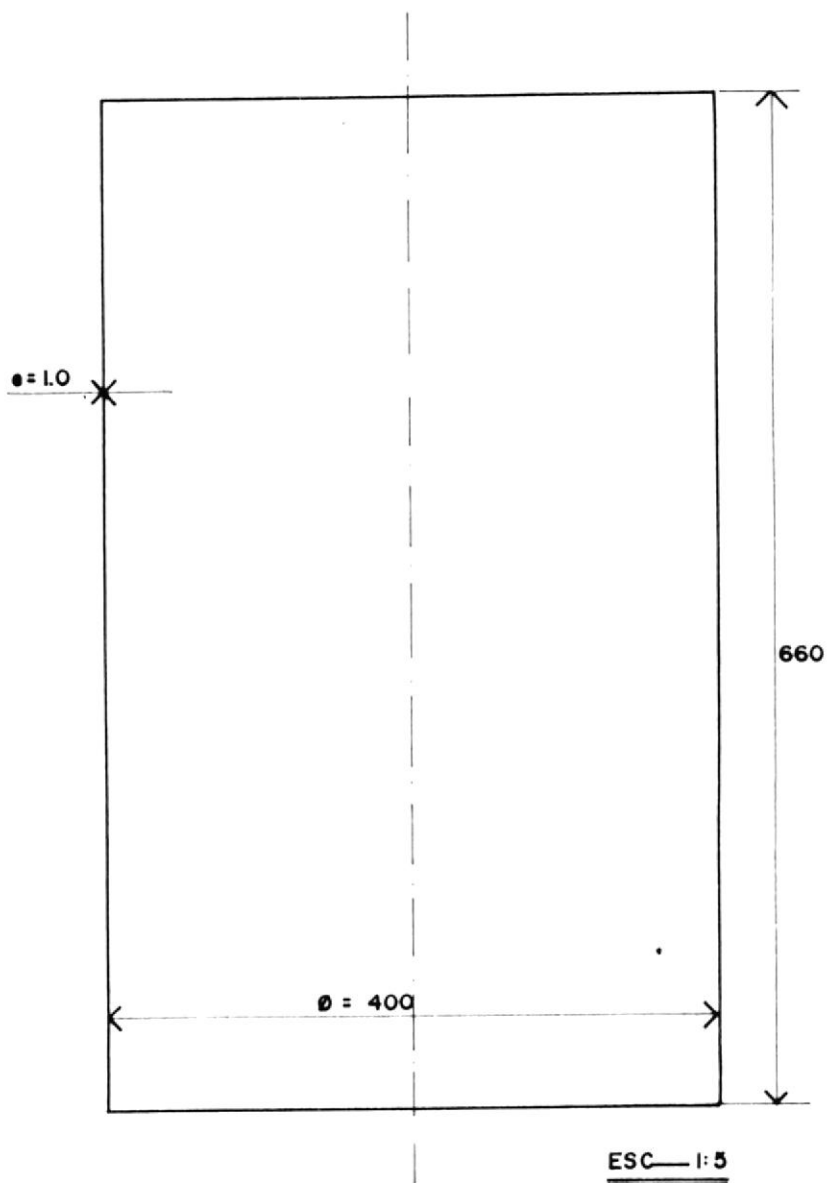
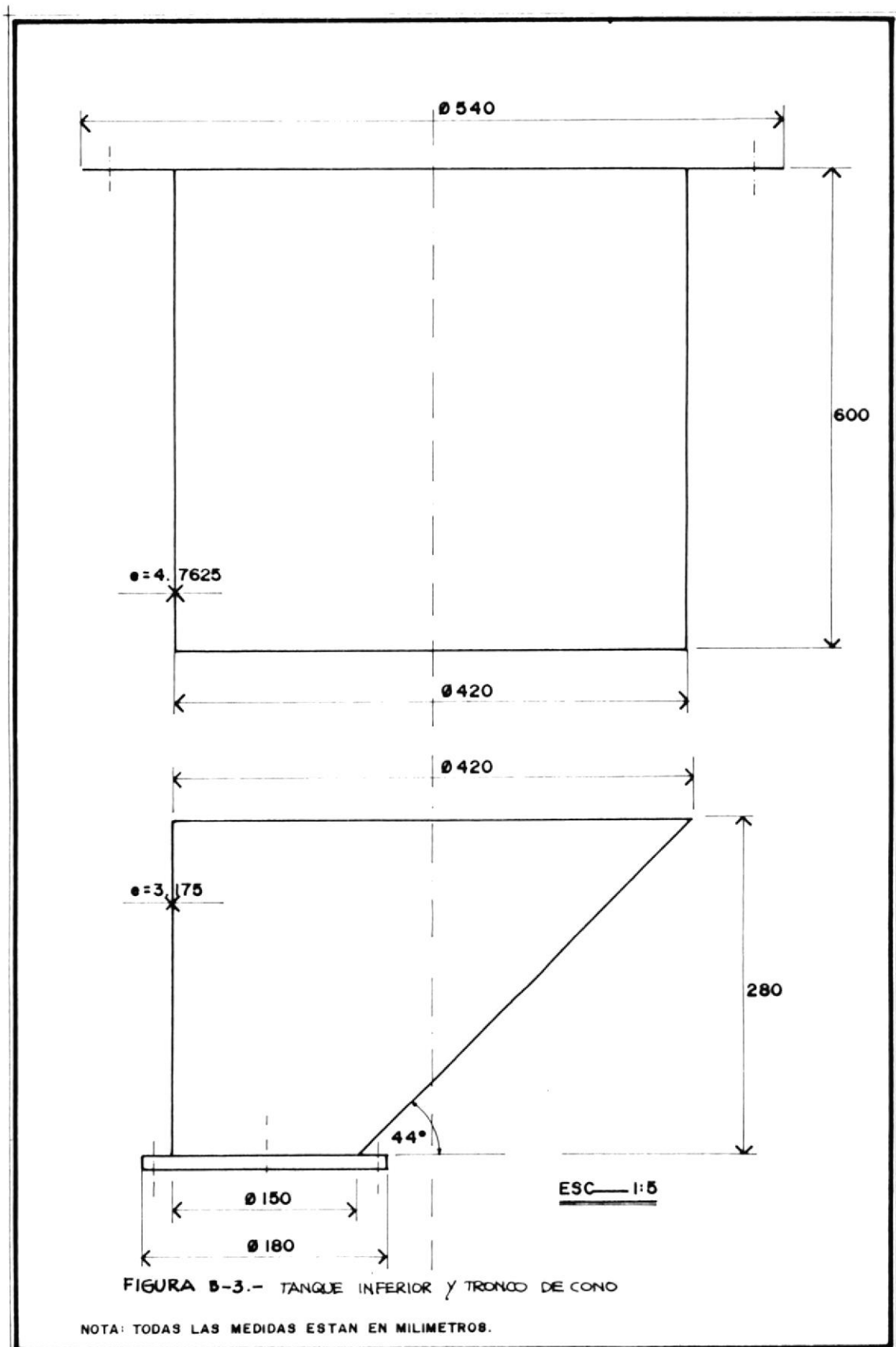


FIGURA B-2.- PLANCHA PERFORADA

NOTA: TODAS LAS MEDIDAS ESTAN EN MILIMETROS.



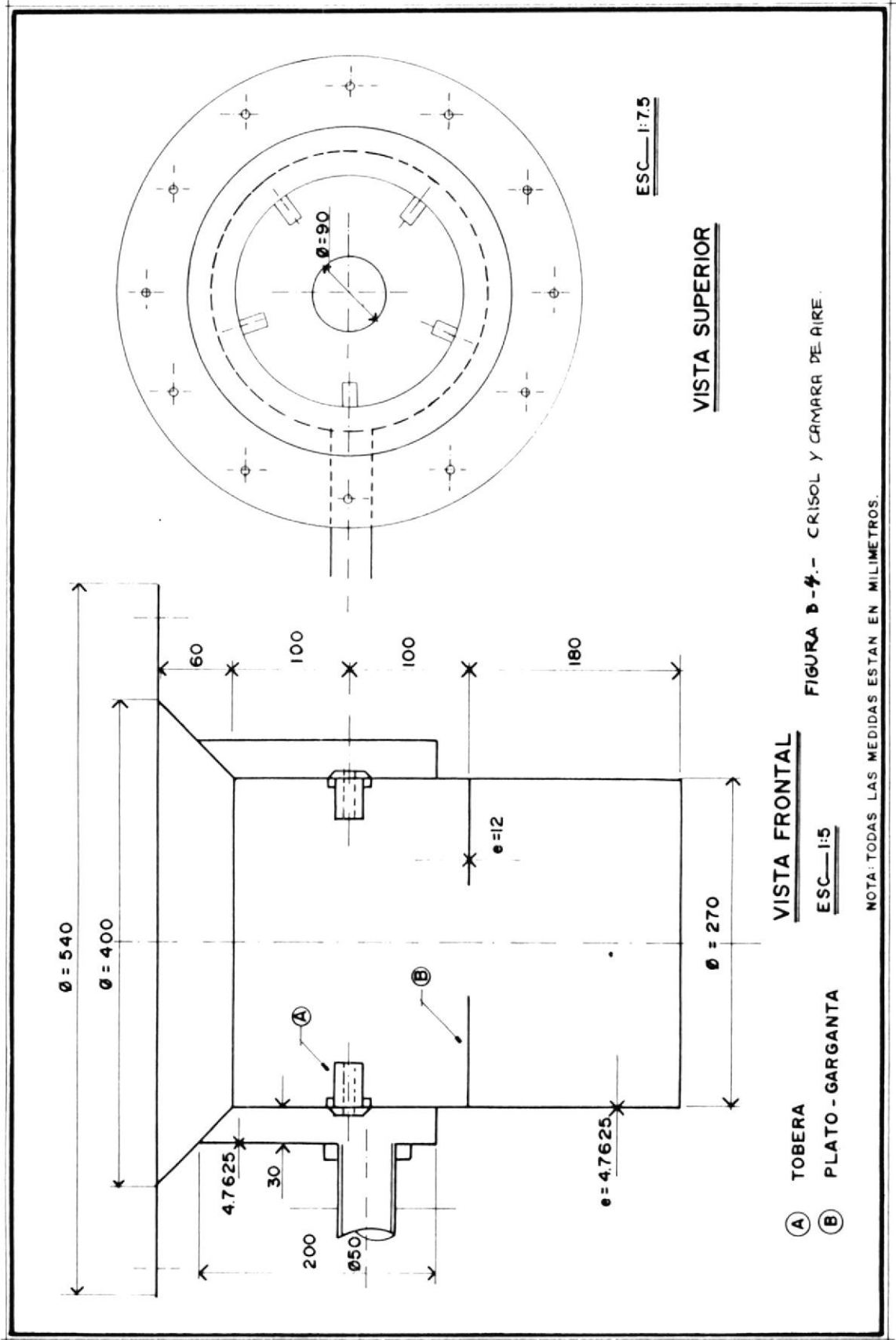
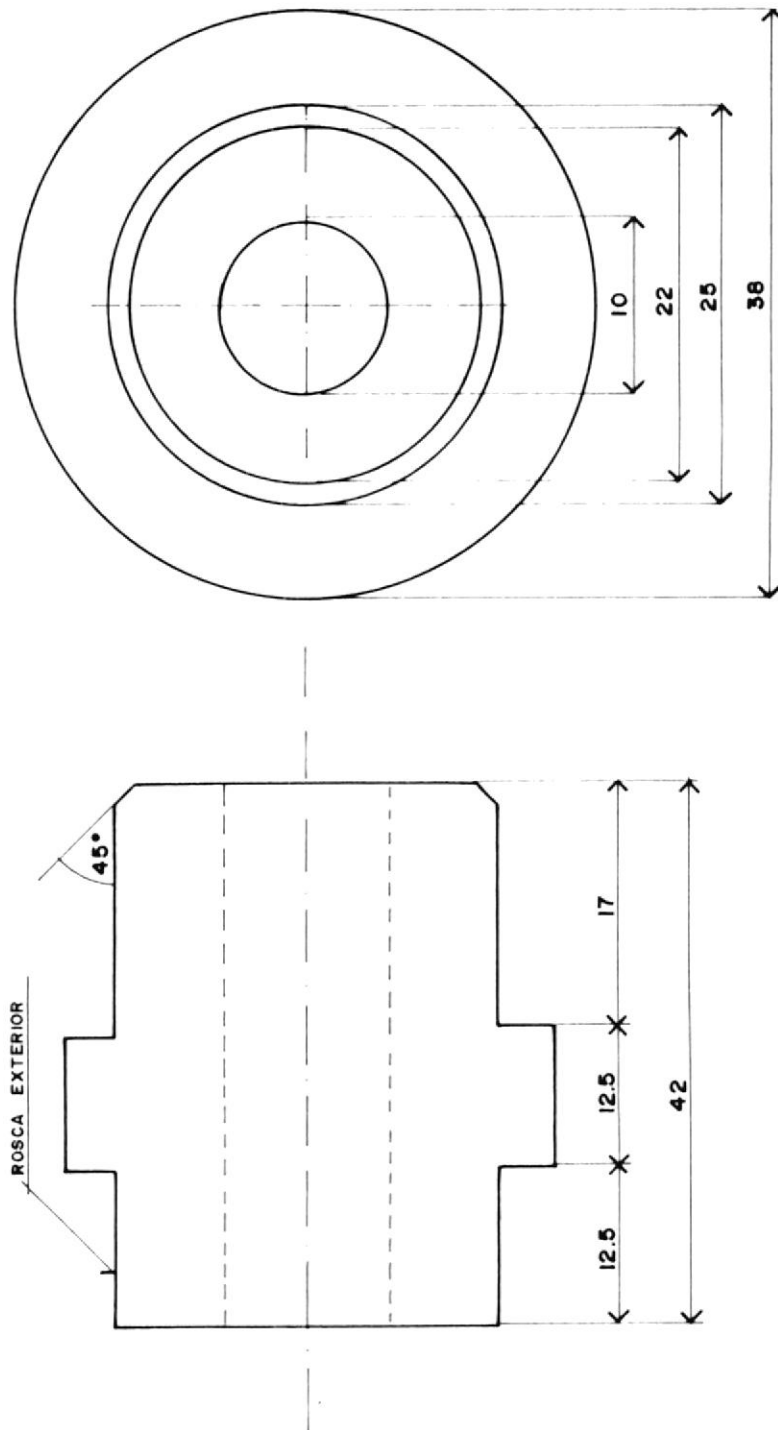


FIGURA B-4.- CRISOL Y CÁMARA DE AIRE.

NOTA: TODAS LAS MEDIDAS ESTAN EN MILIMETROS.

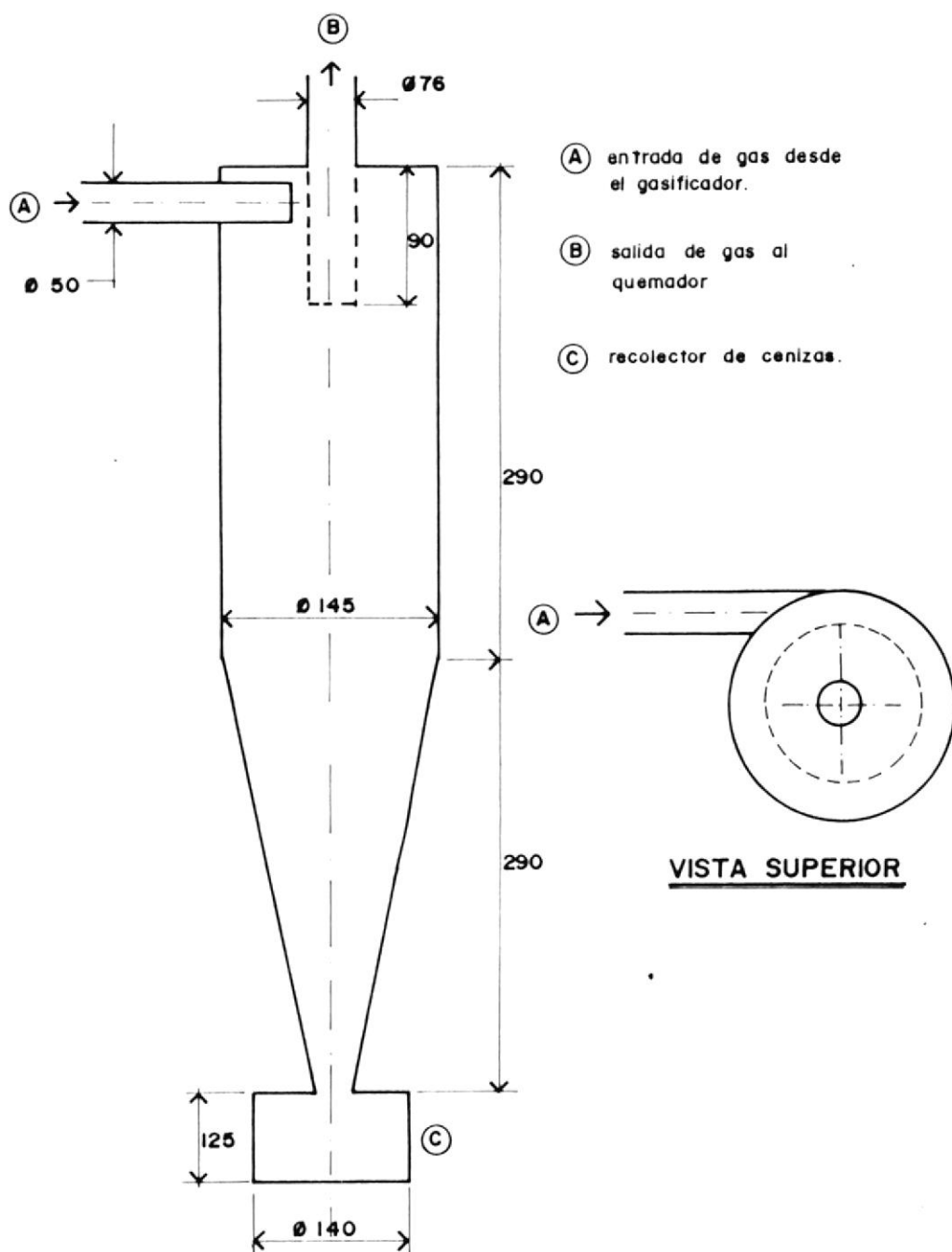


VISTA LATERAL

ESC 1:5

FIGURA B-5.- TOBERA

NOTA: TODAS LAS MEDIDAS ESTAN EN MILIMETROS.



ESC 1:5

VISTA FRONTAL

FIGURA B-6.- FILTRO - CICLON

NOTA: TODAS LAS MEDIDAS ESTAN EN MILIMETROS.



APENDICE C

FOTOS DE LA CONSTRUCCION Y PRUEBAS DEL TERMOGASIFICADOR



FIGURA C-1.- DESARROLLO DEL TRONCO DE CONO INFERIOR



FIGURA C-2.- DESARROLLO DEL TRONCO DE CONO QUE HACE DE SEGUNDA GARGANTA.

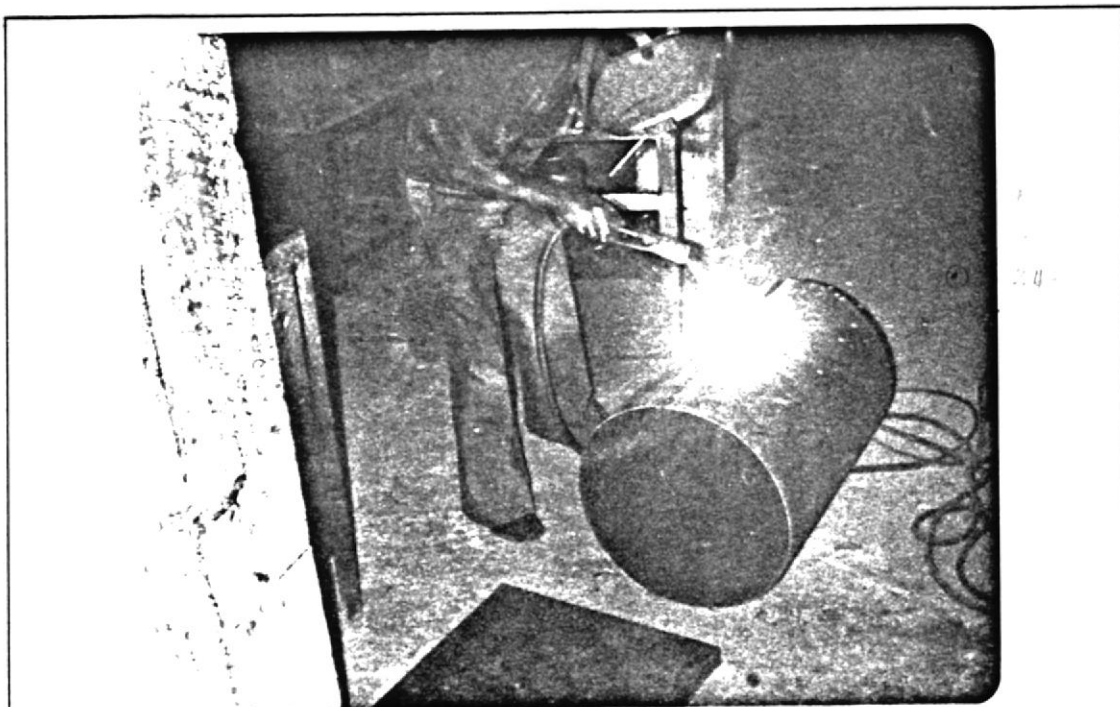


FIGURA C-3.- CILINDRO SUPERIOR



FIGURA C-4.- CILINDRO INFERIOR

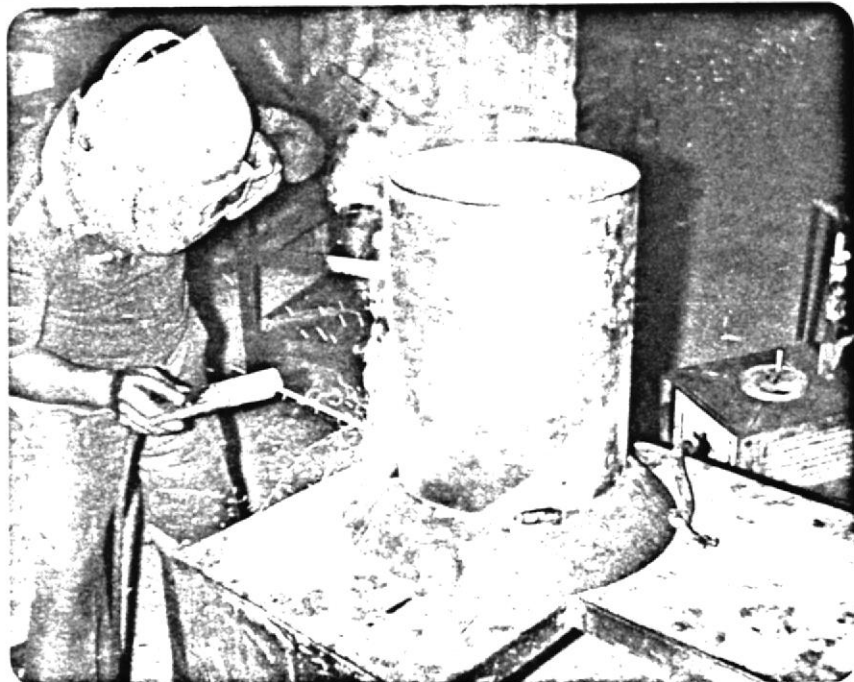


FIGURA C-5.- CILINDRO DEL CRISOL

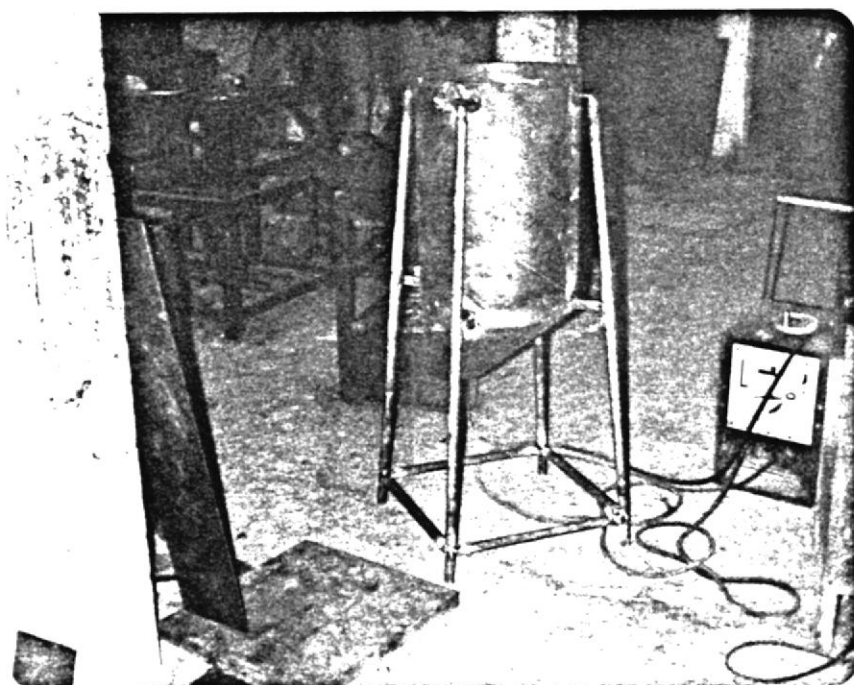


FIGURA C-6.- ESTRUCTURA DE SOPORTE



FIGURA C-7.- PLANCHA PERFORADA



FIGURA C-8.- TOBERAS Y PLATO-GARGANTA



FIGURA C-9.- MAQUINADO DE BRIDAS



FIGURA C-10.- PERFORACION DE BRIDAS

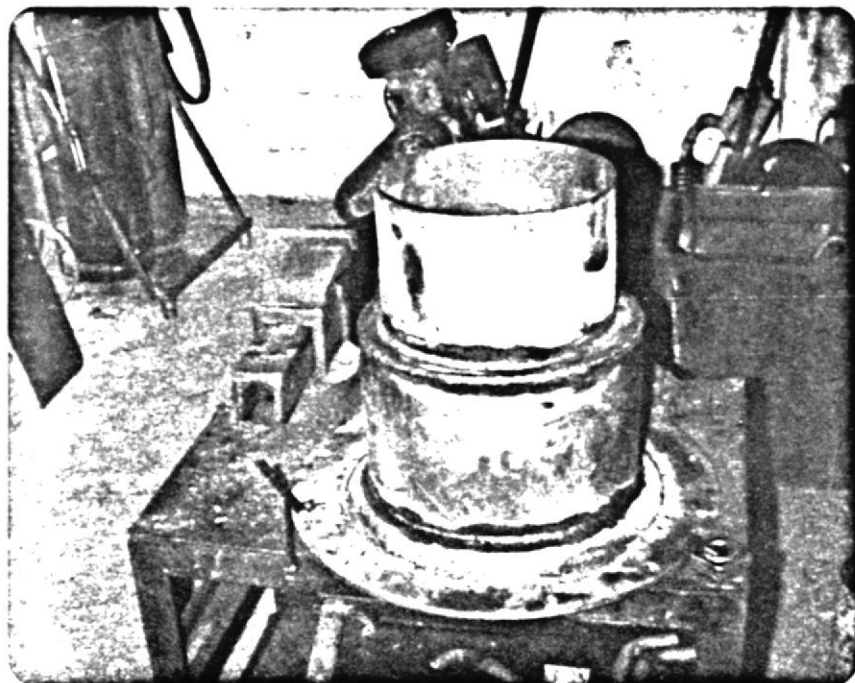


FIGURA C-II.- CAMARA DE AIRE

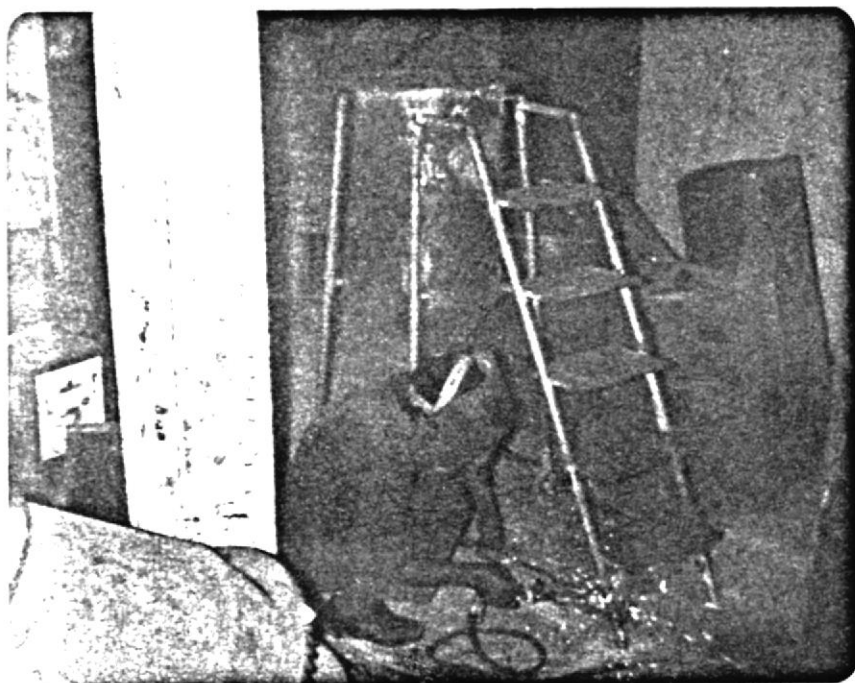


FIGURA C-12.- ESCALERILLA

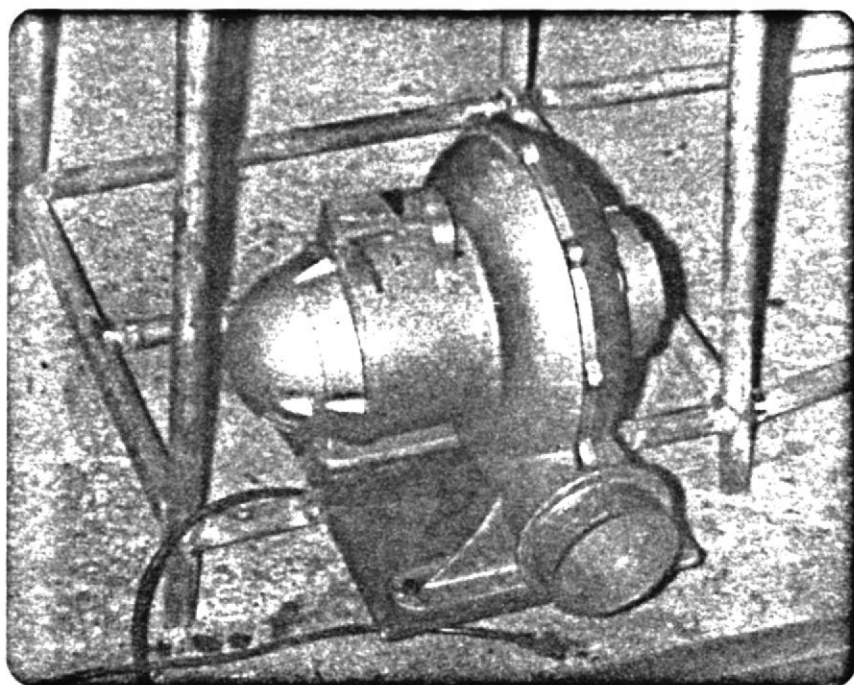


FIGURA C-13.- VENTILADOR

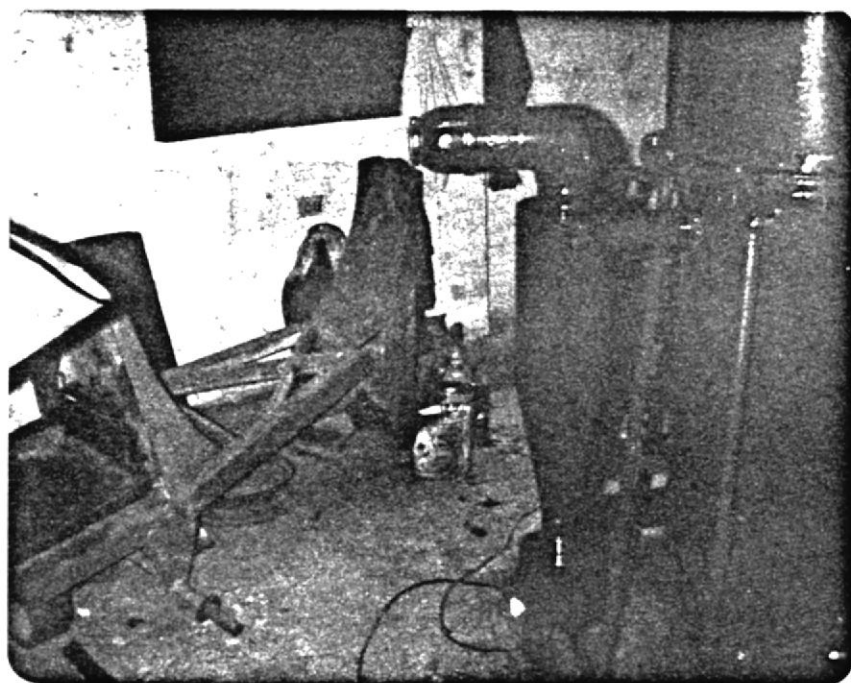


FIGURA C-14.- CICLON



FIGURA C-15.- TAPA SUPERIOR



FIGURA C-16.- AISLAMIENTO

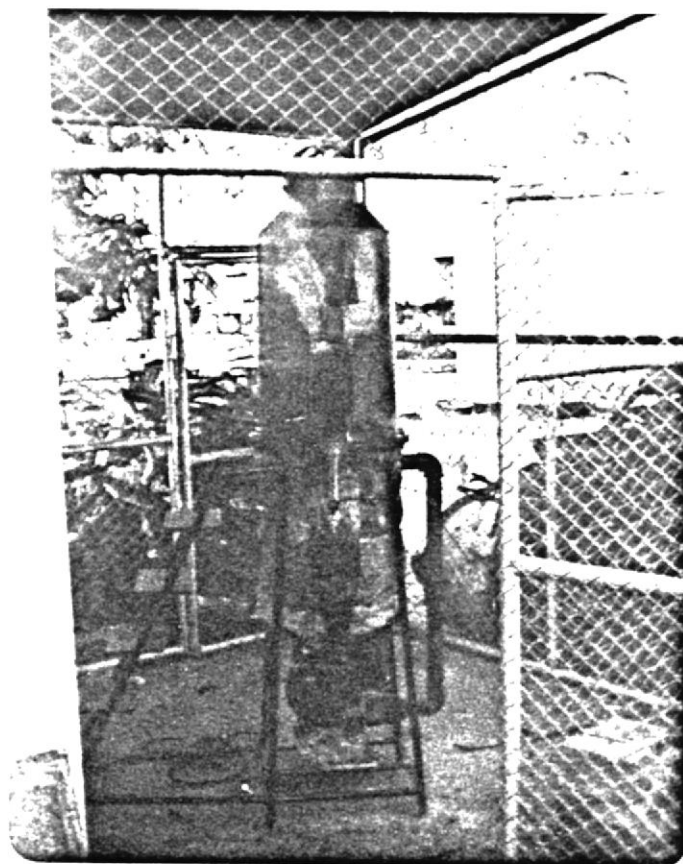


FIGURA C-17.- PRUEBAS





FIGURA C-18.- PRUEBAS



FIGURA C-19.- PRUEBAS



FIGURA C-20.- PRUEBAS

APENDICE D

TABLAS DE DATOS EXPERIMENTALES Y PARA CALCULOS

COMBUSTIBLE: MADERA

TAMAÑO PROMEDIO= 5 cm.

HUMEDAD= 14 %

CONDICIONES: - PRESION= 1 ATM
AMBIENTALES - TEMPERATURA= 26°C

LECTURA #	CONCENTRACION DE GASES			TEMPERATURA SALIDA DE LOS GASES	VELOCIDAD DE ENTRADA DE AIRE	OBSERVACIONES
	% CO ₂	% O ₂	% CO	(°C)	(m/s)	
1	10.5	0.5	16.4	520	1.35	a.- Consumo=27kg
2	13.5	1.5	17.4	510	1.27	b.- Carga Parcial=10:28 hr.
3	14.0	1.8	18.0	550	1.40	c.- Se prendio madera=10:30hr.
4	16.0	0.5	16.4	560	1.37	d.- Termino carga=10:41 hr.
5	14.0	0.2	18.2	555	1.42	e.- Se prendio la llama=11:30
6	15.5	1.0	17.0	560	1.27	f.- Se apago la llama=12:32hr
7	14.5	0.5	16.0	570	1.17	g.- Masa Residuo Sólido=1.1kg
8	12.0	0.5	16.6	585	1.24	h.- Masa ceniza= 0.8l Kg.
9	12.5	0.5	16.2	590	1.32	
10	9.0	0.2	17.6	580	1.37	
11	8.8	1.0	16.8	585	1.32	
12	10.8	2.0	17.8	580	1.37	

TABLA D-1 PRUEBAS EXPERIMENTALES N°1

COMBUSTIBLE: MADERA TAMAÑO PROMEDIO= 4.5cm. HUMEDAD= 14%

CONDICIONES: - PRESION=1.ATM
 AMBIENTALES - TEMPERATURA= 28°C

LECTURA #	CONCENTRACION DE GASES			TEMPERATURA SALIDA DE LOS GASES	VELOCIDAD DE ENTRADA DE AIRE	OBSERVACIONES
	% CO ₂	% O ₂	% CO	(°C)	(m/s)	
1	13.5	3.5	17.4	460	1.02	a.- Consumo= 24.5 kg.
2	13.0	2.0	16.4	520	1.22	b.- Carga Parcial=10:03 hr.
3	12.0	1.7	17.2	500	1.27	c.- Se prendio madera=10:05hr
4	11.0	1.5	19.0	540	1.32	d.- Termino carga=10:13 hr.
5	12.0	2.0	17.6	550	1.40	e.- Se prendio la llama=10:40
6	12.0	2.0	17.0	560	1.24	f.- Se apago la llama=11:30hr
7	11.2	0.8	18.0	555	1.22	g.- Masa residuo sólido=1.2kg
8	9.0	1.2	21.0	540	1.27	h.- Masa ceniza=0.78Kg.
9	12.0	0.8	18.0	530	1.32	
10	11.0	0.6	17.6	540	1.37	
11	10.8	1.0	19.2	525	1.19	
12	11.0	1.2	16.8	530	1.22	

TABLA D-2 PRUEBAS EXPERIMENTALES N° 2

COMBUSTIBLE: MADERA TAMAÑO PROMEDIO= 5cm. HUMEDAD= 14% CONDICIONES: - PRESION= 1ATM
 AMBIENTALES - TEMPERATURA= 30°C

LECTURA #	CONCENTRACION DE GASES			TEMPERATURA SALIDA DE LOS GASES	VELOCIDAD DE ENTRADA DE AIRE	OBSERVACIONES
	% CO ₂	% O ₂	% CO	(°C)	(m/s)	
1	15.4	4.0	11.8	415	1.45	a.- Consumo=26Kg.
2	16.0	3.5	15.0	585	1.37	b.- Carga Parcial=14:50 hr.
3	15.0	1.5	14.0	598	1.32	c.- Se prendio madera=15:55hr.
4	13.0	1.5	16.0	595	1.37	d.- Termino carga= 15:02hr.
5	12.4	2.5	17.2	592	1.27	e.- Se prendio la llama=15:38
6	13.0	2.0	18.0	588	1.52	f.- Se apago la llama=16:30hr
7	10.0	0.8	22.0	574	1.42	g.- Masa residuo sólido=1.1kg
8	11.0	1.0	18.0	580	1.32	h.- Masa ceniza=0.675kg.
9	10.2	1.0	16.0	582	1.37	
10	10.8	1.5	15.5	575	1.24	
11	12.0	1.2	18.0	576	1.32	
12	12.2	1.0	16.2	590	1.22	

TABLA D- 3.- PRUEBAS EXPERIMENTALES Nº 3

COMBUSTIBLE: MADERA

TAMAÑO PROMEDIO= 5cm

HUMEDAD= 16%

CONDICIONES: - PRESION= 1 ATM
AMBIENTALES - TEMPERATURA= 24°C

LECTURA #	CONCENTRACION DE GASES			TEMPERATURA SALIDA DE LOS GASES	VELOCIDAD DE ENTRADA DE AIRE	OBSERVACIONES
	% CO ₂	% O ₂	% CO	(°C)	(m/s)	
1	9.0	1.4	14.0	590	1.22	a.- Consumo= 26kg
2	9.6	1.0	16.0	595	1.52	b.- Carga Parcial=10:55hr
3	8.6	1.4	15.0	580	1.63	c.- Se prendio madera=10:58hr
4	8.0	1.8	14.0	575	1.27	d.- Termino carga= 11:06hr
5	9.5	1.0	13.0	580	1.32	e.- Se prendio la llama=11:42
6	9.0	1.2	16.0	575	1.42	f.- Se apago la llama=12:40hr
7	10.0	1.0	16.0	580	1.27	g.- Masa residuo sólido=1.065 kg.
8	10.2	0.8	18.0	585	1.22	h.- Masa ceniza=0.400kg.
9	9.8	1.0	16.0	590	1.12	
10	9.6	0.8	14.0	575	1.22	
11	9.2	1.2	14.0	565	1.22	
12	9.0	0.6	13.0	580	1.17	

TABLA D-4.- PRUEBAS EXPERIMENTALES N°4

COMBUSTIBLE: MADERA

TAMAÑO PROMEDIO= 5cm.

HUMEDAD= 16%

CONDICIONES: - PRESION= 1ATM
- AMBIENTALES - TEMPERATURA=30°C

LECTURA #	CONCENTRACION DE GASES			TEMPERATURA SALIDA DE LOS GASES	VELOCIDAD DE ENTRADA DE AIRE	OBSERVACIONES
	% CO ₂	% O ₂	% CO	(°C)	(m/s)	
1	9.6	2.5	14.2	595	1.12	a.- Consumo=26kg.
2	11.0	2.0	15.0	600	1.02	b.- Carga Parcial=11:40hr
3	11.5	0.5	14.8	600	0.91	c.- Se prendio madera=11:45
4	10.8	1.5	14.6	585	1.12	d.- Termino carga= 11.56hr.
5	11.0	2.0	14.0	600	0.91	e.- Se prendio la llama=12:10
6	13.0	1.2	15.0	584	0.22	f.- Se apago la llama=13:20hr
7	12.5	1.6	16.0	600	1.32	g.- Masa residuo sólido=1.250 kg.
8	10.0	1.8	16.2	585	1.22	h.- Masa ceniza= 0.65 kg.
9	9.5	1.2	17.0	590	1.42	
10	11.0	1.0	16.5	595	0.91	
11	10.5	1.2	15.0	585	1.32	
12	12.0	1.2	16.0	580	1.32	

TABLA D- 5.- PRUEBAS EXPERIMENTALES N° 5

B I B L I O G R A F I A

1. BABCOCK AND WILCOX, STEAM/ITS GENERATION AND USE, USA, 1972.
2. BARRIGA A, INTRODUCCION A LA TECNOLOGIA DE GAS POBRE EN APLICACIONES AGROFORESTALES DE PEQUEÑA Y MEDIANA ESCALA, SEMINARIO, ESPOL, JULIO, 1984.
- * 3. BARRIGA A, ADAPTACION DE MOTORES DE COMBUSTION INTERNA AL USO DE GAS POBRE, ESPOL, AGOSTO DE 1.984.
4. DEUTSCH I., TECNOLOGIA DEL GAS, EDITORIAL BLUME, ESPAÑA, 1972.
5. ENCALADA M, MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO EN EL ECUADOR, FUNDACION NATURA, QUITO, 1.983.
6. GENERADOR GAS, THE SWEDISH EXPERIENCE FROM 1939 - 1945, THE BEIJER INSTITUTE, STOCKHOLM, 1950.
7. HAGLER, BAILLY AND COMPANY, MANUAL DE AUDITORIA ENERGETICA INDUSTRIAL, U.S.A., AGOSTO DE 1.984.
8. HOUGEN O.A., WATSON K.M. RAGATZ R.A., PRINCIPIOS DE LOS PROCESOS QUIMICOS, VOLUMEN I, EDITORIAL REVERTE, ESPAÑA, 1974.
9. MARKS, MANUAL DEL INGENIERO MECANICO, VOLUMEN I.
- * 10. OLADE/GATE, MANUAL DEL PRIMER CURSO DE GASIFICACION DE LA MADERA EN CENTROAMERICA Y EL CARIBE, COSTA RICA, NOVIEMBRE DE 1.982.
11. PERA A., ESTUDIO TECNICO - ECONOMICO DEL BAGAZO COMO COMBUSTIBLE: ALTERNATIVA DE TERMOGASIFICACION Y USO RACIONAL, TESIS DE

GRADO, ESPOL, 1985.

12. PRODUCER GAS COURSE, THE BEIJER INSTITUTE, STOCKHOLM, MARZO DE 1.984.
13. STASSEN H., PRODUCER GAS FROM WOOD AND COCONUT RESIDUES THE - SEYCHELLES INTEGRATED ENERGY PROJECT, TWENTE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, THE NETHERLANDS, JUN., 1982.
14. VAN DER WEIPE, APLICATION OF PRODUCER GAS IN OTTO AND DIESEL - ENGINES, TNO PROJECT N° 707370008, THE NETHERLANDS, NOV., 1983.

