ESPOL
1958
ESCUELA SUPERIOR
POLITECNICA DEL LITORAL
BIBLIOTECA "GONZALO ZEVALLOS"
F.I.M.C.P.

ESCUELA SUPERIOR
POLITECNICA DEL LITORAL

FACULTAD DE INGENIERIA EN MECANICA

PRUEBAS EXPERIMENTALES DE GASIFICACION Y OPERACION CON GAS POBRE DE UN MOTOR ENCENDIDO POR CHISPA

TESIS DE GRADO
PREVIA A LA OBTENCION DEL TITULO DE:

INGENIERO MECANICO

PRESENTADO POR:

Franklin Leoncio Rodríguez V.

Guayaquil – Ecuador

1.990

A G R A D E C I M I E N T O

Al Ing. JORGE DUQUE, por su acertada direcciòn y colaboraciòn por la realizaciòn de este trabajo.

Al CONUEP por su valioso aporte econòmico para el avance de este proyecto.

A los profesores de la Facultad de Ingenierìa Mecànica.

ESPOL
1958
ESCUELA SUPERIOR
POLITECNICA DEL LITORAL
BIBLIOTECA "GONZALO ZEVALLOS"
F.I.M.C.P.

D E D I C A T O R I A

A MIS PADRES

A MIS HERMANOS

A MI NOVIA

ESPOL
1959
POLITECNICA
BIBLIOTECA CENTRAL
G.V.M.C.P.
GUAYAQUIL

Ing. Nelson Cevallos
DECANO

Ing. Jorge Duque
DIRECTOR TESIS

Ing. Francisco Andrade
MIEMBRO DEL TRIBUNAL

Dr. Alfredo Barriga
MIEMBRO DEL TRIBUNAL

DECLARACION EXPRESA

ESPOL
1958
BIBL

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

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

Franklin Rodriguez V.

Franklin Rodriguez Vera

ESPOL
1958
POLITECNICA DEL LITORAL
BIBLIOTECA "GONZALO CEVALLOS"
K.M.C.P.

RESUMEN

En este trabajo se estudió la producción de gas pobre a partir de residuos agroforestales y la operación de un motor de combustion interna de encendido por chispa operado con gas pobre como combustible. El trabajo realizado abarca básicamente dos etapas; una de recopilación bibliográfica y la otra de prueba experimental.

La fase experimental se llevó a cabo en diferentes etapas:

a) Se efectuaron pruebas de gasificación con diferentes combustibles sólidos (madera, carbón vegetal, tusas de maíz) y una prueba preliminar con cáscara de coco y madera.

b) Pruebas de operación de un motor monocilíndrico de 8 HP usando gasolina y gas pobre, realizar las comparaciones de las curvas características del motor.

c) Prueba de operación de una trilladora de arroz con un motor de 8 HP de potencia con flujo axial utilizando gas pobre como combustible.

Como parte complementaria se hace un análisis económico de un sistema de fuerza motriz de (20Kw) para los años 1985, 1987 y 1988.

De los resultados obtenidos en estas pruebas experimentales, la aplicación de esta tecnología es posible en el área rural, impulsar bombas para agua, generar fuerza motriz, trilladoras, molinos etc. y a pequeños electrogeneradores. Con estas pruebas queda demostrada la operación del sistema, no en lo que respecta a la economía del mismo por el costo no competitivo con respecto a los combustibles líquidos.

ESPOL
1958
POLITÉCNICA DEL LITORAL
BIBL... "GONZALO SEVALLOS"
G.C.P.

I N D I C E G E N E R A L

ESPOL 1958
BIBLIOTECA GENERAL
SINGLETON "GONZALO ZEVALLOS"
G.M.C.P.

RESUMEN

INDICE GENERAL

INDICE DE FIGURAS

INDICE DE TABLAS

INTRODUCCION 1

CAPITULO 1

GENERALIDADES

1.1. Objetivos 3

1.2. Alcance del Proyecto 3

1.3. Proceso de obtención de gas pobre 4

1.3.1. Producción de gas pobre a partir de residuos agroforestales. 5 9

CAPITULO 2

USO DE GAS POBRE EN UN MOTOR ENCENDIDO POR CHISPA 12

2.1. Combustión del gas pobre 12

2.2. Definición de parámetros para el motor con gasolina y gas pobre 15

2.3. Evaluación comparativa del gas pobre y GLP, con gasolina aplicada a motores 17

2.4. Efectos de la corrosión del gas pobre en motores de combustión interna 24

CAPITULO 3

MEZCLADORES DE GAS POBRE 27

3.1. Tipos de mezcladores 27
3.2. Funcionamiento de mezcladores 31

CAPITULO 4

DESCRIPCION DEL EQUIPO EXPERIMENTAL
4.1. Banco de pruebas 34
4.2. Planta de gasificación 37
4.3. Mezclador 37

CAPITULO 5

PRUEBAS EXPERIMENTALES
5.1. Pruebas de gasificación 43
5.1.1 Funcionamiento del gasificador 44
5.1.2 Gasificación con madera 44
5.1.3 Gasificación con carbón vegetal 46
5.1.4 Gasificación con tusas de maiz 47
5.2. Operación del motor a velocidad variable y constante usando gasolina 49
5.3. Operación del motor a velocidad variable y constante usando gas pobre 49
5.4. Análisis de resultados 53

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 57
APENDICES 71
BIBLIOGRAFIA 77
130

I N D I C E D E F I G U R A S

ESPOL 1959 POLITECNICA DEL LITORAL BIBLIOTECA "CUMBAYA" GUAYAQUIL

CAPITULO 1

1.1 Esquema de las zonas de reacciones en un gasificador 7

CAPITULO 2

2.1 Incremento de potencia en un motor de encendido por chispa de baja velocidad 19

2.2 Potencia de salida en función de la velocidad del motor 27

2.3 Curvas de consumo específico y potencia 35

CAPITULO 3

3.1 Mezclador operado manualmente 50

3.2 Mezclador semi-automático 53

3.3 Mezclador completamente automático 55

CAPITULO 4

4.1 Banco de pruebas 59

4.2 Motor utilizado 59

4.3 Planta de gasificación 41

4.4 Mezclador de gas 47

CAPITULO 5

5.1 Filtro para limpiar gas 54

5.2 Curvas caracteriticas para gasolina y gas pobre, velocidad variable 63

5.3 Curvas caracteristicas para gasolina y gas pobre, velocidad constante 65

A P E N D I C E S

APENDICE A

Prueba de gasificación con madera 80

APENDICE B

Prueba de gasificación con carbón vegetal 94

APENDICE C

Pruebas de gasificación con tusas de maíz 101

APENDICE D

Cálculos para densidad y poder calorífico del gas obtenido 106

APENDICE E

Prueba demostrativa de una trilladora de arroz con flujo axial utilizando como combustible gas pobre 111

APENDICE F

Prueba demostrativa de gasificación con mezcla al 50% de madera y cáscara de coco 115

APENDICE G

Análisis de costo de una planta de gasificación de 30 Kw 119

APENDICE H

Análisis económico de un sistema de fuerza motriz de 20Kw usando como combustible diesel y gas pobre 127

ESPOL 1959 BIBLIOTECA

APENDICE I

Residuos de alquitranes depositados en el cabezote del motor y nomenclatura

ESPOL 1958 POLITÉCNICA NACIONAL BIBLIOTECA GENERAL ROGER VALLOS

APENDICE A

A1 Prueba de gasificación con madera 81

A2 " " " " " 85

A3 " " " " " 87

A4 " " " " " 89

A5 " " " " " 91

A6 " " " " " 94

APENDICE B

B1 Prueba de gasificación con carbón 96

B2 " " " " " 98

B3 " " " " " 101

APENDICE C

C1 Prueba de gasificación con tusas de maíz 113

APENDICE E

E1 Encendido del motor 114

E2 Alimentación de la trilladora 117

APENDICE F

F1 Prueba de gasificación con 50% de madera y cáscara de coco

I N D I C E D E T A B L A S

CAPITULO 1

1.1 Zonas de temperaturas y reacciones en el proceso de termogasificación 11

1.2 Composición del gas 12

CAPITULO 4

5.1 Datos de pruebas del motor con gasolina 59

5.2 Resultados de la prueba de motor con gasolina 60

5.3 Datos de la prueba del motor con gas pobre 61

5.4 Resultado de la prueba del motor con gas pobre 62

ANALISIS DE RESULTADOS

Tabla de resultados experimentales de las pruebas de gasificación 68

APENDICE A

A1 Gasificación con madera 80

A2 " " " 82

A3 " " " 84

A4 " " " 86

A5 " " " 88

A6 " " " 90

A7 Resultados de las pruebas de gasificación con madera 72

A8 Resultados de las pruebas de gasificación con madera 73

APENDICE B

B1 Gasificación con carbón 75

B2 " " " 77

B3 " " " 77

B4 Resultados de las pruebas de gasificación con carbón 100

APENDICE C

C1 Gasificación con tusas de maíz 102

C2 " " " " " 103

C3 Resultados de las pruebas de gasificación con tusas de maíz 105

APENDICE F

F1 Prueba de gasificación con 50 % madera y cáscara de coco 118

F2 Residuos de cáscara de coco del proceso de gasificación 136

APENDICE H

H1 Análisis de costo de producción de energía Kw-hr de un sistema de fuerza motriz de 20 Kw-hr con diferentes combustibles 133

ESPOL 1958
POLITECNICA DEL LITORAL
BIBLIOTECA "GONZALO ZEVALLOS"
F.I.M.C.P.

INTRODUCCION

Las crisis energéticas han contribuido para que se de más énfasis en la búsqueda de fuentes de energía distintas de las convencionales. La termogasificación es una de las alternativas para producir energía a partir de la biomasa como: madera, carbón vegetal, residuos agrícolas. Este proceso consiste en convertir el combustible sólido de la biomasa en combustible gaseoso.

Esta tecnología se desarrolló a mediados del siglo pasado en la aplicación industrial con carbón mineral. Se calcula que a comienzo de siglo solo en los Estados Unidos existían alrededor de 10.000 gasificadores de carbón mineral. El desarrollo de gasificadores llegó a tal punto que se estima existieron en operación unos tres cuartos de millón de gasificadores vehiculares, trabajando principalmente con madera troceada durante la segunda guerra mundial (Referencia 1).

Los motores a gasolina pueden ser adaptados con relativa facilidad para utilizar gas pobre depurado. Si bien el motor pierde una parte de su potencia al usar gas pobre, la combustión es más fácil que con combustibles líquidos que requieren de una atomización previa. Para el uso de gas pobre en motores de combustión interna se requiere de un mezclador gas/aire.

En el país solamente la ESPOL está desarollando la tecnología de gas pobre por esfuerzos propios o a través de convenios nacionales e internacionales desde el año 1981. Se ha construido una planta para la producción de gas pobre a ser utilizado en motores de combustión interna para electrogeneradores. En esta tesis se realizaron pruebas de producción de gas, en un gasificador de tiro descendente, utilizando varios residuos agroforestales (madera, carbón vegetal, tusas de maíz, cáscara de coco) y la operación de un motor de combustion interna utilizando gas pobre.

CAPITULO No. 1

GENERALIDADES

1.1 OBJETIVOS

El objetivo especifico de este proyecto, es el de realizar pruebas experimentales de gasificación y operación de un motor de combustion interna, para que sirva de base en la aplicación de gas pobre.

El trabajo en esta Tesis involucra pruebas experimentales de dos tipos:

1) Gasificación con residuos agroforestales como materia prima y la comparación de los resultados obtenidos con experiencias realizadas en otros paises.

2) Estabilidad de operación del motor trabajando con gas pobre y comparación de las curvas características

del motor entre gas pobre y gasolina.

Este trabajo pretende ser una contribución al desarrollo de la capacidad y experiencia local en el proceso de gasificación para fines energéticos, puesto que aun no ha sido difundido en nuestro país.

1.2 ALCANCE DEL PROYECTO

Este proyecto forma parte de un programa global más amplio de la Facultad de Ingeniería Mecánica que abarca el uso de residuos agroforestales como fuente de producción de fuerza motriz aplicado en áreas rurales importantes de nuestro país, donde generalmente se dispone de la materia prima (desperdicios agroforestales).

El desarrollo tecnológico de la utilización del gas pobre, es un campo que está siendo impulsado en la ESPOL y que tendrá efectos multiplicadores para el país. Si se lograra introducir de manera racional esta tecnología sería beneficioso para el desarrollo agrícola, y conllevaría a la construcción de nuevos equipos, nuevas fuentes de trabajo, independencia energética y ahorro de combustibles líquidos.

El aprovechamiento del gas esta orientado fundamental-

ESPOL 1958 ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL BIBLIOTECA "GONZALO ZEVALLOS"

mente al sector de la pequeña industria y en pequeña escala, otras aplicaciones sería en plantas de fuerza motriz con ciclo de Otto, ciclo diesel ó utilización directa en hornos para secado de granos.

En las pruebas de la planta de gasificación como las del motor de combustión interna, los resultados obtenidos permiten la viabilidad de la aplicación en pequeña escala para generar fuerza motriz, impulsar bombas (irrigación, aspersión, etc.) o en pequeños electrogeneradores. Todo lo antes mencionado está relacionado con la parte operacional del sistema, mas no en lo económico ya que los costos relacionados con los combustibles líquidos son superiores.

1.3 PROCESO DE OBTENCION DE GAS POBRE

El proceso de obtención de gas pobre consiste en quemar parcialmente el combustible sólido dentro de un recipiente hermético por el cual fluye un caudal de aire atmosférico. El combustible fresco es añadido en trozos de tamaño (5 cm de lado) y se desplaza lentamente por gravedad a través de un lecho compacto.

El combustible pasa por varias etapas que lo desecan, eliminan su material volátil y lo someten a un proceso de reducción y oxidación en una zona

incandescente. De todos estos procesos resultan gases combustibles: monóxido de carbono, hidrógeno y metano principalmente, vapores condensables y partículas.

Descripción de los procesos

En la gasificación ocurren cuatro procesos distintos en zonas diferentes del reactor, dependiendo del tipo de gasificador. En este caso trataremos de un gasificador de tiro ascendente.

En la figura No. 1.1 se muestra claramente las diferentes zonas que se producen en el proceso de gasificación.

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

Se puede decir que en realidad existen cruces de zonas en todas estas reacciones, es necesario indicar que para gasificar completamente el combustible sólido se producen reacciones químicas y térmicas diferentes.

Zona de Secado: Esta zona está generalmente en la parte superior del gasificador, sobre la zona de

ESPOL
1958
ESCUELA SUPERIOR
POLITECNICA DEL LITORAL
BIBLIOTECA "GONZALO ZEVALLOS"
F.I.M.C.P.

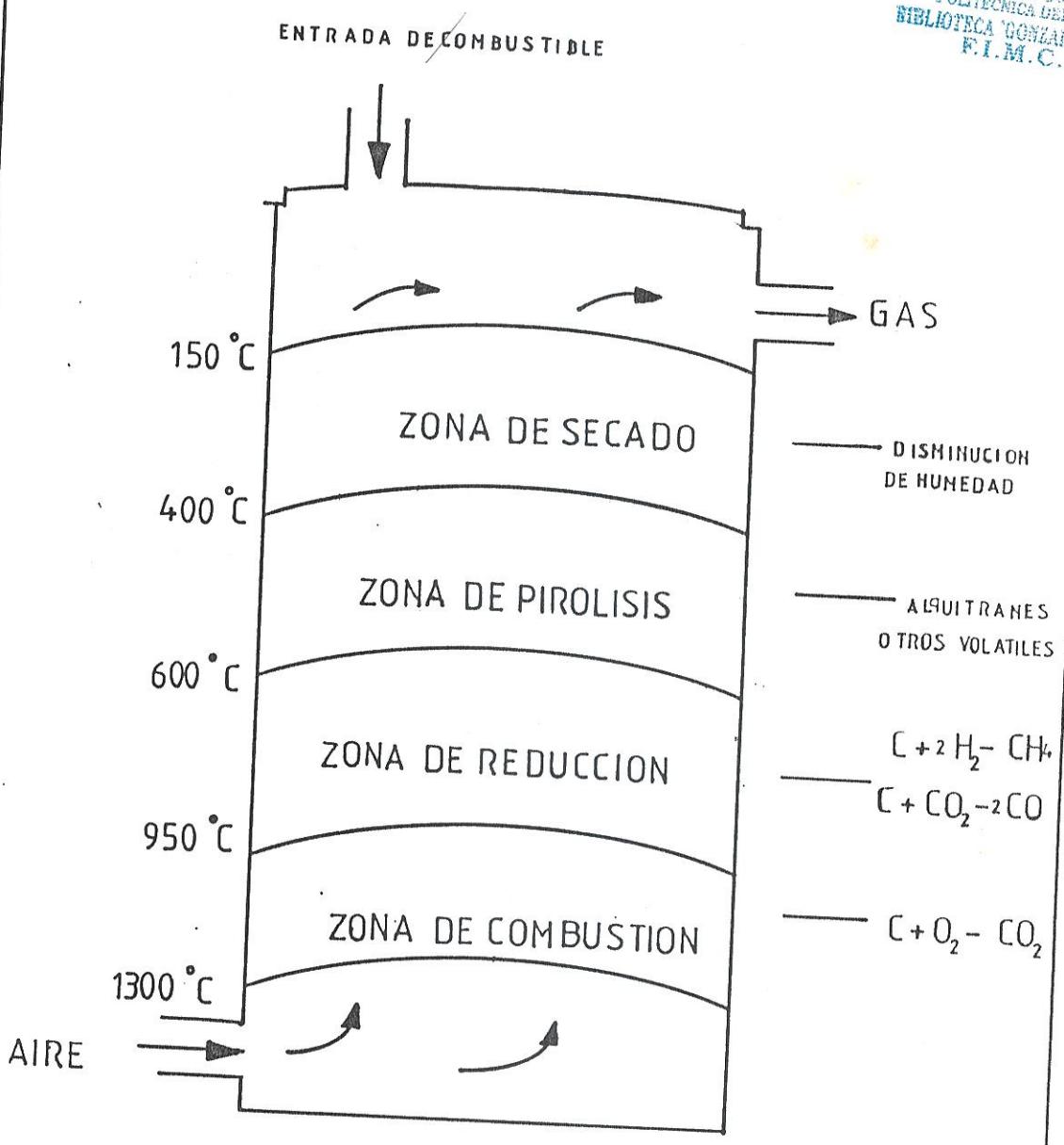


FIGURA 1.1 Esquema de las zonas de reacción en un gasificador de tiro ascendente

pirólisis. Aquí la temperatura no es lo suficientemente alta para producir reacciones químicas, la humedad del combustible es absorbida.

Zona de Pirólisis: Esta zona está sobre la zona de reducción. Aquí se extrae el calor de las zonas calientes. Siendo la temperatura aproximadamente de 400 °C una reacción exotérmica autosuficiente toma lugar, en la cual las estructuras del combustible biomásico utilizado comienzan a disociarse. El proceso es análogo al que ocurre en un horno de manufactura de carbón.

En las reacciones participan vapores condensables, acido acético, metanol y considerables volúmenes 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 breas y volátiles.

Zona de Reducción: Zona donde el calor sensible de los gases y del carbón se convierten en su mayoría en energía química del gas pobre. No está permitido que ingrese aire en esta zona para que no ~~halla~~ haya oxígeno se presente libre y las reacciones que se desarrollen sean diferentes a las que ocurren en demás zonas.

Esta zona es determinante para alcanzar el objetivo básico de la gasificación: la producción del gas combustible. El gas generado se denomina "GAS POBRE" por su bajo contenido de poder calorífico. Para su uso posterior el gas debe ser acondicionado, limpiado previamente y despojado de las partículas en suspensión, así como de los vapores condensables (alquitranes y similares). Por otra parte si se desea quemar el gas en una aplicación térmica directa los requerimientos de acondicionamiento del gas no son estrictos.

Zona de Combustión: La ubicación en esta zona depende del tipo de gasificador a usar. Si es de tipo ascendente, estará ubicada en la parte más baja del gasificador como en este caso, y si el flujo es descendente estará por encima de la zona de reducción, en todo caso es la zona donde se alimenta con aire al gasificador.

1.3.1 PRODUCCION DE GAS POBRE A PARTIR DE RESIDUOS AGROFORESTALES

Se ha demostrado que es factible la obtención de gas pobre a partir de residuos agroforestales como madera, carbón vegetal y tusas de maiz. En este trabajo se dan los

inicios para la continuación en nuevos análisis específicos de cada tipo de combustible usado. En el caso de emplear carbón vegetal puro seco, del que se han evaporado los elementos volátiles en el proceso de manufactura (carbonización), éste al no tener hidrógeno disponible, no existirá en el gas resultante; cuando se usa carbón vegetal el gas que se obtiene es de menor poder calorífico en un 20% que el obtenido con madera.

En la tabla No. 1.1 se presentan las zonas, ~~de~~ temperaturas y reacciones más importantes que ocurren en un proceso global de la termogasificación, indicando si éstas son de carácter exotérmico (+) o endotérmico (-).

El progreso de estas reacciones depende principalmente del tipo de combustible usado, del diseño del gasificador y de las condiciones de operación. El gas pobre tiene un valor calorífico relativamente bajo de 5.2 Mj/Nm^3, del 10 al 15% inferior al gas natural En la tabla No. 1.2 se muestran valores de la composición de gases producidos en gasificadores de tiro descendente que operan con madera y carbón vegetal (Referencia 5).

TABLA # 1.1

ZONAS DE TEMPERATURAS Y REACCIONES EN EL PROCESO DE TERMOGASIFICACION

ZONAS	TEMPERATURAS °C	REACCIONES
Secado	20 - 100	————————
Pirólisis	120	Descomposición
Oxidación	1.000-1.600	$C + O_2 \equiv CO_2$ (+)
		$2H + 1/2O_2 \equiv H_2O$ (+)
Reducción	600	$C + H_2O \equiv CO + H_2$ (-)
		$CO + H_2 \equiv CO_2 + H_2$ (+)
		$C + 2H_2 \equiv CH_4$ (+)

FUENTE: Ref. 5

(+) Reacciones Exotérmicas

(-) Reacciones Endotérmicas

ESPOL 1958
POLITECNICA DEL LITORAL
BIBLIOTECA "GONZALO ZEVALLOS"
F.I.M.C.P.

TABLA # 1.2

COMPOSICION DEL GAS POBRE

GASES	MADERA	CARBON VEGETAL
CO	17 - 22 %	23 - 33 %
H_2	12 - 20 %	4 - 10 %
CH_4	2 - 3 %	0 - 2 %
C_xH_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 MJ/Nm^3	5,0 - 5,9	4,5 - 5,4

FUENTE: Ref. 5

ESPOL
BIBLIOTECA
F.I.M.C.P.

CAPITULO No. 2

USO DE GAS POBRE EN UN MOTOR DE ENCENDIDO POR CHISPA

2.1 COMBUSTION DEL GAS POBRE

La caracteristica principal para la ignición del gas pobre es la temperatura y está determinada por la presencia de hidrógeno H y monóxido de carbono CO. La razón de propagación de llama del gas está influenciada por el hidrógeno, siendo la velocidad de la llama de 265 cm/seg, o por el monóxido de carbono con una velocidad baja de llama de 40 cm/seg (Referencia 15).

Es importante tener conocimiento de los elementos de esta mezcla de gases, sus características físicas, cuando se requiere para propósitos de calentamiento en el cual la combustión se produce.

Sin embargo la mayor parte de estos gases combustibles provienen del contenido de hidrógeno, monóxido de carbono y sus componentes de hidrocarburos que también hacen una contribución en una pequeña parte.

Para una buena combustión no es suficiente una cantidad correcta de aire con un chorro de gas combustible para ser quemado. La mezcla íntima de los dos fluidos es esencial para que la combustión del combustible sea completa. Una de las alternativas que puedan ayudar al mezclado es reducir la diferencia de densidad entre las corrientes de aire y gas.

Debe tenerse siempre en cuenta que el término "gas pobre" no se refiera a una composición química específica, como en el caso de gasolina. El comportamiento del gas pobre bajo las condiciones vigentes en la cámara de combustión de un motor a gasolina varía mucho debido a la amplia gama de posibles contenidos de hidrógeno en el gas. Los octanajes de varios gases que forman el gas pobre son.

Gas	Octanaje
CO	105
H_2	60-66
CH_4	105

2.2 DEFINICION DE PARAMETROS DEL MOTOR PARA GASOLINA Y GAS POBRE.

Para una mejor comprensión de las fórmulas utilizadas en los cálculos se hace una breve descripción de cada una de ellas, en el capítulo No. 4, y su aplicación para el banco de pruebas empleado en este trabajo de tesis.

<u>Parámetros del motor utilizando gasolina</u>

Potencia - Es el trabajo realizado en la unidad de tiempo y se mide en kilowatio KW.

$$KW = \frac{N * RPM}{36040}$$

Consumo de Combustible - Indica la cantidad de combustible que el motor consume por unidad de tiempo.

$$CC = \frac{3,6 * v * d * g}{t} \quad (Kg/hr)$$

Torque - Es la fuerza que actúa sobre el brazo de palanca y se mide en Newton metro.

$$T = L * F \quad (Nm)$$

POLITÉCNICA DEL LITORAL
BIBLIOTECA

Consumo de Aire - Indica la cantidad de aire que el motor consume por unidad de tiempo y su ecuación es la siguiente.

$$CA = 0.00001232 * D^2 \frac{Ho * Pa}{Ta} \text{ (Kg/hr)}$$

Consumo Epecífico de Combustible - Indica la cantidad de combustible que el motor consume para la potencia que produce.

$$CEC = \frac{\text{Flujo de combustible (Kg/hr)}}{KW}$$

Eficiencia Térmica - Es la relación entre el trabajo realizado por los pistones y el calor suministrado por la mezcla aire combustible.

$$N_t = \frac{3.6 * 10^6}{CEC * HL} * 100 \text{ (\%)}$$

<u>Parámetros del motor utilizando gas pobre</u>

Para el cálculo del consumo de combustible en el motor utizando gas pobre se emplea la siguiente fórmula.

$CC = Q * d$

Q = caudal; d = densidad

Con ésta ecuación se cácula la densidad del gas pobre, para la eficiencia térmica y el poder calorífico se toma de la (Referencia 6). El cálculo se lo realiza en el Apéndice D.

Para la determinación de los demás parámetros del motor son empleadas las mismas ecuaciones aplicadas para gasolina.

2.3 EVALUACION COMPARATIVA DEL GAS POBRE Y GLP CON GASOLINA APLICADA A MOTORES.

Uno de los aspectos más relevantes acerca de los motores de combustión interna de encendido por chispa es su habilidad de operar con muy pocas modificaciones. Sin enbargo es fundamental conocer las diferencias de operación cuando se usa gas pobre como combustible.

En motores de combustión interna de encendido por chispa, la mezcla de gas pobre/aire entregada a la cámara de combustión es inferior en su contenido energético con relación a la mezcla gasolina/aire para las cuales el motor fue diseñado. Además las propiedades del gas pobre en relación a los combustibles líquidos son distintas que es necesario una evaluación completa de los siguientes parámetros:

a) Eficiencia real del motor

b) Producción de la potencia del motor

c) Desgaste del motor a largo plazo

d) Gases de escape del motor

2.3.1 OPERACION DE MOTORES DE COMBUSTRION INTERNA CON GAS POBRE.

En el manejo de gas pobre, la eficiencia mecánica N_m sera menor debido al bajo poder calorífico de la mezcla/aire. Además el motor proporciona toda la succión necesaria para vencer la caída de presión en el gasificador, una pérdida considerable en la N_m se produce al utilizar tubos de diámetros muy pequeños (menores de 35 mm), conexiones largas, muchos codos, etc. (Referencia 6).

La potencia de un motor de encendido por chispa y operado con gas pobre, con diferente relación de compresión se puede ver en la figura No. 2.1 que tiene un comportamiento diferente de acuerdo a la forma en que es suministrado el gas pobre a la cámara de combustión en el motor.

Además no es técnicamente factible, y antieco

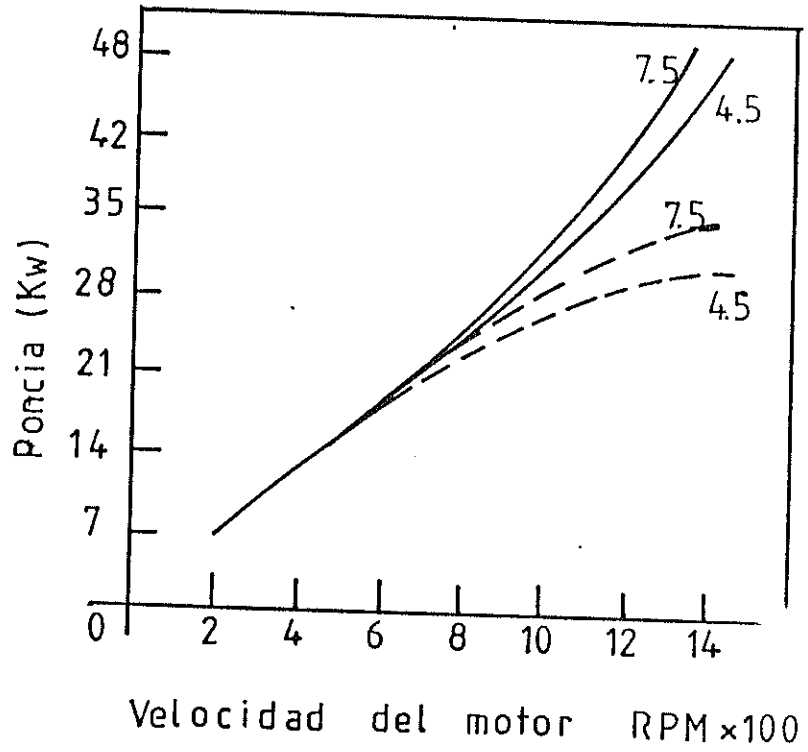


FIGURA 2.1 Incremento de potecia de un motor de encendido por chispa de baja velocidad, razon de 1-4.5 y modificada a 1-7.5 ambos casos utilizando gas pobre.

Sin supercargador — — — — —

Con supercargador ————

FUENTE Ref: 7

nómico aumentar la relación de compresión allá de 10, debido a problemas en el funcionamiento. Los motores de alta compresión son mucho más difíciles de arrancar, siendo el arranque manual casi imposible. El esfuerzo y desgaste de los pistones, sistema de encendido es considerablemente mayor resultando un mal funcionamiento, una corta vida útil para los equipos.

Para tener un mejor entendimiento del comportamiento de un motor de encendido por chispa, se ha considerado resumir las diversas eficiencias aplicadas a un motor. La eficiencia volumétrica N_v, este parametro es de interes para la medida del rendimiento de ensamblaje de válvulas, pistones, cilindros. Su valor máximo oscila entre 0,75-0,85 según el tipo de motor.

La eficiencia térmica indicada N_t, constituye un indicador de la economía del ciclo real del motor de combustión interna, su valor para motores de encendido por chispa oscila entre 0,20-0,45.

Finalmente la eficiencia mecánica N_m, un parámetro que tiene en cuenta el trabajo absorbido por los rozamientos de los pistones,

rines, etc. y de los dispositivos auxiliares propios del motor, así como el trabajo absorbido por el bombeo (aspiración y escape). El rendimiento mecánico es normalmente entre 0,80-0,90.

EL producto de: $N_v * N_t * N_m$ constituye la eficiencia real del motor de combustión interna, y esta eficiencia combinada con la eficiencia de conversión de la biomasa a gas pobre "frio" N_c, listo para ingresar al motor nos da como resultado la eficiencia global N_g de todo el sistema gasificador, enfriador, motor, siendo igual a:

$$N_g = N_c * N_v * N_t * N_m.$$

Para los motores de combustión interna hay una amplia discrepancia en la pérdida de potencia reportada, sobre la eficiencia de los motores operados con gas pobre, en su mayoría se deben a los diferentes métodos de reportar los datos, a la combustión del gas, la pérdida de la potencia, eficiencias, velocidad del motor. Con la velocidad un poco baja en los motores, el uso del gas pobre es más favorable.

En la figura No. 2.2 se puede ver que la potencia varía en un amplio rango, es decir que no es constante en ningún punto usando gas pobre como combustible, todo ésto se debe a la inestabilidad del gas en la producción.

2.3.2 OPERACION DE MOTORES DE COBUSTION INTERNA CON GLP

El gas licuado de petróleo esta compuesto generalmente de una mezcla de propano y butano, estos combustibles a presión atmosférica son normalmente gases, deben ser licuados a baja presión para ser llenados en recipientes apropiados (botella de gas).

Utizando gas licuado de petróleo en motores de combustión interna, se puede usar altas relaciones de compresión por tener un alto índice de octanaje, además el propano se quema limpiamente, por estas razones la vida del motor resulta prolongada y el mantenimiento más barato, las bujías y válvulas no se carbonizan mayormente, los depósitos de carbón son mínimos.

En un análisis de la potencia utilizando como combustible gas licuado de petróleo, se verifica

ESPOL
1956
POLITECNICA DEL LITORAL
BIBLIOTECA "GONZALO ZEVALLOS"
L.C.V.C.B.

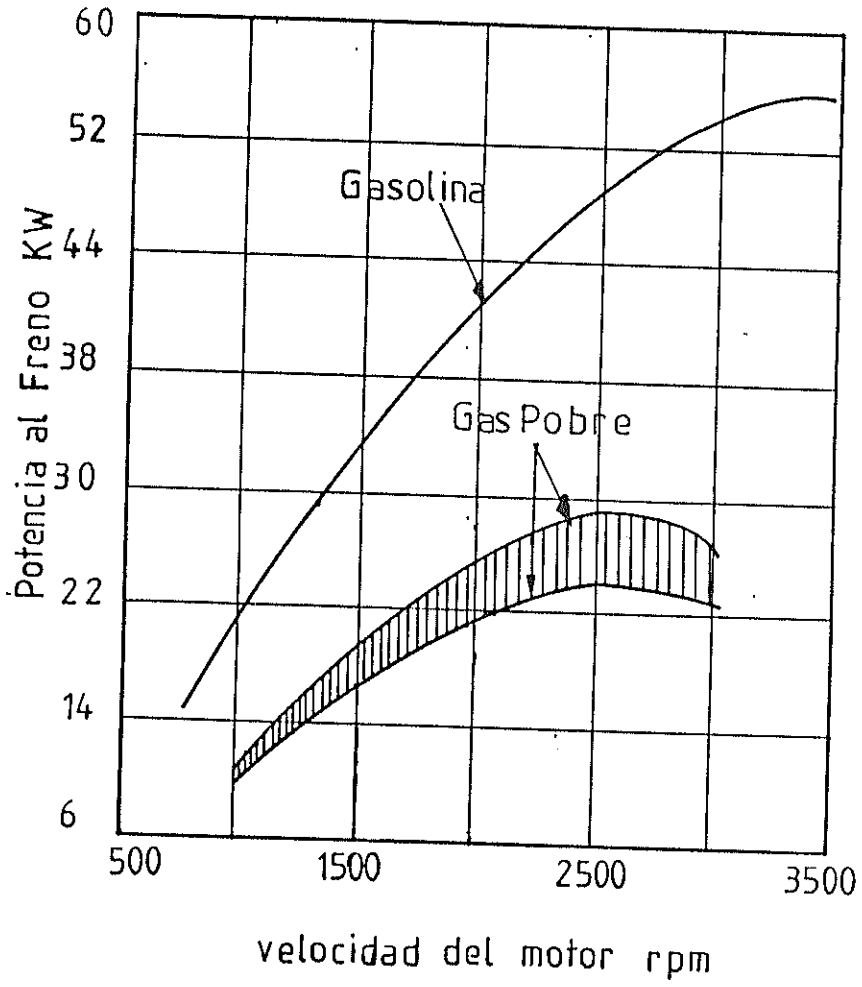


FIGURA 2.2 Potencia de salida en funcion de velocidad del motor

FUENTE Ref 7

que la potencia tiene una disminución en perjuicio del gas, esta disminución no se debe a una menor eficiencia de combustión sino que la cantidad de combustible que entra al cilindro es menor ya que éste ocupa mayor volumen desplazando de esta forma la cantidad de aire necesario para la combustión.

Se puede ver que en la figura No. 2.3 la potencia y el consumo especifico de combustible de acuerdo a estas pruebas son menores usando gas licuado de petróleo que gasolina.

2.4 EFECTOS DE LA CORROSION DEL GAS POBRE EN MOTORES DE COMBUSTION INTERNA.

La corrosión en los motores de combustión interna se produce siempre en la culata, camisas de cilindros, en los cilindros y piezas mecánicas durante la parada del motor. Debido a la condensación de agua que se deposita en lugares de difícil acceso en su mayor parte, resulta casi imposible eliminar este inconveniente. Además se produce la corrosión en las piezas del motor que estan sometidas a variaciones de temperaturas, incluso a causa de los cambios de tiempo en el encendido del motor que produce una mala combustión quedando residuos no combustionados dando

ESPOL 1958
POLITECNICA DEL LITORAL
BIBLIOTECA "GONZALO ZEVALLOS"

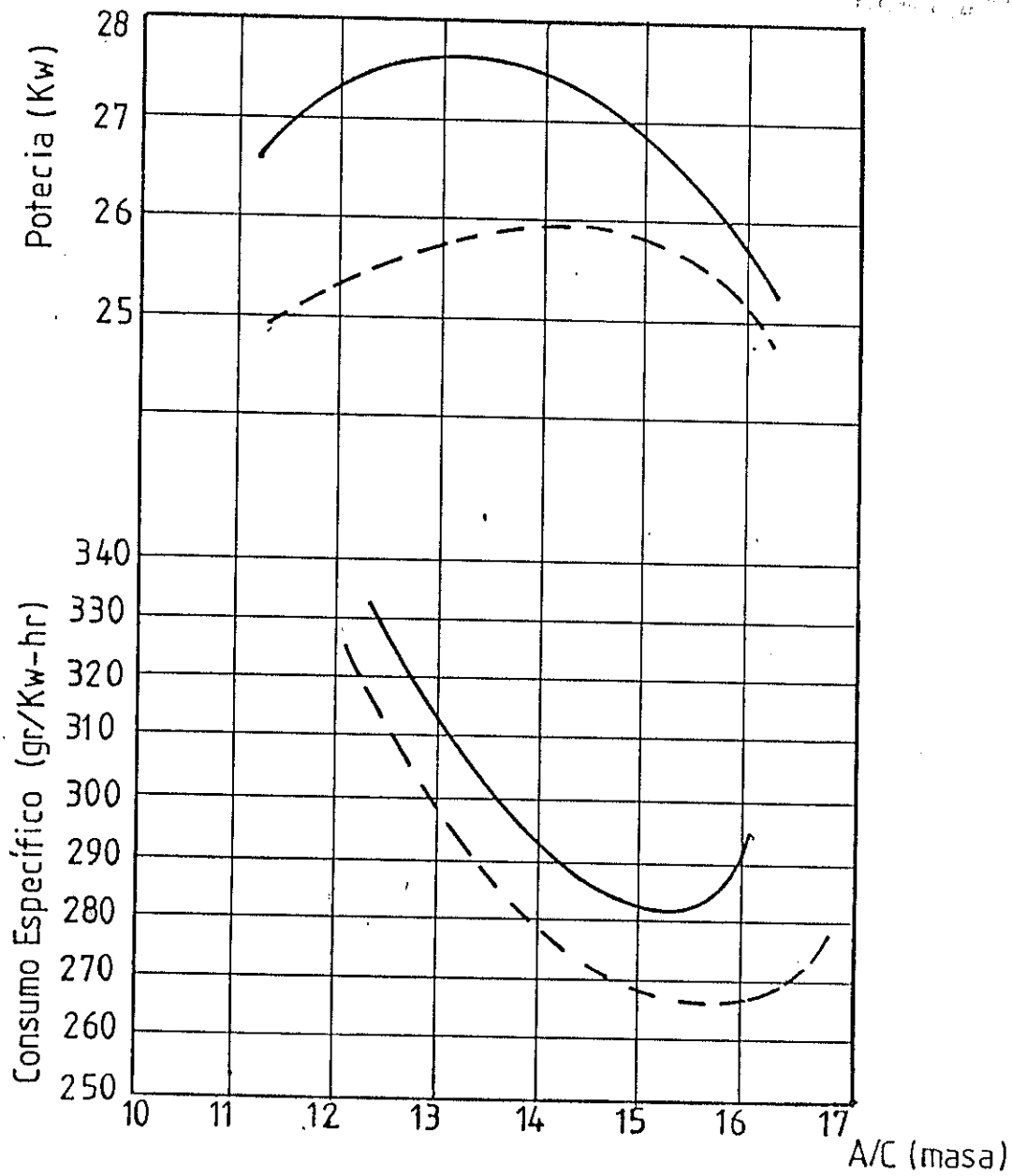


FIGURA 2.3 Curvas de Consumo Específico y Potencia vs Relacion Aire-Combustible.

Gasolina = ————

GLP = - - - - -

FUENTE Ref:3

origen a la corrosión.

La impureza principal en el gas pobre, que se presenta como sustancia corrosiva es el alquitrán que no se condensa en el sistema de depuración y que se deposita en las vávulas, pistones y cilindros del motor ocasionando daños. Además los ácidos orgánicos presentes en el gas pobre son la causa principal del desgaste ya que producen la corrosión en las piezas del motor.

ESPOL
1958
ESCUELA SUPERIOR
POLITECNICA DEL LITORAL
BIBLIOTECA "GONZALO ZEVALLOS"
G.M.C.P.

CAPITULO No. 3

MEZCLADORES DE GAS POBRE

3.1 TIPOS DE MEZCLADORES

Para el funcionamiento de los motores de combustión interna el control y manejo de la mezcla gas pobre/aire es de mucha importancia, por esta razón se realiza un pequeño cambio en el carburador del motor de unidades que operan con gas pobre. Estos dispositivos se los denomina mezcladores y los más conocidos son los que a continuación se mencionan, mezcladores operados manualmente, semiautomáticos y automáticos.

El uso de mezcladores en motores de combustión interna es lo más acertado para encontrar una relación de gas/aire para el buen funcionamiento del motor ya que conseguir esto es dificultoso debido a que la

composición del gas cambia durante su producción. Es decir que con un pequeño cambio en la apertura de la mariposa del mezclador en la toma de aire puede provocar cambios significativos en la potencia del motor.

MEZCLADOR OPERADO MANUALMENTE

Es uno de los primeros diseños de mezcladores, siendo el más generalizado por ser de facil construcción, además es bastante efectivo que permite un buen control tanto del gas pobre como del aire que forma la mezcla combustible.

En la figura No. 3.1 se puede apreciar la forma como está construido, una mariposa controla la entrada del gas y otra controla el aire que finalmente formar la mezcla y llega a la cámara de combustión del motor.

MEZCLADOR SEMIAUTOMATICO

Este tipo de mezclador se puede decir que es una modificación del anterior diseño, una pequeña diferencia se da en que las mariposas "a" y "b" se encuentran vinculadas mecánicamente, de esta forma son controladas por el acelerador y dar una mejor facilidad en la formación de la mezcla, la mariposa "c" se opera por separado y la regulación se la

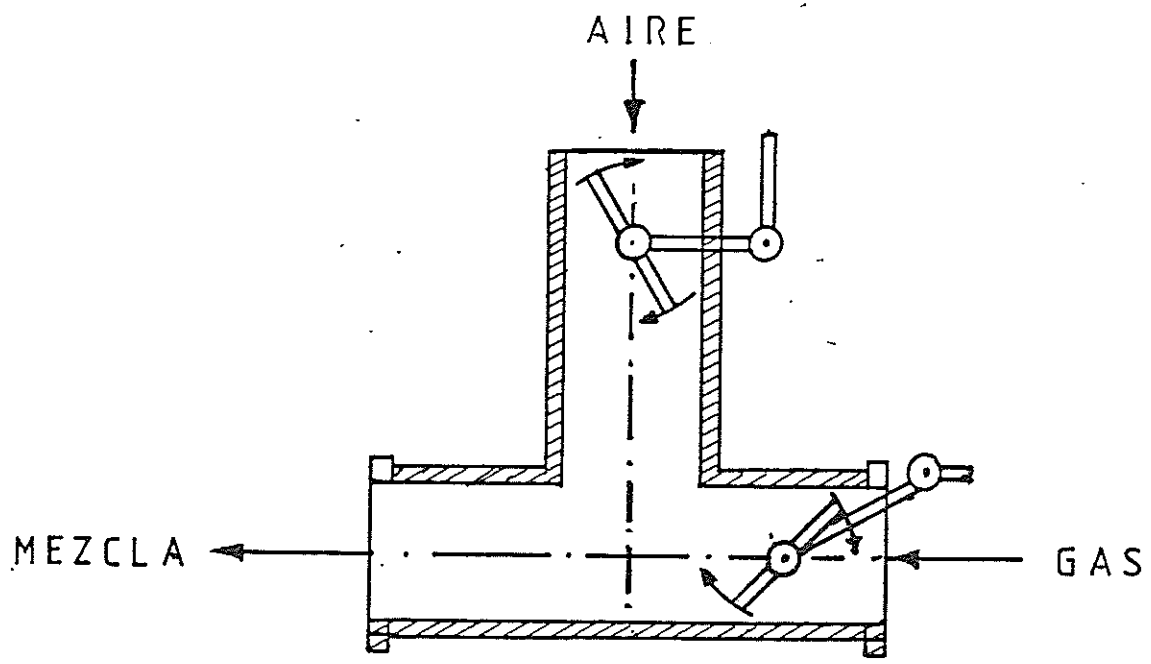


FIGURA 3,1 Mezclador operado a mano

Fuente Ref:7

a = mariposa para gas

b = " " aire

c = " " "

d = orificio para aire

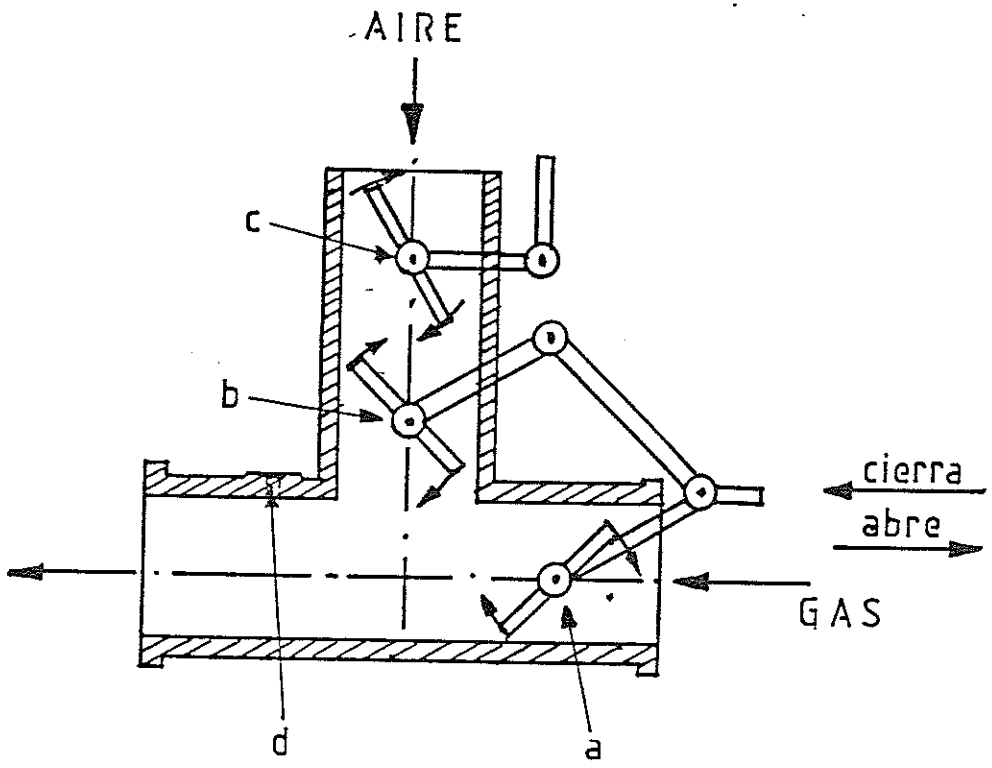


FIGURA 3,2 Mezclador semi-automatico

Fuente Ref: 7

ESPOL

realiza manualmente, con esta mariposa se hace una primera regulación de entrada del aire y con la mariposa "b" una segunda regulación del aire. La figura No. 3.2 muestra el mezclador detallado anteriormente.

MEZCLADOR COMPLETAMENTE AUTOMATICO

Con este tipo de mezclador se puede controlar los flujos de gas y aire completamente desde el pedal del acelerador a través de una válvula mariposa. El aire entra en el mezclador pasando por la válvula de aleta a una velocidad alta, la cual garantiza una mezcla turbulenta. La apertura de la válvula mariposa está regida por un aumento en la depresión de la tubería, normalmente es producida por una mayor demanda de gas por el motor.

Se ha reportado un rendimiento satisfactorio de este tipo de mezcladores. Además los arreglos para obtener la mezcla gas/aire se lo hace colocancando el mezclador delante del carburador del motor y no lo reemplazan a este dispositivo.

3.2 FUNCIONAMIENTO DE MEZCLADORES

El funcionamiento del mezclador en su forma más

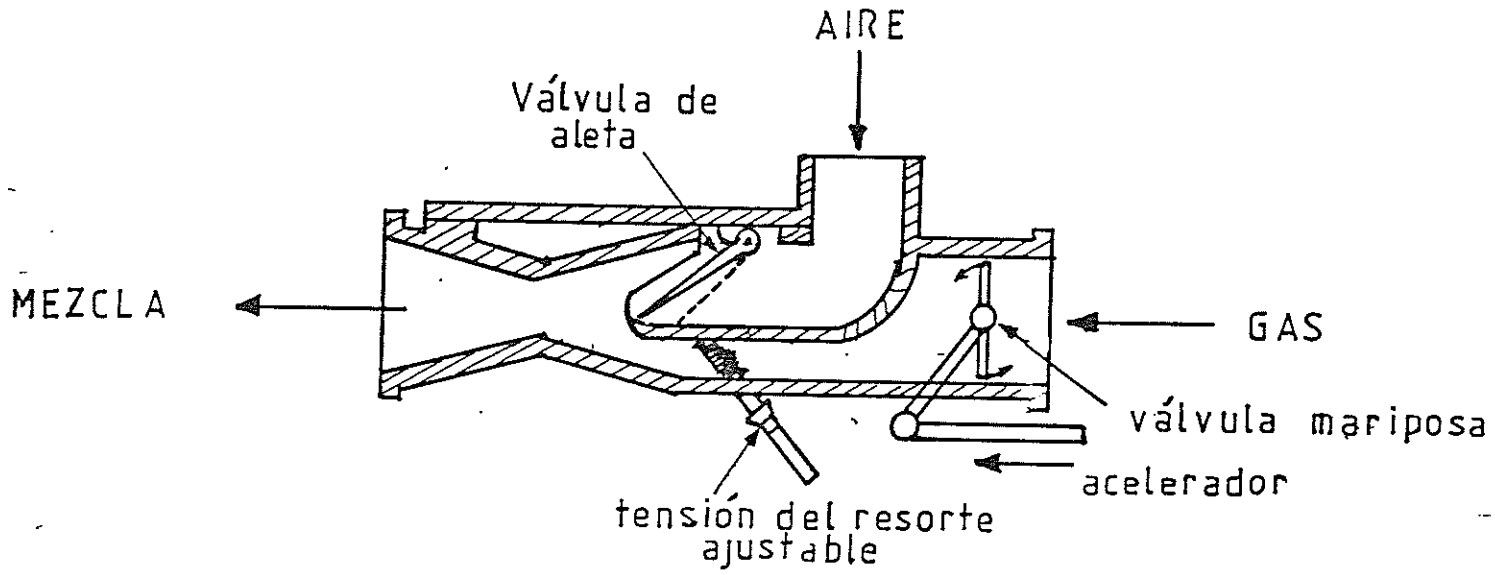


FIGURA 3.3 Mezclador completamente automatizado

FUENTE Ref: 7

elemental, se basa en el control de la regulación del gas y el aire para formar la mezcla que satisfaga las condiciones de operación del motor. El mezclador debe satisfácer con la mayor aproximación estos requerimientos, lo que resulta complicado si se tuviera que hacer una relación de mezcla para toda las variaciones de la potencia del motor.

En el funcionamiento de los diferentes tipos de mezcladores se hará referencia de cada uno, en la forma más elemental relacionados a los esquema de las figuras anteriores.

FUNCIONAMIENTO DEL MEZCLADOR MANUAL

En la figura No. 3.1 se muestra el mezclador operado manualmente, está compuesto de dos válvulas mariposas, las mismas que sirven para controlar la entrada del aire como del gas, la válvula de la entrada del gas está conectada mecánicamente con el pedal del acelerador, mientras que la válvula que controla el flujo de aire está construida para ser operada manualmente. De esta manera se prepara la mezcla apropiada para el funcionamiento del motor con este tipo de mezclador.

FUNCIONAMIENTO DEL MEZCLADOR SEMIAUTOMATICO

En la figura No. 3.2 se muestra este tipo de mezclador en que las maripasas "a" y "b" se encuentran vinculadas mecánicamente y son controladas por el acelerador. La mariposa "c" se opera manualmente. Este diseño no funciona bien en motores que usen dos tipos de combustibles (motores a diesel), porque el cierre parcial de la mariposa del gas "a" resulta que da un enriquecimiento de la mezcla, asociado con un aumento en el humo de escape.

El pequeño orificio "d" proporciona el aire necesario durante el tiempo de marcha en vacío para motores a diesel. En ese tiempo la mariposa "b" es cerrada totalmente y la mariposa "a" es abierta ligeramente para proporcionar una succión suficiente para un flujo de gas.

FUNCIONAMIENTO DEL MEZCLADOR AUTOMATICO

El diseño de este tipo de mezclador está representado en la figura No. 3.3. Para su funcionamiento se requiere que el aire entre con una velocidad alta para garantizar una mezcla turbulenta, ya que la apertura de la válvula mariposa se rige por un aumento en la depresión dentro de la tubería la cual normalmente es

producida por una mayor demanda de gas pobre. Con este tipo de mezclador la aceleración es obtenida de manera automática por el motor de acuerdo a la potencia requerida, a mayor potencia se abre la válvula mariposa a menor potencia se cierra.

CAPITULO No. 4

DESCRIPCION DEL EQUIPO EXPERIMENTAL

El equipo de experimentación está compuesto de un conjunto de elementos que van acoplados de tal manera que puedan realizar el objetivo de trabajo de esta tesis. Los elementos que forman este equipo experimental serán descritos posteriormente: banco de pruebas para el motor, planta de gasificación y mezclador de gas para el motor.

4.1 BANCO DE PRUEBAS

El banco de pruebas está formado de un motor de combustión interna monocilíndrico de cuatro tiempos, un dinamómetro e instrumentos de medida. El banco de pruebas es de la marca PLINT & PARTNEERS LTD Modelo TE 46 y consta de: voltímetro, amperímetro, regulador de carga, dinamómetro, banco de resistencia, medidor de flujo de aire, medidor de combustible.

El dinamómetro es lo relevante de este equipo ya que en base a sus caracteristicas, se realizó las adaptaciones del motor. La figura No. 4.1 nos muestra una vista del equipo.

CARACTERISTICAS DEL DINAMOMETRO

Máxima velocidad permitida	3.600	RPM
Máxima potencia mecánica absorbida	4	Kw
Mínima potencia de salida	2	Kw
Mínimo consumo de potencia del motor	5	Kw
Fusible carga del dinamómetro	20	A
Aislamiento	30	A

MOTOR. El motor usado en las pruebas fue monocilíndrico cuatro tiempos, desplazamiento volumétrico de 319 centímetros cúbicos, equipado con polea de arranque manual y encendido por medio de bujías. La figura No. 4.2 corresponde al motor empleado.

CARACTERISTICAS DEL MOTOR

Marca BRIGGS & STATTON

Modelo 95435 L 464122

RPM 3.600

Potencia 8 HP

Desplazamiento 319 cc.

4 Tiempos

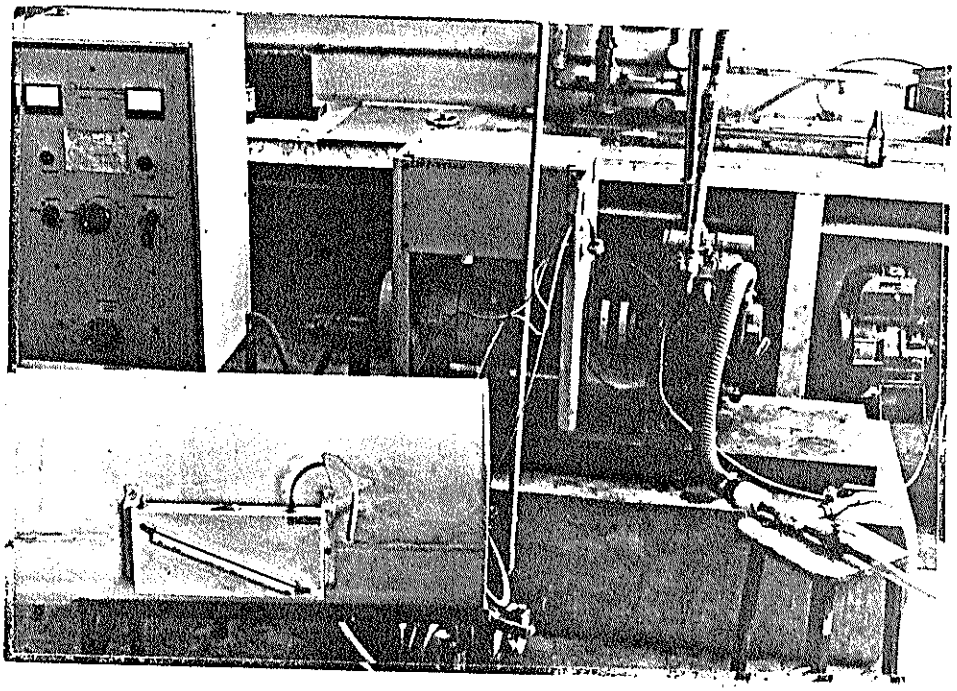


FIGURA N° 4.1 Banco de Pruebas

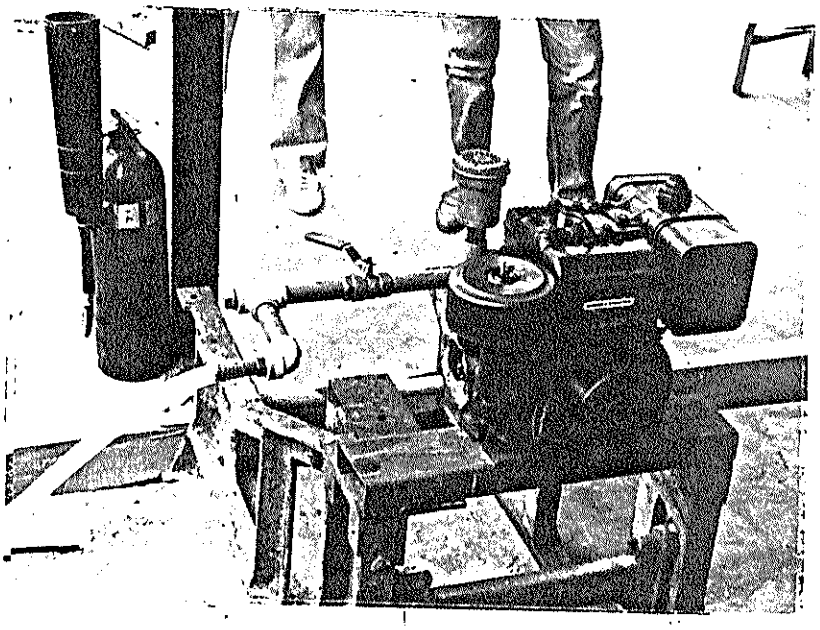


FIGURA N° 4.2 Moto Utilzado

ESPOL 1958 ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL BIBLIOTECA "GONZALO ZEVALLOS" M.I.M.C.P.

4.2 PLANTA DE GASIFICACION

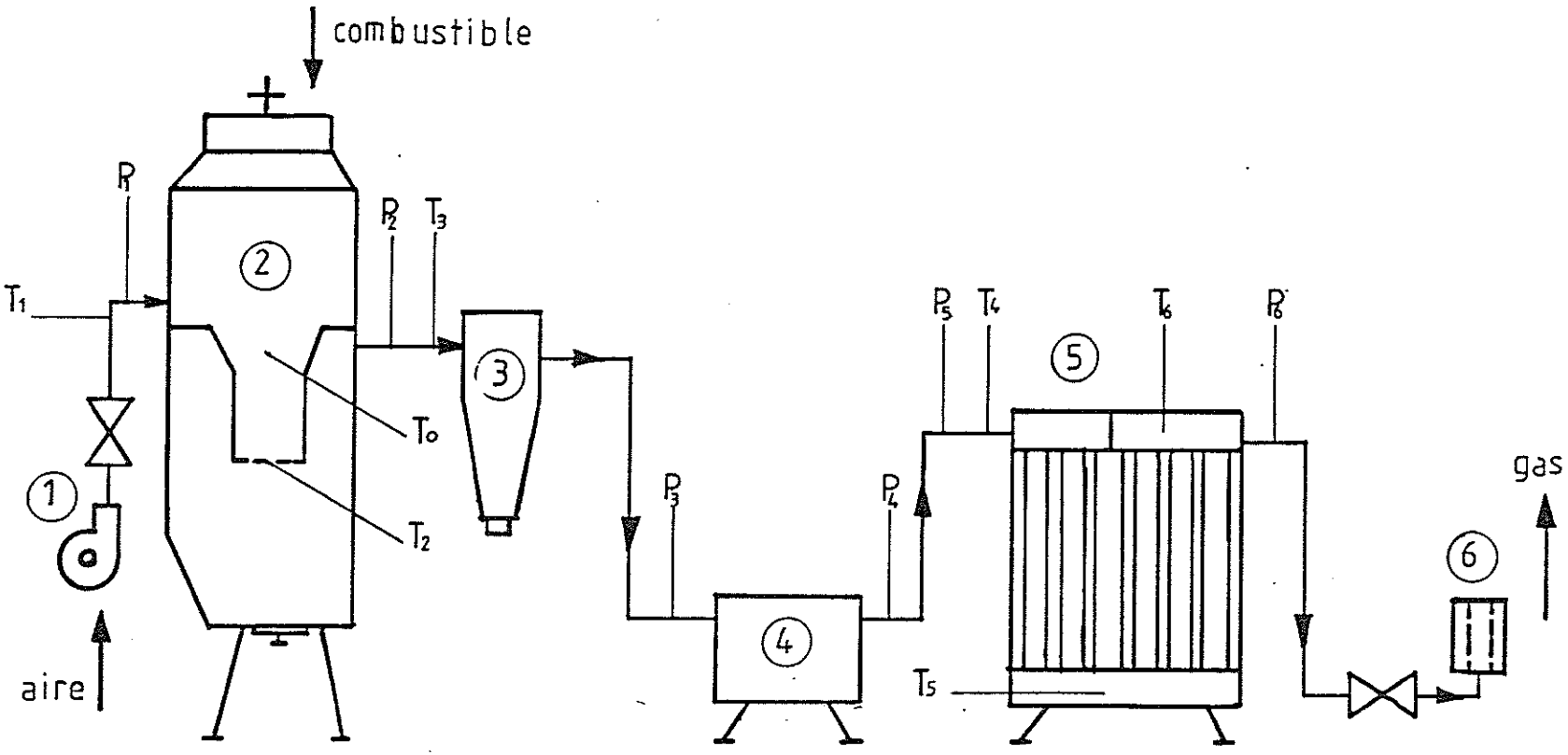
El conjunto generador de gas pobre y sistema de acondicionamiento del gas se lo denomina planta de producción de gas pobre y está compuesta de las siguientes partes: gasificador, filtro, condensador, y quemador de gas. Todo esta planta de producción de gas está descrita en su totalidad (Referencia 6).

La planta de gasificación se muestra en la figura No. 4.3 y además la secuencia que sigue el gas.

4.3 MEZCLADOR

El mezclador que se utilizó en las pruebas para el motor es de construcción tubular muy sencilla y tiene dos válvulas de control que regulan la entrada del gas y el aire. La operación del mezclador se la realizó de forma manual, los resultados que se obtuvieron en estas pruebas experimentales fueron favorables. Para dar una idea clara se recurre a un diagrama secuencial del funcionamiento del mezclador, donde se ve la entrada de gas que está controlada por una válvula de globo, para el control de la entrada de aire se utilizó la válvula mariposa del carburador del motor, teniéndose una buena regulación del aire y de esta forma obtener una mezcla combustible para el motor. En

la figura No. 4.4 se muestra el mezclador utilizado en las pruebas del motor.



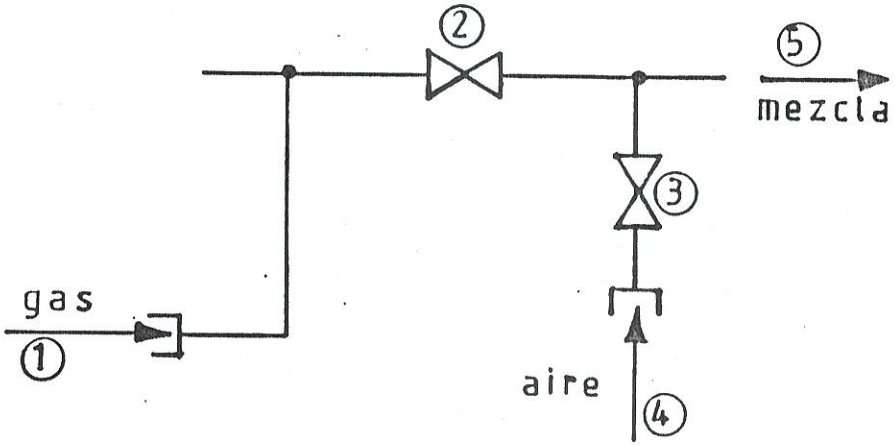
P = Presión Estática
T = Tenperatura

1 = soplador
2 = gasificador
3 = ciclon
4 = filtro
5 = intercambiador
6 = quemador

FIGURA N° 4.3- Planta de Gasificación

ESPOL

Esquema Secuencial del Mezclador



1 Entrada de gas
2 Válvula de globo
3 Válvula mariposa del carburador
4 Entrada de aire
5 Salida de mezcla

ESPOL 1958 ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL BIBLIOTECA "GONZALO ZEVALLO" F.I.M.C.P.

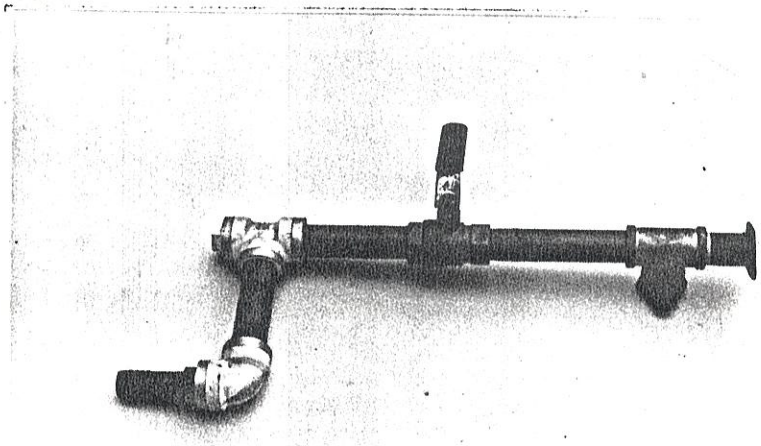


FIGURA N° 4.4 Mezclador de gas

CAPITULO No. 5

PRUEBAS EXPERIMENTALES

5.1 PRUEBAS DE GASIFICACION

Para las pruebas de gasificación se utilizó un gasificador de tiro descendente construido en la ESPOL. La descripción del sistema, diseño y funcionamiento se detallan en su totalidad en la Referencia 6. Se realizaron pruebas con tres tipos de materia prima, a) con madera troceada de 5 cm de lado, b) carbón vegetal previamente seleccionado de dimensiones similares a la madera, c) tusas de maiz del tamaño original. Con el objetivo de obtener experiencia en el funcionamiento del gasificador, primeramente se realizaron pruebas preliminares de observación variando el caudal de aire, siendo un parámetro de mucha importancia en la producción de gas, además se observó que la humedad del combustible es otro parámetro que hay que tener

en cuenta en la obtención del gas.

Posteriormente se realizaron pruebas con toma de datos para hacer un análisis del comportamiento de los diferentes combustibles utilizados.

Los datos tomados en las pruebas de experimentación son los siguientes: presión y temperatura ambiente, consumo de combustible, caudal de aire en la entrada del gasificador, concentración de los gases, temperaturas en diferentes puntos de la planta de gasificación figura No. 4.3, tiempo de operacion. Todos estos datos se utilizaran para los cálculos, de densidad, poder calorífico, relación de aire/combustible entre el real y teórico.

5.1.1 Funcionamiento del gasificador

Para el funcionamiento del gasificador se sigue un procedimiento que se describe a continuación para una operación acertada de la planta de gasificación en la obtención del gas combustible.

Operación del gasificador:

a. Alimentar carbón sobre la parrilla hasta la altura del plato garganta.

b. Hacer un lecho de madera o carbón sobre el plato garganta para el encendido inicial.

c. Colocar combustible líquido o cualquier otro combustible que facilite el encendido del lecho colocado sobre el plato garganta.

d. Mediante un mechero iniciar la ignición del combustible sólido, se lo realiza por la parte superior del gasificador.

e. Prender el soplador de aire con un bajo caudal durante 5 minutos.

f. Cargar el combustible a gasificar de acuerdo al tiempo de operación del equipo.

g. Cerrar herméticamente la tapa del reactor.

h. Verificar la generación de gas combustible por encendido del mismo.

i. Para la nueva alimentación de combustible, apagar el soplador y cerrar la válvula de entrada de aire, abrir paulatinamente la tapa del gasificador, quemar el gas residual.

j. Proceder a realimentar la nueva carga, cerrar herméticamente, prender el soplador.

k. En caso de operar una vez por día es

POLITEC
BIBLIOTECA
K.I

aconsejable retirar las cenizas y residuos que se encuentren acumulados en la parte inferior del gasificador.

5.1.2 Gasificación con madera

En la gasificación con madera se realizaron varias pruebas que se reportan en el Apéndice A tabla de datos de como se llevaron a cabo las mismas, el tiempo de operación de cada prueba, gráfico de temperaturas en diferentes puntos de la planta de gasificaión que se muestra en la figura No. 4.3, datos de presiones en diferentes puntos.

El consumo de combustible fue de 7.54 Kg/hr entre la pruebas más representativas en la producción de gas con madera, el caudal de aire fue muy variado realizando una estimación promedio de 14.32 Kg/hr, el tiempo que tarda en la producción del gas depende de la forma en que se realiza la operación del gasificador.

Si se coloca carbón en la parrilla la producción de gas comienza entre 3-5 minutos, si no se coloca carbón en la parrilla el tiempo en que se produce gas es de 30-40 minutos después de

iniciado el encendido, es el tiempo en que tarda para formarse la zona de reducción en el gasificador.

Todas estas variaciones de los parámetros antes mencionados se los realizaron por características de diseño del gasificador ya que el consumo debía ser de 26 Kg/hr para madera y el comsúmo de aire de 30-40 Kg/hr, con estas condiciones no se pudo obtener gas combustible, razón por la cual se utilizaron otros valores de consumo de aire y combustible con lo que si se obtuvo gas combustible.

5.1.3 Gasificación con carbón vegetal

Para la operación de la planta de gasificación utilizando como combustible carbón vegetal se siguió el mismo procedimento que con madera, los datos, gráficos y resultados de estas pruebas se muestran en el Apéndice B.

Las pruebas de gasificación se realizaron con dos variantes, la primera fue con el plato garganta, obteniéndose la producción de gas en un tiempo de 5-10 minutos con un consumo de combustible de 4.0 Kg/hr y la segunda sin plato

garganta la obtención de gas fue después de 8 minutos con un consumo de combustible 6.0 Kg/hr.

Con respecto al consumo de aire el caudal de operación para la obtención de gas combustible fue de 25.00-35.00 Kg/hr.

Los gráficos de temperaturas que se reportan en el Apendice B se muestra una clara diferencia de las temperaturas con respecto a la madera y tusas de maíz, es decir, que con carbón vegetal para obtener gas combustible se requiere de mayor temperatura. Además el gas es más limpio por tener menor cantidad de líquido condensable.

5.1.4 Gasificación con tusas de maíz

El procedimiento seguido en estas pruebas fue el utilizado anteriormente con la única variante que el cobustible era tusas de maíz de tamaño original.

Los datos, gráficos y resultados de estas pruebas se reportan en el Apéndice C, donde se puede ver que la variación de los parámetros son notorios hasta llegar a un rango de operación en donde se obtiene gas combustible, el consumo de

combustile en este caso es de 7.80-11.30 Kg/hr esto se debe a la fácil combustión de las tusas de maíz.

La obtención del gas combustible se produce a los 10- 15 minutos después del encendido, el gas resultante tiene una coloración oscura, diferente a los anteriores.

Para obtener una buena producción de gas se deberá tener cuidado en la limpieza de la materia prima y la humedad de la misma, siendo determinante en la calidad del gas, además evitar taponeo en el plato garganta al fundirse residuos de impurezas y cenizas.

Las temperaturas de operación con tusas de maíz tienen un comportamiento similar a las pruebas realizadas con madera.

5.2 OPERACION DEL MOTOR A VELOCIDAD VARIABLE Y CONSTANTE USANDO GASOLINA

Las pruebas experimentales aqui consideradas son aquellas que sirven para obtener los datos con los que se van a realizar los cálculos de los parámetros caracteríicos de un motor operado con gasolina.

El procedimiento a seguir para realizar estas pruebas experimentales a velocidades variable y constante se describen en la Referencia 14. La operación del motor se la realizó en un rango pequeño, los datos de velocidad se toman de manera diferente, teniendo la máxima velocidad sin carga, luego empezar a aplicar la misma y tomar los datos respectivos. Todo ésto se lo hace porque el funcionamiento del motor con gas pobre está entre estos rangos de operación donde se pueden registrar los datos.

Teniendo los datos necesarios se dá un ejemplo de como se realizan los cálculos de los parámetros buscados para efectuar los gráficos de las curvas y hacer las comparaciones respectivas.

Los datos tomados en el banco de pruebas son:

Velocidad	3.210	RPM
Carga al freno	17,5	Newton
Tiempo	36,4	seg
Voltaje	209,0	V
Amperaje	6,0	A
Presión de vacio (aire)	30,5	mm H_2O
Volumen	25,0	cc

ESPOL 1958

CALCULOS

Consumo de Combustible. El comsumo de combustible está dado por la relación.

$$\frac{Kg}{hr} = \frac{3,6 * v * (d * g)}{t}$$

De donde:

$$\frac{Kg}{hr} = \frac{3,6 * 25 * 0,735}{36,44} = 1,82 \text{ Kg/hr.}$$

Potencia. La potencia viene dada por la relación.

$$CV = \frac{N * RPM}{36040} * 1,36$$

Entonces tendremos que:

$$CV = \frac{3.210 * 17.5}{36040} * 1.36 = 2.12 \text{ HP}$$

Consumo específico de combustible. Está dado por:

$$CEC = \frac{Kg/hr}{CV \text{ (HP)}}$$

Caballo de fuerza

$$CEC = \frac{1,82}{2.12} = 0.86$$

Potencia eléctrica disipada.

$$KW = \frac{V * A}{1.000}$$

$$KW = \frac{209.0 * 6.0}{1.000} = 1.25$$

Torque. Viene dado por la relación.

$$T = N * L$$

$$L = 0.265 \text{ m}$$

$$T = 17.5 * 0.265 = 4.64 \quad \text{Nm}$$

Eficiencia térmica. Está dada por:

$$Nt = \frac{3.6 * 10^6}{CEC * HL} * 100 \ (\%)$$

$$Nt = \frac{3.6 * 10^6}{0.86 * 41.72 * 10^6} * 100 \ (\%) = 10,05 \ \%$$

A cotinuación de adjunta tabla de datos y tabla de resultados.

ESPOL 1958 POLITECNICA DEL LITORAL BIBLIOTECA GONZALO ZEVALLOS G.

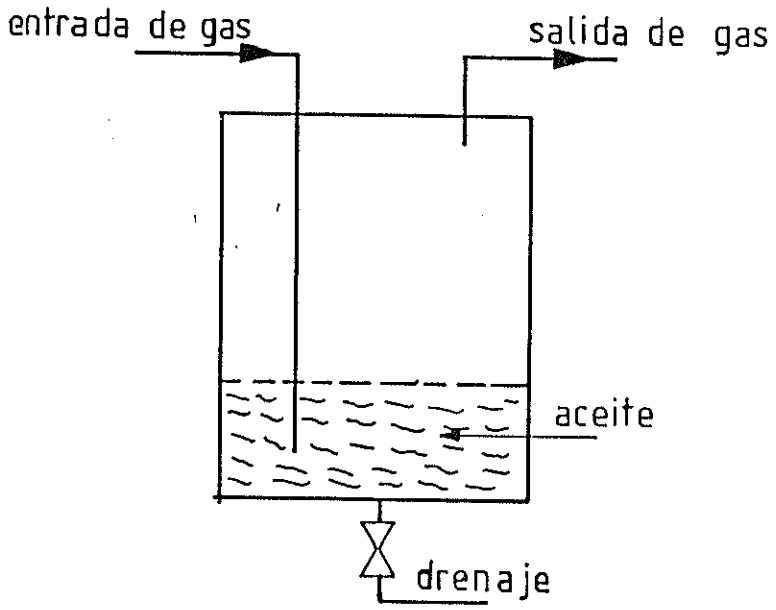
5.3 OPERACION DEL MOTOR A VELOCIDAD VARIABLE Y CONSTANTE USANDO GAS POBRE

Una de las aplicaciones del gas pobre es en motores de combustión interna, siendo una parte del trabajo de esta tesis. Para llevar a efecto las pruebas de operación del motor con gas pobre se realizaron los siguentes trabajos, acoplamiento del mezclador con la cámara de combustión del motor, ver figura No. 4.2 y el mezclador con su respectivo diagrama secuencial de funcionamiento en la figura No. 4.4.

Para las pruebas con el motor se construyó un filtro purificador de gas que consiste en un recipiente de 40 litros de volumen conteniendo en su interior 5 litros de aceite que sirve de retenedor de particulas y vapores no condensables, ver figura No. 5.1.

PROCEDIMIENTO PARA VELOCIDAD VARIABLE

Primeramente se hace arrancar el motor con gasolina y se lo deja en funcionamiento durante 5 minutos, después se cierra la entrada de gasolina para introducir gas de manera lenta hasta tener un buen funcionamiento del motor, ver figura No. 4.2 y llevarlo a su máxima velocidad sin carga que fue de 3.360 RPM para después aplicar carga de manera que la



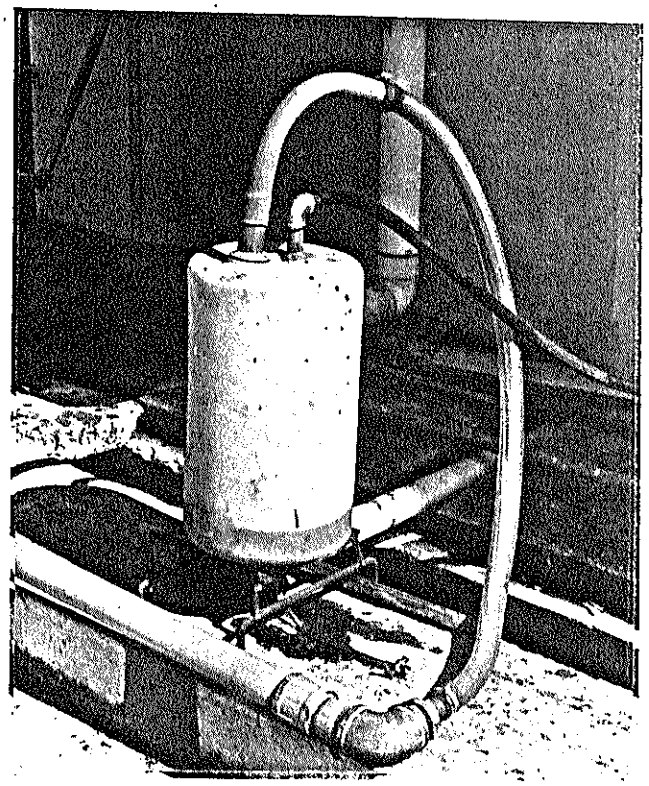


FIGURA N° 5.1 Filtro para limpieza de gas

velocidad varie en disminución hasta 2.300, tabla No. 5.3 como se tomaron los datos.

ESPOL
POLITECNICA DEL LITORAL
BIBLIOTECA "GONZALO SEVALLOS"
F.I.M.C.P.

PROCEDIMIENTO PARA VELOCIDAD CONSTANTE

Se arranca el motor con gasolina por un tiempo de 5 minutos, lo suficiente para que el motor se caliente, cerrar la entrada de gasolina y a continuación introducir gas paulatinamente hasta tener un buen funcionamiento del motor. Utilizando una llave de globo como acelerador, abierta un 50%, se mantiene la velocidad de 2.500 RPM aplicando una determinada carga, la carga se aumenta y el motor se lo lleva nuevamente a las 2.500 RPM aumentando la apertura de la válvula de globo, esta operación se la repite hasta llegar al 100% de apertura de la válvula.

Los datos, resultados y gráficos de curvas de comparación estan después del ejemplo con sus cálculos correspondientes.

Velocidad	3.030	RPM
Carga al freno	7.5	Newton
Velocidad del gas	10.9	m/seg
Voltaje	170	V
Amperaje	2.2	A
Presión de vacío (aire)	17.5	mm H_2

Area por donde pasa el gas	$2.8*10^4$	m^2
Densidad del gas	1.050	Kg/m^3
Poder calorífico	4.073	Mj/Kg

CALCULOS:

Consumo de Combustible. El consumo de combustible está dado por la relación siguiente.

$$Q = v * a$$

v = velocidad m/seg

a = área m^2

$$Q = 10.9 * 2.8 * 10^4 * 3.600$$

$$Q = 11.14 \quad m^3/hr.$$

De donde:

$$\frac{Kg}{hr} = Q * d$$

$$\frac{Kg}{hr} = 11.14 * 1.05 = 11.71$$

Potencia. La relación que da la potencia:

$$CV = \frac{N * RPM}{36040} * 1.36$$

$$CV = \frac{3.03 * 7.5}{36040} * 1.36 = 0.86$$

Consumo específico de combustible:

$$CEC = \frac{Kg/hr}{CV}$$

$$CEC = \frac{11.71}{0.86} = 13.61$$

Potencia eléctrica disipada:

$$KW = \frac{V * A}{1.000}$$

$$KW = \frac{170 * 2.2}{1.000} = 0.37$$

Torque. Está dado por:

$$T = N * L$$

$$T = 0.265 * 7.5 = 1.98 \text{ Nm}$$

Eficiencia térmica:

$$Nt = \frac{3.6 * 10^6}{CEC * HL}$$

$$Nt = \frac{3.6 * 10^6}{13.61 * 4.073 * 10^6} * 100 \ (\%)$$

$$Nt = 6.49 \ \%$$

ESPOL 1958
POLITECNICA LITORAL
BIBLIOTECA "JORGE ALLOS"
B.I.B.L.O.S.

TABLA # 5:1

DATOS DE LA PRUEBA DEL MOTOR CON GASOLINA

VELOCIDAD VARIABLE					
RPM	TORQUE (New-mt)	TIEMPO (seg)	VOLTAJE (V)	AMPERAJE (A)	AIRE mm H2O
3.540	5,5	34,44	290	0,5	31,50
3.360	12,5	35,21	202	4,2	32,50
3.210	17,5	36,44	209	6,0	30,50
2.850	23,0	36,75	222	7,5	31,50
2.640	32,0	38,56	231	7,6	29,00
2.220	38,0	41,17	209	9,0	26,00
VELOCIDAD CONSTANTE					
2.800	39,0	32,12	240	10,0	54,0
-------	36,5	32,47	230	9,5	48,0
-------	28,0	40,57	230	7,5	33,0
-------	26,0	44,14	220	7,0	32,0
-------	23,0	54,53	210	6,5	27,0
-------	16,5	59,80	200	4,5	18,0

ESPOL 1958

TABLA # 5: 2

RESULTADOS DE LA PRUEBA DEL MOTOR CON GASOLINA

CC Kg/hr	Pot CV	CEC Kg/CVhr	*Pot KW	T N-m	Fa Kg/hr	Nt (%)	A/C
VELOCIDAD VARIABLE							
1,92	0,73	2,61	0,14	1,46	14,70	3,31	7,66
1,88	1,58	1,18	0,84	3,31	14,93	7,27	7,94
1,82	2,12	0,86	1,25	4,64	14,46	10,46	7,94
1,80	2,46	0,73	1,66	6,09	15,31	11,85	8,51
1,72	3,19	0,54	1,75	8,48	14,10	15,99	8,20
1,61	3,18	0,50	1,88	10,07	13,36	17,26	8,29
VELOCIDAD CONSTANTE							
2,06	4,12	0,50	2,40	10,34	19,25	17,25	9,34
2,04	3,86	0,53	2,19	9,67	18,15	16,28	9,23
1,63	2,96	0,55	1,73	7,42	15,05	15,67	9,23
1,50	2,75	0,55	1,54	6,89	14,82	15,68	9,88
1,21	2,43	0,49	1,37	6,09	13,61	13,61	11,21
1,11	1,74	0,64	0,90	4,37	11,11	13,48	10,01

TABLA # 5.3

DATOS DE LA PRUEBA DEL MOTOR CON GAS POBRE

RPM	TORQUE (Newton)	VELOCIDA gas m/sg	VOLTAJE (V)	AMPERAJE (A)	AIRE mm H2O
VELOCIDAD VARIABLE					
3.360	7,0	11,43	190	2,2	20,5
3.030	7,5	10,92	170	2,2	17,5
3.000	8,0	11,08	175	2,0	16,0
2.790	18,0	11,68	175	6,0	15,0
2.640	17,0	11,43	162	5,4	13,0
2.490	19,0	12,19	172	5,8	12,5
2.400	20,0	11,69	172	5,8	12,0
2.280	19,0	10,67	168	5,8	11,5
2.300	21.0	11,69	150	6,5	9,5
VELOCIDAD CONSTANTE					
2.500	11,0	11,69	160	4,8	20,5
------	16,0	11,69	185	4,0	14,0
------	17,0	11,99	185	4,0	14,0
------	18,0	12,19	205	4,5	12,5
------	20,0	12,70	220	5,0	12,0
------	20,0	12,80	215	4,8	11,5
------	20,0	12,50	180	6,0	13,5
------	18,0	12,30	170	5,6	12,0

ESPOL 1959

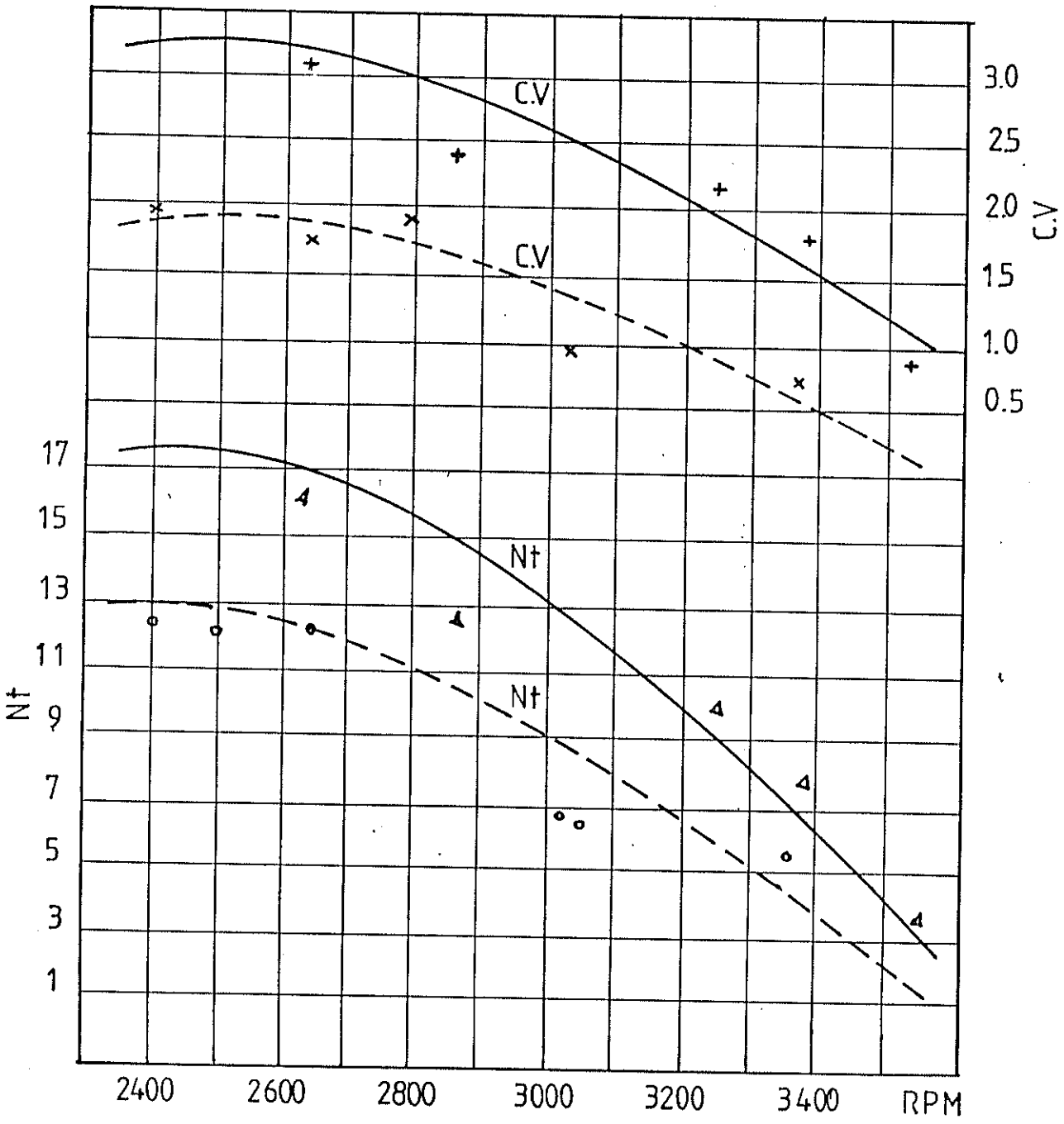
TABLA # 5: 4

RESULTADOS DE LA PRUEBA DEL MOTOR CON GAS POBRE

CC Kg/hr	Pot CV	CEC Kg/CVhr	%Pot KW	T N-m	Fa Kg/hr	Nt (%)	A/C
VELOCIDAD VARIABLE							
12,25	0,89	13,76	0,42	1,85	11,86	6,42	0,97
11,71	0,86	13,61	0,37	1,98	10,48	6,49	0,94
11,87	0,91	13,11	0,35	2,12	10,48	6,74	0,88
12,52	1,89	6,61	1,05	4,77	10,14	13,37	0,81
12,25	1,69	7,23	0,87	4,50	9,44	12,23	0,77
13,07	1,78	7,34	0,99	5,03	9,26	12,04	0,71
12,52	1,81	6,91	0,99	5,30	9,07	12,79	0,72
11,43	1,63	6,99	0,97	5,03	8,88	12,64	0,77
12,52	1,66	7,52	0,97	5,56	8,07	11,75	0,64
VELOCIDAD CONSTANTE							
12,52	1,04	12,06	0,77	2,90	11,86	7,33	0,95
12,85	1,51	8,51	0,74	4,24	9,80	10,39	0,76
11,98	1,60	7,47	0,96	4,51	9,80	11,83	0,81
13,07	1,70	7,69	0,92	4,77	9,26	11,49	0,71
13,61	1,89	7,21	1,10	5,30	9,07	12,26	0,66
13,72	1,89	7,26	1,03	5,30	8,88	12,17	0,65
13,39	1,89	7,27	1,08	5,30	9,62	12,16	0,72
13,18	1,70	7,76	0,95	4,77	9,07	13,39	0,68

GRAFICO 5.1

CURVAS CARACTERISTICAS PARA GASOLINA Y GAS POBRE VELOCIDAD VARIABLE



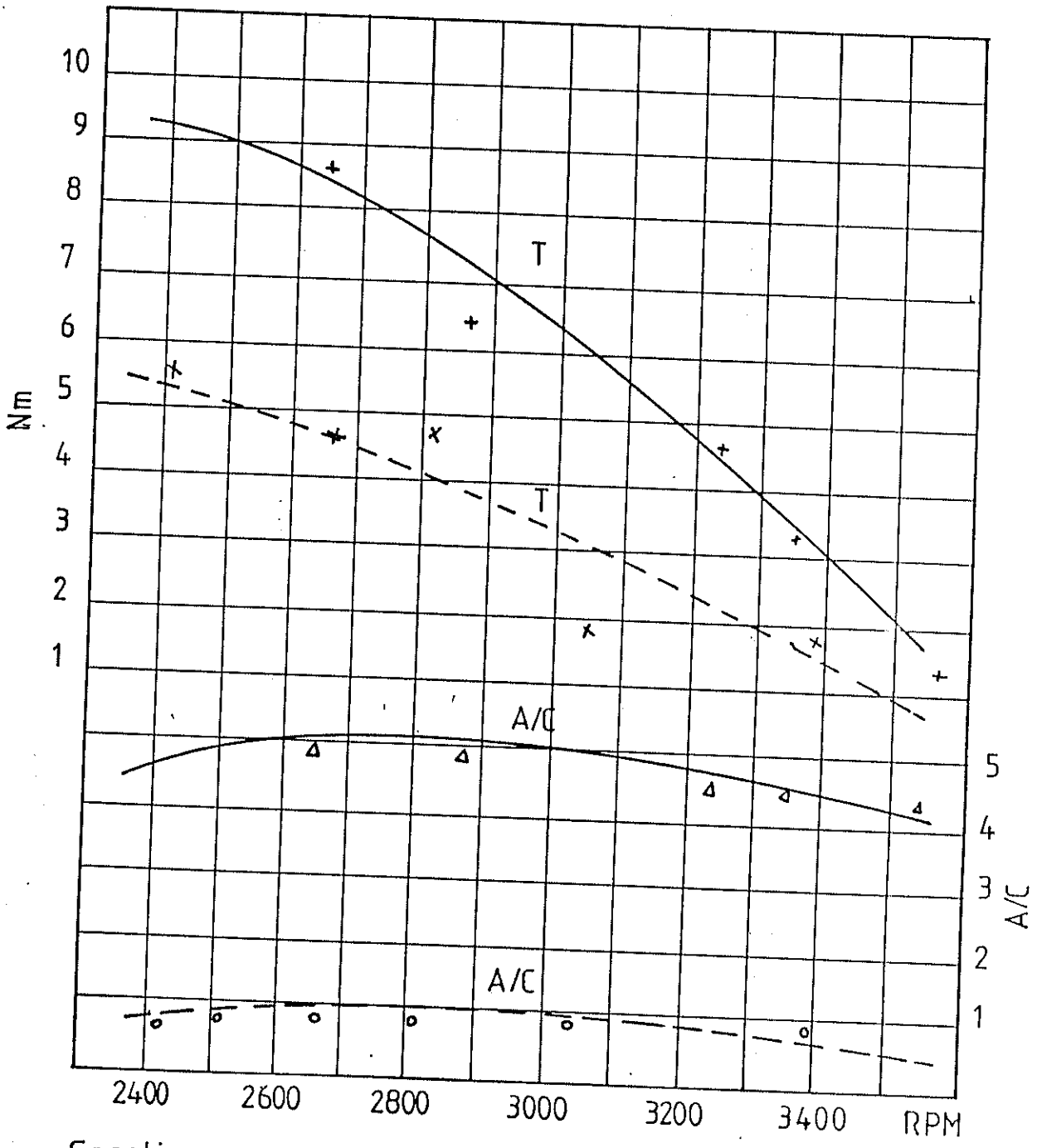
Gasolina = ————————

Gas Pobre = – – – – –

ESPOL
ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL
"GONZALO ZEVALLOS"

GRAFICO 5.2

CURVAS CARACTERISTICAS PARA GASOLINA Y GAS POBRE VELOCIDAD VARIABLE

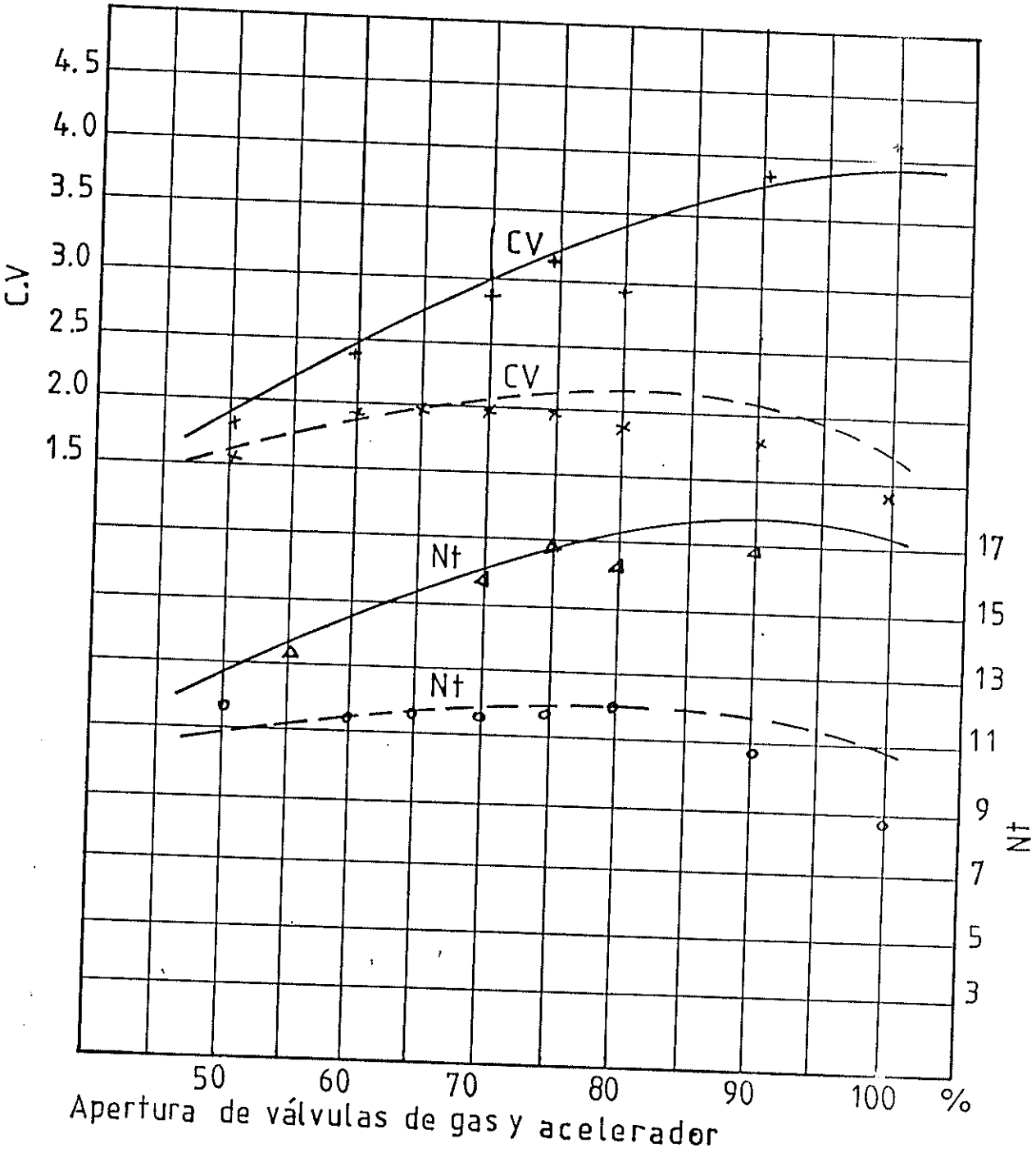


Gasolina = ————

Gas Pobre = — — — —

GRAFICO 5.3

CURVAS CARACTERISTICA PARA GASOLINA Y GAS POBRE VELOCIDAD CONSTANTE

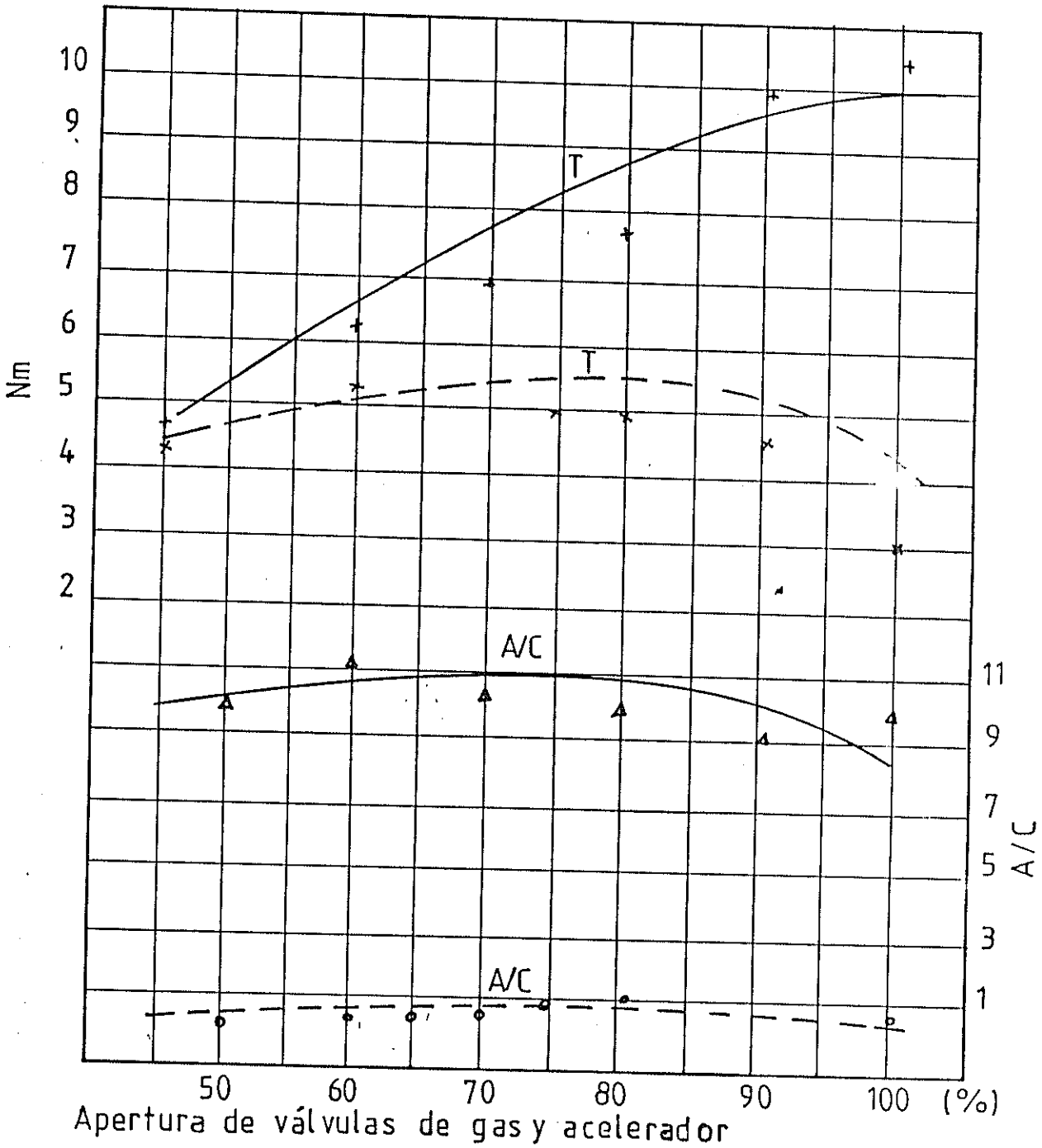


Gasolina= ————————

Gas Pobre= — — — —

GRAFICO 5.4

CURVAS CARACTERISTICAS PARA GASOLINA Y GAS POBRE VELOCIDAD CONSTANTE



Gasolina = ————————

Gas Pobre = — — — —

ESPOL 1958
ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL
BIBLIOTECA "GONZALO ZEVALLOS"
G.L.M.C.P.

ANALISIS DE RESULTADOS

RESULTADOS DE GASIFICACION

Para realizar el análisis de los resultados de las pruebas experimentales de gasificación de residuos agroforestales, se compara los porcentajes de los elementos que lo componen, con datos de experimentos realizados en otros paises y los obtenidos en estas pruebas (Apéndices A,B,C).

RESULTADOS DE REFERENCIAS

Concentración de Gases (%)	Madera	Carbón vegetal
% CO_2	9 - 15	1 - 7
% O_2	0 - 1	0 - 1
% CO	17 - 22	23 - 33
% H_2	12 - 20	4 - 10
% N_2	45 - 50	55 - 65
Poder calorífico MJ/Nm^3	5,0 - 5,9	4,5 - 5.6

FUENTE Ref: 7

TABLA DE RESULTADOS EXPERIMENTALES

DE LAS PRUEBAS DE GASIFICACION

CONCENTRACION DE GAS (%)	MADERA	CARBON VEGETAL	TUSAS DE MAIZ
% CO_2	9,6 - 18,8	7,0 - 9,8	8,8 - 14,0
% O_2	1,0 - 5,6	0,6 - 4,0	2,6 - 4,0
% CO	5,9 - 16,0	12,3 - 18,4	7,3 - 19,2
% H_2	8,7 - 25,2	6,5 - 18,7	7,3 - 28,9
% N_2	40,7 - 60,4	44,2 - 57,1	37,6 - 58,8
Poder Calorífico MJ/Nm	2,3 - 5,0	2,3 - 3,8	1,9 - 2,7
Ø	0,29 - 0,73	0,19 - 0,34	0,28 - 0,71

ESPOL 1958 BIBLIOTECA

De los datos de referencia y los experimentales se pueden ver diferencias en los porcentajes de los gases que componen el gas pobre las causas se dan por las siguientes razones.

El poder calorífico del gas que se obtuvo de la gasificación con madera fue bajo y es de (2.31 - 4.97 MJ/Nm³), comparado con la referencia de (5.0 - 5.9 MJ/Nm³). Esto se debe a la dificultad de controlar el caudal de aire que se suministra al gasificador y las reacciones que se producen al interior del gasificador no son lo suficiente como para producir un gas con mayor poder calorífico. Además las temperaturas en la zona de reducción no producen las reacciones necesarias para obtener una mayor cantidad de CO y de H_2 que son elementos determinantes en el poder calorífico del gas.

A pesar de seguir un procedimiento en la experimentación se puede decir que en la gasificación de la materia prima no existen muchas variaciones ya que influye mucho en la producción del gás y la humedad del mismo. El gas que se obtuvo de la gasificación con carbón vegetal tiene un poder calorífico de (2.33 - 3.82 MJ/Nm³) comparado con los datos referenciales que son (4.50 - 5.60 MJ/Nm³) la diferencia se debe a las siguientes razones:

La dificultad de operación con carbón vegetal fue mayor

debido al control del caudal de aire y la temperatura de la zona de reducción. El tipo de carbón vegetal utilizado en estas pruebas fue de buena resistencia a la combustión siendo necesario el suministro de un mayor caudal de aire como se lo ve en los datos del Apéndice B.

Se utilizó este tipo de carbón pensando obtener una buena calidad de gas combustible, pero se presentaron problemas en la combustión del carbón. El parámetro de la humedad en este caso fue del (5 - 7 %) no tuvo muchas variaciones manteniéndose en un rango muy pequeño. Se obtuvo un mayor porcentaje de CO y una disminucion de H_2 de manera que el poder calorífico del gas fue inferior al gas con madera.

En la obtención de gas utilizando como combustible tusas de maíz, la calidad del mismo fue muy inferior a los demás teniendo un poder colorífico bajo de (1.94 - 2.76 MJ/Nm^3) con estos datos se puede decir que el combustible no es apropiado para este tipo de gasificador, por presentar dificultades en el descenso del mismo al sufrir tapones en el plato garganta y la producción del gas no es continua.

Otra dificultad que se presentó fue el de la humedad que es diferente en cada tusa de manera que el gas que se obtiene presenta mayor porcentaje de vapor de agua, ver

POLITECNICA NACIONAL
BIBLIOTECA GONZALO ZEVILLO

tabla de resultados en el Apéndice C. Con esta materia prima hay que tener siempre presente la limpieza de la misma, que no tenga tierra ya que ésta a temperaturas elevadas tiende a fundirse y ocasiona el taponeo del plato garganta interrumpiéndose la producción de gas como sucedió en nuestro caso. En las observaciones realizadas se vió que este gas presentaba mayor cantidad de particulas en suspensión a la salida del quemador y la llama que se producía tenía una coloración amarilla, en los casos anteriores fue transparente.

ANALISIS DE LAS CURVAS CARACTERISTICAS DEL MOTOR

Seguidamente analizaremos la curvas obtenidas experimentalmente por los combustibles utilizados: gasolina y gas pobre, cuyos gráficos se presentan en el capítulo No. 5, curvas a velocidad variable. En los gráficos (5.1 - 5.2) se representan las curvas resultantes del funcionamiento del motor con los dos tipos de combustibles empleados. Las curvas son máximas cuando la velocidad es de 2.600 RPM y se encuentran a la inversa porque el motor se operó a 3.400 y 2.400 RPM, la forma como se llevaron a cabo estas pruebas se explican en el capítulo No. 5. De estos gráficos se ve que la potencia es máxima cuando la velocidad es de 2.600 RPM, teniendo descenso para mayor y menor velocidad. Del mismo gráfico se verifica que el rendimiento térmico máximo ocurre cuando la velocidad es

de 2.600 RPM para los dos combustibles. La relación A/C aumenta al máximo cuando la velocidad es 2.900 RPM. El torque va en aumento desde las 3.400 RPM hasta cuando es máximo en las 2.500 RPM y después desciende.

En general las curvas para velocidad variable en los dos combustibles tienen un comportamiento aproximado en cuanto a las tendencias que presentan. Con respecto a la potencia, al realizar las comparaciones de las curvas se observa que la mayor potencia desarrollada se obtiene cuando el motor utiliza gasolina. Entre los dos combustibles se aprecia una disminución de la potencia en perjuicio del gas pobre, siendo en porcentaje el 40% con respecto a la gasolina de acuerdo al máximo valor de la potencia con las 2.000 RPM.

Análisis de las curvas a velocidad constante. En los gráficos (5.3 - 5.4) se dan las curvas resultantes del motor, los parámetros están dados en función de la apertura del acelerador para gasolina y la apertura de la válvula de globo para gas, en porcentajes. Analizando las curvas de las potencias para los dos combustibles utilizados se ve una clara divergencia, la curva para gasolina tiende a subir y la de gas desciende, la mayor potencia que se produce con gas es cuando la velocidad es de 2.500 RPM y con la apertura de la válvula al 75%. Analizando la caída de potencia con velocidad constante

entre los combustibles usados la apertura de la válvula al 75% corresponde al 22.57% en perjuicio del gas.

Con respecto a la eficiencia térmica, es máxima para el gas en el 75% de la apertura de la válvula y para gasolina con el 90% del carburador abierto. La relación A/C es máxima para las dos curvas en el 70% de apertura de los dos dispositivos empleados. El torque tiene un comportamiento similar al de la potencia, siendo máximo para gas cuando la válvula está abierta al 75%.

De los resultados de las tablas 5.2 y 5.4 se ve que el CEC del combustible utilizado depende en su mayor parte de la relación aire/combustible de la mezcla que está entrando al motor, siendo muy elevado para gas ya que la relación A/C está entre 0.66 - 0.96. Otra razón en la disminución de la potencia en perjuicio del gas es que la cantidad de combustible (en masa) que entra al cilindro es menor pero mayor su volumen, desplazando de esta manera la cantidad de aire necesario para la combustión.

ESPOL 1958
POLITECNICA DEL LITORAL
BIBLIOTECA "GONZALO ZEVALLOS"
P.I.M.C.P.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES PARA GASIFICACION

La producción de gas pobre utilizando residuos agroforestales ofrece la posibilidad de generar energía mecánica y eléctrica. Esta alternativa es propicia para el desarrollo del país en áreas de difícil acceso.

La termogasificación debe considerarse como un todo y comprende la planta de gasificación, el sistema de enfriamiento y depuración, el elemento final que convierta la energía, sea éste un motor de combustión o un quemador.

Después de haber trabajado en la transformación de los residuos agroforestales en gas combustible se puede decir que no es muy difícil, requiriéndose principalmente de tiempo y paciencia para que esto ocurra, lo difícil es generarlo en un estado físico-químico apropiado para el funcionamiento de un motor durante un tiempo prolongado.

Según los resultados obtenidos se puede decir que la

operación del sistema de gasificación no fue apropiada, según se ve en los porcentajes de gases combustibles que se producen en cada un de los tres tipos de materia prima utilizada.

En la producción de gas con carbón vegetal se puede decir que la materia prima debe tener características homogéneas, en dureza y en la cantidad de volátiles para que la combustión sea igual y pueda haber el descenso del combustible en el interior del gasificador.

En la obtención de gas con tusas de maíz se puede concluir lo siguiente: es un combustible que presenta diferentes zonas para la combustión, su superficie es de fácil combustión mientras que la siguiente zona es más difícil de combustionarse, esto se observó en los residuos gasificados. Además se debe tener mucho cuidado en la recolección de este combustible, de no introducir impurezas ya que éstas ocasionan muchas dificultades en el proceso de gasificación.

En este trabajo se han realizado pruebas de gasificación de madera, carbón vegetal y tusas de maíz y su aplicación a un motor de combustión interna, sería importante realizar en lo posterior pruebas con desechos agrícolas: cáscara de café, cacao, cascarilla de arroz, bagazo de caña, aserrín, etc., disponibles en nuestro medio que

pueden ser empleados como combustibles. Para efecto de realizar estas pruebas se recomienda construir un equipo de gasificación de fácil manipulación que permita cambios en caso de que se requieran, un equipo que tenga un consumo de combustible no más de 2 Kg/hr y realizar los análisis con mucho cuidado.

Se recomienda que cuando se realicen estas pruebas se dé mucha importancia a la humedad del combustible, en lo posible que ésta sea constante y tener solamente una variable que sería el caudal de aire y poder hacer un control con mayor precisión.

Otro tipo de prueba que se recomienda realizar es manteniendo siempre constante el caudal de aire y teniendo como variable la humedad del combustible y verificar la mejor calidad de gas que se obtiene con cierto porcentaje de humedad.

ESPOL
1959
POLITECNICA DEL LITORAL
BIBLIOTECA "GONZALO ZEVALLOS"
C.I.M.C.P.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES PARA EL MOTOR

Las pruebas fueron realizadas con la idea de utilizar gasolina y gas, razón por la cual las condiciones de operación del motor fueron iguales para los dos casos.

De las pruebas realizadas en el motor se puede decir que la pérdida de potencia utilizando gas pobre es inevitable, debido a la menor densidad energética de la mezcla. Por esta razón se recomienda una sobrealimentación al motor para compensar esta deficiencia con un soplador adicional en la entrada de la cámara de combustión del motor.

Como resultado de estas pruebas se puede concluir en primer lugar que se ha demostrado que es factible la adaptación de un motor a gasolina, al uso de gas pobre con los inconvenientes propios encontrados a través del desarrollo de la presente tesis. Lo más importante consiste en que se ha mantenido la integridad del motor en cuanto a la alteración del mismo, lo que se ha hecho aquí

es utilizar un mezclador adaptado sobre el carburador y conectado a la cámara de combustión del motor.

Se recomienda optimizar el tipo de mezclador que se utilizó en estas pruebas para tener un mejor control de la mezcla combustible, esto se lo puede hacer colocando válvulas mariposas en la entrada de aire y gas, y vincularlas mecánicamente para que tengan aperturas iguales.

Otra recomendación es que se diseñe un sistema de filtros que atrape toda las cenizas y vapores no condensables para poder obtener un gas limpio, este puede ser realizado de la siguiente forma: primeramente hacer pasar el gas por un baño de agua, después por un filtro de aciete de manera que atrape los residuos de agua y de esta manera evitar el paso de residuos a la cámara de de combustión del motor, ver apéndice I.

Las pruebas que se efectúen en lo posterior deberían hacerse con un motor que tenga relación de compresión variable y poder determinar cual es la relación de compresión del motor que opera en mejores condiciones.

Se recomienda que las futuras pruebas se realicen en motores de dos o más cilindros ya que éstos prestan mayor estabilidad en el funcionamiento y las interrupciones del mismo son menores.

A P E N D I C E

ESPOL
POLITECNICA DEL LITORAL
BIBLIOTECA GONZALO ZEVALLOS
F.I.M.C.P.

TABLA A 1

PRUEBA DE GASIFICACION # 1

TIPO DE COMB: MADERA | % DE HUMEDAD: 14

PESO INICIAL: 24,87 Kg | PESO FINAL: 1.5 Kg

PESO DE CENIZAS: 0,32 Kg | PESO DE CONDENSADO: 4.0 Kg

TEMP.AMBIENTE: 30 °C | PRESION ATM: 762,8 mm Hg

PESO DE MADERA EN EL PLATO GARGANTA: 1.48 Kg

PESO DE CARBON EN LA PARRILLA: 0,0 Kg

Tiempo min	Aire m /hr	%CO 2	%O 2	%CO	OBSERVACIONES
0	1,79				Encendido
10					Inicio de carga
15					Final de carga
37	11,45	13,5	2,9	9,4	Muestra # 1
44	11,45				Llama estable 2 min
51	13,60				,, ,, 5 min
53	13,60	14,6	2,0	12,2	Muetra # 2
70					Llama estable 10 min
90	5,37	17,6	1,4	10,0	Muestra # 3
92	5,37				Llama estable 22 min
110	5,01				
120	5,19	18,8	1,4	10,5	Muestra # 4
139	19,33				Llama estable 30 min
175	18,61				Final de prueba

Comsumo de combustible: 8,56 Kg/hr

Tiempo de operación: 175 min

Tiempo de producción de gas: 69 min

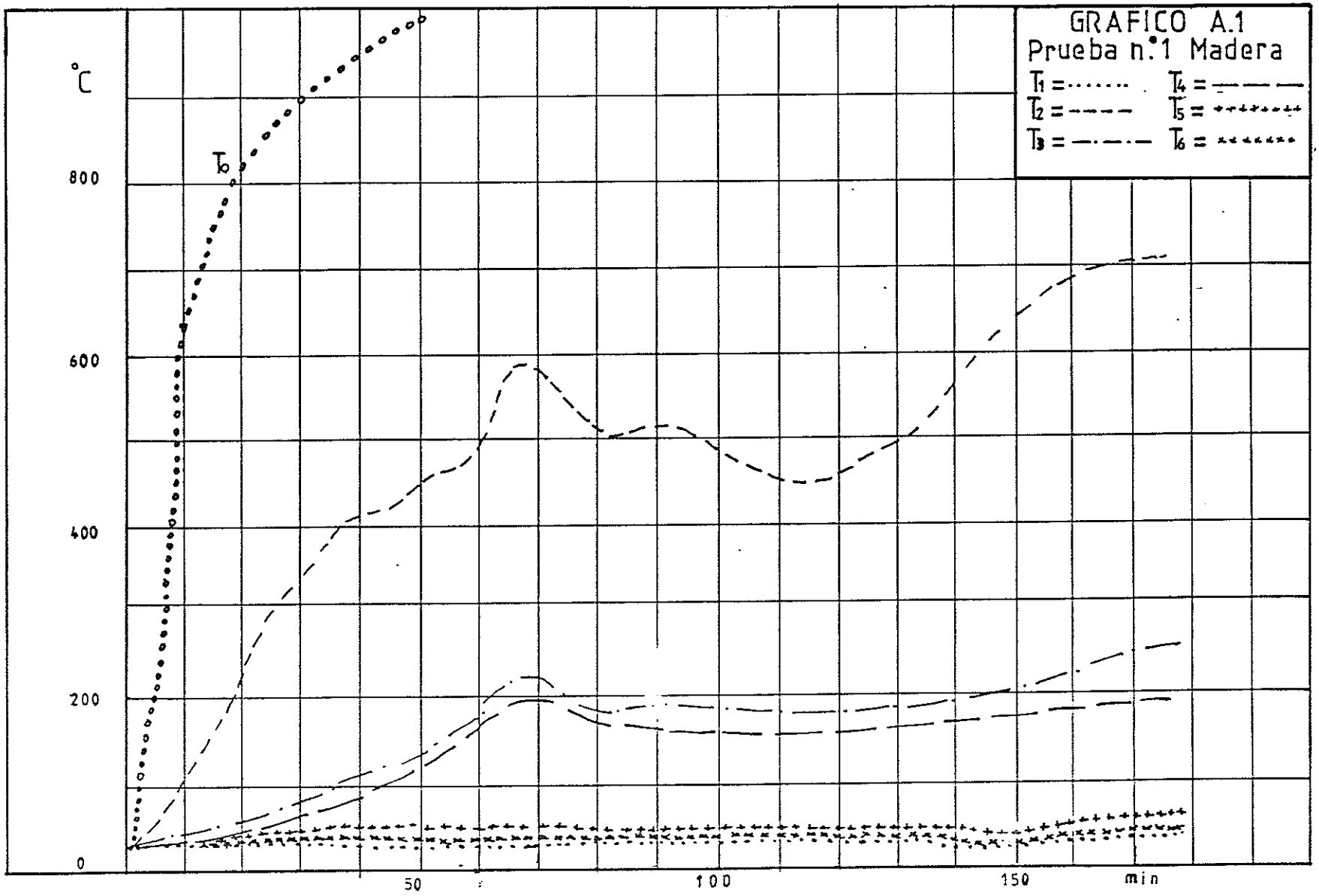


GRAFICO A.1
Prueba n.º1 Madera
T1 =
T2 =
T3 =
T4 =
T5 =
T6 =
°C
800
600
400
200
0
50
100
150
min
To

TABLA A 2
PRUEBA DE GASIFICACION # 2

TIPO DE COMB: MADERA	% DE HUMEDAD: 14
PESO INICIAL: 22,14 Kg	PESO FINAL: 5,02 Kg
PESO DE CENIZAS: 1,14 Kg	PESO DE CONDENSADO: 3,4 Kg
TEMP. AMBIENTE: 32 °C	PRESION ATM: 762,4 mm Hg

PESO DE MADERA EN EL PLATO GARGANTA: 1,45 Kg

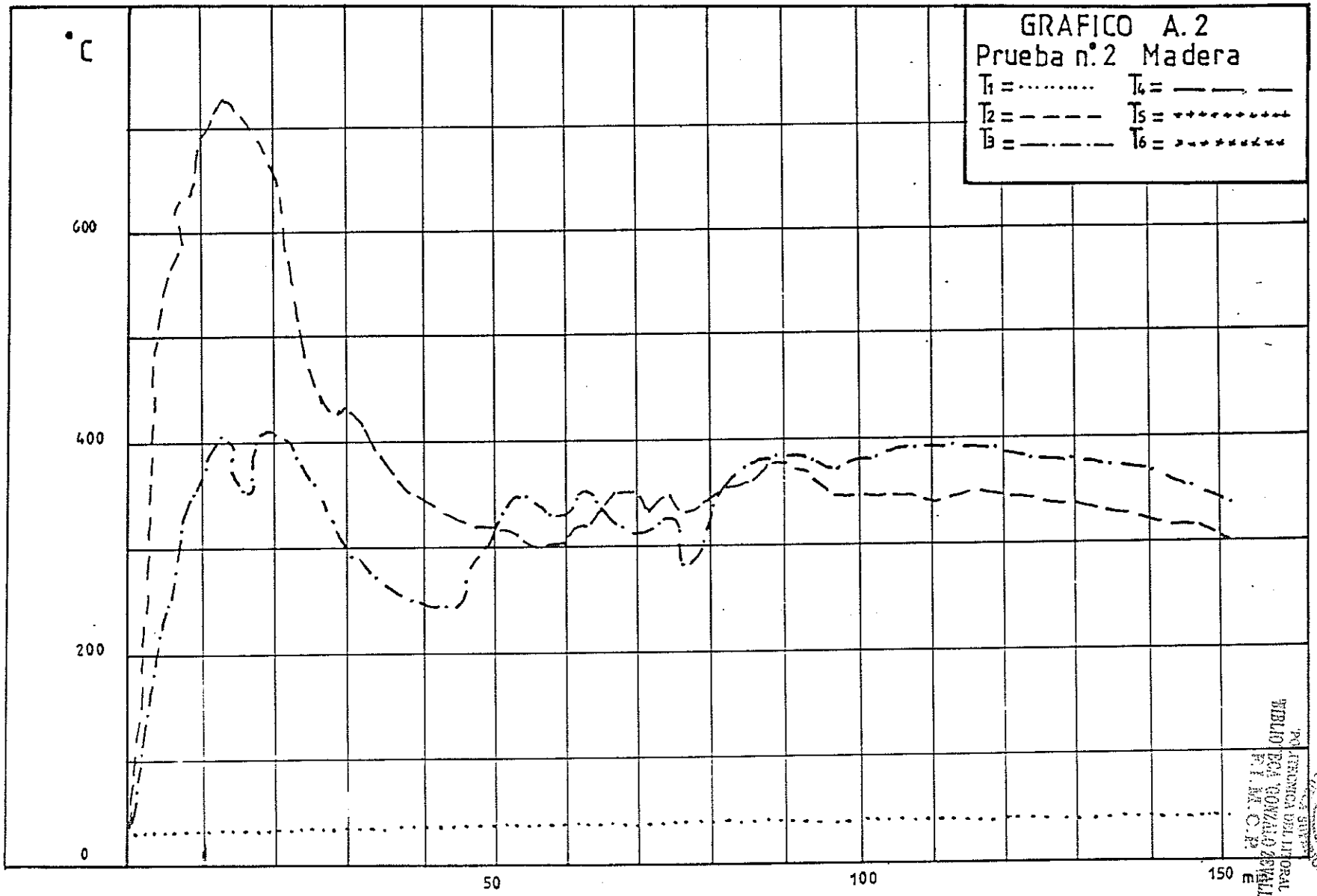
PESO DE CARBON EN LA PARRILLA: 0,0 Kg

Tiempo min	Aire m /hr	%CO 2	%O 2	%CO	OBSERVACIONES
0					Encendido
5	32,22				Inicio de carga
12	32,22				Final de carga
22	32,22	11,0	5,6	6,4	Muestra # 1
28	9,66				Regulación de flujo
40	6,80				" " "
48	8,95				" " "
65	12,53				" " "
80	17,90				" " "
90	17,90	13,2	2,8	8,0	Muestra # 2
95	11,91				Llama estable 45 min
110	11,81	13,0	2,2	10,2	Muestra # 3
125	11,81	13,0	2,2	10,2	Muestra # 4
145	11,85				Final de prueba

Comsumo de combustible: 7,23 Kg/hr

Tiempo de operación: 145 min

Tiempo de producción de gas: 45 min



POLITECNICA DEL LITORAL
BIBLIOTECA "GONZALO ZEVALLOS"
F.I.M.C.P.

TABLA A 3
PRUEBA DE GASIFICACION # 3

TIPO DE COMB: MADERA	% DE HUMEDAD: [illegible]
PESO INICIAL: 24,0 Kg	PESO FINAL: [illegible] Kg
PESO DE CENIZAS: 1,0 Kg	PESO DE CONDENSADO: 2,5 Kg
TEMP. AMBIENTE: 31,4 °C	PRESION ATM: 762,3 mm Hg

PESO DE MADERA EN EL PLATO GARGANTA: 1,3 Kg

PESO DE CARBON EN LA PARRILLA: 0,0 Kg

Tiempo min	Aire m /hr	%CO 2	%O 2	%CO	OBSERVACIONES
0	14,32				Encendido
6	14,32				Inicio de carga
10	14,32				Final de carga
19	14,32				Llama estable 2 min
22	14,32	13,8	2,0	12,9	Muestra # 1
38	19,69				Llama estable 5 min
46	11,45				,, ,, 3 min
50	11,45	14,5	4,2	5,6	Muestra # 2
56	10,74				Llama estable 3 min
69	10,74				
74	15,74	15,8	1,6	9,8	Muestra # 3
83	11,09				Llama estable 5 min
100	15,03				,, ,, 4 min
120	14,32				Final de prueba

Comsumo de combustible: 6,25 Kg/hr

Tiempo de operación: 120 min

Tiempo de producción de gas: 25 min

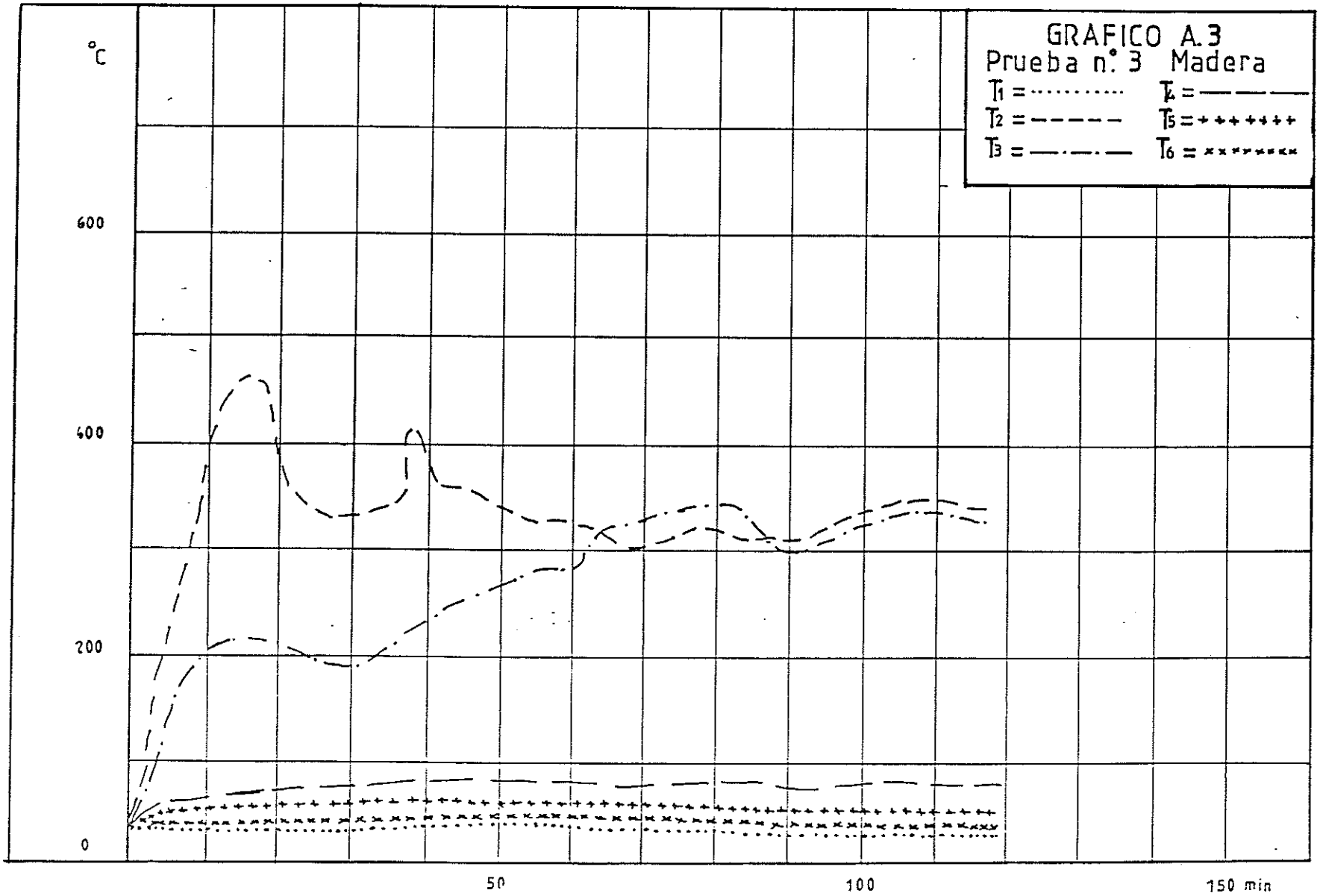


GRAFICO A.3
Prueba n.° 3 Madera
T1 =
T2 =
T3 =
T4 =
T5 =
T6 =
°C
600
400
200
0
50
100
150 min

TABLA A 4

PRUEBA DE GASIFICACION # 4

TIPO DE COMB: MADERA	% DE HUMEDAD: 11,8
PESO TOTAL : 18.6 Kg	PESO FINAL: 1,73 Kg
PESO DE CENIZAS: 0,21 Kg	PESO DE CONDENSADO: 2,6 Kg
TEMP.AMBIENTE: 33 °C	PRESION ATM:762,8 mm Hg

PESO DE MADERA EN EL PLATO GARGANTA: 1,5 Kg

PESO DE CARBON EN LA PARRILLA: 2,5 Kg

Tiempo min	Aire m /hr	%CO 2	%O 2	%CO	OBSERVACIONES
0	35,80				Encendido
5	28,64				Inicio de carga (10,0 Kg)
8	28,64				Final de carga
10	28,64				Llama estable 77 min
18	17,90	11,8	3,2	9,0	Muestra # 1
42	17,90	12,4	3,0	16,0	Muestra # 2
82	14,32	9,6	2,9	12,8	Muestra # 3
87					Nueva carga (8,6 Kg)
102					Final de carga
102					Llama estable 80 min
172	14,32	10,4	3,2	13,8	Muestra # 4
182	14,32				Final de prueba

Comsumo de Combustible: 6,98 Kg/hr

Tiempo de Operación: 182 min

Tiempo de producción de gas: 157 min

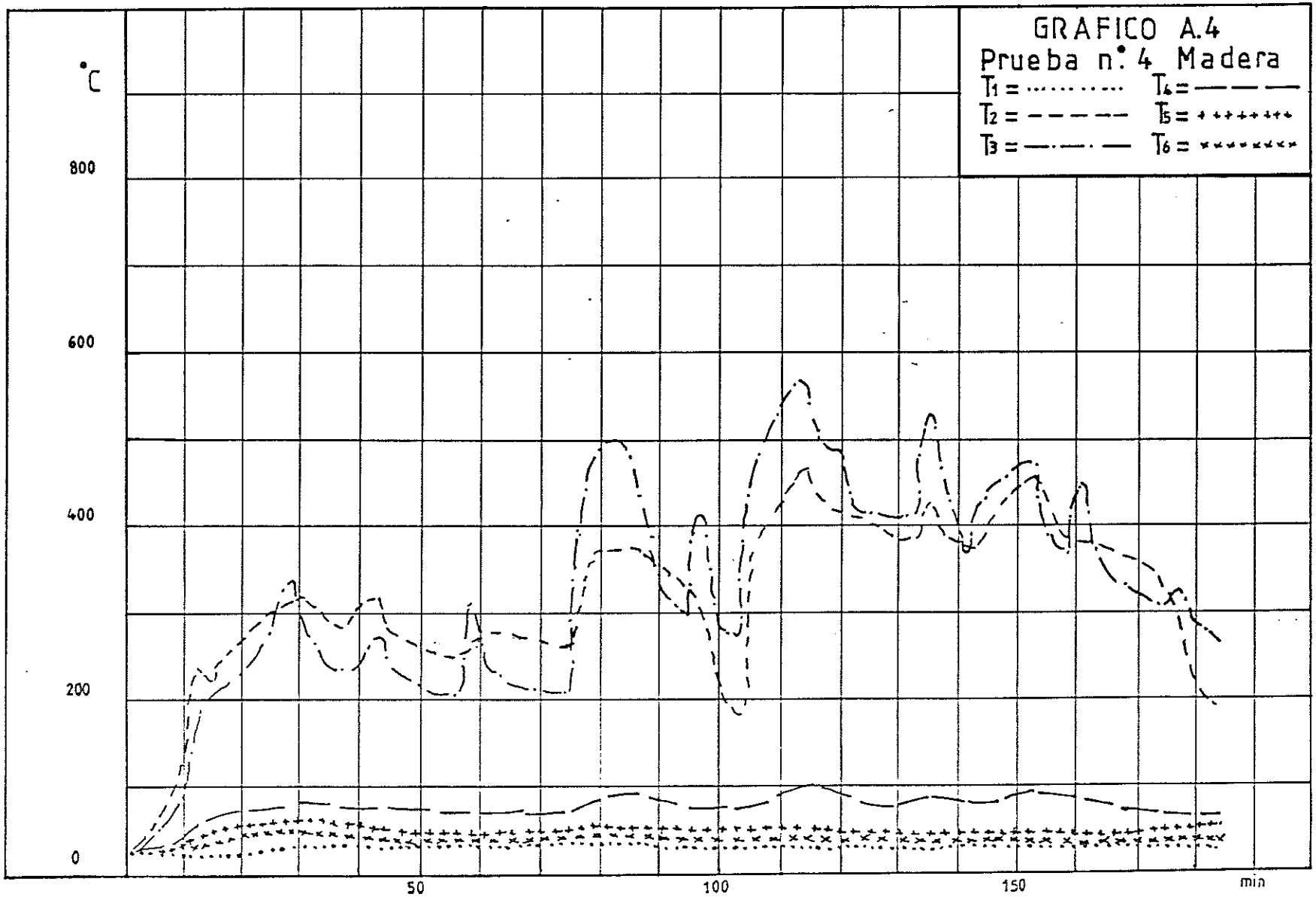


GRAFICO A.4
Prueba n.º 4 Madera
T1 = ... T4 = — — —
T2 = — — — — T5 = + + + + + + +
T3 = —·—·— T6 = × × × × × × ×
°C
800
600
400
200
0
50
100
150
min

ESPOL 1958 ESCUELA SUPERIOR
POLITECNICA DEL LITORAL
BIBLIOTECA "GONZALO ZEVALLOS"
P.S. M.C.

TABLA A 5

PRUEBA DE GASIFICACION # 5

TIPO DE COMB: MADERA	% DE HUMEDAD: 12
PESO TOTAL : 28,69 Kg	PESO FINAL: 2,8 Kg
PESO DE CENIZAS: 0,66 Kg	PESO DE CONDENSADO: 3,6 Kg
TEMP.AMBIENTE: 31 °C	PRESION ATM:762,6 mm Hg

PESO DE MADERA EN EL PLATO GARGANTA: 0,7 Kg

PESO DE CARBON EN LA PARRILLA: 1,25 Kg

Tiempo min	Aire m /hr	%CO 2	%O 2	%CO	OBSERVACIONES
0	10,32				Encendido
5					Inicio de carga (13,9 Kg)
10	10,74				Final de carga
13					Llama estable 55 min
25	13,60	16,2	2,6	7,0	Muestra # 1
55	14,32	11,8	3,2	9,0	Muestra # 2
80	13,60				Nueva carga (14,8 Kg)
90	13,60				Final de carga
95					Llama estable 100 min
100	13,60	12,4	3,0	16,0	Muestra # 3
125	13,60	9,4	2,9	12,8	Muestra # 4
150	13,60	10,4	3,1	13,8	Muestra # 5
185					Llama amarilla
195	13,60				Final de prueba

Comsumo de Combustible: 8,36 Kg/hr

Tiempo de Operación: 195 min

Tiempo de producción de gas: 155 min

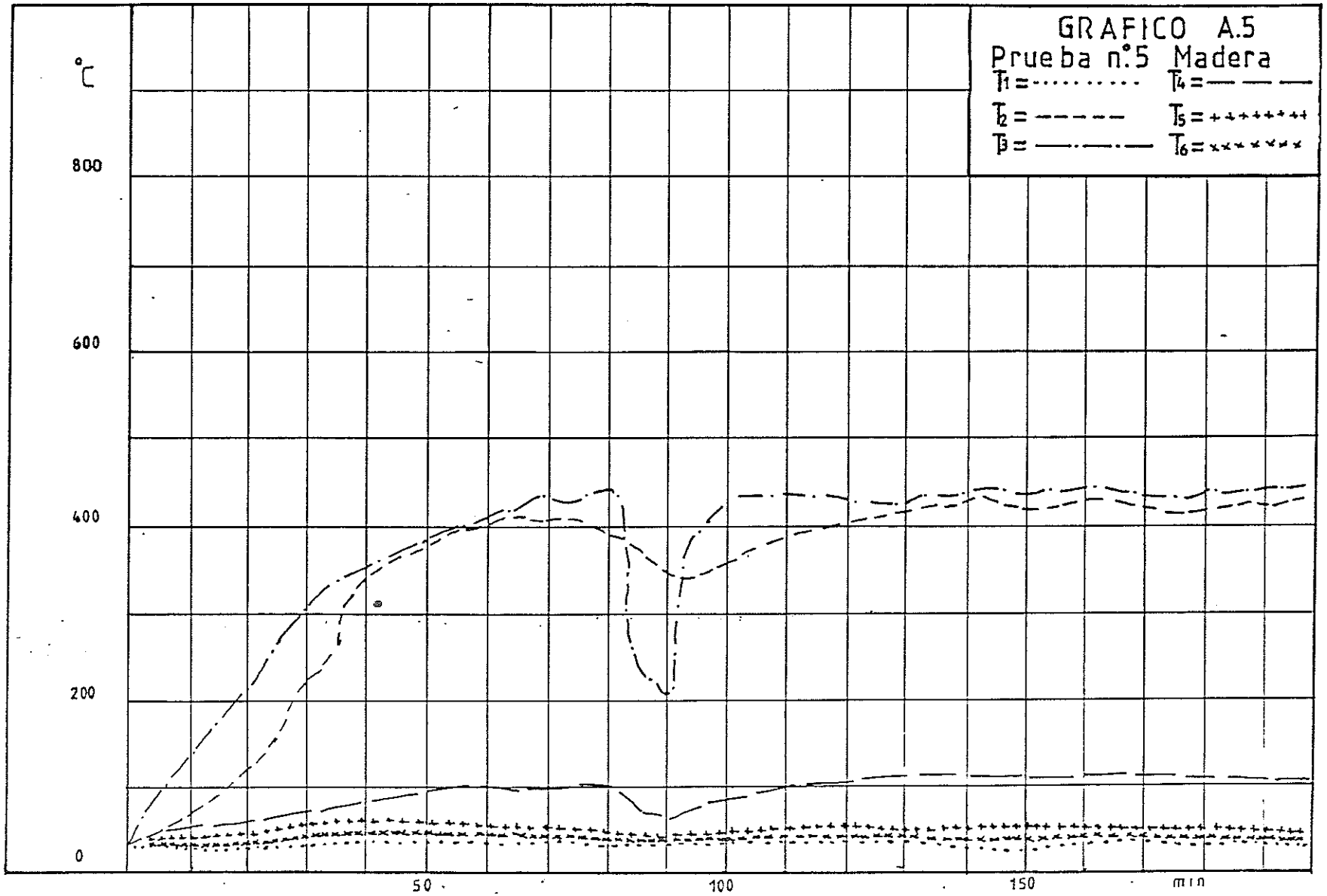


GRAFICO A.5
Prueba n.º5 Madera
T1 = ·····
T2 = – – – –
T3 = —·—·—
T4 = — — —
T5 = + + + + + + +
T6 = × × × × × × ×
°C
800
600
400
200
0
50
100
150
min

TABLA A 6
PRUEBA DE GASIFICACION # 6

TIPO DE COMB: MADERA	% DE HUMEDAD: 21
PESO TOTAL: 27,0 Kg	PESO FINAL: 2,7 Kg
PESO DE CENIZAS: 0,55 Kg	PESO DE CONDENSADO: 5,35 Kg
TEMP.AMBIENTE: 29 °C	PRESION ATM: 762,4 mm Hg

PESO DE MADERA EN EL PLATO GARGANTA: 0,8 Kg

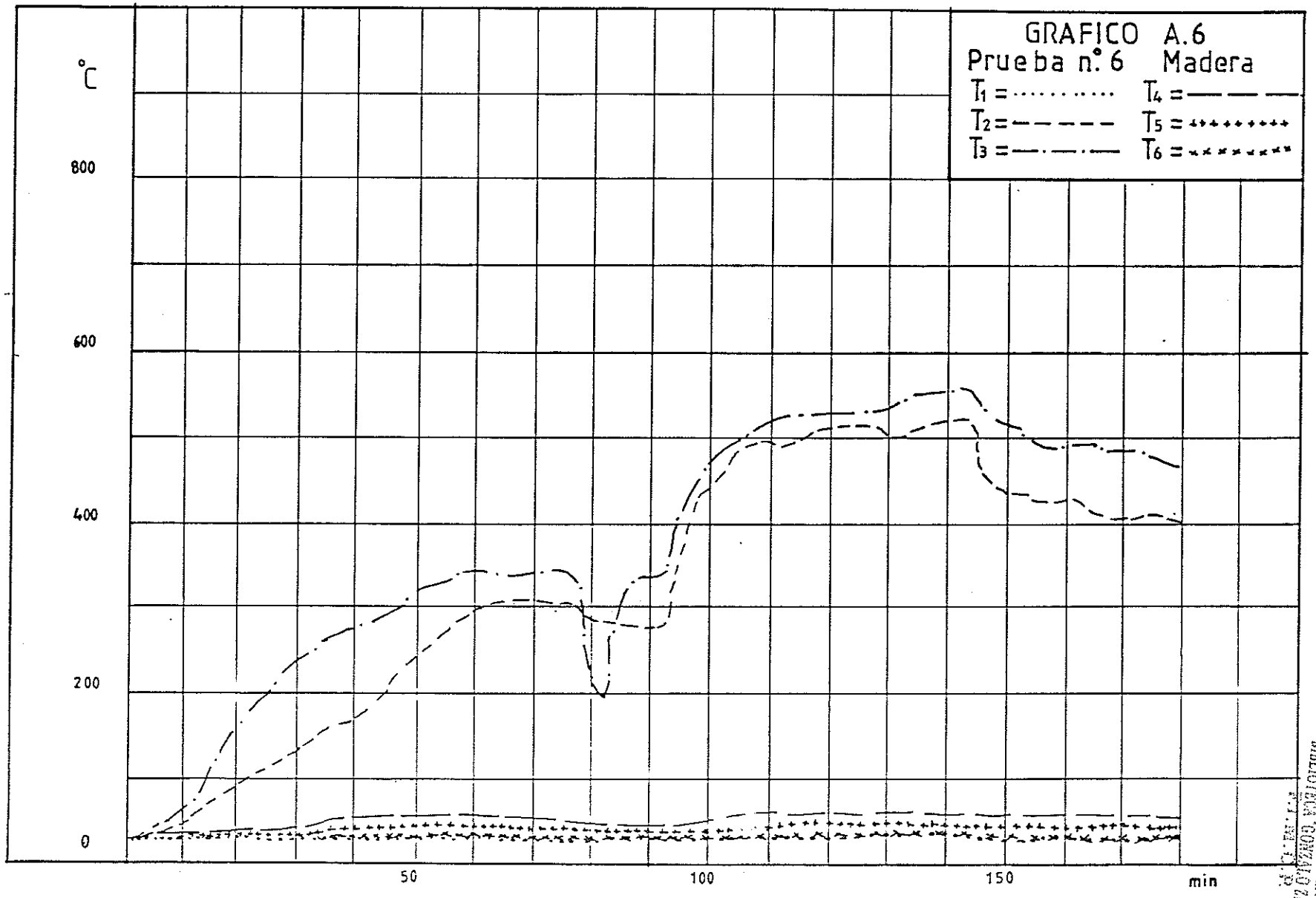
PESO DE CARBON EN LA PARRILLA: 1,25 Kg

Tiempo min	Aire m /hr	%CO 2	%O 2	%CO	OBSERVACIONES
0	14,32				Encendido
10					Inicio de carga (14,5 Kg)
13					Final de carga
14	12,17				Llama estable 8 min
22	13,60	16,0	1,8	7,8	Muestra # 1
34	15,75				Llama estable 26 min
39	15,75	17,4	2,0	9,2	Muestra # 2
75					Nueva carga (12,5 Kg)
85					Final de carga
90	35,80	10,3	2,5	8,4	Muestra # 3
90					Llama estable 90 min
130	35,80	16,0	1,0	9,2	Muestra # 4
155	14,32	16,0	1,4	8,6	Muestra # 5
180	13,60				Final de prueba

Comsumo de Combustible: 8,6 Kg/hr

Tiempo de Operación: 180 min

Tiempo de producción de gas: 124 min



POLITECNICA SUPERIOR
BIBLIOTECA GONZALO ZEVALLOS
E.T.S.I.I.T.
1959

TABLA A 7

RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE GASIFICACION CON MADERA

Tiempo (min)	Aire m/hr	Poder Calor MJ/Nm	Φ	CO_2	CO	O_2	N_2	H_2	H_2O
PRUEBA # 1									
37	11,4	3,08	0,47	13,5	9,4	2,9	51,6	17,6	5,0
53	13,6	4,05	0,35	14,6	12,2	2,0	45,7	23,4	2,2
90	5,3	3,97	0,34	17,0	10,0	1,4	44,7	25,2	1,2
120	5,2	4,02	0,29	18,8	10,4	1,4	40,7	25,0	2,9
PRUEBA # 2									
22	32,2	2,97	0,73	11,0	6,4	5,6	60,2	8,7	7,9
90	17,9	2,39	0,54	13,2	8,0	2,8	55,2	12,9	7,5
110	11,8	3,11	0,46	13,0	10,2	3,0	51,2	17,2	5,1
125	11,8	3,07	0,46	13,0	10,2	2.2	52,0	16,6	5,8
PRUEBA # 3									
22	14,3	4,17	0,36	13,8	12,9	2,0	45,2	23,6	2,0
50	11,4	2,31	0,58	14,5	5,6	4,4	55,9	14,9	4,4
74	10,7	3,61	0,38	15,8	9,8	1,6	47,0	22,0	2,7

TABLA A 8

RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE GASIFICACION CON MADERA

Tiempo (min)	Aire m/hr	Poder Calor MJ/Nm	Φ	CO_2	CO	O_2	N_2	H_2	H_2O
PRUEBA # 4									
18	17,9	2,32	0,56	11,8	9,0	3,2	56,0	11,0	8,7
42	17,9	4,90	0,30	12,4	16,4	3,0	41,0	27,0	1,1
82	14,3	2,86	0,49	9,6	12,8	2,9	52,8	11,6	7,0
172	14,3	3,26	0,46	10,4	13,8	3,1	51,3	11,6	7,6
PRUEBA # 5									
25	13,6	2,95	0,47	16,2	7,0	2,6	51,8	19,2	3,1
65	14,3	2,36	0,57	11,8	9,0	3,2	55,6	11,3	8,7
100	13,6	4,97	0,31	12,4	16,0	3,0	41,1	27,1	6,2
125	13,6	2,72	0,43	9,4	12,8	2,9	54,7	9,5	11,
150	13,6	3,54	0,43	10,4	13,8	3,1	49,1	14,8	6,6
PRUEBA # 6									
22	13,6	2,28	0,45	16,0	7,8	1,8	51,1	18,6	4,5
39	15,7	3,86	0,35	17,8	9,2	2,0	45,1	25,1	0,5
90	35,8	1,47	0,67	10,3	8,5	1,0	60,4	13,7	4,4
130	35,0	3,59	0,40	16,0	9,2	1,0	47,9	22,6	1,4
155	13,6	3,30	0,42	16,0	8,6	1,4	49,8	20,6	3,5

TABLA B 1
PRUEBA DE GASIFICACION # 7

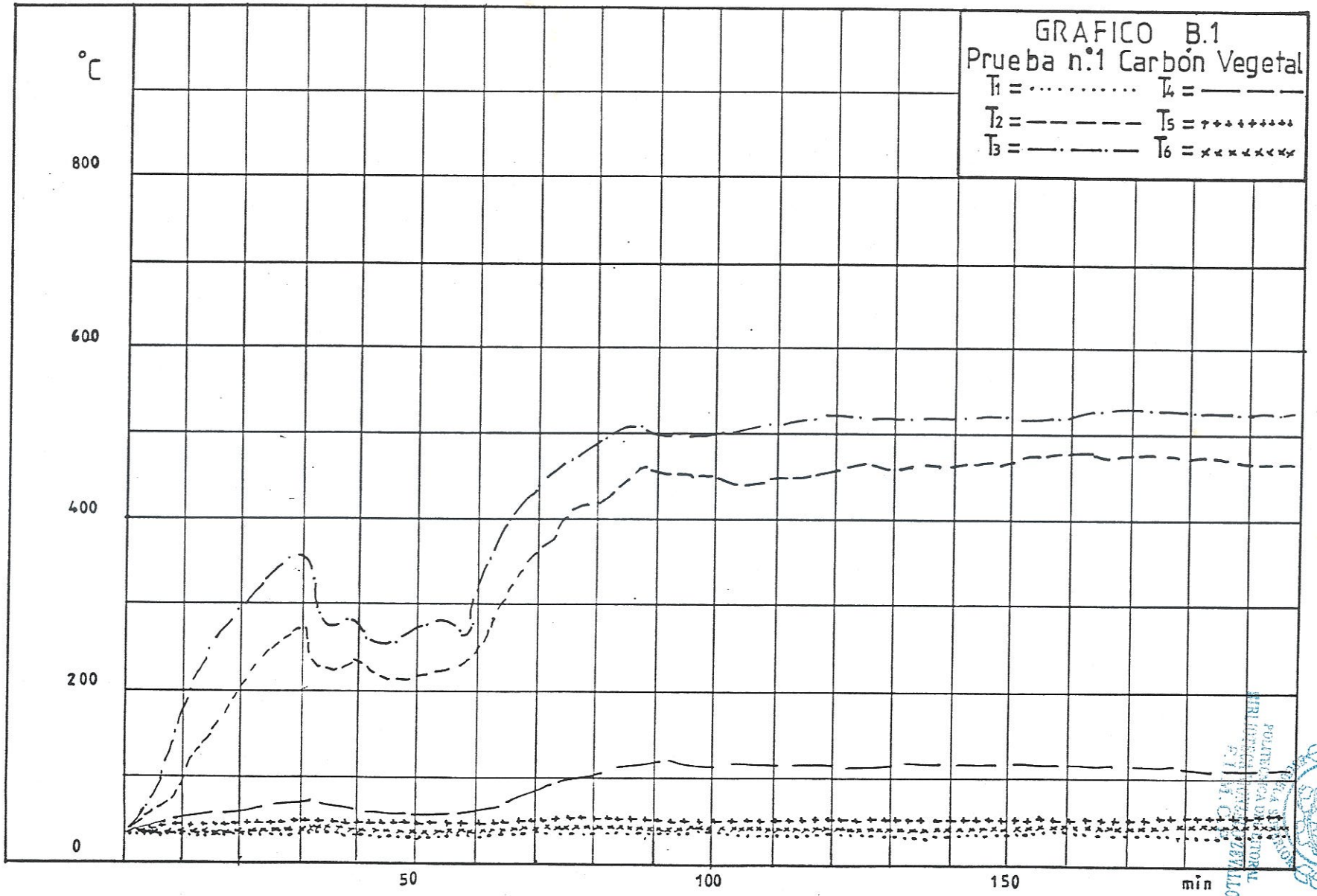
TIPO DE COMB: CARBON VEGETAL	% DE HUMEDAD: 4,85
PESO TOTAL: 17,2 Kg	PESO FINAL: 4,6 Kg
PESO DE CENIZAS: 1,58 Kg	PESO DE CONDENSADO: 0,30 Kg
TEMP.AMBIENTE: 30 °C	PRESION ATM: 762,8 mm Hg
PESO DE CARBON EN EL PLATO GARGANTA: 0,80 Kg	
PESO DE CARBON EN LA PARRILLA: 2.0 Kg	

Tiempo min	Aire m /hr	%CO 2	%O 2	%CO	OBSERVACIONES
0	32,22				Encendido
5	32,22				Inicio de carga (10,54 Kg)
10					Final de carga
12	32,22				Llama estable 28 min
25	32,22	7,0	4,0	14,0	Muestra # 1
45	32,22				Nueva carga (6,66 Kg)
53					Final de carga
70					Llama estable 135 min
78	30,43	7,8	1,0	17,9	Muestra # 2
95	30,43	8,0	1,0	18,4	Muestra # 3
107	28,64	8,4	1,0	18,4	Muestra # 4
135	28,64	8,0	0,6	17,8	Muestra # 5
165	28,64				
205	28,64				Final de prueba

Comsumo de Combustible: 3,92 Kg/hr

Tiempo de Operación: 205 min

Tiempo de producción de gas: 163 min



ESPOL
1958
POLITÉCNICA DEL LITORAL
BIBLIOTECA CENTRAL
F.I.M.C.P. - ESPOL

TABLA B 2
PRUEBA DE GASIFICACION # 8

TIPO DE COMB: CARBON VEGETAL	% DE HUMEDAD: 6,5
PESO TOTAL: 18,8 Kg	PESO FINAL: 7,02 Kg
PESO DE CENIZAS: 0,60 Kg	PESO DE CONDENSADO: 2,05 Kg
TEMP.AMBIENTE: 33 °C	PRESION ATM: 762,6 mm Hg

PESO DE CARBON EN EL PLATO GARGANTA: 0,0 Kg

PESO DE CARBON EN LA PARRILLA: 3,8 Kg

Tiempo min	Aire m /hr	%CO 2	%O 2	%CO	OBSERVACIONES
0	36,54				Encendido
5	35,80				Inicio de carga (10,0 Kg)
10					Final de carga
11	35,80				Llama estable 4 min
15	32,22				
22	32,22				Llama estable 20 min
43					Nueva carga (8,8 Kg)
45					Final de carga
46	32,22				Llama estable 74 min
55	32,22	9,5	1,1	18,4	Muestra # 1
90	28,64	9,8	1,2	18,0	Muestra # 2
120					Final de pruebas

Comsumo de Combustible: 7,79 Kg/hr

Tiempo de Operación: 120 min

Tiempo de producción de gas: 98 min

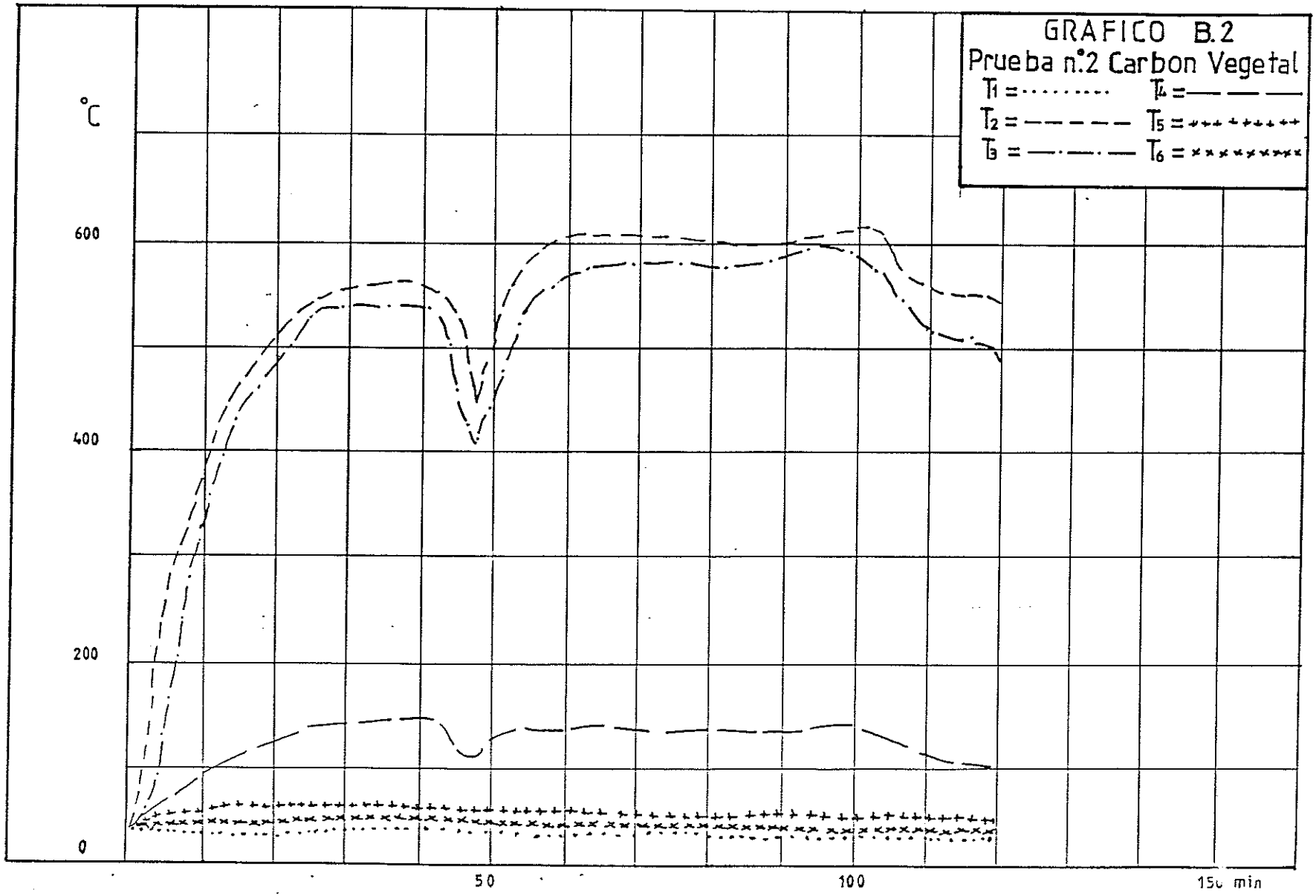


GRAFICO B.2
Prueba n.°2 Carbon Vegetal
T1 =
T2 =
T3 =
T4 =
T5 =
T6 =
°C
600
400
200
0
50
100
150 min

ESPOL 1958 ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL BIBLIOTECA "GONZALO ZEVALLOS" F.I.M.C.P.

TABLA B 3
PRUEBA DE GASIFICACION # 9

TIPO DE COMB: CARBON VEGETAL	% DE HUMEDAD: 7,2
PESO TOTAL: 14,0 Kg	PESO FINAL: 3,4 Kg
PESO DE CENIZAS: 0,75 Kg	PESO DE CONDENSADO: 1,6 Kg
TEMP.AMBIENTE: 30 °C	PRESION ATM: 762,2 mm Hg

PESO DE CARBON EN EL PLATO GARGANTA: 0,0 Kg

PESO DE CARBON EN LA PARRILLA: 3,8 Kg

Tiempo min	Aire m /hr	%CO 2	%O 2	%CO	OBSERVACIONES
0	28,64				Encendido
6	28,64				Inicio de carga (10,0 Kg)
10					Final de carga
12	28,64				Llama estable 58 min
20	35,80	8,0	3,5	12,3	Muestra # 1
35	32,22				
50	32,22				
55	32,22	8,0	2,0	14,0	Muestra # 2
66					Nueva carga (4 Kg)
76					Final de carga
80	32,22				Llama estable 30
110	25,06				
120	28,64				Final de prueba

Comsumo de Combustible: 7,53 Kg/hr

Tiempo de Operación: 120 min

Tiempo de producción de gas: 88 min

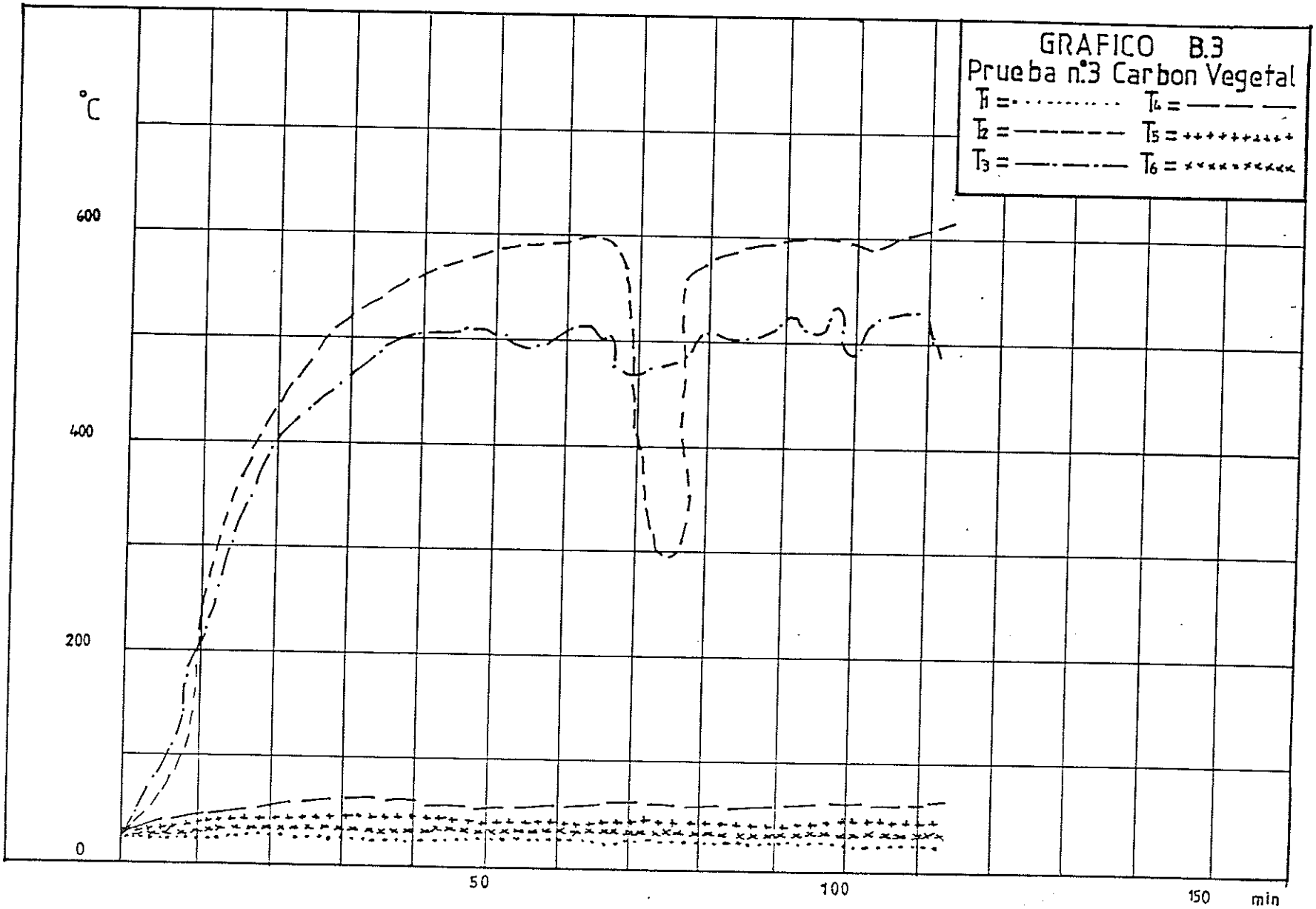


GRAFICO B.3
Prueba n.º3 Carbon Vegetal
T1 =
T2 =
T3 =
T4 =
T5 =
T6 =
°C
600
400
200
0
50
100
150
min

TABLA B 4

RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE GASIFICACION CON C.VEGETAL

Tiempo (min)	Aire m/hr	Poder Calor MJ/Nm	Φ	CO_2	CO	O_2	N_2	H_2	H_2O
PRUEBA # 1									
25	32,2	2,63	0,32	7,0	14,0	4,0	55,4	8,0	11
78	30,4	3,56	0,22	7,8	17,9	1,0	48,5	12,2	12
95	30,4	3,50	0,23	8,0	17,5	1,0	48,0	12,0	12
107	28,6	3,82	0,22	8,4	18,4	1,0	47,0	14,0	11
135	28,6	3,34	0,22	8,0	17,8	0,6	48,6	10,2	14
PRUEBA # 2									
55	32,2	4,33	0,19	9,5	18,4	1,1	44,1	18,7	8,1
90	28,6	4,20	0,20	9,8	18,0	1,2	45,0	18,0	8,2
PRUEBA # 3									
20	35,8	2,23	0,34	9,5	12,3	3,5	57,1	6,4	12
55	32,2	2,45	0,30	8,0	14,0	2,0	55,2	6,5	14

ESPOL 1958
POLITECNICA DEL LITORAL
BIBLIOTECA "GONZALO ZEVALLOS"
G.L. M. C.P.

TABLA C 1

PRUEBA DE GASIFICACION # 10

TIPO DE COMB: TUSAS DE MAIZ | % DE HUMEDAD: 12,13

PESO TOTAL: 19,5 Kg | PESO FINAL: 4,8 Kg

PESO DE CENIZAS: 0,8 Kg | PESO DE CONDENSADO: 1,19 Kg

TEMP.AMBIENTE: 27 °C | PRESION ATM: 762,4 mm Hg

PESO DE CARBON EN EL PLATO GARGANTA: 1,0 Kg

PESO DE CARBON EN LA PARRILLA: 1,0 Kg

Tiempo min	Aire m /hr	%CO 2	%O 2	%CO	OBSERVACIONES
0	35,80				Encendido
3	12,53				Inicio de carga (10,3 Kg)
5					Final de carga
7	19,69				Llama estable 45 min
32	18,97	14,0	3,2	7,3	Muestra # 1
40	25,06				
52	21,48	12,8	3,2	9,3	Muestra # 2
57					Nueva carga (9,17 Kg)
67					Final de carga
77	19,69				Llama estable 40 min
82	19,69	10,0	3,2	12,0	Muestra # 3
97	21,48				
102	17,54	10,0	4,0	9,2	Muestra # 4
120	17,90				Final de prueba por comb.

Comsumo de Combustible: 7,85 Kg/hr

Tiempo de Operación: 120 min

Tiempo de producción de gas: 85 min

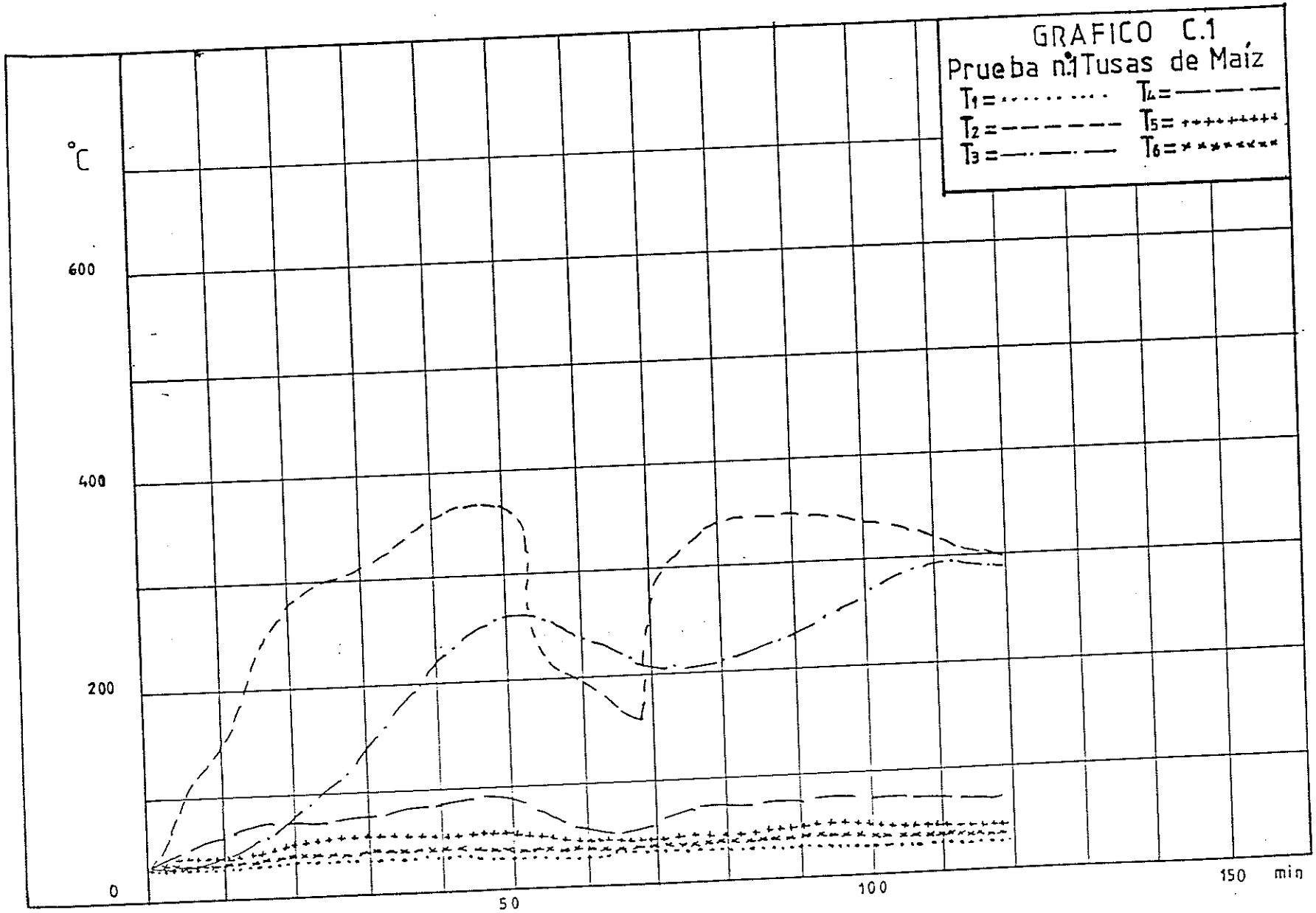


GRAFICO C.1
Prueba n.º1 Tusas de Maíz
T1 =
T2 =
T3 =
T4 =
T5 =
T6 =
°C
600
400
200
0
50
100
150
min

TABLA C 2
PRUEBA DE GASIFICACION # 11

TIPO DE COMB: TUSAS DE MAIZ	% DE HUMEDAD: 15,4
PESO INICIAL: 11,24 Kg	PESO FINAL: 0,72 Kg
PESO DE CENIZAS: 0,87 Kg	PESO DE CONDENSADO: 2,69 Kg
TEMP.AMBIENTE: 32 °C	PRESION ATM: 762,5 mm Hg
PESO DE CARBON EN EL PLATO GARGANTA: 0,81 Kg	
PESO DE CARBON EN LA PARRILLA: 1,1 Kg	

Tiempo min	Aire m /hr	%CO 2	%O 2	%CO	OBSERVACIONES
0	32,22				Encendido
4					Inicio de carga
7					Final de carga
10	35,80				Llama estable 37 min
14	32,22				Llama anaranjada
27	32,22	11,2	2,6	19,2	Muestra # 1
42	32,22	8,8	3,0	17,6	Muestra # 2
47					Final de llama
60	32,22				Final de prueba (por tapo neo en el plato garganta)

Comsumo de Combustible: 11,24 Kg/hr

Tiempo de Operación: 60 min

Tiempo de producción de gas: 37 min

ESPOL 1958
POLITECNICA DEL LITORAL
BIBLIOTECA "GONZALO ZEVALLOS"
K.M. 30 C.P.

TABLA C 1
PRUEBA DE GASIFICACION # 10

TIPO DE COMB: TUSAS DE MAIZ	% DE HUMEDAD: 12,13
PESO TOTAL: 19,5 Kg	PESO FINAL: 4,8 Kg
PESO DE CENIZAS: 0,8 Kg	PESO DE CONDENSADO: 1,19 Kg
TEMP.AMBIENTE: 27 °C	PRESION ATM: 762,4 mm Hg

PESO DE CARBON EN EL PLATO GARGANTA: 1,0 Kg

PESO DE CARBON EN LA PARRILLA: 1,0 Kg

Tiempo min	Aire m /hr	%CO 2	%O 2	%CO	OBSERVACIONES
0	35,80				Encendido
3	12,53				Inicio de carga (10,3 Kg)
5					Final de carga
7	19,69				Llama estable 45 min
32	18,97	14,0	3,2	7,3	Muestra # 1
40	25,06				
52	21,48	12,8	3,2	9,3	Muestra # 2
57					Nueva carga (9,17 Kg)
67					Final de carga
77	19,69				Llama estable 40 min
82	19,69	10,0	3,2	12,0	Muestra # 3
97	21,48				
102	17,54	10,0	4,0	9,2	Muestra # 4
120	17,90				Final de prueba por comb.

Comsumo de Combustible: 7,85 Kg/hr

Tiempo de Operación: 120 min

Tiempo de producción de gas: 85 min

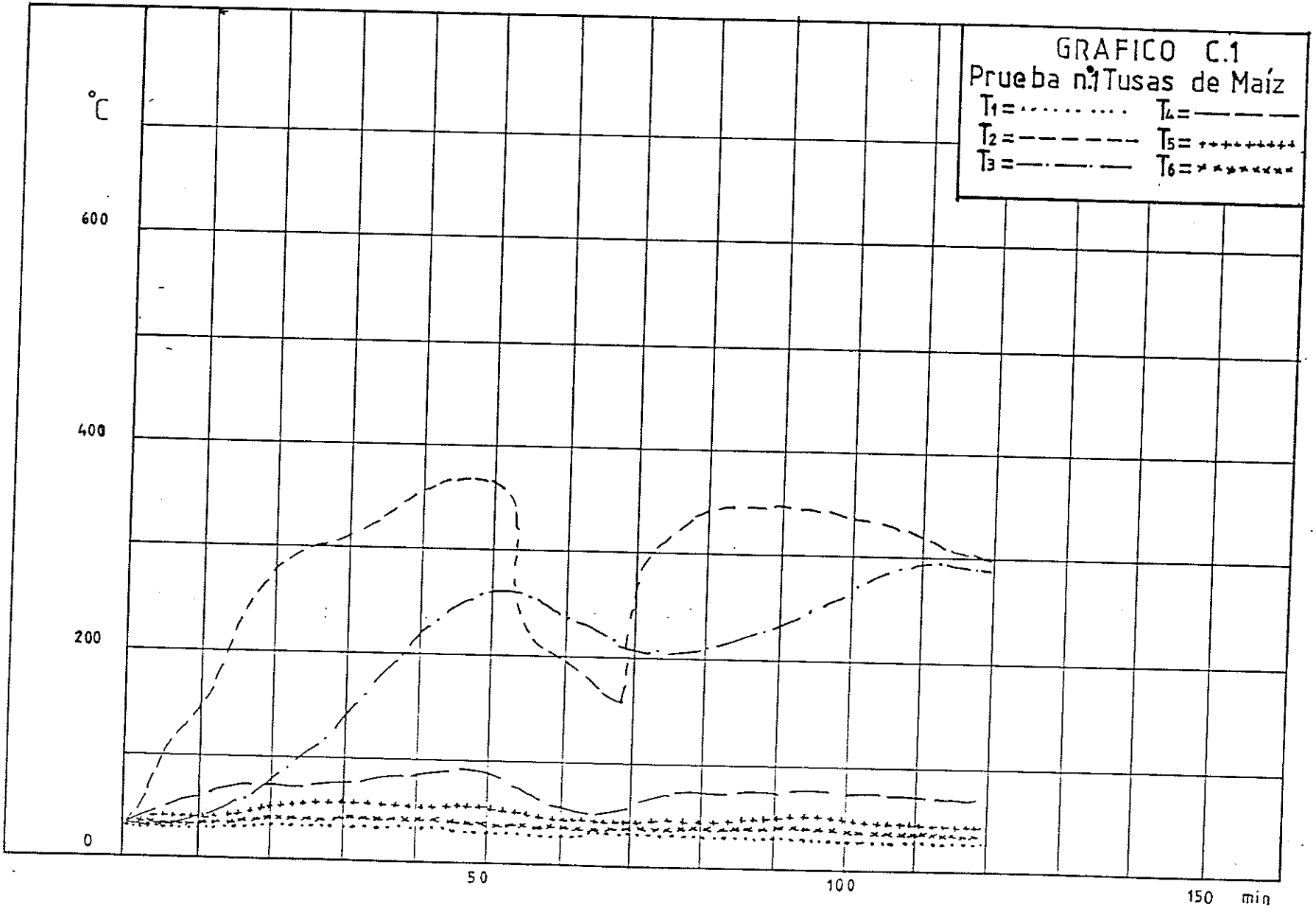


GRAFICO C.1
Prueba n.1 Tusas de Maíz
T1 =
T2 =
T3 =
T4 =
T5 =
T6 =
°C
600
400
200
0
50
100
150
min

TABLA C 2
PRUEBA DE GASIFICACION # 11

TIPO DE COMB: TUSAS DE MAIZ	% DE HUMEDAD: 15,4
PESO INICIAL: 11,24 Kg	PESO FINAL: 0,92 Kg
PESO DE CENIZAS: 0,87 Kg	PESO DE CONDENSADO: 2,69 Kg
TEMP.AMBIENTE: 32 °C	PRESION ATM: 762,5 mm Hg

PESO DE CARBON EN EL PLATO GARGANTA: 0,81 Kg

PESO DE CARBON EN LA PARRILLA: 1,1 Kg

Tiempo min	Aire m /hr	%CO 2	%O 2	%CO	OBSERVACIONES
0	32,22				Encendido
4					Inicio de carga
7					Final de carga
10	35,80				Llama estable 37 min
14	32,22				Llama anaranjada
27	32,22	11,2	2,6	19,2	Muestra # 1
42	32,22	8,8	3,0	17,6	Muestra # 2
47					Final de llama
60	32,22				Final de prueba (por taponeo en el plato garganta)

Comsumo de Combustible: 11,24 Kg/hr

Tiempo de Operación: 60 min

Tiempo de producción de gas: 37 min

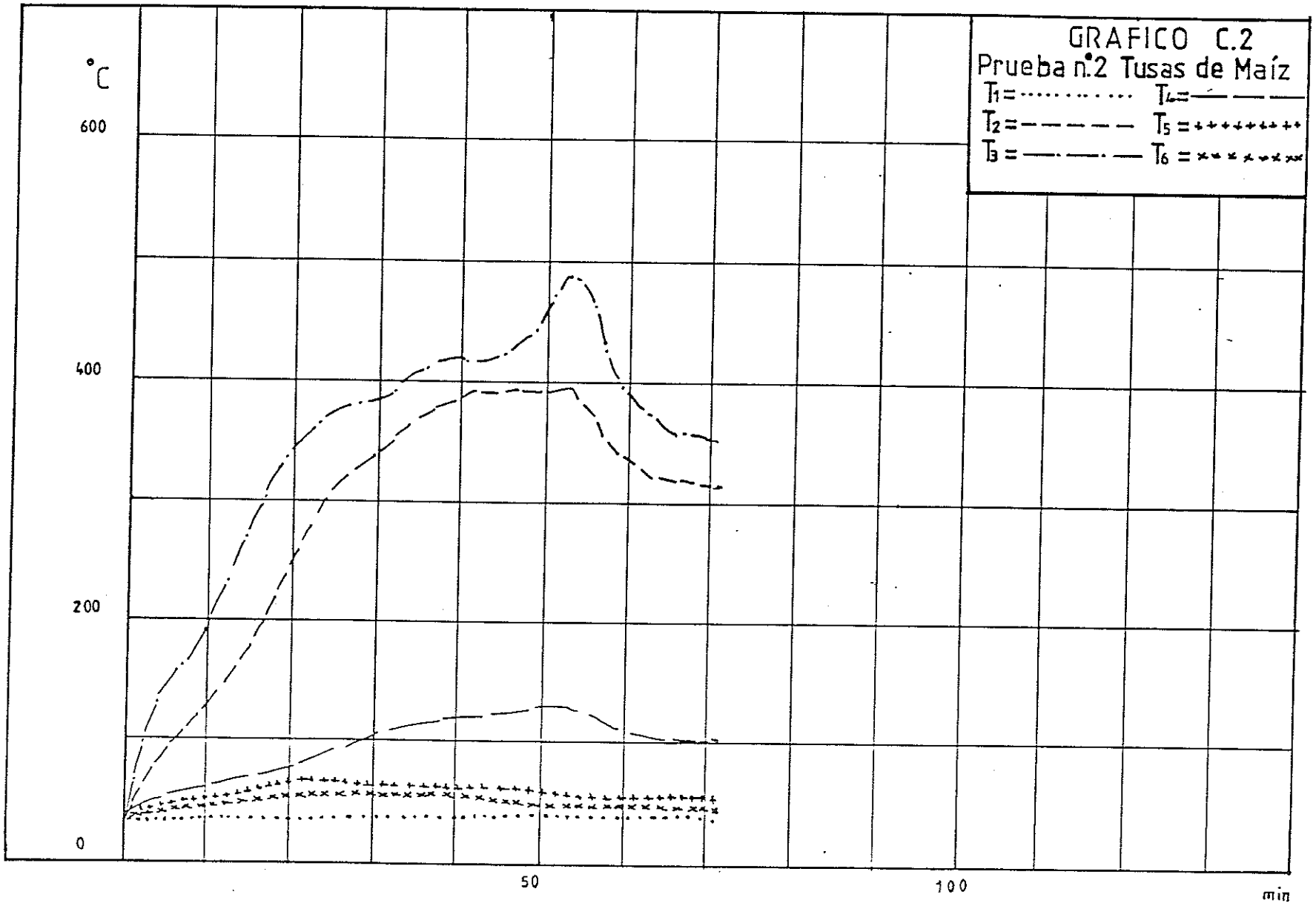


GRAFICO C.2
Prueba n.º 2 Tusas de Maíz
T1 =
T2 =
T3 =
T4 =
T5 =
T6 =
°C
600
400
200
0
50
100
min

ESPOL 1958 ESCUELA SUPERIOR
POLITECNICA DEL LITORAL
BIBLIOTECA "GONZALO ZEVALLOS"
F.I.M.C.P.

TABLA C 3

RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE GASIFICACION CON T. MAIZ

Tiempo (min)	Aire m/hr	Poder Calor MJ/Nm	Φ	CO_2	CO	O_2	N_2	H_2	H_2O
PRUEBA # 1									
32	18,9	2,49	0,58	14,0	7,3	3,2	54,5	14,6	5,8
52	21,5	2,39	0,61	12,8	9,0	3,2	55,6	11,7	8,3
82	19,7	2,76	0,56	10,0	12,0	3,2	53,9	11,6	9,3
102	17,4	1,94	0,71	10,0	9,2	4,0	58,8	7,3	10
PRUEBA # 2									
27	32,2	2,50	0,40	11,2	15,2	2,6	37,6	27,0	5,0
42	32,2	2,40	0,50	8,8	10,2	3,0	46,0	25,7	6,2

APENDICE D

CALCULO PARA LA DENSIDAD Y EL PODER CALORIFICO DEL GAS

Para realizar el cálculo del poder calorífico y la densidad del gas pobre, se recurre a métodos conocidos que se encuentran en la (Referencia 6), conociendo los porcentajes de los componentes del gas, datos de las pruebas experimentales de CO_2, O_2, y CO. A continuacion se realizan los cálculos para determinar los porcentajes de H_2, N_2, H_2O, esta forma de calculos son aplicables para el gas que se obtiene de combustibles lignocelulósicos madera, carbón vegetal y tusas de maíz.

COMPOSICION DEL GAS OBTENIDO DE MADERA

% CO_2 = 13,5

% O_2 = 2,9

% CO = 9,4

Composición de la madera tomado de la (Referencia 6)

% C = 42,9

% H = 6,9

% O = 49,2

Fórmula quimica para este tipo de madera en base al dato

ESPOL 1958 ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL BIBLIOTECA "GONZALO ZEVALLOS" F.I.M.C.P.

anterior.

5.18 5.18

$CH_{1.93}\ O_{0.87} \Longrightarrow C_{5.18}\ H_{10}\ O_{4.5}$

Ecuación de la combustión

$C_{5.18}\ H_{10}\ O_{4.5} + a(O_2 + 3.76N_2)$

$\Longrightarrow\ dH_2 + eO_2 + fH_2O + 3.76 * aN_2$

Ecuaciones de concentración molar de los gasas CO_2, O_2 y CO, NT = Numero' total de moles.

$$(CO_2) = \frac{b}{NT} = 0,135$$

$$(O_2) = \frac{e}{NT} = 0,029$$

$$(CO) = \frac{c}{NT} = 0,094$$

Cálculo aritmético.

$$\frac{b}{c} = \frac{0,135}{0,094} \qquad b+c = 5.18 \Longrightarrow b = 3,06 \quad c = 2,12$$

$$\frac{c}{NT} = 0,094 \Longrightarrow NT = 22,55$$

$$\frac{e}{NT} = 0{,}029 \quad \Longrightarrow \quad e = 0{,}65$$

De la ecuación de la combustión tenemos:

$$2d + 2f = 10 \quad \Longrightarrow \quad d + f = 5$$

$$NT = b + c + e + (d + f) + 3{,}76 * a \quad \Longrightarrow \quad a = 3{,}11$$

$$4{,}5 + 2a = 2b + c + 2e + f \quad \Longrightarrow \quad f = 1{,}19$$

$$d = 5 - f \quad \Longrightarrow \quad d = 3{,}99$$

Ecuaciones de concentración molar H_2, N_2, H_2O.

$$(H_2) = \frac{d}{NT} = \frac{3{,}99}{22{,}55} \quad \Longrightarrow \quad H_2 = 0{,}176$$

$$(N_2) = \frac{3{,}76 * a}{NT} = \frac{3{,}76*3{,}11}{22{,}55} \quad \Longrightarrow \quad N_2 = 0{,}516$$

$$(H_2O) = \frac{f}{NT} = \frac{1{,}19}{22{,}55} \quad \Longrightarrow \quad H_2O = 0{,}050$$

Las concentraciones en volumen de los gases de salida son:

% CO_2 = 13,5

% O_2 = 2,9

% CO = 9,4

% H_2 = 17,6

% N_2 = 51,6

% H_2O = 5,0

100,0

Concentración de gas (%)	Densidad (Kg/m^3)
CO_2 = 13,5	0,135 * 1,977 = 0,266
O_2 = 2,9	0,029 * 1,429 = 0,041
CO = 9,4	0,094 * 1,250 = 0,117
H_2 = 17,60	0,176 * 0,090 = 0,015
N_2 = 51,60	0,516 * 1,251 = 0,648
	Total = 1,087

Poder Calorifico (MJ/~~Nm^3~~) Kg.

CO = 9,4	0,094 * 12,644 = 1,188
H_2= 17,60	0,176 * 10,760 = 1,893
	Total = 3,081

Para hallar el poder colorífico y la densidad del gas obtenido del carbón vegetal y tusas de maíz se toman los siguientes datos.

COMPOSICION DEL GAS OBTENIDO DE CARBON VEGETAL

% CO_2 = 7.0

% O_2 = 4.0

% CO = 14.0

Composición del carbón vegetal tomado de la (Referencia 9)

% C = 89

% H = 3

% O = 8

COMPOSICION DEL GAS OBTENIDO DE TUSAS DE MAIZ

% CO_2 = 14.0

% O_2 = 3.2

% CO = 7.3

Composición de tusas de maíz tomado de la (Referencia 10)

% C = 48.4

% H = 6.1

% O = 44.9

Los resultados de estos cálculos se encuentran en los Apéndices A - B - C.

APENDICE E

PRUEBA DEMOSTRATIVA DE UNA TRILLADORA DE ARROZ CON FLUJO AXIAL UTILIZANDO COMO COMBUSTIBLE GAS POBRE

Esta prueba tiene mucha importancia en la aplicación directa del gas pobre en un motor monocilíndrico que opera una trilladora de arroz, se está confirmando que sirve para el desarrollo de la agricultura en nuetro país. Además se dispone de grandes cantidades de desechos agrícolas de los cuales se puede obtener el gas combustible como ya se demostró en este trabajo. Para realizar esta prueba se efectuó un pequeño cambio del tubo de admisión del motor por un mezclador que sirve en la operación del motor usando gasolina o gas pobre.

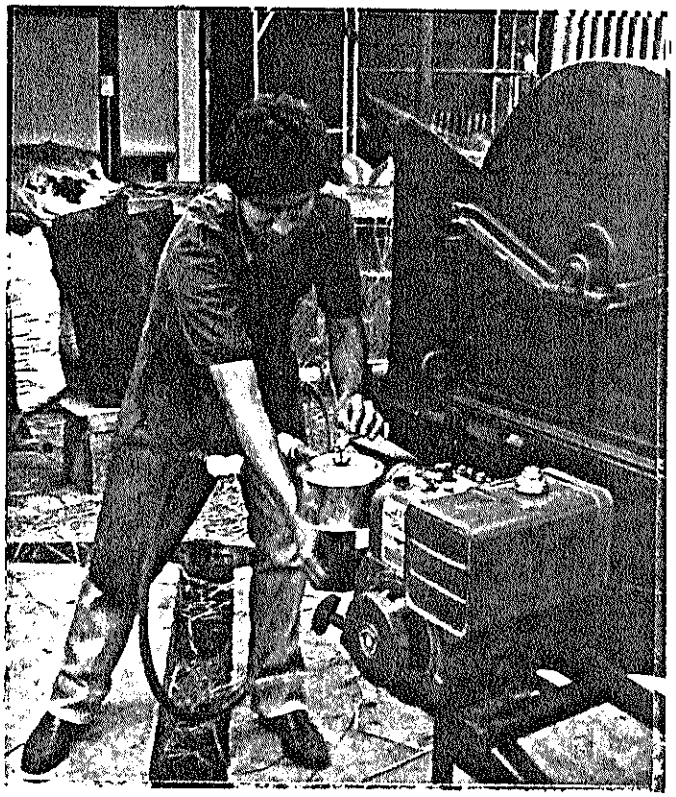
El funcionamiento se lo realizó de la siguiente manera, primeramente se obtiene el gas combustible en la planta de gasificación por un tiempo de 10 minutos, se hace el calentamiento del motor con gasolina por un tiempo de 5 minutos terminada esta operación se cierra el paso de la gasolina y a continuación se suministra gas de manera muy lenta hasta tener el funcionamiento del motor de manera regular.

A medida que el tiempo transcurría se observó que el funcionamiento de la trilladora no era regular esto se

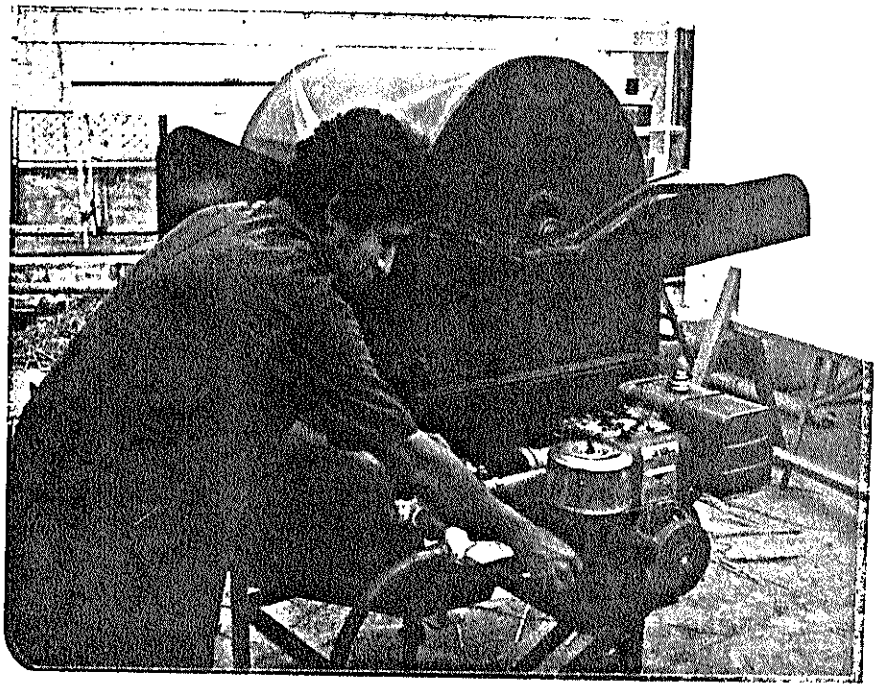
ESPOL
1958
ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL
BIBLIOTECA "GONZALO ZEVALLOS"
G.I.C.P.

debía a que la composición del gas no era estable y además a la dificultad de la regulación de la mezcla aire/gas. Para seguir observando el funcionamiento del sistema gasificador - trilladora no se le aplicó carga por el lapso de 15 minutos, tiempo en el que se notó que el sistema funcionaba de manera estable. Luego se alimentó carga lentamente de esta forma la trilladora funcionó normalmente, al variar la alimentación se producía atascamiento en las paletas que expulsan la paja, asi se trabajó por el tiempo de 20 minutos.

De todo esto se puede decir que el funcionamiento de la trilladora fue aceptable utilizando gas pobre como combustible. Se recomienda que estas pruebas continuen en lo posterior y sean un poco rigurosas para tomar datos y hacer comparaciones más objetivas al respecto.

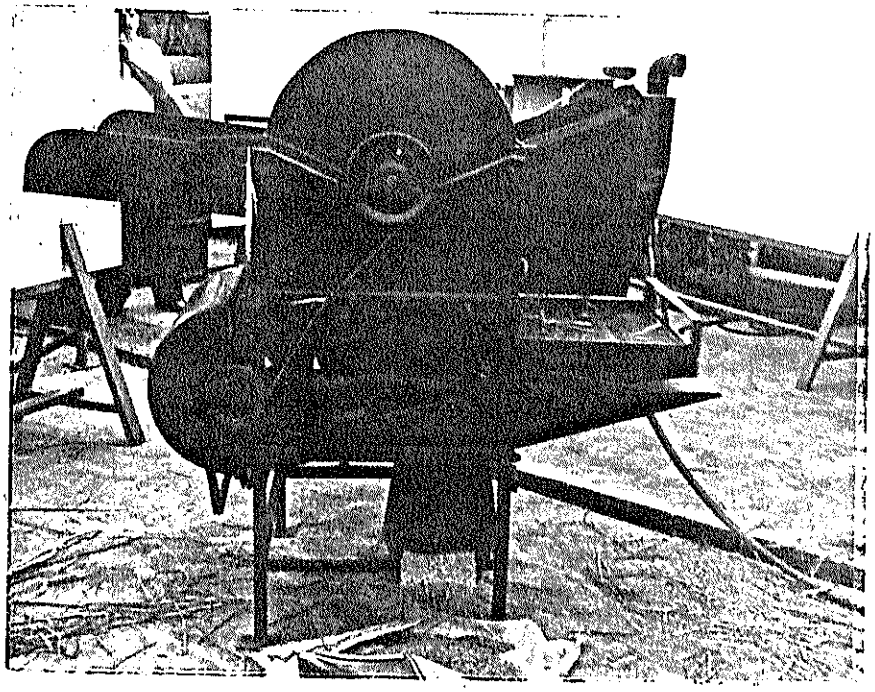


Encendido del motor con gas pobre



Funcionamiento de la trilladora sin carga

Alimentación de la trilladora



Obtencion de arroz trillado

ESPOL
POLITECNICA DEL LITORAL
BIBLIOTECA "GONZALO ZEVALLOS"
F.I.M.C.P.

APENDICE F

PRUEBA DEMOSTRATIVA DE GASIFICACION CON UNA MEZCLA AL 50% DE CASCARA DE COCO Y MADERA.

Con esta prueba de gasificación se demostró que es posible la obtención de gas combustible haciendo una mezcla en este caso con cáscara de coco y madera. El combustible que se utilizó no fue homogéneo, es decir que los trozos de cáscara de coco fueron de mayor dimensión que la madera por lo que no hubo un desplazamiento con facilidad en la carbonera del gasificador. Además los trozos de cáscara de coco tienden a carbonizarse con mayor rapidez pero no se convierten en cenizas como sucede con la madera, quedando los trozos enteros de cáscara de coco enteros, obstaculiza el desplazamiento del nuevo combustible y por lo tanto descontinúa la producción de gas.

La prueba tuvo una duración de 90 minutos de los cuales la producción de gas fue de 6 minutos, las varaciones del caudal de aire fueron muchas ya que no se podía precisar en que caudal era el gas de mejor calidad. De las observaciones hechas se notó lo siguiente.

La cáscara de coco es un combustible que desprende con facilidad los volátiles del mismo y tiene la particularidad de que no se convierte en cenizas. Por esta

razón se recomienda que se realicen pruebas en lo posterior pero con cáscara de coco solamente y con trozos pequeños para observar con detenimiento el comportamiento de este combustible. Y además proseguir con las mezclas variando las dimensiones de los trozos de los dos combustibles en mención.

TABLA F 1

PRUEBA DE GASIFICACION # 12

TIPO DE COMB: MADERA C-COCO	% DE HUMEDAD: PROMEDIO 12
PESO TOTAL: 14 Kg	PESO FINAL: 4,4 Kg
PESO DE CENIZAS: 0,35 Kg	PESO DE CONDENSADO: 1,0 Kg
TEMP.AMBIENTE: 25 °C	PRESION ATM: 762,4 mm Hg

PESO DE CARBON EN EL PLATO GARGANTA: 0,83 Kg

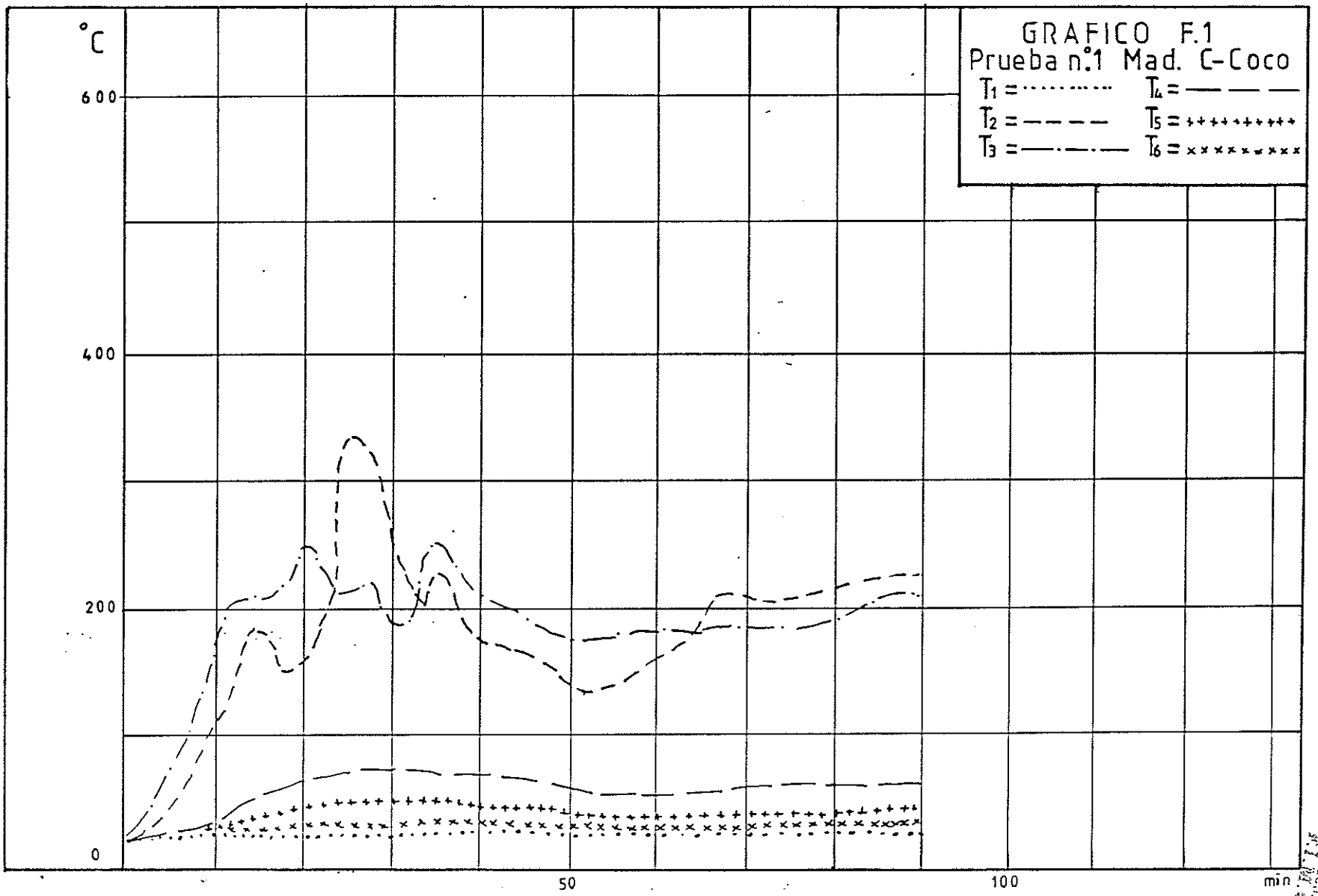
PESO DE CARBON EN LA PARRILLA: 0,52 Kg

Tiempo min	Aire m /hr	%CO_2	%O_2	%CO	OBSERVACIONES
0	19,69				Encendido
5					Inicio de carga
9					Final de prueba
12	19,69				Llama estable 1 min
20	19,69				
30	21,48				Cambio de flujo
64	10,74				Llama estable 3 min
86	7,76				Cambio de flujo
88	7,76				Llama estable 2 min
90					Final de prueba (por no produción de gas)

Comsumo de Combustible: 6,26 Kg/hr

Tiempo de Operación: 90 min

Tiempo de producción de gas: 6 min



BIBLIOTECA POLITÉCNICA

APENDICE G

ANALISIS DE COSTO DE UNA PLANTA DE GASIFICACION (20 kw)

En este análisis se toman en cuena todo los materiales utilizados en la construcción de la plata de gasificación y su adaptación al motor. Los elementos que forman el análisis son: gasificador, ciclón, filtro de manga, intercambiador, filtro de aceite, adaptación del motor, mano de obra. Los costos corresponden al año 1987.

ANALISIS DE COSTO DE UNA PLANTA DE GASIFICACION DE (20 KW)

MATERIALES

CANT.	D E S C R I P C I O N	COSTO UNIT.	COSTO TOTAL
	Gasificador y ciclón		
1	Plancha negra de 2,44 m * 1,22 m * 3,17 mm.	14.240,00	14.240,00
1	Plancha negra de 2,44 m * 1,22 m * 4,76 mm.	19.000,00	19.000,00
1/2	Plancha negra de 2,44 m * 1,22 m * 10 mm.	48.000,00	48.000,00
1	Plancha negra perforada de 2,44 m * 1,22 m * 1 mm.	11.070,00	11.070,00
1/4	Plancha negra corrugada de 2,44 m * 1,22 m * 4 mm.	18.750,00	4.687,50
20 Kg	Soldadura E-6011.	750,00	15.000,00
1	Torta de Ø 0,3 m * 12 mm.	3.200,00	3.200,00
3	Codos a 90° de Ø 50 mm.	1.140,00	3.420,00
1	Codo a 90° de Ø 76 mm.	3.420,00	3.420,00

CANT.	D E S C R I P C I O N	COSTO UNIT.	COSTO TOTAL
1	Unión Universal de Ø 50 mm.	2.600,00	2.600,00
1	Reductor de Ø 76 mm a Ø 50 mm.	2.280,00	2.280,00
1 Kg	Pernos de Ø 13 mm * 50 mm.	992,00	992,00
1 Kg	Acero de transmisión circular de Ø 16 mm.	850,00	722,00
2 Kg	Acero de transmisión exagonal de 25 mm.	1.026,00	2.052,00
1/2	Plancha negra de 0,8 mm.	6.400,00	3.200,00
1/3 m	Tubo de Ø 152 mm.	4.800,00	1.600,00
1	Tubería de Ø 50 mm (6 m)	6.750,00	6.750,00
4 m	Tubo de Ø 19 mm.	1.800,00	7.200,00
1	Platina de Ø 12 mm.(6 m)	2.880,00	2.880,00
10 Kg	Yeso	150,00	1.500,00
10 Kg	Cemento	20,00	200,00
15	Ladrillos refractarios	1.700,00	25.500,00
2	Varillas de Ø 6,35 mm	800,00	1.600,00
1	Ventilador de 1/4 HP	30.815,00	30.815,00
1	Litro de laca azul	1.710,00	1.710,00
1	Litro de esmalte negro	1.245,00	1.245,00
1	Galón pintura anticorrosiva	4.416,00	4.416,00

COSTO GASIFICADOR -CICLON... S/. 194.510,00

ESPOL 1959 ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL
BIBLIOTECA "GONZALO ZEVALLOS"
F.I.M.C.P.

CANT.	D E S C R I P C I O N	COSTO UNIT.	COSTO TOTAL
	Filtro de Aciete		
1	Tanque de plástico transparente de 40 litros	760,00	760,00
1 m	Tubo de PVC de Ø 40 mm	580,00	580,00
1	Codo de 90° de Ø 40 mm PVC	600,00	600,00
1	Neploflex de Ø 19,05 mmm	200,00	200,00
1	Codo de 90° de Ø 19,05 mm	300,00	300,00
1	Adaptador de Ø 19,05 mm	200,00	200,00
1	Neploflex de Ø 12,7 mm	150,00	150,00
1	Adaptador de Ø 12,7 a 6,35 mm	250,00	250,00
20 cm	Manguera transparente Ø 6,35 mm	200,00	200,00
1	Válvula de bronce de Ø 6,35 mm	600,00	600,00
1,5 m	Manguera plástica de Ø 38,1 mm	600,00	600,00
2	Abrazaderas de Ø 38,1 mm.	110,00	110,00
2	Galones de aceite SAE-40	950,00	1.900,00
	ADAPTACION MOTOR GASIFICADOR		
1	Neplo de Ø 19,05 * 150 mm	200,00	200,00
1	T galvanizada de Ø 19,05 mm	350,00	350,00
2	Neploflex de Ø 19,05 * 100 mm	300,00	600,00
1	Unión plástica de Ø 19,05 mm	400,00	400,00
1	Válvula de globo de Ø 19,05 mm	2.700,00	2.700,00
2	Adaptadores de Ø 19,05 mm	300,00	600,00
2	Abrazaderas de Ø 19,05 mm	90,00	180,00

CANT.	D E S C R I P C I O N	COSTO UNIT.	COSTO TOTAL
10 m	Manguera plástica de Ø 19,05 mm	520,00	5.250,00
1	Bushing de Ø 50,8 a 38,1 mm.	600,00	600,00
3	Unines de Ø 50,8 mm	615,00	1.845,00
2	T de Ø 50,8 mm	2.000,00	4.000,00
4	Uniones Universal Ø 50,8 mm	2.600,00	10.000,00
8	Codos a 90° de Ø 50,8 mm	1.400,00	11.200,00
3	Válvulas de compuerta Ø 50,8 mm	6.000,00	18.000,00
2	Tubería de Ø 50,8 mm (6 m)	6.750,00	13.500,00

COSTO DE FILTRO DE ACIETE -ADAPTACION AL MOTOR.. S/: 76.685,00

CANT.	D E S C R I P C I O N	COSTO UNIT.	COSTO TOTAL
	FILTRO DE MANGA		
2/3	Plancha negra de 2,44 * 1,22 m * 2 mm	10.500,00	7.000,00
1	Unión galvanizada de Ø 50,8 mm	615,00	615,00
24	Pernos de Ø 6,35 mm * 35 mm	50,00	1.200,00
2	Platinas de 19,05 mm * 3,17 mm	600,00	1.200,00
1	Varilla lisa de Ø 6,35 mm	800,00	800,00
10 m	Liencillo	225,00	2.250,00
	INTERCAMBIADOR		
2/3	Plancha negra de 2,44 mm * 1,22 m * 2 mm	10.500,00	7.000,00
1	Angulo de 25,4 * 25,4 * 3,17 mm	2.000,00	2.000,00
15	Tubos galvanizados de Ø 50,8 mm	2.500,00	37.500,00
2	Unión galvanizada de Ø 50,8 mm	600,00	1.200,00
1	Válvula de compuerta de 12,7 mm	1.400,00	1.400,00
1	Unión de Ø 12,7 mm	180,00	180,00
1	Codo de Ø 12,7 mm.	225,00	225,00
3	Neplos de Ø 12,7 * 25,4 mm	110,00	330,00
10 Kg	Soldadura E-6011	750,00	7.500,00
	COSTO DE FILTRO DE MANGAS-INTERCAMBIADOR.	S/.	70.400,00

ESPOL 1958 ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL BIBLIOTECA "GONZALO ZEVALLOS" F.I.M.C.P.

M A N O D E O B R A

GASIFICADOR - CICLON

TIPOS DE TRABAJOS	TIEMPO EMPLEADO HARAS	COSTO POR HORA	COSTO TOTAL
Corte	17,00	650,00	11.050,00
Rolado	11,00	1.000,00	11.000,00
Soldado	20,00	1.500,00	30.000,00
Maquinado	18,00	1.350,00	24.300,00
Ensamblado	34,00	500,00	17.000,00
Pintado	4,00	500,00	2,000,00
TOTAL:	104,00		S/. 95.350.00

INTERCAMBIADOR - FILTRO

TIPO DE TRABAJO	TIEMPO EMPLEADO HORAS	COSTO POR HORA	COSTO TOTAL
Trazado y corte	16,00	650,00	10.400,00
Preparación de material (esmerilado,perforado, roscado, etc.)	8,00	750,00	6.000,00
Soldado	24,00	1.500,00	36.000,00
Pintado	2,00	500,00	1.000,00
TOTAL:	50,00		S/. 53.400,00

ESPOL
1958
ESCUELA SUPERIOR
POLITECNICA DEL LITORAL
BIBLIOTECA "GONZALO ZEVALLOS"
G.L.M.C.B.

COSTO TOTAL

CONCEPTO	COSTO
Materiales	S/. 341.595,00
Costo de mano de obra	S/. 148.750,00
Mezclador y accesorios	S/. 34.000,00
TOTAL	S/. 524.345,00

APENDICE H

ANALISIS ECONOMICO DE UN SISTEMA DE FUERZA MOTRIZ (20 KW)

Para realizar el análisis económico se hacen las siguientes consideraciones referente al funcionamiento anual y vida útil del sistema.

Se supone que el sistema funcionará a plena potencia de salida durante 2.000 horas y que será reemplazado después de 5 años de operación. Lo anterior equivale a 8 horas de funcionamiento en días laborables, y una vida útil de 10.000 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 algunas aplicaciones. Como en nuestro país no existe todavía esa experiencia se consultó la (Referencia 6).

El costo total de la planta de gasificación se lo hace en el Apéndice anterior siendo este de S/. 524.345 sucres.

1. Costos de Capital Anual, se denomina anualidad (A), al costo inicial del equipo, es decir la inversión (I), determinada unualmente para un período de (t) años (vida útil del sistema) con una tasa de interés anual (K),

calculado por la siguente relación.

ESPOL
POLITECNICA DEL LITORAL
BIBLIOTECA "GONZALO ZEVALLOS"
F.I.M.C.P.

$$A = I * \frac{K}{1 - (1 + K)^{-t}}$$

2. El valor en el mercado del diesel en el año 1987 fue de 15 sucres por litro. En el caso de los residuos de madera se averiguó en los aserraderos que su costo es de S/. 1.500 el metro cúbico. Tomando una densidad de la madera promedio de 500 Kg/m³ nos da un valor de S/. 3.00/Kg, equivalente a S/. 3.000/Tonelada. No se incluye aquí el costo de proceso de corte y secado de los residuos de madera.

Combustible = Costo del diesel * Consumo de diesel * Potencia * Horas/año.

3. Mantenimiento, se considera un costo de mantenimiento anual del 15% del costo del capital del sistema diesel convencional y del 10% del costo del capital del sistema gasificador motor.

4. Lubricación, se adoptó un costo de lubricación anual del 15% del costo total del consumo de combustible (diesel) para el sistema convencional. Para el sistema alternativo se considera el 10% del costo total de combustible.

5. Mano de Obra para el caso del sistema gasificador motor, se debe considerar el costo de la mano de obra extra que se necesita en la operación del gasificador. El valor que corresponde a un trabajo a medio tiempo.

6. Herramientas para acondicionar el combustible para gasificar.

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

PARAMETROS	VALORES REFERNCIALES
Potencia Mecánica	20 KW
Período de funcionamiento anual del sistema	2.000 hr
Vida útil del sistema	5 años
Inflación del petróleo	0 %
Tasa de interés	25 %

ESPOL 1958 ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL BIBLIOTECA "GONZALO ZEVALLOS" K.L.M.C.P.

SISTEMA CONVENCIONAL (DIESEL)

Costo de motor generador diesel 20/1.500 (KW/RPM)	2'750.000,00 sucres
Costo anual de Mantenimiento	5 % costo del capital
Costo de lubricante	5 % costo del diesel
Costo de diesel	S/. 15,00 litro
Consumo de diesel	0,4 litro/Kw-Hr

SISTEMA ALTERNATIVO (GAS POBRE - DIESEL)

Costo del termogasificador	26.000,00 sucres/Kw
Costo anual de mantenimiento	10 % costo del capital
Costo de lubricante	10 % costo del diesel
Costo de madera	S/. 3.000,00/Tonelada
Consumo de madera	1,3 Kg/Kw-Hr
Sustitución del diesel	80 %
Consumo de diesel	0,08 litro/Kw-Hr

ANALISIS ECONOMICO DE UN SISTEMA DE FUERZA MOTRIZ (20 KW)

CONCEPTO		SISTEMA DIESEL	SISTEMA GAS POBRE/DIESEL
1. Costo del capital anual del equipo	MOTOR	1'022.578,5	1'022.578,5
	GASIFICADOR	----------	171.775,2
2. Combustible	DIESEL	240.000,0	48.000,0
	MADERA	----------	156.300,0
3. Mantenimiento		137.500,0	227.371,0
4. Lubricante		12.000,0	21.000,0
5. Mano de Obra Adicional		----------	87.000,0

6. Herramienta para acondi-nar combustible	----------	200.000,0
COSTO TOTAL ANUAL	1'412.078,4	2'057.000,0
COSTO TOTAL DE ENERGIA (S/.KW-Hr)	35,30	51,42

ESPOL
1958
ESCUELA SUPERIOR
POLITECNICA DEL LITORAL
BIBLIOTECA "GONZALO ZEVALLOS"
F.I.M.C.P.

ANALISIS DE COSTO DE PRODUCCION DE ENERGIA KW-Hr
DE UN SISTEMA DE FUERZA MOTRIZ DE 20 KW-Hr
CON DIFERENTES COMBUSTIBLES

	SISTEMA DIESEL		SISTEMA GAS-POBRE/DIESEL	
Año	COSTO S./ LITRO Diesel	COSTO S./ KW-Hr	COSTO S./ Kg Madera	COSTO S./ KW-Hr
1.985	10,60	15,00	1,50	21,00
1.987	15,00	35,30	3,00	51,49
1.988	27,50	60,67	6,00	86,43

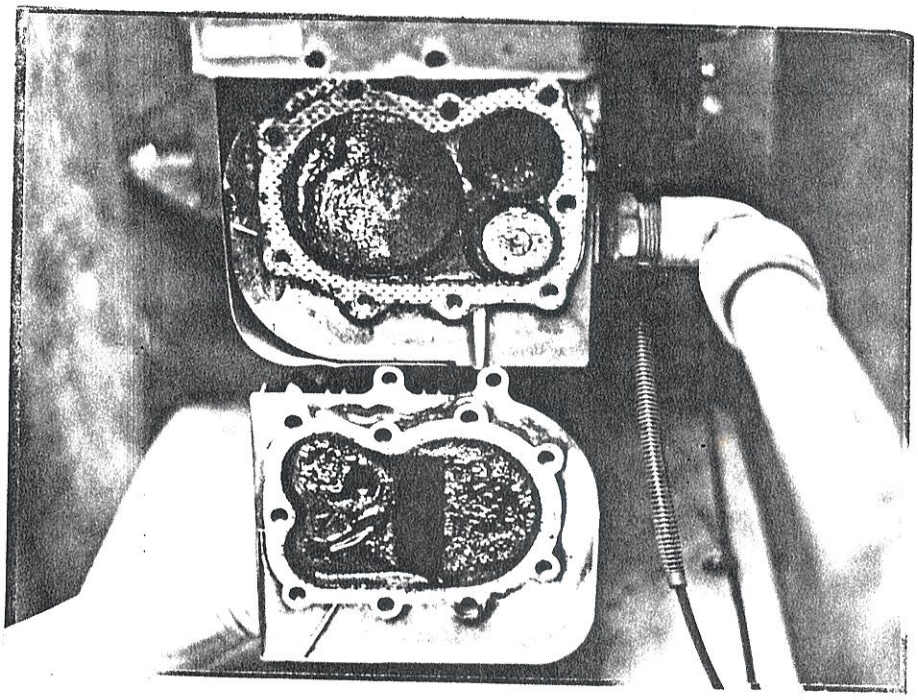
APENDICE I

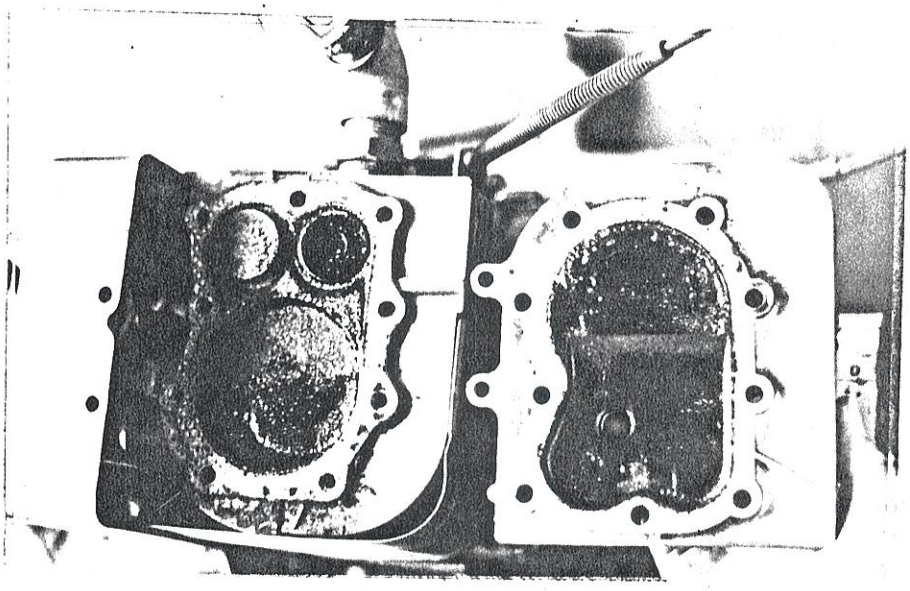
PODER CALORIFICO DE GASES COMBUSTIBLES

Gas Combustible	MJ/Nm³
Biogas	19.5 - 23.[illegible]
Metano	33.5 - 35.[illegible]
Gas Natural	37.6 - [illegible]
Propano	79.5 - 91.[illegible]
Butano	104.6 - 121.1
Gas Pobre	3.2 - 5.[illegible]

FUENTE Ref: Manual de Biogas OLADE, Guatemala 1981

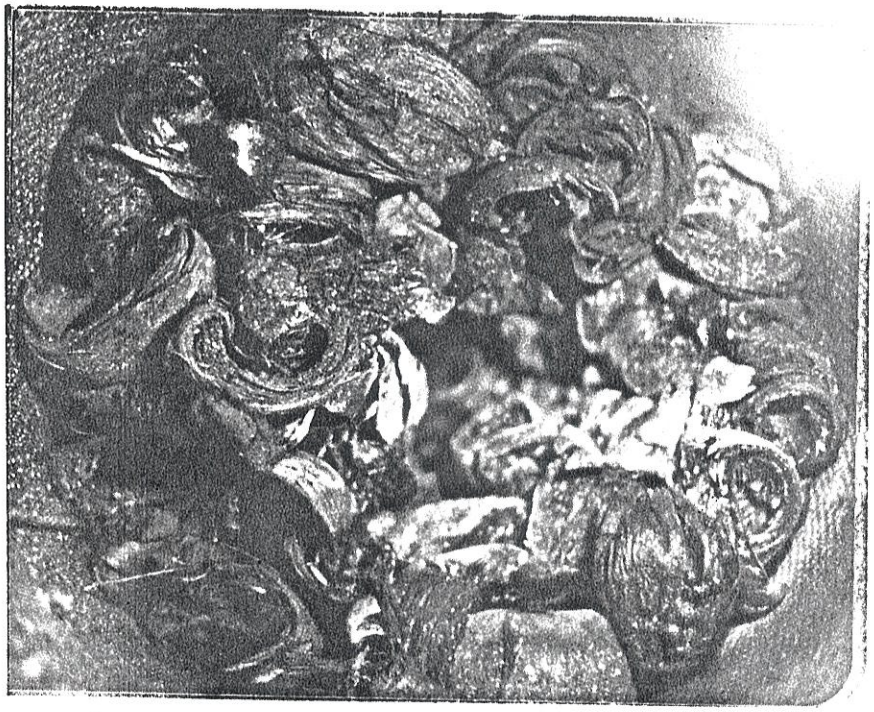
ESPOL
1958
ESCUELA SUPERIOR
POLITECNICA DEL LITORAL
BIBLIOTECA "GONZALO ZEVALLOS"
G.A.M.C.





Residuo de alquitranes en el cabezote del motor.

ESPOL
1958
ESCUELA SUPERIOR
POLITECNICA DEL LITORAL
BIBLIOTECA "GONZALO ZEVALLOS"
F.I.M.C.P.



Residuos de cascara de coco del proceso de gasificación

NOMENCLATURA

A - Amperaje

cc - centimetro cúbico

CV - Potencia del motor

d - Densidad

KJ - Kilojuole

m - metro lineal

mm - milimetro

Nm^3 - metro cubico normal

m^3 - metro cubico

MJ - Megajuole

KW - Potencia del generador

MCI - Motor de combustión interna

PMS - Punto muerto superior

t - Tiempo

seg - segundo

v - Volumen

V - Volteje

Kn - Kilo Newton

m^2 - metro cuadrado

B I B L I O G R A F I A

1. BARRIGA A, INTRODUCCION A LA TECNOLOGIA DE GAS POBRE EN APLICACIONES AGROFORESTALES DE PEQUEÑA Y MEDIANA ESCALA, SEMINARIO, ESPOL. 1984

2. BARRIGA A, ADAPTACION DE MOTORES DE COMBUSTION INTERNA AL USO DE GAS POBRE, ESPOL. 1984

3. REYES F; FUNCIONAMIENTO DE UN MOTOR DE CUATRO TIEMPOS ENCENDIDO POR CHISPA, CON GAS LICUADO DE PETROLEO. TESIS DE GRADO ESPOL, 1982

4. ZURITA M, ESTUDIO DE LOS GASOGENOS, DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN PROTOTIPO, TESIS DE GRADO, UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR, ESCUELA DE ING. QUIMICA, 1984

5. PRODUCER GAS COURSE, THE BEIJER INSTITUTE, STOCKHOLM, MARZO 1984

6. PATIÑO M, DISEÑO, CONSTRUCCION Y PRUEBAS DE UN TERMO-GASIFICADOR EXPERIMENTAL PARA RESIDUOS FORESTALES Y AGRICOLAS, TESIS DE GRADO, ESPOL, 1985

7. OLADE/GATE, MANUAL DEL PRIMER CURSO DE GASIFICACION DE MADERA EN CENTRO AMERICA Y EL CARIBE, COSTA RICA, NOVIEMBRE DE 1982

ESCUELA POLITECNICA
BIBLIOTECA

8. LARCO V, ADAPTACION DE ELECTROGENERADORES DOMESTICOS A USO DE BIOGAS, TESIS DE GRADO, ESPOL, 1982

9. REYES M, ESTUDIO APROPIADO PARA PRODUCCION DE CARBON VEGETAL CON APLICACION AL USO RACIONAL DE LENA, TESIS DE GRADO, ESPOL, 1986

10. BJORN KJELISTROM, CHARACTERISTICOS OF SOME TYPES OF AGRICULTURAL RESIDUES FOR USE AS FUEL IN DOWN DRAFT GASIFIERS, THE BEJER INSTITUTE, STOCKOLM, MAYO 1981

11. CHISTER HOGLUND, AGRICULTURAL RESIDUES AS FUEL FOR PRODUCER GAS GENERATION, THE BEIJER INSTITUTE, STOCKOLM, AGOSTO 1981

12. MOTORES DE COMBUSTION INTERNA, KATES EDGAS Y WILLIAM E. LUCK, BARCELONA, 1982

13. REPORTE FINAL DEL PROYECTO FUERZA MOTRIZ RURAL, ESPOL, 1989

14. GUIA DEL LABORATORIO DE GENERACION DE PODER, ESPOL, 1981