aad0586

TESIS
IID990
L32

UNIVERSIDAD CATOLICA ANDRES BELLO

FACULTAD DE INGENIERIA

ESCUELA DE INGENIERIA INDUSTRIAL

EVALUACION DEL USO DEL GAS NATURAL PARA MOTORES DE COMBUSTION INTERNA (Ciclo Otto).

Este Jurado; una vez realizado el examen del presente trabajo ha evaluado su contenido con el resultado: SOBRESALIENTE (Para concurso y publicación).

JURADO EXAMINADOR

Firma: Manuela Herrera L. Firma: Firma: jorge Trujillo

Nombre: MANUELA HERRERA L. Nombre: ALFONSO ROSSINI Nombre: JORGE TRUJILLO.

REALIZADO POR	Br. Angelo La Ciacera Br. Vincenzo Iannicelli
PROFESOR GUIA	Ing. Manuela Herrera
FECHA	Octubre de 1990

DEDICATORIA

A mis Padres, que con su confianza, guía y ejemplo me han enseñado a vencer los obstáculos más difíciles de una manera sencilla, a ustedes, que más quiero, el logro de esta meta.

Angelo

Este pequeño sueño que Dios hizo realidad, está dedicado a las personas que más quiero en este mundo,

a mis Padres: Valdivia, Aldo

y a mi Hermana: Giovanna

Vincenzo

AGRADECIMIENTO

Queremos agradecer,principalmente, a la Universidad Católica Andres Bello, la oportunidad ofrecida para realizar este Trabajo en sus Laboratorios.

En segundo lugar, agradecer a CORPOVEN S.A., Proyecto GNV, a cargo del Lic. Alberto Lanz, así como al Ing. Roberto Hernandez y su personal técnico, José Antonio Rodriguez y Jorge Moreno, sin dejar atrás al personal técnico de Covenal-Mariara.

Queremos expresar, al mismo tiempo, nuestro agradecimiento a la empresa Smurfit-Cartón de Venezuela, a los Srs. José Manuel Rios, Nestor Tochon y muy especialmente al Sr. Aldo Iannicelli, que gracias a su trabajo, dedicación y valiosa experiencia ayudó a resolver nuestros mayores problemas.

A nuestra tutora, Ing. Manuela Herrera por toda su colaboración; a la Ing. Raiza Reyes, quién también dedicó parte de su tiempo.

No queremos dejar de mencionar al Dr. Ing. Jozef Przybylski, profesor invitado de la Universidad del Zulia.

A todo el personal técnico de la Universidad Católica

Andres Bello, especialmente a Jorge Hernández, técnico del laboratorio de Térmica.

A la Oficina Técnica Romeo por su colaboración desinteresada.

Por último, a todos nuestros amigos y compañeros de estudio, en especial a Giovanni;, quienes de alguna u otra forma nos brindaron su apoyo moral.

INDICE

Sistema de Unidades..... 1

Nomenclatura..... 3

1. Sinopsis..... 6

2. Introducción..... 8

3. Fundamentos del Gas Natural..... 9

3.1 Composición..... 10

3.2 Origen..... 12

3.3 Clasificación..... 12

3.4 Comportamiento..... 14

3.4.1 Gas Ideal..... 14

3.4.2 Gas Real..... 15

3.4.3 Mezcla de gases..... 17

3.5 Propiedades Fisicas..... 18

3.5.1 Poder Calorífico..... 19

3.5.2 Gravedad Especifica..... 19

3.5.3 Volumen Normalizado..... 19

3.5.4 Peso Molecular..... 20

3.6 Transporte y Red de Distribución..... 20

3.7 Proyecto GNV..... 22

3.8 Ventajas y Desventajas del GNV vs Gasolina.... 23

4. Fundamentos Teóricos de la Máquina Endotermica.... 27

4.1 Introducción de Términos..... 27

4.2 Ciclo Otto..... 31

4.2.1 Ideal..... 31

4.2.2 Real..... 34

4.2.3 Diagrama Indicado Real..... 38

5. Parámetros Caracteristicos de un Motor..... 42

5.1 Potencia y rendimiento Mecánico..... 42

5.2 Presión Media Efectiva..... 43

5.3 Consumo Específico de Combustible..... 45

5.4 Consumo Específico de Aire y
Rendimiento Volumétrico..... 48

5.5 Relación Aire-Combustible..... 49

5.6 Tiempo de Encendido y Velocidad de la LLama... 55

5.7 Influencia del Ambiente..... 60

5.8 Balance Térmico del Motor..... 61

5.9 Balance Térmico del Freno..... 62

6. Modificaciones al Banco de Pruebas
y Sistemas Periféricos..... 64

6.1 Sistema de Escape..... 64

6.2 Sistema de Refrigeración..... 66

6.3 Adapatación del Mezclador..... 69

6.4 Cámara del Motor..... 69

6.5 Vapores de Aceite..... 71

7. Equipos de Conversión Dual..... 73

7.1 Sistema de Almacenamiento..... 75

7.2 Válvulas de Cierre de las Bombonas..... 78

7.3 Válvula Principal de Cierre y Llenado..... 80

7.4 Indicador de Nivel..... 81

7.5 Solenoide de Gasolina Y Gas..... 82

7.6 Selector de Combustible..... 83

7.7 Tuberias de Alta Presión
Mangueras de Baja Presión..... 84

7.8 Mezclador-Dosificador..... 86

7.9 Central Electrónica de Control..... 88

7.10 Reductor-Regulador de Presión..... 90

7.11 Instalación en el Banco..... 95

7.12 Sistema de Medición de Gas Natural.....104

8. Operación del Banco.....110

8.1 Manipulación del Cilindro
de almacenamiento de GNV.....110

8.2 Arranque del Motor con Gas.....113

8.3 Control del Funcionamiento del Motor.....115

8.3.1 Aplicación de Carga al Freno.....115

8.3.2 Aceleración del Motor.....116

8.3.3 Modificación de Chispa.....117

8.3.4 Relación Aire-gasolina.....118

8.3.5 Relación Aire-Gas Natural (Entonación)..118

8.4 Mediciones.....120

8.4.1 Tacómetro.....120

8.4.2 Potencia y Torque.....120

8.4.3 Consumo de Aire.....122

8.4.4 Consumo de Gasolina.....122

8.4.5 Consumo de Gas.....123

8.4.6 Temperaturas.....124

9. Pruebas.....125

9.1 100 y 50 % Abertura de la Mariposa del Carburador y Carga Variable.....127

9.2 Abertura de la Mariposa Variable y Carga Constante.....128

9.3 Abertura de la Mariposa y Carga Variable.....128

9.4 Avance de Chispa y Carga Variable.....129

9.5 Relación Aire-Gas y Carga Variable.....129

9.6 Balance Térmico del Freno.....130

9.7 Balance Térmico del Motor.....130

9.8 Influencia de las Condiciones Atmosféricas....131

10. Resultados.....132

11. Análisis de Resultados.....187

12. Conclusiones.....202

13. Recomendaciones.....204

14. Bibliografía.....205

15. Apéndices.....207

Apéndice A.
Características del gas natural para vehículos...207

Apéndice A1.
Características gasolina/gas natural.....209

Apéndice B.
Propiedades del gas natural según su composición.....210

Apéndice C.
Curva del caudal de agua vs rpm para el motor tipo 131 A 1.000 (FIAT).....213

Apéndice D. Tablas complementarias.....215
D1. Propiedades del agua saturada.....216
D2. Propiedades del aire.....218

D3. Propiedades de los productos de combustión 200% aire teórico.....220
D4. Tabla de resultados con gasolina.....222

Apéndice E. Constantes físicas.....226

Apéndice F. Factor de compresibilidad "z".....229

Apéndice G. Tabla del cálculo de mgn.....235

Apéndice H. Ecuaciones.....236

Apéndice I. Reductor de presión (despiece).....240

Apéndice J. Sistema eléctrico del equipo.....243

Apéndice K. Estaciones de llenado.....245

Apéndice L. Especificaciones del motor.....248

Apéndice M. Planos.....253

Cálculo de la pieza de acople del ventilador.....258

PROLOGO

La motivación de este trabajo es el auge que tiene actualmente en el país el Proyecto de Gas Natural para Vehículos (GNV), y el dar a conocer a la Comunidad Universitaria la existencia de otro tipo de combustible, así como sus ventajas y características.

En segundo lugar, enriquecer el Laboratorio de Térmica de la Universidad, dotandolo de nuevos y valiosos equipos con el fin de permitir la realización de ensayos con otro tipo de combustible.

SISTEMA DE UNIDADES

Para que el desarrollo de este trabajo sea claro y coherente en cuanto a datos, cálculos y resultados se ha escogido el Sistema Internacional de Unidades, no obstante se han utilizado algunas unidades en el sistema Ingles debido a su uso en el pais, como la presión [psi] y la energía [BTU/PC].

El SI cuenta con siete unidades básicas, pero sólo se mencionaran las utilizadas en este trabajo:

Unidades Básicas.

Magnitud física	Unidad	Simbolo
Masa	Kilogramo	Kg
Longitud	Metro	m
Tiempo	segundo	s
Temperatura	Kelvin	°K

Unidades derivadas.

Magnitud física	Unidad	Simbolo
Fuerza	Newton	N
Presión	bar	bar
Energía	joule	J
Potencia	watt	W

NOMENCLATURA

A continuación se definen todos los simbolos utilizados en este Trabajo.

C = carrera

D = diámetro

E = energía

E_L = poder calorífico

F = relación aire-combustible

L = límite de inflamabilidad

N = potencia experimental

P = presión

PMI = punto muerto inferior

PMS = punto muerto superior

Q = calor

S = entropía

T_R = temperatura reducida

T_c = temperatura crítica

U = energía interna

V = volumen

V' = cilindrada

W = trabajo

W_e = trabajo efectivo

bcea = consumo de aire al freno

bcec = consumo de combustible al freno

bhp = potencia al freno

cea = consumo específico de aire

cec = consumo específico de combustible

cp = calor específico a presión constante

cv = calor específico a volumen constante

dA = densidad del agua

da = densidad del aire

fhp = potencia de fricción

h = entalpía

h = número de tiempos del motor

hp = caballos de fuerza o potencia

icea = consumo de aire indicado

icec = consumo de combustible indicado

ihp = potencia indicada

k = relación de calores específicos

m_A = consumo de agua

mG = consumo de gasolina por unidad de tiempo

mGN = consumo de gas natural por unidad de tiempo

m_a = consumo de aire por unidad de tiempo

mao = consumo de aire teórico

m_f = consumo de combustible por unidad de tiempo

m_f = consumo de combustible

n = número de revoluciones

n_T = rendimiento total

n_i = eficiencia indicada

n_m = eficiencia mecanica

n_t = eficiencia termica

n_v = rendimiento volumetrico

pme = presión media efectiva

pmeb = presión media efectiva al freno

pmei = presión media indicada

q_a = caudal de aire teórico

q_{at} = caudal de aire teórico

q_{gt} = caudal de gas teorico

rac = relación aire combustible

r_c = relacion de compresión

v = volumen específico

z = factor de compresibilidad

λ = razón de equivalencia

1. SINOPSIS

Para evaluar el uso del gas natural en motores de combustión interna se fijaron tres puntos:

- Acondicionamiento del Banco de Pruebas.
- Diseño de la instalación de los equipos.
- Evaluación del gas natural.

El informe consta de 13 capítulos, de los cuales el tercero y el cuarto constan de los fundamentos teóricos del gas natural y de las máquinas endotérmicas respectivamente, en el capítulo 5 se profundizan los parámetros característicos de un motor.

El capítulo 6 esta directamente relacionado con el primer objetivo, después del cual sigue el capítulo dedicado a los equipos de conversión dual, en donde se incluye un punto como lo es la instalación en el Banco.

A continuación sigue un capítulo dedicado a la operación del banco una vez instalados los equipos de conversión.

Para evaluar el gas como combustible en motores de ciclo Otto estan dedicados los capitulos 9, 10 y 11 donde se presentan las pruebas, los resultados y su respectivo análisis.

Las conclusiones y recomendaciones se presentan en los capitulos 12 y 13 respectivamente.

Los apéndice, ubicados en el capitulo 15 complementan el trabajo con valiosa información.

2. INTRODUCCION

El presente Trabajo Especial no hubiese sido posible sin la obtención de los equipos de conversión de gas natural para vehiculos. Estos valiosos equipos fueron donados por CORPOVEN S.A., que consta de un kit completo para la conversión a gas de un vehiculo, y corresponden a la firma Italiana "Landi Renzo".

El Banco de Prueba, donde estan instalados dichos equipos, consta de un motor FIAT 131 A1.000 y de un freno dinamométrico hidráulico tamaño U-16 de la marca SCHENCK.

3. FUNDAMENTOS DEL GAS NATURAL

El gas natural, en los últimos años, ha pasado a ocupar una posición relevante en el escenario energético de nuestro pais. Desde el inicio de la explotación petrolera hizo su aparición como componente asociado constituyendo un inconveniente operacional que obligaba a inversiones cuantiosas que no reportaban beneficios tangibles a la industria. No era otra cosa que un socio molesto y hasta riesgoso que se trató de neutralizar en las llamas culpables de los mechurrios.

Por largos años esas llamas consumieron recursos irrecuperables pero, poco a poco se fue comprendiendo la importancia del gas natural como fuente de energia.

Actualmente se producen, a escala mundial, 2 billones de metros cúbicos anuales de gas natural, de los cuales Venezuela produce 38 mil millones. Si consideramos que Venezuela posee recursos gasiferos del orden de los 6 billones de metros cúbicos, de los cuales 2,8 billones son reservas identificadas, podemos comprender nuestro potencial energético y las posibilidades excepcionales que ofrece a nuestro desarrollo económico.

3.1 COMPOSICION

El gas natural es una mezcla de hidrocarburos parafínicos, también denominados alcanos por la Química Orgánica, que incluye el metano (CH_4) en mayor proporción y otros hidrocarburos en proporciones menores y decrecientes. Una muestra de gas natural ordinario, esta formado por los siguientes componentes:

METANO	CH_4
ETANO	C_2H_6
PROPANO	C_3H_8
N-BUTANO	C_4H_{10}
I-BUTANO	C_4H_{10}
N-PENTANO	C_5H_{12}
I-PENTANO	C_5H_{12}
HEXANOS	C_6H_{14}
HEPTANOS-PLUS	C_7^+

no siendo este último un componente sencillo, sino una denominación para describir todo ese remanente de componentes más pesados de los hexanos, que debido a las infimas concentraciones que presentan, resulta impráctico desde el punto de vista de laboratorio, su identificación.

Los componentes orgánicos nombrados se presentan bajo concentraciones variables, pero siguiendo normalmente un orden de magnitud descendiente. Asi, el metano constituye del 70 al 90% de la mezcla, el etano del 3 al 10%, el propano del 1,5 al 6%, los butanos del 0,5 al 2% y los

restantes componentes concentraciones aún inferiores. Físicamente estos componentes se caracterizan por ser incoloros e insípidos, los cinco primeros de la serie nombrada (metano-butanos) son gases a presión y temperatura ambiente; los restantes, pentanos y más pesados, son líquidos más ligeros que el agua e insolubles en ella, pero si lo son en otros componentes orgánicos (alcohol,éter,benceno,etc). Todos ellos son excelentes combustibles, reaccionando con el oxigeno del aire para generar abundante calor y producir dióxido de carbono y agua.

El segundo grupo de componentes que forman el gas natural lo constituyen los componentes inorgánicos, estos aportan normalmente menos del 10% en volumen en una muestra de gas y están representados normalmente por el dióxido de carbono (CO_2) y el sulfuro de hidrógeno (H_2S), algunas veces por el nitrógeno (N_2) y excepcionalmente por el helio (He_2).

El dióxido de carbono es el más común y el que normalmente se presenta en mayor concentración (1 al 12%).

El sulfuro de hidrógeno es químicamente más activo que el dióxido de carbono.

El nitrógeno se encuentra presente en relativas altas concentraciones, y tiene el efecto de reducir el poder calorífico del gas.

3.2 ORIGEN

Hasta el presente se presume que el petróleo y el gas se han formado como resultado de variaciones sufridas por la materia orgánica proveniente de animales y vegetales, debido a la acción bacteriológica y a las elevadas temperaturas y presiones producidas durante millones de años, por efecto del asentamiento de las capas de sedimentos que la contienen.

El gas natural se presenta asociado al petróleo en yacimientos subterraneos contenido en los espacios porosos de ciertas rocas. Por ésta razón el gas natural, el carbón y el petróleo se presume que tienen un mismo origen.

3.3 CLASIFICACION

Antes de clasificar el gas natural comenzemos por enumerar los distintos tipos de yacimientos donde se ubican:

a) Yacimientos de gas asociado, donde el producto principal es el petróleo.

b) Yacimientos de gas seco o libre, donde el producto principal es el gas mismo.

c) Yacimientos de condensado donde el gas se encuentra mezclado con hidrocarburos liquidos. A este tipo de gas se le denomina gas húmedo.

En la figura 3.3.1 se presenta en forma esquemática el flujo del gas natural desde el yacimiento hasta el consumidor final.

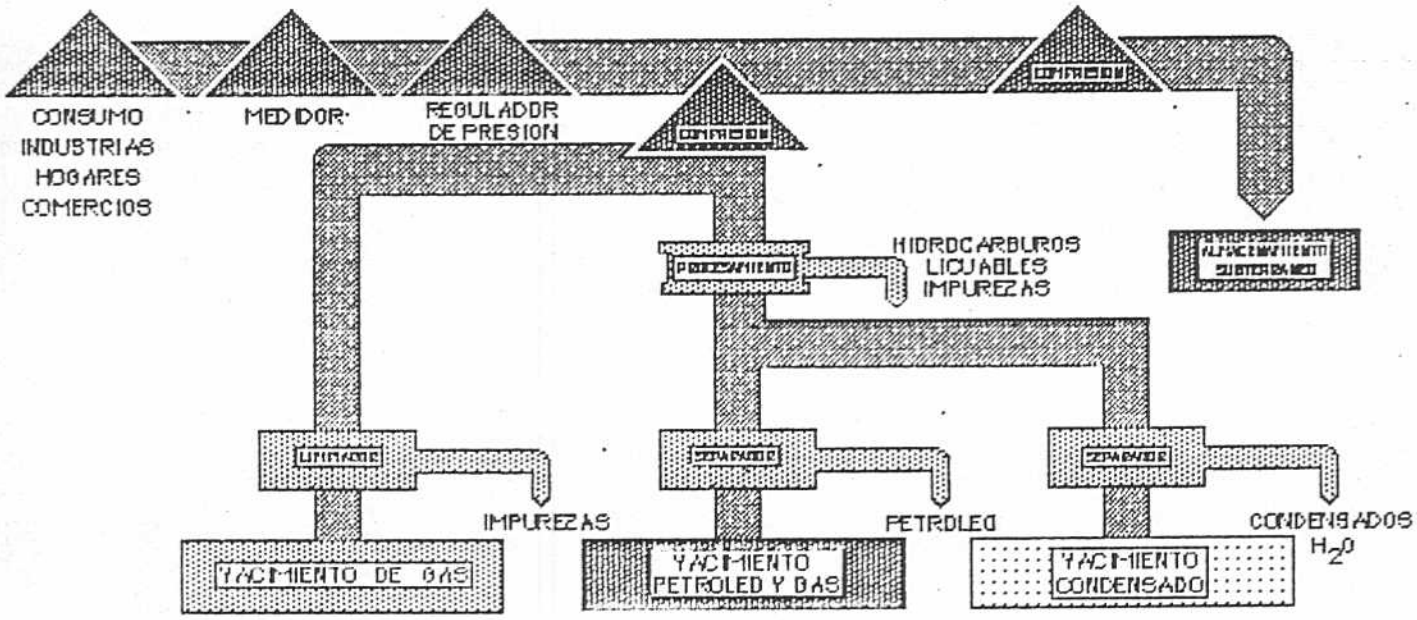


Figura 3.3.1 Flujo del gas natural del yacimiento al consumidor.

Según sus componentes y caracteristicas el gas natural se clasifica en:

a) Gas agrio: es un tipo de gas natural el cual contiene cantidades apreciables de sulfuro de hidrógeno y por lo tanto es muy corrosivo.

b) Gas dulce: es aquel que no contiene sulfuro de hidrógeno.

c) Gas rico (húmedo): es un tipo de gas natural del que se pueden obtener cantidades apreciables de hidrocarburos

liquidos.

d) Gas pobre (seco): está formado prácticamente por metano.

3.4 COMPORTAMIENTO

La predicción analitica del comportamiento del gas natural es una labor delicada debido a que depende del modelo utilizado para un proceso dado. La elección de las ecuaciones aplicables a dicho proceso serán en función de las condiciones termodinámicas y de la composición del gas mismo. Comenzaremos entonces por recordar algunos conceptos importantes involucrados en el comportamiento del gas natural.

3.4.1 Gas Ideal

Es un concepto que busca simplificar el comportamiento de presión, volumen y temperatura de los gases. Un gas ideal es un fluido imaginario formados por partículas sin volumen que no presentan fuerzas de interacción entre si, es completamente homogéneo, de viscosidad despreciable y adopta la forma del recipiente que lo contiene.

La ecuación matemática a la cual responde el gas ideal se deduce de las conocidas leyes de Avogadro, Boyle y Charle (también conocida como la ley de Gay Lussac), y se expresa de la siguiente forma:

$$PV = nRT$$

donde: P es presión absoluta, V el volumen, n el número de

moles, R la constante universal de los gases y T la temperatura absoluta.

La ecuación de gas ideal permite resultados satisfactorios cuando se trabaja a bajas presiones y relativamente altas temperaturas, ya que la distancia entre la moléculas es grande por lo que no interactúan entre ellas. Al trabajar a altas presiones el comportamiento predicho difiere en gran forma del real, por lo tanto es necesario acudir a otro tipo de ecuaciones.

3.4.2 Gases Reales

Infinidades de ecuaciones se han desarrollado para expresar el comportamiento correcto de los gases, sin embargo, ninguna se ha encontrado universalmente satisfactoria, limitandose la utilidad de éstas a ciertos rangos de presiones y temperaturas. Estas ecuaciones son las llamadas ecuaciones de estado. La más utilizada de éstas, debido a su simplicidad , se deduce de la introducción de un factor que compense la desviación presentada sobre la ecuación de gas ideal, este factor es llamado factor de compresibilidad "z", así, la ecuación de los gases reales se escribe de la siguiente manera:

$$P\ V = z\ n\ R\ T$$

Puesto que RT/P es el volumen especifico del gas ideal (V_{ideal}), se puede considerar al factor de compresibilidad como una medida de la razón del volumen real al volumen especifico del gas ideal. Es decir, $z = V_{real}/V_{ideal}$. Para el

hipotético gas ideal el factor de compresibilidad es la unidad; pero para los gases reales puede ser mayor o menor que la unidad. Por tanto, el factor de compresibilidad mide la desviación de un gas real con el comportamiento del gas ideal. Los valores de z < 1 indican que estas condiciones de almacenamiento (presión y temperatura) de un gas real son favorables, ya que es posible almacenar una mayor cantidad de gas real que ideal, en un determinado volumen.

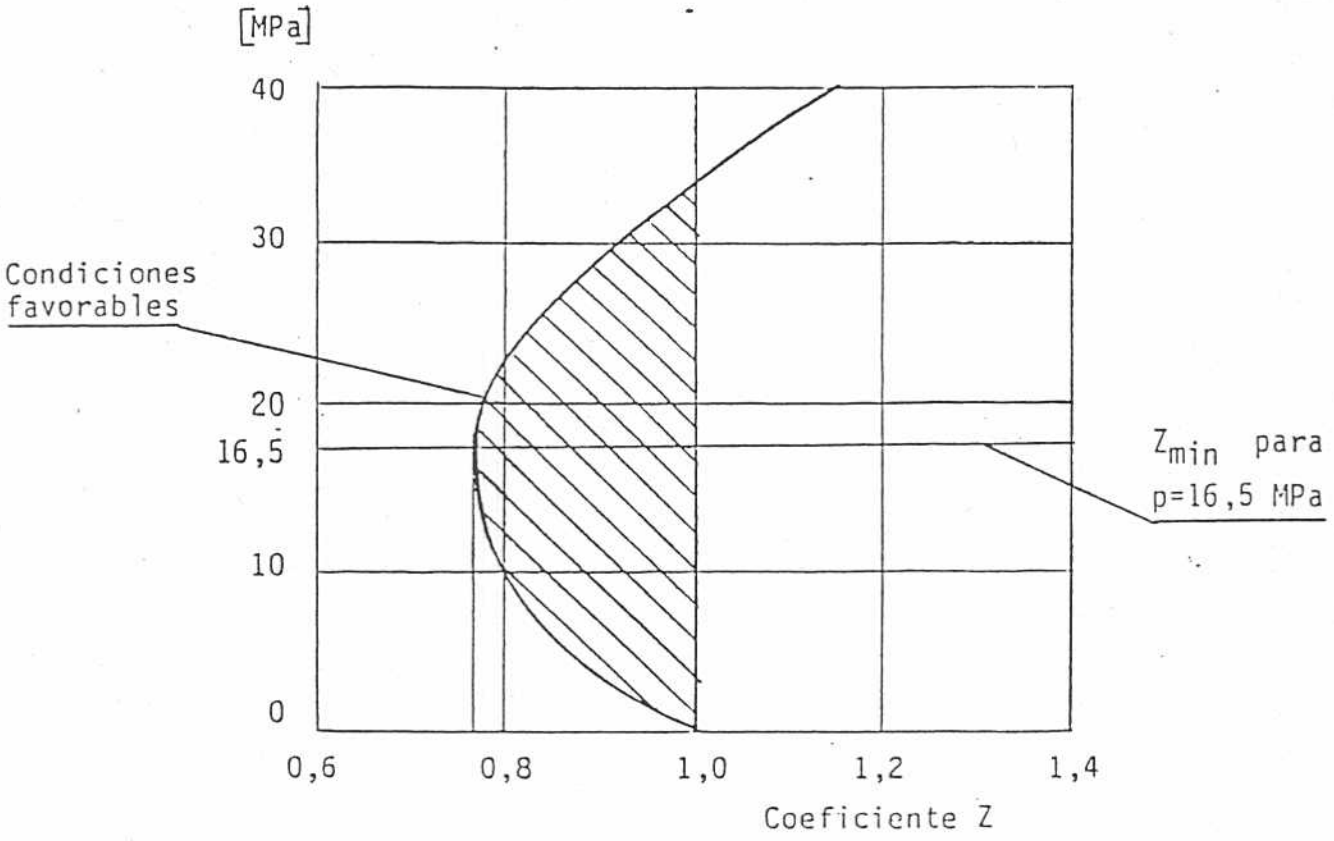


Figura 3.2.2.1 Coeficiente de compresibilidad para el metano (T= 20 °C).

El volumen especifico de cualquier gas puede estimarse a la presión y temperatura que se desee, si se conoce el

factor de compresibilidad como función de P y T, puesto que v = zRT/P. Esta información se encuentra al aplicar lo que se conoce como los *principios de los estados correspondientes.* El principio predice que el factor z para todos los gases es aproximadamente el mismo cuando éstos tienen la misma presión y temperatura reducidas. La presión reducida P_R y la temperatura reducida T_R se definen por:

$$P_R = \frac{P}{P_c} \qquad y \qquad T_R = \frac{T}{T_c}$$

En estas ecuaciones se deben usar presiones absolutas y temperaturas en grados Kelvin o Rankine. De esta manera, la presión y temperatura criticas de una sustancia se usan para definir un estado reducido. La validez de dicho principio se basa en evidencias experimentales. Cuando se grafican las isotermas reducidas T_R, en una gráfica z vs P_R, la desviación promedio de los datos experimentales para un cierto número de gases es menor del 5%.*

3.4.3 Mezcla de Gases

Como se mencionó en un principio, el gas natural es una mezcla de compuestos orgánicos e inorgánicos. Muchas de sus propiedades se obtienen a partir de las cualidades de los componentes puros, siendo las propiedades de la mezcla, dependientes intrinsicamente de las caracteristicas individuales de los elementos.

Fracción Molar: se define como fracción molar a la razón

* Apuntes de Fisico-Quimica

entre el número de moles del componente "i" y número de moles totales de mezcla, analíticamente se expresa como:

$$Yi = \frac{ni}{nt}$$

donde: **Yi** es la fracción molar del componente "i", **ni** el número de moles del componente "i" y **nt** número total de moles de la mezcla.

Mediante el empleo del concepto de fracción molar, se pueden estimar con cierto grado de exactitud las propiedades de las mezcla de gases, llamadas "propiedades aparentes". Sea "x" la propiedad de la mezcla de gases que se quiere calcular y "n" el número de componentes de esa mezcla, entonces:

$$x = (Y1.X1 + Y2.X2 + ... + Yn.Xn)$$

El método anteriormente nombrado es el más comunmente utilizado en la industria para estimar propiedades tales como temperatura crítica de una mezcla, presión crítica, peso molecular, etc.

3.5 PROPIEDADES FISICAS

Las propiedades fisicas del gas natural varian en función de las fracciones molares de sus componentes. Por lo tanto, es común utilizar propiedades promedio que representan el comportamiento del gas bajo varias condiciones de proceso. Las propiedades fisicas más utilizadas en la industria del gas natural son las siguientes:

3.5.1 Poder Calorífico

El poder calorífico de un gas o mezcla de gases se define como el calor liberado al quemar un volumen unitario del mismo, bajo determinadas condiciones. La prueba experimental para determinar el poder calorífico de un gas está normalizada por la ASTM asumiendo un factor de compresibilidad de z = 1, temperatura de 60 °F (15,6 °C) y presión de 14,7 psia.

3.5.2 Gravedad Específica

Se define como la razón entre el peso molecular del fluido en cuestión, respecto a un fluido patrón. En el caso de los gases el fluido patrón es el aire, entonces:

$$GE = \frac{M(gas)}{M(aire)} = \frac{R(aire)}{R(gas)}$$

3.5.3 Volumen Normalizado

Debido a la gran variedad de condiciones de presión y temperatura a las cuales se puede presentar el gas, se hace necesaria una uniformidad de criterios con el fin de comparar volumenes, ya que lo importante es que la energia suministrada por el combustible sea la requerida por un equipo en particular, bien sea que esté expresada por unidad de masa o por unidad de volumen. Para esto se definen las condiciones estándar las cuales son fijadas previamente. Usualmente las condiciones estándar utilizadas por fabricantes de equipos y en laboratorios son las siguientes:

Presión estándar: 14,7 psia

Temperatura estándar: 60 °F

Así, podriamos definir la energia requerida por un equipo en particular, como la energía contenida en un volumen dado de gas, a condiciones estandar.

3.5.4 Peso Molecular

Una caracteristica fundamental de todo elemento es su peso molecular. En una mezcla de gases, por ejemplo, solo se puede hablar de peso molecular aparente, que es el resultado de la suma del peso molecular de cada elemento puro multiplicado por su fracción molar, asi, para el gas natural esta propiedad dependerá del porcentaje de cada componente.

3.6 TRANSPORTE Y RED DE DISTRIBUCION

Una vez separado del crudo, tratado y procesado, el gas natural se transporta hasta los centros de consumo a través de la red nacional de gasoductos. Esta red, está constituida por tuberías con diámetros que varían entre 8 y 36 pulgadas, con una longitud total de 4.125 kilómetros y una capacidad de transmisión de 124 millones de metros cúbicos al dia, siendo el 76% operada por CORPOVEN.

Para las actividades de transmisión de gas se cuenta con 85 plantas compresoras, cuya potencia es de 870.000 Hp, con capacidad para comprimir 140 millones de metros cúbicos diarios.

La figura 3.6.1 muestra esquemáticamente la red nacional de gasoductos. La tabla 3.6.1 indica la distribución de

longitud de gasoductos por empresa.

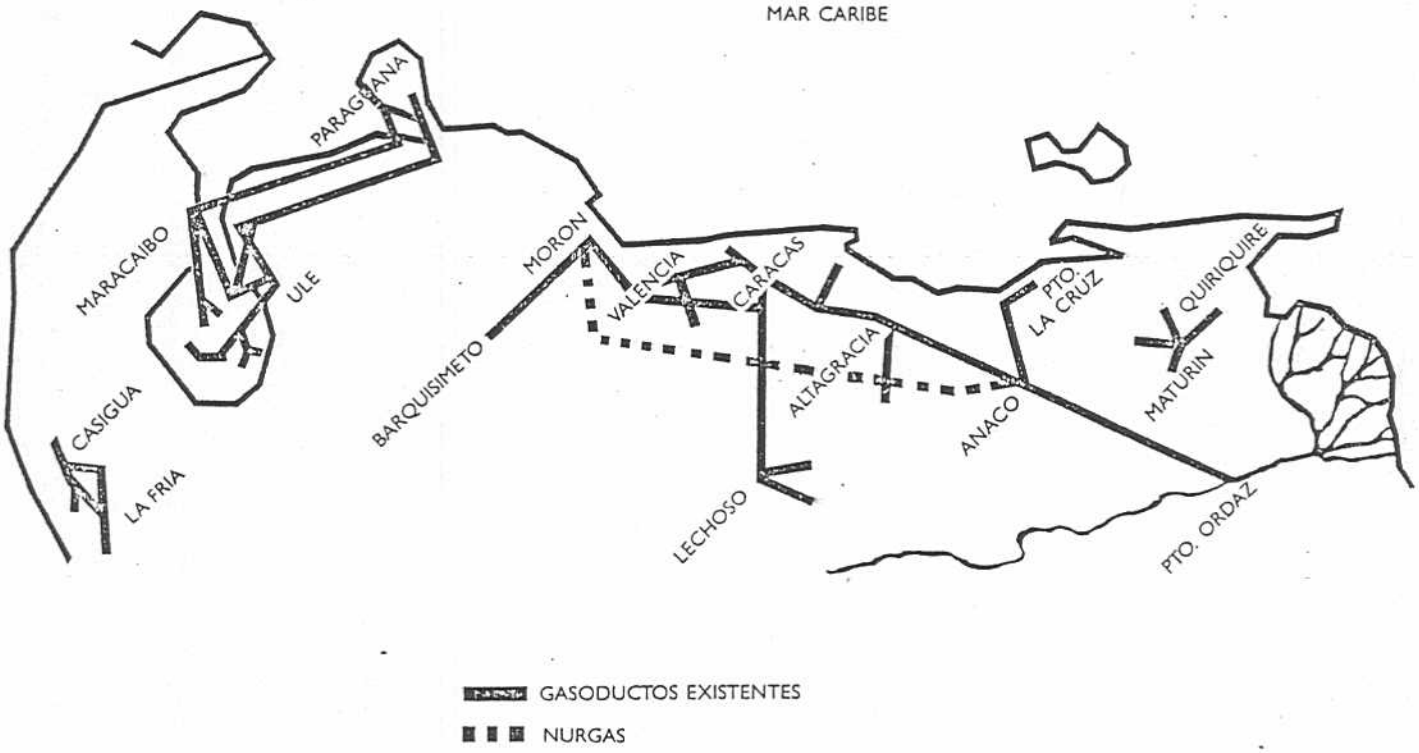


Figura 3.6.1 Red Nacional de Gasoductos

Tabla 3.6.1
INFRAESTRUCTURA DE INYECCION, PROCESAMIENTO Y TRANSMISION DE GAS NATURAL

	Gasoductos		Inyección			Transmisión(*)			Plantas de procesamiento	
Filial	Longitud (KM)	Capacidad (MMMCD)	N°	Potencia (MHP)	Capacidad (MMMCD)	N°	Potencia (MHP)	Capacidad (MMMCD)	N°(**)	Capacidad (MMMCD)
Corpoven	3120	96	50	315	69	47	175	69	6	41
Maraven	767	23	8	180	21	19	310	32	6	18
Lagoven	238	5	9	495	50	19	385	39	5	35
Total	4125	124	67	990	140	85	870	140	17	94

(*) Incluye transmisión realizada en actividades propias de la industria
(**) Incluye plantas fraccionadoras

3.7 PROYECTO GNV

El uso del gas natural como combustible para motores de combustión interna no es nuevo. El principal componente del gas natural, el metano, era utilizado como combustible desde los primeros años de este siglo. En esa época el metano era disponible como gas de hulla. Otros combustibles alternos a la gasolina se han desarrollado a partir de entonces; sin embargo, el gas natural representa un combustible de especial interés para Venezuela. Las considerables reservas probadas de este producto, 1,9 billones de metros cúbicos, su distribución actual a través de gasoductos que cubren las principales ciudades del país y el hecho de que actualmente no se cuenta con las facilidades de procesamiento para exportarlo, abre perspectivas interesantes para usarlo como combustible alterno a la gasolina y el diesel, en ciertos sectores del mercado. Por esta razón, Petróleos de Venezuela,S.A., encomienda a Corpoven,S.A., la realización de un proyecto que contemple el inicio de la infraestructura necesaria para utilizar el gas natural como combustible alterno en Venezuela.

La razón fundamental que respalda comenzar la infraestructura para implantar el uso de GNV en Venezuela es que, bajo un techo de producción limitado fijado por la OPEP, permite liberar volúmenes adicionales de gasolina para la exportación, obteniendose de esta manera un incremento de divisas para la nación. Esto traeria como consecuencia el

desarrollo de actividades en sectores económicos, tales como el automotríz, la industria metalmecánica, empresas de servicio, talleres y empresas suplidoras de partes y equipos.

Bajo las condiciones actuales (entre ellas la paridad cambiaria) se ha estimado que el mercado potencial convertible a GNV es de 40.000 vehiculos. Esto tomando en cuenta el suministro de GNV, la aceptación por parte del usuario y el parque automotor existente.

3.8 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL GNV vs GASOLINA

A continuación se presentan una serie de aspectos favorables y desfavorables al comparar el gas natural para vehiculos con la gasolina.

En Sistemas de Carburación

- No se requiere de bomba de suministro de combustible al sistema de carburación cuando se utiliza el gas natural, debido, a que se aprovecha la presión de almacenamiento del gas que es muy elevada (se explicará con más detalle en el capitulo 7).

- Al usar gas natural no se requiere de un carburador complejo, pero si de un dosificador-mezclador que es mucho más sencillo.

- El gas natural es un combustible que no carboniza a las bujias ni a las cámaras de combustión, y no deja partículas en el aceite lubricante del motor, obteniendose así una vida

más prolongada del motor, y menos cambios de bujias, filtros y aceite.

- Al contrario de la gasolina el gas natural no tiene problema de evaporización mezclandose fácilmente con el aire, por lo cual, resultan fáciles los arranques en frío.

- El gas natural presenta un elevado octanaje de aproximadamente 130 RON, que esta muy por encima del octanaje que presenta la gasolina (alrededor de 95 RON), por tanto se reduce notablemente el peligro a la detonación.

- El gas natural tiene un poder calorífico elevado (1 m^3 de metano posee cerca de 8250 Kcal contra las 7750 de 1 lt de gasolina) y una tonalidad térmica (se entiende la cantidad de calor desarrollada por la combustión de 1 lt de mezcla aire-combustible, importante porque determina en los motores la potencia máxima) algo inferior a la de la gasolina (0,82 Kcal/lt de mezcla metano-aire contra las 0,89 Kcal/lt de mezcla gasolina-aire). [1]

- El gas natural en cuanto a sistema de carburación no presenta desventajas apreciables, sin embargo cabe destacar que el mezclador-dosificador frena el paso del aire requerido para la carburación, si se utiliza gasolina (sistema dual).

Para el Usuario

- La mayor ventaja para el consumidor es el bajo costo que presenta el gas con respecto al valor de la gasolina, ya

[1] Revista Quattroruote Enero 87, #375, pag. 204

que es aproximadamente una quinta parte del precio de está última.

- Otra ventaja son los menores cambios de bujias, filtros y aceite por lo expresado anteriormente.

- Debido a que el gas natural es un gas liviano y con una alta temperatura de autoignición , mayor a 700 °C, es más seguro que la gasolina.

- El cilindro de almacenamiento y el sistema de distribución de gas utilizado en el vehículo son totalmente sellados y son más fuertes que cualquier tanque de gasolina.

- La mayor desvantaja para el usuario es el elevado costo inicial del equipo de conversión para gas, a parte del bajo número de estaciones surtidoras de gas natural, por los momentos. Actualmente solo existen tres estaciones de gas natural de las cuales dos se encuentran en el área metropolitana.

- Otro inconveniente técnico, común a todos los combustibles gaseosos, la limitada autonomía. De hecho, no obstante el gas sea comprimido a 220 atm.,éste ocupa todavía un volumen elevado. A paridad de capacidad de un tanque, con el gas natural se recorre sólo 1/4 parte de lo que se recorre con la gasolina; por ejemplo, una bombona de 80 lt puede contener como máximo 20 m^3 de metano aunque ocupe el mismo espacio de un tanque de 80 lt de gasolina.

La situación se empeora si se comparan también los pesos de ambos tanques: aquel para el gas natural pesa 70 kg. más

respecto al de gasolina; lo que implica una reduccion de la capacidad de carga en volumen y peso del vehiculo.

Para la Industria Petrolera

- Reducción de costos por ser más facil su procesamiento.

- Se requieren plantas compresoras para su distribución y transporte.

Ecológicas

- La combustión del gas natural reduce la contaminación ambiental, debido a que los agentes contaminantes de los gases de escape se presentan en menor cantidad, especialmente el monóxido de carbono (CO), en virtud de una mejor combustión; así como también son menores los hidrocarburos no quemados (HC), y como estan constituidos en gran parte por metano, son mucho menos nocivos que los producidos por la gasolina, a parte de presentar ésta un antidetonante sumamente tóxico como lo es el tetraetilo de plomo.

A continuación se presenta una tabla comparativa de niveles de contaminación [1]:

NIVELES DE CONTAMINACION
(gr/km)

EMISION	GASOLINA	DIESEL	GNV
Hidrocarburos	0,45	0,72	0,04
Monóxido de Carbono	2,27	1,60	0,06
Oxido de Nitrógeno	0,86	1,22	0,82
Oxido de Azufre	0,28	0,49	--
Part. Sólidas	0,04	0,45	--

[1] SULZER TECHNICAL REVIEW 2/1987, pag. 5

4. FUNDAMENTOS TEORICOS DE LAS MAQUINAS ENDOTERMICAS

Este capítulo presenta una serie de conceptos y términos que se desarrollan en áreas como: Calor y Termodinámica, Térmica y Generación de Potencia, que sirven de base al trabajo mismo para que éste sea completo y coherente.

El estudio será enfocado unicamente al motor de encendido por chispa de cuatro tiempos, que trabaja tanto con combustibles líquidos como con combustibles gaseosos.

En principio se introducen los términos relacionados con el funcionamiento de está máquina térmica, el ciclo que la rige (tanto ideal como real) y el diagrama indicado.

Estos conceptos básicos se consideran de gran importancia en la comprensión y por lo tanto en un mejor aprovechamiento de este trabajo.

4.1 INTRODUCCION DE TERMINOS

Las máquinas térmicas tienen por objeto transformar la energía calórica en energía mecánica utilizable. Todos los motores de combustión interna de encendido por chispa, que generan trabajo mecánico partiendo del calor aportado por

la energia quimica de una mezcla aire-combustible, se llaman motores endotérmicos.

El fundamento de estos motores endotérmicos del tipo alternativo lo constituye el ciclo Otto desarrollado en los años setenta del pasado siglo.

En la figura 4.1.1. se muestran las partes mecánicas más importantes que conforman un motor de este tipo.

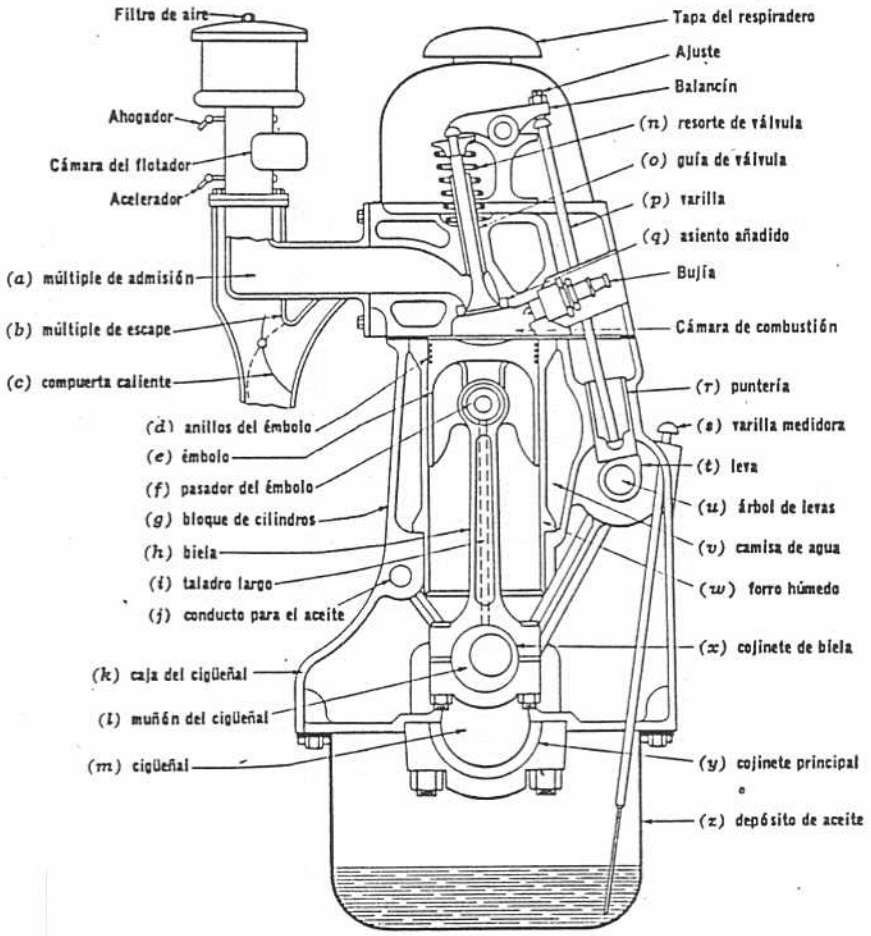


Figura 4.1.1 Sección transversal de un motor endotérmico de encendido por chispa.

Para el estudio de los motores endotérmicos (de cuatro tiempos) es necesario conocer la terminología utilizada universalmente para indicar los procesos y algunas dimensiones, las cuales se pueden apreciar con más claridad en la figura 4.1.2.

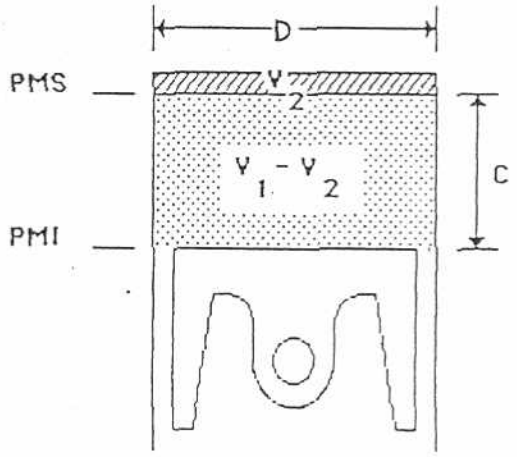


Figura 4.1.2 Representación esquemática del cilindro.

Los términos incluidos en la figura se describen a continuación:

-Punto Muerto Superior (PMS): posición del pistón más próxima a la culata.

-Punto Muerto Inferior (PMI): posición del pistón más alejada de la culata.

-Diámetro (D): diametro interior del cilindro.

-Carrera (C): comprende la distancia entre el PMS y el PMI.

-Volumen total del Cilindro (V_1): es el espacio comprendido entre la culata y el pistoñ cuando éste se halla en el PMI.

-Volumen de la Cámara de Combustión (V_2): está comprendido entre la culata y el pistón cuando éste se encuentra en el PMS.

-Cilindrada (V_1-V_2): es el volumen generado por el pistón en su movimiento alternativo desde el PMS hasta el PMI.

-Relación de Compresión (r_c): se entiende por tal, la que hay entre el volumen total del cilindro (V_1) y el volumen de la cámara de combustión (V_2).

Para un motor de pistón reciprocante, Beau de Rochas había propuesto en 1862 una secuencia de operación que es, aún hoy, típica en muchos motores de encendido por chispa, como se aprecia en la figura 4.1.3.

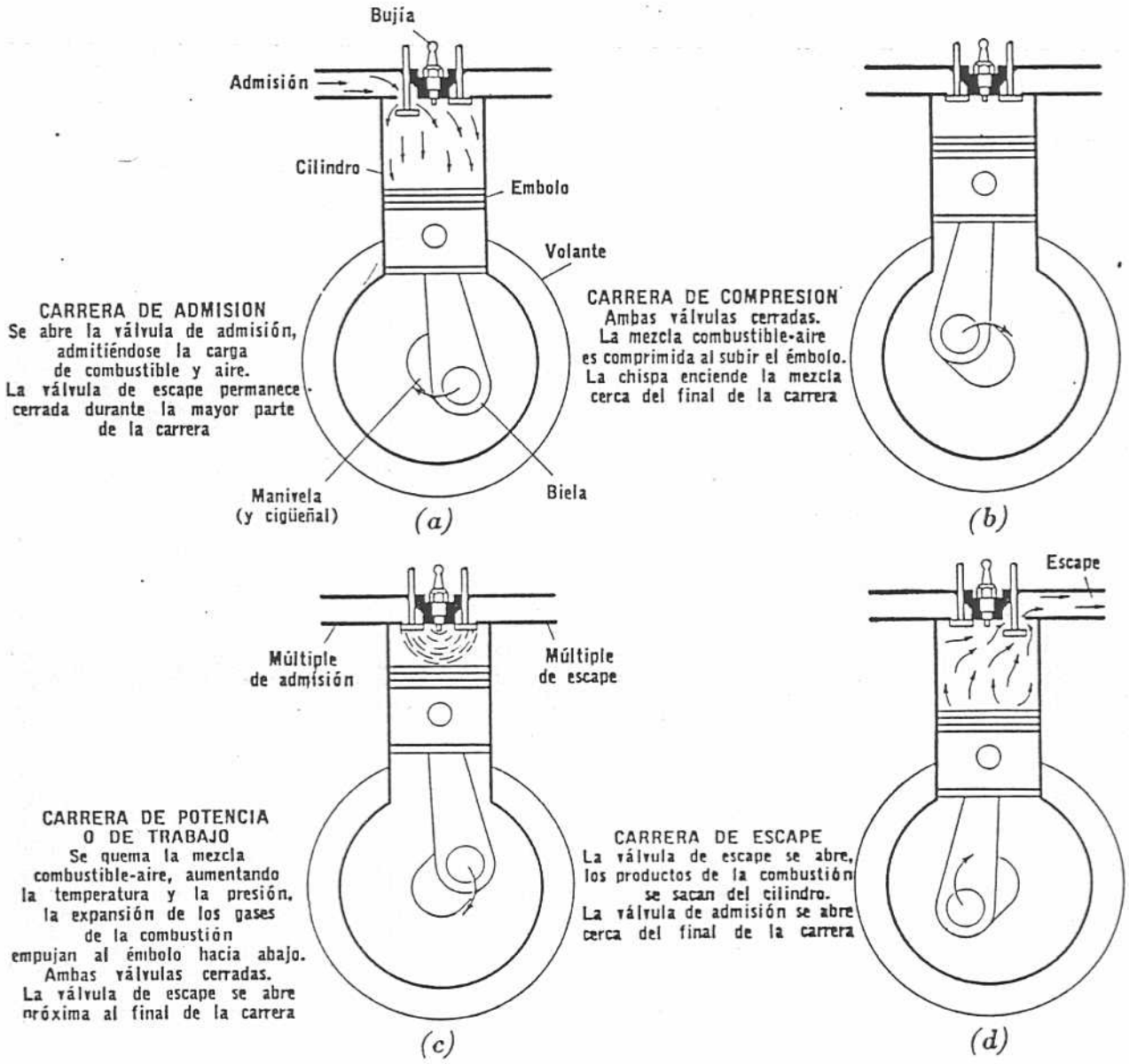


Figura 4.1.3 Fases del ciclo de cuatro tiempos.

4.2 CICLO OTTO

El ciclo Otto es un ciclo ideal que se asemeja al seguido por una máquina por combustión interna de encendido por chispa. Su principal diferencia radica en que, en el ciclo Otto ideal, el proceso de la combustión se verifica a volumen constante, en tanto que en motor de encendido por chispa no es exactamente de esta forma.

4.2.1 CICLO IDEAL

El ciclo utilizado para el análisis del comportamiento del motor de encendido por chispa es el ciclo ideal Otto, el cual está representado graficamente en la figura 4.2.1, representado tanto en coordenadas P-V como en coordenadas T-S. Para la explicación de los procesos que se llevan a cabo en el ciclo Otto ideal, se asume que el cilindro contiene aire y que el pistón está colocado en la posición del PMI que en el diagrama anterior se indican en el punto 1.

Los procesos que se verifican durante el ciclo son:

1-2 Compresión adiabática o isentrópica (sín intercambio de calor con el exterior) del fluido activo y el correspondiente trabajo W_1 realizado por el pistón.

2-3 Suministro instantáneo a volumen constante: **de calor Q_1.**

3-4 Expansión adiabática: **producción de trabajo W_2 por el fluido activo.**

4-1 **Disipación instantánea** a volumen constante: del calor Q_2.

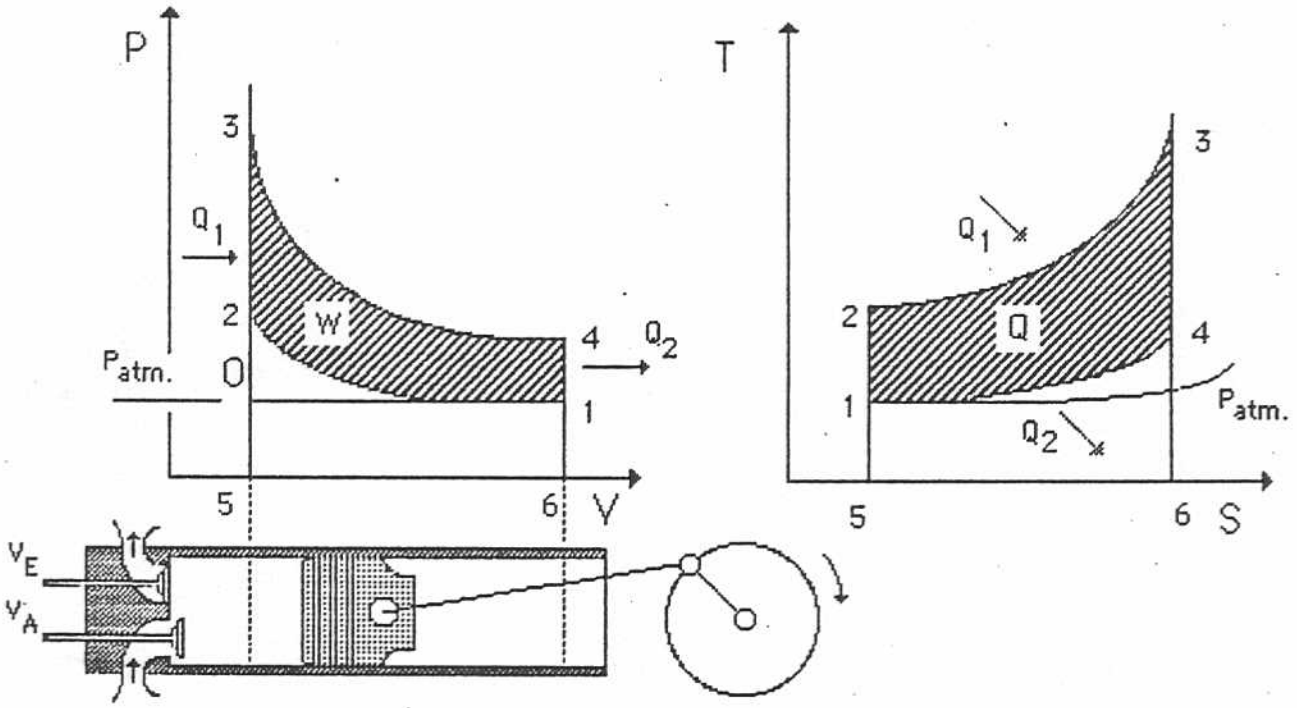


Figura 4.2.1 Ciclo Otto en coordenadas p-V y T-S.

Todos los ciclos termodinámicos, que se realizen en el sentido de las agujas del reloj producen trabajo útil positivo.

Cabe señalar que en los motores de combustión interna se considera también un ciclo de escape, 1-O en el cual se realiza la sustracción de calor; y un paso de admisión del

fluido, 0-1 que son representados en el diagrama P-V, ya que en el T-S no es posible dicha representación. Por ser ambos procesos ideales se anulan, sin ganancia ni pérdida de trabajo.

Como el calor Q_1 se introduce a volumen costante, el trabajo W_{2-3} realizado durante este proceso, es nulo, por lo que la ecuación de la energia del fluido es:

$$Q_1 = U_3 - U_2$$

Como se trata de un ciclo ideal donde el fluido operante es un gas ideal, la variación de la energia interna durante su transformación a volumen constante es:

$$U_3 - U_2 = C_v.(T_3 - T_2)$$

de donde resulta:

$$Q_1 = C_v\ (T_3 - T_2)$$

Análogamente como el calor Q_2 es sustraido también a volumen constante, y en tales condiciones $W_{4-1} = 0$, se puede escribir:

$$Q_2 = U_4 - U_1 = C_v\ (T_4 - T_1)$$

Por consiguiente el rendimiento térmico ideal para el ciclo Otto resulta:

$$n_t = \frac{\text{calor suministrado} - \text{calor sustraido}}{\text{calor suministrado}}$$

Tomando en cuenta que para las transformaciones isentrópicas de compresión 1-2 y de expansión 3-4 se cumple que:

$$T_2/T_1 = (V_1/V_2)^{k-1}\ ;\ T_3/T_4 = (V_4/V_3)^{k-1}$$

y como V1 = V4 y V2 = V3, combinando estas relaciones, resulta que:

$$n_t = 1 - (V_2/V_1)^{k-1} = 1 - 1/r_c^{(k-1)}$$

El rendimiento térmico del ciclo Otto es, por lo tanto, función de la relación de compresión y del exponente k, relación de los calores especificos del fluido operante. Aumentando r_c, aumenta n_t y aumentando los valores de los calores especificos, disminuye k disminuyendo n_t.

4.2.2 CICLO REAL

El diagrama, asi como las presiones y temperaturas bajo las cuales se llevan a cabo los procesos de los ciclos real e ideal, difieren notablemente. Las diferencias que se pueden notar en el diagrama son:

a) Tanto los procesos de llenado como de expulsión de gases son trazos curvilineos y no rectos como en el ciclo ideal.

b) Los ángulos agudos y obtusos de los estados (1,2,3,4) del diagrama ideal son sustituidos por trazos redondeados.

Las razones por las cuales se presentan los cambios antes mencionados se deben a los siguientes factores:

- Para que los gases puedan ser expulsados al medio ambiente, en el proceso 1-0, la presión interna debe ser mayor a la atmosférica y de la misma manera para que la mezcla sea admitida dentro del cilindro (salvo en casos particulares), en el proceso 0-1, la presión interna debe

ser menor a la atmosférica. Por tanto en el diagrama indicado se crea una superficie negativa (W_b) que corresponde al trabajo perdido, representada por el área D en la figura 4.2.2.1. Cabe destacar que todo ciclo que se realize en el sentido contrario a las agujas del reloj, implica un trabajo negativo. Esta pérdida de trabajo del motor es llamada pérdida de bombeo.

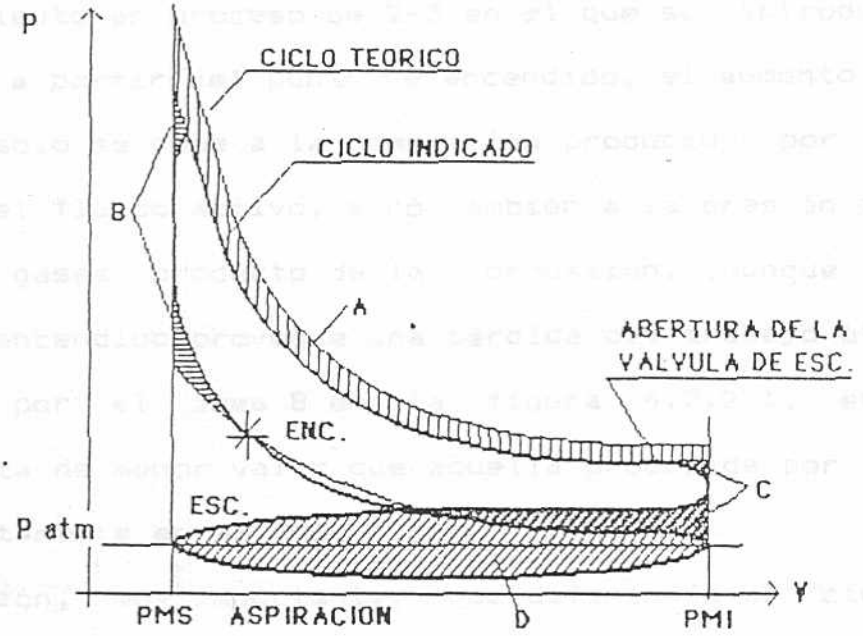


Figura 4.2.2.1 Comparación entre los ciclos Otto teórico e indicado.

- No es posible obtener una combustión instantánea como la que se supone en el ciclo ideal, donde la combustión es a volumen constante. En el ciclo real la combustión dura cierto tiempo, y una manera de hacer este proceso más eficiente consiste en que el encendido ocurra unos grados

valor de la politrópica de expansión (el cual debe ser mayor que K debida por las pérdidas de calor a través de las paredes del cilindro) y se aproxima al de la politrópica de compresión; por ello, se consigue una parcial recuperación del trabajo antes perdido.

4.2.3 DIAGRAMA INDICADO REAL

En este apartado se da a conocer como varia la forma del diagrama indicado real, ya que la forma del ciclo indicado depende del modo en que se desarrollan las transformaciones en el motor. Estas variaciones pueden observarse con la representación de dichas transformaciones, en el diagrama indicado.

La 'posición de la mariposa del carburador afecta notoriamente la forma del diagrama, como puede verse en la figura 4.2.3.1. A plena apertura la resistencia al paso de aire hacia el cilindro es mínima y entra la mayor cantidad posible de mezcla. Por tanto, la superficie donde se obtiene trabajo positivo (blanca) es mayor. Sin embargo, el trabajo de bombeo requerido para expulsar los gases es mayor, por la mayor cantidad de gases de la combustión, pero el trabajo de bombeo de aspiración es menor observandose (en la figura) como una curva más chata.

Con apertura parcial de la mariposa, la resistencia al paso de aire es mayor, por lo que el trabajo positivo es menor. En este caso aumenta el trabajo de bombeo por

aspiración y se reduce el trabajo de expulsión. (Comparese ambas zonas oscuras de las figuras).

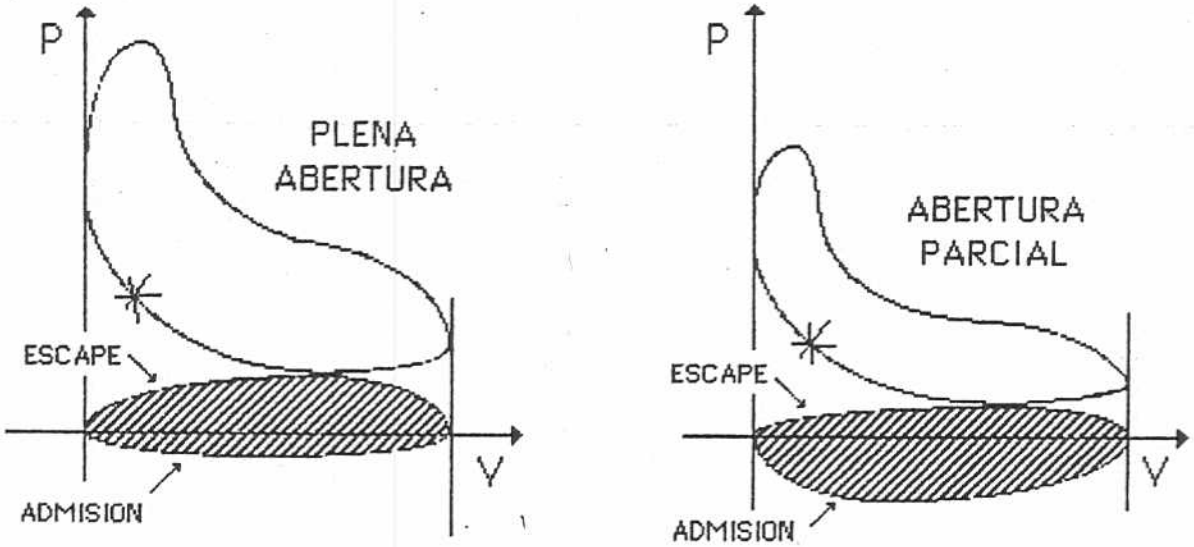


Figura 4.2.3.1 Ciclos Otto indicados con plena abertura y abertura parcial.

La figura anterior también es válida para exponer las pérdidas de bombeo ocasionada por la mayor o menor resistencia que ofrece los conductos de admisión y escape, el mayor o menor diámetro de las válvulas, asi como sus tiempos de apertura y cierre.

Se sabe que no hay conducto perfecto que no ofrezca resistencia al paso de un fluido, pero para obtener una menor pérdida por bombeo y una mayor cantidad de trabajo útil, es necesario que estos, asi como las válvulas (con un mayor diámetro), ofrezcan la menor resistencia posible al paso de los gases. Si se retarda el inicio de la apertura de

la válvula de aspiración, o se atrasa el inicio de la apertura de la válvula de escape, la presión en el cilindro es menor en la carrera de aspiración y mayor en la carrera de escape, lo que implica una mayor pérdida por bombeo y un menor trabajo útil.

Otro aspecto importante que varía la forma del diagrama indicado es el correspondiente al encendido de la chispa. Se sabe que la combustión necesita un cierto tiempo para realizarse, por lo tanto para aproximar el proceso real a uno teórico (a volumen constante) el encendido de la mezcla debe producirse antes del PMS.

El tiempo de encendido óptimo se establece experimentalmente por medio de pruebas, para hallar el valor correspondiente a la potencia máxima que se puede obtener sin llegar a la detonación o funcionamiento violento del motor. Por lo regular, el instante en que salta la chispa corresponde al punto en que la presión equivale a la mitad de la que se alcance en el PMS. Si la chispa salta con retraso, la combustión se desarrolla después del PMS, alcanzando la presión máxima cuando el pistón se encuentra cerca del PMI. Esto implica un trabajo útil menor representado en la figura 4.2.3.2.a. Una deformación similar ocurre en el caso de una combustión rápida. Cuando la chispa salta con anticipación, la combustión ocurre antes del PMS, la presión máxima es superior a la normal y el ciclo aparece deformado como se observa en la figura 4.2.3.2.b.

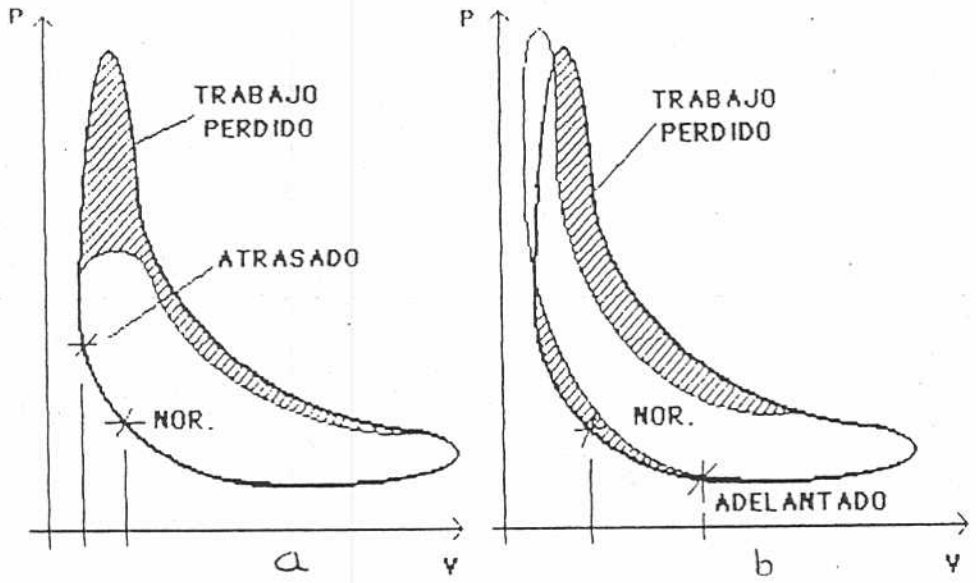


Figura 4.2.3.2 Influencia del tiempo de encendido sobre el ciclo Otto indicado.

5. PARAMETROS CARACTERISTICOS DE UN MOTOR

En esta sección se introducen los conceptos de potencia, eficiencia, presión media efectiva, torque, consumo especifico de combustible. Estos conceptos son de gran importancia ya que indican las especificaciones de un motor.

5.1 POTENCIA Y EFICIENCIA MECANICA

La potencia de un motor es llamada **potencia al freno** (**bhp**) y en algunas ocaciones es llamada potencia del eje. La SAE (SOCIETY AMERICAN ENGINEERS) mide la potencia neta al freno con todos los componentes del motor. La potencia total desarrollada en el interior del cilindro de un motor es llamada **potencia indicada.**

Una parte de la potencia indicada desarrollada por la combustión no aparece como potencia al freno pero es utilizada en superar la fricción de los anillos, pistón, bombas y otras partes mecánicas así como auxiliares del motor; también en la admisión de la mezcla y expulsión de gases. Estas partes mecánicas y auxiliares del motor son: accionamiento de la distribución, bomba de aceite para la lubricación, bomba de agua y ventilador para la

refrigeración y otras partes mecánicas como árbol de levas, cigueñal, etc. La potencia para desarrollar estos objetivos es llamada **potencia de fricción (fhp)**. La potencia al freno es menor que la potencia indicada por la cantidad de potencia de fricción que se consume en el motor:

$$ihp = bhp + fhp$$

De mayor interés práctico es el par disponible en el eje del motor y la potencia generada por este par. Esta es la llamada potencia al freno porque se mide con un dispositivo frenante que aplicado al eje del motor se opone al par motor y permite medir su valor.

La relación de potencia obtenida por el motor (bhp) a la potencia total desarrollada dentro del motor, es conocida como la **eficiencia mecánica (n_m)**:

$$n_m = \frac{bhp}{ihp}$$

5.2 PRESION MEDIA EFECTIVA (pme)

La presión media efectiva es un parámetro útil en el estudio de los motores de encendido. Se define como la presión promedio, aquella que, si actua durante toda la carrera de trabajo o de potencia, produce una salida de trabajo igual al trabajo neto producido por el proceso ciclico real. De esto se deduce que:

$$W_{ciclo} = pme * cilindrada$$

Si sobre la base del diagrama del ciclo ideal (figura

5.2.1.) se traza un rectángulo ABCD, cuya área sea igual a la del ciclo, la altura del rectángulo representa la presión media del ciclo considerado.

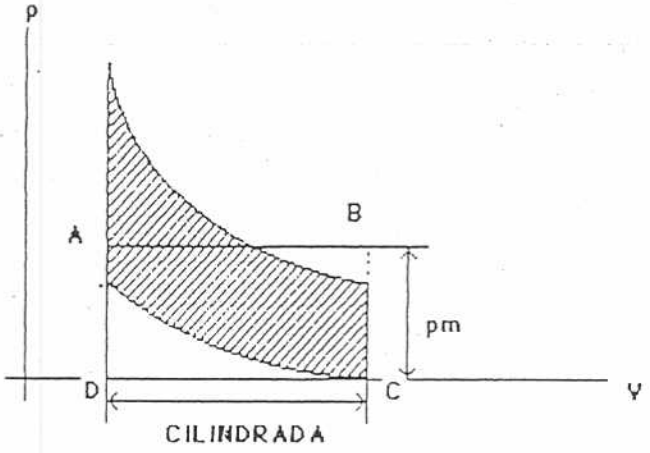


Figura 5.2.1 Diagrama P-V de un ciclo.

Existen dos tipos de presión media efectiva, que son: la indicada y al freno. **La presión media efectiva al freno (pmeb)** es definida como una presión constante teórica, la cual puede ser imaginada como la que se ejerce durante cada carrera de potencia del motor para producir una potencia igual a la potencia al freno.

La presión media efectiva indicada (pmei) se define como la presión constante teórica , que teóricamente se ejerce durante cada carrera de potencia del motor, para producir una potencia igual a la potencia indicada.

Conociendo la pmei es fácil obtener la potencia indicada,

es decir, la potencia desarrollada por el fluido en el cilindro. El valor de la fuerza total que actúa sobre el pistón es:

$$F = pi*D^2*pmei/4$$

El trabajo realizado por esta fuerza:

$$W_i = pi*D^2*pmei*C/4 = V*pmei$$

Para calcular la potencia indicada basta multiplicar el trabajo realizado durante una carrera por el número de carreras útiles efectuadas en la unidad de tiempo:

$$ihp = V*pmei*n*2/h$$

Torque y Presión Media Efectiva

Debido a que el torque depende del tamaño del motor, no es un buen factor que indique el desempeño de éste; los motores de mayor cilindrada producen altos torques. Los motores tampoco se pueden comparar sobre su potencia relativa, porque su potencia depende no solo del tamaño sino también en su velocidad. Por esto el mejor parámetro de comparación es la presión media efectiva, ya que uno de los objetivos en el diseño es el de construir motores con elevadas presiones medias efectivas.

5.3 CONSUMO ESPECIFICO DE COMBUSTIBLE Y EFICIENCIA TERMICA

El consumo especifico de combustible es la relación del consumo de combustible por unidad de tiempo respecto a la potencia; por definición,

$$c.e.c. = \frac{mf}{hp}$$

c.e.c. = g/hp-hr ó lb/hp-hr

El consumo específico de combustible puede referirse a la potencia al freno o indicada:

$$b.c.e.c. = \frac{mf}{bhp}$$

$$i.c.e.c. = \frac{mf}{ihp}$$

El rendimiento térmico se conoce en un motor ideal como la relación del trabajo que sale entre el calor que entra.

$$\text{rendimiento térmico} = \frac{\text{trabajo que sale}}{\text{calor que entra}}$$

Según se explicó en la sección 4.2.1 el rendimiento térmico ideal del ciclo Otto, es el siguiente:

$$n_t = 1 - 1/\ r_c^{(k-1)}$$

En un motor ideal se introduce calor, se saca trabajo y lo que queda de esta conversión también es calor. En un motor real la situación es distinta: el calor o la energía está asociada a los cambios de un material. El material que entra es el combustible, y el material que queda después de producirse trabajo son los productos de la combustión.

$$\text{rendimiento térmico} = \frac{\text{trabajo que sale}}{\text{(mat. que entra)*("poder calorífico" del material)}}$$

$$n_e = \frac{hp * 632,410}{mf * E_L} \quad [1]$$

de la ecuación anterior el **rendimiento indicado,** puede obternerse de la siguiente forma:

$$ni = \frac{ihp * 632,410}{mf * E_L}$$

Este rendimiento señala en que forma se aprovecha el fluido activo, y depende en gran medida de la cámara de combustión (forma, disposición de válvulas y bujia, etc.). Si relacionamos esta última ecuación con la ecuación obtenida del i.c.e.c., nos queda:

$$i.c.e.c. = \frac{632,410}{E_L * nt}$$

Se recordará que existen dos tipos de poderes calorificos:

El poder calorífico alto, que es aquel que se obtiene al quemar el combustible en un calorímetro que incluye el agua de condensación de la combustión, y el poder calorifico bajo que no incluye la condensación del agua. Se argumenta que el rendimiento térmico debe basarse en el poder calorifico bajo porque la temperatura de los gases de escape es superior a la temperatura de condensación, y el vapor de agua por tanto no se condensa.

Al comparar motores desde el punto de vista comercial se debe usar el poder calorifico alto, ya que el motor debe cargarse con toda la energía que se le suministre. En

[1] Apuntes de Generación de Potencia

problemas de ingeniería el rendimiento térmico no es tan importante como el consumo específico de combustible.

5.4 CONSUMO ESPECIFICO DE AIRE (c.e.a.) Y RENDIMIENTO VOLUMETRICO (n_v)

Es la relación entre el consumo de aire por unidad de tiempo respecto a la potencia del motor.

$$c.e.a. = \frac{ma}{hp}$$

puede referirse a la potencia al freno o indicada sencillamente utilizando los ihp o los bhp.

El consumo específico del aire es un criterio del tamaño y por consiguiente, del costo del motor.

De lo dicho anteriormente se puede deducir:

$$ihp = \frac{ma}{icea} = \frac{ma * F * E_L * ni}{632,410}$$

$$icea = \frac{632,410}{F*E_L*ni}$$

donde F es la relación aire-combustible, que se verá en la sección 5.5.

El **rendimiento volumétrico** (n_v) es la relación entre la masa del aire (m_a) efectivamente introducido en el cilindro en la carrera de aspiración y la masa de aire teórica (m_{at}) que corresponde a un volumen de aire igual al volumen del cilindro, en condiciones estandar:

$$n_v = m_a/m_{at}$$

m_a se calcula por medio del q_a experimentalmente, mientras que la m_{at} se obtiene por medio del caudal de aire teórico, que es igual a:

$$q_{at} = V' * n / 2$$

Su valor para la gran mayoria de los motores comerciales oscila entre 0,70 y 0,85 pero, suelen alcanzarse valores mayores, incluso por encima de uno, en motores de competición, y depende de la velocidad media del aire o mezcla a través de los ductos de admisión.

5.5 RELACION AIRE-COMBUSTIBLE

La cantidad de aire necesaria para la combustión completa de 1 Kg de combustible corresponde a la relación en peso aire-combustible llamada estequiométrica y representa la dosificación teórica ideal para conseguir la combustión total. Para un combustible gaseoso se utilizan, por regla general, las unidades de volumen, tanto para el combustible como para el aire.

Tomando como base las ecuaciones de las reacciones químicas de la combustión, se puede determinar la cantidad minima de aire requerida para una combustión completa. Por ejemplo, para el metano la ecuación es la siguiente:

$$CH_4 + 2\ O_2 \longrightarrow CO_2 + 2\ H_2O$$

De aqui se deduce, que un mol de CH_4 (1mol x 16,04gr/mol = 16,04) requiere de dos moles de O_2 (2mol x 32 gr/mol = 64 gr), es decir que, a 1Kg de CH_4 hay

que suministrarle 4 kg de O_2. Debido a que el aire esta compuesto de un 23% másico de O_2 y de un 76% másico de N_2, la cantidad minima de aire, para la combustión de 1 kg de CH_4, es de 17,4 kg. (Aire x 0,23 = moles de oxigeno (O_2)). Los m^3 de aire necesarios para un m^3 de combustible se obtienen sencillamente con la densidad.

El **Coeficiente de Exceso de Aire** es la relación entre la cantidad de aire que ingresa al cilindro del motor y la cantidad de aire teóricamente necesaria para la combustión de 1 kg o 1 m^3 de combustible, y se designa con la letra λ, es decir:

$$\lambda = \frac{m_a}{m_{ao}}$$

En la práctica, la conexión aire-combustible, que se llama relación de mezcla, se aparta del valor estequiométrico durante el funcionamiento del motor; según resulte deficiente ($\lambda < 1$) o excesiva ($\lambda > 1$) la cantidad de aire que intervenga en el proceso, la mezcla se calificará de rica o pobre (en combustible), respectivamente.

El coeficiente de exceso de aire influye también sobre el poder calorífico de una mezcla aire-combustible, a medida que λ aumenta el poder calorífico disminuye, ya que hay menor cantidad de combustible por volumen de mezcla.

Las caracteristicas de la combustión de una mezcla aire-combustible de un motor dependen principalmente de la magnitud del coeficiente. Dicho coeficiente influye en forma

directa sobre la potencia máxima, el consumo de combustible y en la composición de los gases de escape de un motor, como puede observarse el la figura 5.5.1.

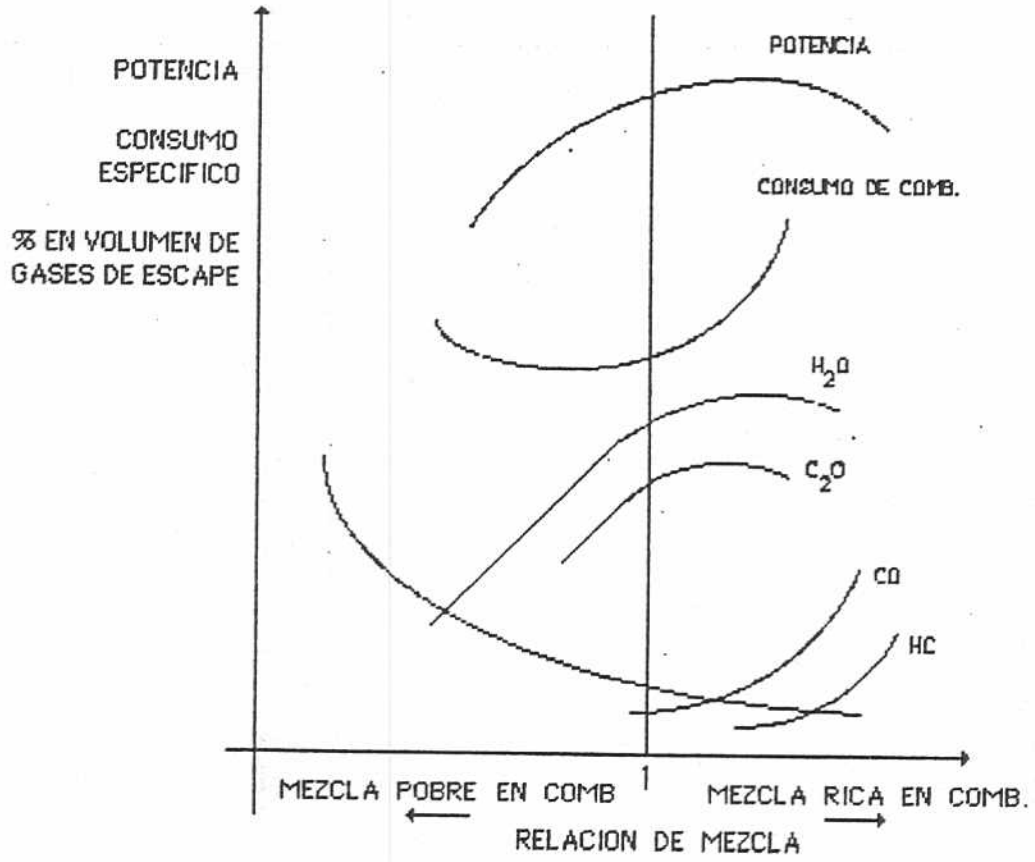


Figura 5.5.1 Efecto de la relación de mezcla sobre la potencia, consumo especifico y gases de escape.

Las mezclas aire-combustible pueden inflamarse dentro de un rango de composición. Este rango lo comprenden dos limites, llamados, **Limites de Inflamabilidad**, y estan expresados en porcentaje volumétrico. Sólo entre dichos limites es posible aprovechar la energia de un combustible,

y entre el coeficiente de exceso de aire y los limites de inflamabilidad existe una relación que viene dada por:

$$\lambda_{min} = \frac{100 - Lmax}{m_{ao} \times Lmax}$$

$$\lambda_{max} = \frac{100 - Lmin}{m_{ao} \times Lmin}$$

Por ejemplo para el metano: m_{ao} = 9,5 m^3 aire/m^3 gas

Lmin = 5,3% volumen

Lmax = 15% volumen

de aqui, los valores de λ son iguales a:

$$\lambda_{min} = \frac{100 - 15}{9,5 \times 15} = 0,6 \qquad \lambda_{max} = \frac{100 - 5,3}{9,5 \times 5,3} = 1,9$$

En los motores a gas natural la relación aire-combustible es óptima cuando el mezclador es capaz de mantener en un 80%[1] de la relación aire-combustible estequiométrica, para un mezclador tipico de gas natural. No obstante la relación aire-combustible real entre la relación aire-combustible estequiométrica se puede variar de 0,6 a 1,2.

Dependiendo de los componentes del gas natural su relación estequiométrica varia. Según valores otorgados por Corpoven, de la composición promedio del gas natural en el area metropolitana [*], se tiene que la relación aire-combustible es 13,73 [**].

---

[1] SAE PAPER #852073
[*] Apéndice A
[**] Apéndice B

En los motores que trabajan con gasolina la relación estequiométrica es aproximadamente 15:1, aunque ésta relación varia entre 11 y 17 de acuerdo al suministro del carburador. Este, en una mayor o menor cantidad (según el régimen y condiciones de funcionamiento del motor), pulveriza y mezcla el combustible de forma homogenéa con el aire . La relación aire-combustible requerida por el motor, cuando trabaja con gasolina, se altera dentro de cierta medida al variar el régimen de funcionamiento, en general los motores requieren relaciones de mezcla que sigan en lo posible la forma de la curva de "GASOLINA" representada en la figura 5.5.2. Cuando se trabaja con gas las variaciones de la mezcla pueden ser mucho menores, incluso constante, como para asegurar un funcionamiento estable del motor (ver figura 5.5.2 curva de "GAS NATURAL").

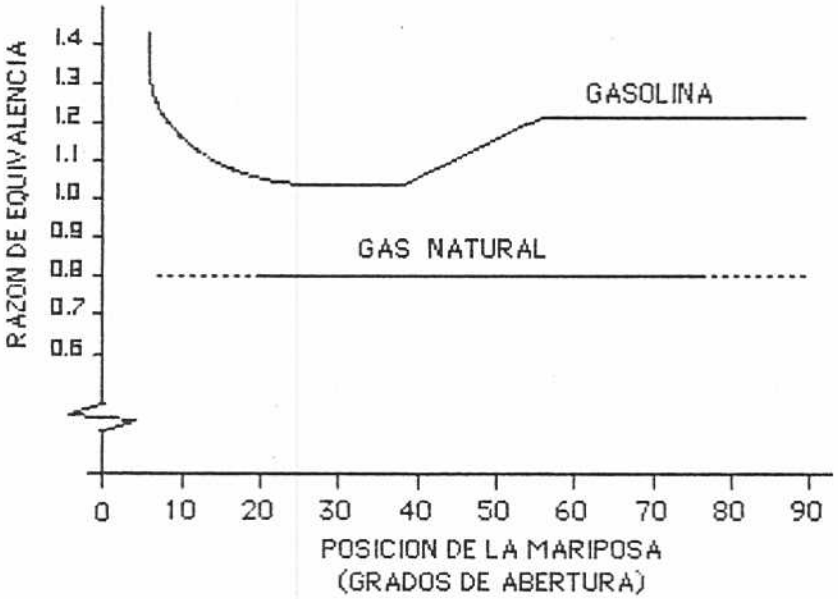


Figura 5.5.2 Razón de equivalencia vs Angulos de la Mariposa para la Gasolina y Gas Natural.

Los motores de combustión interna encendidos por chispa generalmente operan en un relativo estrecho margen de relación aire-combustible y con combustibles que tienen poca variación en el **radio de compresión anti-detonante** (volumétrico). Sin embargo, con el metano los motores pueden trabajar con un amplio margen de relación de compresión, y al aumentar la relación de compresión aumenta el margen de la relación aire-combustible, como puede apreciarse en la figura 5.5.3 y 5.5.4.

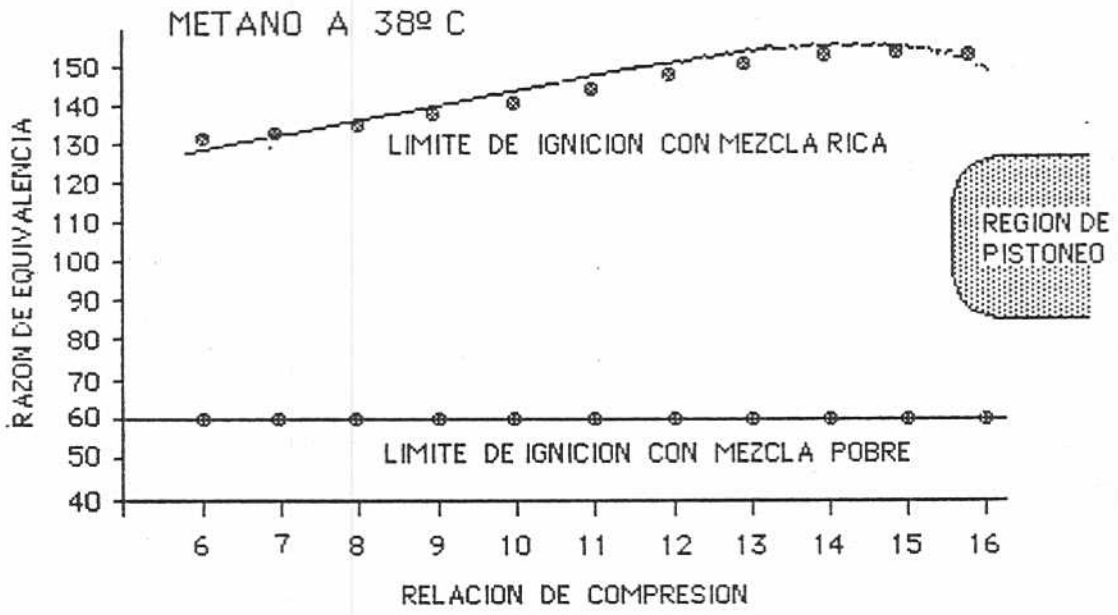


Figura 5.5.3 Efecto de la relación de compresión sobre los límites de encendido y detonación en función de la razón de equivalencia.

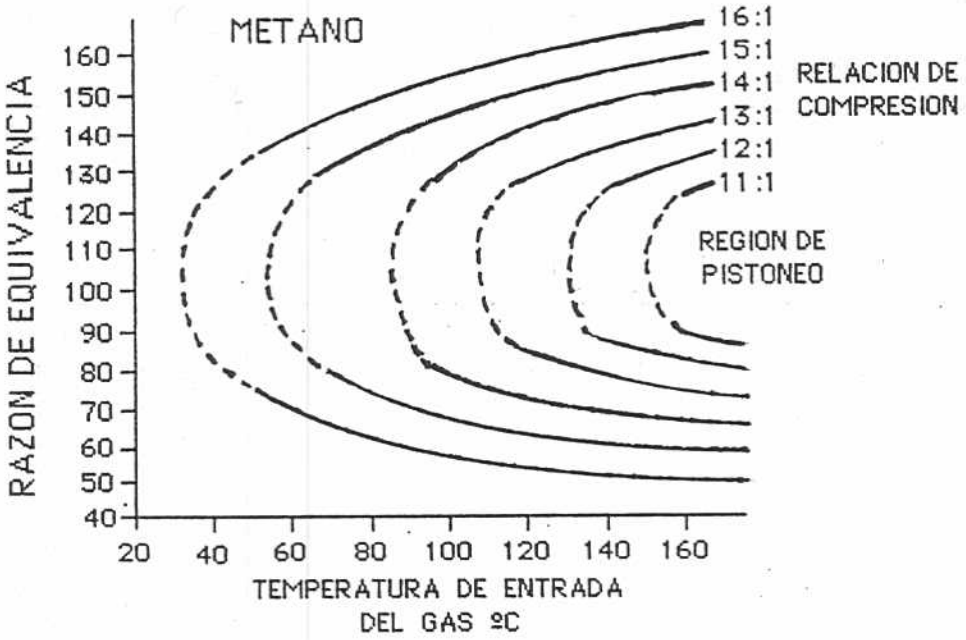


Figura 5.5.4 Variación de los limites de detonación con la temperatura de admisión y relación de en función de la razón de equivalencia.

5.6 TIEMPO DE ENCENDIDO Y VELOCIDAD DE LLAMA

Es importante conocer las caracteristicas del tipo de combustible usado en un motor, especialmente su velocidad de inflamación o propagación del frente de llama. La figura 5.6.1 representa una comparación entre la velocidad de llama del metano con la del iso-octano, a una presión de 88 psi y a una temperatura de 476 ºF. La velocidad de llama del metano es aproximadamente un 12% menor que la de la gasolina. Aunque la combustión se lleva a cabo bajo condiciones de turbulencia, la velocidad de llama es un factor importante en el avance de encendido de la chispa

requerida para obtener buenos rendimientos del motor [1].

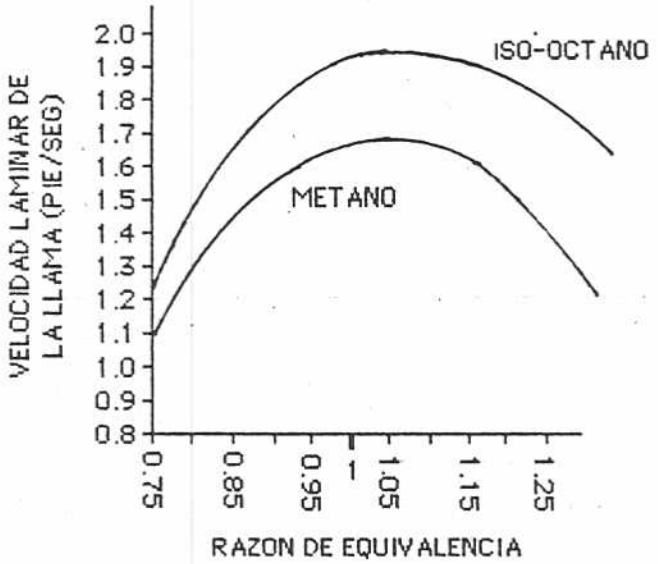


Figura 5.6.1 Velocidad de llama del Metano y del Iso-octano vs razón de equivalencia.

Pruebas llevadas a cabo por la Cooperative Fuel Research señalan que, un avance óptimo del encendido para el metano se obtiene incrementando 10º más el avance requerido para la gasolina, recomendado por la A.S.T.M. (Ver figura 5.6.2). Cuando la chispa no es adelantada adecuadamente, la combustión es tardía y lenta, lo que causa que ésta se lleve a cabo a través de la carrera de potencia y continue en la carrera de escape. El resultado es una válvula de escape con elevada temperatura, pérdida de calor a través del escape, baja presión media efectiva (ver figura 5.6.3) y baja eficiencia. Sin embargo, el avance total (inicial, por vacio y centrifugo) no deberia exceder de 45º, bajo cualquier

[1] SAE PAPER #841159, PAG. 3

condición, como se muestra en la figura 5.6.4.

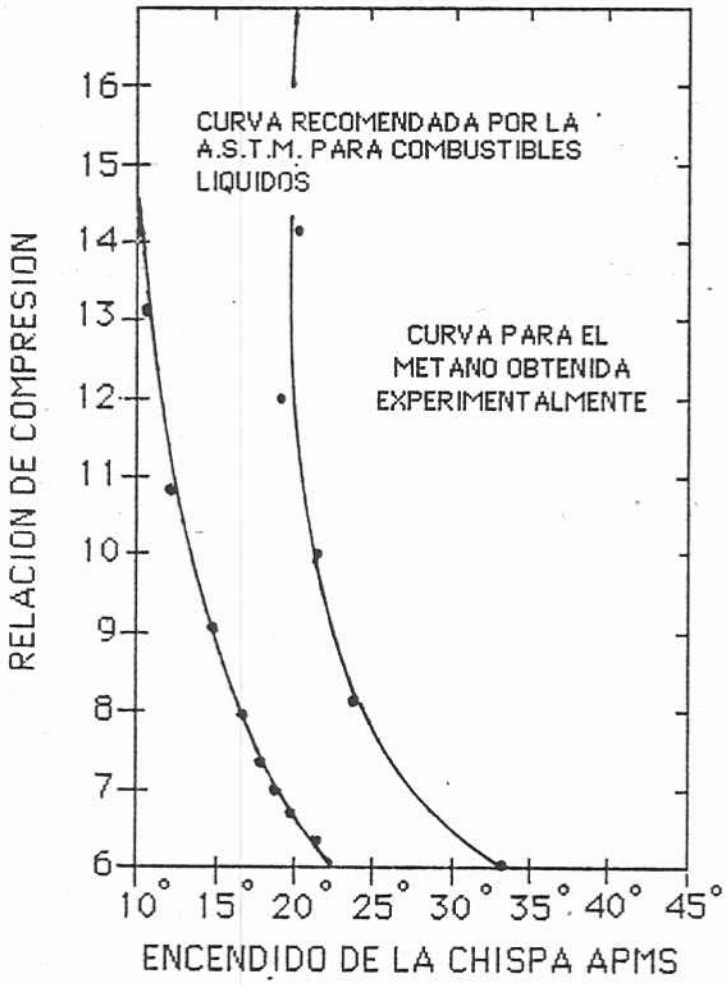


Figura 5.6.2 Relación de compresión vs adelanto del incendio antes del PMS.

Otro aspecto importante es el volumen de mezcla afectado por la transmición de calor debida a la chispa, o radio de encendido, que influye en la propagación del calor a los sucesivos volúmenes de mezcla, por tanto, sobre la velocidad del frente de llama. Dicho radio de encendido depende del voltaje de la chispa, la energia de la misma y de la separación de los electrodos de las bujias. A partir de la

energía de la chispa se puede calcular el volúmen de gas que alcanza la temperatura de autoignición y el tiempo necesario para que esto suceda: por ejemplo, en una mezcla de aire y metano (8,8% de CH_4) una chispa con una energía de 4 milijulios (0,0009 calorías) provoca en 3,4 milisegundos un aumento de la temperatura de 700 °C en 1,24 mm^3 de mezcla, mientras que la misma energía es capaz de aumentar la temperatura a 1500 °C en 0,58 mm^3 de mezcla, en un tiempo de 2 milisegundos [1].

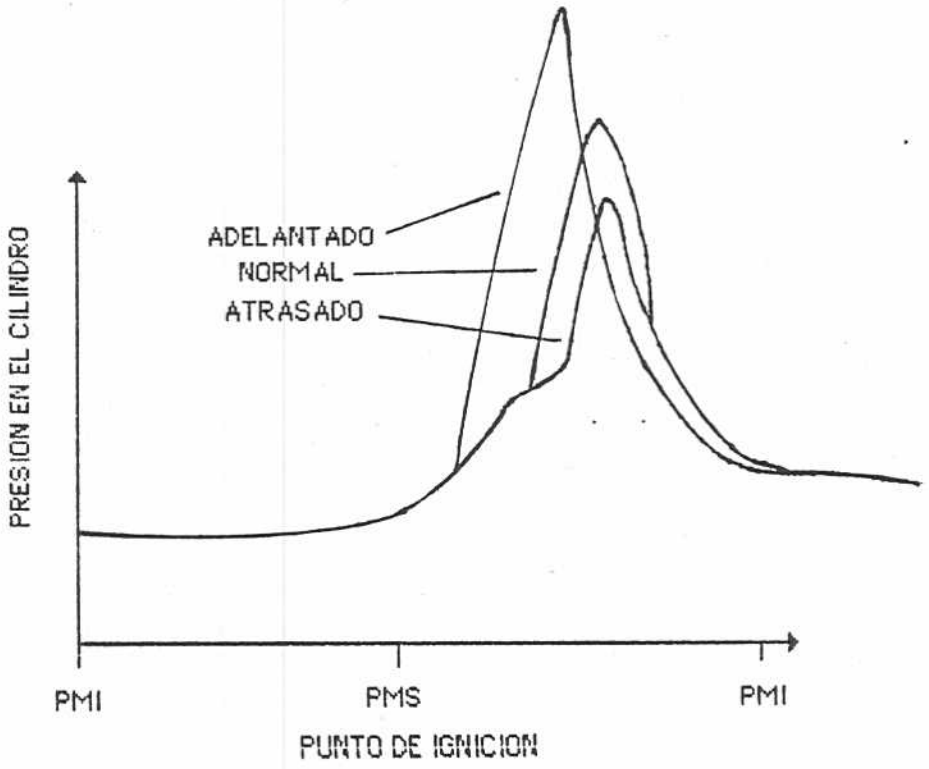


Figura 5.6.3 Efecto del punto de ignición sobre la presión del cilindro.

La cantidad de energía mínima necesaria para el encendido

[1] Giulano Salvi, "LA COMBUSTION", p. 667

de la mezcla, en un motor, depende del tipo de carburante utilizado, asi como del coeficiente de exceso de aire. Para el gas natural la energia minima de encendido de la mezla, resulta ser mayor que aquella necesaria para el encendido de la mezcla aire-gasolina, como se aprecia en la figura 5.6.5. En la práctica se suelen acercar los electrodos de las bujias y/o aumentar el voltaje del encendido.

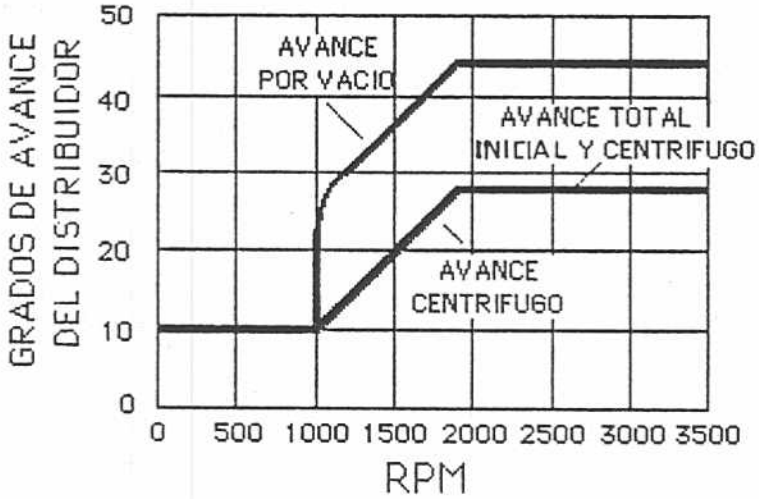


Figura 5.6.4 Variación del avance total de encendido en función de las RPM.

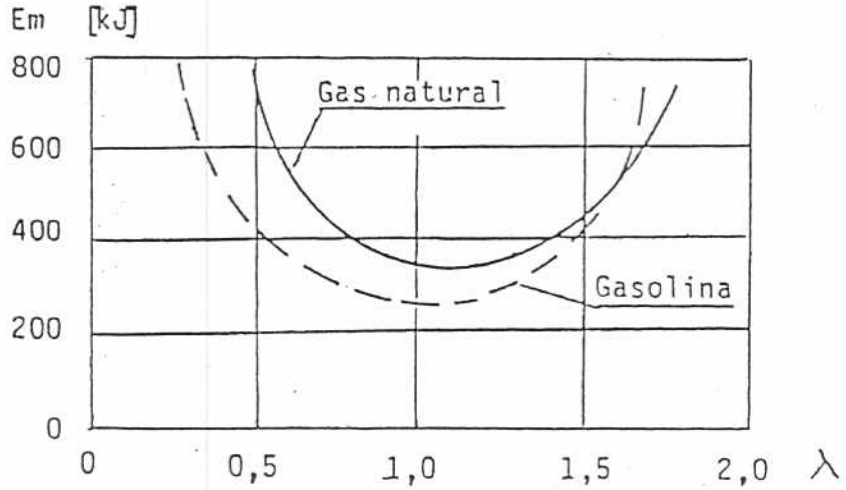


Figura 5.6.5 Energia minima necesaria para el encendido de la mezcla aire-combustible.

5.7 INFLUENCIA DEL AMBIENTE

Las condiciones metereológicas hacen variar las caracteristicas de funcionamiento de un motor. El consumo varía a través de una fase de balance energético, como lo es la forma de producir potencia en el motor. En otras palabras, con una cantidad dada de combustible se pueden obtener caballos de fuerza en mayor o menor cantidad, según las condiciones ambientales.

En lineas generales se puede afirmar que aumentando la presión atmosférica crece proporcionalmente la potencia producida. Esto depende del hecho que la densidad del aire es mayor y por ende:

1) Entra más oxigeno en el motor.

2) La combustión se desarrolla en un ambiente en el cual ya está presente una presión elevada que, al final de la combustión, dará lugar a un incremento proporcionalmente más alto.

Un aumento de presión puede ser de todas formas obtenido también, sin variar el número de moléculas de oxigeno, simplemente calentando el aire. De aquí la necesidad de tomar en cuenta la temperatura, que tendrá una influencia negativa: a medidad que ella aumenta, disminuye la potencia desarrollada. Hay que tener presente también, la acción que ejercen las condiones ambientales sobre la carburación, osea, sobre la dosificación del carburante, por parte del carburador o del mezclador (en el caso de que se trabaje con

gas natural). En definitiva viene utilizandose desde hace muchos años la formula:

$$N_1/N_o = P_1/P_o * (T_o/T_1)^{1/2}$$

Donde N_1 es la potencia de un motor a las condiciones de presión y temperatura P_1 y T_1, mientras N_o es la potencia que el motor tendría a presión y temperatura estandar, ($P = 1$ atm ; $T = 60$ °F).

En fin, hay que tomar en cuenta también la humedad. Como regla general ella disminuye la potencia por tres motivos:

1) Reduce la cantidad de oxigeno del aire aspirado (por que parte del espacio es ocupado por la humedad misma). Osea, es como si entrase menos aire;

2) Provoca un aumento de la relación aire-combustible (se enriquece en carburante);

3) Introduce pérdidas en la combustión porque el vapor baja la temperatura de la misma.

5.8 BALANCE TERMICO DEL MOTOR

Aproximadamente, sólo un 25% de la energia calorifica suministrada (E_e)a un motor por el combustible, se transforma en trabajo efectivo (W_{efec}), ya que el resto son pérdidas que incluyen: 20% por radiación (E_{rad}), 20% por refrigeración (E_{ref}) y un 35% de esta energia se pierde con los gases de escape (E_{gases}).

Representando el balance térmico como una ecuación se tiene:

$$E_s = W_{efec} + E_{ref} + E_{gases} + E_{rad}$$

- La energía suministrada se puede calcular mediante:

$$E_s = E_L * mf$$

- El trabajo efectivo se obtine del valor de la potencia medida y aplicando la ecuación:

$$W_{efec} = N * n$$

- La energía de refriferación se calcula con las entalpías del agua de refrigeración a su entrada al motor y a la salida del mismo y con los caudales que aparecen en el apéndice C [1].

$$E_{rad} = (h_{AE} - h_{AS}) * m_A$$

- Energía de los gases puede calcularse como el cambio de entalpia, entre la entrada y la salida de la mezcla, y el consumo de aire y combustible sumados:

$$E_G = h_G * (m_f + m_a) - h_a m_a - h_f m_f$$

- La energía restante (por radiación) se obtiene por simple diferencia.

5.9 BALANCE TERMICO DE UN FRENO HIDRAULICO

Un freno hidráulico transforma el trabajo de un motor en energía calórica absorvida por el agua de frenado. Esta energía que el freno toma del motor para ejercer su acción de frenado, la disipa calentando un flujo contínuo de agua. Así, calculando la energía calórica absorvida por el agua de

[1] Ameijeiras, Juan y Trujillo Jorge "DISEÑO, CONSTRUCCION Y EVALUACION DE UN BANCO DE PRUEBAS DE C.I.E. POR CHISPA.

frenado y suponiendo que las pérdidas por radiación a través de la carcasa del freno son despreciables, puede obtenerse el trabajo realizado por el motor, y, a partir de las rpm, la potencia del mismo.

El valor de potencia asi obtenido puede compararse al indicado en la balanza como verificación.

El balance térmico del freno puede expresarse en forma de ecuación de la siguiente manera:

$$\text{Energia al Freno} = (h_{AS} - h_{AE}) * m_A$$

Los valores de entalpia pueden encontrarse en el apéndice D a partir de la temperatura del agua y suponiendo que el agua se encuentra en el punto de saturación a la temperatura correspondiente por lo que no se comete un mayor error.

6. MODIFICACIONES AL BANCO DE PRUEBAS Y SISTEMAS PERIFERICOS

Para la realización de este trabajo especial fue necesario realizar algunas modificaciones y reparaciones (especialmente al sistema de escape y cámara del motor) al banco de pruebas.

La instalación del equipo de conversión de gas natural implica pequeñas modificaciones, especialmente al sistema de carburación (ver sección 6.5) y refrigeración (ver sección 6.2).

Las otras modificaciones y reparaciones incluyen también: reparación del motor de arranque, sistema de vapores de aceite y puesta en funcionamiento del cuenta revoluciones que posee el freno hidráulico.

6.1 SISTEMA DE ESCAPE

El viejo sistema de escape del banco de pruebas presentaba una serie de inconvenientes, principalmente su proximidad al motor, que dificultaba las operaciones sobre el mismo y se corria el riesgo de quemaduras. Para evitar esto el sistema de escape estaba aislado con de fibra de

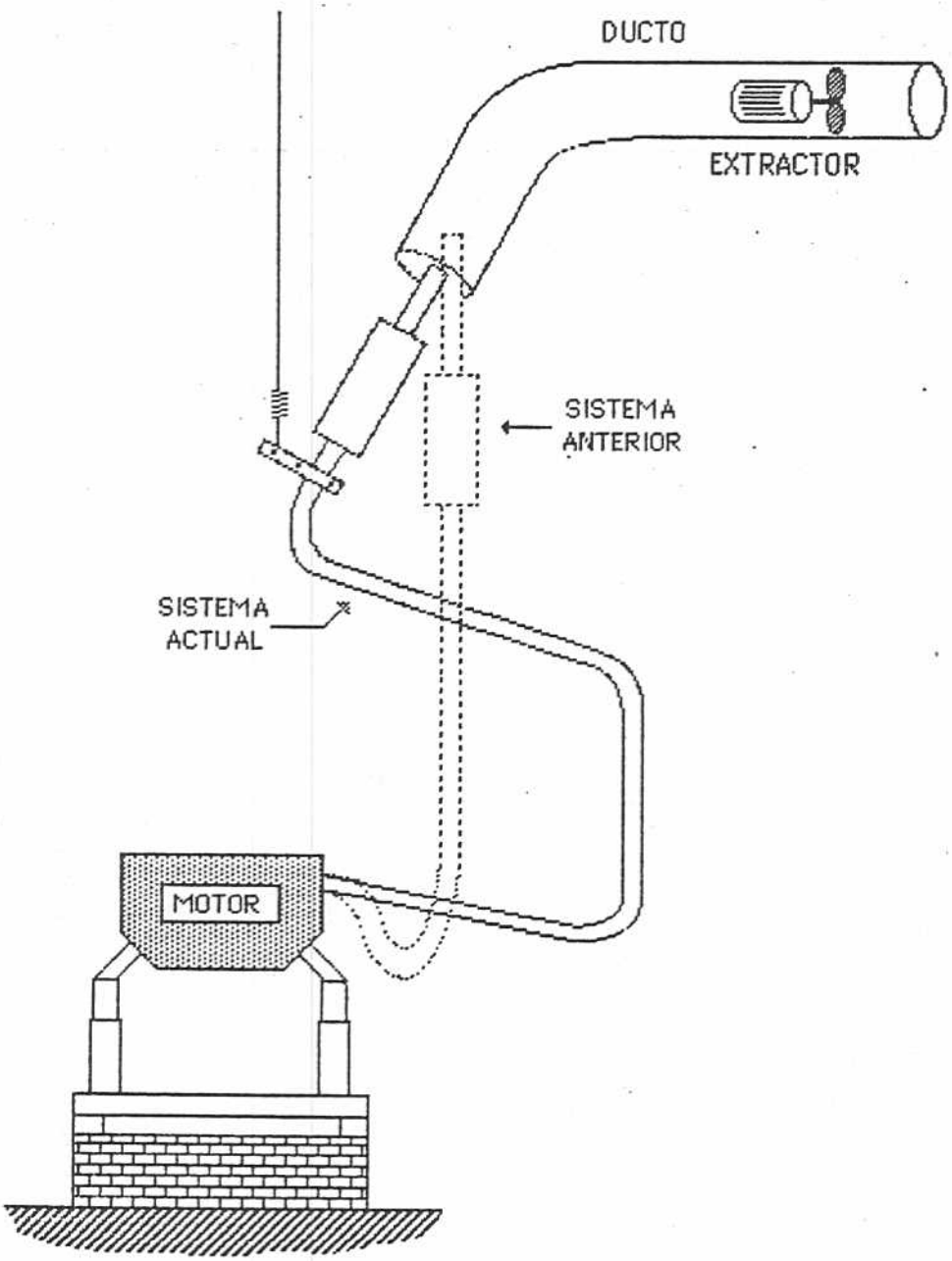


Figura 6.1.1 Sistema de escape.

vidrio que trae como consecuencia una menor disipación de calor al medio ambiente provocando un sobrecalentamiento de las válvulas de escape; que puede ser un factor importante en la deformación de la cámara del motor (es de aluminio, material susceptible a las altas temperaturas).

Para evitar lo anteriormente señalado se modificaron los radios de curvatura del sistema de escape para alejarlo lo más posible del motor (ver figura 6.1.1).

Fue necesaria también la reparación del extractor de los gases de escape ubicado al final del ducto de extracción ya que este no funcionaba.

6.2 SISTEMA DE REFRIGERACION

Anteriormente el sistema de refrigeración del motor consistia principalmente de un radiador y de la bomba de agua del mismo motor, utilizandose también un ventilador externo que simulaba las condiciones de operación normales de los motores en los vehiculos; siendo esto no suficiente como para mantener las temperaturas de operación del motor en sus niveles pre-establecidos, se decidio, instalar un ventilador accionado por una de las poleas del motor. Otras opciones incluian colocar una ventilador accionado por un motor eléctrico controlado por válvulas de temperaturas y relés; sin embargo esta solución es más complicada, costosa y relativamente menos confiable, a demás de que la solución tomada presenta la gran ventaja de aumentar el caudal de

aire a medida que aumenta el régimen del motor. Para la instalación de este ventilador (usado en el sistema de enfriamiento de un vehiculo comercial) fue necesario realizar una pieza de acople, entre la polea de la bomba de agua y el aspa, así como también, la construcción de un colector (realizado en el laboratorio con láminas galvanizadas) para asegurar que todo el caudal de aire pase por el radiador. En la foto 6.2.1 se muestra la pieza de acople, el colector y el ventilador.

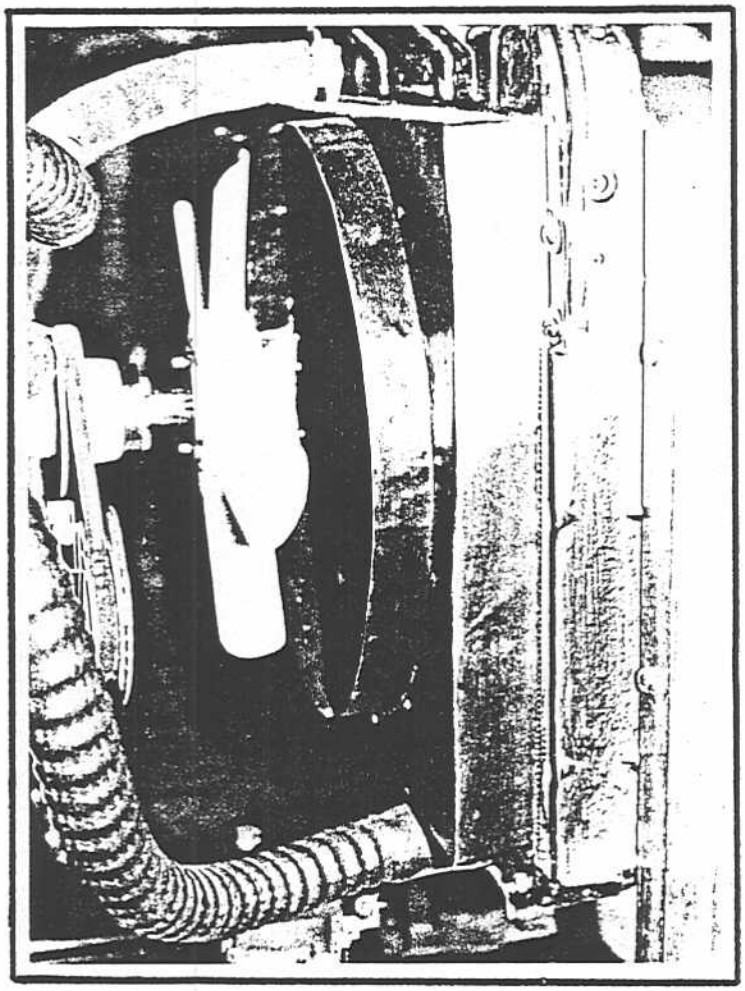


Foto 6.2.1 Pieza de acople, ventilador y colector.

Otra importante modificación al sistema de enfriamiento, consiste en tomar agua caliente de éste para llevarla al reductor-regulador de presión, con el objeto de evitar el congelamiento (los gases al pasar de una elevada presión y ser expandidos bruscamente a una baja presión presentan la característica de enfriarse).

Estas tomas se hicieron por medio de dos "T", realizadas con tubos de hierro gavanizado, a la entrada y salida del radiador, como se muestra en la figura 6.2.3.

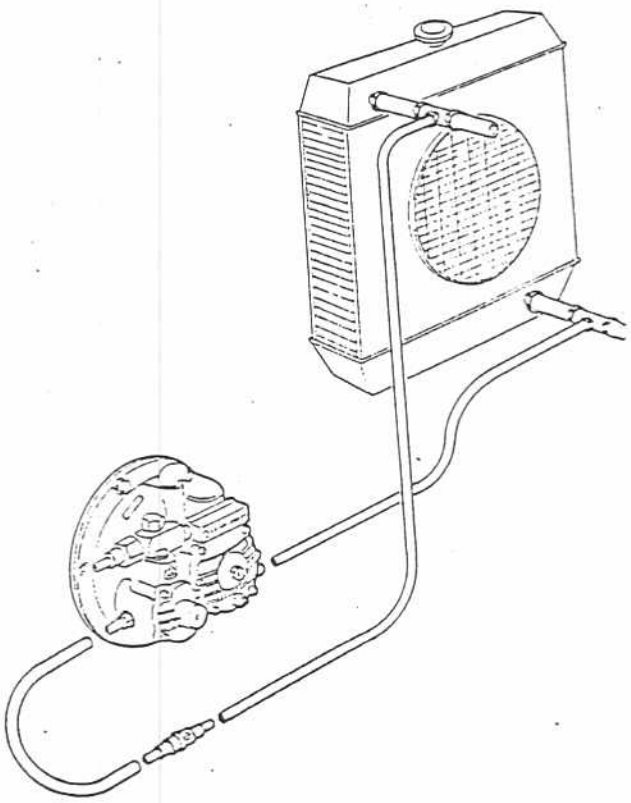


Figura 6.2.3 Instalación del sistema de calefacción del reductor.

6.3 ADAPTACION DEL MEZCLADOR

Para la instalación del mezclador fue indispensable modificar el sistema de aspiración de aire. El mezclador utilizado es el adecuado para el carburador existente, y va colocado justamente encima de el. Para la **adaptación del mezclador al carburador,** se utilizó un envase de hojalata sujetado al carburador y en la tapa del envase se coloca la entrada de aire. Para reforzar las tapas del envase sujetas a deformación por la aspiración del motor, se colocaron cuatro tubos de cobre de 1/2" perpendiculares a ambas tapas y apoyados sobre una base sólida del carburador. Para aclarar esta sección se muestra la foto 6.3.1, que señala la disposición del mezclador y del envase, asi como los tubos de cobre utilizados para reforzar la estructura de hojalata.

En la figura 6.3.2 se indica el esquema del sistema de aspiración de aire anterior y actual.

6.4 CAMARA DEL MOTOR

La cámara del motor asi como su empacadura, que se encuentra entre la culata y el bloque del motor, se encontrarón en mal estado. La camara estaba deformada y la empacadura quemada. Para la reparación de la camara se utilizarón los servicios de un taller especializado; a ésta se le rebajaron unas decimas de milimetros, y se utilizó una empacadura de mayor espesor para compesar la disminución del volumen muerto que provoca la rectificación de la cámara.

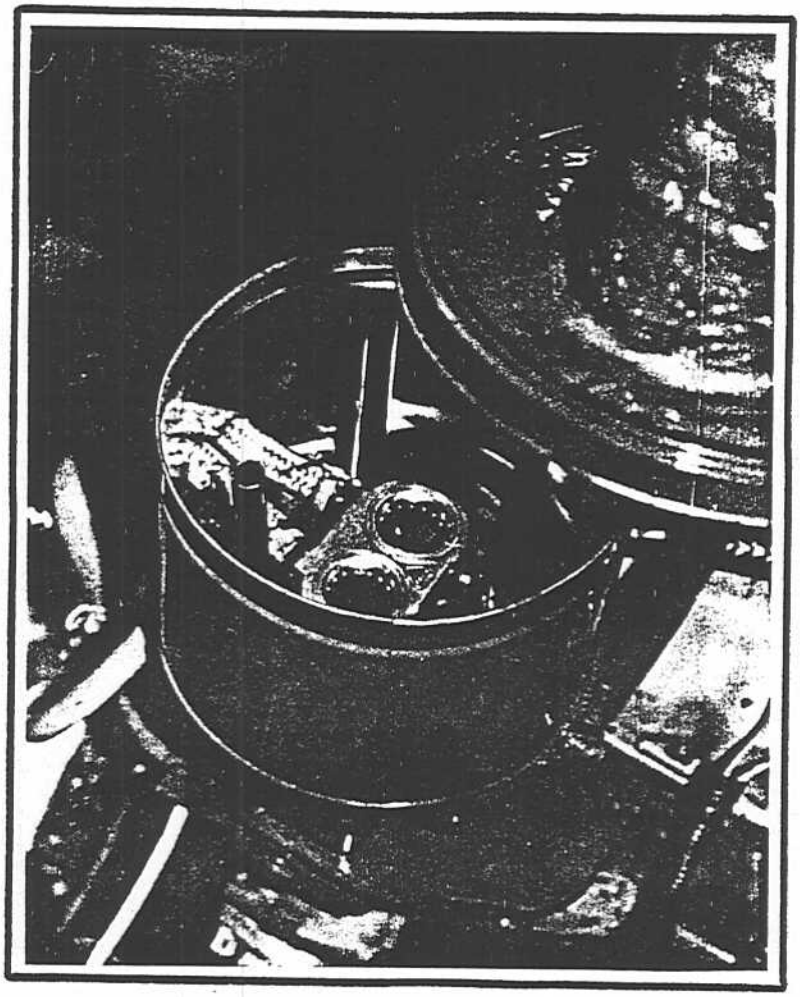


Foto 6.3.1 Adaptación del mezclador.

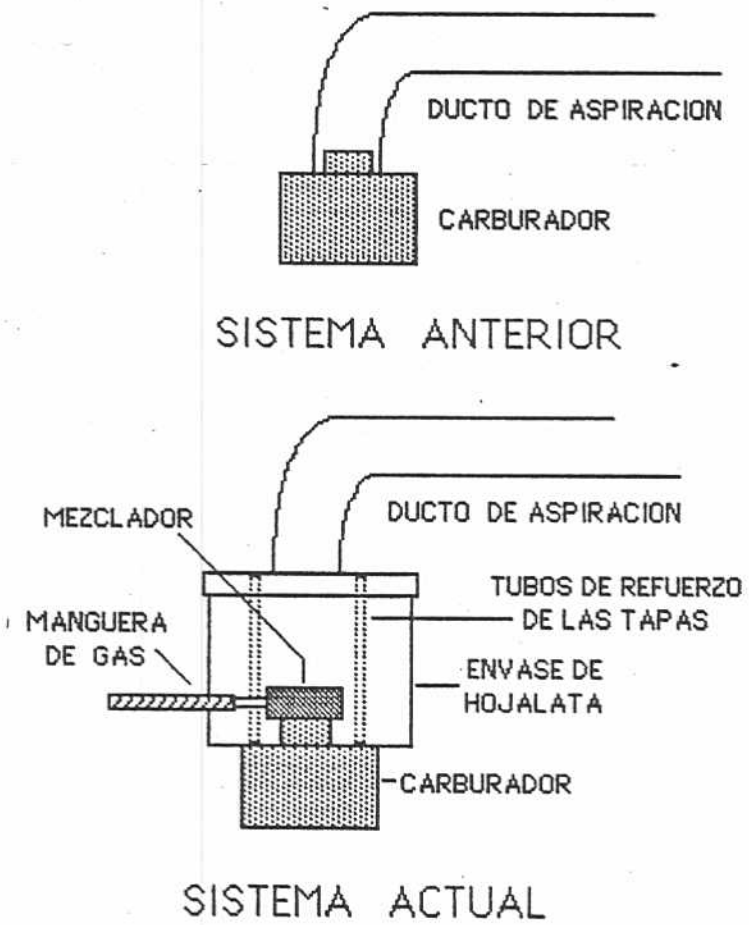


Figura 6.3.2 Esquema del sistema de aspiración del aire.

6.5 VAPORES DE ACEITE

Los vapores producidos por el calentamiento del aceite del motor, así como, la pérdida de compresión por el desgaste de los anillos del pistón y paredes de los cilindros, tienen su desahogo en la parte superior del motor

(tapa de válvulas). El volumen de estos vapores en los motores nuevos es bajo y son reciclados al carburador, sin embargo, en los motores con cierto desgaste dicho volumen es mayor, lo que dificulta la carburación porque desplaza parte del aire necesario para una correcta combustión, especialmente a bajas revoluciones del motor.

El motor del banco de pruebas presenta cierto desgaste, por la cual es conveniente que los vapores de aceite no sean reciclados al carburador sino, llevados directamente al ducto de extracción de gases de escape.

7. EQUIPOS DE CONVERSION DUAL

Para la utilización del gas natural como combustible en un motor de encendido por chispa se requiere de una serie de equipos, que dependen del tamaño del motor y tipo de carburador. Cabe destacar que se puede utilizar el gas natural u otro tipo de combustible alterno (Gas Liquado de Petróleo, Gas Natural Liquado) en otros tipos de motores como el DIESEL o en motores diseñados para operar exclusivamente con combustible gaseosos.

Entre los componentes que conforman el sistema de conversión se encuentran: cilindros de almacenamiento, reductor de presión, mezclador de gas, así como una serie de válvulas (de llenado de las bombonas, principal de cierre, ajuste de mezcla, etc.), tuberias, conexiones y mangueras de gas, aire y agua. En la figura 7.1 se muestra un esquema detallado del sistema de conversión para gas natural.

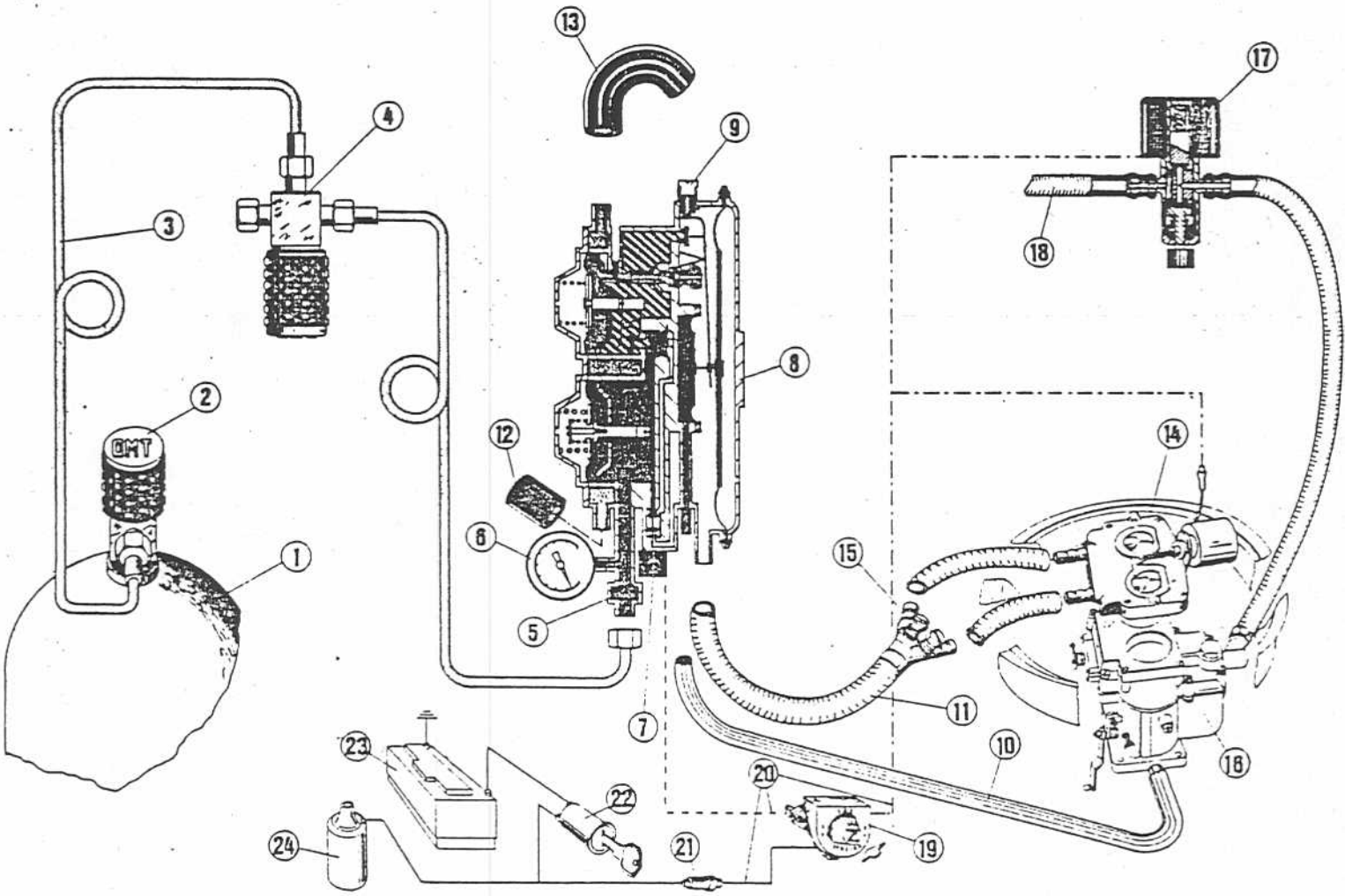


Figura 7.1 Esquema de instalación y funcionamiento del sistema de gas natural comprimido.

LEYENDA

1) Cilindros de metano, en comunicación con la tubería. La presión del gas,en el interior de los mismos llega a 3000 psi.
2) LLave de cierre de los cilindros.
3) Tubería principal del Gas Natural.
4) Válvula de carga, que permite el reabastecimiento de los cilindros sin removerlos. Regula el flujo del gas entre cilindros y tubería principal.
6) Manómetro, para el control de la presión del gas que llega a los cilindros
7) Electroválvula del metano con "cebador" electrico. Este dispositivo desarrolla tres importantes funciones: pérmite la intercepción del gas proveniente del primer salto de reducción del reductor cada vez que se saca la llave del tablero, evitando de tal manera el riesgo de pérdida de gas. Corta el flujo del gas cuando se conmuta a nafta. Pérmite un enriquecimiento

suplementario en cada puesta en marcha, favoreciendo de tal manera el arranque especialmente con motor en frio.

8) Reductor: descomprime el gas natural de la presión de almacenamiento (3000 psi) existente en los cilindros, a la presión de operación y lo envia al mezclador en la cantidad requerida por la aspiración del motor.
9) Registro del mínimo.
10) Tubo de conexión con el vacío o depresión del motor.
11) Tubo de conexión del reductor con el mezclador.
12) Tubo de circulación del agua (hacia el reductor).
13) Tubo de circulación del agua (desde el reductor).
14) Mezclador del gas natural, fijado al carburador; ejecuta las funciones normales de un carburador.
15) Regulador del caudal de gas natural.
16) Carburador.
17) Electroválvula para la gasolina; interrumpe el flujo de gasolina al carburador proveniente de la bomba cuando el motor es alimentado a gas natural.
18) Tubo de conexión con la bomba de gasolina.
19) Conmutador rotativo, para la selección del funcionamiento a gasolina o al funcionamiento a gas y viceversa. Además presionando el pulsador se acciona el "cebador" eléctrico, el cual provoca la apertutra de una válvula con la consecuente salida del gas, sinque intervenga la aspiración del motor.
20) Conexiones eléctricas de mando entre el conmutador de mando y electroválvulas.
21) Fusibles.
22) Llave del tablero.
23) Batería.
24) Bobina.

7.1 SISTEMA DE ALMACENAMIENTO

Para el almacenamiento del gas natural se requieren de cilindros que soporten elevadas presiones a temperatura ambiente. Esta presión se ha estandarizado a 3000 psi como máximo y algunos paises suelen trabajar con 2400 psi. El material con que suelen fabricarse los cilindros, es de acero al carbono, pero existen cilindros de otros materiales como el aluminio, reforzado con fibras al carbono, cuyo peso es un 60% menor que las de acero. La tabla 7.1.1 muestra la relación peso/volumen para tanque de 50 litros de capacidad (de agua) y diferentes tipos de materiales. Se puede

observar que el peso de los cilindros convencionales (los de acero al carbono) oscilan en alrededor de 1 kg por litro de agua de capacidad, lo cual representa un peso significativo; más aún, si se considera que el volumen de gasolina equivalente contenido en un tanque de gas es aproximadamente la cuarta parte de su capacidad real en litros de agua.

TABLA 7.7.1
CILINDRO DE ALMACENAMIENTO GNV

Tipo de material		Dimensiones D [mm]	Dimensiones L [mm]	Peso del Cilindro [kg]	Relación Peso/Volumen [kg/lt]
Acero	DOT	230	1.477	64	1,28
	Norma Italiana	227	1.484	49,1	0,98
Acero Reforzado		290	1.006	49	0,98
Aluminio Reforzado			335	990	45	0,90
Material Compuesto			350	750	22	0,44

Notas: 1) Cilindros con capacidad de 50 lts.

2) Volumen de gas almacenado 12,5 M^3 (a presión y temperatura normal).

3) Volumen de gasolina equivalente 12,5 m^3.

Si la cantidad de gas natural que un tanque de 50 lt puede almacenar a la presión máxima permisible, corresponde alrededor de 12,5 lt (variará según el contenido de BTU o KJ) de gasolina, entonces, un vehiculo con un consumo de gasolina de 10 lt/100 km, podrá recorrer 125 km con gas natural.

Las normas vigentes en los diferentes paises, en donde se usa gas natural como combustible automotor, exigen que se realicen pruebas hidrostáticas a los cilindros de almacenamiento cada cierto tiempo.

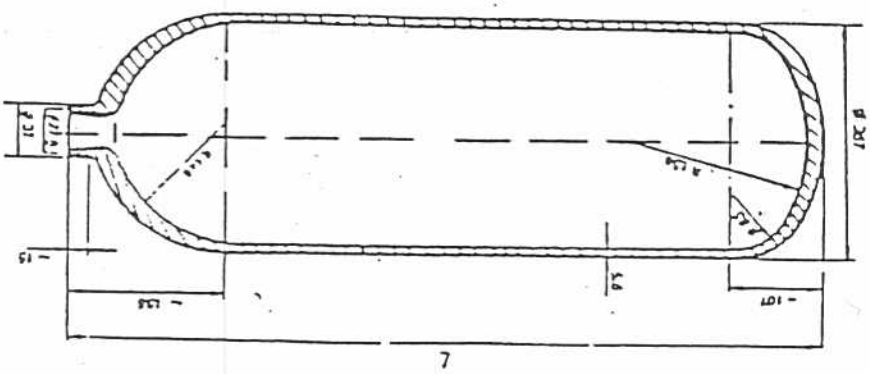


Figura 7.1.1 Bombona de acero utilizada en vehículos automotores para almacenar Gas Natural Comprimido (GNC).

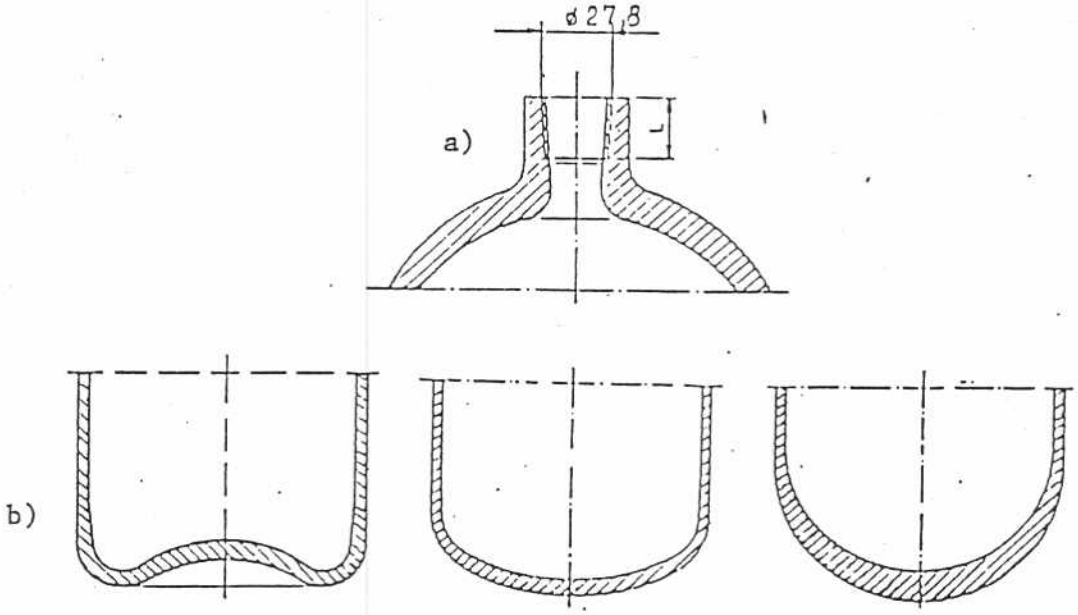


Figura 7.1.2 (a)Agujero con rosca cónica, (b)Diferentes formas del fondo de las bombonas.

7.2 VALVULA DE CIERRE DE LAS BOMBONAS

Cada bombona debe estar equipada de una válvula de cierre manual. Estas válvulas siempre son de dos boquillas en forma de T (en caso de utilizar varios cilindros de almacenamiento en paralelo), para la salida del gas, con roscas interiores de M 14x1 para la conexión de los tubos de alta presión, mientras que la rosca que va conectada a la bombona es de 3/4 NPT (14 hilos por pulgada). Hay que señalar que la llave de cierre sólo impide o permite el paso del gas que se encuentra en la bombona hacia las dos boquillas, quedando siempre libre el flujo de gas entre las boquillas. Ver foto 7.2.1 y 7.2.2.

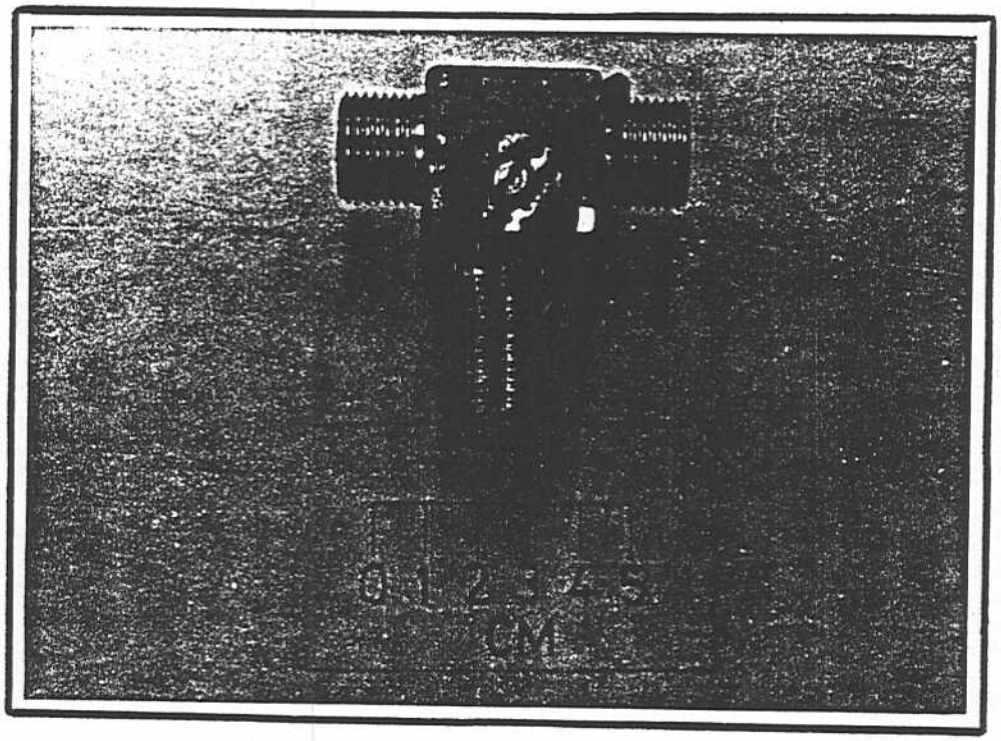


Foto 7.2.1 Válvula de cierre de las bombonas.

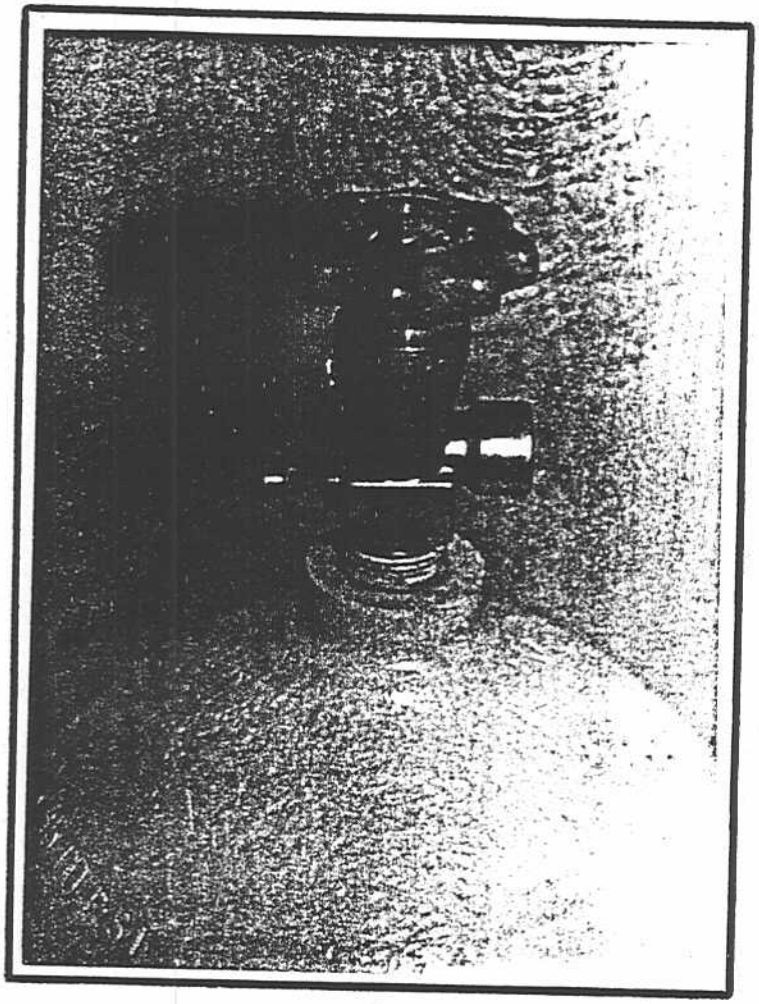


Foto 7.2.2 Válvula de cierre del cilindro de almacenamiento, utilizada en el banco de pruebas.

Estas válvulas están provistas de un sistema de alivio de la presión, en caso de que las bombonas sean cargadas a una presión mayor que la permitida o por un aumento de la temperatura que trae consigo un incremento de la presión.

7.3 VALVULA INTEGRAL DE CIERRE Y LLENADO

Esta válvula es de tres vías, una via para la conexión del pico de llenado y las dos restantes son conectadas al reductor y cilindro de almacenamiento. Estas conexiones son hechas por medio de tuberias de alta presión. Para el llenado de las bombonas se cierra el paso del gas hacia el reductor y se coloca el pico de llenado en la via correspondiente de la válvula. Una vez llenas las bombonas, se retira el pico de llenado y se abre la válvula, permitiendo el flujo de gas de las bombonas al reductor.

Otra función de la válvula principal es la de cerrar el flujo del gas entre las bombonas y el reductor. Este cierre se realiza en caso de que el vehiculo y/o el sistema de gas no sea utilizado por un tiempo prolongado.

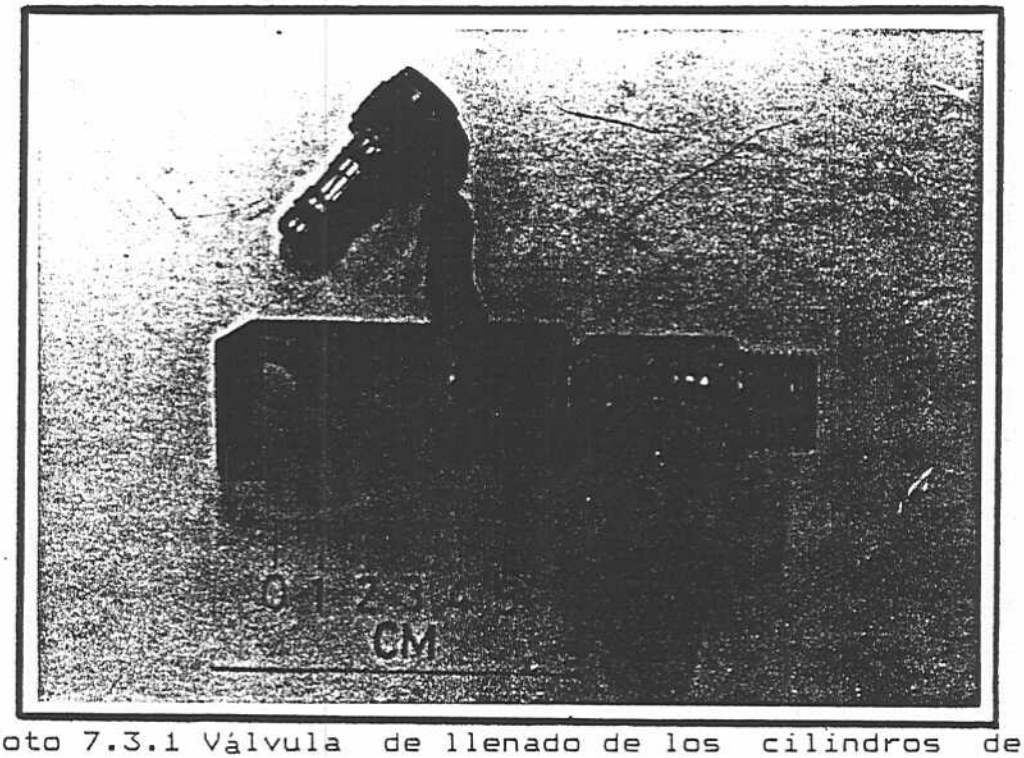


Foto 7.3.1 Válvula de llenado de los cilindros de almacenamiento

7.4 INDICADOR DE NIVEL

El indicador de nivel del gas, indica la presión en el sistema, que incluye los cilindros, tuberia y válvulas (la presión tiende a igualarse en todos los puntos del sistema), por medio de un dispositivo electrónico que recibe los impulsos de un trasductor colocado en la entrada de gas del

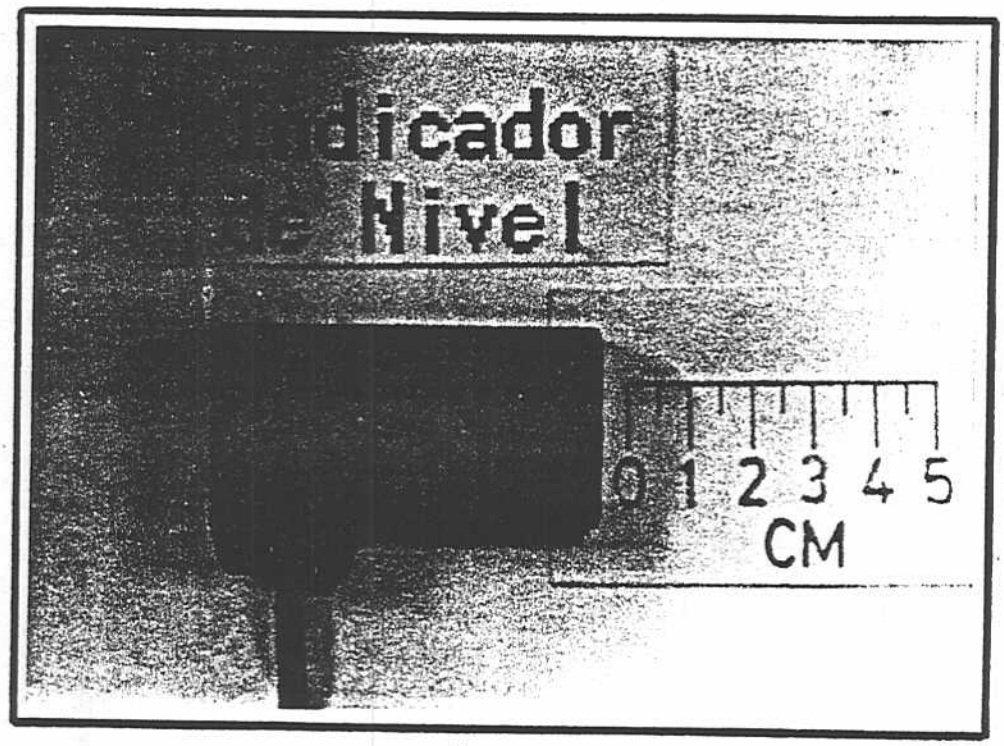


Foto 7.4.1 Indicador de nivel

reductor. Este dispositivo es utilizado para sustituir las funciones de un manómetro de presión, ya que el uso de éste implica el paso de una tuberia de gas dentro de la cabina de los vehiculos, que por normas de seguridad se prohibe internacionalmente. El manómetro, que es más preciso que el dispositivo electrónico (15% de error), se coloca en la

tubería principal, cercana a la válvula de llenado para controlar la presión del sistema en el momento de llenar los cilindros.

7.5 SOLENOIDE DE GASOLINA y GAS

Cuando se trabaja con gas natural es necesario que el paso de gasolina hacia el carburador quede bloqueado. Para ello se utiliza una electroválvula que permite el paso de gasolina sólo cuando está energizado el solenoide. Dicha válvula está equipada con un dispositivo, que permite su accionamiento mecánico en caso de falla.

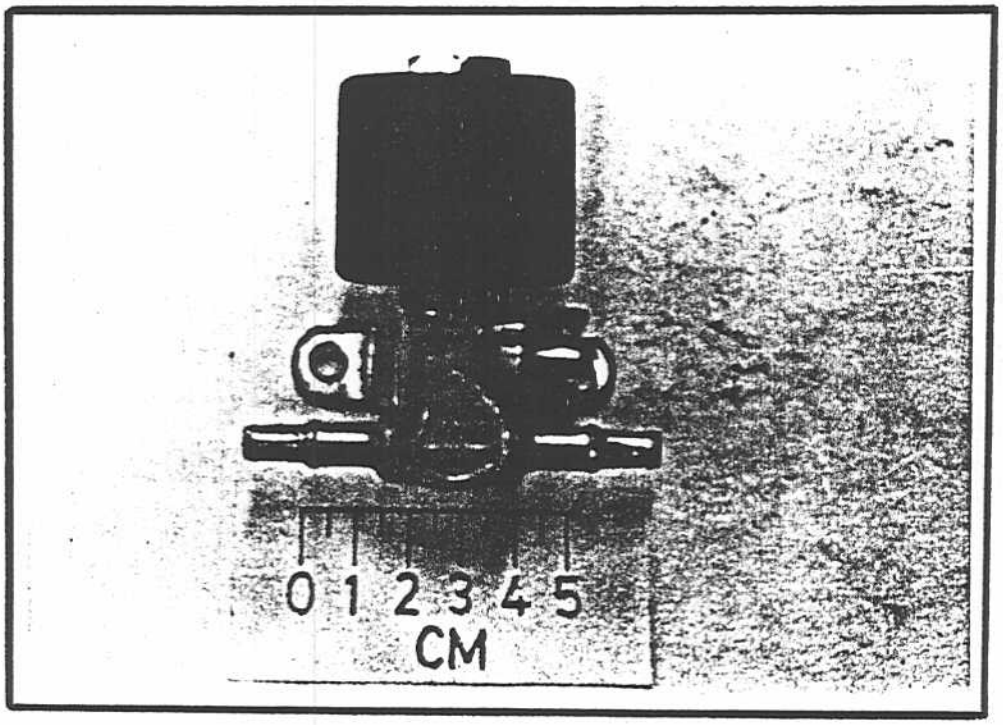


Foto 7.5.1 Electroválvula de la gasolina.

De la misma manera se requiere de un solenoide que, cuando no está energizado, no pérmita el paso de gas hacia el motor, para poder trabajar con gasolina. Este solenoide esta ubicado en el reductor de presión.

7.6 SELECTOR DE COMBUSTIBLE

El uso de un determinado tipo de combustible implica energizar un solo solenoide, bien sea el de gas o de gasolina. Por tanto se requiere de un selector de combustible que active una electroválvula a la vez. (Ver Foto 7.6.1)

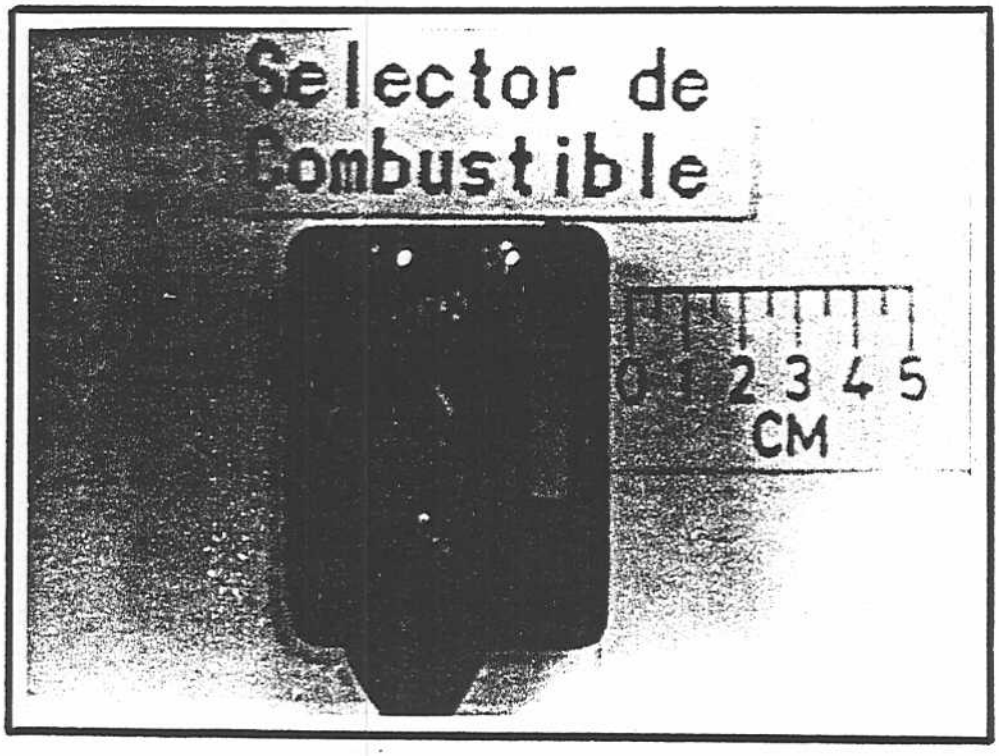


Foto 7.6.1 Selector de combustible.

Estos selectores generalmente presentan tres posiciones: una de ellas para trabajar con gas, la otra para trabajar

con gasolina y una intermedia que hace posible vaciar la cámara del flotador del carburador, antes de conectar la alimentación con gas.

Además los selectores de combustibles presentan un pulsador, que presionandolo activa un "cebador" eléctrico, el cual provoca la apertura de una válvula en el reductor de presión con la consecuente salida del gas, sin que intervenga la aspiración del motor.

7.7 TUBERIAS DE ALTA PRESION Y MANGUERAS DE BAJA PRESION

Para soportar la elevada presión a la que se encuentra el gas en los cilindros de almacenamiento, y llevarlo al reductor de presión se utiliza una tubería de acero de alta presión. Dicha tubería presenta un diámetro externo de 1/4 de pulgadas, con un diámetro interno de 1/8 de pulgadas, y va recubierta por un protector para evitar la corrosión, así como pequeños golpes.

A lo largo de la tubería se suelen realizar bucles, ubicados cerca de la válvula de llenado (en la tubería que va desde la válvula hacia el cilindro), para amortiguar la entrada de gas del surtidor al cilindro. Otros bucles se realizan entre bombonas que se encuentran en paralelo, para controlar las vibraciones o pequeños desplazamientos que se pudieran producir entre ellas.

Una vez reducida la presión por el reductor, se requiere de una manguera para llevar el gas al mezclador-dosificador

y suele ser de goma recubierta por una tela metálica para protegerla del calor y golpes menores. Su diámetro es mucho mayor que la tubería de acero por la expansión que sufre el gas al pasar de alta a baja presión y por el caudal de gas que requiere el motor.

CONEXIONES DE ALTA PRESION

Para unir la tubería de alta presión con las diferentes válvulas y reductor, se utilizan conexiones de alta presión como la mostrada en la figura 7.7.1.

PREPARADO DE CONEXIONES DE ALTA PRESION

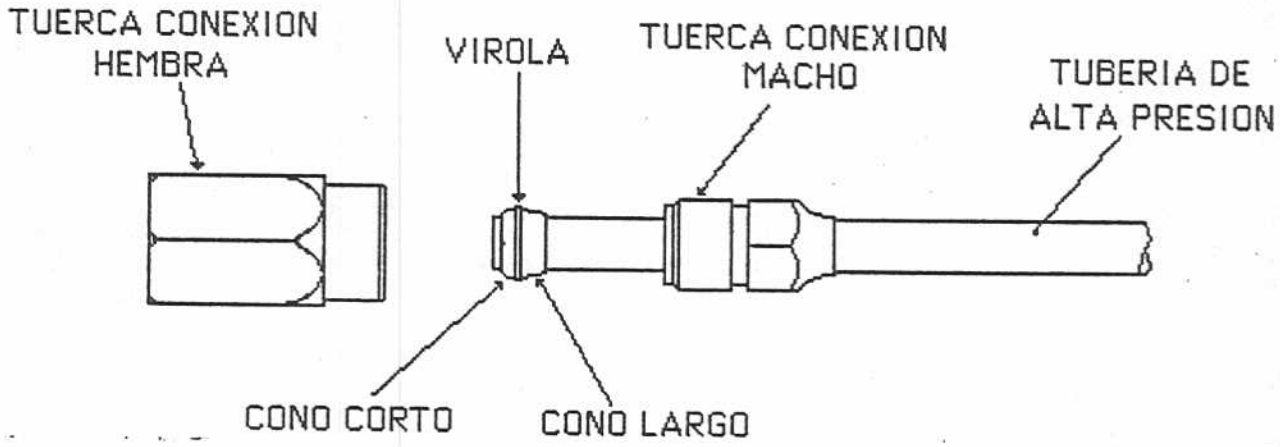


Figura 7.7.1 Conexiones de alta presión.

7.8 MEZCLADOR-DOSIFICADOR

El mezclador-dosificador tiene como función, mezclar adecuadamente el gas natural con el aire, y esto se lleva a cabo utilizando el vacio creado en el multiple de admisión del motor. En la foto 7.8.1 se muestra el mezclador utilizado en el banco de pruebas.

Existen diferentes tipos de mezcladores: de acuerdo al diseño, ubicación y tipo de motor. Según su diseño el mezclador puede ser de tipo venturi, válvula aire-gas y boquilla; éste último consiste en perforar el carburador hasta llegar al venturi y colocarle una boquilla radialmente en el difusor de venturi.

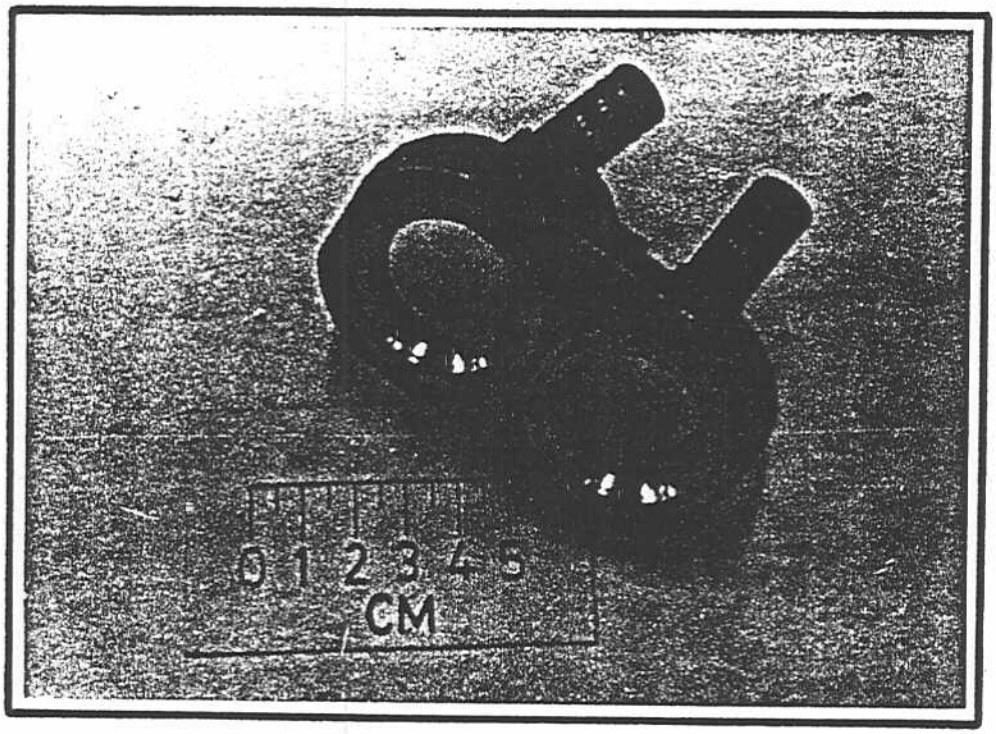
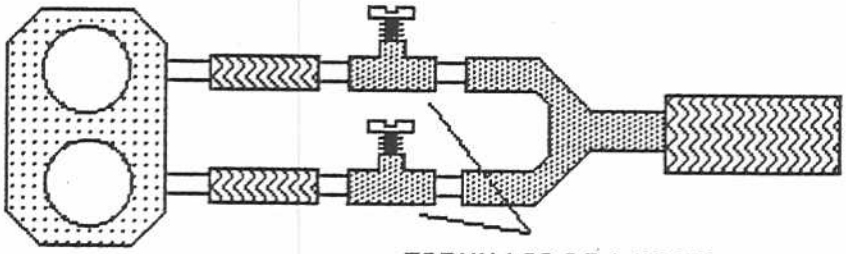


Foto 7.8.1 Mezclador-Dosificador (doble boca).

El mezclador puede ubicarse en diferentes posiciones, entre ellas se encuentran: dentro del filtro de aire, entre el filtro de aire y el carburador, a la entrada del filtro de aire, etc.

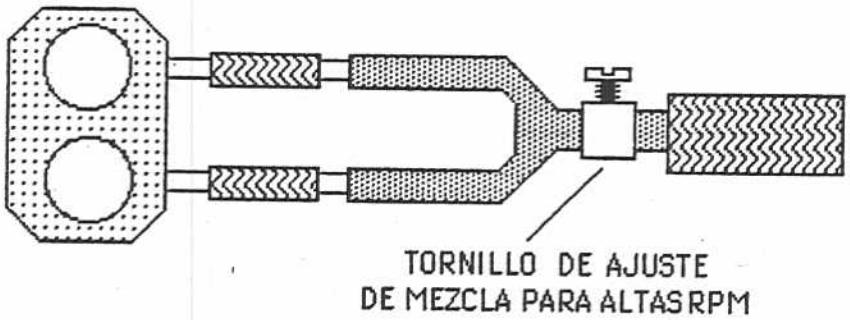
REGULACION DE LA MEZCLA AIRE/GAS

Cada mezclador debe estar provisto de una llave que controle el paso de gas hacia el mezclador y de esta forma mantener la relación aire-combustible apropiada. Dependiendo del tipo de carburador, se requerirá de una sola llave de paso de gas, si la o las bocas del carburador son de apertura simultánea, y de una llave de paso por cada boca si estas son de apertura progresiva. La figura 7.8.2 presenta un esquema del número y la posición de llaves de paso de gas, para un carburador de dos bocas: a) de apertura progresva y b) de apertura simultanea.



SISTEMA PARA CARBURADORES DE DOBLE BOCA CON ABERTURA **PROGRESIVA** DE ESTAS

Figura 7.8.2.(a) Regulador de la mezcla (aire/gas) con apertura progresiva.



SISTEMA PARA CARBURADORES DE DOBLE BOCA
CON ABERTURA **SIMULTANEA** DE ESTAS

Figura 7.8.2.(b) Regulador de mezcla (aire/gas) con apertura simultanea.

7.9 CENTRAL ELECTRONICA DE CONTROL

Debido a las caracteristicas que presenta el gas natural como combustible, principalmente en cuanto a su velocidad de combustión es necesario, para el mejor aprovechamiento de este, corregir las curvas de encendido originales de un motor que trabaje con gasolina. Para ello se requiere de una central electrónica de control capaz de analizar el encendido original del motor funcionando con gasolina, y automáticamente proveer a los diferentes regimenes, el adelanto ideal para el funcionamiento a gas.

La central electrónica de control (DIGI-1 E.I.), instalada en el banco de pruebas, se muestra en la foto 7.9.1, asi como el esquema de su instalación elétrica en la figura 7.9.2.

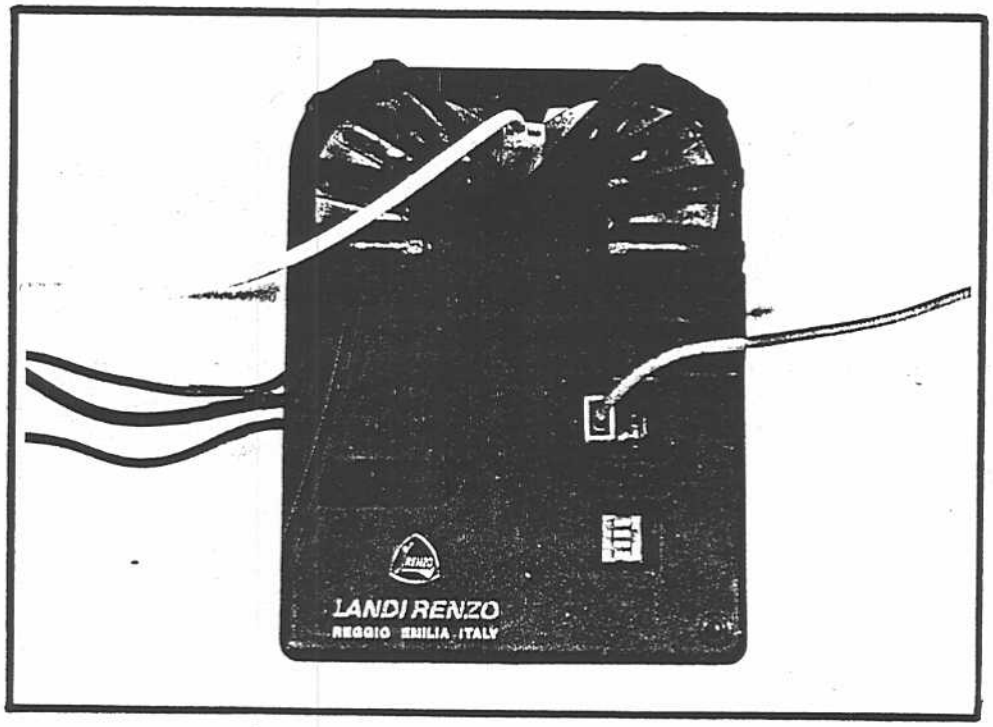


Foto 7.9.1 Central Electrónica de Control.

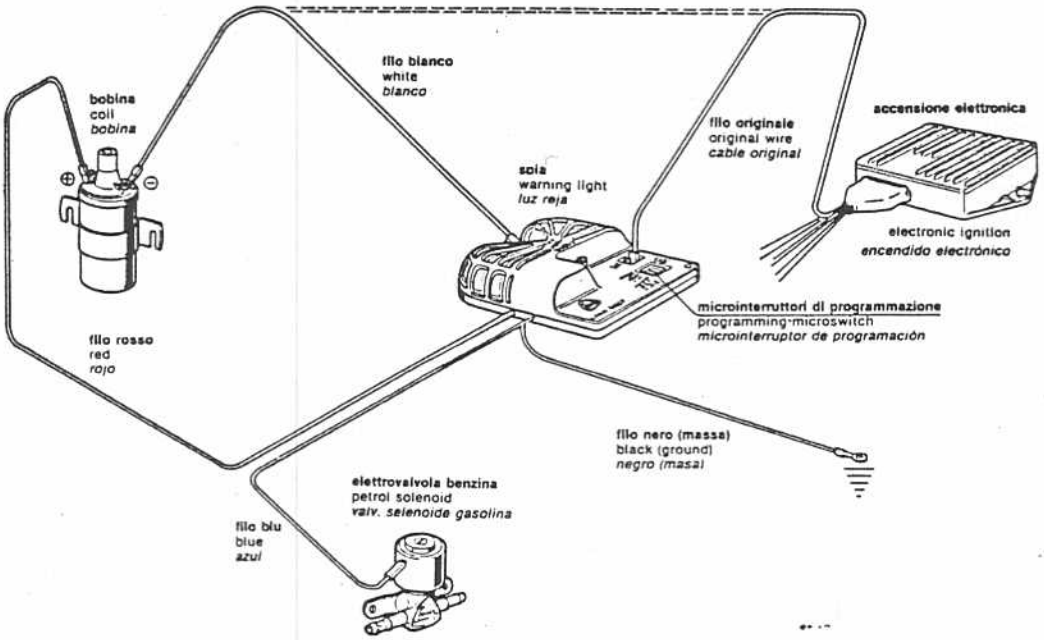


Figura 7.9.2 Esquema del montaje elétrico.

Dicha central electrónica puede ser programada para el funcionamiento con Gas Liquado de Petróleo o Gas Natural, en motores de Ciclo Otto de 4, 6 u 8 cilindros. La figura 7.9.3 muestra el esquema de programación.

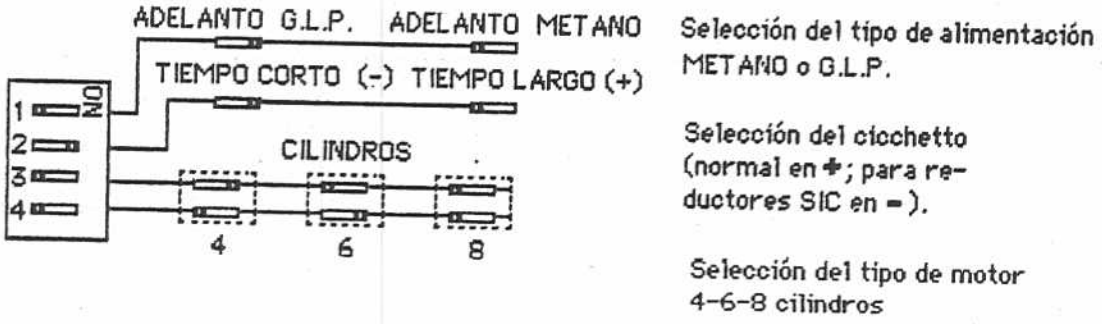


Figura 7.9.3 Esquema de programación.

7.10 REDUCTOR DE PRESION

El equipo primordial de un sistema de conversión a gas natural, es el **reductor-regulador** de presión que junto al mezclador cumple la función de un carburador. Su función principal es la de reducir la presión del gas, comprimido en los cilindros a 3000 psi como máxixmo, hasta una presión ligeramente menor o mayor que la atmosférica, dependiendo del equipo utilizado. Debido a que la presión del gas en las bombonas varía desde 200 atm hasta 1 atm, es necesario utilizar un reductor-regulador de tres etapas o cámaras de reducción, utilizando para ello válvulas de expansión. Estas tres cámaras pueden estar ubicadas en un solo cuerpo o separadas mediante dos reductores, uno de alta presión y

otro de baja presión.

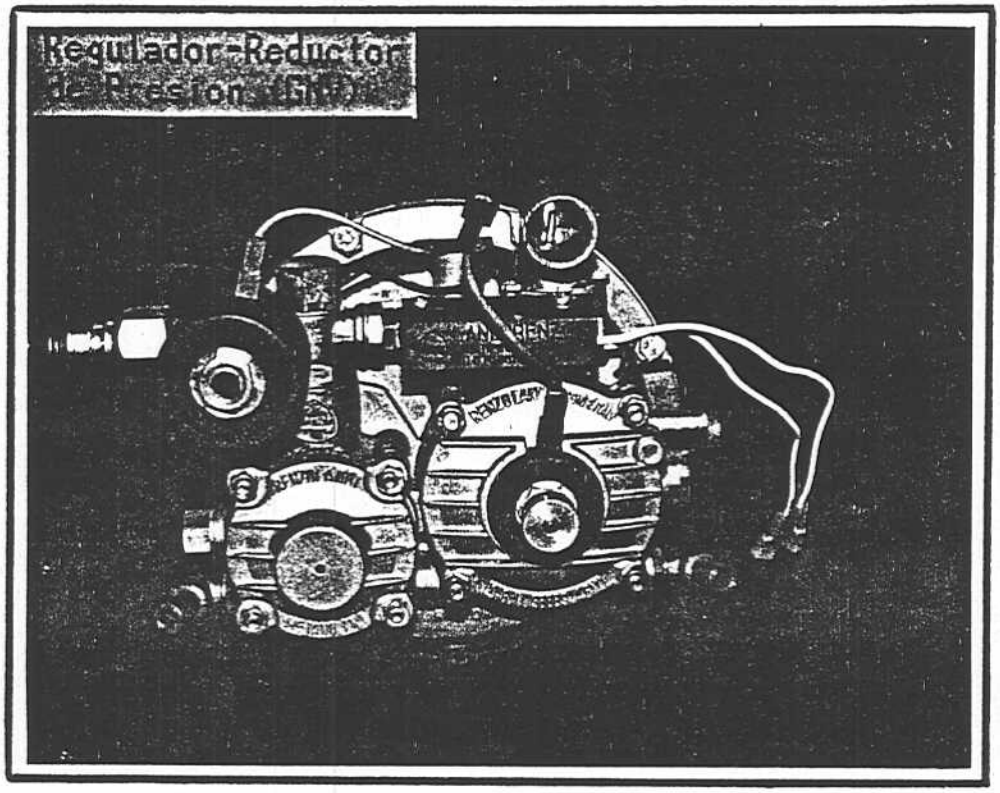


Foto 7.10.1 Reductor de presión (TN2).

En general, las presiones de trabajo de cada una de las camaras oscilan entre: 0,3 y 0,4 MPa para la primera de estas, de 0,12 a 0,13 MPa para la segunda y una presión aproximadamente igual a la atmosférica para la tercera de ellas. Debido a la expansión que sufre el gas en el reductor de presión es necesario suministrarle calor a éste, para evitar su congelamiento, que se toma generalmente del sistema de enfriamiento del motor (suele utilizarse también una resistencia eléctrica).

Adicionalmente, este equipo debe ser capaz de proporcionar la cantidad de gas requerida por el motor, asegurar un fácil encendido del motor y cerrar el paso del gas, en caso de que el motor no trabaje o esté funcionando con gasolina (sistema dual). La mayoría de los reductores poseen también un sistema que permite enriquecer la mezcla, con el objeto de facilitar el arranque del motor en frío, utilizando por ejemplo, una electroválvula ("cebador" elétrico) que trabaja con la señal enviada desde el selector de combustible.

Para que el gas pase del reductor al mezclador no es suficiente con que el solenoide de la electroválvula de gas esté activado (Válvula abierta), ya que también entra en juego una cuarta cámara, llamada de vacío. Al existir vacío en el múltiple (motor funcionando), esta cámara deja libre el flujo del combustible gaseoso desde la electroválvula de gas hasta el mezclador.

Los reductores-reguladores de presión presentan también un tornillo para regular la mezcla durante la marcha del motor en vacío (en rotación mínima), y además, algunos presentan dispositivos (mecánicos o neumáticos) de enriquecimiento de mezcla, cuando el motor trabaja con elevadas cargas.

Cada fabricante presenta soluciones particulares, pero el principio de operación es el mismo.

A continuación se muestra un esquema general de un

reductor de presión, para gas natural.

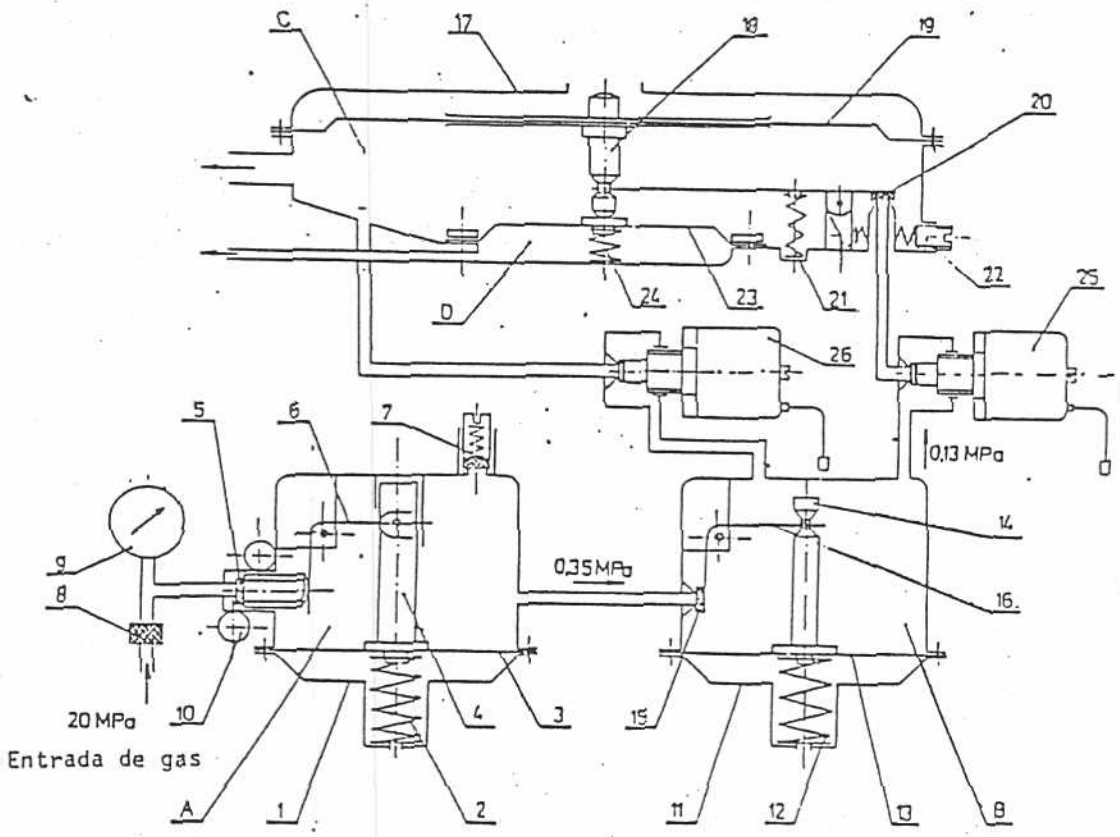


Figura 7.10.2 Esquema del regulador-reductor.

A) Cámara de alta presión.

B) Cámara de media presión.

C) Cámara de baja presión.

D) Cámara de vacio.

1) Tapa.

2) Resorte.

3) Diafragma.

4) Impulsor.

5) Válvula.

6) Palanca.

7) Válvula de seguridad.

8) Filtro de gas.

9) Manómetro.

10) Intercambiador de calor.

11) Tapa.

12) Resorte.

13) Diafragma.

14) Impulsor.

15) Válvula.

16) Palanca.

17) Tapa.

18) Impulsor.

19) Diafragma.

20) Válvula.

21) Resorte.

22) Tornillo de ajuste.

23) Diafragma.

24) Resorte.

25) Válvula de cierre.

26) Válvula de enriquecimiento.

7.11 INSTALACION EN EL BANCO

Los equipos antes mencionados son diseñados para ser instalados en vehículos automotores, y cada uno tiene una ubicación prefijada, bien sea en compartimiento del motor, habitáculo o cabina y baul o maletero del vehículo, tal como se muestra en la figura 7.11.1.

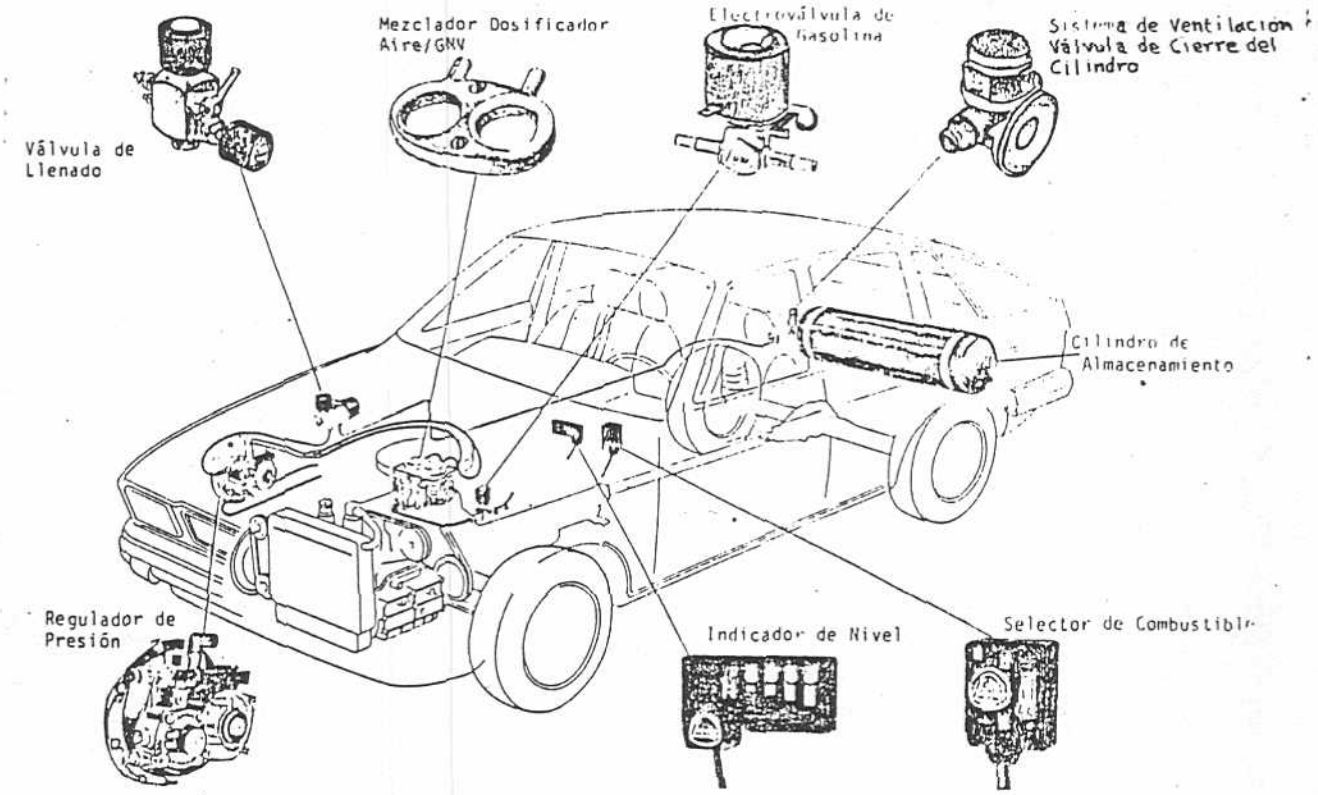


Figura 7.11.1 Instalación Tipica del sistema dual gasolina/GNV en un vehículo.

El kit de conversión instalado en el Banco de Pruebas pertenece a la firma Italiana, Landi Renzo; cabe destacar que el **reductor** utilizado es el **TN2/C**, utilizado en motores de 5000 c.c. en adelante. Sin embargo puede

aplicarse a motores de pequeña cilindrada, ya que está sobredimensionado y no subdimensionado.

El regulador de presión, en los vehiculos, está montado en los guardafangos internos contemplando las siguientes recomendaciones:

- Que el lugar ofrezca una superficie firme para efectuar el remachado o fijarlo por medio de pernos. (NUNCA FIJARLO AL MOTOR).
- El regulador de presión puede funcionar en cualquier posición, pero preferiblemente en posisción vertical y en sentido logitudinal a la marcha. Colocado lo más próximo posible al carburador y al mismo nivel que el radiador, para evitar burbujas de aire.
- Que las mangueras y tuberias de agua y gas lleguen holgadas y sin curvas cerradas.
- Que este garantizado su fácil acceso y evitar posibles colisiones.

Basado en esto, se decidió instalar el regulador de presión en el soporte del tambor de amortiguación del aire, ya que se encuentra alejado de fuentes de calor (motor y sistema de escape) y relativamente cerca del carburador y sistema de enfriamiento. El regulador de presión se encuentra en posición vertical, fijado a una lámina galvanizada, remachada al soporte (utilizando 10 remaches de aluminio de 1/8"), y paralela al eje longitudinal del motor.

Los remaches utilizados para fijar la lámina galvanizada estan sometidos a un esfuerzo cortante, producidos por el peso del regulador (alrededor de 4 kg). Cada uno de estos remaches está sometido a un esfuerzo cortante de 5 kg/cm². El aluminio supera ampliamente éste margen, de aquí que la estructura esté sobredimensionada.

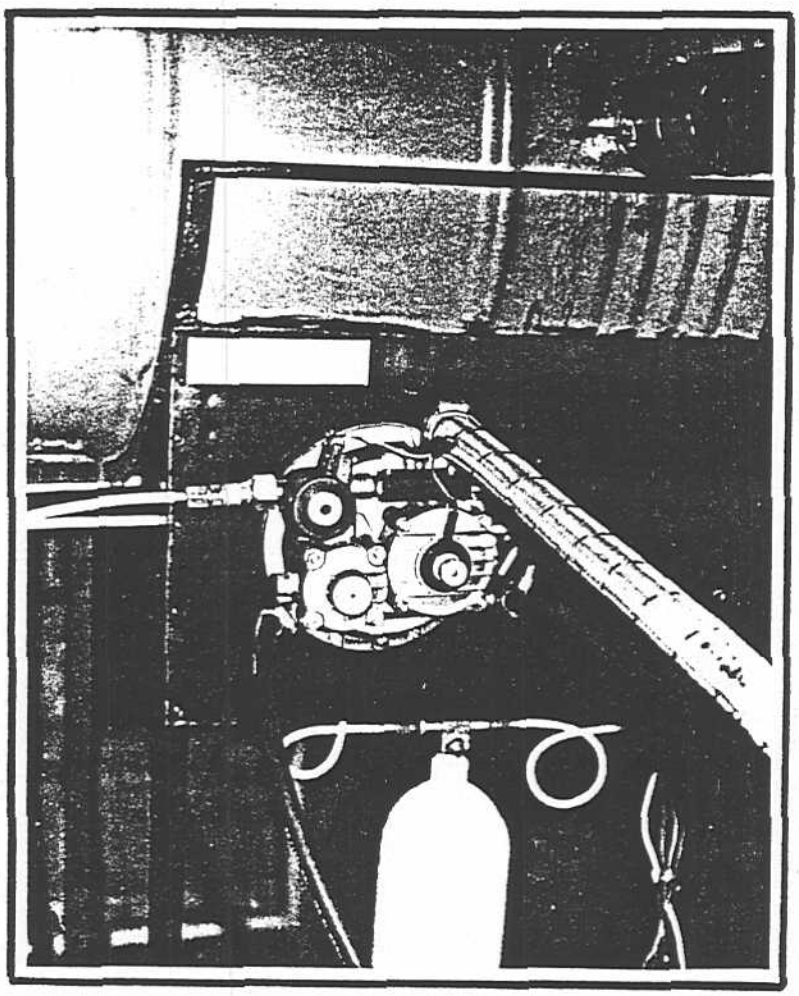


Foto 7.11.2 Regulador de presión en el banco.

El cilindro de almacenamiento en los vehiculos, suele colocarse en el compartimiento de carga, y fijado con soportes al piso y/o partes estructurales (chasis), en

posición horizontal. Si bien los soportes deben ser capaces de resistir esfuerzos en dirección longitudinal no inferior a 20 veces el peso del cilindro y 8 veces el peso de éste en las demás direcciones, debido a las aceleraciones y desaceleraciones que ocurren en un vehículo, estas condiciones no se presentan en el banco de pruebas.

El cilindro utilizado en el banco fue colocado en posición vertical para facilitar las operaciones de carga y descarga del mismo, ya que es necesario recargarlo frecuentemente en las estaciones de servicio. Este cilindro se instaló en el soporte del sistema de admisión de aire, apoyado sobre el piso y sujetado a una de las vigas por medio de abrazaderas, realizadas con láminas de acero de 1/8", que tienen como función mantener al cilindro (de unos 52 Kgrs de peso, sin gas) en dicha posición.

Datos del cilindro de almacenamiento:

Marca: Dalmine

Volumen de agua: 44,8 lit

Peso: 52 kg

Diámetro: 27,5 cm

Largo: 1m (aprox.)

Presión de trabajo: 3000psi (206 bar o 204 atm aprox.)

Presión de prueba: 4500psi (310 bar o 306 atm aprox.)

A parte de la bombona anterior, se instaló una bombona pequeña (como parte del sistema de medición de gas; sección

7.12) sobre una tabla de madera apoyada en las barras horizontales de la estructura hasta ahora mencionada. (Ver figura 7.11.3)

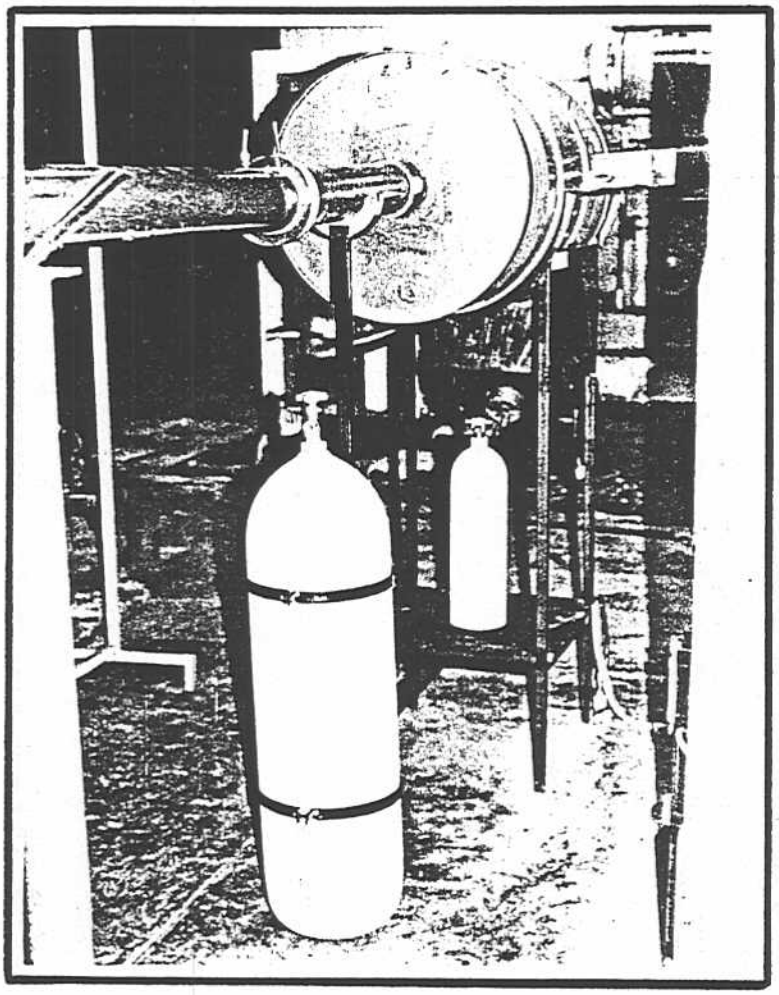


Foto 7.11.3 Cilindro de almacenamiento en el banco de pruebas.

<u>Datos del cilindro de medición:</u>

Marca: Dalmine

Volumen de agua: 5,3 lit

Peso: 7,4 kg

Diámetro: 15 cm

Largo: 50 cm

Presión de trabajo: 2100psi (145 bar o 143 atm aprox)

Presión de prueba: 3200psi (220 bar o 218 atm aprox.)

En la foto 7.11.4 se muestra el cilindro de medición utilizado.

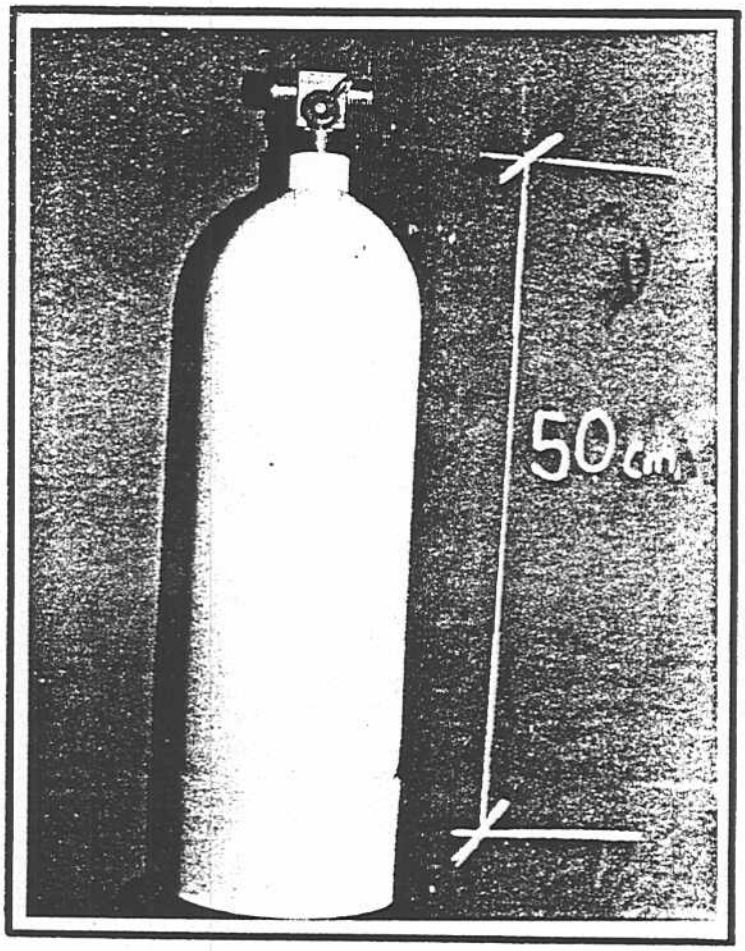


Foto 7.11.4 Cilindro de medición.

La válvula integral de cierre y llenado se encuentra situada a continuación de la vávula de cierre de la bombona de almacenamiento, como puede observarse el la foto 7.11.5.

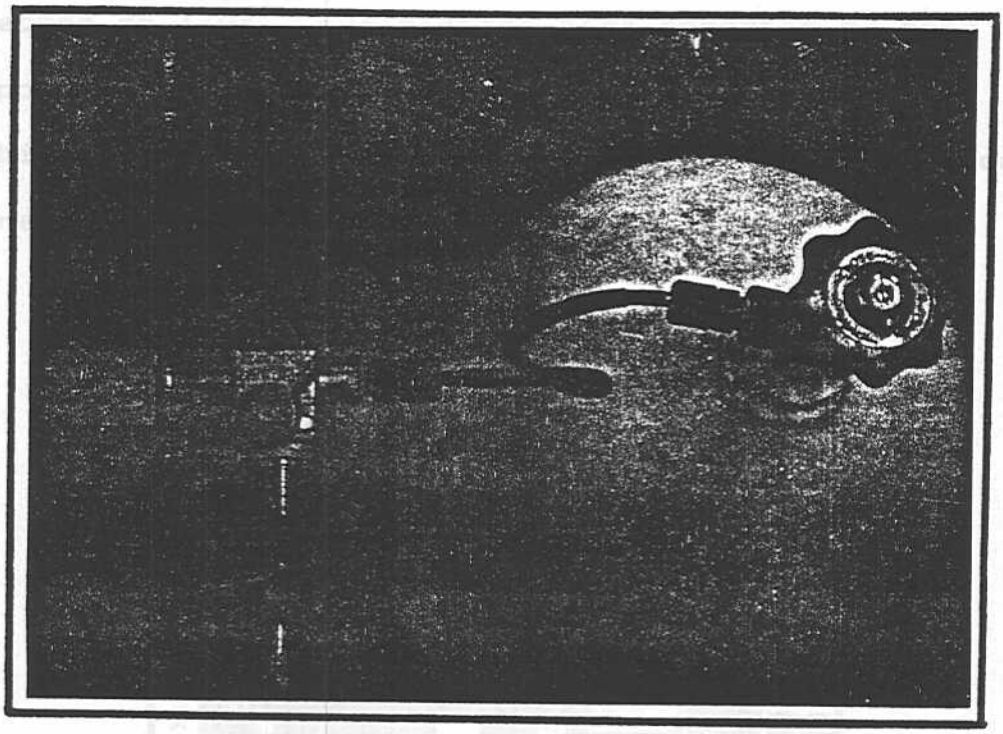


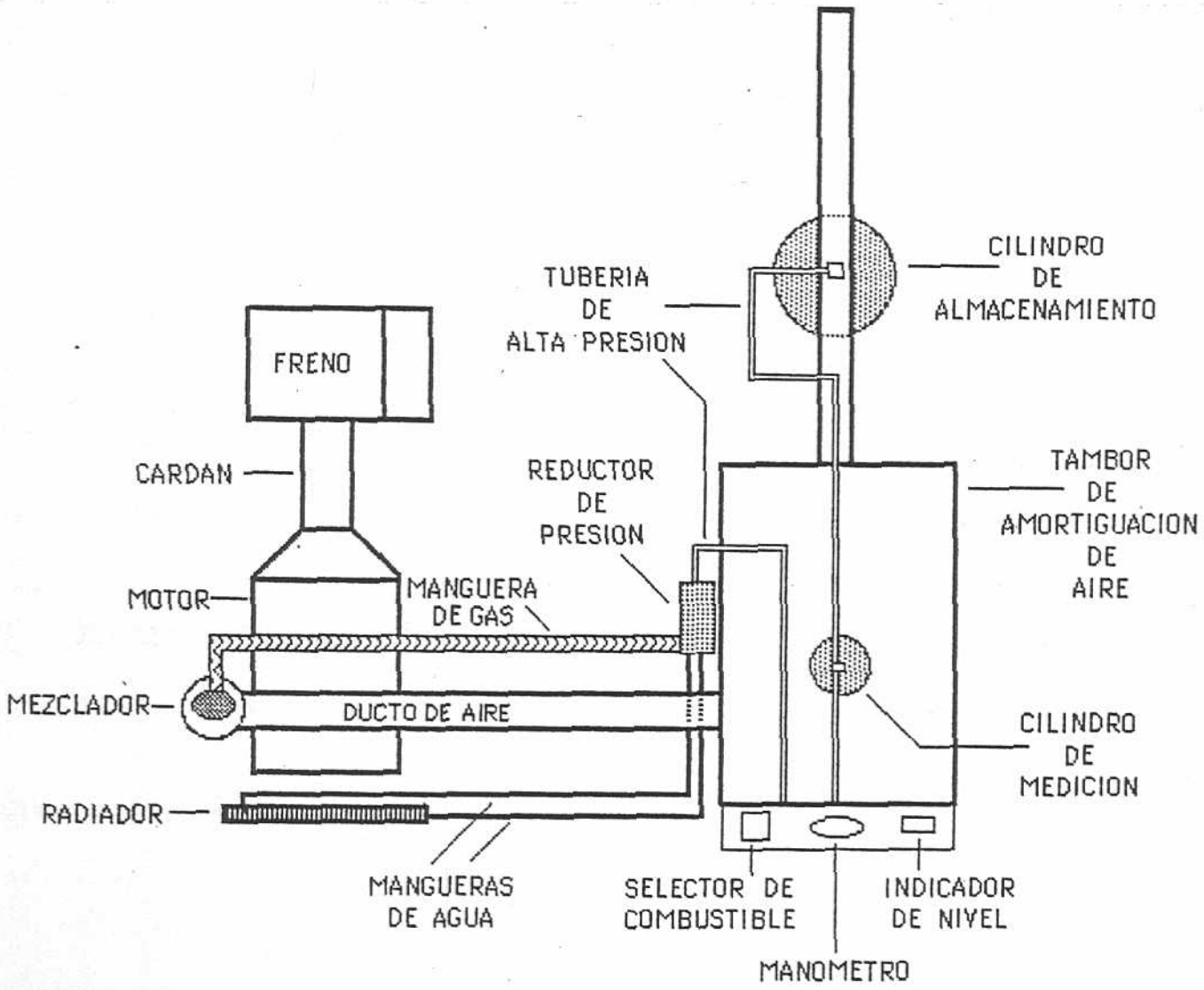
Foto 7.11.5 Válvula integral de cierre.

Los **componentes electricos y electrónicos** así como el **manómetro** utilizado (ver sección 7.12) también fueron colocados en la estructura que soporta el tanque de amortiguamiento de aire, empotrados sobre una lámina galvanizada paralela al radiador del motor.

El selector de combustible, la central electrónica de control, el indicador de nivel electrónico son livianos y

La **electroválvula de la gasolina** está colocada entre la bomba de gasolina y el carburador, fijada al tapa válvulas del motor.

A continuación se muestra un esquema general de la instalación de los equipos en el Banco de Pruebas.



ESQUEMA GENERAL DE LA INSTALACION DEL EQUIPO DE CONVERSION PARA GAS NATURAL

7.12 DISEÑO DEL SISTEMA DE MEDICION DEL CONSUMO DE GAS NATURAL

Antes de seleccionar y diseñar el sistema de medición ha utilizar, se estudiarón y evaluarón otros posibles métodos de medición, tomando en cuenta una serie de factores, tales como: costo, facilidad de adquisición y construcción, presición, etc.

Entre los métodos evaluados se encuentran: Placa Orificio, Rotámetros, Balanza y Caida de Presión. Cabe destacar que existen otros sistemas de medición, como son: Tubo de Pitot, Medidores de Desplazamiento Positivo, etc.

La **placa orificio** es utilizada, principalmente, para grandes caudales y se recomienda que el diámetro de tubería, por donde pasa el flujo, no sea menor de dos pulgadas.

En nuestro caso el consumo de gas es relativamente pequeño; diez veces menor que el consumo volumétrico de aire teórico.

Los caudales de aire teórico pueden obtenerse sobre la base de las siguientes consideracione:

a) La cilindrada del motor es de 1585 cm^3.

b) Por tratarse de un motor de cuatro tiempos, se tiene una aspiración de cada cilindro por cada dos revoluciones.

c) Se asume que en la aspiración, la cámara se llena totalmente de aire.

d) La velocidad de giro se encuentra entre 1000 y 6000

RPM.

$$q_{at} = V' \times n / (2 \times 60)$$

asi:

$$q_{atmax} = 79.250 \ cm^3/seg$$

$$q_{atmin} = 13.208 \ cm^3/seg$$

de aqui el consumo de gas a condiciones standars resulta ser:

$$q_{gtmax} = 28,53 \ m^3/hr$$

$$q_{gtmin} = 4,75 \ m^3/hr$$

Debido a estos pequeños caudales la placa orificio no resulta ser muy precisa para medir este consumo de gas, adicionalmente ella requiere un tambor de amortiguamiento (la aspiración del motor es intermitente), que junto a la tuberia de 2" pudieran dificultar el funcionamiento del Reductor de Presión, al colocarse dicha placa entre éste y el mezclador; de otra forma no podria colocarse.

El Rotámetro, al igual que la Placa Orificio permite una fácil lectura, sin embargo no fue posible conseguir en el pais el adecuado para los caudales antes mencionados. Su adquisición en el exterior resulta dificultosa y costosa, asi como la construcción y calibración del mismo por parte de los autores.

La otra posible solución consiste en medir el consumo másico de gas por unidad de tiempo utilizando una balanza. Si bien es una de las soluciones más sencillas, presenta el inconveniente de tener que utilizar una balanza con una precisión elevada (1/50.000 aprox. debido al peso del

cilindro de almacenamiento que es de unos 50 kgrs), cuyo costo es sumamente alto. Adicionalmente las lecturas de esta balanza se verian afectadas por la tuberia o manguera de alta presión que debe permanecer acoplada al cilindro ya que las pruebas se realizan en forma contínua.

El método para medir el consumo de gas utilizado fue el de **Caida de Presión**. Este método consiste en hacer una lectura de presión inicial y otra lectura final, indicada en el manómetro, después de un intervalo de tiempo.

Las razones por las cuales se decidió usar este sistema de medición fue en primer lugar la disposición de buen manómetro (0,5 % de error a media escala y divisiones de 2 kg/cm²), como se muestra en la foto 7.12.1, y de una válvula en forma de "T" que permite colocar cilindros en paralelo.

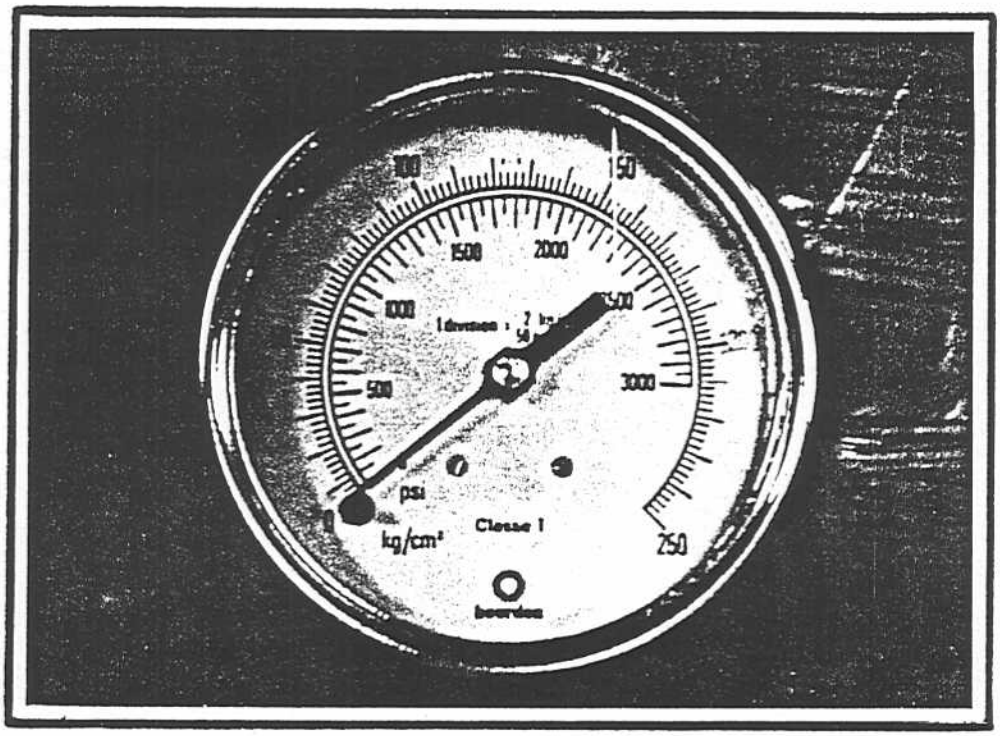


Foto 7.12.1 Manómetro del Banco de Pruebas.

Sólo fue necesario obtener un cilindro de poca capacidad (aprox. 1 nm^3 de gas a 2100 psi.), para que la diferencia de presión sea apreciable al utilizar solo éste. Dicho cilindro permite una autonomía de aproximadamente unos 2 minutos a máximo régimen.

El esquema de este sistema de medición se muestra en la figura 7.12.2.

Para realizar la medición de consumo de gas es necesario que ambos cilindros alimenten al reductor, para poder llevar el motor a las condiciones deseadas. Una vez logrado esto, sólo debe alimentar al reductor el cilindro de medición, cerrando la válvula integral de cierre y llenado, para tomar asi la lectura inicial que presenta el manómetro, y después de un lapso de tiempo una segunda lectura.

Para la obtención de la masa de gas se utiliza la siguiente ecuación:

$$m = \frac{M\ P\ V}{zRT}$$

El factor de compresibilidad "z" se obtiene con la presión y temperatura pseudoreducidas, según fracción molar del gas representado en el apendice A. Para composiciones diferentes del gas, el valor de "z" difiere.

Este sistema lógicamente no es adiabático, pero para las pruebas se toman previsiones como: evitar grandes caidas de presión en el cilindro de medición, por ejemplo, abriendo y cerrando la llave de cierre integral cada vez que se realiza

una lectura a un determinado régimen, abertura de la mariposa o cualquier otra variable independiente. De esta forma se garantizan bajas diferencias de temperaturas entre el cilindro de medición y el medio ambiente. Existen varias soluciones para minimizar el error que se comete al suponer que el sistema es adiabático, entre ellas colocar un termómetro dentro del cilindro, pero estas soluciones escapan de nuestro alcanze y de los objetivos principales de este trabajo.

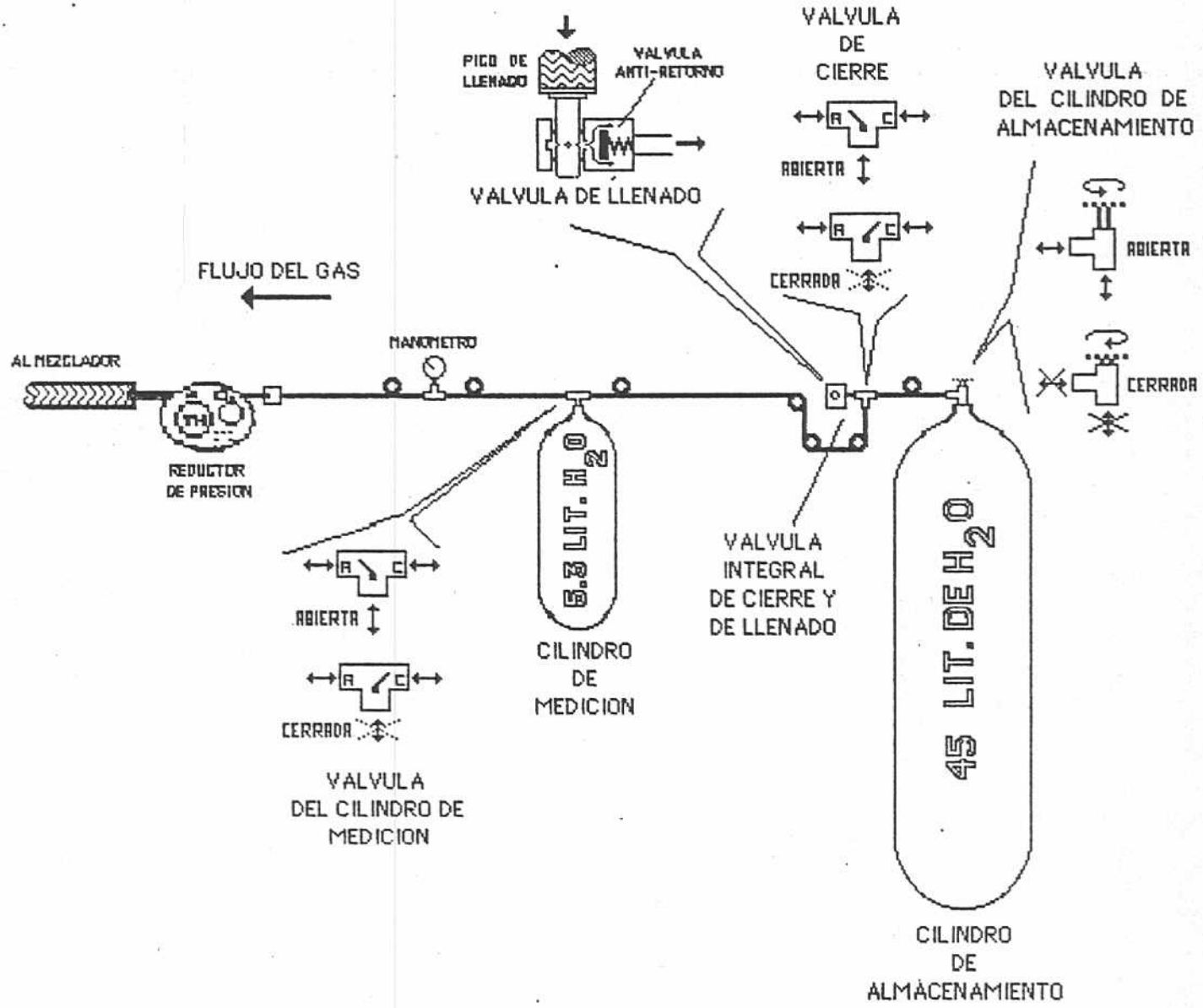


Figura 7.12.2 Esquema del sistema de medición.

8. OPERACION DEL BANCO

Para la conservación y manteniemiento de los equipos, tanto de gas natural como los ya existentes en el Banco de Pruebas, es imprescindible la correcta operación de los mismos.

La mayor parte de los puntos a tratar en este capitulo son tomados de la tesis: "DISEÑO, CONSTRUCCION Y EVALUACION DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA MOTORES DE COMBUSTION INTERNA ENCENDIDOS POR CHISPA", de Jorge Trujillo y Juan Ameijeiras, Febrero de 1987, ya que el sistema de gas natural no modifica sustancialmente la operación del mismo. No obstante es fundamental conocer la correcta manipulación del Banco de Pruebas al utilizar el gas natural como combustible.

8.1 MANIPULACION DEL CILINDRO DE ALMACENAMIENTO DE GNV

Antes del arranque del motor con cualquier combustible, gasolina o gas natural, es necesario que sus respectivos tanques de almacenamiento se encuentren llenos. De estos dos tanques, el que presenta mayor dificulad, debido a su volumen y peso, es el de gas natural, ya que este debe ser transportado a los surtidores de gas para su llenado,

colocados en algunas estaciones de servicio de CORPOVEN ubicadas en la zona metropolitana; Catia y Bello Campo.

Procedimiento:

Para llevar la bombona de almacenamiento a la estación, una vez vacia, es necesario separar ésta junto con la válvula integral de cierre y llenado, de la tuberia principal que conduce al cilindro pequeño o de medición, aflojando la tuerca de conexión hembra (ver detalle de la figura 7.7.1) que sujeta la tuberia principal, de la válvula de cierre integral, como se indica en el esquema de la figura 8.1.1.. **Es muy importante que antes de realizar esta operación, el manómetro del sistema marque 0 kgrs/cm², y que las válvulas de cierre integral y las de cierre de los cilindros (de almacenamiento y de medición) esten cerradas.** Una vez realizada esta operación se procede a liberar la bombona de almacenamiento de las abrazaderas que la sujetan, para ser transportada a la estación.

En la estación de servicio, se procede a quitar el tapón de la válvula de llenado, para alojar el pico de llenado del surtidor y abrir la válvula de cierre de la bombona, pero MANTENIENDO SIEMPRE CERRADA LA VALVULA INTEGRAL DE CIERRE Y LLENADO. Este cilindro (45 lit) de almacenamiento soporta la presión de trabajo de 3000 psi, pero NUNCA debe llenado a una presión mayor de 2100 psi, que es la presión de trabajo del cilindro de medición (la presión tiende a igualarse en todo el sistema una vez abiertas todas las válvulas). En

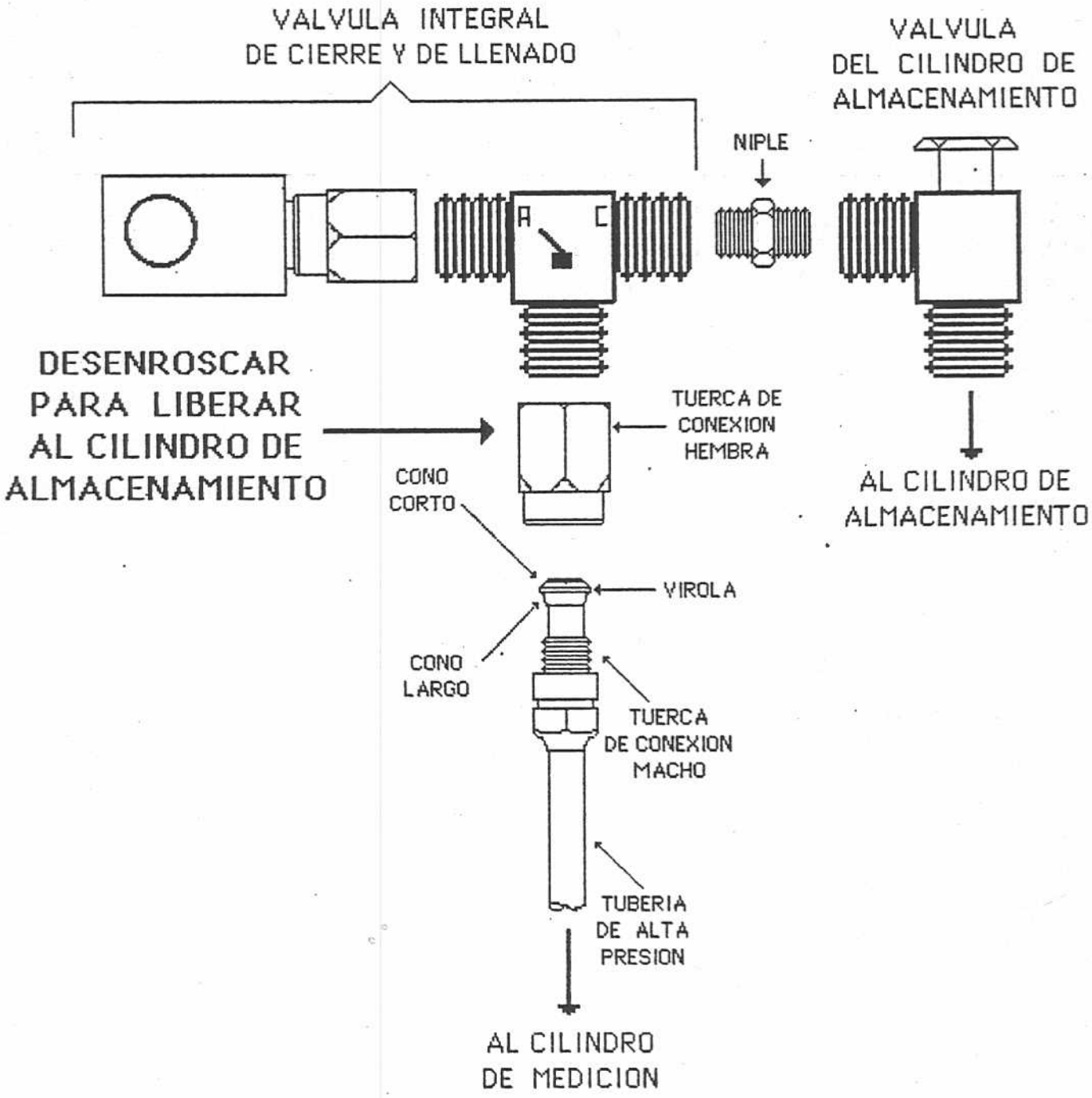


Figura 8.1.1 Acople del cilindro de almacenamiento.

caso de que el cilindro de almacenamiento se llene a una presión mayor de 2100 psi (los surtidores de gas estan estandarizados para llenar los cilindros a una presión de unas 3000 psia), debe consumirse una cantidad de gas tal que asegure una presión de 2100 psi, manteniendo cerrada la válvula de cierre del cilindro de medición.

Una vez lleno el cilindro, se conecta la válvula integral de cierre y llenado, a la tubería principal por medio de la tuerca de conexión hembra; realizada esta operación, abrir la válvula de cierre integral y de esta forma presurizar lentamente el sistema, abriendo paulatinamente la válvula de cierre del cilindro de almacenamiento (el de 45 litros de agua).

8.2 ARRANQUE DEL MOTOR

Una vez instalados los equipos de conversión, el motor del banco de pruebas puede operar tanto con gas natural como con gasolina. Para el correcto funcionamiento del motor con gas natural, este debe ser entonado con las especificaciones que indica el fabricante para trabajar con gasolina.

Es conveniente, a fin de economizar el consumo de gas debido a su limitada autonomia, enceder el motor con gasolina hasta que alcance las condiciones normales y estables de operación. No obstante el motor puede arrancar con gas natural.

Antes de encender el motor deben seguirse los siguientes

pasos:

- Verificar el nivel de aceite del motor y el nivel de agua al radiador.
- Verificar la presión en el cilindro de almacenamiento de gas.
- Verificar que el embrague se encuentre en la posición de desacoplado, para evitar que el freno gire mienstra el motor se calienta.
- Encender los medidores de temperatura en el panel de control.
- Verificar que nadie se encuentre tocando el motor o en posición peligrosa.

En caso de encenderce con gasolina:

- Verificar que el selector de combustible se encuentre en la posición de gasolina.
- Inyectar gasolina utlizando el acelerador, en forma manual y directa sobre el carburador.

En caso de encenderce con gas:

- Verificar que el selector de combustible se encuentre en la posición de gas.
- Presionar dos o tres veces el pulsador situado en el selector del combustible, para que de esta forma el regulador libere una porción de gas.

Para pasar de gasolina a gas, durante el funcionamiento del motor con gasolina, el selector de combustible debe estar en la posición intermedia, donde quedarán cerrados

ambos solenoides, por lo tanto, no ingresarán ninguno de los dos combustibles y el motor permanecerá funcionando con la gasolina de la cuba del carburador. Se debe tener el motor girando a altas revoluciones (2000-2300 RPM) y esperar que consuma dicho combustible antes de pasar a gas.

Se debe tener cuidado, ya que el motor comenzará a fallar pues estará trabajando con falta de combustible, momento en el cual hay que aumentar las revoluciones y pasar así la posición del selector a gas .

La operación para pasar de gas a gasolina, es más sencilla, solamente requiere colocar la posición del selector de combustible en gasolina.

8.3 CONTROL DEL FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR

Otra de las operaciones del Banco de Pruebas es la toma de medidas, que se subdivide en: modificación de las condiciones operativas del motor y el proceso de toma de medidas propiamente dicho.

Los procedimientos que permiten modificar las condiciones en que opera el motor serán explicadas a continuación.

8.3.1 APLICACION DE CARGA AL FRENO

Esta operación se efectúa escencialmente en el freno, el cual está equipado con los dispositivos necesarios para la regulación de la carga aplicada al motor.

- Abrir la válvula de paso de agua al freno, ubicada en

el canal que pasa junto al mismo.

- Abrir la válvula reguladora de caudal junto al contador de flujo (1 vuelta). El caudal de agua puede obtenerse a partir del contador de flujo y de un cronómetro. Se toma una lectura del contador en un instante dado y un lapso de tiempo después (por ejemplo 60") se vuelve a leer el contador. La diferencia entre las dos lecturas dividida por el tiempo transcurrido, dá el caudal.
- Verificar que la palanca de aplicación del freno se encuentra en cero antes de acoplar el motor en funcionamiento.
- Liberar la palanca que gobierna el embrague del motor hasta que éste y el freno se encuentren acoplados.
- Si se desea calibrar el freno o graduar el fiel de la balanza, acudir a los manuales.
- La carga aplicada se modifica mediante la palanca lateral del freno. Las variaciones deben efectuarse en forma suave, utilizando la rueda dentada de ajuste fino.

8.3.2. ACELERACION DEL MOTOR

Sobre el panel de control se encuentra el sistema de aceleración del motor que consiste de una cuerda de acero colocada dento de un tubo de cobre y acciona en forma directa la mariposa del carburador. Este sistema es de facil manipulación ya que al halarlo se acelara el motor y al.

soltarlo se desacelera hasta llegar al mínimo de revoluciones del motor.

8.3.3. MODIFICACION DEL AVANCE DE LA CHISPA

El ángulo de avance de la chispa viene determinado por la posición del distribuidor. Para variar este ángulo es necesario, girar el distribuidor.

- Afloje moderadamente la tuerca de sujección del distribuidor localizada bajo el mismo (utilizando una llave hexagonal de 13 mm para el caso del motor Fiat 1600).
- Gire el distribuidor sobre su propio eje para modificar el avance de la chispa.
- Giro en el sentido de las agujas del reloj produce un atraso de la chispa; giro en sentido opuesto a las agujas del reloj produce un adelanto de la chispa.
- Para determinar el ángulo exacto de ocurrencia de la chispa, utilizar una pistola estroboscópica.

Se debe tener presente, que con la utilización del gas natural la central electrónica de control modifica la chispa automáticamente. Por tanto el valor del avance en "mínimo" debe estar en lo posición que indica el manual de mantenimiento del motor, para el uso de gasolina; de está forma se asegura el correcto funcionamiento del motor con gas. En caso de que un equipo de conversión no presente una central electrónica de control, para el funcionamiento con

gas, los grados de avance en mínimo deben ser de unos 16 grados.

Si se desea modificar el avance de la chispa, para realizar pruebas con esta variable independiente utilizando el gas natural como combustible, no debe intervenir la central electrónica de control; se debe desconectar la misma como se muestra en el esquema de la figura 7.9.2.

8.3.4 RELACION AIRE-GASOLINA

- Mediante la utilización de un destornillador plano, girar el tornillo de ajuste de la rac, el cual se ubica en la cara lateral izquierda del carburador y se encuentra debidamente señalado.
- Giro en sentido de las agujas del reloj produce una disminución del caudal de gasolina con el consiguiente aumento de la relación aire-gasolina, y viceversa.

8.3.5 RELACION AIRE-GAS (Entonación)

La entonación del motor usando gas natural consta de tres pasos, que deben efectuarse una vez entonado debidamente el motor con gasolina. Los pasos a seguir son los siguientes:

Marcha en mínimo:

El ajuste del mínimo del motor con gas natural, se realiza actuando sobre el tornillo localizado en la segunda electroválvula del regulador de presión (pieza #40 del apéndice I). De la posición totalmente abierto (giro en el

sentido contrario a las agujas del reloj), este tornillo debe cerrarse paulatinamente hasta lograrse el funcionamiento más estable del motor. Dicho ajuste se lleva a cabo registrandose conjuntamente con el sensor del vacío (pieza #62 del apéndice I).

Para ajustar las RPM de marcha en vacío, es necesario actuar sobre la mariposa del carburador, para aumentar o disminuir estas al valor requerido.

Marcha en alta:

Una vez ajustada la marcha en vacío, se procede a la regulación de la marcha en alta del motor.

Debido a que el carburador presenta dos bocas de abertura progresiva, debe ajustarse inicialmente la boca principal. Para ello es necesario llevar el motor a 3000 RPM (con o sin carga), sin exceder el 50% de apertura para asegurar el funcionamiento de la boca principal solamente. Una vez llevado el motor a este régimen se actua sobre el tornillo que corresponde a la boca principal, de la manguera de gas, entre el regulador y el mezclador, como puede apreciarse el la figura 7.8.2.a, hasta que se alcanze el mayor incremento de las RPM.

Para regular la boca secundaria, se procede de igual manera, tomando en cuenta que es necesario aplicar carga para no exceder el regimen de 3000 RPM una vez abiertas las dos bocas del carburador.

Estos tornillos, localizados en la manguera de gas,

definen la relación de mezcla aire-gas natural. A medida que se cierran (en el sentido de las agujas del reloj) la mezcla se empobrece en combustible y viceversa.

8.4 MEDICIONES

Las normas y procedimientos que deben seguirse para la lectura en los diferentes instrumentos de medidas son las siguientes:

8.4.1 TACOMETRO

Existen dos cuenta revoluciones, uno electrónico empotrado en el panel de instrumento, que sólo servirá para tomar las lecturas de las RPM cuando el motor no esta acoplado al freno y el otro mecánico, acoplado al eje del freno que se utilizará para tomar las lecturas de las revoluciones durante las pruebas. Este tacómetro forma parte del freno (ver foto 8.4.1.1), permitiendo una fácil lectura y una mayor presición en la medición (1% de error).

Debe procurarse, ya sea controlando la carga aplicada o la apertura de la maripopsa del carburador, que la lectura del tacómetro permanezca estable en los valores preestablecidos para la prueba.

8.4.2 POTENCIA Y TORQUE

Son valores que se obtienen en forma indirecta a partir de la fuerza indicada en la báscula del freno. A pesar de

que el freno presenta internamente un mecanismo magnético de estabilización del fiel de la balanza, éste inevitablemente presenta unas pequeñas oscilasciones. La lectura definitiva quedará a juicio del usuario como promedio de esas oscilaciones.

Antes de cada prueba debe verificarse que el fiel de la balanza este en cero, si esto no es asi debe procederse al reajuste de la balanza según lo explican los catálogos del freno.

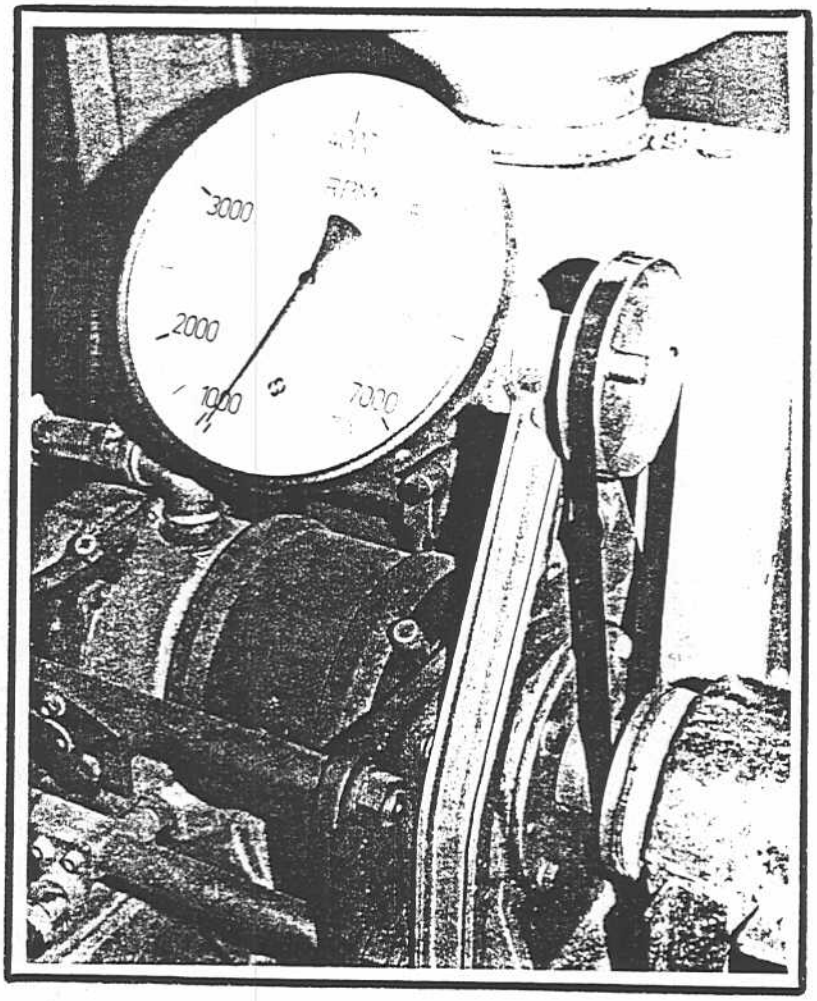


Foto 8.4.1.1 Tacómetro.

8.4.3 CONSUMO DE AIRE

Esta medición se efectua junto al freno hidráulico sobre un tubo en "U" de vidrio con agua en su interior. El nivel inicial de agua (con el motor apagado) debe ser aproximadamente de 35 cm (la mitad de la longitud total del tubo).

Con el motor en funcionamiento, las lecturas se realizan tomando la posición del menisco de agua respecto a la escala graduada que acompaña al tubo. La lectura debe tomarse una vez que el nivel de agua se haya estabilizado.

El caudal de aire se pude obtener luego, a partir del desnivel de agua leido sobre el tubo y aplicando las ecuaciones especificadas en el apendice H.

8.4.4. CONSUMO DE GASOLINA

Sobre el panel de control se encuentra un instrumento digital que permite obtener de dos formas diferentes el caudal de gasolina.

- Mediante la pantalla de conteo acumulativo de flujo se coloca el interuptor principal en ON y luego se conmuta el segundo interruptor en START durante un periodo de tiempo cronometrado (por ejemplo 10 seg.) tomando la lectura inicial y final de la pantalla. La diferencia entre ambas lecturas dividida entre el tiempo cronometrado, representa el caudal en cm^3/seg.
- Utilizando la pantalla de conteo integrado se tiene una

lectura directa en litros por hora del consumo de gasolina.

Es sumamente importante que todo el sistema de suministro de combustible se encuentre purgado, es decir, que no exista aire en las linea de combustible. En todo caso, esto puede verificarse mediante el bulbo de vidrio de interconexión del retorno de la gasolina.

8.4.5 CONSUMO DE GAS NATURAL

Para medir el consumo de gas natural se utiliza un manómetro, que permite obtener lecturas de presión y de esta manera la masa consumida por unidad de tiempo cronometrado, como se explica en la sección 7.12.

La diferencia de la presión inicial y final no debe ser mayor de diez (10 kg/cm^2), esto con el objeto de obtener un precisión razonable, una autonomia mayor del combustible, así como facilitar las lecturas. La escala utilizada para medir la "caida de presión" es en [kg/cm^2], ya que esta es más presisa que la escala en [psi].

Una vez que se tienen las lecturas de presión inicial y final y la temperatura ambiente, se procede a la obtención de la presión y temperatura pseudoreducidas, según la fracción molar del gas natural (apéndice A) y de la presión y temperatura críticas de cada uno de los componentes que conforman al gas (apéndice E).

Con la presión y temperatura pseudoreducidas se obtiene

el factor de compresibilidad "z", que se tiene del apéndice F.

Obtenidos los datos necesarios, se calcula la masa de gas natural (ver apendice H de ecuaciones), y se divide por el tiempo cronometrado (variable para cada régimen). En el apéndice G se presenta un ejemplo para la obtención de la masa del gas natural.

8.4.6. TEMPERATURAS

Las temperaturas de agua de entrada al motor, agua de salida del motor y gases de escape, se obtienen sobre la pantalla destinada a este fin, ubicada en el panel de control. Un selector de señal de entrada ubicado a la derecha de la pantalla permite escoger, entre las posiciones 1, 2 y 3 respectivamente, las temperaturas antes mencionadas.

La temperatura del agua de frenado se obtiene colocando un termómetro a la entrada del freno y a la salida del mismo. La temperatura de aire de admisión del motor, puede obtenerse colocando un termómetro después del tanque de amortiguación.

9. PRUEBAS

Para evaluar los parámetros caracteristicos de un motor es fundamental realizar una serie de pruebas que permitan obtenerlos.

El objetivo de estas pruebas es la de obtener los parámetros caracteristicos del motor operando con gas natural, y compararlos con los parámetros ya obtenidos con gasolina.

Debido que el motor ha sufrido cierto desgaste desde que se realizaron las pruebas con gasolina, y adicionalmente presenta una serie de modificaciones, incluyendo aquellas necesarias para que pueda trabajar con gas natural, se elaboraron algunas pruebas con gasolina para comparar sus resultados con los ya obtenidos [1], y de esta manera poder evaluar las condiciones actuales del motor. Las pruebas realizadas fueron: 100 y 50 % de abertura constante de la mariposa y carga variable con 10 ° APMS a 1000 RPM, mariposa variable con carga constante, mariposa variable a velocidad constante (3000 RPM) y avance de la chispa y carga

[1] Ameijeiras, Juan y Trujillo Jorge "DISEÑO, CONSTRUCCION Y EVALUACION DE UN BANCO DE PRUEBAS DE C.I.E. POR CHISPA.

variables a 100 y 50% de abertura constante de la mariposa y 3000 RPM. Realizar todas las pruebas con gasolina nuevamente, implica un elevado desgaste del motor, y además escapa de los objetivos de este Trabajo Especial.

Entre las pruebas más importantes realizadas con gas natural, se encuentran:

- 100 % abertura de la mariposa y carga variable.
- 50 % abertura de la mariposa y carga variable.
- Mariposa variable y carga constante.
- Mariposa variable y RPM constante.

Entre las numerosas variables independientes que afectan al Banco de Pruebas, sólo se consideran las siguientes:

- Abertura de la mariposa del carburador (acelerador).
- Carga del motor (freno).
- Condiciones ambientales.

Las variables dependientes que se miden son:

- Velocidad angular del eje (RPM).
- Consumo de gas natural.
- Consumo de aire.
- Torque en el eje.
- Temperaturas en diversos puntos.

Con el fin de obtener conclusiones válidas se estructuraron las pruebas de forma tal que se modifique solamente una de las variables independientes manteniendose las demás constantes.

Si bien la obtención de resultados confiables implica

realizar un elevado número de mediciones por prueba, en este caso especifico el número de muestras seleccionado fué de tres (3), debido principalmente a la escaza autonomía del cilindro de almacenamiento y la dificultad que presenta trasnportar dicho cilindro a las estaciones de servicio; por su elevado peso y volumen.

A continuación se explican las diferentes pruebas realizadas en el Trabajo Especial, donde para cada una ellas se toma la presión barométrica y la temperatura ambiente.

Cabe destacar que para evitar un sobrecalentamiento del motor es estrictamente necesario que las pruebas se realizen con el número de revoluciones por minuto en forma decreciente.

9.1 100 y 50 % ABERTURA DE LA MARIPOSA DEL CARBURADOR Y CARGA VARIABLE

Esta prueba es la más importante y permite conocer las curvas caracteristicas del motor a máxima y parcial abertura de la mariposa del carburador.

La prueba se realiza manteniendo la mariposa del carburador a 100 % o 50 % a lo largo de todo el ensayo y se varía únicamente la carga aplicada al freno. La prueba comienza con baja carga, esto es, a máximas revoluciones y se vá incrementando la carga hasta alcanzar la velocidad minima de giro donde el motor aún funcione en forma estable.

Para cada condición de carga se toman medidas de: RPM,

altura de la columna de agua, diferencial de presión en el cilindro y kilogramos de la báscula del freno.

La prueba debe realizarse con el motor debidamente entonado y manteniendo constantes: relación aire-combustible, posición del distribuidor y condiciones ambientales.

A partir de las medidas tomadas, se obtienen además potencia, torque, consumo específico de gas y aire, relación aire-gas, rendimiento volumétrico y rendimiento total. Con el fin de facilitar el análisis del comportamiento de los diferentes parámetros, se elaboraron gráficas para cada uno de ellos.

9.2 ABERTURA DE LA MARIPOSA VARIABLE Y CARGA CONSTANTE

En esta prueba se mantiene la carga constante y se varia la abertura del carburador en forma decreciente, desde el 100 % hasta el minimo posible. Al igual que en la prueba anterior, se toman lecturas de: RPM, altura de la columna de agua, diferencial de presión en el cilindro y kilogramos de la báscula del freno.

Efectuando de la misma manera los cálculos y gráficas, mencionados anteriormente.

9.3 ABERTURA DE LA MARIPOSA Y CARGA VARIABLES

En esta prueba a diferencia de las anteriores se varian dos parámetros, con el fin de mantener las RPM constante y

apreciar como se ven afectadas las demas variables.

Se realizaron tres series de pruebas para tres diferentes valores de RPM y se efectuaron las gráficas correspondientes.

9.4 AVANCE DE LA CHISPA Y CARGA VARIABLE

Con esta prueba se desea determinar la influencia del avance de la chispa sobre el funcionamiento del motor. La carga debe variarse para garantizar que las RPM permanezcan constantes.

Si el motor trabaja con gas natural es necesario desconectar la central electrónica de control, para esta prueba, ya que ella elabora la curva adecuada para el funcionamiento óptimo con gas.

Se realizaron dos series de pruebas en la que se mantuvo la abertura de la mariposa del carburador constante a 100% y 50%. El APMS se midió con una pistola estroboscópica sicronizada con la bujia #1. Se marcaron una serie de puntos sobre la polea del cigueñal, con el fin de determinar los ángulos de adelanto o atraso de la chispa.

La temperatura de los gases de escape es de gran importancia para esta prueba.

9.5 RELACION AIRE-COMBUSTIBLE Y CARGA VARIABLES

Nuevamente es necesario variar la carga para mantener las RPM constante y verificar la influencia de la relación aire-

combustible sobre el funcionamiento del motor.

La relación aire-gas se regula actuando sobre los tornillos (dos, uno para cada boca del carburador) situados en las mangueras que van del reductor al mezclador. Si la abertura de la mariposa del carburador se encuentra entre 0 y 50 %, sólo es necesario ajustar el tornillo de la manguera que va a la primera boca, mientras que entre 50 y 100 % es necesario ajustar con el mismo número de vueltas ambos tornillos.

Esta prueba se realiza con 50% de abertura de la mariposa del carburador, para asi ajustar un solo tornillo, el de la boca primaria.

Para cada punto se toman las mismas lecturas antes mencionadas.

9.6 BALANCE TERMICO DEL FRENO

Con el fin de verificar que toda la energia tomada por el freno se disipa en forma de calor en el agua, se toma la temperatura de salida y entrada del freno. El caudal puede obtenerse en el contador.

El valor de potencia obtenido a través del resultado de la balanza se compara con el de la energia disipada por el agua.

9.7 BALANCE TERMICO DEL MOTOR

Esta prueba debe realizarse sin termostato para asegurar

un flujo continuo de agua a través del motor. El caudal se obtiene a partir de una gráfica que relaciona el caudal de la bomba del motor vs RPM [1]. Es necesario tomar las temperaturas de entrada y salida de agua de refrigeración, gas, fuerza en la balanza del freno y caudales de aire y gas.

La prueba se realiza para una determinada carga y abertura de la mariposa del carburador.

9.8 INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES ATMOSFERICAS SOBRE EL MOTOR

Esta prueba consiste en variar la temperatura y presión del aire a la entrada del motor. De las cuales sólo la segunda es factible de realizar, ya que la primera presenta la dificultad en la obtención de una temperatura elevada y estable como para alterar la potencia del motor. Variando la abertura del ducto de admisión de aire se logra variar la presión de admisión; dicho valor se obtiene utilizando la columna de agua de la placa orificio.

La prueba se realiza a velocidad constante.

---

[1] Ameijeiras, Juan y Trujillo, Jorge "DISEÑO, CONSTRUCCION Y EVALUACION DE UN BANCO DE PRUEBAS DE C.I.E. POR CHISPA.

10. RESULTADOS

Los resultados de las pruebas se presentan de una vez en las unidades y formas más apropiadas para su interpretación y análisis.

Los resultados se encuentran acompañados de sus respectivas gráficas, las cuales simplifican aún más la labor interpretativa.

Cada una de estas gráficas presenta las curvas caracteristicas originalmente obtenidas de la tesis: "DISEÑO, CONSTRUCCION Y EVALUACION DE UN BANCO DE PRUEBAS DE COMBUSTION INTERNA ENCENDIDOS POR CHISPA" cuyos puntos estan representados por "circulos", a excepción de las pruebas de 100 y 50 % abertura de la mariposa del carburador con carga variable, y avance de la chispa y carga variables a 50 y 100 %; mientras que las curvas obtenidas en este Trabajo Especial se representan por medio de "triangulos" (las de gas natural) y de "cuadrados" (las de gasolina).

En el apéndice H se presenta una recopilación de las ecuaciones utilizadas en el tratamiento de los datos para obtener los resultados en las unidades deseadas.

▮ Prueba con carga variable y 100% de abertura de la mariposa del carburador con **gas natural.**

P = 697.7 mmHg T = 28 °C

rpm	N(KW)	M(mN)	mgn(gr/s)	ma (gr/s)	mat(gr/s)
5000	28,0±0,4	53,4±0,7	4,62±0,12	47,27±0,05	71,19
4500	29,5±0,4	62,5±0,7	4,53±0,34	43,75±0,22	64,07
4000	29,0±0,2	69,2±0,4	4,11±0,33	39,85±0,02	56,95
3500	26,6±0,3	72,8±0,2	3,81±0,11	34,75±0,27	49,83
3000	23,5±0,3	74,9±1,1	3,33±0,13	29,63±0,08	42,72
2500	19,3±0,4	73,8±1,5	2,69±0,09	24,00±0,02	35,60
2000	16,0±0,1	76,3±0,4	2,09±0,11	19,75±0,02	28,48
1500	11,5±0,8	66,7±1,4	1,52±0,12	16,45±0,03	21,36

rpm	mespgn (gr/kwh)	mespa (gr/kwh)	rac	n_v(%)	n_T(%)
5000	593±8	6090±83	10,3±0,1	66,4±0,1	14,7±0,2
4500	545±37	5347±86	9,9±0,5	68,3±0,4	16,1±1,1
4000	510±40	4951±25	9,8±0,7	70,0±0,1	17,3±1,4
3500	516±5	4718±10	9,2±0,1	69,8±0,6	16,8±0,8
3000	498±15	4477±86	9,1±0,2	69,4±0,2	17,6±0,6
2500	495±19	4477±86	9,0±0,2	67,4±0,1	17,7±0,7
2000	474±2	4456±21	9,4±0,1	69,4±0,1	18,5±0,1
1500	457±48	5160±361	11,3±0,4	70,4±6,4	19,3±2,0

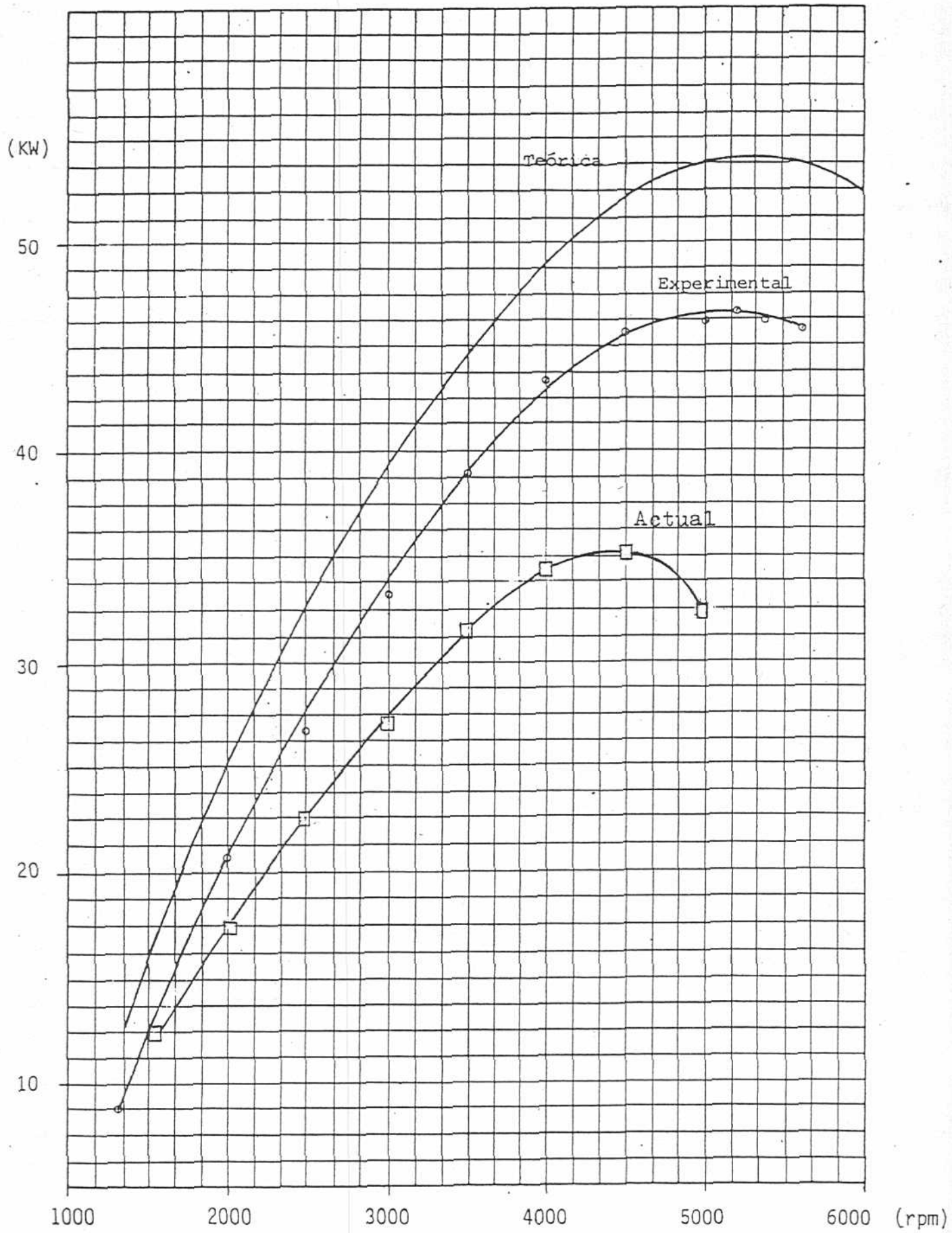
- Prueba con carga variable y 100% de abertura de la mariposa del carburador con gasolina.

P=696,5 mmHg T=28 °C

rpm	N(KW)	M(mN)	mG (gr/s)	ma (gr/s)	mat(gr/s)
5000	32.4±1,0	61,8±1,8	4,90±0,30	50,31±1,5	71,07
4500	35,1±0,9	74,5±1,6	4,36±0,12	46,78±1,28	63,96
4000	34,7±0,6	82,9±1,4	4,05±0,13	43,17±0,85	56,86
3500	31,4±0,4	85,7±1,1	3,77±0,12	38,52±0,67	49,75
3000	27,6±0,3	87,8±0,9	3,38±0,14	32,37±0,55	42,64
2500	22,4±0,1	85,7±0,5	2,43±0,13	26,37±0,93	35,54
2000	17,9±0,1	85,7±0,6	1,79±0,11	21,32±1,02	28,43
1500	12,2±0,2	78,0±0,8	1,23±0,14	15,53±0,41	21,32

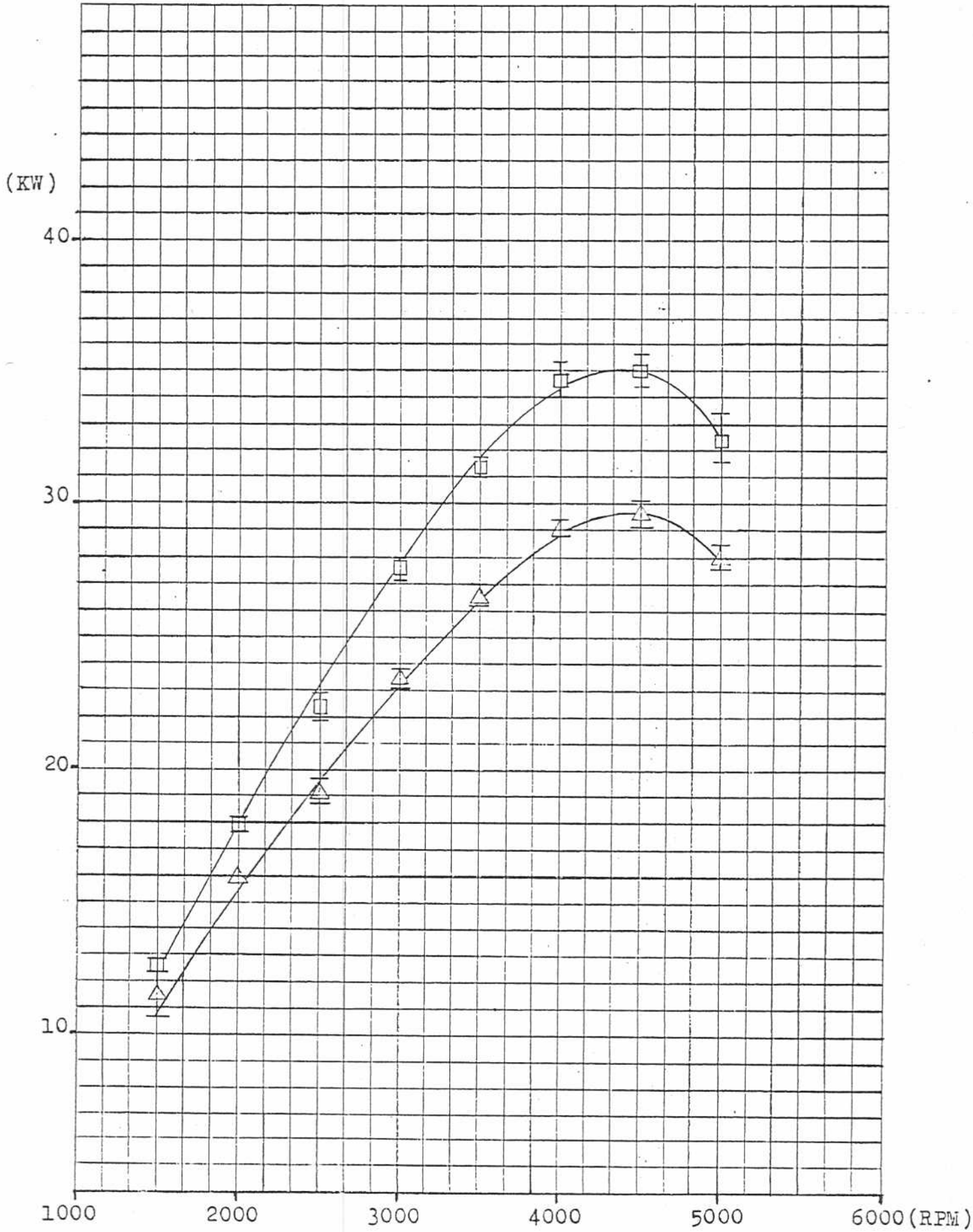
rpm	mespG (gr/kwh)	mespa (gr/kwh)	rac	n_v(%)	n_T(%)
5000	547±46	5597±268	10,2±1,0	70,8±1,6	14,9±1,8
4500	447±23	4800±197	10,7±0,7	73,1±1,4	18,2±1,3
4000	420±21	4477±169	10,7±0,7	75,9±1,5	19,4±1,2
3500	432±18	4415±127	10,2±0,6	77,4±1,4	18,9±1,1
3000	341±21	4225±97	9,6±0,8	75,9±1,1	18,5±1,5
2500	390±14	4232±104	10,9±0,6	74,2±1,4	20,9±1,0
2000	359±27	4276±206	11,9±1,3	75,0±3,2	22,7±1,8
1500	362±33	4565±154	12,6±1,1	72,8±5,0	22,5±1,5

Potencia experimental y teórica (estandarizadas) vs. rpm. (100% abertura).



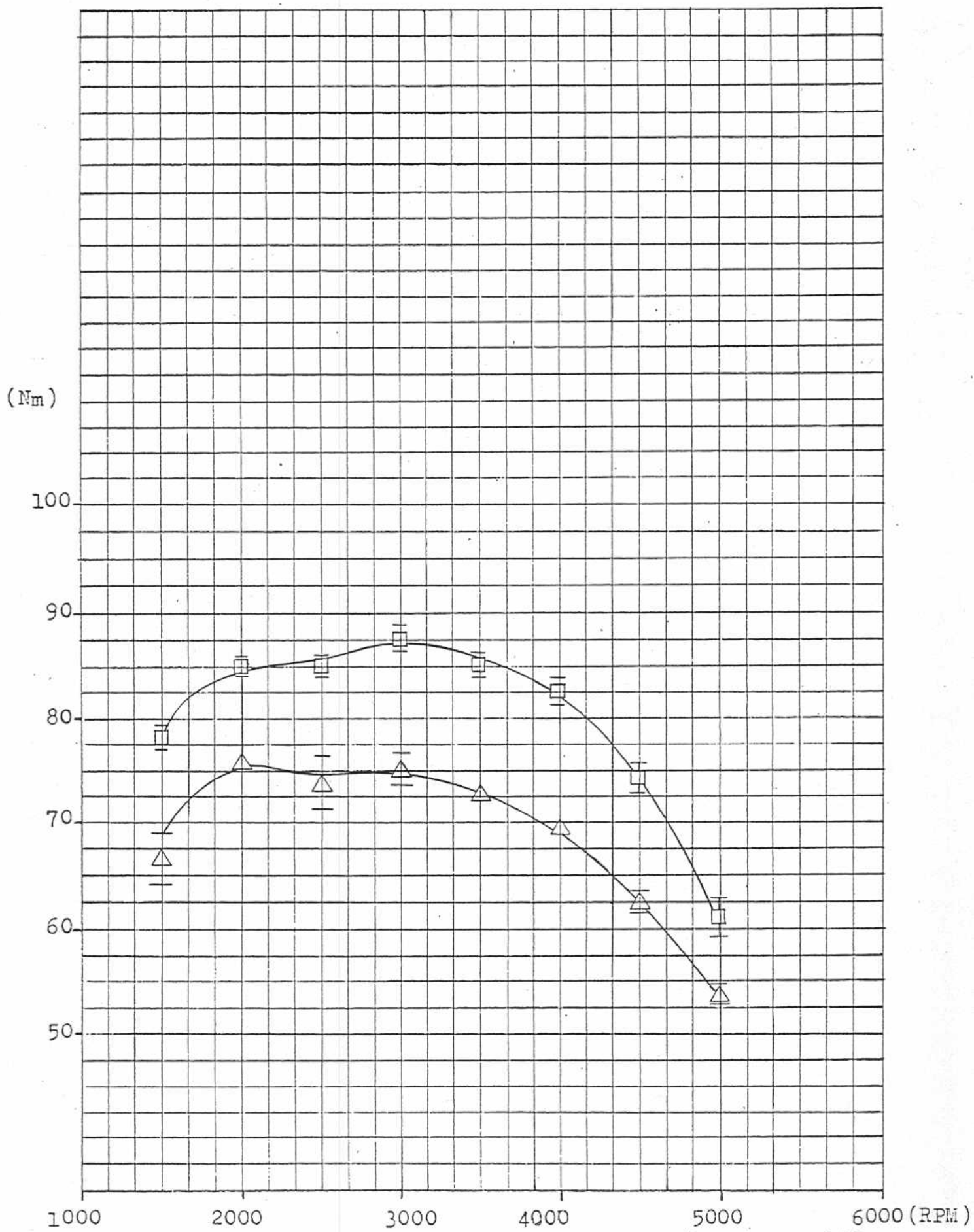
GRAFICA # 1 UCAB 135

Potencia (KW) vs RPM con 100% de abertura del carburador



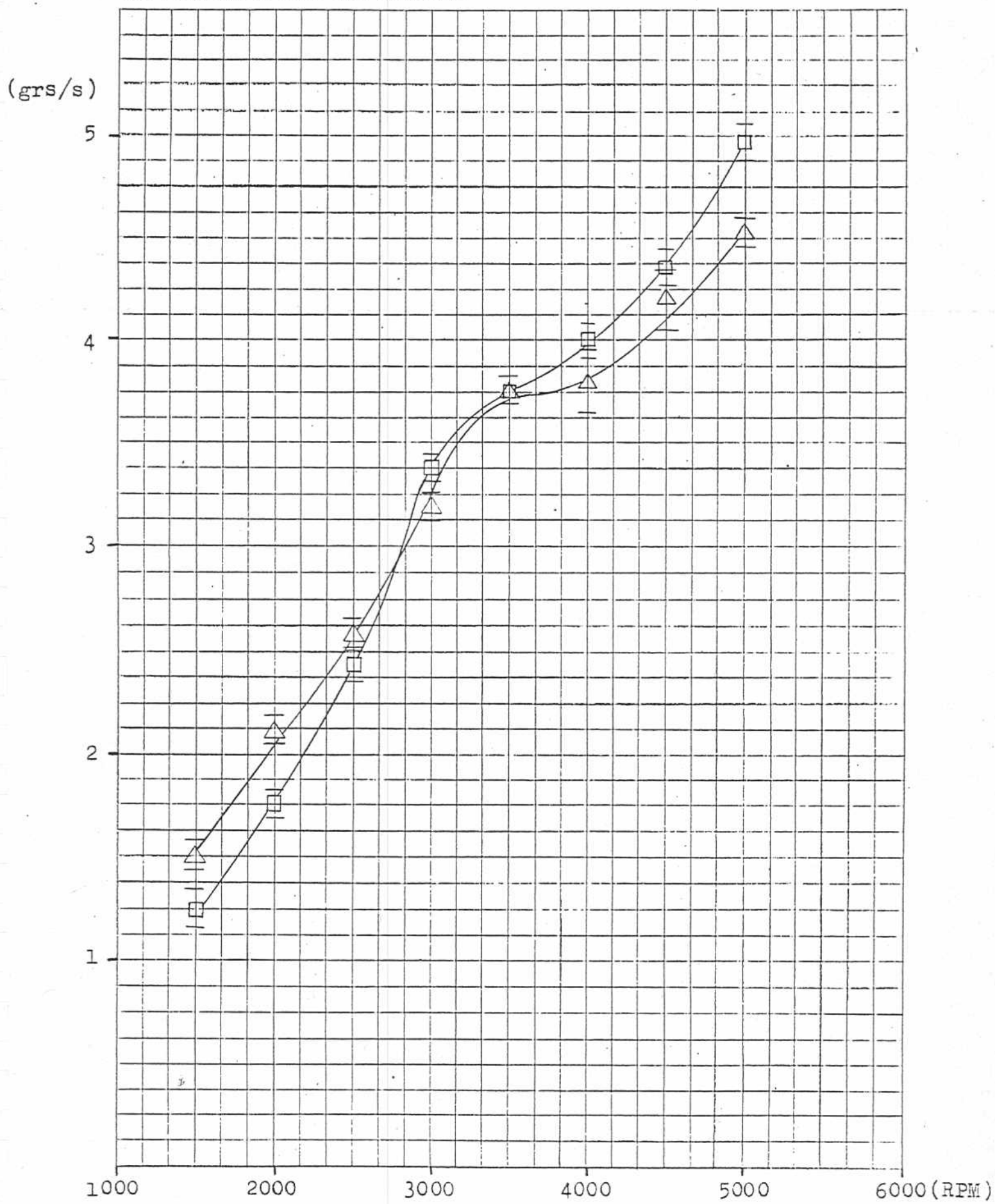
GRAFICA # 2 UCAB 136

Torque (Nm) vs RPM con 100% de abertura del carburador



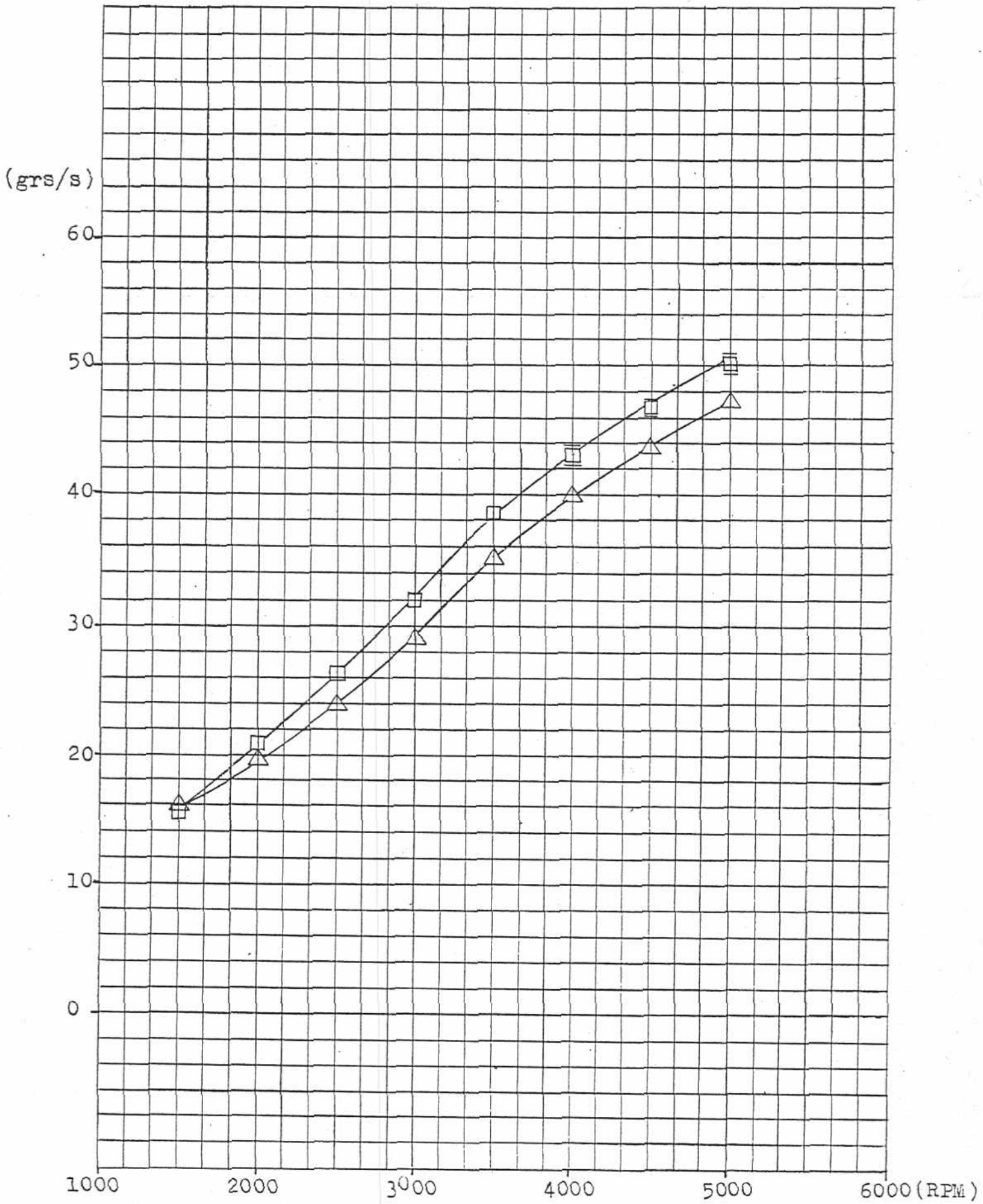
GRAFICA # 3 UCAB 137

Consumo horario de gasolina y gas vs RPM con 100% de abertura del carburador



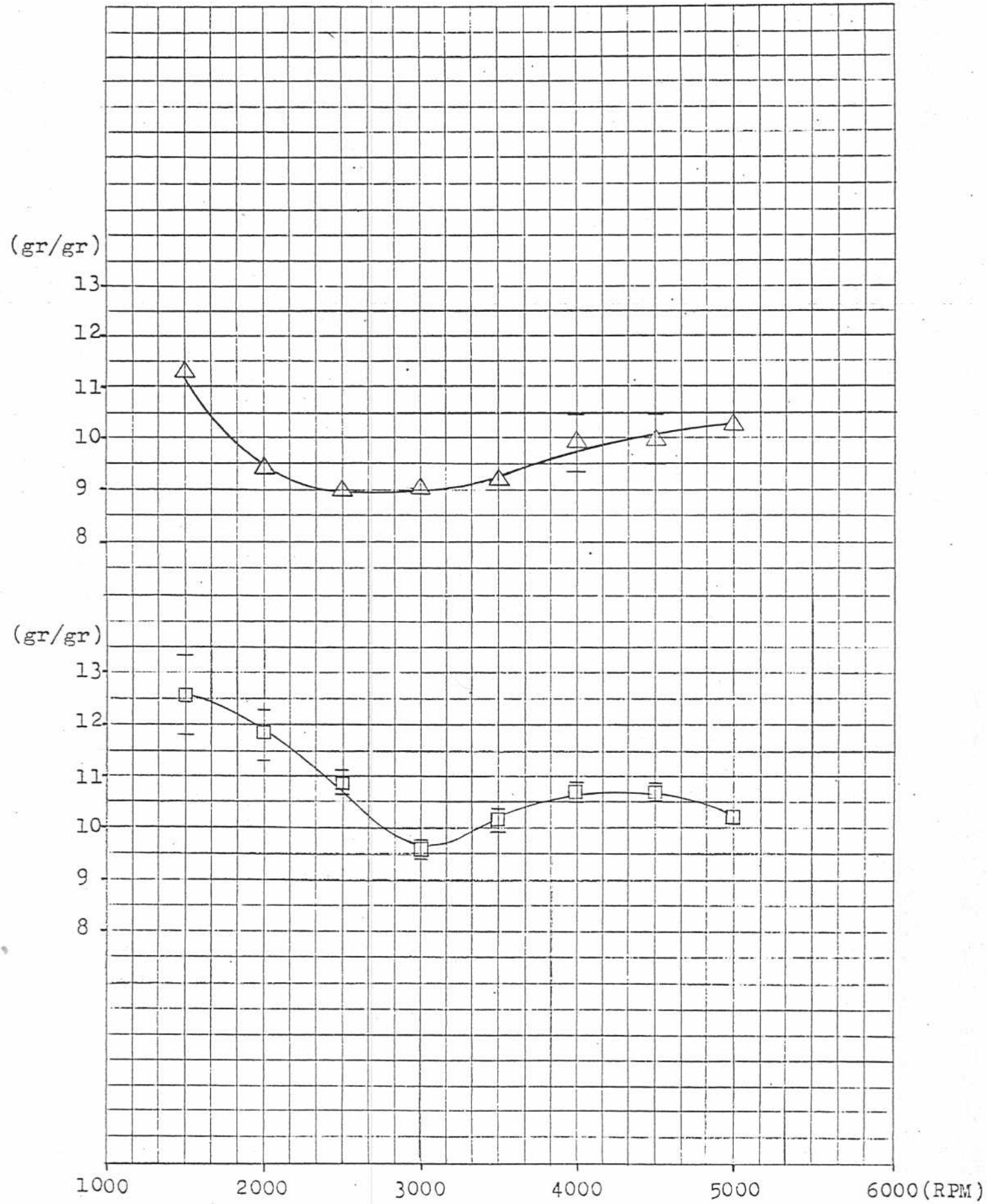
GRAFICA # 4 UCAB 138

Consumo horario de aire con gas y gasolina vs RPM
con 100% de abertura del carburador



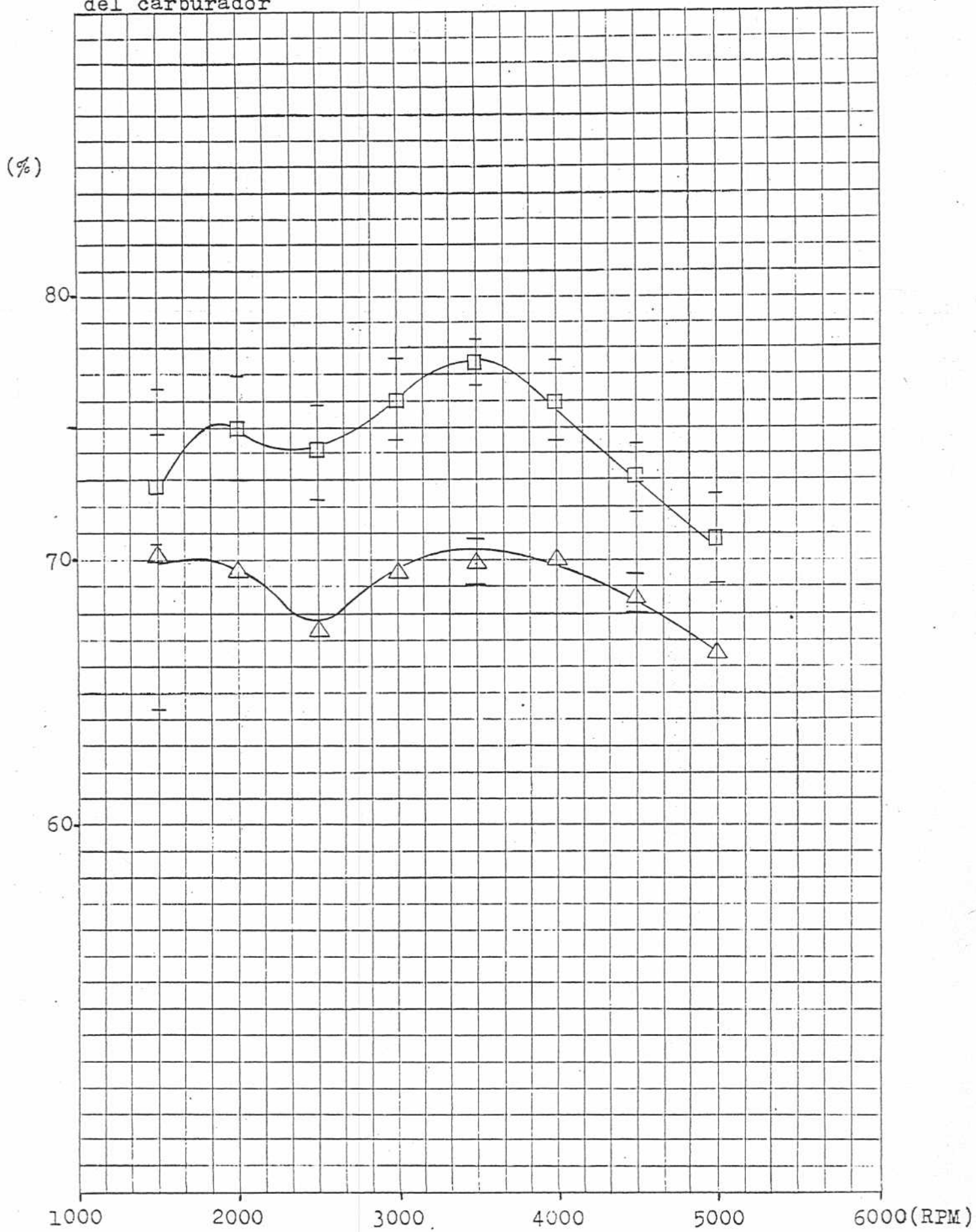
GRAFICA # 5 UCAB 139

Relación aire-combustible (rac) vs RPM con 100% de abertura del carburador



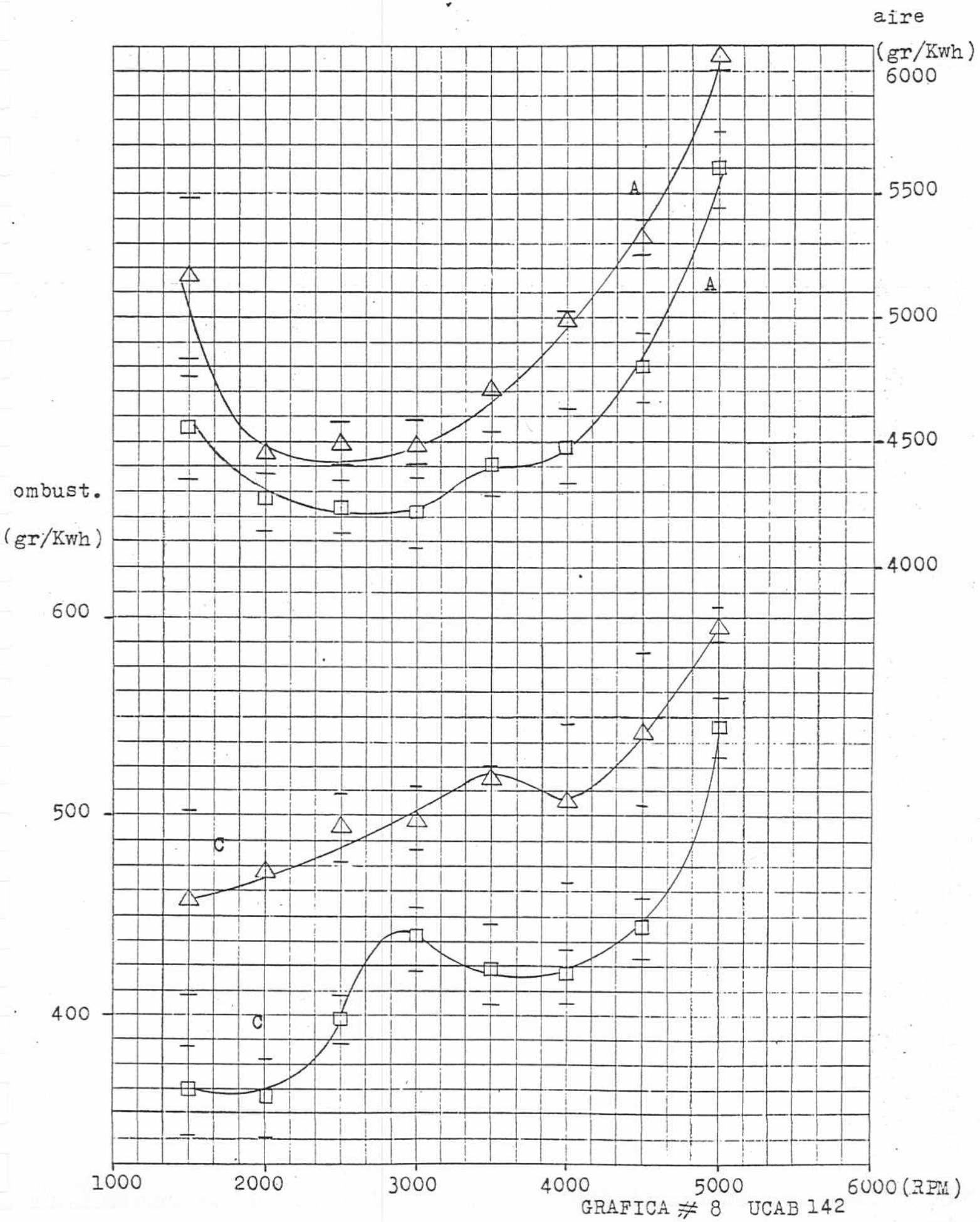
GRAFICA # 6 UCAB 140

Rendimiento volúmetrico (μ_v) vs RPM con 100% de abertura del carburador



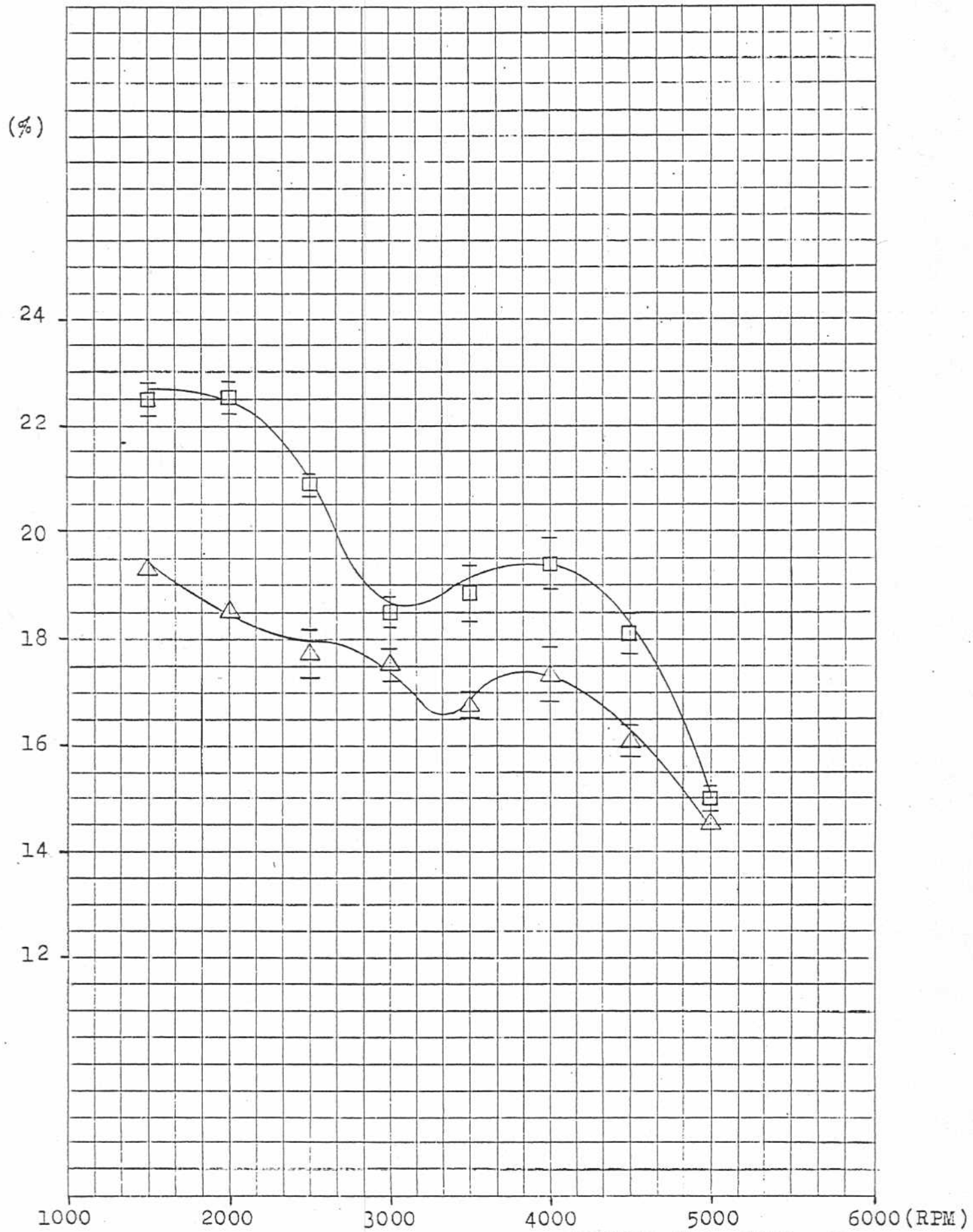
GRAFICA # 7 UCAB 141

Consumo específico de combustible y aire vs RPM con gas y gasolina a 100% de abertura del carburador



GRAFICA # 8 UCAB 142

Rendimiento total vs RPM con 100% de abertura del carburador



GRAFICA # 9 UCAB 143

▮ Prueba con carga variable y 50% de abertura de la mariposa del carburador con gas natural.

P = 697,6 mmHg T = 28 °C

rpm	N(KW)	M(mN)	mgn(gr/s)	ma (gr/s)	mat(gr/s)
5000	17,3±0,4	33,0±0,7	4,32±0,12	36,83±0,51	71,18
4500	20,7±0,5	43,9±1,1	4,27±0,28	35,41±0,10	64,06
4000	22,7±0,3	54,1±0,7	4,07±0,03	32,69±0,29	56,95
3500	22,4±0,3	61,1±0,7	3,66±0,06	29,86±0,31	49,83
3000	21,1±0,1	67,1±0,4	3,21±0,08	26,83±0,26	42,71
2500	18,5±0,1	70,6±0,4	2,53±0,04	22,81±0,10	35,59
2000	15,3±0,1	72,7±0,4	2,20±0,11	18,91±0,12	28,47
1500	9,5±0,2	60,4±0,1	1,22±0,14	13,63±0,10	21,35
1000	3,4±0,2	33,1±0,1	0,75±0,07	9,39±0,25	14,24

rpm	mespgn (gr/kwh)	mespa (gr/kwh)	rac	n_v(%)	n_T(%)
5000	897±40	7675±269	8,6±0,1	51,07±0,7	9,8±0,5
4500	739±26	6166±148	8,4±0,5	55,3±0,1	11,8±0,4
4000	644±16	5194±22	8,1±0,2	57,4±0,5	13,6±0,4
3500	587±2	4800±5	8,2±0,1	59,9±0,6	14,9±0,1
3000	547±20	4584±21	8,4±0,3	62,8±0,6	16,0±0,6
2500	497±8	4443±22	9,0±0,2	64,1±0,1	17,6±0,3
2000	520±26	4472±51	8,6±0,3	66,4±0,4	16,9±0,9
1500	474±57	5172±1	11,1±1,4	63,8±0,1	18,7±2,3
1000	820±91	10246±725	12,6±0,6	66,0±1,8	10,8±1,2

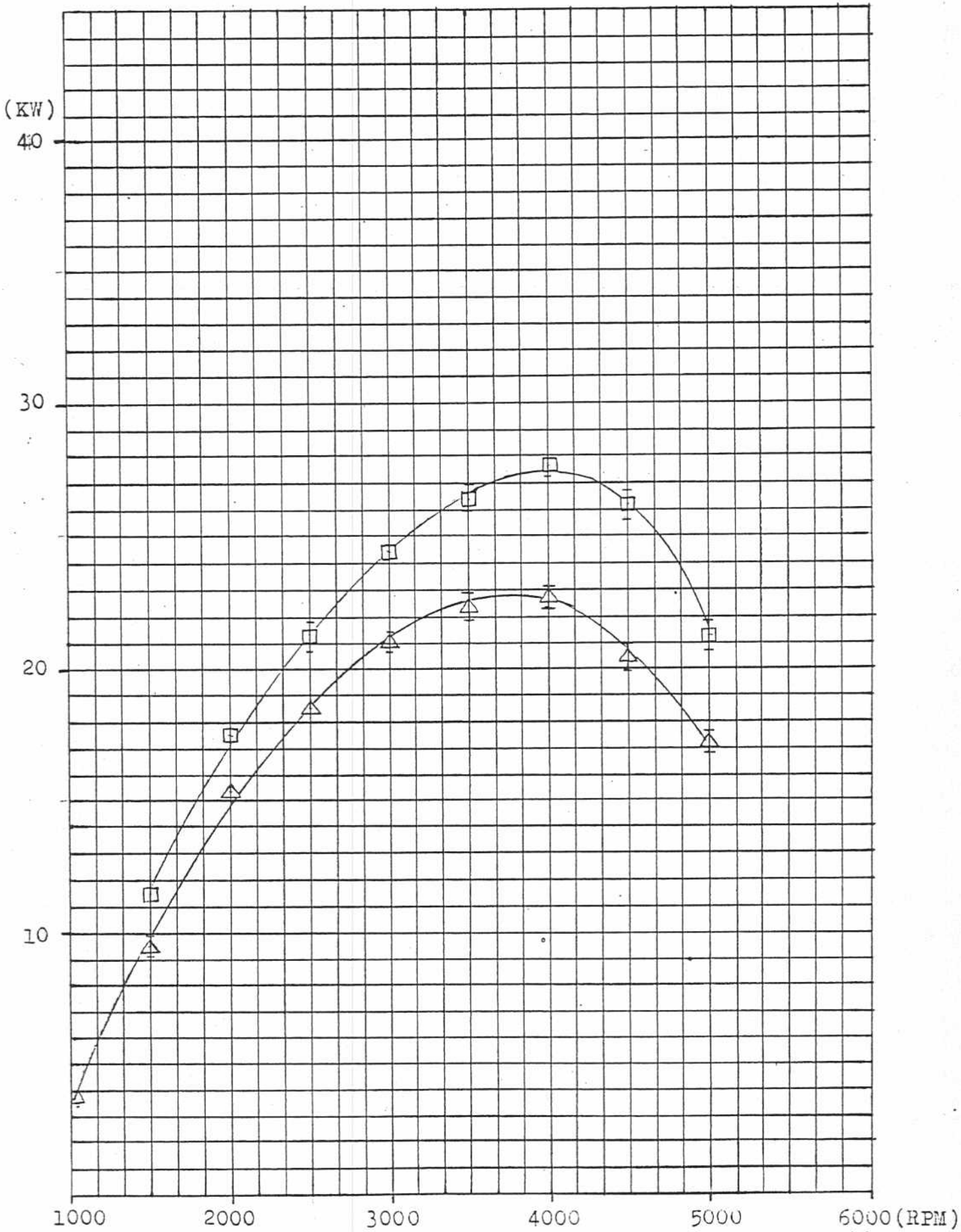
▮ Prueba con carga variable y 50% de abertura de la mariposa del carburador con **gasolina.**

P = 698,7 mmHg T = 25 °C

rpm	N(KW)	M(mN)	mG (gr/s)	ma (gr/s)	mat(gr/s)
5000	21,33±0,8	40,74±1,5	3,99±0,15	40,15±1,02	72,01
4500	26,15±0,8	55,49±1,6	3.33±0,15	40,15±1,08	64,81
4000	27,65±0,7	66,03±1,5	3,34±0,18	38,03±0,86	57,61
3500	26,26±0,7	71,64±1,5	3,10±0,20	34,33±0,61	50,41
3000	24,49±0,4	77,97±1,4	2,81±0,11	30,71±0,72	43,21
2500	21,33±0,4	81,48±1,6	2,39±0,10	26,24±0,54	36,01
2000	17,50±0,3	83,59±1,6	1,92±0,15	21,87±0,67	28,80
1500	11,47±0,2	73,05±1,7	1,44±0,10	16,36±0,40	21,60
1100	7,12±0,4	61,81±1,4	0,90±0,13	10,93±0,63	15,84

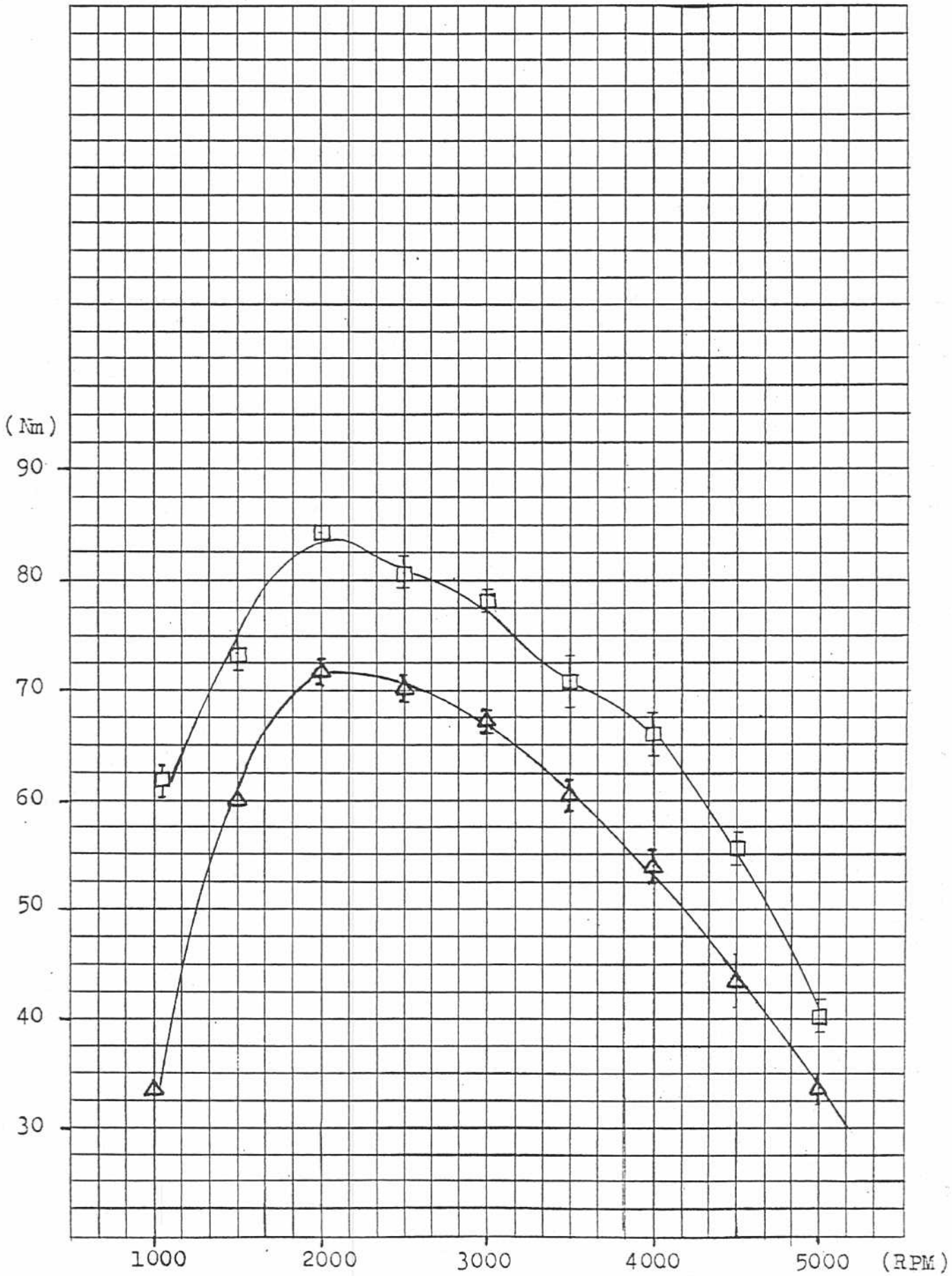
rpm	mespG (gr/kwh)	mespa (gr/kwh)	rac	n_v(%)	n_T(%)
5000	673±25	5426±166	10,1±0,6	55,76±1,5	12,1±1,3
4500	458±19	4426±164	12,1±0,7	61,95±1,7	17,75±1,4
4000	434±19	3910±140	11,4±0,8	66,01±1,6	18,73±1,4
3500	425±15	3747±106	11,1±0,6	68,10±1,2	19,15±1,6
3000	413±16	3632±138	10,9±0,7	71,07±1,7	19,69±1,3
2500	403±21	3584±143	11,0±0,8	72,87±1,5	20,18±1,7
2000	396±30	3676±193	11,4±0,9	75,94±2,3	20,57±2,4
1500	453±38	4192±255	11,4±1,1	75,74±2,1	17,98±1,8
1100	452±59	5022±305	12,1±1,0	69,00±2,2	17,98±1,5

Potencia (KW) vs RPM con 50% de abertura del carburador



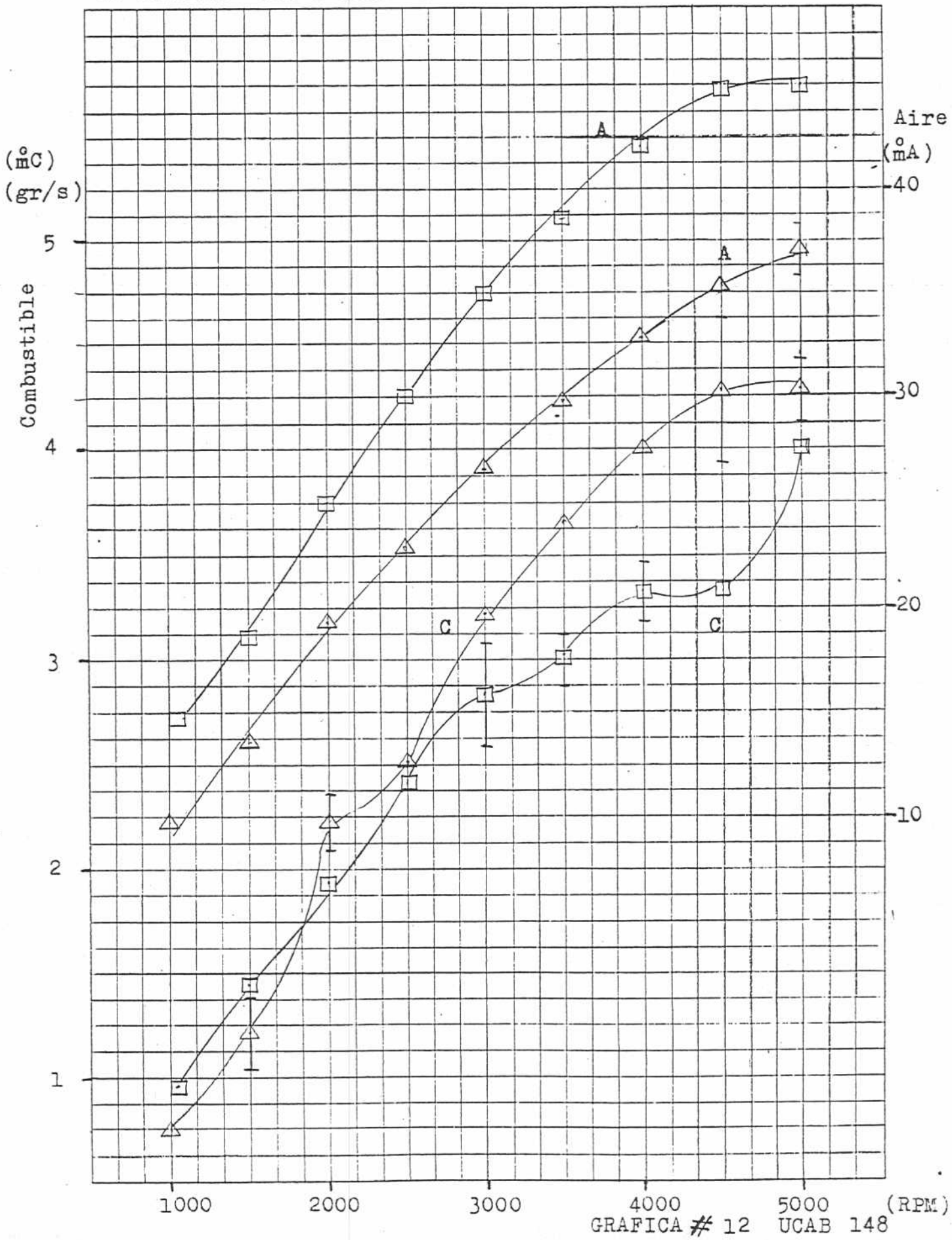
GRAFICA # 10 UCAB 146

Torque (Nm) vs RPM con 50% de abertura del carburador



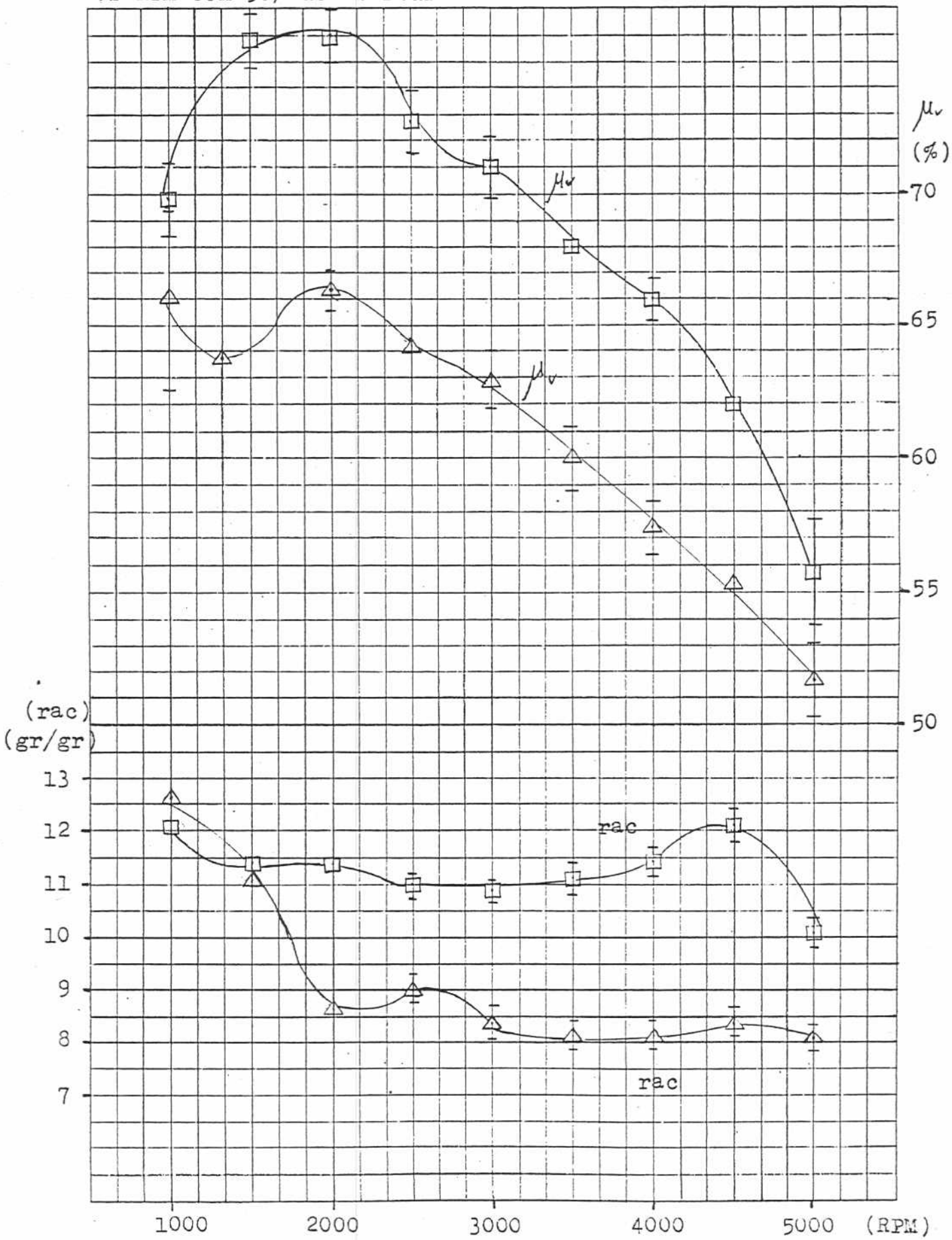
GRAFICA # 11 UCAB 147

Consumo horario de combustible y aire vs RPM con 50% de abertura del carburador



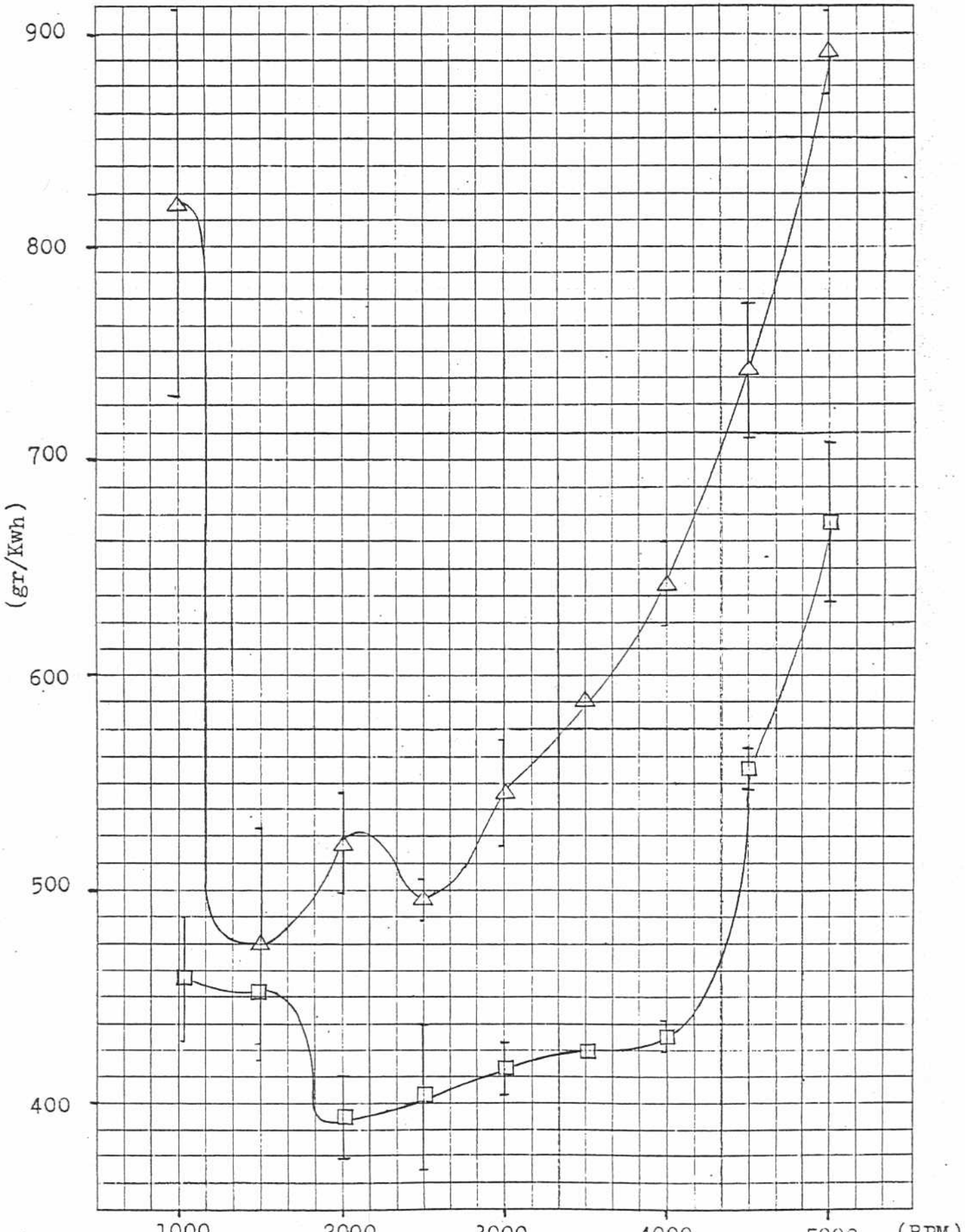
GRAFICA # 12 UCAB 148

Relación aire-combustible (rac) y rendimiento volumétrico (μ_v) vs RPM con 50% de abertura del carburador



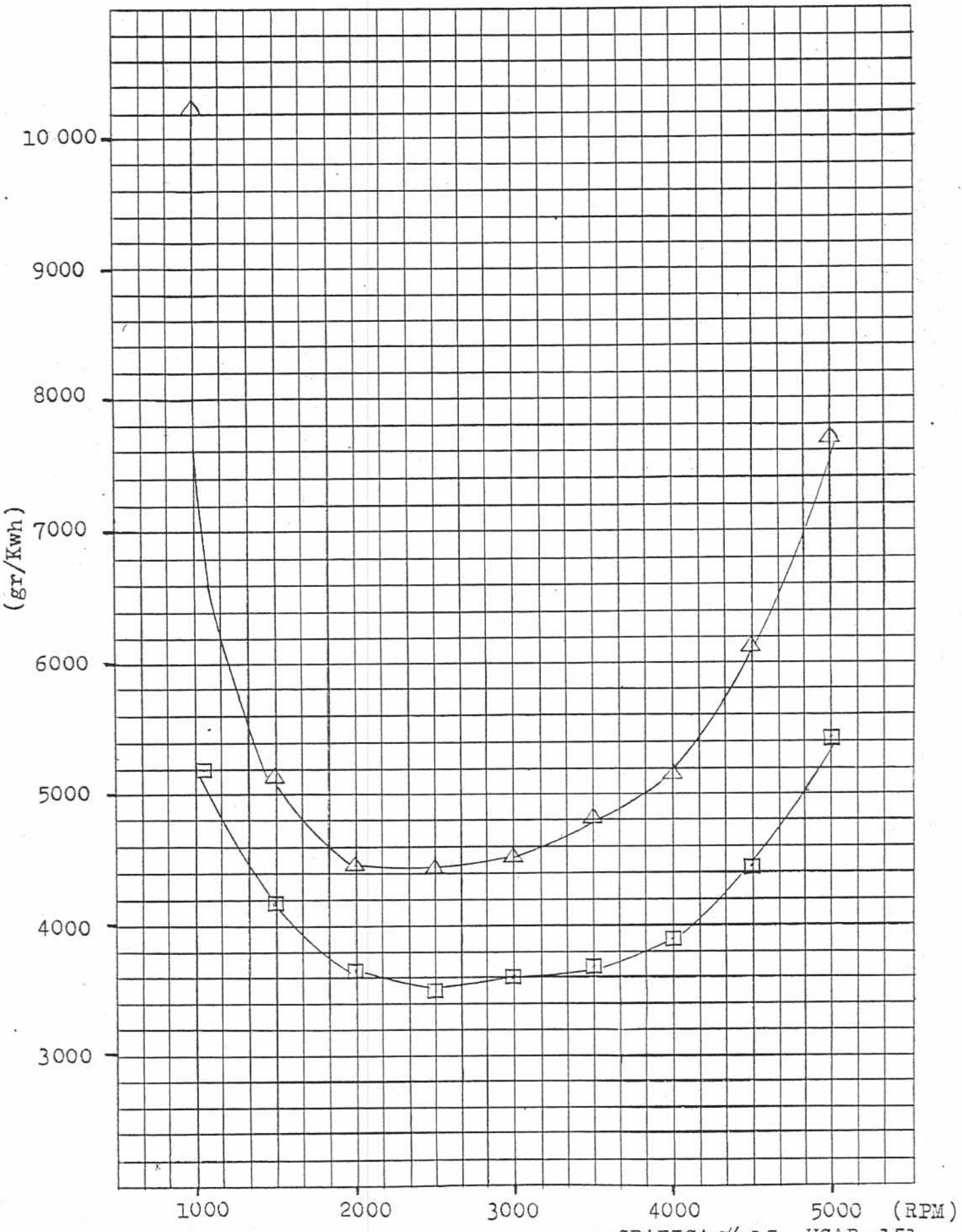
GRAFICA # 13 UCAB 149

Consumo específico de combustible vs RPM a 50% de abertura del carburador



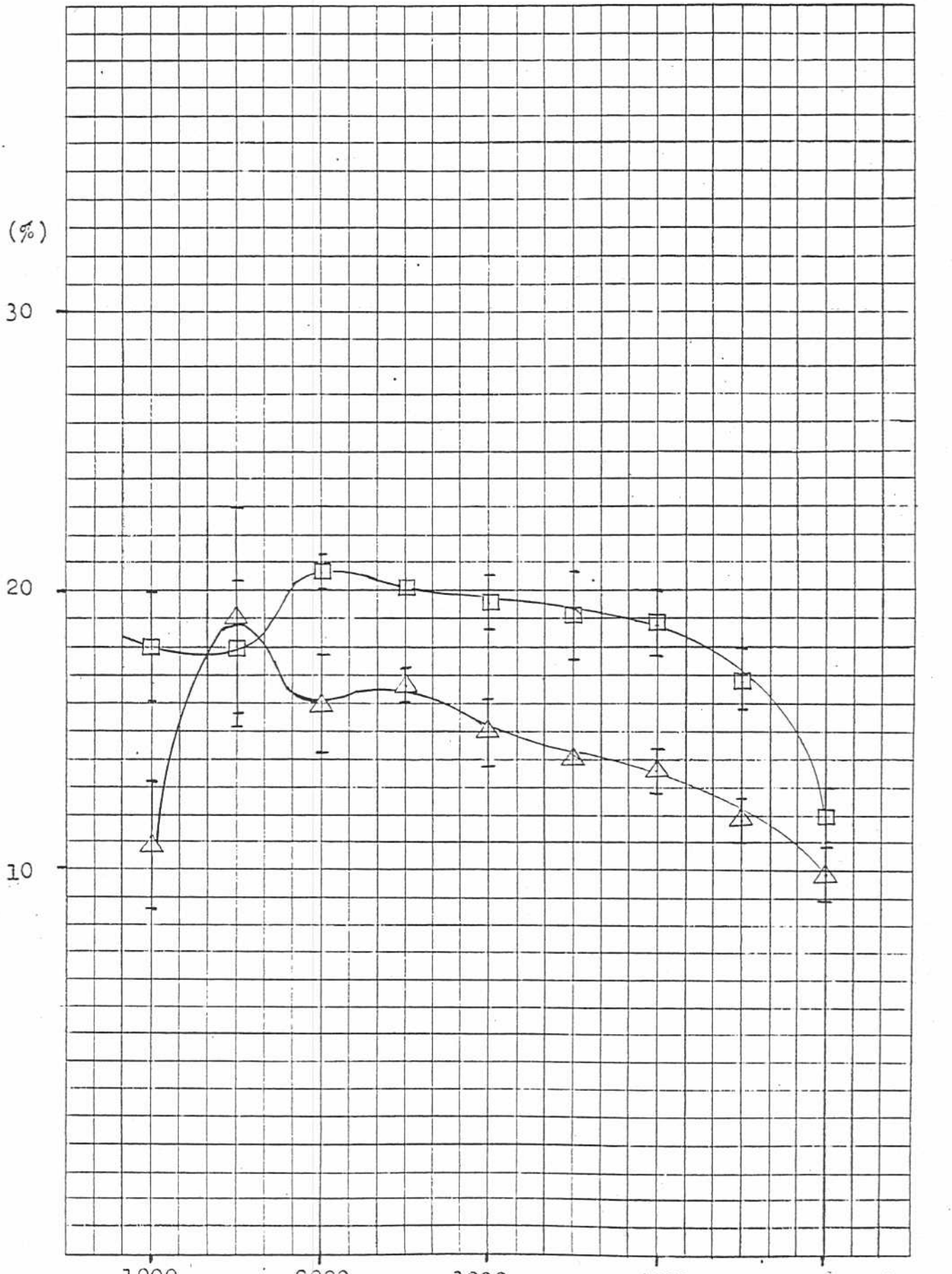
GRAFICA # 14 UCAB 150

Consumo específico de aire vs RPM con 50% de abertura del carburador



GRAFICA # 15 UCAB 151

Rendimiento total vs RPM con 50% de abertura del carburador



GRAFICA # 16 UCAB 152

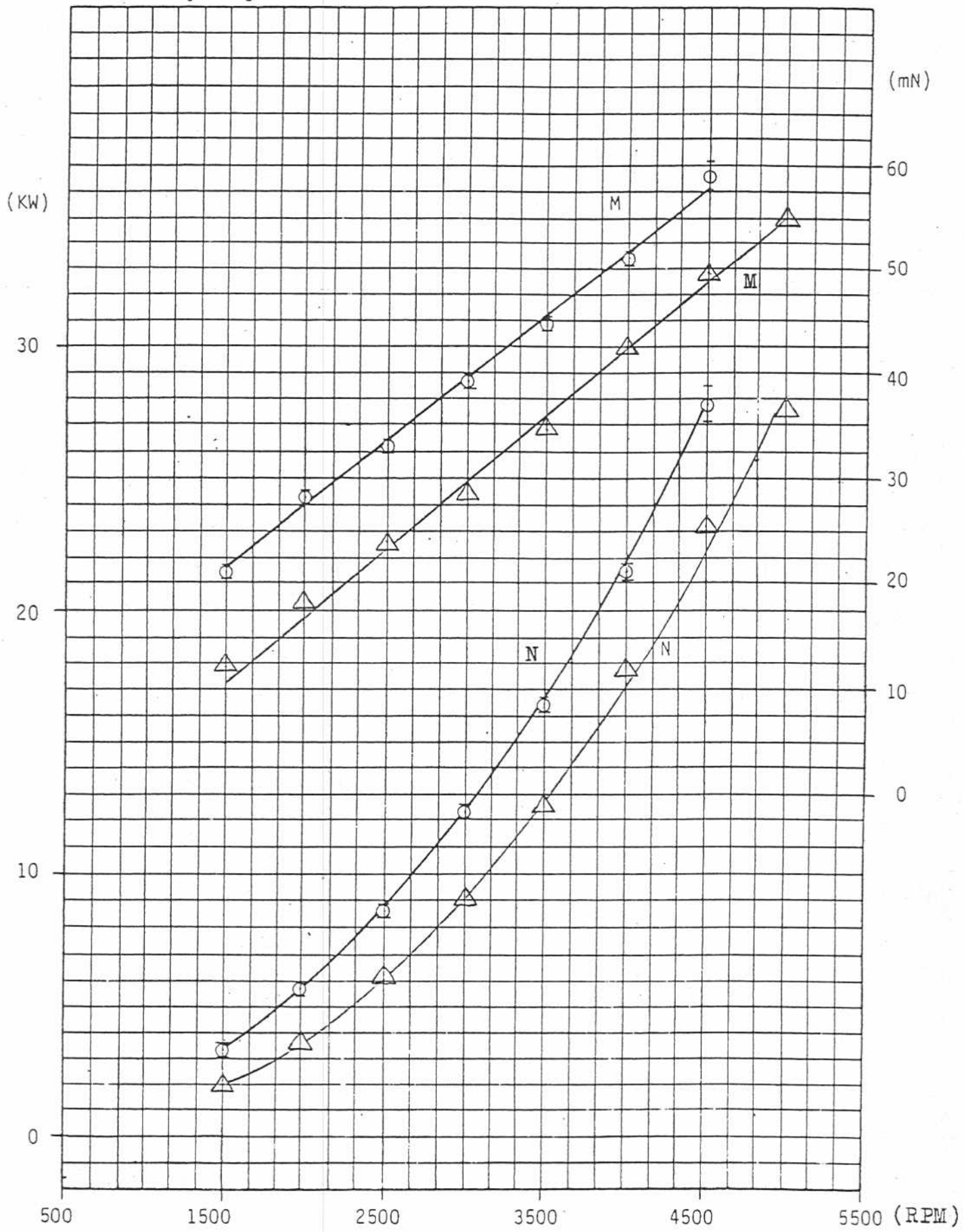
▮ Prueba con abertura de la mariposa del carburador variable y carga constante con **gas natural.**

P = 698,5 mmHg T = 26,5 °C

rpm	N(KW)	M(mN)	mgn(gr/s)	ma (gr/s)	mat(gr/s)
5000	27,8±0,2	53,1±0,4	4,17±0,11	47,90±0,05	71,63
4500	23,2±0,4	49,2±0,7	3,22±0,21	37,13±0,32	64,47
4000	17,8±1,0	42,4±2,5	2,45±0,20	28,10±0,25	57,30
3500	12,6±0,8	34,4±2,1	1,70±0,04	21,72±0,54	50,14
3000	9,1±0,5	28,8±1,4	1,38±0,08	17,82±0,53	42,98
2500	6,2±0,5	23,6±1,8	1,02±0,04	13,84±0,17	35,82
2000	3,8±0,4	18,0±1,8	0,69±0,02	9,91±0,24	28,65
1500	2,0±0,2	12,3±1,1	0,47±0,01	7,79±0,30	21,49

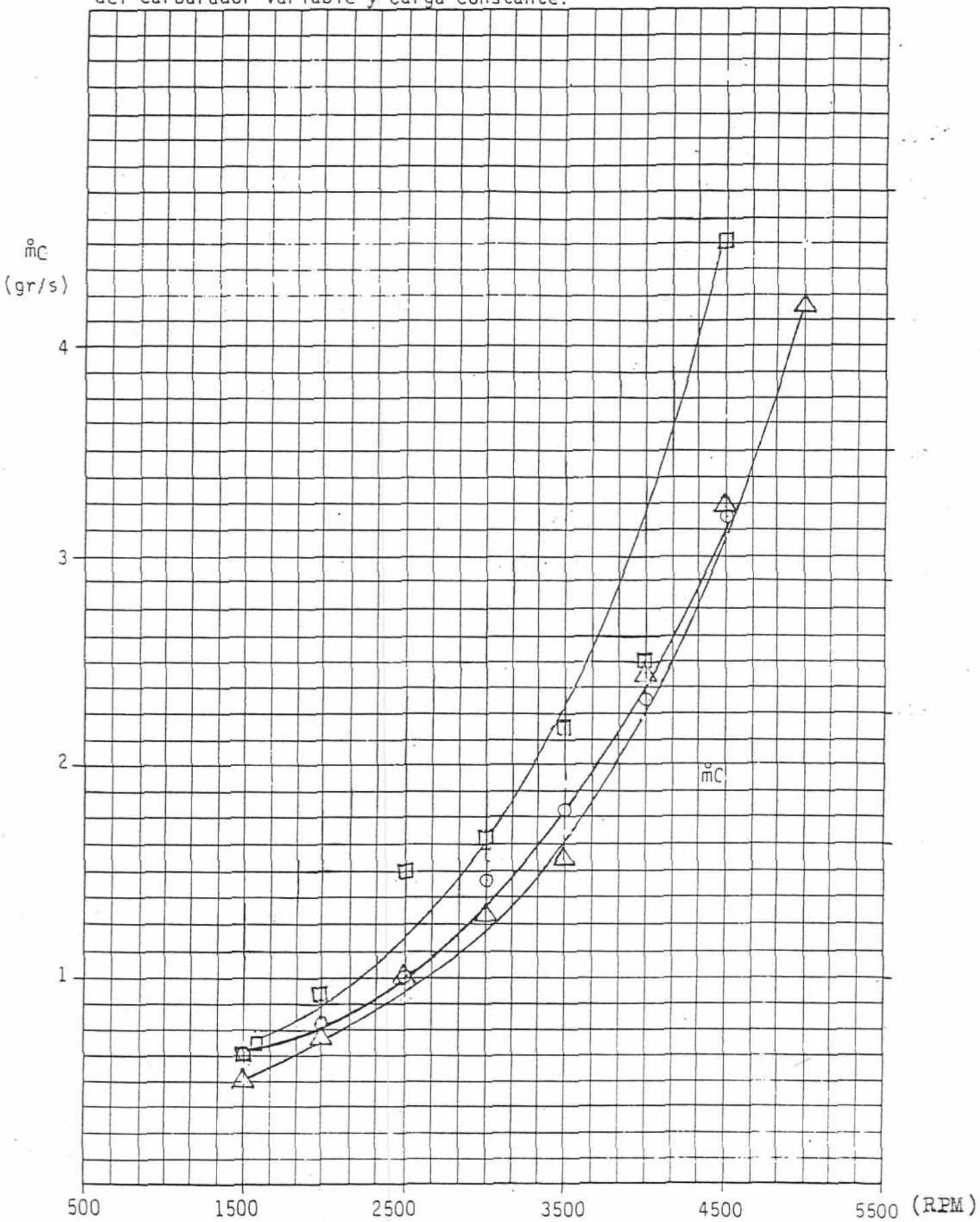
rpm	mespgn (gr/kwh)	mespa (gr/kwh)	rac	n_v(%)	n_T(%)
5000	540±10	6211±35	11,5±0,3	66,9±0,1	16,2±0,4
4500	501±40	5770±34	11,6±0,9	57,6±0,5	17,6±1,4
4000	499±69	5700±279	11,6±1,1	49,1±0,5	17,8±2,4
3500	486±40	6231±535	12,9±0,1	43,3±1,1	18,1±1,5
3000	552±59	7118±556	13,0±0,4	41,5±1,3	16,0±1,8
2500	598±65	8142±707	13,7±0,4	38,7±0,5	14,8±1,6
2000	667±46	9575±713	14,4±0,1	34,6±0,9	13,1±0,9
1500	883±76	14582±691	16,6±0,7	36,2±1,4	10,0±0,9

Potencia (KW) y Torque (mN) vs. RPM con abertura del carburador variable y carga constante.



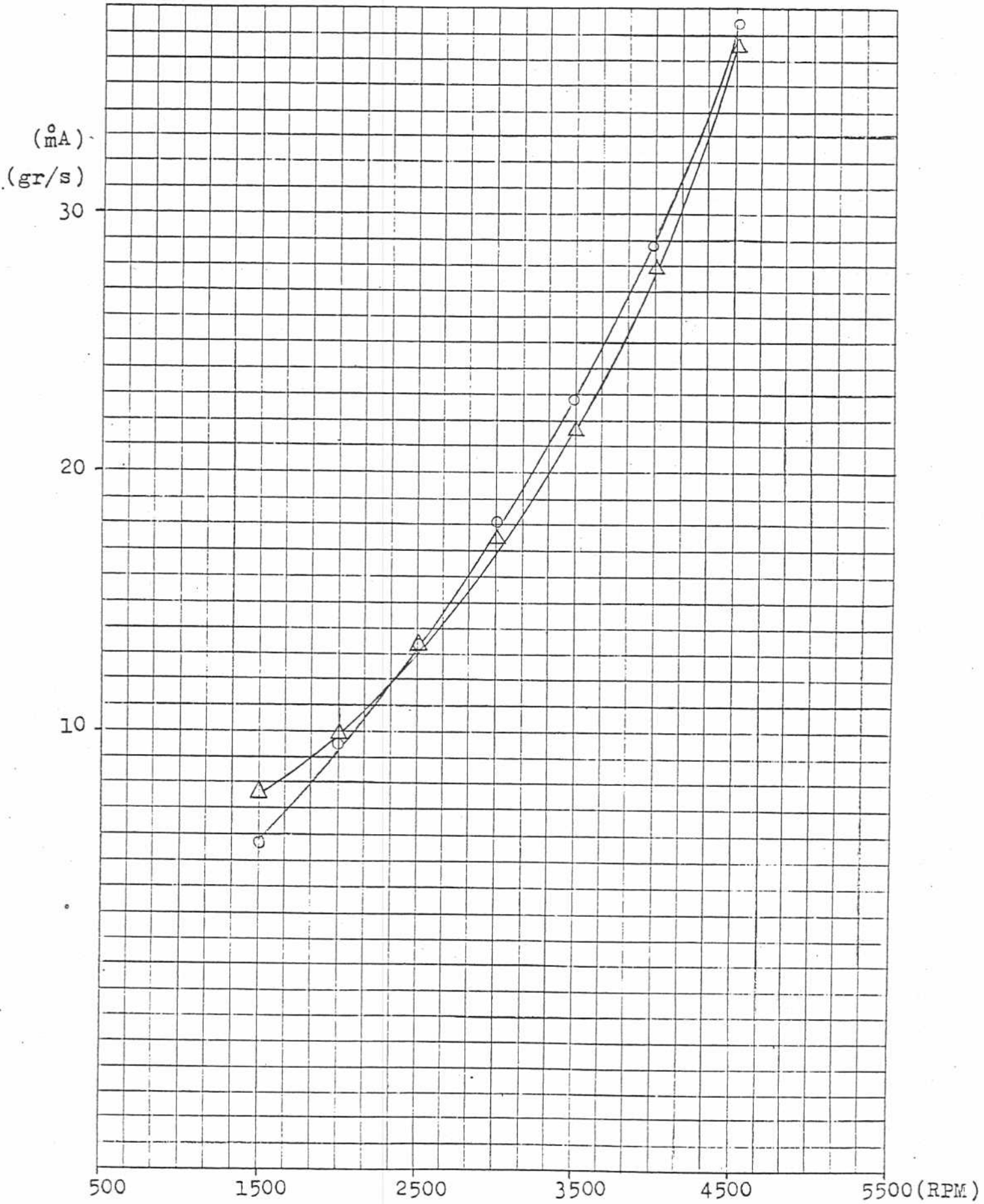
GRAFICA # 17 UCAB 154

Consumo horario de combustible ($\mathring{m}C$) vs RPM con abertura del carburador variable y carga constante.



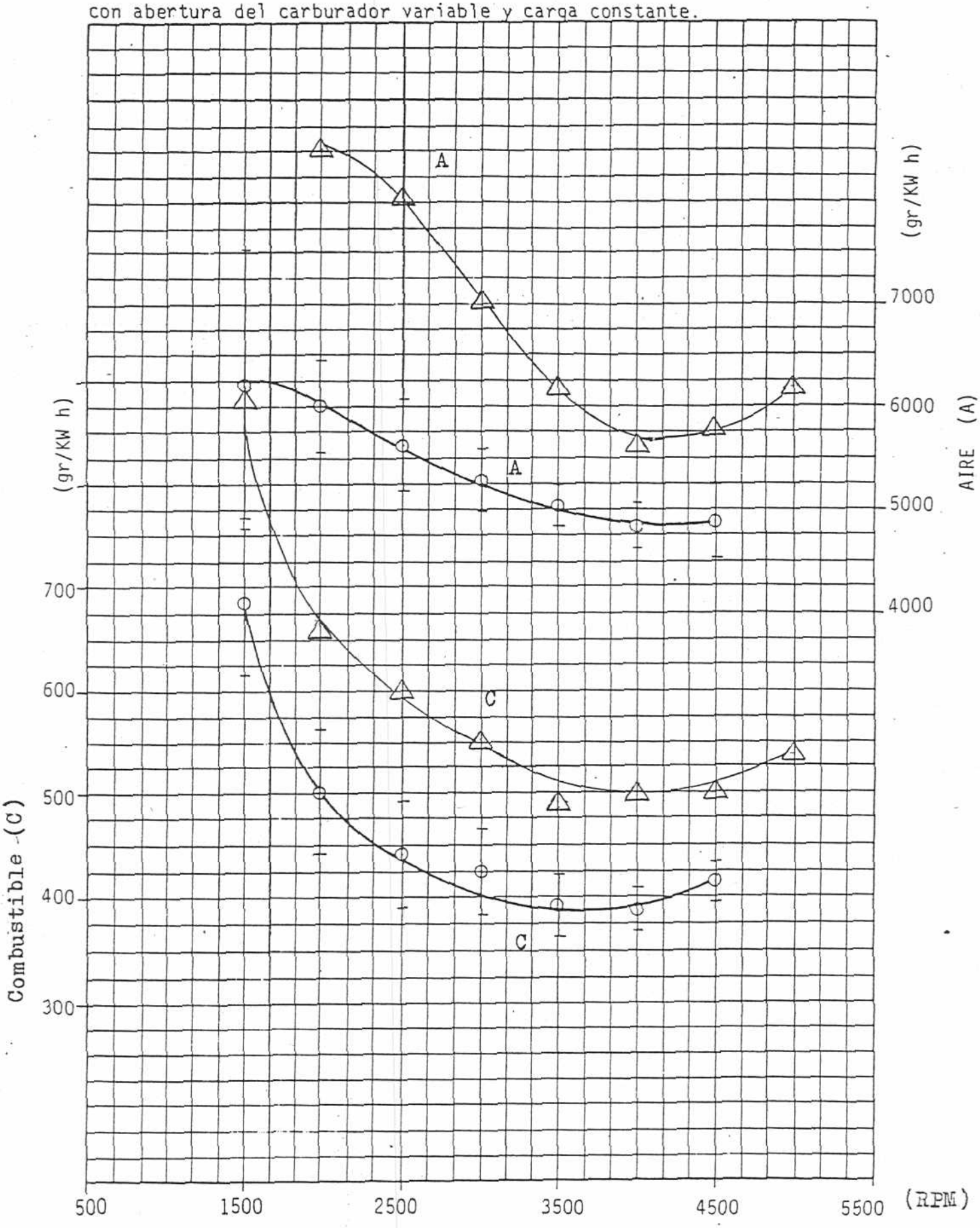
GRAFICA # 18 UCAB 155

Consumo horario de aire (ṁA) vs RPM con abertura del carburador variable y carga constante



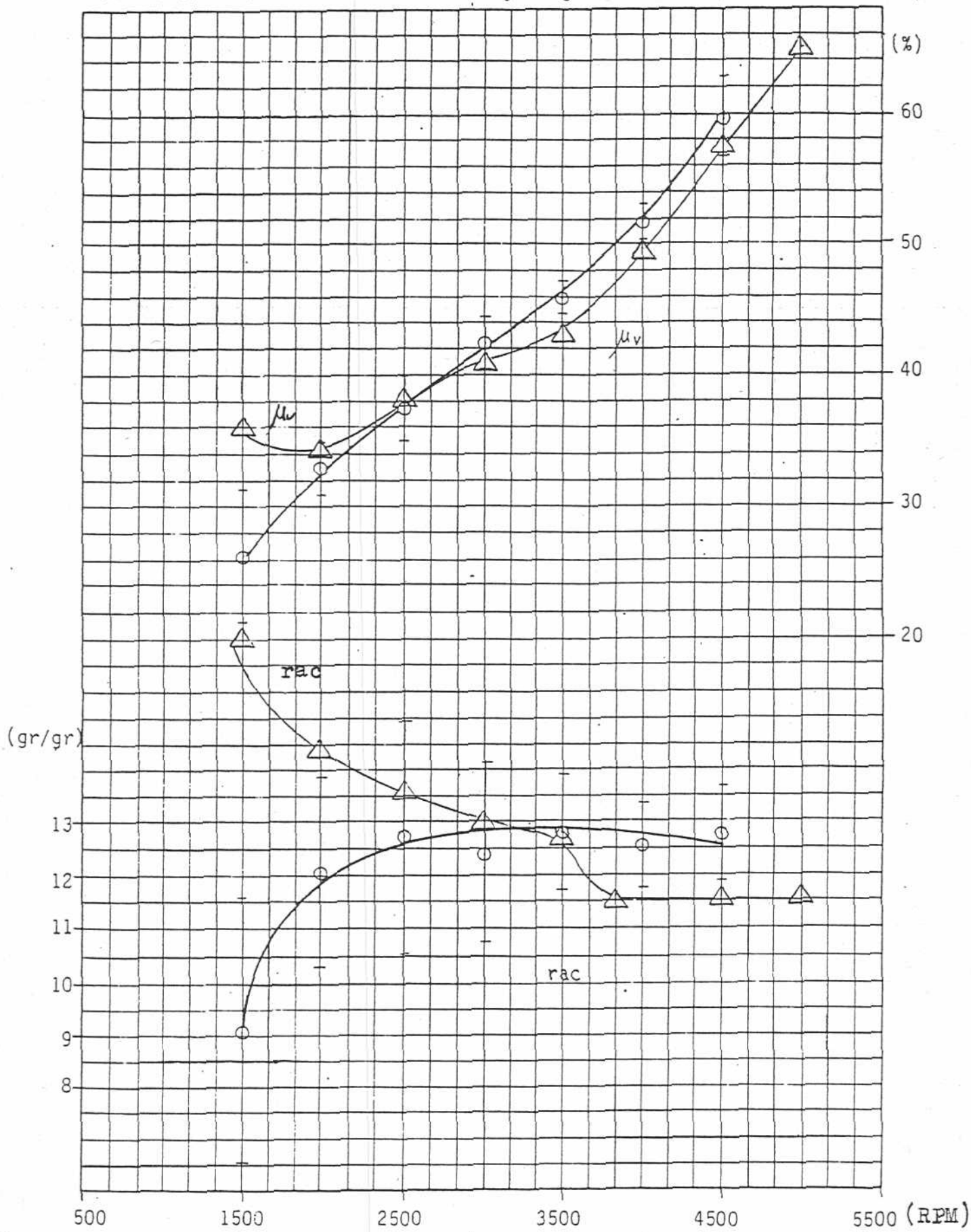
GRAFICA # 19 UCAB 156

Consumo específico de combustible y consumo específico de aire vs. (RPM) con abertura del carburador variable y carga constante.



GRAFICA # 20 UCAB 157

Relación aire-combustible (rac) y rendimiento volumétrico (μ_v) vs. **RPM** con abertura del carburador variable y carga constante.



GRAFICA # 21 UCAB 158

▮ Prueba con abertura de la mariposa del carburador y carga variables a velocidad constante de 4000 rpm **con gas natural.**

P = 699,6 mmHg T = 26,6 °C

Abert	N(KW)	M(mN)	mgn(gr/s)	ma (gr/s)	mat(gr/s)
90	30,8±0,5	73,4±1,1	4,33±0,22	40,18±0,19	57,22
80	28,4±0,2	67,8±0,4	4,53±0,28	38,75±0,17	57,22
70	26,1±0,8	62,2±1,8	4,41±0,32	36,38±0,28	57,22
60	24,1±0,6	57,6±1,4	3,99±0,10	34,12±0,31	57,22
50	21,2±0,6	50,6±1,4	3,89±0,28	31,99±0,21	57,22
40	15,5±0,5	36,9±1,1	2,72±0,21	26,00±0,22	57,22
30	8,8±0,6	21,1±1,4	1,92±0,25	19,86±0,10	57,22

Abert	mespgn (gr/kwh)	mespa (gr/kwh)	rac	n_v(%)	n_T(%)
90	498±13	4774±35	9,3±0,5	69,8±1,1	17,6±0,5
80	571±29	4940±58	8,2±0,4	67,3±0,3	15,4±0,8
70	601±18	4892±33	7,9±0,7	63,2±0,8	14,6±0,5
60	598±15	4970±48	8,5±0,3	59,3±1,2	14,7±0,4
50	637±8	5289±61	8,2±0,8	55,6±0,9	13,7±0,2
40	617±17	5891±75	9,3±0,9	45,2±0,5	14,2±0,4
30	773±30	7593±80	9,5±0,5	34,5±0,6	11,0±0,5

▮ Prueba con abertura de la mariposa del carburador y carga variables a velocidad constante de 3000 rpm con **gas natural.**

P = 699,2 mmHg T = 26 °C

Abert	N(KW)	M(mN)	mgn(gr/s)	ma (gr/s)	mat(gr/s)
90	22,3±1,3	71,0±4,3	3,35±0,15	30,46±1,3	43,08
80	23,0±0,5	73,1±1,5	3,20±0,20	30,15±1,1	43,08
70	21,7±0,1	69,2±0,4	3,15±0,25	28,55±1,0	43,08
60	20,8±0,3	66,0±0,7	2,85±0,15	27,55±1,3	43,08
50	19,6±0,1	62,5±0,1	2,60±0,10	26,33±1,1	43,08
40	16,6±0,3	52,7±0,7	2,4±0,10	23,31±0,9	43,08
30	11,7±0,4	37,2±1,4	1,90±0,10	18,87±0,8	43,08
20	3,7±0,4	11,6±1,1	1,15±0,15	12,99±0,9	43,08

Abert	mespgn (gr/kwh)	mespa (gr/kwh)	rac	n_v(%)	n_T(%)
90	545±57	4644±41	9,5±0,8	70,7±0,9	16,2±1,7
80	502±22	4823±21	10,0±0,6	70,0±1,1	17,5±0,8
70	522±39	4754±15	9,8±0,5	66,3±0,9	16,9±1,3
60	495±21	4732±26	9,2±0,1	63,9±0,7	17,7±0,8
50	477±10	4827±20	10,1±0,2	61,1±0,8	18,3±0,1
40	522±7	5140±33	9,7±0,9	54,1±0,3	16,7±0,2
30	586±22	6037±28	9,9±0,5	43,8±0,9	15,0±0,6
20	1160±254	14126±198	10,0±0,8	30,1±0,6	7,9±1,7

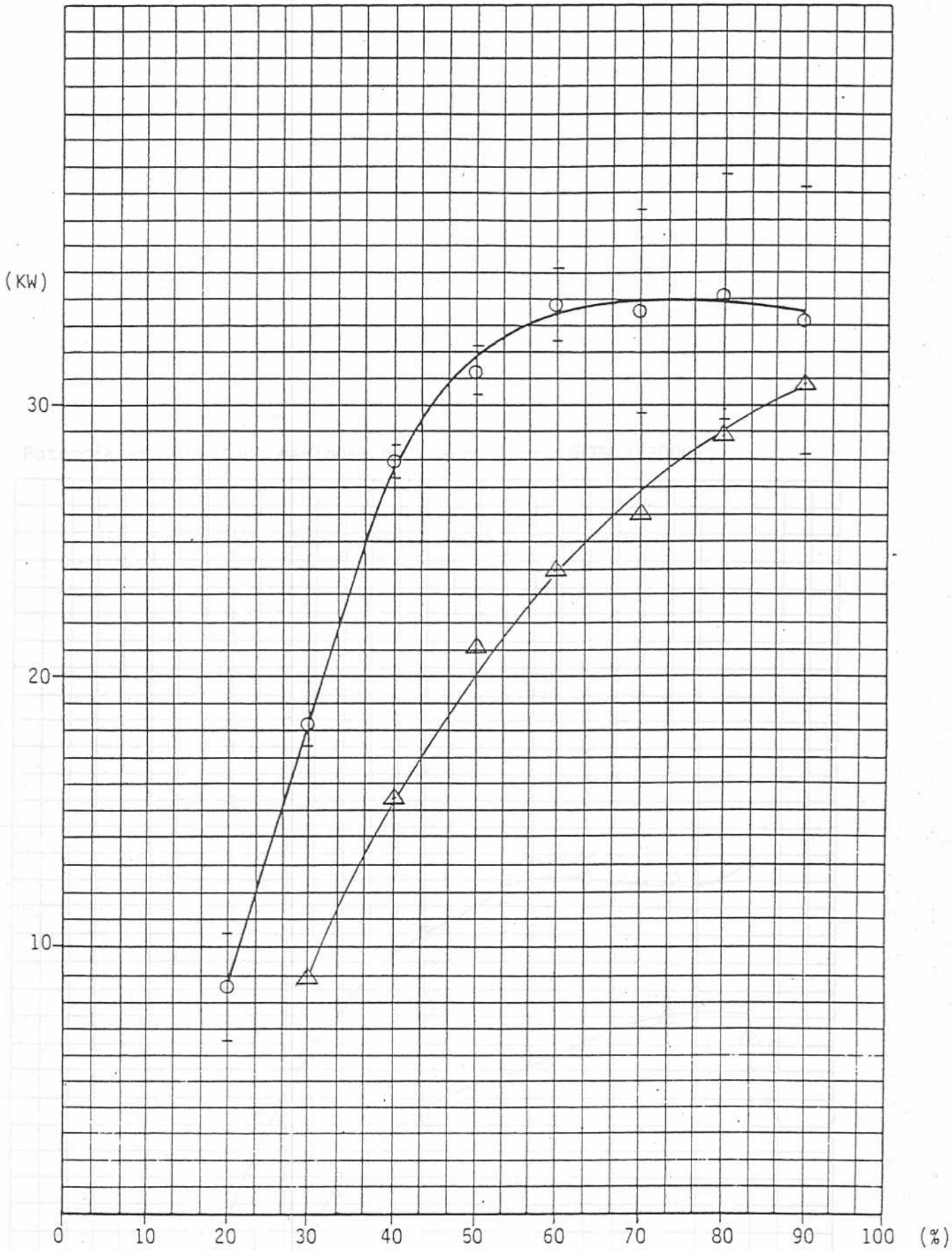
▮ Prueba con abertura de la mariposa del carburador y carga variables a velocidad constante de 2000 rpm con **gas natural.**

P = 699,1 mmHg T = 26,5 °C

Abert	N(KW)	M(mN)	mgn(gr/s)	ma (gr/s)	mat(gr/s)
90	16,2±0,9	77,3±4,3	2,21±0,22	20,27±0,33	28,63
80	16,1±1,1	76,9±5,3	2,00±0,15	20,04±0,51	28,63
70	15,7±0,8	74,8±3,9	1,63±0,23	19,80±0,42	28,63
60	15,4±0,8	73,4±3,9	1,44±0,32	19,08±1,12	28,63
50	14,5±0,7	69,2±3,2	1,41±0,47	18,59±0,95	28,63
40	12,7±0,8	60,8±3,9	1,33±0,36	17,55±0,94	28,63
30	10,5±0,9	49,4±4,2	1,31±0,11	15,58±0,43	28,63
20	6,1±1,4	29,2±6,7	0,89±0,19	11,84±0,60	28,63

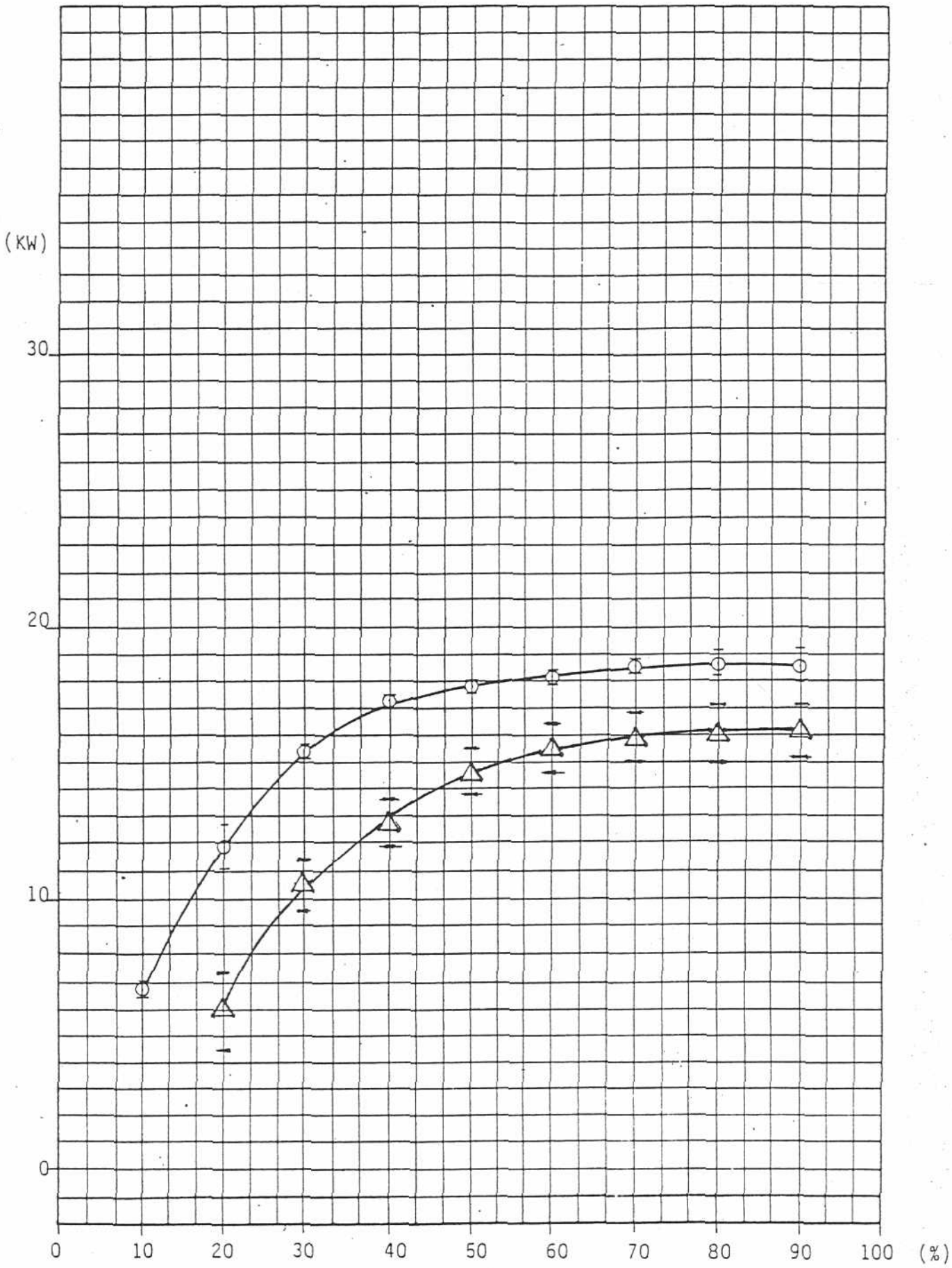
Abert	mespgn (gr/kwh)	mespa (gr/kwh)	rac	n_v(%)	n_T(%)
90	471±14	4770±48	10,1±0,9	70,8±0,8	18,6±0,6
80	456±15	4808±51	10,5±0,7	70,0±1,0	19,2±0,8
70	436±31	4799±43	11,0±0,4	69,2±0,5	20,0±0,3
60	420±25	4718±37	11,2±0,7	66,7±0,9	20,8±0,8
50	443±19	4839±59	10,9±0,5	64,9±1,2	19,7±1,7
40	483±27	5304±70	11,0±0,4	61,3±1,5	18,1±1,5
30	527±31	5867±80	11,1±0,3	54,4±1,1	16,6±0,8
20	765±20	9051±250	11,8±0,8	41,3±0,9	11,4±1,1

Potencia vs. abertura mariposa del carburador.(RPM= 4000).



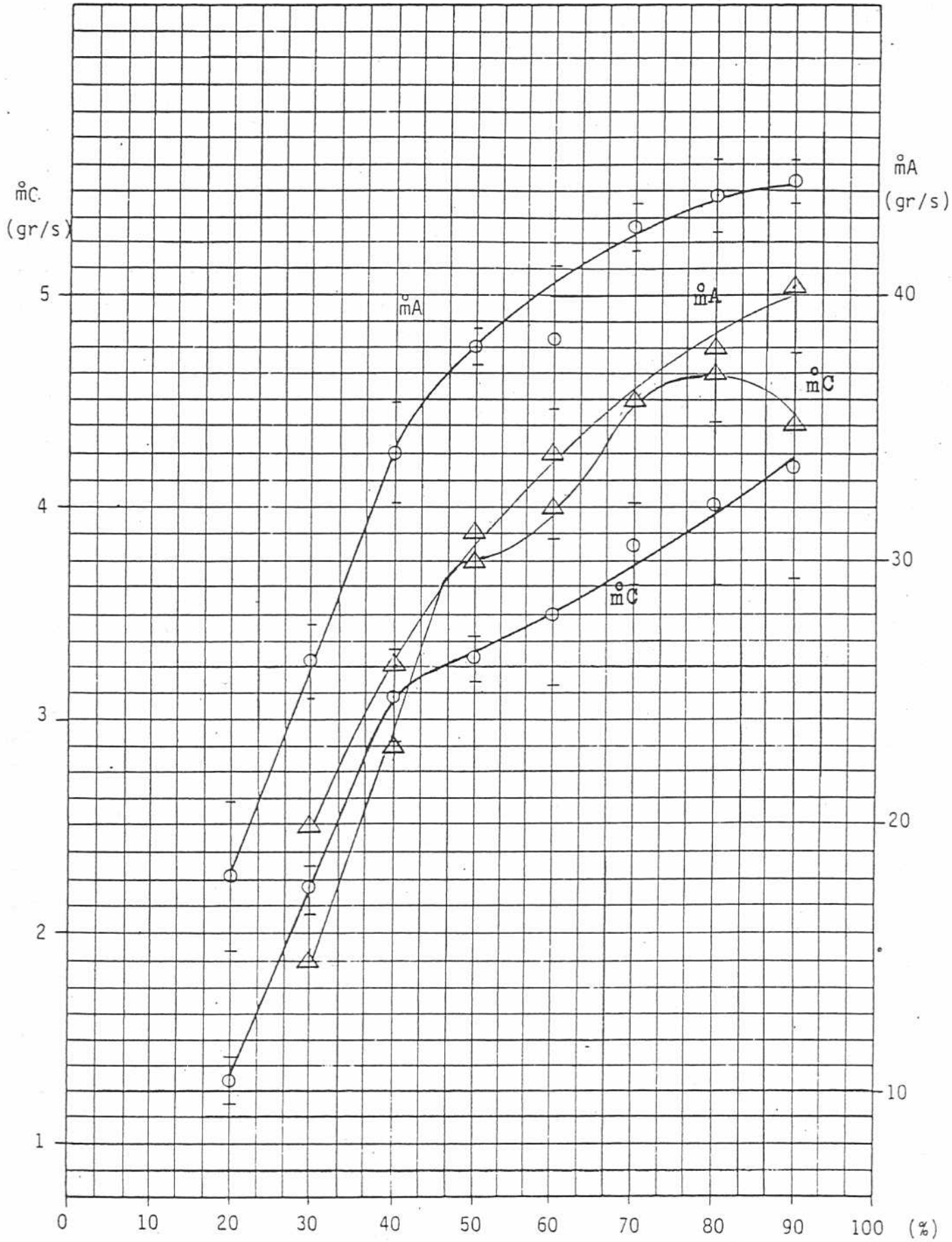
GRAFICA # 22 UCAB 162

Potencia vs. abertura mariposa del carburador. (RPM = 2000).



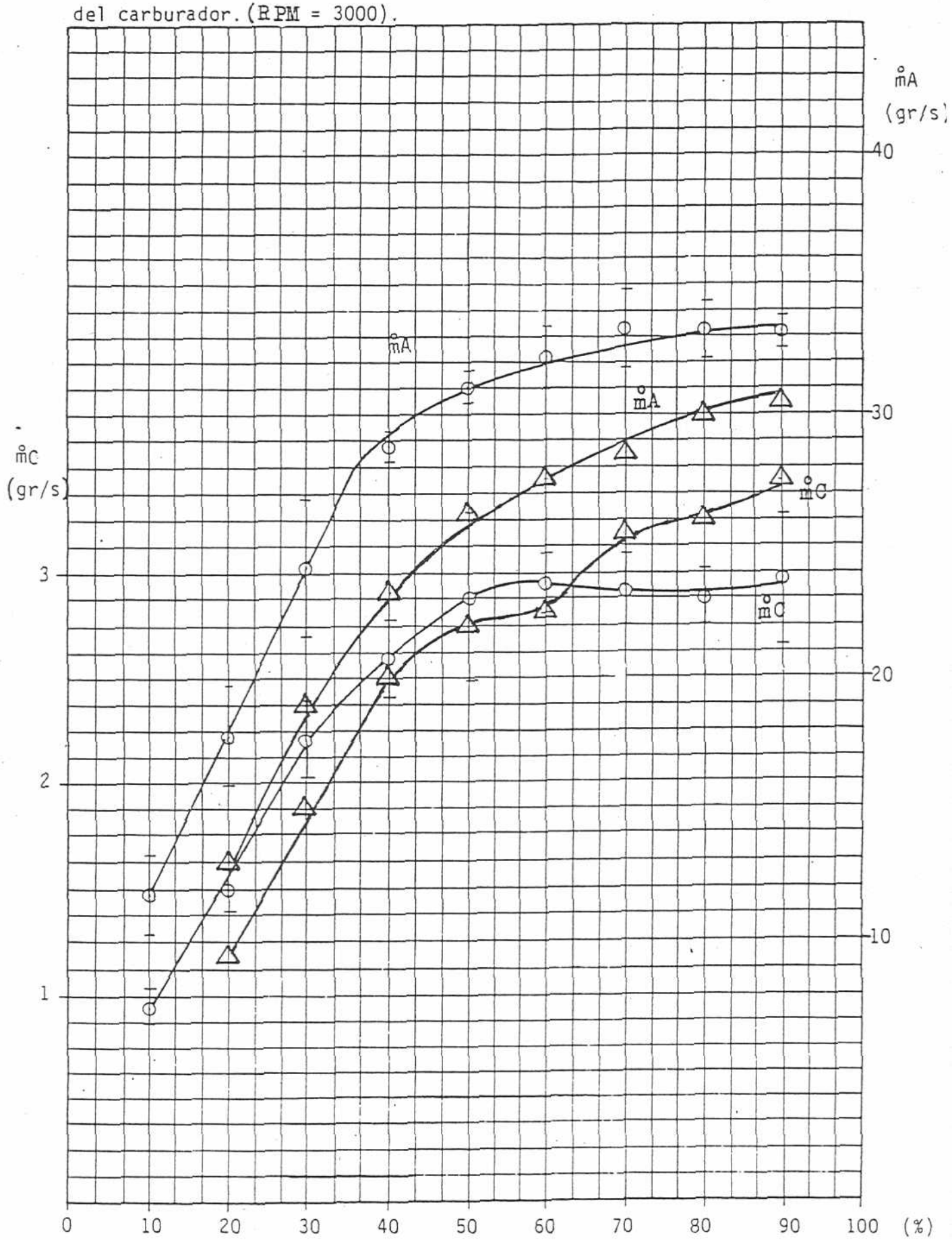
GRAFICA # 24 UCAB 164

Consumo horario de **combust.**($\mathring{m}C$) y de aire ($\mathring{m}A$) vs. abertura mariposa del carburador. (**RPM**= 4000).



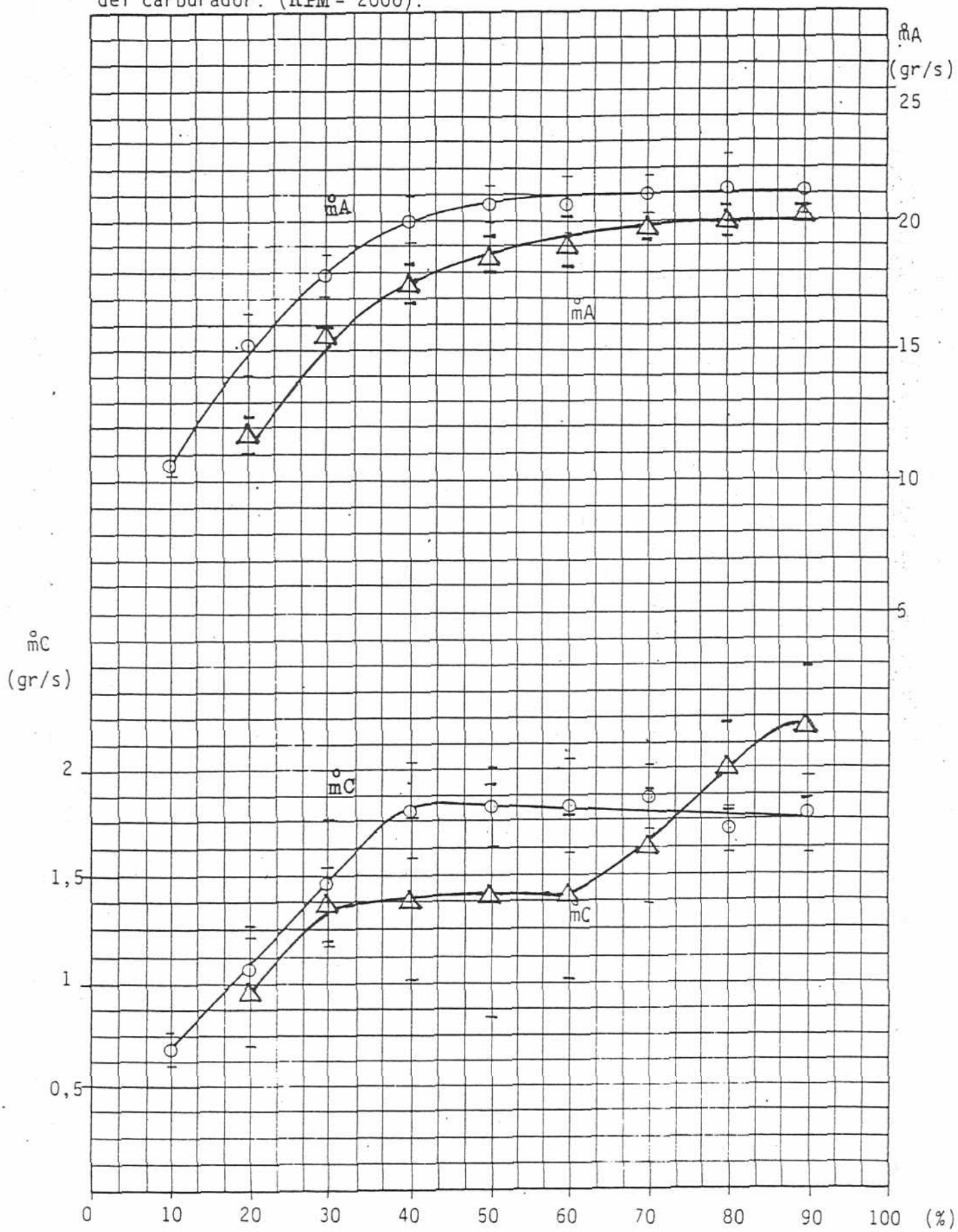
GRAFICA # 25 UCAB 165

Consumo horario de combust. ($\mathring{m}C$) y de aire ($\mathring{m}A$) vs. abertura mariposa del carburador. (RPM = 3000).



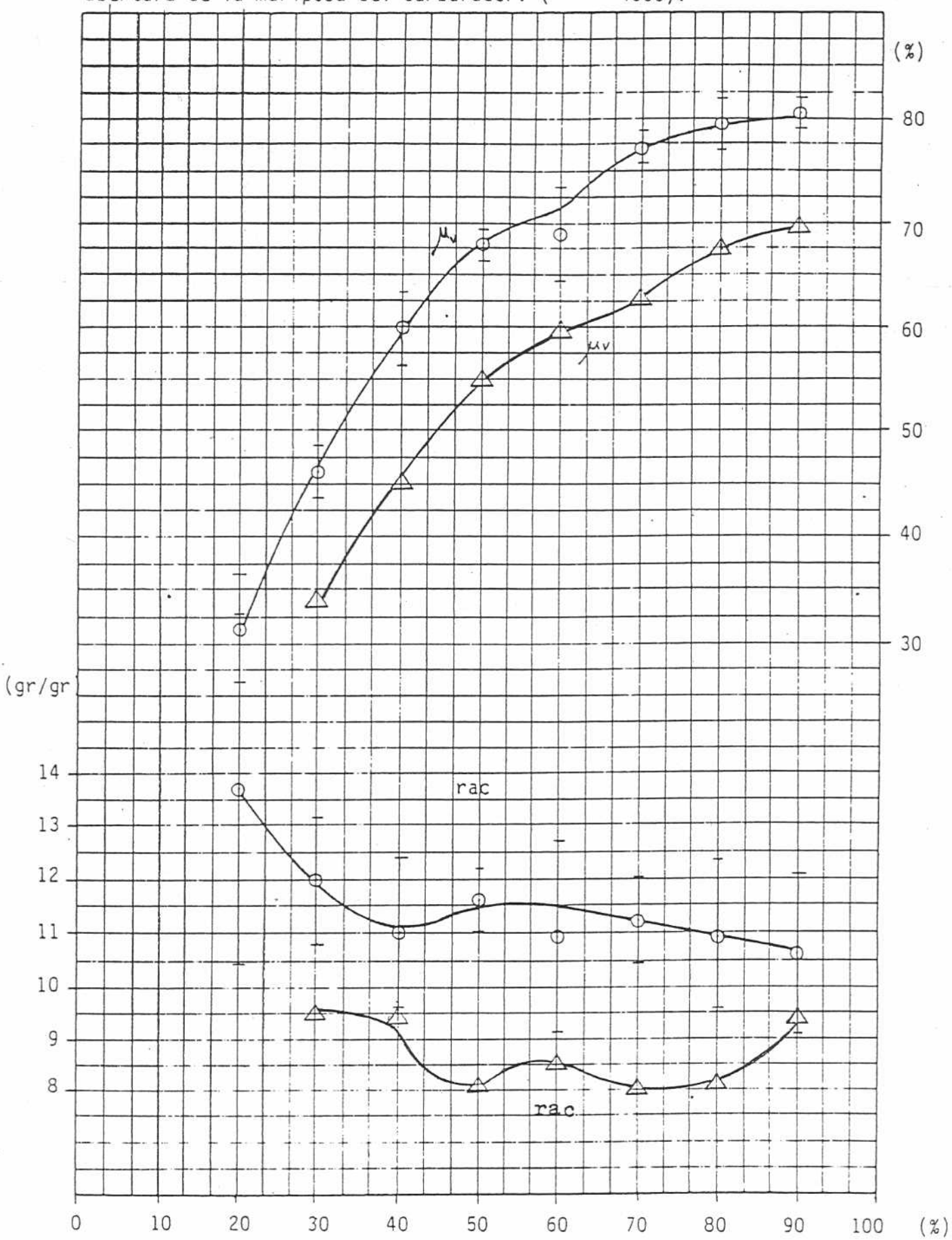
GRAFICA # 26 UCAB 166

Consumo horario de combus. ($\mathring{m}C$) y de aire ($\mathring{m}A$) vs. abertura mariposa del carburador. (RPM = 2000).



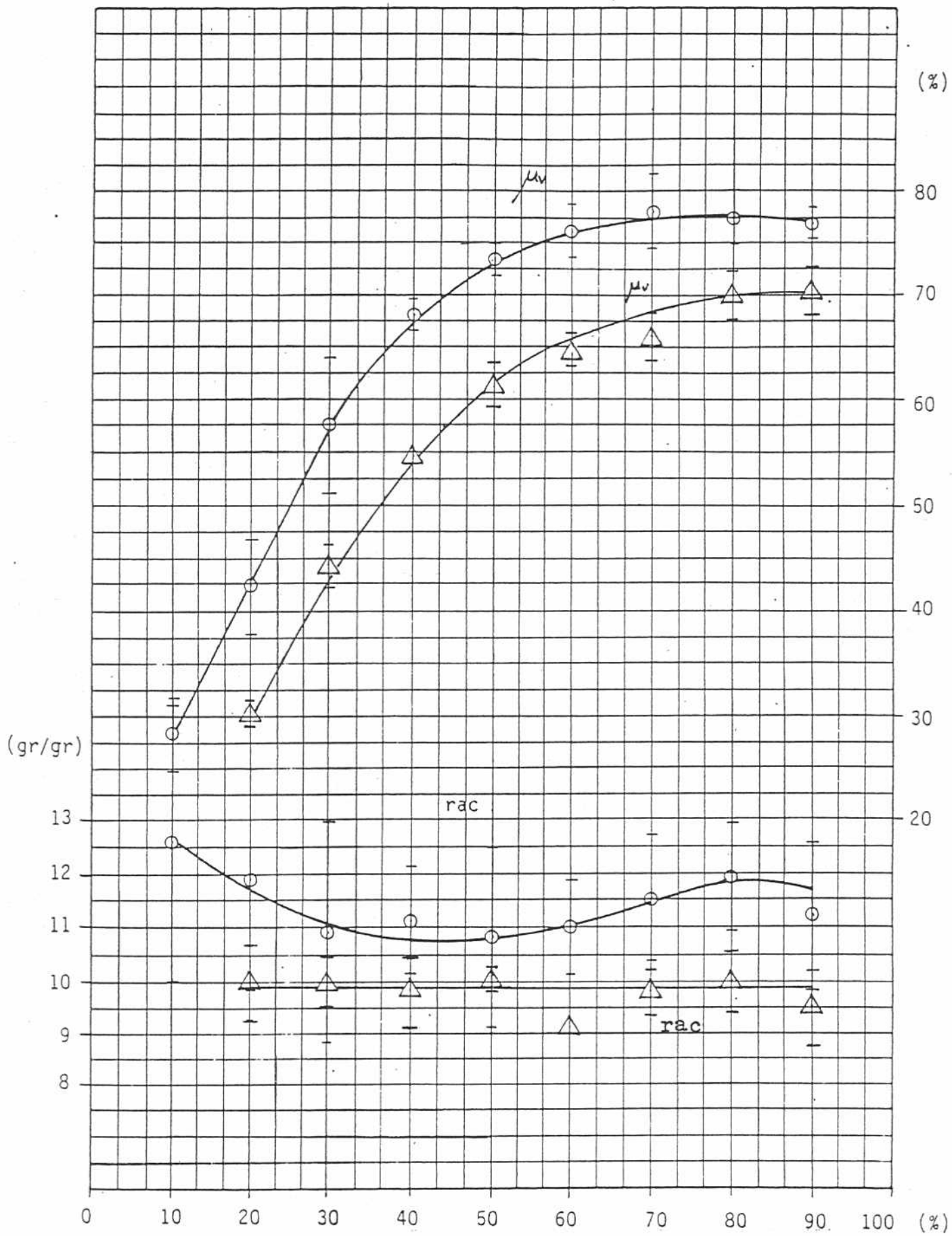
GRAFICA # 27 UCAB 167

Relación aire-combustible (rac) y rendimiento volumétrico (μ_v) vs. abertura de la mariposa del carburador. (RPM = 4000).



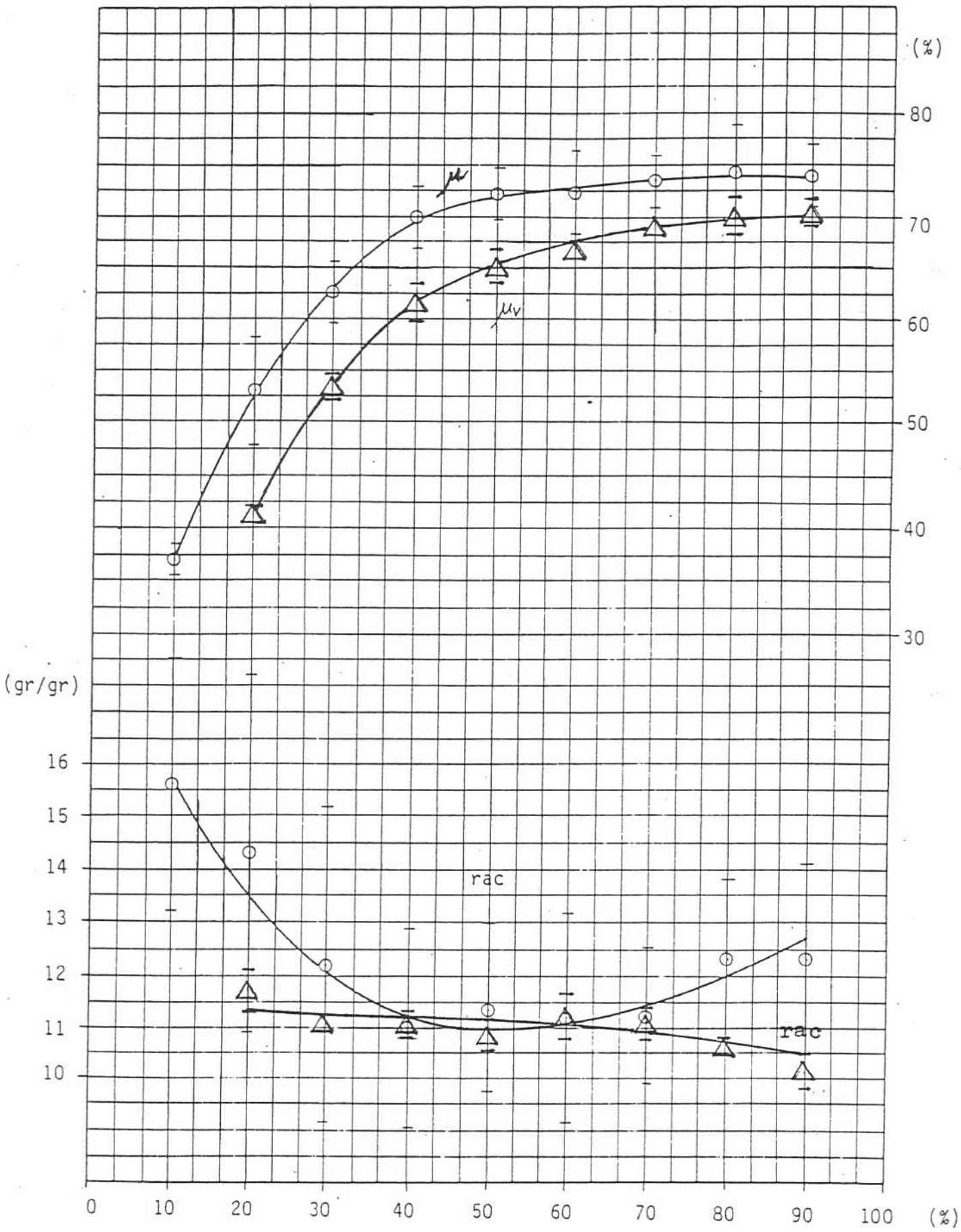
GRAFICA # 28 UCAB 168

Relación aire-combustible (rac) y rendimiento volumétrico (μ_v) vs. abertura mariposa del carburador. (RPM = 3000).



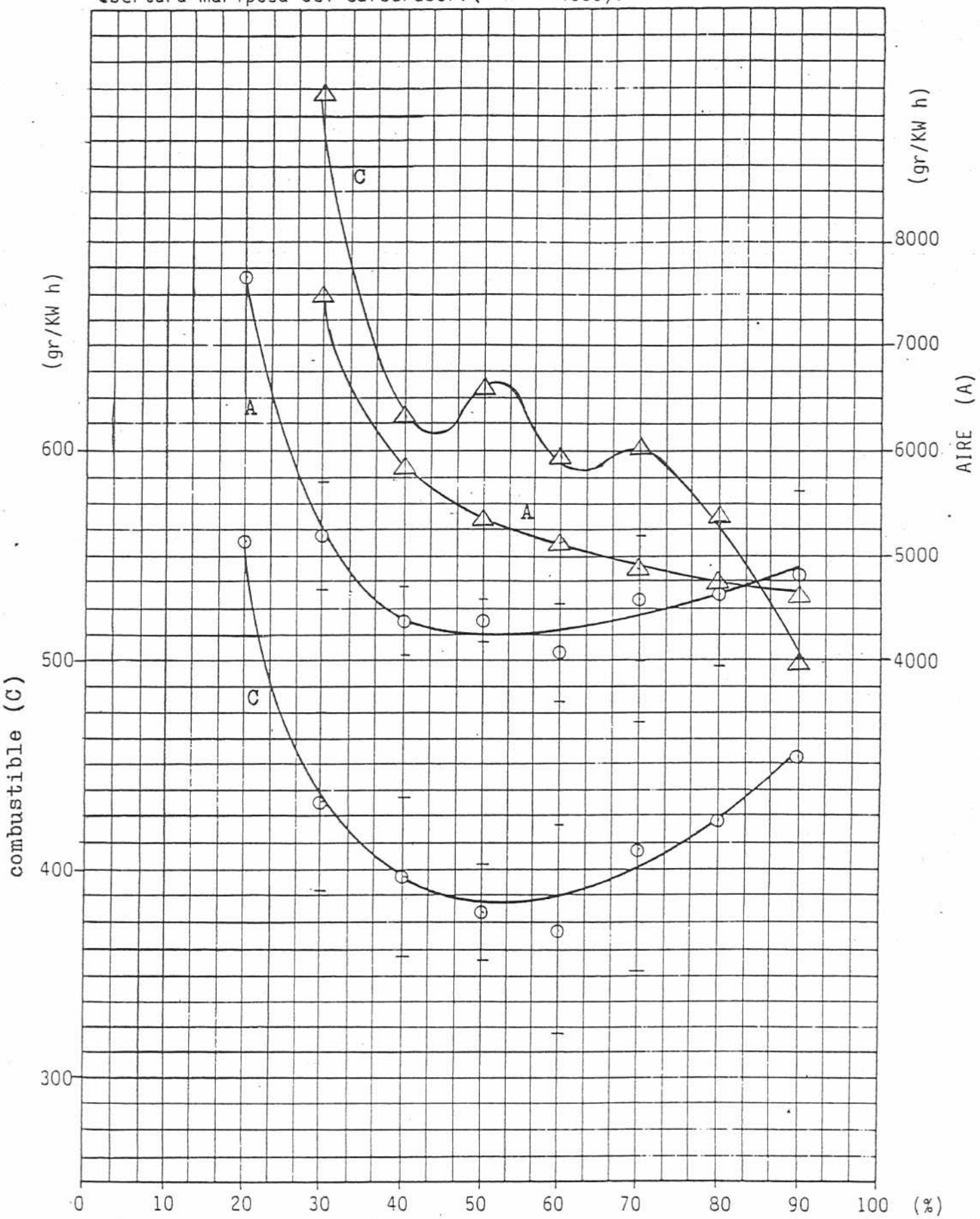
GRAFICA # 29 UCAB 169

Relación aire-combustible (rac) y rendimiento volumétrico (μ_v) vs. abertura mariposa del carburador.(RPM = 2000).



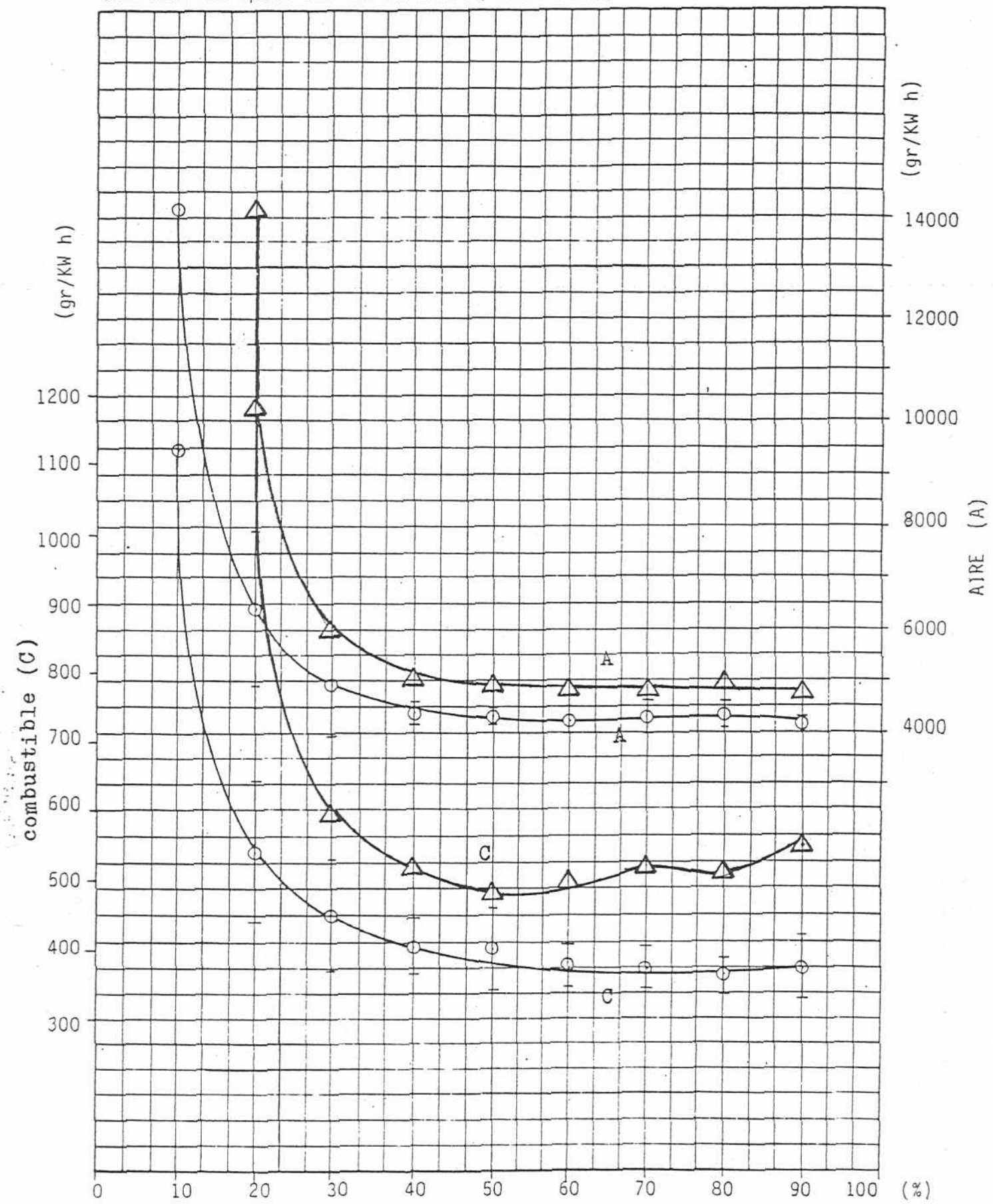
GRAFICA # 30 UCAB 170

Consumo específico de combustible y consumo específico de aire vs. abertura mariposa del carburador. (RPM = 4000).



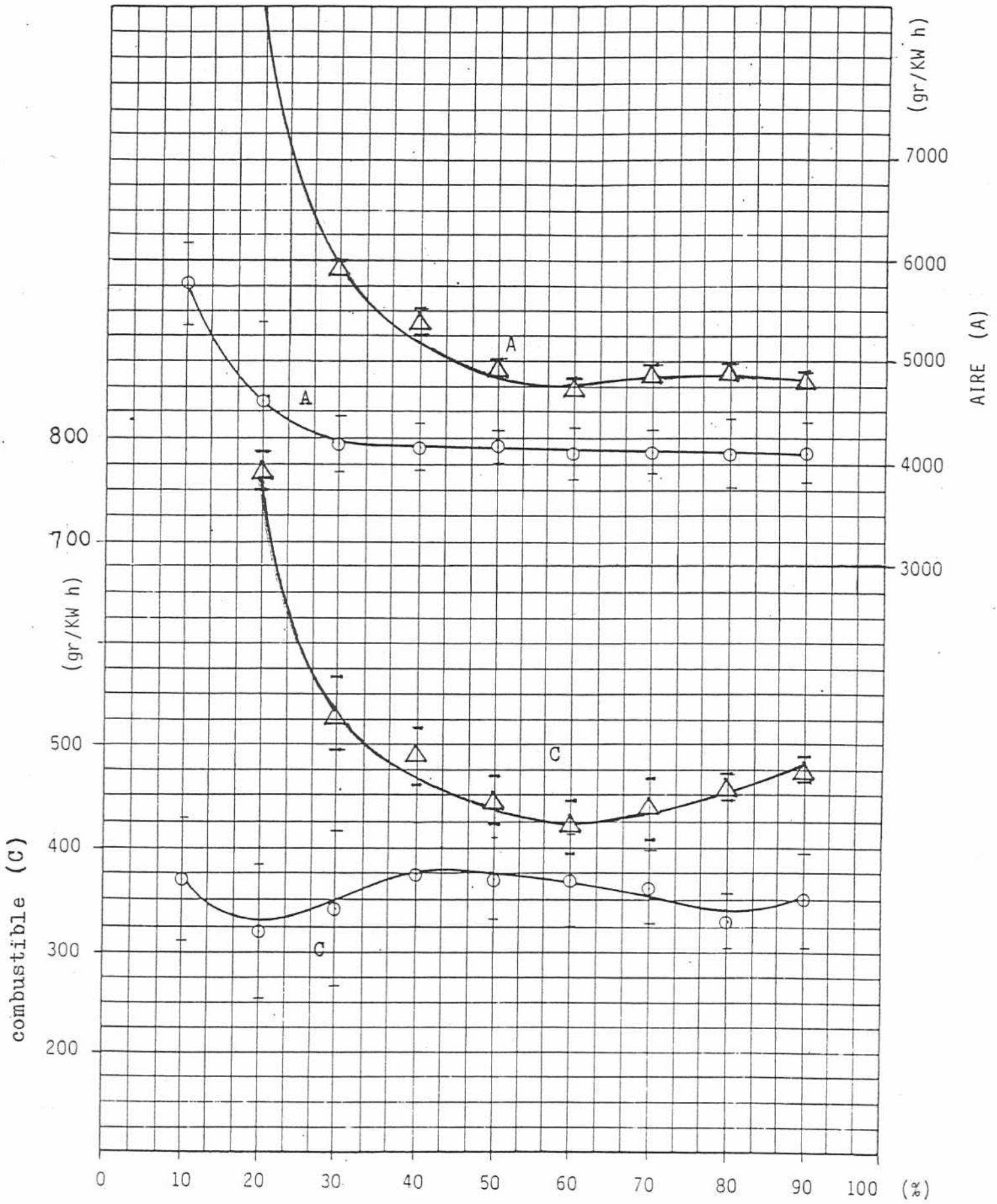
GRAFICA # 31 UCAB 171

Consumo específico de combustible y consumo específico de aire vs. abertura mariposa del carburador. (RPM = 3000).



GRAFICA # 32 UCAB 172

Consumo específico de combustible y consumo específico de aire vs. abertura mariposa del carburador. (RPM = 2000).



GRAFICA # 33 UCAB 173

▮ Prueba con avance de la chispa y carga variables a velocidad constante de 3000 rpm con **gas natural.** Abertura de la mariposa del carburador 100 % abierta.

P = 698,6 mmHg T = 26,5 °C

APMS	N(KW)	M(mN)	mgn(gr/s)	ma (gr/s)	T (°C)
20	16,5±0,3	52,7±1,1	4,45±0,18	29,64±0,34	689±22
30	20,5±0,8	65,3±1,3	3,73±0,33	29,48±0,38	649±19
40	21,8±1,3	69,5±0,9	4,39±0,41	29,32±0,51	621±15
50	22,3±1,1	70,9±1,2	3,72±0,81	29,17±0,81	604±11

mat (gr/s) = 42,98

APMS	mespgn (gr/kwh)	mespa (gr/kwh)	rac	n_v(%)	n_T(%)
20	968±31	6448±39	6,7±0,4	69,0±0,8	9,0±1,0
30	654±28	5172±44	7,9±0,9	68,6±1,4	13,7±0,9
40	723±88	4833±71	6,7±0,7	68,2±1,8	21,1±0,8
50	601±51	4711±91	7,8±0,9	67,8±2,1	14,5±1,1

▮ Prueba con avance de la chispa y carga variables a velocidad constante de 3000 rpm con **gasolina.** 100% abertura de la mariposa del carburador.

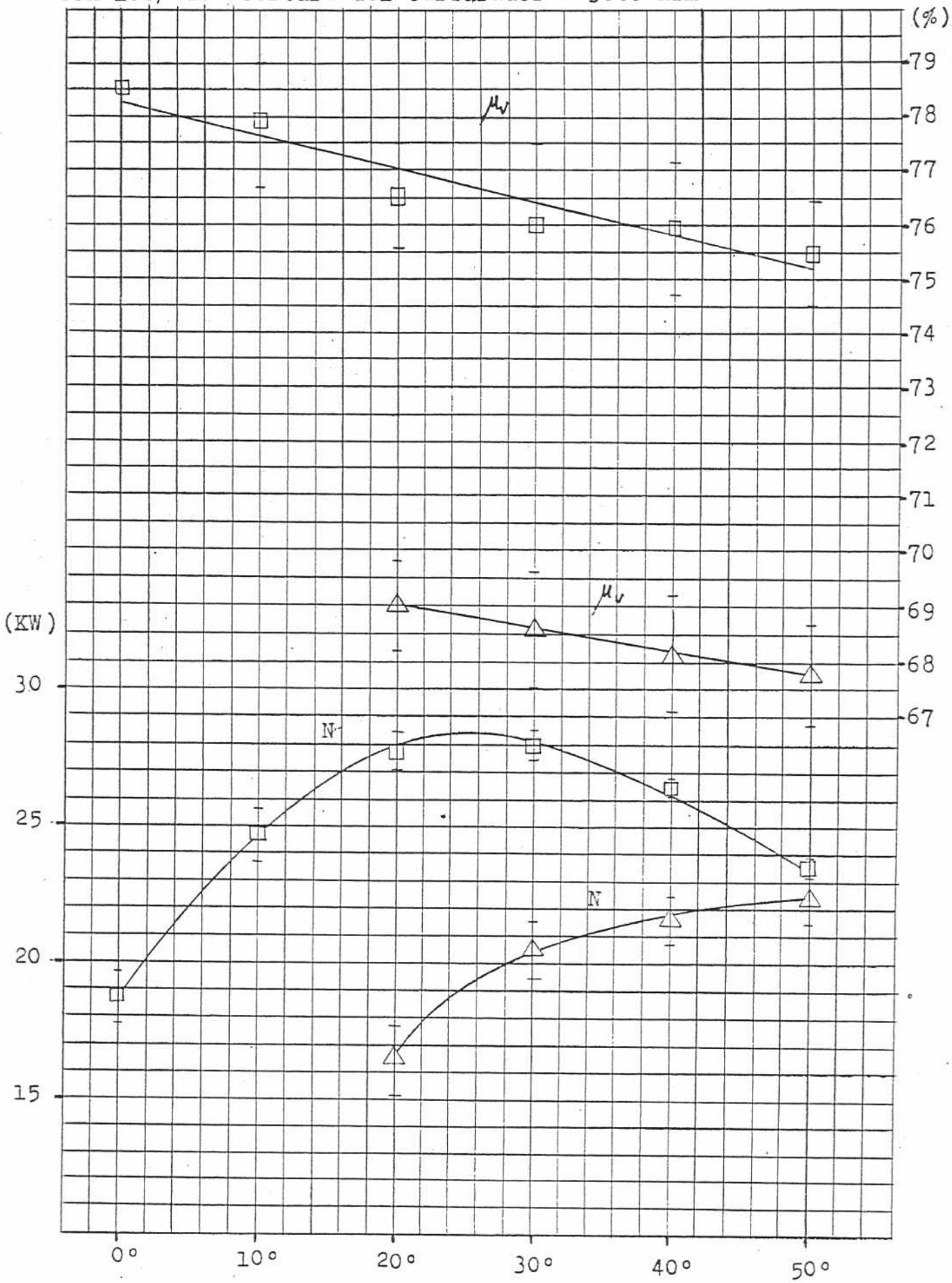
P = 698,0 mmHg T = 26 °C

APMS	N(KW)	M(mN)	mg(gr/s)	ma (gr/s)	T (°C)
0	18,8±1,1	59,7±0,9	3,51±0,33	33,78±0,29	752
10	24,7±1,4	78,7±1,1	3,15±0,51	33,5±0,31	725
20	27,8±0,9	88,5±1,4	3,38±0,52	32,9±0,51	681
30	28,0±0,5	89,2±1,3	3,41±0,35	32,80±0,77	659
40	26,5±0,3	84,3±0,8	3,501±0,55	32,66±0,91	650
50	23,6±0,2	75,2±1,1	3,37±0,21	32,51±0,50	648

mat (gr/s) = 43,02

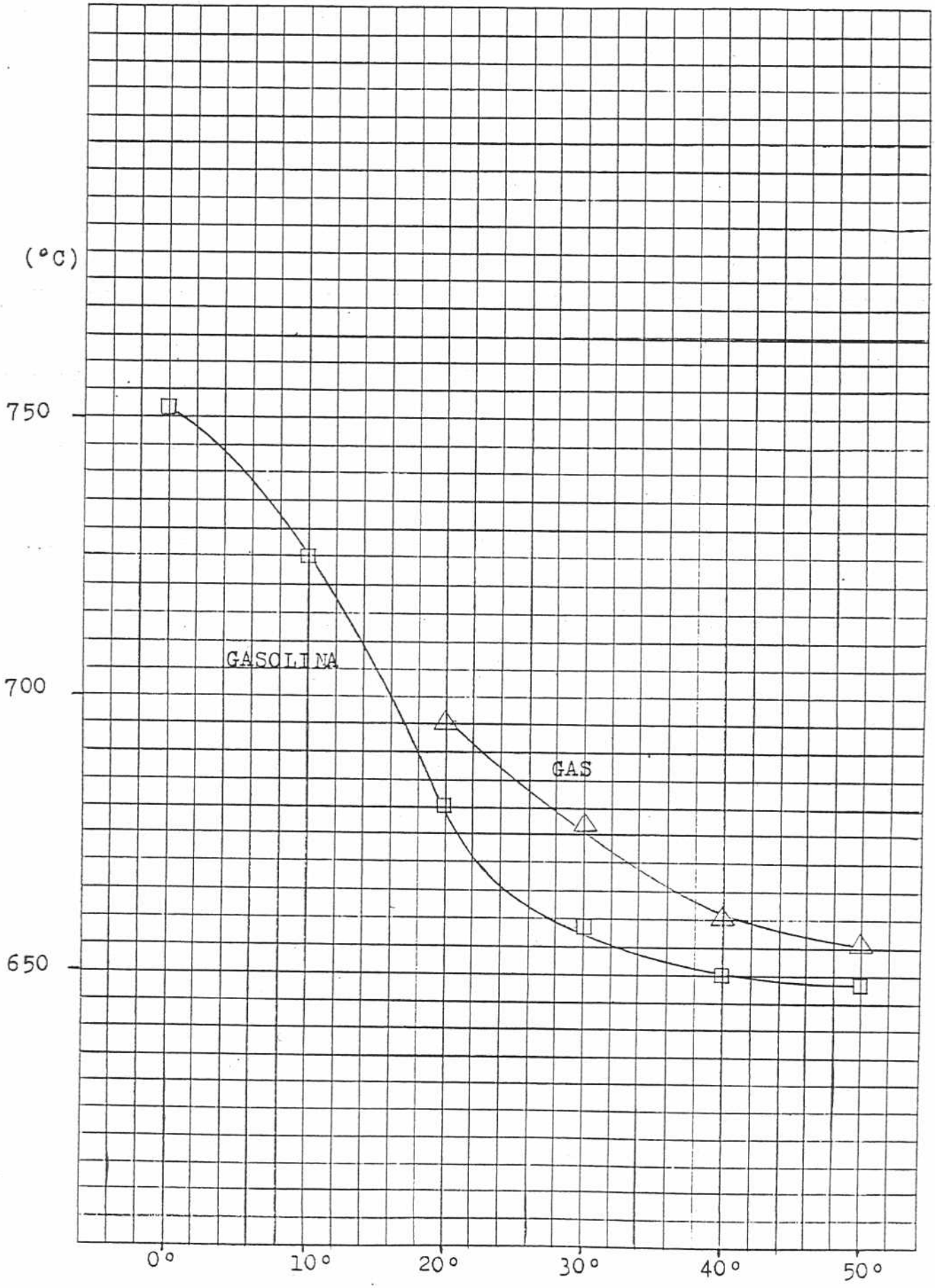
APMS	mespg (gr/kwh)	mespa (gr/kwh)	rac	n_v(%)	n_T(%)
0	674±33	6485±81	9,6±0,9	78,5±0,7	12,1±0,8
10	459±54	4881±79	10,6±0,8	77,9±0,9	17,8±0,7
20	438±71	4266±60	9,7±0,5	76,6±0,8	18,6±0,9
30	438±29	4214±11	9,6±0,3	76,2±1,2	18,6±0,8
40	476±17	4440±19	0,3±0,8	75,9±0,7	17,1±1,1
50	514±35	4958±28	9,6±0,7	75,6±0,8	15,1±2,3

Potencia y rendimiento volumétrico vs avance de la chispa con 100% de abertura del carburador a 3000 RPM



GRAFICA # 34 UCAB 176

Temperatura de gases de escape vs avance de la chispa con 100% de abertura del carburador a 3000 RPM



GRAFICA # 35 UCAB 177

▮ Prueba con avance de la chispa y carga variables a velocidad constante de 3000 rpm **con gas natural.** 50% abertura de la mariposa del carburador.

P = 698,6 mmHg T = 26,5 °C

APMS	N(KW)	M(mN)	mgn(gr/s)	ma (gr/s)	T (°C)
0	3,3±0,9	10,5±0,8	3,26±0,81	24,84±1,2	868
10	7,9±1,1	25,3±0,7	2,92±0,99	25,94±1,3	836
20	14,6±0,5	46,4±1,4	3,28±1,3	25,21±1,1	764
30	19,0±0,8	60,4±1,1	3,31±1,10	26,21±1,3	689
40	20,1±0,5	63,9±1,9	3,09±1,40	26,48±0,8	645
50	19,6±0,6	62,5±1,8	3,00±0,51	26,30±0,7	620

mat (gr/s) = 42,98

APMS	mespgn (gr/kwh)	mespa (gr/kwh)	rac	n_v(%)	n_T(%)
0	3546±31	27016±333	7,6±1,1	57,8±0,9	2,5±1,1
10	1332±49	11757±151	8,8±1,4	60,4±1,8	6,6±1,8
20	811±11	6232±39	7,7±0,9	58,7±1,9	10,7±0,3
30	628±33	4956±61	7,9±0,7	60,8±1,5	13,9±0,5
40	554±41	4747±72	8,6±1,1	61,6±2,1	15,8±1,1
50	563±42	4821±55	8,6±1,2	61,2±2,2	15,5±1,5

▮ Prueba con avance de la chispa y carga variables a velocidad constante de 3000 rpm con **gasolina.** 50% de abertura de la mariposa del carburador.

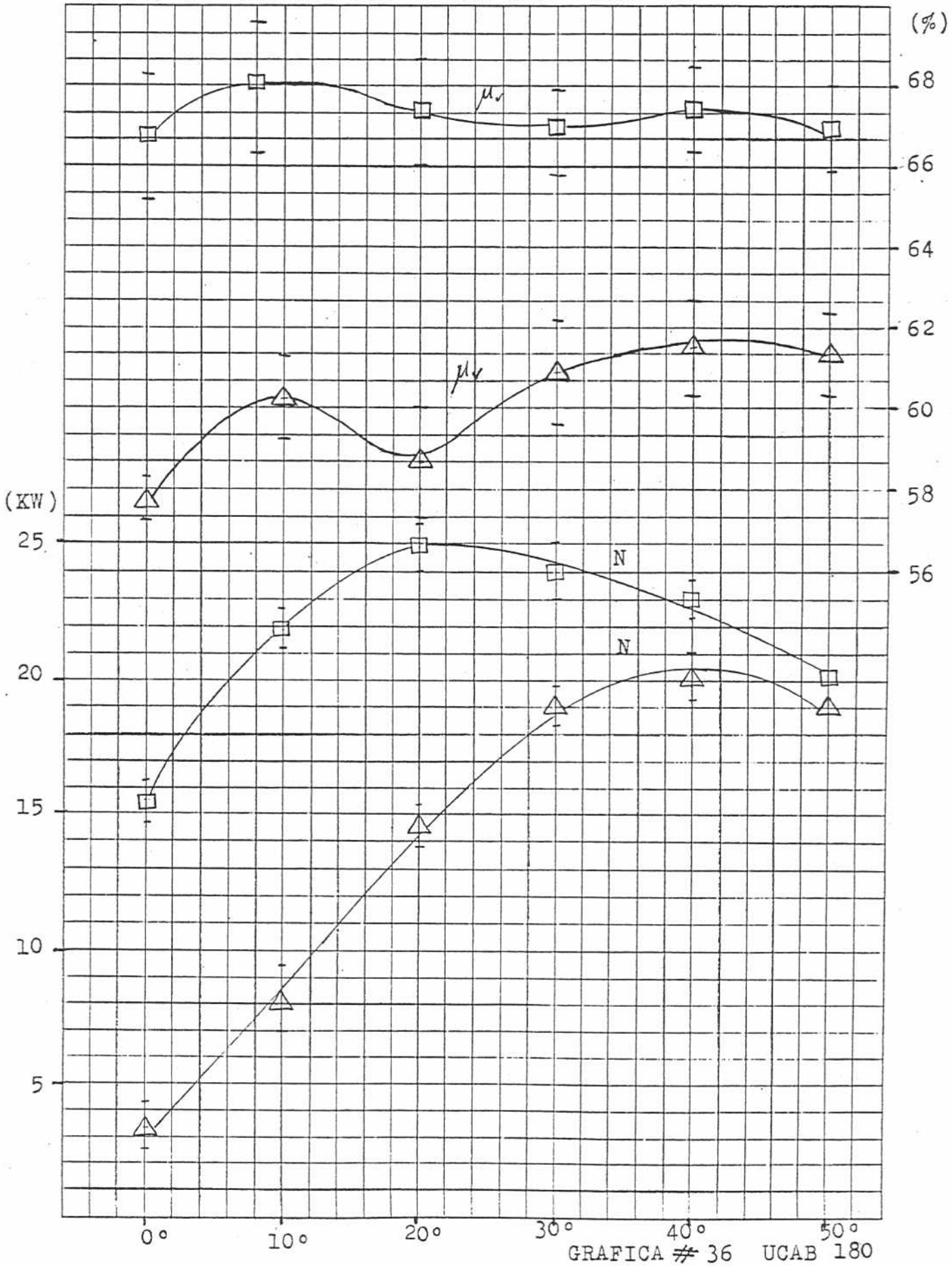
P = 698,6 mmHg T = 27,5 °C

APMS	N(KW)	M(mN)	mg(gr/s)	ma (gr/s)	T (°C)
0	15,4±0,4	49,2±0,7	2,87±0,12	28,63±0,51	767
10	21,8±0,5	69,5±1,1	2,76±0,28	29,28±0,10	705
20	24,9±0,3	79,4±0,7	2,45±0,03	28,96±0,29	663
30	24,3±0,3	77,3±0,7	2,57±0,06	28,79±0,31	638
40	22,9±0,1	73,0±0,4	2,36±0,08	28,46±0,26	635
50	20,3±0,1	64,6±0,4	2,57±0,11	28,79±0,12	635

mat (gr/s) = 42,84

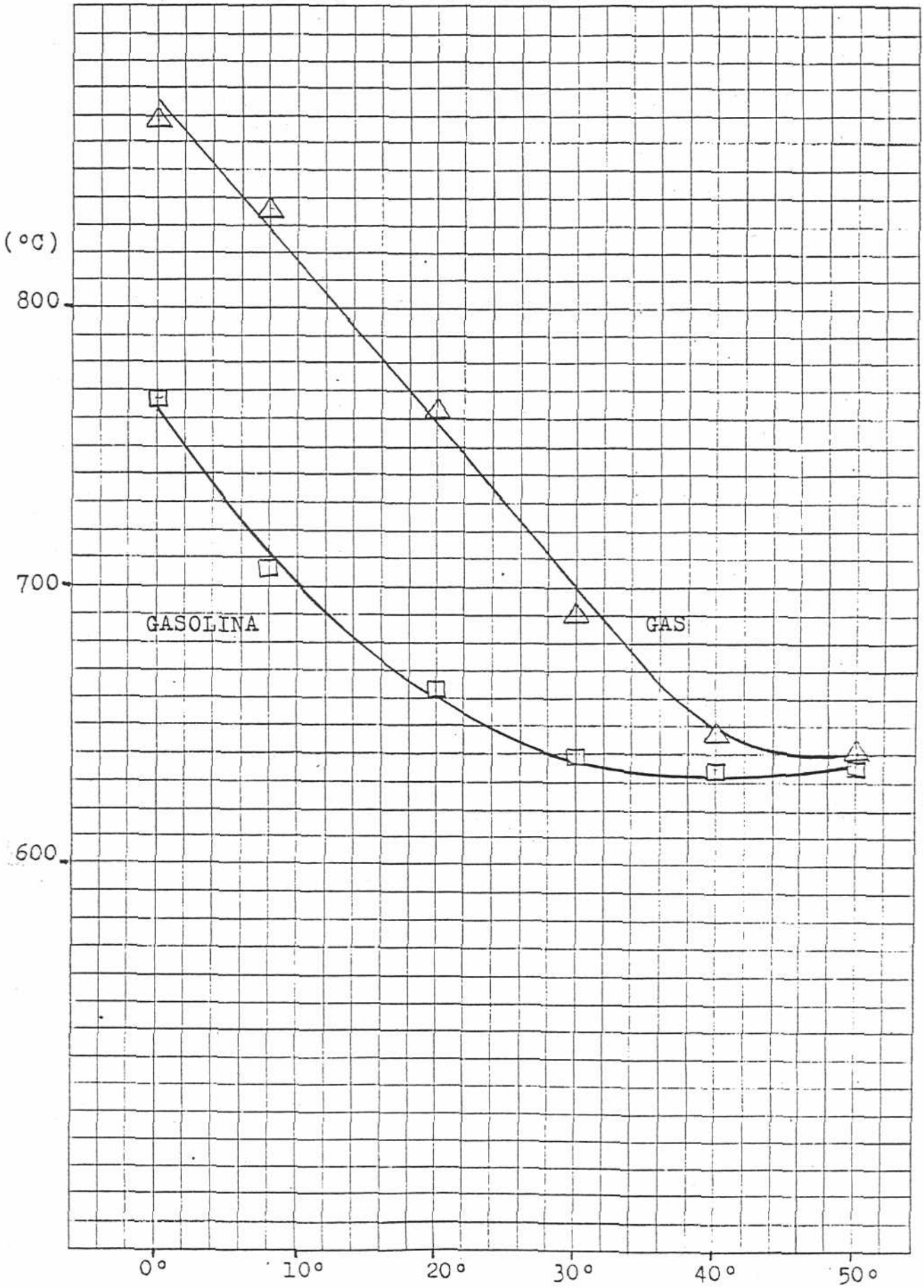
APMS	mespg (gr/kwh)	mespa (gr/kwh)	rac	n_v(%)	n_T(%)
0	669±40	6674±148	10,0±0,1	66,8±0,7	12,2±0,5
10	455±26	4825±22	10,6±0,5	68,3±0,1	17,9±0,4
20	354±16	4184±5	11,8±0,2	67,6±0,5	23,0±0,4
30	381±20	4271±21	11,2±0,1	67,2±0,6	21,4±0,3
40	370±8	4543±22	12,3±0,3	67,6±0,6	22,0±2,3
50	456±57	5107±51	11,2±1,4	67,2±0,4	17,9±1,2

Potencia y rendimiento volumétrico vs avance de la chispa con 50% de abertura del carburador a 3000 RPM



GRAFICA # 36 UCAB 180

Temperatura de gases de escape vs avance de la chispa con 50% de abertura del carburador a 3000 RPM



GRAFICA # 37 UCAB 181

▮ Prueba con relación aire-combustible y carga variables. 50% de abertura y 2500 rpm.

P = 699,2 mmHg T = 26,5 °C

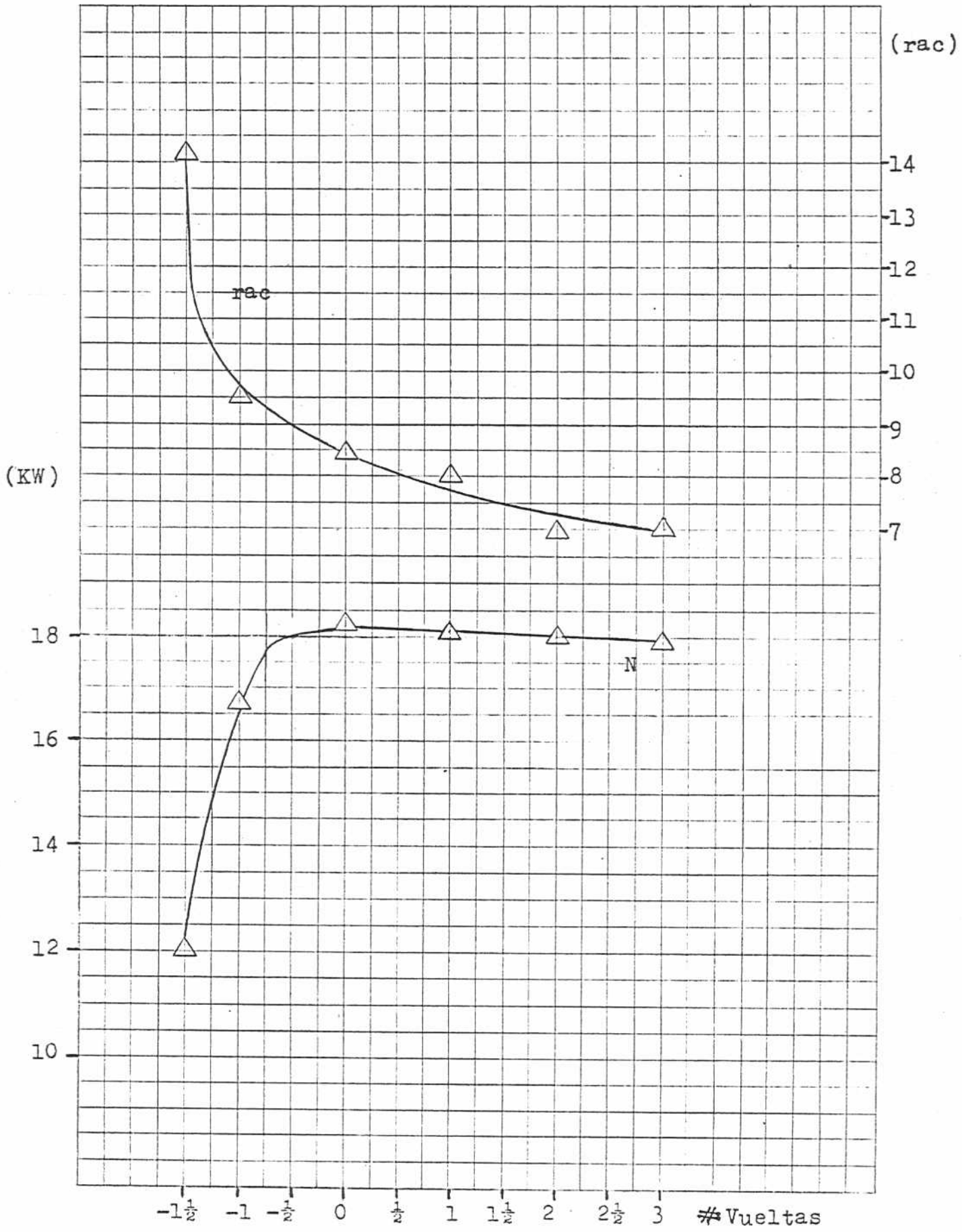
Abertura del tornillo	N(KW)	rac
$1\frac{1}{2}$ Vuelta cerrado	12,0	14,3
1 Vuelta cerrado	16,7	9,5
0 Vuelta	18,2	8,4
1 Vuelta abierto	18,1	8,0
2 Vueltas abierto	18,0	6,9
3 Vueltas abierto	17,9	7,0

▮ Balance Térmico del Freno

rpm	N(KW)
2000	17,06
2500	20,59
2000	22,95

rpm	T_E(°C)	T_S(°C)	qA(m^3/s)	N'(KW)	e(%)
2000	28	35	$5,55\times10^{-4}$	16,17	5,22
2500	28	37	$5,76\times10^{-4}$	21,58	4,81
3000	28	39	$5,46\times10^{-4}$	24,99	8,89

Relación aire-gas y potencia vs # de vueltas
a 2500 RPM con 50% de abertura del carburador



GRAFICA # 38 UCAB 183

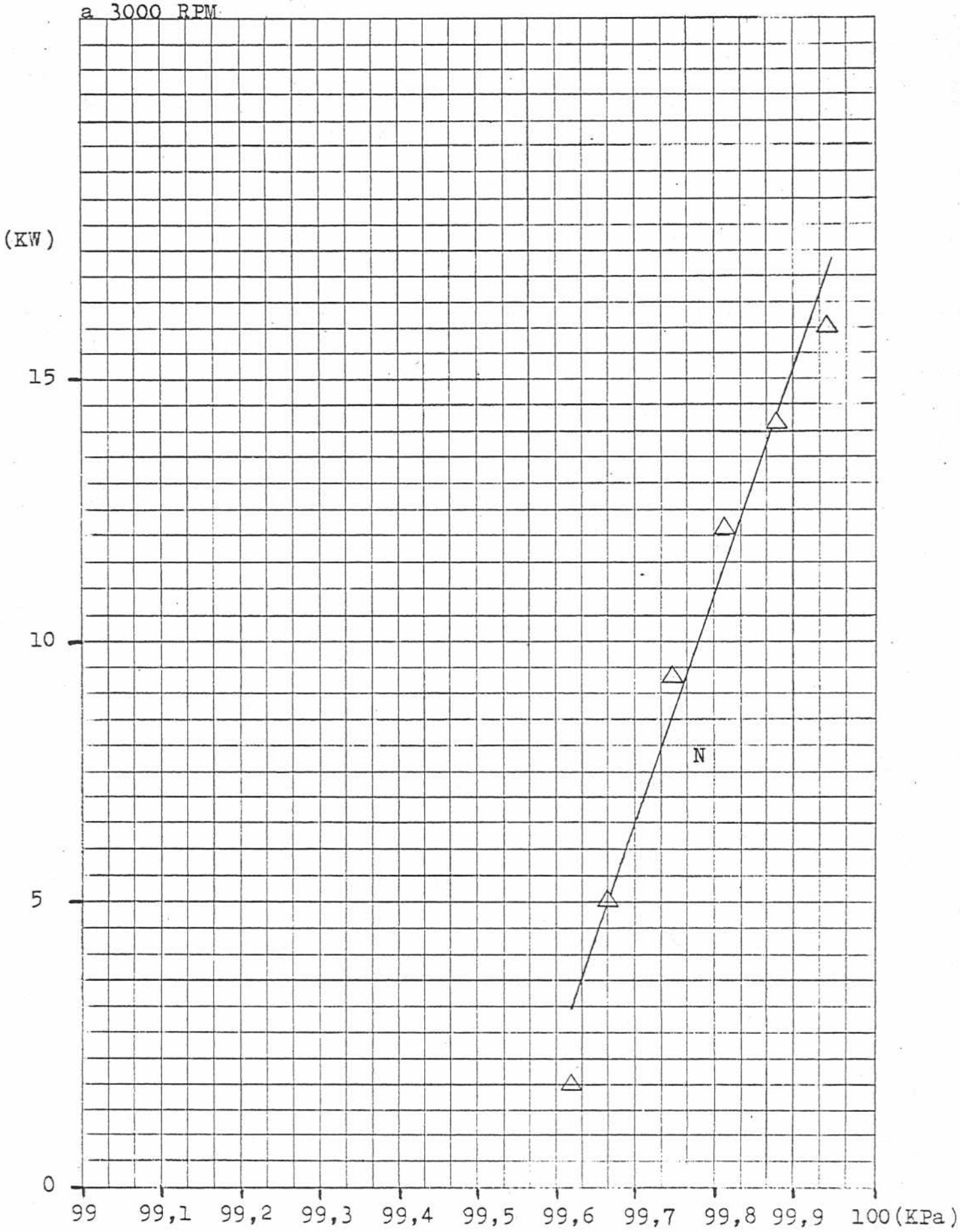
▮ Prueba de la influencia de la presión atmosférica sobre la potencia del motor.

3000 rpm P = 698,4 mmHg T = 25 °C

N(KW)	p (KPa)
16,0	99,96
14,1	99,88
24,1	99,82
9,3	99,75
5,1	99,69
2,0	99,63

Tabla #27 UCAB 184

Potencia vs presión ambiental con abertura const. de 50% a 3000 RPM



GRAFICA # 39 UCAB 185

■ Balance Térmico del Motor. 50% abertura de la mariposa del carburador y carga variable.

P = 607,7 mmHg T = 26,5 °C

rpm	Caudal de la bomba ($10^{-4} m^3/s$)
1000	4,04 ± 0,09
1500	5,63 ± 0,18
2000	7,69 ± 0,33
2500	10,30 ± 0,60
3000	12,69 ± 0,92

rpm	mgn(gr/s)	ma(gr/s)	mA(gr/s)	TA_E(°C)	TA_S(°C)	Tg(°C)
2500	1,86	23,27	1015,27	55	58	626
2000	1,54	19,08	756,87	58	61	621
1500	0,84	13,66	553,25	61	65	583

rpm	Ei(KW)	N(KW)	(%)	Er(KW)	(%)	Eg(KW)	(%)	Erad(KW)	(%)
2500	76,67	18,60	24,3	12,73	16,6	15,56	20,3	29,78	38,3
2000	63,48	15,31	24,1	9,49	15,0	12,63	19,9	26,05	41,0
1500	34,63	9,6	27,7	9,27	26,8	8,38	24,2	7,38	21,3

11. ANALISIS DE RESULTADOS

El objetivo de este trabajo es la evaluación del gas natural como combustible, utilizando éste en un motor que normalmente opera con gasolina. Para ello se analizan los resultados de cada prueba realizada, comparando la influencia de ambos combustible sobre los parámetros característicos de un motor.

11.1 PRUEBA CON CARGA VARIABLE Y 100 % DE ABERTURA

Esta prueba es la más importante ya que define las curvas características de un motor.

La curva de potencia experimental del motor (utilizando gasolina), comparada con la obtenida en el Trabajo Especial: Diseño, Construcción y Evaluación de un Banco de Pruebas para Motores de Combustión Interna Encendidos por Chispa, observadas en la gráfica #1, presenta una disminución en el valor la de potencia tal como era de esperarse. El valor actual difiere en un 19% del valor obtenido con anterioridad a máxima potencia (4500 y 5200 RPM respectivamente). La pérdida de potencia se justifica por una serie de razones,

entre ellas se pueden citar:

- En primer lugar hay que destacar que el motor a "sufrido" cierto desgaste debido al gran número de prácticas y experimentos realizados sobre el mismo, sin incluir los 30.000 Km recorridos antes de ser adquirido por la Universidad. Sin bien el motor fue reparado antes de realizar este Trabajo, no fue reconstruido en su totalidad.

- El hecho de añadir una serie de partes auxiliares tales como el ventilador, accionado por el cigueñal a través de la polea de la bomba de agua, el cuenta revoluciones mecánico, acoplado al eje del freno a través de una correa y el mezclador colocado sobre el carburador, implica una disminución de la potencia neta aprovechable.

El ventilador absorve alrededor de 1/4 de hp a máximo caudal (máximo número de revoluciones), y el cuenta revoluciones utilizado implica cierta pérdida adicional, cercana al 1%.

Debe señalarse que el hecho de que el error entre las curvas se incremente con las RPM, es el resultado de las pérdidas ocasionadas por el sistema de medición del consumo de aire y **especialmente el mezclador utilizado**. Estas pérdidas aumentan con las RPM ya que el **mezclador** implica una carga proporcional al incremento del cuadrado del caudal. Adicionalmente, esto influye sobre el número de revoluciones bajo el cual se obtiene la potencia máxima (4500 RPM utilizando mezclador).

- Para la realización de las pruebas se utilizaron todos los instrumentos existentes en el Banco de Pruebas, a excepción del tacómetro, cuyo valor indicado, de RPM, puede afectar notoriamente el valor de la potencia, sino concuerdan los valores señalados por ambos instrumentos (entre el tacómetro actual y el anterior).

- Por último cabe destacar que las condiciones bajo las cuales se realizaron ambas pruebas son diferentes especialmente los grados de avance del encendido antes del PMS, 40º para la primera y 10º para la actual.

En todo caso la forma de esta curva concuerda con la teórica.

La estandarización de la curva se realiza según normas Venezolanas [1], aplicando la formula diseñada para tal fin.

La gráfica #2 presenta los resultados de potencia obtenidos utilizando el gas natural y la gasolina. Como puede observarse, la curva de gas natural presenta una disminución del 16% al comparar su valor de potencia máxima con el de la gasolina, y de un 8% a mínima potencia.

La pérdida de potencia se debe al desplazamiento del aire por parte del gas natural, así como a la baja velocidad de llama del gas con respecto a la gasolina. Si bien este último factor puede solucionarse en parte adelantando el punto de encendido, ésto implica un incremento de las

---

[1] Norma Covenin 2018-83. Motores de Combustión Interna. Método de Ensayo de Potencia Neta.

pérdidas por bombeo (trabajo negativo) que debe realizar el pistón antes de llegar al punto muerto superior. De igual forma se ve afectada la curva de torque como puede apreciarse en la gráfica #3.

Si se compara el consumo específico de gas con el de gasolina, este último resulta menor; apreciado en la gráfica #8. El aumento del consumo específico de gas natural se debe a su bajo poder calorífico con respecto a la gasolina, como se muestra en el apéndice A1. El consumo específico de aire, observado en la misma gráfica, es mayor cuando se utiliza el gas natural, por la razón anteriormente mencionada.

En las gráficas 4 y 5 pueden observarse el consumo horario de gasolina y gas, y aire para ambos combustibles, respectivmente. El consumo horario de gasolina y gas es bastante similar, sin embargo a bajas revoluciones se observa un incremento del consumo de gas y viceversa en alta; tal comportamiento se debe a que el suministro de combustible no es exactamente igual para el reductor-regulador que para el carburador. El consumo horario de aire para ambos combustibles presenta un comportamiento bastante lineal, lo que representa una relación directa entre éste y la velocidad del motor. No obstante el consumo horario de aire para la gasolina es mayor, debido tanto a la diferencia entre la relación estequiométrica de ambos combustibles (ver apéndice A1) como al desplazamiento del aire por parte del gas.

La relación aire-combustible real presentada en la gráfica #6 resulta ser menor que la teórica, para ambos combustibles; en los motores suele utilizarse un valor menor para obtener una potencia mayor, aún cuando la combustión sea incompleta.

El rendimiento volumétrico presenta valores normales tal como se aprecia en la gráfica #7, que varían entre el 70 y el 80%, con un máximo de 77,5 cerca de las 3500 RPM para la gasolina, y entre el 65 y 70% para el gas natural, siendo el máximo de 70% a 4000 RPM (no se puede tomar el de 1500 RPM ya que la varianza en este punto es elevada). Ambas curvas presentan un comportamiento bastante similar aunque con valores menores debido al desplazamiento del aire por el gas y a la diferencia en la relación estequiométrica de ambos combustibles. La forma de ambas curvas, tratándose de un motor diseñado para funcionar a regímenes elevados, es la esperada. A altas revoluciones la gran velocidad del aire ocasiona una fuerte pérdida de carga, que a su vez produce una disminución en el rendimiento. A bajas revoluciones, la baja inercia de la mezcla aire-combustible no es capaz de vencer la fuga a través de la válvula de admisión de la mezcla, introducida previamente en el cilindro.

El rendimiento total es el esperado para ambos combustibles observandose un rendimiento mayor para la gasolina ya que este es proporcional al inverso del consumo específico de combustible (ver gráfica #9).

En las gráficas # 10, 11, 12 ,13, 14, 15 y 16 se presentan la misma prueba anterior, pero con una abertura de la mariposa del carburador del 50%. Como era de esperarse los resultados obtenidos representan un comportamiento similar a las pruebas con una abertura de la mariposa del 100%, no obstante, en cada una de las gráficas se observa una disminución de los parámetros caracteristicos del motor.

La gráfica # 10 representa la curva de potencia para ambos combustible, observandose una disminución de la potencia de un 17% a 4500 RPM y de un 10% a 1500 RPM.

El consumo especifico de combustible sigue siendo mayor para el gas natural que para la gasolina, como puede verse en la gráfica #14.

La diferencia de los parámetros caracteristicos del motor, al comparar ambos combustibles, permanece igual que en la prueba anterior. Algunos de estos presentan un comportamiento más razonable que en la prueba de 100%, como el rendimiento total de la gráfica #16, tanto para la gasolina como para el gas natural.

11.2 PRUEBA CON ABERTURA DEL CARBURADOR VARIABLE

En esta prueba se fija la carga y se varia la abertura de la mariposa, que es la variable independiente.

Los resultados obtenidos en este tipo de pruebas son comparados con los resultados obtenidos en el Trabajo

Especial realizado por Ameijeiras, Juan y Trujillo, Jorge.

En la gráfica #17 puede observarse el mismo comportamiento para ambos combustibles, tanto en el torque como en la potencia. El primero se incrementa linealmente y el segundo en forma parabólica, con el aumento de velocidad del motor (o, con la creciente abertura de la mariposa del carburador).

La gráfica #18 se comparan tres curvas del consumo horario de combustible. La curva actual del consumo horario de gasolina presenta un incremento del mismo, debido a la presencia del mezclador sobre el carburador. Dicho mezclador crea un efecto semejante al "cebador" del carburador, al restringirse el paso del aire se incrementa el suministro del combustible.

El consumo horario de gas natural es menor que el consumo horario de gasolina, ya que en esta prueba el motor trabajó con una relación aire-gas bastante elevada, como puede observarse en la gráfica #21. Dicha relación aire-gas al igual que en las pruebas del 100 y 50% de abertura de la mariposa del carburador, presenta valores elevados a bajas RPM del motor, estabilizandose en valores más al incrementarse las RPM. El Comportamiento a baja revoluciones difiere del de la gasolina ya que los carburadores suelen presentar, a bajos ángulos de apertura de la mariposa, una mezcla rica en combustible debido a los problemas de vaporización que presenta la gasolina; tal problema no lo

presentan los combustibles gaseosos. Adicionalmente la mariposa del carburador operando con gas natural, permanece más abierta que usando gasolina, para asi vencer la misma carga. De ahi que, si bien el gas desplaza al aire, los consumos horarios de este, y el rendimiento volumétrico, tanto para gasolina como para gas tienden a igualarse, tal como se aprecia en las gráficas #19 y #21.

Los consumos específicos tanto de aire como de gas, permanecen mayores que los de gasolina como era de esperarse.

11.3 PRUEBA CON CARGA Y ABERTURA DEL CARBURADOR VARIABLES A VELOCIDAD CONSTANTES

En las gráficas # 22, 23 y 24 puede observarse la dependencia existente entre la potencia y la abertura de la mariposa, a mayor abertura mayor potencia. Permaneciendo constantes las dos variables independientes (abertura y RPM) tanto para el uso de un combustible como para el otro, es lógico que con gas natural los valores de potencia se vean desplazados hacia valores menores. Con el uso de la gasolina, las curvas de potencia tienden a la horizontalidad a amplios ángulos de abertura, para todas las velocidades (4000, 3000, 2000 RPM), tal comportamiento es semejante para las 2000 y 3000 RPM con el gas natural.

Los consumos horarios se presentan en las gráficas #25, 26 y 27, en las que puede apreciarse el aumento de estos a

medida que se incrementa la abertura. El consumo de aire para el gas natural es menor que para la gasolina, dependiendo esto de la diferencia en la relación estequiométrica de ambos combustibles, así como al desplazamiento del aire, esto corrobora lo explicado en la prueba anterior para el consumo horario de aire.

En cuanto a los consumos horarios de combustible hay que resaltar que el carburador presenta dos bocas de abertura progresiva, una de las cuales se abre a partir del 50%, de aquí que existan cambios de pendientes (ver gráficas #25, 26 y 27) alrededor de este porcentaje para ambos combustibles, ya que el mezclador también presenta una regulación independiente para cada venturi, por tanto es lógico también que, las curvas de consumo específico de combustible se cruzen y además en diferentes puntos.

El rendimiento volumétrico con gas al igual que con la gasolina, tiende a estabilizarse con el aumento del porcentaje de abertura ya que a partir de un determinado punto se alcanza el tope para una determinada velocidad de prueba, y por esto el punto de estabilización depende directamente de la velocidad a la que se efectue la prueba, como se aprecia en las gráficas #28, 29 y 30. En las mismas se presentan también las relaciones aire-combustible, las cuales concuerdan perfectamente con las curvas teóricas presentadas en la figura 5.5.2 de la sección 5.5, además corresponde con el 80% de la relación aire-combustible

estequiométrica, que es el óptimo cuando se trabaja con gas natural (pag. 52, en la sección 5.5), especialmente a una velocidad de 2000 y 3000 RPM.

Por último, las gráficas #31, 32 y 33 representan los consumos específicos de combustible y aire, que son mayores con el uso de gas natural y disminuyen a medida que aumenta el porcentaje de abertura del carburador.

11.4 PRUEBA CON VARIACION DEL AVANCE DE LA CHISPA A VELOCIDAD CONSTANTE

Las dos pruebas realizadas (con 50 y 100% de abertura) se muestran en las gráficas #34, 35, 36 y 37. En las gráficas 34 y 36 se presentan las curvas de potencia y rendimiento volumétrico. Las curvas de potencia en ambas gráficas, para la gasolina, presenta un punto donde ésta es óptima a partir del cual decrece dicho valor. Con el uso del gas natural, se presenta la misma forma de curva, sin embargo desplazada hacia la derecha. Con bajos grados de avance, se obtiene lógicamente mayor potencia con gasolina que con gas natural, no obstante, a elevados grados de avance la potencia obtenida con gasolina tiende a decrecer; aquella que se obtiene con gas natural tiende a aumentar, hasta un punto en el que casi se igualan ambas potencias. Tal comportamiento se debe a la diferencia en la velocidad de llama de ambos combustibles, explicado con anterioridad. Debido a esto la temperatura de los gases de escape es mayor con el uso del

gas, como se observa en las gráficas #35 y 37.

11.5 PRUEBA CON RAC VARIABLE

Si bien el carburador del motor no presenta un sistema adecuado para variar la relación aire-gasolina bajo cualquier régimen; utilizando el gas natural sí se puede variar la relación aire-gas a cualquier régimen, actuando sobre los tornillos de ajuste de mezcla localizados entre el reductor y mezclador, en la manguera de gas. Es lógico pensar que los sistemas de conversión para gas natural permitan realizar dicho ajuste, sabiendo la infinidad de composiciones que presenta el gas natural, ya que la relación estequiométrica (así como el poder calorífico) depende precisamente de dicha composición. La posibilidad de realizar dicho ajuste permite efectuar pruebas a diferentes velocidades de rotación del motor.

La gráfica #38 presenta los resultados obtenidos al realizar esta prueba, con 50% de abertura (para ajustar un solo tornillo) y 2500 RPM, en la cual se aprecia como una relación de aire-combustible pobre en carburante, implica una baja potencia, que aumenta al disminuir dicha relación, hasta un punto en el cual ya no es posible obtener una mayor potencia; sólo se obtiene así un mayor consumo de combustible. Para este caso el valor de máxima potencia corresponde a un valor de 8,5 en la relación aire-combustible.

11.6 INFLUENCIA DE LA PRESION ATMOSFERICA

Se obtuvo en esta prueba una proporción directa entre la presión ambiental y la potencia al freno a velocidad constante. Hay que resaltar que con el uso del gas natural pequeñas variaciones en la presión ambiental influyen notablemente en el valor de potencia (ver gráfica #39).

11.7 BALANCE TERMICO DEL FRENO

Esta prueba tiene como finalidad comprobar que la energía cedida por el motor es absorbida en su totalidad por el freno hidráulico. Aunque de los valores obtenidos de potencia (experimentales) presentan errores al ser comparados con los valores teóricos de potencia, tanto por defecto como por exceso, puede afirmarse que la energía obtenida en el eje del motor es disipada en su totalidad, por el freno en forma de calor tomado por el agua. La diferencia entre la potencia real y la teórica se debe a varios factores como son: aparato de medición del caudal de agua y lectura de la temperatura de salida del agua.

11.8 BALANCE TERMICO DEL MOTOR

En esta prueba se comprueba que el porcentaje de energia útil aprovechable es el esperado. Este valor oscila entre un 24 y un 27%, siendo superior a los valores obtenidos en el Trabajo Especial realizado por Ameijeiras, Juan y Trujillo, Jorge, utilizando la gasolina como combustible. Los valores

en porcentaje, de energia disipada por radiación son menores que los obtenidos en dicho trabajo especial, debido principalmente al diferente tipo de sistema de refrigeración, que permite una mayor disipación de calor, y a la mayor temperatura de salida de los gases de escape.

ASPECTOS RESALTANTES UNA VEZ REALIZADAS LAS PRUEBAS

A continuación se mencionan algunos puntos que tienen que ver directamente con los resultados obtenidos en las pruebas. Entre estos puntos el más importante es la entonación del motor con gas natural, que, lógicamente dependiendo de ésta se ven alterados los resultados de una u otra forma. Dicha entonación fue realizada por los autores careciendo de un conocimiento técnico profundo, que es adquirido con cursos especializados y experiencia; además de ser algo nuevo en el país. Adicionalmente el reductor-regulador de presión instalado en el Banco de Pruebas esta diseñado para motores de 5 lit. en adelante; no fue posible obtener el adecuado para la cilindrada del motor del Banco de Pruebas. Tal equipo, produce ciertos inconvenientes, especialmente con el motor trabajando en vacio.

En el sistema eléctrico del motor fué necesario acercar en un 20% aproximadamente, del valor prescrito, la separación de los electrodos de las bujias usando gasolina como combustible, para facilitar el encendido del motor con el uso del gas natural. Otro inconveniente que afecta al

sistema eléctrico es la Central Electrónica de Control, ya que al estar colocada en serie con el circuito primario de la bobina, reduce el voltaje en éste, debido a la resistencia adicional que ofrecen los componentes electrónicos de la Central, por tanto se ve afectado el voltaje del circuito secundario de la bobina hacia un valor menor. Este último inconveniente se presenta sólo para encender el motor. Para solventar esto se encuentra instalado un pequeño interruptor, que trabaja como "by pass".

El gas natural presenta una temperatura de combustión superior a la de la gasolina por tanto, en la cámara del motor se desarrollan temperaturas mayores. Para evitar que los electrodos de las bujias se vuelvan incandescentes dando origen a dañinas preigniciones, se aconseja utilizar bujias más "frias", osea de un cierto grado térmico menor que el recomendado por el fabricante del motor para el uso de éste con gasolina.

Hay que resaltar que el mezclador utilizado reduce el máximo régimen del motor y la potencia a elevadas revoluciones, favoreciendo al mismo tiempo un aumento de ésta última a bajas revoluciones, como se observa al comparar los resultados de las pruebas realizadas con gasolina, especialmente la de 100% de abertura y carga variable, con aquellos obtenidos en el Trabajo Especial de grado ya mencionado con anterioridad. Tal comportamiento se

debe a la disminución de área que ofrece al ducto de admisión, el mezclador, y que aumenta la velocidad del aire en los conductos de admisión y aumente la carga por bombeo a elevados regímenes.

Se verificó que las bujías presentan un excelente aspecto; color gris claro, sin presentar depositos de carbon, al extraerla una vez concluida una prueba con gas natural. Tal aspecto no se presenta con el uso de la gasolina. Esto es una prueba de que el gas natural es un combustible limpio, que no deja depositos en las cámaras, mantiene limpio el aceite, además de no diluirlo, ayudando de esta forma a conservar en un mejor estado, el motor.

12. CONCLUSIONES

Finalizado el Trabajo Especial de Grado, sólo resta añadir al informe de éste, las conclusiones derivadas de la experiencia vivida.

Actualmente el Banco de Pruebas esta en capacidad de operar en forma dual con dos tipos de combustible, permitiendo un mayor preparación y conocimiento a la Comunidad Universitaria acerca de las caracteristicas de otro tipo de carburante.

Los nuevos equipos instalados en el Banco de Pruebas, permiten realizar pruebas confiables y seguras, tanto para gasolina como para gas natural.

Sin el Banco de Pruebas no hubiese sido posible la realización de este trabajo especial, el cual, junto a los nuevos equipos de conversión, presentó un comportamiento muy satisfactorio a pesar del gran número de ensayos llevados a cabo con él.

Las pruebas obtenidas, usando el gas natural, resultaron ser las esperadas, aún cuando sean unas de las primeras pruebas llevadas a cabo en el país, con dicho combustible.

La realización de este trabajo especial, deja un

incalculable valor de conocimientos prácticos y afianza los conocimientos teóricos adquiridos durante el periodo universitario en los autores.

A pesar de todos los incovenientes que se pueden presentar durante la realización de un Trabajo Especial de Grado en un laboratorio, queremos estimular a los estundiantes para que realizen su tesis de grado en los mismos, ya que quedan innumerables proyectos interesantes por realizar.

13. RECOMENDACIONES

Es muy importante que para continuar con las labores, ensayos, practicas, etc.; es necesario que todos los equipos del Laboratorio de Térmica se encuentren en buen estado. Para ello es necesario inculcar una actitud conservacionistas para su mantenimiento, mejora y desarrollo de éste, que ayudará sin duda a una mejor formación del estudiante.

Con el gas natural se pueden realizar otros tipos de pruebas que resultarian ser muy interesantes, tales como: analizar el comportamiento de este combustible frente a diversas relaciones de compresión, utilizando otro tipo de mezclador o perforando el carburador para el uso de los "promiscuos", incluidos en el kit de conversión y disponibles en el laboratorio.

Otro tipo de ensayo interesante es el análisis de los gases de escape (análisis Orsat), en ambos combustibles.

Por último, sería de sumo interes observar el comportamiento del motor con ambos combustibles en el diagrama P-V. Para ello es necesario reparar los equipos instalados para tal fin; que se encuentra en mal estado.

14. BIBLIOGRAFIA

* Ameijeiras, Juan y Trujillo, Jorge. Trabajo Especial: "Diseño, Construcción y Evaluación de un Banco de Pruebas para Motores de Combustión Interna Encendidos por chispa".UCAB 1987.

* Bosch, Robert. "Automotive Handbook".1986

* Corpoven. "La Industria del Gas en Venezuela".

* Eghbali,Baharam. "Natural Gas as a Vehicular Fuel". S.A.E. 841159.

* Engineering Data Book. "Natural Gas Processors Suppliers Association".1966

* Evans, R.L.; Goharian, F. and Hill, P.G. "The Performance of a Spark-Ignition Engine Fuelled with Natural Gas and Gasoline". S.A.E. 840234.

* Faires, V. "Termodinámica".Editorial Hispanoamericana. 20º edición.1973.

* Fleming, Ralph D.. "Potencial for Improving the Efficiency of a Spark Ignition Engine for Natural Gas Fuel". S.A.E. 852073.

* Giacosa, Dante. "Motores Endotérmicos".Editorial Dossat SA. 3ra edición.1978.

* Hansen, Asmut T. "Motores y Máquinas. Manual del Ingeniero".

* Katz, Cornell. "Handbook of Natural Gas Engineering".

* "Metano:Costa poco ma non si trova". Revista QUATTRORUOTE. 1/1987.

* Osorio D.,Gaston A. y De Jesus, Mario. Trabajo especial:

"Comportamiento del LPG como Combustible en los Motores Alternativos".UDO.

* Przybylski, Jozef. Trabajo Especial:"Uso del Gas Natural Comprimido (GNC) como Combustible en Vehículos Automotores".ULA 1990.

* Salvi, Giulano. "La Combustión".Editorial Dossat,SA.2da edición.

* Sonntag, R. y Van Wylen, G. "Introducción a la Termodinámica".Editorial Limusa. 1977.

* Wark, K. "Termodinámica".Editorial McGraw-Hill.4ta edición.1984.

* Wyman, Richard P. "GNC Measurements Using PVT Relationships". S.A.E. 831067.

* Zwemmer, A. "Compact High Pressure Natural Gas Compressors for CNG Refuelling Systems". Revista Sulzer Technical Review. 2/1987.

APENDICE A

CARACTERISTICAS DEL GAS NATURAL PARA VEHICULOS

	COMPOSICION GAS NATURAL	REQUERIMIENTOS INTERNACIONALES
Metano (% Molar)	81,93	80,0 MIN
Etano (%)	7,98	10,5 MAX
Propano (%)	0,81	3,5 MAX
I-Butano (%)	0,12	0,7 MAX
N-Butano (%)	0,19	0,8 MAX
I-Pentano (%)	0,07	0,3 MAX
N-Pentano (%)	0,07	0,2 MAX
Hexanos +	0,06	
Heptanos	0,04	0,5 MAX
Dióxido de Carbono (%)	8,55	3,0 MAX
Nitrógeno	0,18	7,0 MAX
Sulfuro de Hidrógeno (PPM)	5,7	10,0 MAX
Agua (LB/MMPC)	4,95	6,5 MAX
Gravedad Especifica	0,69	0,56-0,69 MAX
Poder Calorífico (BTU/PC)	1010,00	1140 MAX 995 MIN
Odorización	Detectable	Detectable

Notas:

1.- Estos valores corresponden a la composición obtenida por el laboratorio del Cuji, según análisis Cromatografico del Gas Natural en el área metropolitana.

2.- Valores superiores de CO_2 podrán permitirse siempre y cuando no exista condensación de agua a las condiciones de operación (ver nota 3).

3.- El máximo contenido de agua permisible del gas deberá ser tal que a una presión de 27,6 MPa (4000 psi) y a la temperatura ambinte no se alcance el punto de rocio. Si bajo estas condiciones se produce condensación de agua se requerirá un tratamiento para deshidratar el gas.

APENDICE A1

CARACTERISTICAS GASOLINA/GAS NATURAL

	Gasolina	Gas Natural
Gravedad Específica	3,5	0,68
Temperatura de Ignición en aire (Espontánea)	430ºC	700ºC
Octanaje	83-95	130
Temperatura de Ebullición (Presión Atmosférica)	27ºC	-161ºC
Relación Aire Combustible (en Volumen)	15,5:1	9,52:1
Reacción Quimica con Gomas	SI	NO
Presión de Almacenaje	Atms.	3000 Psi
Calidad de la Mezcla Aire-Combustible	Pobre	Buena
Contaminación (CO, HC, NO_x)	Alta	Muy Baja
Rango Mezcla Explosiva	1-16%	4-14%
Poder Calorífico Bajo BTU/lb	19.017	17.770
Poder Calorífico Bajo KJ/kg	44.120	41.225
Equivalencia Energética	1,0 lt	1,0M³

APENDICE B

Propiedades según la composición del gas natural

Peso Molecular

	% Volumen	Vol. Fracción	Peso Molecular	Masa kg/kmol
Metano CH_4	81,93	0,8193	16,042	13,143
Etano C_2H_6	7,98	0,0798	30,068	2,399
Propano C_3H_8	0,81	0,0081	44,094	0,357
I-Butano C_4H_{10}	0,12	0,0012	58,120	0,070
N-Butano C_4H_{10}	0,19	0,0019	58,120	0,110
I-Pentano C_5H_{12}	0,07	0,0007	72,146	0,052
N-Pentano C_5H_{12}	0,07	0,0007	72,146	0,052
Hexanos + C_6H_{14}	0,06	0,0006	86,172	0,052
Heptanos C_7H_{16}	0,04	0,0004	100,198	0,040
Dióxido de carbono	8,55	0,0855	44,010	3,763
Nitrógeno	0,18	0,0018	28,016	0,050
Totales	100,00	1,0000		20,088

Poder Calorífico Alto (HHV) @ 15,6 ºC

	Vol. Fracción	HVi BTU/PC	BTU/PC
Metano CH_4	0,8193	911	746,4
Etano C_2H_6	0,0798	1631	130,2
Propano C_3H_8	0,0081	2353	19,1
I-Butano C_4H_{10}	0,0012	3094	3,7
N-Butano C_4H_{10}	0,0019	3101	5,9
I-Pentano C_5H_{12}	0,0007	3698	2,6
N-Pentano C_5H_{12}	0,0007	3709	2,6
Hexanos + C_6H_{14}	0,0006	4404	2,6
Heptanos C_7H_{16}	0,0004	5101	2,0
Dióxido de carbono	0,0855	----	-----
Nitrógeno	0,0018	----	-----
Totales	1,0000		**915,1 BTU/PC**
			41.225,0 kj/kg

Poder Calorífico Bajo (LHV) @ 15,6 ºC

	Vol. Fracción	HVi BTU/PC	BTU/PC
Metano CH_4	0,8193	1012	829,1
Etano C_2H_6	0,0798	1783	142,3
Propano C_3H_8	0,0081	2557	20,7
I-Butano C_4H_{10}	0,0012	3354	4,0
N-Butano C_4H_{10}	0,0019	3369	6,4
I-Pentano C_5H_{12}	0,0007	4001	2,8
N-Pentano C_5H_{12}	0,0007	4009	2,8
Hexanos + C_6H_{14}	0,0006	4756	2,9
Heptanos C_7H_{16}	0,0004	5503	2,2
Dióxido de carbono	0,0855	----	-----
Nitrógeno	0,0018	----	-----
Totales	1,0000		**1.009,2 BTU/PC**
			45.464,0 kj/kg

Relación estequiométrica de aire/combustible

$$0{,}8193CH_4 + 0{,}0798C_2H_6 + 0{,}0081C_3H_8 + 0{,}0012I\text{-}C_4H_{10} + 0{,}0019N\text{-}C_4H_{10} + 0{,}0007I\text{-}C_5H_{12} + 0{,}0007N\text{-}C_5H_{12} + 0{,}0006C_6H_{14} + 0{,}0004C_7H_{16} + 0{,}0018N_2 + 0{,}0855CO_2 + 1{,}9999O_2 + 1{,}9999(3{,}76)N_2 \longrightarrow 1{,}11450CO_2 + 1{,}9417H_2O + 7{,}5180N_2$$

$$\frac{A}{F} = \frac{(1{,}9999 + 7{,}5196) * 28{,}97}{20{,}086} = \frac{275{,}7806}{20{,}086} = 13{,}73$$

A/F = 13,73 kg de aire/kg de gas natural

Densidad:

@ 25 °C & 14,696 psi

0,7996 kg/m³

0,0499 lb/PC

@ 15,6 °C & 14,696 psi

0,8257 kg/m³

0,0515 lb/PC

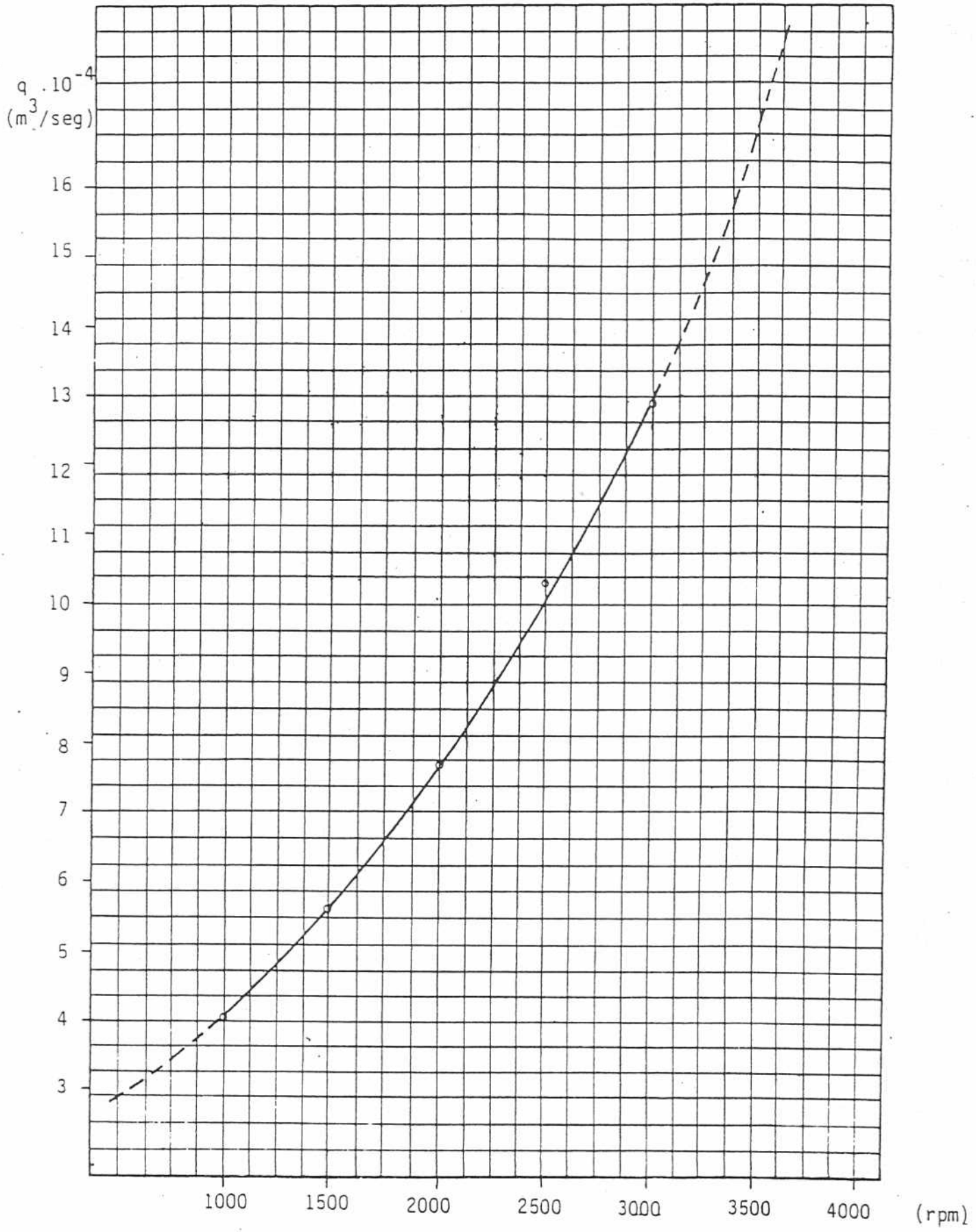
Relación Aire Combustible en Volumen

$$A/F = 13{,}73 \frac{\text{kg de aire}}{\text{kg de G.N.}} * \frac{0{,}7996 \text{ kg/m}^3 \text{ de G.N.}}{1{,}1534 \text{ kg/m}^3 \text{ de aire}} =$$

9,52 m³ de aire/m³ de G.N.

APENDICE C

Curva de caudal de agua vs. rpm para motor tipo 131 A 1.000 (FIAT), a través de la bomba de refrigeración y obtenida empíricamente en el Lab.



APENDICE D

Tablas Complementarias.

D1. PROPIEDADES DEL AGUA SATURADA

Tabla A-12M Propiedades del agua saturada: tabla de la temperatura

v, cm^3/g; u, kJ/kg; h, kJ/kg; s; kJ/(kg)(°K)

		Volumen específico		Energía interna		Entalpía			Entropía	
Temp. °C T	Press. bars P	Líquido saturado v_f	Vapor saturado v_g	Líquido saturado u_f	Vapor saturado u_g	Líquido saturado h_f	Evap. h_{fg}	Vapor saturado h_g	Líquido saturado s_f	Vapor saturado s_g
0	0.00611	1.0002	206278	−0.03	2375.4	−0.02	2501.4	2501.3	0.0001	9.1565
4	0.00813	1.0001	157232	16.77	2380.9	16.78	2491.9	2508.7	0.0610	9.0514
5	0.00872	1.0001	147120	20.97	2382.3	20.98	2489.6	2510.6	0.0761	9.0257
6	0.00935	1.0001	137734	25.19	2383.6	25.20	2487.2	2512.4	0.0912	9.0003
8	0.01072	1.0002	120917	33.59	2386.4	33.60	2482.5	2516.1	0.1212	8.9501
10	0.01228	1.0004	106379	42.00	2389.2	42.01	2477.7	2519.8	0.1510	8.9008
11	0.01312	1.0004	99857	46.20	2390.5	46.20	2475.4	2521.6	0.1658	8.8765
12	0.01402	1.0005	93784	50.41	2391.9	50.41	2473.0	2523.4	0.1806	8.8524
13	0.01497	1.0007	88124	54.60	2393.3	54.60	2470.7	2525.3	0.1953	8.8285
14	0.01598	1.0008	82848	58.79	2394.7	58.80	2468.3	2527.1	0.2099	8.8048
15	0.01705	1.0009	77926	62.99	2396.1	62.99	2465.9	2528.9	0.2245	8.7814
16	0.01818	1.0011	73333	67.18	2397.4	67.19	2463.6	2530.8	0.2390	8.7582
17	0.01938	1.0012	69044	71.38	2398.8	71.38	2461.2	2532.6	0.2535	8.7351
18	0.02064	1.0014	65038	75.57	2400.2	75.58	2458.8	2534.4	0.2679	8.7123
19	0.02198	1.0016	61293	79.76	2401.6	79.77	2456.5	2536.2	0.2823	8.6897
20	0.02339	1.0018	57791	83.95	2402.9	83.96	2454.1	2538.1	0.2966	8.6672
21	0.02487	1.0020	54514	88.14	2404.3	88.14	2451.8	2539.9	0.3109	8.6450
22	0.02645	1.0022	51447	92.32	2405.7	92.33	2449.4	2541.7	0.3251	8.6229
23	0.02810	1.0024	48574	96.51	2407.0	96.52	2447.0	2543.5	0.3393	8.6011
24	0.02985	1.0027	45883	100.70	2408.4	100.70	2444.7	2545.4	0.3534	8.5794
25	0.03169	1.0029	43360	104.88	2409.8	104.89	2442.3	2547.2	0.3674	8.5580
26	0.03363	1.0032	40994	109.06	2411.1	109.07	2439.9	2549.0	0.3814	8.5367
27	0.03567	1.0035	38774	113.25	2412.5	113.25	2437.6	2550.8	0.3954	8.5156
28	0.03782	1.0037	36690	117.42	2413.9	117.43	2435.2	2552.6	0.4093	8.4946
29	0.04008	1.0040	34733	121.60	2415.2	121.61	2432.8	2554.5	0.4231	8.4739
30	0.04246	1.0043	32894	125.78	2416.6	125.79	2430.5	2556.3	0.4369	8.4533
31	0.04496	1.0046	31165	129.96	2418.0	129.97	2428.1	2558.1	0.4507	8.4329
32	0.04759	1.0050	29540	134.14	2419.3	134.15	2425.7	2559.9	0.4644	8.4127
33	0.05034	1.0053	28011	138.32	2420.7	138.33	2423.4	2561.7	0.4781	8.3927
34	0.05324	1.0056	26571	142.50	2422.0	142.50	2421.0	2563.5	0.4917	8.3728
35	0.05628	1.0060	25216	146.67	2423.4	146.68	2418.6	2565.3	0.5053	8.3531
36	0.05947	1.0063	23940	150.85	2424.7	150.86	2416.2	2567.1	0.5188	8.3336
38	0.06632	1.0071	21602	159.20	2427.4	159.21	2411.5	2570.7	0.5458	8.2950
40	0.07384	1.0078	19523	167.56	2430.1	167.57	2406.7	2574.3	0.5725	8.2570
45	0.09593	1.0099	15258	188.44	2436.8	188.45	2394.8	2583.2	0.6387	8.1648

Tabla A-12M (*Continuación*)

Temp. °C T	Press. bars P	Volumen específico Líquido saturado v_f	Volumen específico Vapor saturado v_g	Energía interna Líquido saturado u_f	Energía interna Vapor saturado u_g	Entalpía Líquido saturado h_f	Entalpía Evap. h_{fg}	Entalpía Vapor saturado h_g	Entropía Líquido saturado s_f	Entropía Vapor saturado s_g
50	.1235	1.0121	12032	209.32	2443.5	209.33	2382.7	2592.1	.7038	8.0763
55	.1576	1.0146	9568	230.21	2450.1	230.23	2370.7	2600.9	.7679	7.9913
60	.1994	1.0172	7671	251.11	2456.6	251.13	2358.5	2609.6	.8312	7.9096
65	.2503	1.0199	6197	272.02	2463.1	272.06	2346.2	2618.3	.8935	7.8310
70	.3119	1.0228	5042	292.95	2469.6	292.98	2333.8	2626.8	.9549	7.7553
75	.3858	1.0259	4131	313.90	2475.9	313.93	2321.4	2635.3	1.0155	7.6824
80	.4739	1.0291	3407	334.86	2482.2	334.91	2308.8	2643.7	1.0753	7.6122
85	.5783	1.0325	2828	355.84	2488.4	355.90	2296.0	2651.9	1.1343	7.5445
90	.7014	1.0360	2361	376.85	2494.5	376.92	2283.2	2660.1	1.1925	7.4791
95	.8455	1.0397	1982	397.88	2500.6	397.96	2270.2	2668.1	1.2500	7.4159
100	1.014	1.0435	1673.	418.94	2506.5	419.04	2257.0	2676.1	1.3069	7.3549
110	1.433	1.0516	1210.	461.14	2518.1	461.30	2230.2	2691.5	1.4185	7.2387
120	1.985	1.0603	891.9	503.50	2529.3	503.71	2202.6	2706.3	1.5276	7.1296
130	2.701	1.0697	668.5	546.02	2539.9	546.31	2174.2	2720.5	1.6344	7.0269
140	3.613	1.0797	508.9	588.74	2550.0	589.13	2144.7	2733.9	1.7391	6.9299
150	4.758	1.0905	392.8	631.68	2559.5	632.20	2114.3	2746.5	1.8418	6.8379
160	6.178	1.1020	307.1	674.86	2568.4	675.55	2082.6	2758.1	1.9427	6.7502
170	7.917	1.1143	242.8	718.33	2576.5	719.21	2049.5	2768.7	2.0419	6.6663
180	10.02	1.1274	194.1	762.09	2583.7	763.22	2015.0	2778.2	2.1396	6,5857
190	12.54	1.1414	156.5	806.19	2590.0	807.62	1978.8	2786.4	2.2359	6.5079
200	15.54	1.1565	127.4	850.65	2595.3	852.45	1940.7	2973.2	2.3309	6.4323
210	19.06	1.1726	104.4	895.53	2599.5	897.76	1900.7	2798.5	2.4248	6.3585
220	23.18	1.1900	86.19	940.87	2602.4	943.62	1858.5	2802.1	2.5178	6.2861
230	27.95	1.2088	71.58	986.74	2603.9	990.12	1813.8	2804.0	2.6099	6.2146
240	33.44	1.2291	59.76	1033.2	2604.0	1037.3	1766.5	2803.8	2.7015	6.1437
250	39.73	1.2512	50.13	1080.4	2602.4	1085.4	1716.2	2801.5	2.7927	6.0730
260	46.88	1.2755	42.21	1128.4	2599.0	1134.4	1662.5	2796.6	2.8838	6.0019
270	54.99	1.3023	35.64	1177.4	2593.7	1184.5	1605.2	2789.7	2.9751	5.9301
280	64.12	1.3321	30.17	1227.5	2586.1	1236.0	1543.6	2779.6	3.0668	5.8571
290	74.36	1.3656	25.57	1278.9	2576.0	1289.1	1477.1	2766.2	3.1594	5.7821
300	85.81	1.4036	21.67	1332.0	2563.0	1344.0	1404.9	2749.0	3.2534	5.7045
320	112.7	1.4988	15.49	1444.6	2525.5	1461.5	1238.6	2700.1	3.4480	5.5362
340	145.9	1.6379	10.80	1570.3	2464.6	1594.2	1027.9	2622.0	36594	5.3357
360	186.5	1.8925	6.945	1725.2	2351.5	1760.5	720.5	2481.0	3.9147	5.0526
374.14	220.9	3.155	3.155	2029.6	2029.6	2099.3	0	2099.3	4.4298	4.4298

Fuente: Keenan, J. H., F. G. Keyes, P. G. Hill, and J. G. Moore, "Steam Tables", Wiley, New York, 1969.

D2. PROPIEDADES DEL AIRE

Tabla A-5M Propiedades de gas ideal del aire

T, °K; h, kJ/kg; u, kJ/kg; s^0, kJ/(kg)(°K)

T	h	p_r	u	v_r	s^0	T	h	p_r	u	v_r	s^0
200	199.97	0.3363	142.56	1707.	1.29559	460	462.02	6.245	329.97	211.4	2.13407
210	209.97	0.3987	149.69	1512.	1.34444	470	472.24	6.742	337.32	200.1	2.15604
220	219.97	0.4690	156.82	1346.	1.39105	480	482.49	7.268	344.70	189.5	2.17760
230	230.02	0.5477	164.00	1205.	1.43557	490	492.74	7.824	352.08	179.7	2.19876
240	240.02	0.6355	171.13	1084.	1.47824	500	503.02	8.411	359.49	170.6	2.21952
250	250.05	0.7329	178.28	979.	1.51917	510	513.32	9.031	366.92	162.1	2.23993
260	260.09	0.8405	185.45	887.8	1.55848	520	523.63	9.684	374.36	154.1	2.25997
270	270.11	0.9590	192.60	808.0	1.59634	530	533.98	10.37	381.84	146.7	2.27967
280	280.13	1.0889	199.75	738.0	1.63279	540	544.35	11.10	389.34	139.7	2.29906
285	285.14	1.1584	203.33	706.1	1.65055	550	554.74	11.86	396.86	133.1	2.31809
290	290.16	1.2311	206.91	676.1	1.66802	560	565.17	12.66	404.42	127.0	2.33685
295	295.17	1.3068	210.49	647.9	1.68515	570	575.59	13.50	411.97	121.2	2.35531
300	300.19	1.3860	214.07	621.2	1.70203	580	586.04	14.38	419.55	115.7	2.37348
305	305.22	1.4686	217.67	596.0	1.71865	590	596.52	15.31	427.15	110.6	2.39140
310	310.24	1.5546	221.25	572.3	1.73498	600	607.02	16.28	434.78	105.8	2.40902
315	315.27	1.6442	224.85	549.8	1.75106	610	617.53	17.30	442.42	101.2	2.42644
320	320.29	1.7375	228.42	528.6	1.76690	620	628.07	18.36	450.09	96.92	2.44356
325	325.31	1.8345	232.02	508.4	1.78249	630	638.63	19.84	457.78	92.84	2.46048
330	330.34	1.9352	235.61	489.4	1.79783	640	649.22	20.64	465.50	88.99	2.47716
340	340.42	2.149	242.82	454.1	1.82790	650	659.84	21.86	473.25	85.34	2.49364
350	350.49	2.379	250.02	422.2	1.85708	660	670.47	23.13	481.01	81.89	2.50985
360	360.58	2.626	257.24	393.4	1.88543	670	681.14	24.46	488.81	78.61	2.52589
370	370.67	2.892	264.46	367.2	1.91313	680	691.82	25.85	496.62	75.50	2.54175
380	380.77	3.176	271.69	343.4	1.94001	690	702.52	27.29	504.45	72.56	2.55731
390	390.88	3.481	278.93	321.5	1.96633	700	713.27	28.80	512.33	69.76	2.57277
400	400.98	3.806	286.16	301.6	1.99194	710	724.04	30.38	520.23	67.07	2.58810
410	411.12	4.153	293.43	283.3	2.01699	720	734.82	32.02	528.14	64.53	2.60319
420	421.26	4.522	300.69	266.6	2.04142	730	745.62	33.72	536.07	62.13	2.61803
430	431.43	4.915	307.99	251.1	2.06533	740	756.44	35.50	544.02	59.82	2.63280
440	441.61	5.332	315.30	236.8	2.08870	750	767.29	37.35	551.99	57.63	2.64737
450	451.80	5.775	322.62	223.6	2.11161	760	778.18	39.27	560.01	55.54	2.66176

Tabla A-5M (*Continuación*)

T, K; h, kJ/kg; u, kJ/kg; s^0, kJ/(kg)(°K)

T	h	p_r	u	v_r	s^0	T	h	p_r	u	v_r	s^0
780	800.03	43.35	576.12	51.64	2.69013	1360	1467.49	399.1	1077.10	9.780	3.32724
800	821.95	47.75	592.30	48.08	2.71787	1380	1491.44	424.2	1095.26	9.337	3.34474
820	843.98	52.59	608.59	44.84	2.74504	1400	1515.42	450.5	1113.52	8.919	3.36200
840	866.08	57.60	624.95	41.85	2.77170	1420	1539.44	478.0	1131.77	8.526	3.37901
860	888.27	63.09	641.40	39.12	2.79783	1440	1563.51	506.9	1150.13	8.153	3.39586
880	910.56	68.98	657.95	36.61	2.82344	1460	1587.63	537.1	1168.49	7.801	3.41247
900	932.93	75.29	674.58	34.31	2.84856	1480	1611.79	568.8	1186.95	7.468	3.42892
920	955.38	82.05	691.28	32.18	2.87324	1500	1635.97	601.9	1205.41	7.152	3.44516
940	977.92	89.28	708.08	30.22	2.89748	1520	1660.23	636.5	1223.87	6.854	3.46120
960	1000.55	97.00	725.02	28.40	2.92128	1540	1684.51	672.8	1242.43	6.569	3.47712
980	1023.25	105.2	741.98	26.73	2.94468	1560	1708.82	710.5	1260.99	6.301	3.49276
1000	1046.04	114.0	758.94	25.17	2.96770	1580	1733.17	750.0	1279.65	6.046	3.50829
1020	1068.89	123.4	776.10	23.72	2.99034	1600	1757.57	791.2	1298.30	5.804	3.52364
1040	1091.85	133.3	793.36	22.39	3.01260	1620	1782.00	834.1	1316.96	5.574	3.53879
1060	1114.86	143.9	810.62	21.14	3.03449	1640	1806.46	878.9	1335.72	5.355	3.55381
1080	1137.89	155.2	827.88	19.98	3.05608	1660	1830.96	925.6	1354.48	5.147	3.56867
1100	1161.07	167.1	845.33	18.896	3.07732	1680	1855.50	974.2	1373.24	4.949	3.58335
1120	1184.28	179.7	862.79	17.886	3.09825	1700	1880.1	1025	1392.7	4.761	3.5979
1140	1207.57	193.1	880.35	16.946	3.11883	1750	1941.6	1161	1439.8	4.328	3.6336
1160	1230.92	207.2	897.91	16.064	3.13916	1800	2003.3	1310	1487.2	3.944	3.6684
1180	1254.34	222.2	915.57	15.241	3.15916	1850	2065.3	1475	1534.9	3.601	3.7023
1200	1277.79	238.0	933.33	14.470	3.17888	1900	2127.4	1655	1582.6	3.295	3.7354
1220	1301.31	254.7	951.09	13.747	3.19834	1950	2189.7	1852	1630.6	3.022	3.7677
1240	1324.93	272.3	968.95	13.069	3.21751	2000	2252.1	2068	1678.7	2.776	3.7994
1260	1348.55	290.8	986.90	12.435	3.23638	2050	2314.6	2303	1726.8	2.555	3.8303
1280	1372.24	310.4	1004.76	11.835	3.25510	2100	2377.4	2559	1775.3	2.356	3.8605
1300	1395.97	330.9	1022.82	11.275	3.27345	2150	2440.3	2837	1823.8	2.175	3.8901
1320	1419.76	352.5	1040.88	10.747	3.29160	2200	2503.2	3138	1872.4	2.012	3.9191
1340	1443.60	375.3	1058.94	10.247	3.30959	2250	2566.4	3464	1921.3	1.864	3.9474

Fuente: adaptada de Keenan, J. H. and J. Kaye, "Gas Tables", Wiley, New York, 1945.

D3. PROPIEDADES DE LOS PRODUCTOS DE LA COMBUSTION (200% de aire teórico)

Tabla A9. Productos; 200% aire teórico (por kilogramomol)

Transformada de la tabla A9'. Los datos son exactos para los °R., y los °K. que se indican son equivalencias en números enteros. Si se quiere mayor precisión para los °K. habrá que multiplicar los °R. por 9/5.

T °K.	T °R.	$\bar{h}$	p_r	$\bar{u}$	v_r	$\bar{\phi}$
211	380	1477.9	0.3878	1058.7	10516	43.845
222	400	1556.3	0.4655	1115.0	9222	44.208
233	420	1635.0	0.5539	1171.6	8138	44.553
244	440	1713.8	0.6539	1228.3	7223	44.883
255	460	1792.6	0.7663	1285.2	6441	45.198
266	480	1871.6	0.8925	1342.0	5772	45.500
278	500	1950.6	1.0330	1399.0	5194	45.791
289	520	2029.8	1.1893	1456.1	4692	46.070
298	537	2097.1	1.3350	1504.7	4317	46.300
300	540	2109.0	1.3620	1513.3	4255	46.340
311	560	2188.5	1.5526	1570.7	3871	46.600
322	580	2268.1	1.7621	1628.3	3532	46.851
333	600	2347.9	1.992	1686.0	3233	47.094
344	620	2427.8	2.243	1743.8	2967	47.330
355	640	2507.8	2.516	1801.6	2730	47.558
366	660	2588.1	2.814	1859.9	2517	47.781
377	680	2668.2	3.136	1918.0	2326	47.996
389	700	2748.7	3.487	1976.4	2154.5	48.207
400	720	2829.2	3.864	2034.9	1999.3	48.411
411	740	2909.9	4.273	2093.5	1858.7	48.610
422	760	2990.9	4.711	2152.4	1731.1	48.804
433	780	3072.1	5.183	2211.6	1614.9	48.994
444	800	3153.5	5.690	2270.9	1508.7	49.179
455	820	3235.0	6.234	2330.4	1411.7	49.360
466	840	3316.6	6.815	2389.8	1322.6	49.537
477	860	3398.6	7.437	2449.8	1241.0	49.711
488	880	3480.5	8.101	2509.6	1165.8	49.881
500	900	3562.7	8.808	2569.8	1096.4	50.047
511	920	3645.2	9.564	2630.3	1032.4	50.210
522	940	3728.0	10.366	2690.9	973.3	50.370
533	960	3811.0	11.221	2751.9	918.2	50.528
544	980	3894.2	12.126	2813.1	867.2	50.682
555	1000	3977.6	13.089	2874.4	819.8	50.833
567	1020	4061.3	14.109	2936.0	775.8	50.983
578	1040	4145.0	15.189	2997.6	734.9	51.128
589	1060	4229.2	16.333	3059.8	696.2	51.273
600	1080	4313.5	17.542	3121.9	660.8	51.415
611	1100	4398.0	18.822	3184.4	627.1	51.555
622	1120	4482.7	20.170	3247.1	595.9	51.692
633	1140	4567.8	21.595	3310.1	566.6	51.828
644	1160	4653.0	23.10	3373.2	539.0	51.961
655	1180	4738.4	24.68	3436.6	513.2	52.093
667	1200	4824.2	26.34	3500.3	488.9	52.222
678	1220	4910.3	28.09	3564.3	466.0	52.351
689	1240	4996.5	29.94	3628.4	444.5	52.477
700	1260	5082.9	31.87	3692.8	424.2	52.601
711	1280	5169.6	33.90	3757.4	405.1	52.724
722	1300	5256.4	36.05	3822.2	387.0	52.845
733	1320	5343.7	38.29	3887.4	370.0	52.965
744	1340	5431.2	40.64	3952.8	353.9	53.084
755	1360	5518.7	43.10	4018.3	338.6	53.200
767	1380	5606.6	45.68	4084.1	324.2	53.316
778	1400	5694.8	48.38	4150.2	310.5	53.430
789	1420	5783.3	51.21	4216.6	297.6	53.543
800	1440	5871.8	54.17	4283.1	285.3	53.654

Tabla A9. *(Conclusión)*

T °K.	T °R.	$\bar{h}$	p_r	$\bar{u}$	v_r	$\bar{\phi}$
811	1460	5960.7	57.26	4349.9	273.6	53.764
822	1480	6049.7	60.49	4416.8	262.5	53.874
833	1500	6139.0	63.88	4484.1	252.0	53.981
844	1520	6228.5	67.40	4551.6	242.0	54.088
855	1540	6318.2	71.08	4619.2	232.5	54.194
867	1560	6408.2	74.91	4687.0	223.5	54.298
878	1580	6498.2	78.92	4755.0	214.8	54.401
889	1600	6588.7	83.10	4823.4	206.63	54.504
900	1620	6679.3	87.44	4892.0	198.81	54.605
911	1640	6770.1	91.97	4960.7	191.35	54.705
922	1660	6861.1	96.69	5029.7	184.25	54.805
933	1680	6952.3	101.60	5098.8	177.46	54.903
944	1700	7043.7	106.70	5168.1	170.97	55.000
955	1720	7135.4	112.01	5237.8	164.79	55.097
967	1740	7227.2	117.53	5307.5	158.88	55.192
978	1760	7319.2	123.27	5377.4	153.22	55.287
989	1780	7411.4	129.23	5447.4	147.80	55.380
1000	1800	7503.9	135.43	5517.9	142.63	55.473
1011	1820	7596.5	141.86	5588.6	137.68	55.566
1022	1840	7689.2	148.54	5659.2	132.94	55.657
1033	1860	7782.4	155.46	5730.4	128.40	55.748
1044	1880	7875.6	162.55	5801.5	124.03	55.837
1055	1900	7968.9	170.09	5872.8	119.87	55.926
1067	1920	8062.5	177.82	5944.2	115.87	56.015
1078	1940	8156.3	185.82	6016.0	112.04	56.102
1089	1960	8250.2	194.13	6087.8	108.35	56.189
1100	1980	8344.3	202.71	6159.9	104.82	56.275
1111	2000	8438.5	211.6	6232.0	101.43	56.360
1122	2020	8532.9	220.8	6304.4	98.16	56.444
1133	2040	8627.6	230.4	6376.9	95.04	56.528
1144	2060	8722.4	240.2	6449.7	92.03	56.612
1155	2080	8817.4	250.4	6522.6	89.15	56.694
1167	2100	8912.4	260.9	6595.6	86.36	56.777
1194	2150	9150.8	288.9	6778.8	79.86	56.978
1222	2200	9390.3	319.2	6963.1	73.96	56.177
1250	2250	9630.7	352.0	7148.4	68.57	57.371
1278	2300	9871.8	387.5	7334.3	63.68	57.562
1305	2350	10113.8	425.9	7521.2	59.21	57.749
1333	2400	10356.7	467.4	7708.9	55.12	57.933
1361	2450	10600.4	511.9	7897.4	51.36	58.114
1389	2500	10844.8	559.8	8086.7	47.91	58.292
1417	2550	11090.0	611.3	8276.7	44.76	58.467
1444	2600	11335.9	666.6	8467.4	41.85	58.639
1472	2650	11582.4	725.9	8658.6	39.18	58.808
1500	2700	11829.9	789.4	8851.1	36.71	58.974
1528	2750	12077.9	857.2	9044.0	34.42	59.138
1555	2800	12326.4	929.8	9237.3	32.31	59.300
1583	2850	12575.7	1007.2	9431.4	30.36	59.459
1611	2900	12825.5	1089.8	9626.1	28.56	59.615
1639	2950	13075.9	1177.9	9821.3	26.88	59.769
1667	3000	13326.9	1271.2	10017.2	25.321	59.921
1722	3100	13830.7	1476.8	10410.6	22.528	60.218
1778	3200	14336.4	1708.2	10806.0	20.103	60.507
1889	3400	15353.5	2259.1	11602.4	16.152	61.063
2000	3600	16377.7	2946	12406.0	13.114	61.590
2166	3900	17925.6	4284	13622.9	9.770	62.333

D4. TABLA DE RESULTADOS CON GASOLINA (Febrero 1987)

- Prueba con abertura de la mariposa del carburador variable.

P = 698,50 mmHg T = 24,77 ºC

rpm	N (KW)	M (mN)	mG (grs/s)	ma (grs/s)	mat (grs/s)
4.500	27,7 ±0,7	58,9 ± 1,4	3,19 ± 0,09	37,5 ± 1,9	62,80
4.000	21,4 ± 0,3	51,1 ± 0,7	2,30 ± 0,09	28,8 ± 0,9	56,56
3.500	16,4 ± 0,2	44,6 ± 0,5	1,78 ± 0,10	22,8 ± 0,7	49,84
3.000	12,3 ± 0,1	39,2 ± 0,4	1,46 ± 0,13	18,1 ± 0,9	42,91
2.500	8,6 ± 0,2	33,0 ± 0,6	1,06 ± 0,11	13,5 ± 0,9	35,87
2.000	5,7 ± 0,1	27,2 ± 0,4	0,79 ± 0,08	9,5 ± 0,6	28,76
1.500	3,3 ± 0,1	21,1 ± 0,6	0,63 ± 0,05	5,7 ± 1,1	21,60

rpm	mespG (grs/KWh)	mespa (grs/KWh)	rac	µY (%)	µT (%)
4.500	414 ± 22	4867 ± 362	11,76 ± 0,93	59,7 ± 3,0	19,6 ± 1,0
4.000	387 ± 20	4847 ± 217	12,52 ± 0,88	50,9 ± 1,6	21,0 ± 1,1
3.500	392 ± 26	5020 ± 209	12,81 ± 1,11	45,8 ± 1,4	20,7 ± 1,4
3.000	427 ± 42	5293 ± 311	12,40 ± 1,72	42,2 ± 2,1	19,0 ± 1,9
2.500	442 ± 54	5625 ± 473	12,74 ± 2,17	37,6 ± 2,5	18,4 ± 2,3
2.000	500 ± 59	6011 ± 475	12,03 ± 1,98	33,0 ± 2,1	16,3 ± 1,9
1.500	685 ± 73	6199 ± 1365	9,05 ± 2,46	26,4 ± 5,1	11,9 ± 1,3

- Prueba con abertura de la mariposa del carburador y carga variables a velocidad constante de 2.000 rpm.

P = 698,70 mmHg T = 24,80 ºC

ABERT	N (KW)	M (mN)	mG (grs/s)	ma (grs/s)	mat (grs/s)
10	6,7 ± 0,3	31,8 ± 1,3	0,68 ± 0,08	10,6 ± 0,4	28,75
20	11,9 ± 0,8	56,6 ± 3,8	1,06 ± 0,15	15,2 ± 1,2	28,67
30	15,4 ± 0,3	73,6 ± 1,3	1,47 ± 0,30	17,9 ± 0,8	28,62
40	17,3 ± 0,2	82,7 ± 0,8	1,81 ± 0,23	20,0 ± 0,9	28,56
50	17,8 ± 0,1	85,1 ± 0,6	1,82 ± 0,19	20,6 ± 0,7	28,55
60	18,1 ± 0,1	86,3 ± 0,6	1,84 ± 0,23	20,6 ± 1,1	28,55
70	18,5 ± 0,3	88,5 ± 1,4	1,87 ± 0,15	21,0 ± 0,7	28,54
80	18,6 ± 0,4	88,8 ± 1,7	1,72 ± 0,11	21,2 ± 1,3	28,53
90	18,5 ± 0,6	88,5 ± 2,8	1,79 ± 0,19	21,1 ± 0,9	28,53

ABERT	mespG (grs/KWh)	mespa (grs/KWh)	rac	µv (%)	µT (%)
10	368 ± 58	5730 ± 440	15,6 ± 2,4	36,9 ± 1,4	22,1 ± 3,5
20	322 ± 67	4614 ± 763	14,3 ± 3,4	53,0 ± 5,2	25,2 ± 5,3
30	343 ± 76	4179 ± 257	12,2 ± 3,0	62,5 ± 2,8	23,7 ± 5,3
40	376 ± 52	4155 ± 230	11,0 ± 1,9	70,0 ± 3,2	21,6 ± 3,0
50	367 ± 41	4159 ± 169	11,3 ± 1,6	72,2 ± 2,5	22,2 ± 2,5
60	367 ± 48	4106 ± 247	11,2 ± 2,0	72,2 ± 3,9	22,2 ± 2,9
70	363 ± 35	4080 ± 200	11,2 ± 1,3	73,6 ± 2,5	22,4 ± 2,2
80	333 ± 28	4105 ± 329	12,3 ± 1,5	74,3 ± 4,6	24,4 ± 2,1
90	348 ± 48	4099 ± 305	11,8 ± 1,8	74,0 ± 3,2	23,4 ± 3,2

- Prueba con abertura de la mariposa del carburador y carga variables a velocidad constante de 3.000 rpm .

P = 698,50 mmHg T = 25,33 ºC

ABERT	N (KW)	M (mN)	mG (grs/s)	ma (grs/s)	mat (grs/s)
10	3,0 ± 0,8	9,6 ± 2,7	0,94 ± 0,08	11,9 ± 1,5	43,01
20	10,2 ± 1,3	31,9 ± 4,1	1,50 ± 0,10	17,8 ± 1,9	42,84
30	17,7 ± 1,7	56,3 ± 5,3	2,21 ± 0,18	24,2 ± 2,7	42,59
40	23,4 ± 0,6	74,5 ± 1,8	2,59 ± 0,18	28,7 ± 0,6	42,35
50	26,0 ± 0,3	82,6 ± 0,9	2,88 ± 0,40	31,0 ± 0,6	42,21
60	27,7 ± 0,6	88,1 ± 2,0	2,94 ± 0,14	32,2 ± 1,2	42,14
70	28,2 ± 0,7	89,9 ± 2,2	2,91 ± 0,17	33,3 ± 1,5	42,07
80	27,7 ± 0,5	88,0 ± 1,6	2,78 ± 0,13	33,2 ± 1,1	42,08
90	28,7 ± 0,5	91,3 ± 1,5	2,96 ± 0,31	33,1 ± 0,6	42,09

ABERT	mespG (grs/KWh)	mespa (grs/KWh)	rac	µv (%)	µT (%)
10	1121 ± 407	14138 ± 5673	12,6 ± 2,6	28,2 ± 3,5	7,3 ± 2,6
20	539 ± 105	6410 ± 1516	11,9 ± 2,1	42,4 ± 4,6	15,1 ± 2,9
30	450 ± 79	4924 ± 1008	10,9 ± 2,1	57,5 ± 6,4	18,1 ± 3,2
40	399 ± 37	4411 ± 199	11,1 ± 1,0	68,0 ± 1,5	24,7 ± 2,8
50	400 ± 60	4303 ± 134	10,8 ± 1,7	73,5 ± 1,5	20,3 ± 3,0
60	383 ± 27	4193 ± 245	11,0 ± 0,9	76,1 ± 2,7	21,2 ± 1,5
70	371 ± 31	4248 ± 229	11,5 ± 1,2	78,2 ± 3,5	21,9 ± 1,8
80	362 ± 24	4320 ± 226	11,9 ± 1,0	77,5 ± 2,6	22,5 ± 1,5
90	372 ± 45	4150 ± 143	11,2 ± 1,4	76,9 ± 1,4	21,9 ± 2,6

- Prueba con abertura de la mariposa del carburador y carga variables a velocidad constante de 4.000 rpm.

P = 698,80 mmHg T = 25,20 ºC

ABERT	N (KW)	M (mN)	mG (grs/s)	ma (grs/s)	mat (grs/s)
20	8,5 ± 2,1	20,3 ± 4,9	1,32 ± 0,11	18,1 ± 2,9	57,15
30	18,2 ± 0,9	43,5 ± 2,1	2,19 ± 0,11	26,2 ± 1,4	56,69
40	28,0 ± 0,6	66,7 ± 1,4	3,08 ± 0,23	34,0 ± 1,9	56,09
50	31,2 ± 0,9	74,5 ± 2,1	3,29 ± 0,11	38,0 ± 0,7	55,71
60	33,8 ± 1,5	80,8 ± 3,5	3,50 ± 0,34	38,3 ± 2,7	55,69
70	33,5 ± 3,8	80,1 ± 9,1	3,82 ± 0,19	42,6 ± 0,9	55,23
80	34,1 ± 4,7	81,5 ± 11,2	4,01 ± 0,38	43,8 ± 1,4	55,10
90	33,2 ± 5,0	79,4 ± 11,9	4,18 ± 0,53	44,3 ± 0,8	55,04

ABERT	mespG (grs/KWh)	mespa (grs/KWh)	rac	µv (%)	µT (%)
20	557 ±181	7652 ± 3051	13,7 ± 3,3	31,7 ± 5,0	14,6 ± 4,7
30	432 ± 43	5171 ± 526	12,0 ± 1,2	46,2 ± 2,5	18,8 ± 19
40	397 ± 38	4379 ± 337	11,0 ± 1,4	60,6 ± 3,4	20,5 ± 2,0
50	380 ± 23	4386 ± 205	11,6 ± 0,6	68,2 ± 1,3	21,4 ± 1,3
60	372 ± 52	4076 ± 464	10,9 ± 1,8	68,8 ± 4,8	21,9 ± 3,1
70	410 ± 67	4572 ± 617	11,2 ± 0,8	77,1 ± 1,6	19,8 ± 3,2
80	423 ± 98	4620 ± 785	10,9 ± 1,4	79,5 ± 2,5	19,2 ± 4,5
90	453 ± 125	4798 ± 808	10,6 ± 1,5	80,5 ± 1,5	18,0 ± 5,0

APENDICE E

Constantes Físicas.

Table A-1. Physical

No.	Compound	Formula	Molecular weight	Boiling point at 14.696 psia, °F	Vapor pressure at 100°F, psia	Freezing point at 14.696 psia, °F	Critical constants: Pressure, psia	Critical constants: Temperature, °F	Critical constants: Volume, cu ft/lb	Liquid density at 60°F, 14.696 psia: Specific gravity, 60°F/60°F	Liquid density at 60°F, 14.696 psia: Lb/gal	Liquid density at 60°F, 14.696 psia: Gal/lb mole	Liquid density at 60°F, 14.696 psia: Temperature coefficient of density
1	Methane	CH_4	16.042	−258.68	.....	−296.46	673.1	−116.5	0.0993	0.25	.....	7.7	.....
2	Ethane	C_2H_6	30.068	−127.53	.....	−297.89	708.3	+90.09	0.0787	0.40	.....	9.0	.....
3	Propane	C_3H_8	44.094	−43.73	190	−305.84	617.4	206.26	0.0730	0.5077	4.224	10.44	0.00171
4	*n*-Butane	C_4H_{10}	58.120	+31.10	51.6	−217.030	550.7	305.62	0.0704	0.5844	4.863	11.95	0.00111
5	2-Methylpropane (isobutane)	C_4H_{10}	58.120	+10.89	72.2	−255.280	529.1	274.96	0.0725	0.5631	4.685	12.40	0.00123
6	*n*-Pentane	C_5H_{12}	72.146	96.933	15.570	−201.498	489.5	385.92	0.0690	0.63116	5.2528	13.74	0.00086
7	2-Methylbutane (isopentane)	C_5H_{12}	72.146	82.134	20.44	−255.800	483	370.0	0.0685	0.62476	5.1995	13.88	0.00091
8	2,2-Dimethylpropane (neopentane)	C_5H_{12}	72.146	49.105	.....	+2.210	464.0	321.08	0.0671	0.601	5.00	14.43	0.00093
9	*n*-Hexane	C_6H_{14}	86.172	155.736	4.956	−139.612	439.7	454.5	0.0685	0.66405	5.5271	15.59	0.00077
10	2-Methylpentane	C_6H_{14}	86.172	140.488	6.767	−244.622	440.1	436.8	0.0680	0.65790	5.4758	15.74	0.00079
11	3-Methylpentane	C_6H_{14}	86.172	145.908	6.098	−180.4	453.1	448.2	0.0680	0.66902	5.5686	15.48	0.00076
12	2,2-Dimethylbutane (neohexane)	C_6H_{14}	86.172	121.534	9.856	−147.825	450.5	421.2	0.0667	0.65399	5.4433	15.83	0.00081
13	2,3-Dimethylbutane	C_6H_{14}	86.172	136.378	7.404	−199.368	455.4	440.8	0.0667	0.66639	5.5466	15.54	0.00097
14	*n*-Heptane	C_7H_{16}	100.198	209.169	1.6199	−131.082	396.9	512.62	0.0682	0.68819	5.7281	17.49	0.00069
15	2-Methylhexane	C_7H_{16}	100.198	194.094	2.2712	−180.897	400	496.2	0.0686	0.68299	5.6850	17.63	0.00069
16	3-Methylhexane	C_7H_{16}	100.198	197.330	2.1300	−182.9	413	504.3	0.0667	0.69151	5.7561	17.41	0.00068
17	3-Ethylpentane	C_7H_{16}	100.198	200.251	2.0123	−181.487	420	513.7	0.0667	0.70257	5.8483	17.13	0.00067
18	2,2-Dimethylpentane	C_7H_{16}	100.198	174.560	3.492	−190.858	417	477.9	0.0645	0.67833	5.6462	17.75	0.00071
19	2,4-Dimethylpentane	C_7H_{16}	100.198	176.900	3.292	−182.636	403	476.8	0.0671	0.67723	5.6370	17.78	0.00072
20	3,3-Dimethylpentane	C_7H_{16}	100.198	186.917	2.7727	−210.03	440	505	(0.067)	0.69767	5.8075	17.25	0.00067
21	2,2,3-Trimethylbutane (triptane)	C_7H_{16}	100.198	177.584	3.374	−12.842	437.2	496.9	0.0629	0.69454	5.7813	17.33	0.00068
22	*n*-Octane	C_8H_{18}	114.224	258.197	0.537	−70.236	362.1	565.2	0.0682	0.70677	5.8833	19.41	0.00063
23	2,5-Dimethylhexane (diisobutyl)	C_8H_{18}	114.224	228.385	1.1012	−132.160	367	534	0.0671	0.69795	5.8098	19.66	0.00068
24	2,2,4-Trimethylpentane ("*isooctane*")	C_8H_{18}	114.224	210.628	1.7084	−161.257	374.7	520.7	0.0676	0.69625	5.7957	19.71	0.00067
25	*n*-Nonane	C_9H_{20}	128.250	303.436	0.179	−64.36	(345)	(613)	0.0673	0.72171	6.0079	21.35	0.00059
26	*n*-Decane	$C_{10}H_{22}$	142.276	345.2	0.073	−21.5	(320)	(655)	0.0671	0.73413	6.1140	23.27	0.00055
27	Cyclopentane	C_5H_{10}	70.130	120.672	9.915	−136.982	654.7	461.48	0.0593	0.75048	6.2478	11.23	0.000736
28	Methylcyclopentane	C_6H_{12}	84.156	161.262	4.503	−224.419	549.1	499.30	0.0607	0.75354	6.2733	13.42	0.000693
29	Cyclohexane	C_6H_{12}	84.156	177.328	3.265	43.797	561.4	538	0.0592	0.78341	6.5226	12.90	0.000662
30	Methylcyclohexane	C_7H_{14}	98.182	213.681	1.609	−195.860	504.4	570.43	0.0562	0.77398	6.4437	15.24	0.000623
31	Ethene (ethylene)	C_2H_4	28.052	−154.68	.....	−272.47	742.1	49.82	0.0705	.....	.....	9.64	.....
32	Propene	C_3H_6	42.078	−53.86	226.4	−301.45	667	197.4	0.0689	0.5218	4.340	9.70	0.00177
33	1-Butene	C_4H_8	56.104	+20.73	63.05	−301.63	583	295.6	0.0690	0.6011	5.001	11.22	0.00113
34	*cis*-2-Butene	C_4H_8	56.104	38.70	45.54	−218.04	600	311	(0.0671)	0.6272	5.211	10.77	0.00105
35	*trans*-2-Butene	C_4H_8	56.104	33.58	49.80	−157.99	600	311	(0.0671)	0.6100	5.075	11.06	0.00105
36	2-Methylpropene (isobutene)	C_4H_8	56.104	19.58	63.40	−220.63	579.8	292.5	(0.0685)	0.6002	4.994	11.23	0.00113
37	1-Pentene	C_5H_{10}	70.130	85.95	19.14	−265.40	586	394	(0.0672)	0.6461	5.377	13.04	0.00087
38	1,2-Butadiene	C_4H_6	54.088	50.5	(20)	−213.3	653	339	(0.0649)	0.658	5.476	9.88	0.00114
39	1,3-Butadiene	C_4H_6	54.088	24.06	(60)	−164.05	628	306	(0.0654)	0.6272	5.220	10.36	0.00110
40	2-Methyl-1,3-butadiene (isoprene)	C_5H_8	68.114	93.34	(17)	−230.8	(558.4)	(412)	(0.0650)	0.6861	5.712	11.93	0.00085
41	Ethyne (acetylene)	C_2H_2	26.036	−119	.....	−114	905	97.4	(0.0661)	0.615	5.118	5.09	.....
42	Benzene	C_6H_6	78.108	176.185	3.224	+41.959	714	553.01	0.054	0.88158	7.3659	10.60	0.000686
43	Toluene	C_7H_8	92.134	231.121	1.032	−138.984	611	609.51	0.057	0.87190	7.2602	12.69	0.000592
44	Ethylbenzene	C_8H_{10}	106.160	277.137	0.3706	−138.955	560	654.8	0.056	0.87175	7.2589	14.63	0.000539
45	1,2-Dimethylbenzene (*o*-xylene)	C_8H_{10}	106.160	291.95	0.2636	−13.32	542	678.3	0.058	0.88182	7.3679	14.41	0.000533
46	1,3-Dimethylbenzene (*m*-xylene)	C_8H_{10}	106.160	282.38	0.3259	−54.17	526	651.9	0.058	0.86880	7.2344	14.67	0.000546
47	1,4-Dimethylbenzene (*p*-xylene)	C_8H_{10}	106.160	281.03	0.3421	+55.87	514	653.1	0.056	0.86576	7.2090	14.73	0.000561
48	Styrene (phenyl ethylene)	C_8H_8	104.144	293.4	(0.24)	−23.130	580	706.0	0.0541	0.91112	7.5872	13.73	0.000584
49	Isopropylbenzene (cumene)	C_9H_{12}	120.186	306.31	0.1880	−140.85	473	685	0.059	0.86642	7.2144	16.66	0.000550
50	Methyl alcohol	CH_4O	32.042	148.1	4.6	−144.0	1,157	464	0.0589	0.796	6.637	4.83	.....
51	Ethyl alcohol	C_2H_6O	46.069	173.3	2.3	−179.1	927	469.6	0.0581	0.794	6.619	6.96	.....
52	Carbon monoxide	CO	28.010	−313.6	.....	−340.6	510	−218	0.0515	0.8017	.....	.....	.....
53	Carbon dioxide	CO_2	44.010	−109.3	.....	.....	1,073	88.0	0.0348	0.8159	6.802	6.47	.....
54	Hydrogen sulfide	H_2S	34.076	−76.5	554.6	−121.9	1,306	212.7	.....	0.79	6.58	5.18	.....
55	Sulfur dioxide	SO_2	64.060	14.0	84.5	−98.9	1,142	315.0	0.0308	1.394	11.62	5.51	.....
56	Ammonia	NH_3	17.032	−28.1	211.9	−107.9	1,657	271.4	0.0682	0.6173	5.147	3.31	.....
57	Air	N_2O_2	28.966	−317.7	.....	.....	547	−221.3	0.0517	0.8567	.....	.....	.....
58	Hydrogen	H_2	2.016	−422.9	.....	−434.4	188	−399.8	0.5168	0.077	.....	.....	.....
59	Oxygen	O_2	32.000	−297.4	.....	−361.1	730	−181.8	0.0373	1.147	.....	.....	.....
60	Nitrogen	N_2	28.016	−320.4	.....	−345.6	492	−232.8	0.0515	0.8087	.....	.....	.....
61	Chlorine	Cl_2	70.914	30.3	154	−150.9	1,120	291	0.0280	1.423	11.86	5.98	.....
62	Water	H_2O	18.016	212.0	0.9492	32.0	3,206	705.4	0.0400	1.000	8.337	2.16	.....
63	Hydrogen chloride	HCl	36.465	−121	900	−173.6	1,199.2	124.5	0.0381	0.8558	7.1266	5.117	0.003346

[a] Reproduced from National Gasoline Supply Men's Association "Engineering Data Book" (5-1). Values in parentheses are estimated. [b] Minus octane numbers derived from blends with reference fuel. [c] Actual gas volumes corrected for deviation. [d] Equivalent octane number (gas). [e] The plus sign

Constants of Hydrocarbons[a]

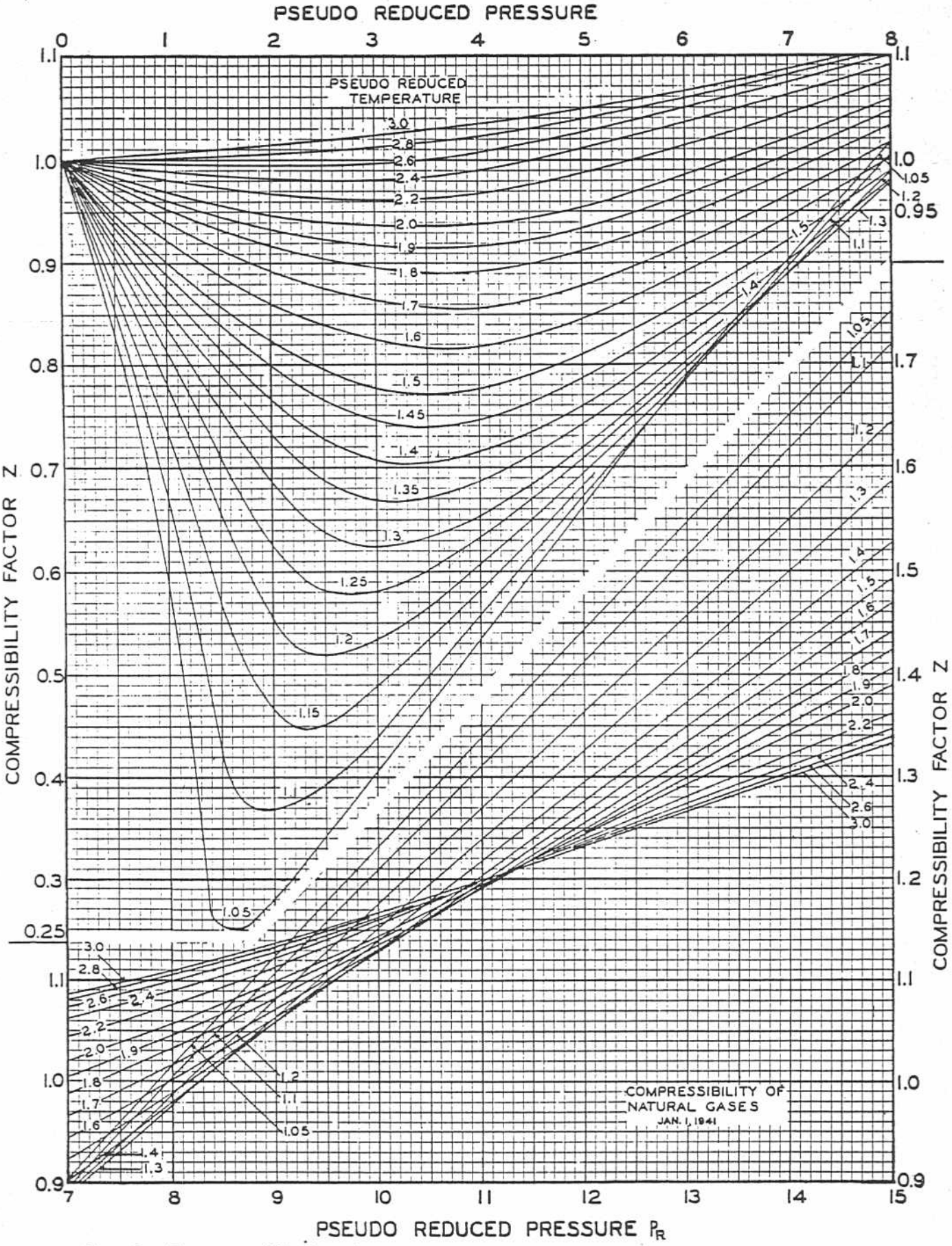
Gas density at 60°F, 14.696 psia			Specific heat at 60°F, 14.696 psia		Calorific value at 60°F							Flammability limits, vol % in air mixture		ASTM octane number[b]		
Ideal gas			Ideal gas		Net	Gross										
Specific gravity (air = 1)	Cu ft gas/lb	Cu ft gas/gal liquid	C_p	C_v	Btu/cu ft vapor at 14.696 psia	Btu/cu ft vapor at 14.696 psia	Btu/lb liquid	Btu/gal liquid	Heat of vaporization at 14.696 psia at boiling point, Btu/lb	Refractive index n_D at 68°F	Air required for combustion, cu ft/cu ft	Lower	Higher	Motor method D-357	Research method D-908	No.
0.555[c]	23.61[c]	.....	0.5271	0.402	911	1012[e]	.....	.....	219.7	.....	9.53	5.0	15.0	.....	+6[d]	1
1.046[c]	12.52[c]	.....	0.4097	0.343	1631	1783[c]	.....	.....	210.7	.....	16.67	3.22	12.45	.....	+6[d]	2
1.547[c]	8.471[c]	35.78[c]	0.3885	0.342	2353	2557[c]	21,554	91,044	183.5	.....	23.82	2.37	9.50	.....	+5.3[d]	3
2.071[c]	6.327[c]	30.77[c]	0.3970	0.363	3101	3369[c]	21,190	108,047	165.9	.....	30.97	1.86	8.41	.....	88[d]	4
2.067[c]	6.339[c]	29.70[c]	0.3872	0.352	3094	3354[c]	21,152	99,097	157.8	.....	30.97	1.80	8.44	.....	+0.2[d]	5
2.4906	5.2601	27.680	0.3972	0.370	3709	4009	20,965	110,125	153.8	1.35748	38.11	1.40	7.80	61.9	61.7	6
2.4906	5.2601	27.398	0.3880	0.361	3698	4001	20,929	108,820	145.9	1.35373	38.11	1.32	.....	90.3	92.3	7
2.4906	5.2601	26.3	0.3914	0.364	3685	3987	20,878	104,390	135.8	1.342	38.11	.....	.....	80.2	85.5	8
2.9749	4.4039	24.381	0.3984	(0.375)	4404	4756	20,819	115,069	144.2	1.37486	45.26	1.25	6.90	26.0	24.8	9
2.9749	4.4039	24.156	0.389	(0.366)	4396	4748	20,791	113,847	138.0	1.37145	45.26	.....	.....	73.5	73.4	10
2.9749	4.4039	24.564	0.397	(0.374)	4399	4751	20,804	115,849	140.3	1.37652	45.26	.....	.....	74.3	74.5	11
2.9749	4.4039	24.011	0.386	(0.363)	4383	4735	20,747	112,932	131.4	1.36876	45.26	.....	.....	93.4	91.8	12
2.9749	4.4039	24.467	0.391	(0.368)	4392	4744	20,779	115,253	136.3	1.37495	45.26	.....	.....	94.3	+0.3[e]	13
3.4591	3.7875	21.731	0.3992	(0.379)	5101	5503	20,714	118,658	136.2	1.38765	52.41	1.0	6.0	0.0	0.0	14
3.4591	3.7875	21.567	(0.390)	(0.370)	5093	5495	20,692	117,628	131.8	1.38485	52.41	.....	.....	46.4	42.4	15
3.4591	3.7875	21.836	(0.378)	(0.358)	5096	5498	20,701	119,157	132.3	1.38864	52.41	.....	.....	55.0	52.0	16
3.4591	3.7875	22.185	(0.367)	(0.347)	5099	5501	20,712	121,128	133.0	1.39340	52.41	.....	.....	69.3	65.0	17
3.4591	3.7875	21.419	(0.359)	(0.339)	5380	5482	20,653	116,103	125.3	1.38215	52.41	.....	.....	95.6	92.8	18
3.4591	3.7875	21.385	(0.370)	(0.353)	5085	5487	20,669	116,511	126.8	1.38145	52.41	.....	.....	83.8	83.1	19
3.4591	3.7875	22.030	(0.347)	(0.327)	5085	5488	20,671	120,667	127.4	1.39092	52.41	.....	.....	86.6	80.8	20
3.4591	3.7875	21.932	(0.356)	(0.366)	5081	5484	20,660	119,442	124.4	1.38943	52.41	.....	.....	+0.1[e]	+1.8[e]	21
3.9432	3.3224	19.577	0.3998	(0.382)	5797	6250	20,638	121,420	131.9	1.39743	59.55	0.84	3.2	.....	.....	22
3.9432	3.3224	19.333	(0.373)	(0.355)	5781	6234	20,597	119,664	123.7	1.39246	59.55	.....	.....	55.7	55.5	23
3.9432	3.3224	19.286	(0.380)	(0.363)	5779	6232	20,602	119,403	116.8	1.39145	59.55	.....	.....	100	+100	24
4.4275	2.9590	17.805	0.400	(0.385)	6493	6996	20,577	123,625	126.9	1.40542	66.70	0.74	2.9	−20	.....	25
4.9118	2.6673	16.325	0.401	(0.387)	7190	7743	20,683	126,456	120.2	1.41189	73.85	0.67	2.6	.....	−53.0	26
2.4211	5.4113	33.86	0.2712	0.2429	3512	3763	20,216	126,310	167.34	1.40645	35.731	.....	.....	85.0	.....	27
2.9053	4.5094	28.33	0.3010	0.2774	4199	4500	20,158	126,460	147.83	1.40970	42.878	1.33	8.35	80.0	91.3	28
2.9053	4.5094	29.45	0.2900	0.2664	4180	4482	20,066	130,880	153.7	1.42623	42.878	1.33	8.35	77.2	83.0	29
3.3896	3.8652	24.94	0.3170	0.2968	4864	5216	20,031	129,070	138.9	1.42312	50.024	.....	.....	71.1	74.8	30
0.9684	13.530	.....	0.3622	0.2914	1499	1600	.....	.....	207.56	.....	14.29	3.05	28.6	75.6	+0.03[e]	31
1.4526	9.020	39.23	0.3541	0.3069	2182	2333	20,943	90,891	188.19	.....	21.44	2.00	11.1	84.9	+0.24[e]	32
1.9368	6.764	33.90	0.3703	0.3349	2880	3082	20,727	103,658	167.93	.....	28.58	.....	.....	81.7	97.4	33
1.9368	6.764	35.37	0.3269	0.2915	2872	3074	20,655	107,633	178.91	.....	28.58	.....	.....	.....	.....	34
1.9368	6.764	34.39	0.3654	0.3300	2867	3069	20,633	104,711	174.37	.....	28.58	.....	.....	.....	.....	35
1.9368	6.764	33.85	0.3701	0.3347	2863	3065	20,618	102,964	169.48	.....	28.58	.....	.....	88.1	+0.26[e]	36
2.4210	5.412	29.15	0.3817	0.3334	3574	3826	20,590	110,712	(149)	1.3714	35.73	.....	.....	77.1	90.9	37
1.8673	7.016	38.52	(0.3458)	(0.3091)	2792	2943	20,496	112,236	(181)	.....	26.20	.....	.....	.....	.....	38
1.8673	7.016	36.69	(0.3412)	(0.3045)	2732	2883	20,095	104,898	(174)	.....	26.20	.....	.....	.....	.....	39
2.3515	5.572	31.87	(0.357)	(0.328)	3510	3611	19,998	114,227	(153)	1.4216	33.35	.....	.....	.....	.....	40
0.8988	14.577	74.34	0.3966	0.3203	1422	1472	.....	.....	.....	.....	11.91	.....	.....	.....	.....	41
2.0965	4.8586	35.83	0.2404	0.2150	3591	3742	18,013	132,680	169.34	1.50112	35.731	1.41	6.75	+2.75[e]	.....	42
3.1868	4.1189	29.90	0.2599	0.2383	4273	4475	18,274	132,670	156.2	1.49693	42.878	1.27	6.75	+0.27[e]	+5.82[e]	43
3.6650	3.5747	25.98	0.2795	0.2608	4970	5222	18,517	134,410	145.7	1.49592	50.024	.....	.....	97.9	+0.8[e]	44
3.6650	3.5747	26.37	0.2914	0.2727	4958	5210	18,468	136,070	149.1	1.50543	50.024	1.00	6.00	100	(>+6)[e]	45
3.6650	3.5747	25.89	0.2782	0.2595	4956	5208	18,464	133,580	147.4	1.49721	50.024	.....	.....	<100	(>+6)[e]	46
3.6650	3.5747	25.80	0.2769	0.2582	4957	5209	18,468	133,140	146.1	1.49581	50.024	.....	.....	<100	(>+6)[e]	47
3.5954	3.6439	27.68	0.2711	0.2520	4830	5030	18,171	137,870	(151)	1.54682	47.641	1.10	6.10	+0.2[e]	>+3[e]	48
4.1392	3.1576	22.81	0.2917	0.2752	5661	5963	18,690	134,840	134.3	1.49146	57.170	.....	.....	99.3	+2.08[e]	49
1.1062	14.479	96.097	0.27	0.446	765	865	9,750	64,643	473	1.3288	7.15	6.72	36.50	.....	.....	50
1.5905	20.818	137.794	0.307	0.368	1446	1596	12,755	84,311	368	1.3614	14.30	3.28	18.95	.....	.....	51
0.9670	13.550	.....	0.2484	0.177	....	321	.....	.....	91	.....	2.39	12.50	74.20	.....	.....	52
1.5194	8.569	(58.3)	0.1991	0.153	....	.....	.....	.....	248[e]	.....	.....	.....	.....	.....	.....	53
1.1764	11.050	(72.7)	0.254	0.192	621	672	.....	.....	236	.....	(7.2)	4.30	45.50	.....	.....	54
2.2116	5.824	(67.7)	0.147	0.118	....	.....	.....	.....	171	.....	.....	.....	.....	.....	.....	55
0.3880	22.124	113.4	0.5232	0.399	....	.....	.....	.....	589.3	.....	.....	15.50	27.00	.....	.....	56
1.0000	13.089	.....	0.241	0.171	....	.....	.....	.....	92	.....	.....	.....	.....	.....	.....	57
0.0696	188.679	.....	3.408	2.42	273	324	.....	.....	192	.....	2.39	4.00	74.20	.....	.....	58
1.1047	11.848	.....	0.2188	0.156	....	.....	.....	.....	92	.....	.....	.....	.....	.....	.....	59
0.0672	13.532	.....	0.2482	0.177	....	.....	.....	.....	86	.....	.....	.....	.....	.....	.....	60
2.4482	(5.283)	(62.6)	0.1149	0.0841	....	.....	.....	.....	121	.....	.....	.....	.....	.....	.....	61
0.6220	.....	175.44	0.4446	0.332	....	.....	.....	.....	970.3	1.3330	.....	.....	.....	.....	.....	62
1.268	10.407	74.17	0.1939	0.1375	....	.....	.....	.....	190.4	.....	.....	.....	.....	.....	.....	63

and number following signify the octane number corresponding to that of 2,2,4-trimethylpentane with the indicated number of milliliters of TEL added.
/ Density of liquid in grams per milliliter at normal boiling point. [e] Heat of sublimation.

APENDICE F

Factor de Compresibilidad "z".

Taken from Section 1, "Natural Gasoline and the Volatile Hydrocarbons", by Brown, Katz, Oberfell and Alden.



Figurt 1 — The compressibility factor for natural gases as a function of pseudo-reduced pressure and temperature.

$$\text{Pseudo-reduced temperature} = \frac{\text{absolute temperature}}{\text{molecular average critical temperature}} \qquad \text{Pseudo-reduced pressure} = \frac{\text{absolute pressure}}{\text{molecular average critical pressure}}$$

Table A-2. Compressibility Factors for Natural Gases

Values of z

Pseudo-reduced pressure P_r	Pseudoreduced temperature T_r																			
	1.05	1.10	1.15	1.20	1.25	1.30	1.35	1.40	1.45	1.50	1.60	1.70	1.80	1.90	2.00	2.20	2.40	2.60	2.80	3.00
0.20	0.938	0.948	0.953	0.959	0.964	0.969	0.971	0.973	0.978	0.979	0.981	0.987	0.990	0.991	0.993	0.995	0.998	0.999	1.000	1.001
0.25	0.922	0.934	0.941	0.949	0.955	0.960	0.964	0.968	0.972	0.974	0.980	0.984	0.988	0.990	0.992	0.995	0.998	0.999	1.000	1.001
0.30	0.905	0.920	0.928	0.938	0.946	0.951	0.956	0.962	0.965	0.969	0.976	0.984	0.985	0.988	0.990	0.994	0.997	0.999	1.000	1.001
0.35	0.887	0.905	0.914	0.927	0.937	0.943	0.949	0.956	0.959	0.964	0.972	0.978	0.983	0.986	0.989	0.994	0.997	0.999	1.000	1.001
0.40	0.868	0.889	0.900	0.916	0.928	0.934	0.942	0.949	0.953	0.959	0.968	0.975	0.980	0.983	0.987	0.992	0.996	0.998	1.000	1.002
0.45	0.849	0.872	0.887	0.905	0.919	0.926	0.934	0.943	0.948	0.954	0.964	0.972	0.978	0.981	0.985	0.991	0.995	0.998	1.000	1.002
0.50	0.829	0.855	0.874	0.894	0.909	0.918	0.926	0.937	0.942	0.949	0.960	0.969	0.976	0.979	0.983	0.990	0.994	0.998	1.000	1.002
0.55	0.810	0.839	0.862	0.883	0.900	0.909	0.919	0.930	0.937	0.944	0.956	0.966	0.974	0.978	0.982	0.989	0.994	0.998	1.000	1.002
0.60	0.790	0.822	0.849	0.872	0.890	0.900	0.912	0.924	0.931	0.939	0.952	0.963	0.971	0.976	0.981	0.988	0.993	0.997	1.000	1.003
0.65	0.769	0.804	0.835	0.861	0.881	0.893	0.905	0.917	0.926	0.935	0.949	0.961	0.969	0.974	0.980	0.987	0.993	0.997	1.000	1.003
0.70	0.747	0.785	0.820	0.850	0.871	0.885	0.898	0.911	0.921	0.930	0.945	0.958	0.967	0.972	0.978	0.986	0.992	0.997	1.001	1.004
0.75	0.722	0.767	0.806	0.839	0.861	0.878	0.890	0.905	0.916	0.925	0.942	0.955	0.965	0.971	0.977	0.985	0.992	0.997	1.001	1.004
0.80	0.698	0.748	0.791	0.827	0.851	0.870	0.883	0.899	0.910	0.920	0.938	0.952	0.962	0.969	0.975	0.984	0.991	0.997	1.001	1.005
0.85	0.672	0.729	0.776	0.815	0.842	0.861	0.876	0.893	0.905	0.916	0.935	0.950	0.960	0.967	0.974	0.983	0.991	0.997	1.001	1.005
0.90	0.645	0.710	0.761	0.802	0.832	0.852	0.870	0.887	0.899	0.911	0.931	0.947	0.958	0.965	0.972	0.983	0.990	0.996	1.001	1.006
0.95	0.618	0.690	0.748	0.791	0.823	0.845	0.863	0.881	0.895	0.906	0.927	0.944	0.956	0.963	0.971	0.982	0.990	0.996	1.001	1.006
1.00	0.590	0.670	0.734	0.780	0.813	0.838	0.856	0.875	0.890	0.901	0.923	0.941	0.953	0.961	0.970	0.981	0.989	0.996	1.001	1.007
1.05	0.555	0.647	0.719	0.768	0.803	0.829	0.849	0.869	0.885	0.897	0.920	0.939	0.951	0.960	0.969	0.980	0.989	0.996	1.001	1.007
1.10	0.520	0.624	0.703	0.755	0.793	0.820	0.842	0.862	0.879	0.893	0.917	0.936	0.949	0.958	0.967	0.979	0.988	0.996	1.002	1.008
1.15	0.482	0.602	0.688	0.743	0.783	0.812	0.836	0.856	0.874	0.889	0.913	0.933	0.947	0.957	0.966	0.979	0.988	0.996	1.002	1.008
1.20	0.444	0.580	0.672	0.731	0.773	0.804	0.829	0.850	0.869	0.884	0.909	0.930	0.945	0.955	0.964	0.978	0.987	0.996	1.002	1.008
1.25	0.398	0.555	0.656	0.719	0.763	0.797	0.823	0.845	0.864	0.880	0.905	0.928	0.943	0.954	0.963	0.978	0.987	0.996	1.002	1.008
1.30	0.351	0.530	0.640	0.707	0.753	0.789	0.817	0.839	0.859	0.876	0.901	0.925	0.941	0.952	0.962	0.977	0.987	0.996	1.002	1.009
1.35	0.307	0.505	0.623	0.695	0.743	0.781	0.810	0.834	0.855	0.872	0.898	0.923	0.940	0.951	0.961	0.976	0.986	0.996	1.002	1.009
1.40	0.263	0.480	0.605	0.682	0.732	0.772	0.803	0.828	0.850	0.868	0.895	0.920	0.938	0.949	0.960	0.975	0.986	0.996	1.002	1.010
1.45	0.259	0.453	0.588	0.670	0.721	0.765	0.797	0.821	0.846	0.861	0.892	0.918	0.936	0.947	0.959	0.975	0.986	0.996	1.002	1.010
1.50	0.254	0.425	0.570	0.657	0.710	0.757	0.791	0.817	0.841	0.859	0.889	0.915	0.934	0.946	0.957	0.974	0.985	0.995	1.003	1.010
1.55	0.253	0.409	0.556	0.646	0.701	0.750	0.785	0.811	0.837	0.855	0.886	0.913	0.932	0.945	0.956	0.973	0.985	0.995	1.003	1.010
1.60	0.251	0.393	0.541	0.634	0.691	0.742	0.779	0.805	0.832	0.851	0.882	0.910	0.930	0.943	0.954	0.972	0.984	0.995	1.003	1.011
1.65	0.251	0.386	0.529	0.623	0.682	0.735	0.773	0.800	0.828	0.847	0.880	0.908	0.929	0.942	0.953	0.972	0.984	0.995	1.003	1.011
1.70	0.252	0.378	0.517	0.612	0.672	0.728	0.767	0.795	0.823	0.843	0.877	0.905	0.927	0.941	0.952	0.971	0.983	0.995	1.004	1.012
1.75	0.256	0.374	0.507	0.602	0.664	0.720	0.761	0.790	0.819	0.840	0.874	0.903	0.925	0.940	0.951	0.971	0.983	0.995	1.004	1.012
1.80	0.260	0.370	0.497	0.592	0.656	0.712	0.755	0.784	0.815	0.837	0.871	0.900	0.923	0.938	0.950	0.970	0.983	0.995	1.004	1.012
1.85	0.265	0.370	0.489	0.582	0.648	0.706	0.750	0.779	0.811	0.834	0.869	0.899	0.922	0.937	0.949	0.970	0.983	0.995	1.004	1.012
1.90	0.270	0.369	0.480	0.572	0.640	0.699	0.744	0.774	0.806	0.830	0.866	0.897	0.921	0.936	0.948	0.969	0.982	0.995	1.005	1.013
1.95	0.275	0.369	0.474	0.564	0.634	0.693	0.738	0.771	0.803	0.827	0.864	0.895	0.920	0.935	0.948	0.969	0.982	0.995	1.005	1.013
2.00	0.280	0.370	0.467	0.555	0.627	0.687	0.732	0.767	0.799	0.824	0.861	0.893	0.918	0.933	0.947	0.968	0.982	0.995	1.006	1.014
2.05	0.286	0.371	0.462	0.547	0.620	0.681	0.727	0.762	0.795	0.821	0.859	0.891	0.917	0.932	0.946	0.968	0.982	0.995	1.006	1.014
2.10	0.292	0.372	0.457	0.539	0.612	0.674	0.721	0.757	0.791	0.818	0.856	0.889	0.915	0.931	0.945	0.967	0.981	0.995	1.007	1.015
2.15	0.298	0.374	0.454	0.534	0.607	0.669	0.716	0.753	0.788	0.815	0.854	0.887	0.914	0.930	0.945	0.967	0.981	0.995	1.007	1.015
2.20	0.305	0.376	0.450	0.528	0.602	0.663	0.711	0.748	0.784	0.811	0.851	0.885	0.912	0.929	0.944	0.966	0.981	0.995	1.007	1.016
2.25	0.311	0.378	0.449	0.525	0.598	0.658	0.707	0.745	0.781	0.808	0.850	0.884	0.911	0.928	0.943	0.966	0.981	0.995	1.007	1.016
2.30	0.318	0.380	0.448	0.522	0.593	0.652	0.702	0.741	0.778	0.805	0.848	0.882	0.909	0.927	0.942	0.965	0.980	0.995	1.008	1.017
2.35	0.324	0.383	0.448	0.521	0.590	0.649	0.699	0.737	0.775	0.803	0.846	0.881	0.908	0.927	0.942	0.965	0.980	0.995	1.008	1.017
2.40	0.330	0.387	0.449	0.520	0.586	0.645	0.695	0.733	0.771	0.800	0.843	0.879	0.907	0.926	0.941	0.964	0.980	0.995	1.008	1.018
2.45	0.336	0.390	0.450	0.520	0.583	0.642	0.692	0.731	0.768	0.798	0.842	0.878	0.906	0.925	0.941	0.964	0.980	0.995	1.008	1.018
2.50	0.343	0.394	0.451	0.519	0.581	0.638	0.688	0.728	0.765	0.796	0.840	0.876	0.904	0.924	0.941	0.963	0.980	0.995	1.009	1.019
2.55	0.349	0.398	0.454	0.519	0.581	0.636	0.685	0.725	0.763	0.793	0.839	0.875	0.903	0.923	0.941	0.963	0.980	0.995	1.009	1.019
2.60	0.356	0.402	0.458	0.520	0.580	0.633	0.682	0.722	0.760	0.791	0.837	0.873	0.902	0.922	0.940	0.963	0.980	0.995	1.009	1.020
2.65	0.362	0.406	0.460	0.521	0.580	0.631	0.680	0.720	0.758	0.789	0.835	0.872	0.901	0.922	0.940	0.963	0.980	0.995	1.009	1.020
2.70	0.369	0.410	0.463	0.522	0.579	0.629	0.678	0.718	0.756	0.787	0.833	0.871	0.900	0.921	0.939	0.962	0.980	0.996	1.010	1.021
2.75	0.375	0.414	0.467	0.524	0.579	0.628	0.676	0.716	0.754	0.785	0.832	0.870	0.900	0.921	0.939	0.962	0.980	0.996	1.010	1.021
2.80	0.381	0.419	0.472	0.526	0.579	0.627	0.673	0.713	0.752	0.783	0.830	0.869	0.899	0.920	0.938	0.962	0.980	0.996	1.010	1.022
2.85	0.387	0.424	0.476	0.528	0.579	0.626	0.672	0.712	0.750	0.781	0.829	0.868	0.898	0.920	0.938	0.962	0.980	0.996	1.010	1.022
2.90	0.394	0.429	0.481	0.530	0.580	0.625	0.670	0.710	0.748	0.779	0.828	0.867	0.897	0.919	0.938	0.962	0.980	0.997	1.011	1.023
2.95	0.401	0.434	0.485	0.532	0.580	0.625	0.670	0.709	0.747	0.778	0.827	0.866	0.897	0.919	0.938	0.962	0.980	0.997	1.011	1.023
3.00	0.407	0.440	0.489	0.534	0.581	0.624	0.669	0.707	0.745	0.777	0.825	0.864	0.896	0.918	0.938	0.962	0.981	0.997	1.012	1.024
3.05	0.413	0.446	0.494	0.537	0.582	0.624	0.669	0.706	0.744	0.776	0.823	0.863	0.896	0.918	0.938	0.962	0.981	0.997	1.012	1.024
3.10	0.420	0.452	0.499	0.540	0.584	0.625	0.668	0.705	0.742	0.775	0.822	0.862	0.895	0.917	0.937	0.962	0.981	0.998	1.013	1.025
3.15	0.426	0.457	0.503	0.543	0.586	0.625	0.668	0.704	0.742	0.774	0.822	0.862	0.895	0.917	0.937	0.962	0.981	0.998	1.013	1.025
3.20	0.432	0.463	0.507	0.546	0.588	0.626	0.668	0.703	0.741	0.773	0.821	0.861	0.894	0.917	0.937	0.962	0.982	0.998	1.014	1.026
3.25	0.438	0.469	0.511	0.548	0.590	0.627	0.668	0.701	0.741	0.773	0.820	0.860	0.894	0.917	0.937	0.962	0.982	0.998	1.014	1.026
3.30	0.445	0.475	0.516	0.551	0.592	0.628	0.669	0.702	0.740	0.772	0.819	0.859	0.893	0.916	0.937	0.962	0.982	0.999	1.015	1.027
3.35	0.451	0.481	0.520	0.555	0.594	0.629	0.669	0.702	0.740	0.772	0.819	0.859	0.893	0.916	0.937	0.962	0.982	0.999	1.015	1.027
3.40	0.458	0.488	0.525	0.559	0.597	0.631	0.670	0.703	0.739	0.771	0.818	0.858	0.892	0.916	0.937	0.963	0.983	1.000	1.016	1.028
3.45	0.464	0.494	0.530	0.562	0.599	0.632	0.670	0.703	0.739	0.771	0.818	0.858	0.892	0.916	0.937	0.963	0.983	1.000	1.016	1.029
3.50	0.471	0.500	0.535	0.566	0.602	0.633	0.670	0.704	0.739	0.771	0.817	0.858	0.891	0.915	0.937	0.963	0.984	1.000	1.017	1.030
3.55	0.477	0.505	0.539	0.569	0.605	0.635	0.672	0.705	0.739	0.771	0.817	0.858	0.891	0.915	0.937	0.963	0.984	1.000	1.017	1.030
3.60	0.483	0.511	0.544	0.572	0.608	0.637	0.673	0.706	0.740	0.771	0.816	0.857	0.890	0.915	0.937	0.964	0.985	1.001	1.018	1.031
3.65	0.490	0.517	0.548	0.577	0.611	0.639	0.675	0.707	0.740	0.771	0.816	0.857	0.890	0.915	0.937	0.964	0.985	1.001	1.019	1.031
3.70	0.497	0.523	0.553	0.582	0.614	0.641	0.677	0.708	0.741	0.772	0.816	0.856	0.890	0.916	0.937	0.965	0.986	1.002	1.019	1.032
3.75	0.503	0.529	0.558	0.586	0.617	0.642	0.678	0.709	0.741	0.772	0.816	0.856	0.890	0.916	0.937	0.965	0.986	1.002	1.019	1.032
3.80	0.509	0.535	0.563	0.590	0.620	0.644	0.680	0.710	0.742	0.773	0.816	0.855	0.891	0.916	0.937	0.966	0.987	1.003	1.020	1.033
3.85	0.515	0.541	0.568	0.594	0.623	0.646	0.681	0.711	0.742	0.773	0.816	0.855	0.891	0.916	0.937	0.966	0.988	1.004	1.021	1.033
3.90	0.522	0.547	0.573	0.599	0.627	0.649	0.683	0.713	0.743	0.774	0.817	0.855	0.891	0.917	0.938	0.967	0.989	1.005	1.022	1.034

Table A-2. Compressibility Factors for Natural Gases (Continued)

Pseudo-reduced pressure P_r	Pseudoreduced temperature T_r																			
	1.05	1.10	1.15	1.20	1.25	1.30	1.35	1.40	1.45	1.50	1.60	1.70	1.80	1.90	2.00	2.20	2.40	2.60	2.80	3.00
3.95	0.528	0.552	0.577	0.603	0.630	0.651	0.685	0.714	0.744	0.775	0.817	0.855	0.891	0.917	0.938	0.967	0.989	1.006	1.022	1.034
4.00	0.534	0.558	0.582	0.608	0.633	0.653	0.687	0.716	0.746	0.776	0.818	0.856	0.892	0.917	0.939	0.968	0.990	1.007	1.023	1.035
4.05	0.540	0.564	0.587	0.612	0.636	0.656	0.689	0.717	0.747	0.777	0.819	0.856	0.892	0.917	0.939	0.968	0.991	1.008	1.023	1.035
4.10	0.547	0.570	0.592	0.616	0.640	0.659	0.692	0.719	0.749	0.779	0.820	0.857	0.893	0.918	0.940	0.969	0.992	1.009	1.021	1.036
4.15	0.553	0.575	0.596	0.620	0.644	0.662	0.695	0.720	0.750	0.780	0.821	0.857	0.894	0.918	0.940	0.970	0.993	1.010	1.025	1.036
4.20	0.560	0.581	0.601	0.624	0.648	0.665	0.697	0.722	0.752	0.781	0.822	0.859	0.895	0.919	0.941	0.971	0.994	1.011	1.026	1.037
4.25	0.566	0.587	0.606	0.628	0.651	0.668	0.699	0.724	0.753	0.782	0.823	0.859	0.896	0.919	0.941	0.972	0.995	1.012	1.026	1.037
4.30	0.572	0.593	0.611	0.632	0.655	0.671	0.701	0.726	0.755	0.784	0.824	0.861	0.897	0.920	0.942	0.973	0.996	1.013	1.027	1.038
4.35	0.579	0.598	0.616	0.636	0.658	0.674	0.703	0.728	0.757	0.785	0.825	0.861	0.897	0.921	0.942	0.973	0.997	1.013	1.028	1.039
4.40	0.586	0.604	0.621	0.641	0.662	0.678	0.706	0.730	0.759	0.787	0.826	0.862	0.898	0.922	0.943	0.974	0.998	1.014	1.029	1.040
4.45	0.592	0.610	0.626	0.645	0.666	0.680	0.709	0.732	0.761	0.788	0.827	0.862	0.899	0.922	0.943	0.975	0.999	1.015	1.029	1.040
4.50	0.599	0.616	0.631	0.650	0.670	0.683	0.712	0.734	0.763	0.790	0.829	0.864	0.900	0.923	0.944	0.977	1.000	1.016	1.030	1.041
4.55	0.605	0.621	0.636	0.654	0.673	0.687	0.715	0.736	0.765	0.792	0.830	0.865	0.901	0.924	0.945	0.977	1.001	1.017	1.031	1.042
4.60	0.612	0.627	0.641	0.659	0.677	0.691	0.718	0.739	0.768	0.794	0.832	0.867	0.902	0.925	0.946	0.978	1.002	1.018	1.032	1.043
4.65	0.617	0.633	0.646	0.663	0.681	0.694	0.720	0.741	0.770	0.796	0.833	0.868	0.903	0.926	0.947	0.979	1.003	1.019	1.033	1.043
4.70	0.623	0.639	0.651	0.668	0.685	0.698	0.723	0.743	0.772	0.798	0.835	0.869	0.904	0.927	0.948	0.981	1.004	1.020	1.034	1.044
4.75	0.630	0.644	0.655	0.672	0.689	0.701	0.726	0.746	0.774	0.800	0.836	0.870	0.905	0.928	0.949	0.982	1.005	1.021	1.035	1.045
4.80	0.637	0.650	0.662	0.677	0.693	0.705	0.729	0.749	0.777	0.802	0.838	0.872	0.907	0.929	0.950	0.983	1.007	1.022	1.036	1.046
4.85	0.643	0.655	0.667	0.681	0.697	0.708	0.732	0.751	0.779	0.804	0.840	0.873	0.908	0.930	0.951	0.984	1.008	1.023	1.037	1.047
4.90	0.650	0.661	0.672	0.686	0.701	0.712	0.736	0.753	0.782	0.806	0.842	0.875	0.910	0.932	0.952	0.985	1.009	1.024	1.038	1.048
4.95	0.656	0.666	0.677	0.690	0.705	0.716	0.739	0.756	0.784	0.808	0.844	0.877	0.911	0.933	0.953	0.986	1.010	1.025	1.038	1.048
5.00	0.663	0.672	0.683	0.694	0.709	0.720	0.742	0.760	0.787	0.810	0.846	0.879	0.912	0.934	0.954	0.988	1.011	1.027	1.039	1.049
5.05	0.669	0.677	0.688	0.698	0.713	0.723	0.745	0.763	0.789	0.812	0.848	0.880	0.914	0.935	0.955	0.989	1.012	1.028	1.040	1.050
5.10	0.675	0.683	0.693	0.703	0.717	0.727	0.749	0.766	0.792	0.814	0.850	0.882	0.916	0.937	0.957	0.990	1.013	1.029	1.041	1.051
5.15	0.681	0.689	0.698	0.708	0.721	0.731	0.752	0.769	0.795	0.817	0.851	0.884	0.917	0.938	0.958	0.991	1.014	1.030	1.042	1.051
5.20	0.688	0.695	0.703	0.713	0.725	0.735	0.755	0.772	0.798	0.820	0.853	0.886	0.919	0.940	0.960	0.992	1.016	1.031	1.043	1.052
5.25	0.694	0.700	0.708	0.717	0.729	0.739	0.758	0.775	0.800	0.822	0.855	0.887	0.920	0.941	0.961	0.993	1.017	1.032	1.044	1.052
5.30	0.701	0.706	0.713	0.722	0.734	0.743	0.762	0.778	0.803	0.825	0.858	0.889	0.921	0.943	0.963	0.995	1.018	1.033	1.045	1.053
5.35	0.707	0.712	0.718	0.726	0.738	0.747	0.765	0.781	0.806	0.827	0.860	0.891	0.923	0.944	0.964	0.996	1.019	1.034	1.046	1.053
5.40	0.713	0.718	0.723	0.731	0.742	0.751	0.769	0.785	0.809	0.830	0.862	0.893	0.925	0.946	0.966	0.998	1.021	1.035	1.047	1.055
5.45	0.720	0.723	0.728	0.735	0.746	0.755	0.772	0.788	0.812	0.832	0.865	0.895	0.926	0.947	0.967	0.999	1.022	1.036	1.048	1.056
5.50	0.727	0.729	0.733	0.740	0.751	0.759	0.776	0.792	0.815	0.835	0.868	0.897	0.928	0.949	0.969	1.000	1.023	1.038	1.049	1.057
5.55	0.733	0.734	0.738	0.745	0.755	0.763	0.779	0.795	0.818	0.837	0.870	0.899	0.929	0.950	0.970	1.001	1.024	1.039	1.050	1.058
5.60	0.739	0.740	0.744	0.750	0.760	0.768	0.783	0.799	0.821	0.840	0.872	0.900	0.931	0.952	0.972	1.003	1.026	1.040	1.051	1.058
5.65	0.745	0.745	0.749	0.755	0.764	0.772	0.787	0.802	0.824	0.843	0.874	0.902	0.933	0.953	0.974	0.004	1.027	1.041	1.052	1.059
5.70	0.751	0.751	0.754	0.760	0.769	0.777	0.791	0.806	0.827	0.846	0.877	0.905	0.935	0.955	0.976	1.006	1.028	1.042	1.053	1.060
5.75	0.757	0.756	0.759	0.764	0.773	0.781	0.795	0.809	0.830	0.848	0.879	0.907	0.937	0.957	0.977	1.007	1.029	1.043	1.054	1.061
5.80	0.763	0.762	0.764	0.769	0.778	0.785	0.799	0.813	0.833	0.851	0.882	0.909	0.939	0.959	0.979	1.008	1.031	1.045	1.055	1.062
5.85	0.769	0.768	0.770	0.774	0.782	0.789	0.803	0.817	0.836	0.854	0.884	0.911	0.940	0.961	0.980	1.009	1.032	1.046	1.056	1.063
5.90	0.775	0.774	0.777	0.779	0.787	0.794	0.807	0.821	0.839	0.857	0.887	0.913	0.942	0.963	0.982	1.011	1.033	1.048	1.057	1.064
5.95	0.781	0.779	0.782	0.784	0.792	0.798	0.810	0.824	0.842	0.860	0.889	0.915	0.944	0.965	0.984	1.012	1.034	1.049	1.058	1.065
6.00	0.788	0.785	0.787	0.790	0.797	0.803	0.814	0.828	0.845	0.863	0.892	0.918	0.946	0.967	0.986	1.013	1.036	1.050	1.059	1.066
6.05	0.794	0.790	0.792	0.795	0.801	0.807	0.818	0.831	0.848	0.865	0.894	0.920	0.948	0.968	0.987	1.015	1.037	1.051	1.060	1.067
6.10	0.800	0.796	0.797	0.800	0.805	0.812	0.822	0.835	0.852	0.868	0.897	0.922	0.950	0.970	0.989	1.017	1.038	1.052	1.061	1.068
6.15	0.805	0.801	0.802	0.805	0.809	0.816	0.826	0.838	0.855	0.870	0.899	0.924	0.952	0.971	0.991	1.018	1.039	1.053	1.062	1.069
6.20	0.811	0.807	0.808	0.810	0.814	0.820	0.830	0.842	0.858	0.873	0.902	0.927	0.954	0.973	0.993	1.019	1.041	1.055	1.063	1.070
6.25	0.816	0.812	0.813	0.815	0.818	0.824	0.834	0.846	0.861	0.876	0.904	0.930	0.956	0.975	0.995	1.020	1.042	1.056	1.064	1.071
6.30	0.822	0.818	0.818	0.820	0.823	0.829	0.839	0.850	0.864	0.880	0.907	0.931	0.958	0.977	0.997	1.022	1.043	1.057	1.065	1.072
6.35	0.829	0.824	0.823	0.825	0.828	0.833	0.843	0.853	0.867	0.883	0.909	0.932	0.960	0.979	0.998	1.023	1.045	1.058	1.066	1.072
6.40	0.835	0.830	0.829	0.830	0.833	0.838	0.848	0.857	0.871	0.886	0.912	0.936	0.962	0.981	1.000	1.025	1.047	1.059	1.067	1.073
6.45	0.841	0.835	0.834	0.835	0.837	0.842	0.852	0.861	0.874	0.889	0.915	0.938	0.964	0.983	1.001	1.026	1.048	1.060	1.068	1.074
6.50	0.848	0.841	0.839	0.840	0.842	0.847	0.856	0.865	0.878	0.892	0.918	0.941	0.966	0.985	1.003	1.028	1.049	1.062	1.069	1.075
6.55	0.853	0.846	0.844	0.845	0.846	0.851	0.860	0.868	0.881	0.895	0.920	0.943	0.968	0.987	1.005	1.029	1.050	1.063	1.070	1.076
6.60	0.858	0.852	0.850	0.851	0.851	0.855	0.864	0.871	0.884	0.898	0.923	0.945	0.970	0.989	1.007	1.031	1.052	1.064	1.072	1.077
6.65	0.864	0.857	0.855	0.856	0.856	0.859	0.868	0.875	0.888	0.900	0.925	0.947	0.972	0.991	1.008	1.032	1.053	1.065	1.073	1.078
6.70	0.870	0.863	0.860	0.861	0.861	0.863	0.872	0.880	0.892	0.903	0.928	0.950	0.974	0.993	1.010	1.034	1.054	1.067	1.074	1.080
6.75	0.875	0.868	0.865	0.866	0.865	0.867	0.876	0.884	0.895	0.906	0.930	0.952	0.976	0.995	1.011	1.036	1.055	1.068	1.075	1.081
6.80	0.881	0.874	0.871	0.872	0.870	0.872	0.880	0.888	0.899	0.910	0.933	0.955	0.979	0.997	1.013	1.038	1.057	1.069	1.077	1.082
6.85	0.886	0.879	0.876	0.877	0.875	0.877	0.884	0.891	0.902	0.913	0.936	0.957	0.981	0.998	1.015	1.040	1.058	1.070	1.078	1.083
6.90	0.892	0.885	0.881	0.881	0.881	0.881	0.888	0.895	0.906	0.917	0.939	0.960	0.983	1.000	1.017	1.041	1.059	1.071	1.079	1.084
6.95	0.897	0.890	0.886	0.885	0.885	0.885	0.892	0.898	0.909	0.919	0.941	0.962	0.985	1.002	1.018	1.042	1.060	1.072	1.080	1.085
7.00	0.903	0.896	0.892	0.890	0.890	0.890	0.896	0.902	0.913	0.922	0.944	0.965	0.988	1.004	1.020	1.044	1.062	1.073	1.081	1.086
7.05	0.909	0.901	0.897	0.895	0.894	0.894	0.899	0.906	0.916	0.925	0.947	0.967	0.990	1.006	1.022	1.045	1.063	1.075	1.082	1.087
7.10	0.915	0.907	0.903	0.900	0.899	0.899	0.903	0.910	0.920	0.929	0.950	0.970	0.992	1.008	1.021	1.047	1.065	1.077	1.083	1.088
7.15	0.921	0.912	0.908	0.905	0.903	0.903	0.907	0.914	0.923	0.932	0.953	0.972	0.994	1.010	1.026	1.048	1.066	1.078	1.084	1.089
7.20	0.928	0.918	0.913	0.910	0.908	0.907	0.911	0.918	0.927	0.935	0.956	0.975	0.997	1.012	1.028	1.050	1.067	1.079	1.086	1.091
7.25	0.933	0.923	0.918	0.915	0.912	0.910	0.915	0.921	0.930	0.938	0.959	0.977	0.999	1.014	1.029	1.051	1.068	1.080	1.087	1.092
7.30	0.938	0.929	0.923	0.920	0.917	0.914	0.919	0.925	0.934	0.942	0.962	0.980	1.001	1.017	1.031	1.053	1.070	1.081	1.088	1.093
7.35	0.943	0.934	0.928	0.924	0.921	0.918	0.923	0.928	0.937	0.946	0.965	0.982	1.003	1.019	1.033	1.055	1.071	1.082	1.089	1.094
7.40	0.949	0.940	0.933	0.929	0.926	0.923	0.927	0.932	0.941	0.950	0.968	0.985	1.005	1.021	1.035	1.057	1.073	1.084	1.091	1.095
7.45	0.955	0.945	0.938	0.934	0.930	0.927	0.931	0.936	0.944	0.953	0.970	0.988	1.007	1.023	1.037	1.058	1.074	1.085	1.092	1.096
7.50	0.961	0.951	0.943	0.939	0.935	0.932	0.935	0.940	0.948	0.956	0.973	0.991	1.010	1.025	1.039	1.060	1.076	1.087	1.093	1.098
7.55	0.966	0.956	0.948	0.944	0.939	0.936	0.939	0.944	0.951	0.959	0.976	0.993	1.012	1.027	1.041	1.061	1.077	1.088	1.094	1.099
7.60	0.972	0.961	0.953	0.949	0.944	0.941	0.943	0.949	0.955	0.962	0.979	0.996	1.015	1.029	1.043	1.063	1.079	1.089	1.095	1.100
7.65	0.987	0.966	0.958	0.954	0.949	0.945	0.947	0.952	0.958	0.965	0.981	0.998	1.017	1.031	1.045	1.065	1.080	1.090	1.097	1.101

Table A-2. Compressibility Factors for Natural Gases (*Continued*)

Pseudo-reduced pressure P_r	Pseudoreduced temperature T_r																			
	1.05	1.10	1.15	1.20	1.25	1.30	1.35	1.40	1.45	1.50	1.60	1.70	1.80	1.90	2.00	2.20	2.40	2.60	2.80	3.00
7.70	0.983	0.972	0.963	0.959	0.954	0.950	0.952	0.956	0.962	0.969	0.984	1.001	1.019	1.033	1.047	1.067	1.082	1.092	1.098	1.102
7.75	0.989	0.977	0.968	0.963	0.958	0.954	0.956	0.959	0.965	0.972	0.987	1.003	1.021	1.035	1.049	1.068	1.083	1.093	1.099	1.103
7.80	0.995	0.983	0.973	0.968	0.962	0.959	0.960	0.963	0.969	0.976	0.990	1.006	1.024	1.038	1.051	1.070	1.084	1.095	1.100	1.104
7.85	1.000	0.988	0.978	0.973	0.966	0.963	0.964	0.967	0.973	0.979	0.993	1.009	1.026	1.040	1.053	1.071	1.085	1.096	1.101	1.105
7.90	1.005	0.993	0.984	0.978	0.970	0.968	0.968	0.972	0.977	0.982	0.997	1.012	1.029	1.042	1.055	1.073	1.087	1.098	1.103	1.107
7.95	1.011	0.999	0.989	0.983	0.974	0.972	0.972	0.976	0.980	0.986	0.999	1.015	1.031	1.044	1.057	1.075	1.088	1.099	1.104	1.108
8.00	1.017	1.005	0.995	0.988	0.979	0.977	0.976	0.980	0.984	0.990	1.001	1.018	1.033	1.047	1.059	1.078	1.090	1.100	1.106	1.110
8.05	1.022	1.010	1.000	0.993	0.983	0.982	0.980	0.984	0.988	0.994	1.004	1.020	1.035	1.049	1.060	1.079	1.091	1.101	1.107	1.111
8.10	1.027	1.016	1.006	0.998	0.987	0.987	0.984	0.989	0.992	0.998	1.008	1.022	1.038	1.051	1.062	1.081	1.093	1.102	1.109	1.112
8.15	1.032	1.021	1.011	1.002	0.991	0.991	0.988	0.992	0.996	1.000	1.011	1.025	1.040	1.053	1.064	1.082	1.095	1.103	1.110	1.113
8.20	1.038	1.026	1.016	1.007	0.996	0.996	0.992	0.996	1.000	1.003	1.014	1.028	1.043	1.055	1.066	1.084	1.097	1.105	1.111	1.115
8.25	1.044	1.031	1.021	1.012	1.000	1.000	0.996	0.999	1.001	1.007	1.017	1.030	1.045	1.057	1.068	1.086	1.098	1.106	1.112	1.116
8.30	1.050	1.037	1.026	1.017	1.005	1.004	1.001	1.003	1.008	1.011	1.021	1.033	1.048	1.060	1.070	1.088	1.100	1.108	1.113	1.118
8.35	1.055	1.042	1.031	1.021	1.010	1.008	1.005	1.007	1.011	1.014	1.024	1.036	1.050	1.062	1.072	1.089	1.101	1.109	1.115	1.119
8.40	1.060	1.048	1.036	1.026	1.015	1.012	1.010	1.012	1.015	1.018	1.027	1.039	1.052	1.064	1.074	1.091	1.102	1.111	1.117	1.120
8.45	1.065	1.053	1.041	1.030	1.019	1.016	1.014	1.016	1.019	1.021	1.029	1.041	1.055	1.066	1.076	1.092	1.103	1.112	1.118	1.121
8.50	1.070	1.058	1.046	1.035	1.024	1.021	1.019	1.020	1.023	1.025	1.032	1.044	1.058	1.069	1.078	1.094	1.105	1.113	1.119	1.123
8.55	1.075	1.063	1.051	1.040	1.029	1.025	1.023	1.024	1.026	1.028	1.035	1.047	1.060	1.071	1.080	1.096	1.107	1.115	1.120	1.124
8.60	1.081	1.068	1.056	1.045	1.034	1.030	1.028	1.028	1.030	1.031	1.039	1.050	1.063	1.073	1.082	1.098	1.109	1.117	1.122	1.126
8.65	1.086	1.073	1.061	1.049	1.039	1.034	1.032	1.032	1.034	1.035	1.042	1.052	1.065	1.075	1.084	1.099	1.110	1.118	1.123	1.127
8.70	1.092	1.078	1.066	1.054	1.044	1.039	1.037	1.036	1.038	1.039	1.046	1.055	1.068	1.078	1.087	1.101	1.112	1.120	1.125	1.129
8.75	1.097	1.083	1.070	1.058	1.049	1.043	1.041	1.040	1.041	1.043	1.048	1.058	1.070	1.080	1.089	1.103	1.113	1.121	1.126	1.130
8.80	1.102	1.088	1.075	1.063	1.054	1.048	1.045	1.044	1.045	1.047	1.051	1.061	1.073	1.082	1.091	1.105	1.115	1.122	1.127	1.132
8.85	1.108	1.094	1.080	1.068	1.058	1.052	1.049	1.048	1.048	1.049	1.055	1.064	1.075	1.084	1.093	1.107	1.116	1.124	1.129	1.133
8.90	1.113	1.099	1.085	1.073	1.063	1.056	1.053	1.052	1.052	1.052	1.058	1.067	1.078	1.087	1.095	1.109	1.118	1.126	1.131	1.135
8.95	1.118	1.103	1.090	1.077	1.067	1.060	1.057	1.056	1.056	1.056	1.061	1.069	1.080	1.089	1.097	1.111	1.120	1.127	1.132	1.136
9.00	1.124	1.108	1.095	1.082	1.072	1.064	1.061	1.060	1.060	1.060	1.064	1.072	1.083	1.092	1.100	1.113	1.122	1.129	1.134	1.138
9.05	1.129	1.113	1.100	1.086	1.076	1.068	1.065	1.064	1.064	1.064	1.067	1.075	1.085	1.094	1.102	1.115	1.124	1.130	1.135	1.139
9.10	1.135	1.118	1.105	1.091	1.081	1.073	1.069	1.068	1.068	1.068	1.070	1.078	1.088	1.097	1.104	1.117	1.126	1.132	1.137	1.140
9.15	1.140	1.123	1.109	1.096	1.085	1.077	1.073	1.071	1.071	1.071	1.074	1.081	1.091	1.099	1.106	1.119	1.128	1.133	1.138	1.141
9.20	1.146	1.128	1.114	1.101	1.090	1.082	1.078	1.075	1.074	1.074	1.078	1.084	1.094	1.102	1.108	1.122	1.130	1.135	1.140	1.143
9.25	1.151	1.133	1.119	1.105	1.094	1.086	1.082	1.079	1.078	1.077	1.081	1.086	1.096	1.104	1.110	1.124	1.132	1.136	1.141	1.145
9.30	1.157	1.138	1.124	1.110	1.099	1.091	1.086	1.083	1.082	1.081	1.084	1.089	1.099	1.106	1.112	1.126	1.134	1.138	1.143	1.147
9.35	1.162	1.143	1.129	1.115	1.104	1.095	1.090	1.087	1.086	1.084	1.087	1.092	1.101	1.108	1.114	1.128	1.136	1.140	1.145	1.148
9.40	1.167	1.148	1.134	1.120	1.109	1.100	1.095	1.092	1.090	1.088	1.090	1.095	1.104	1.111	1.117	1.130	1.138	1.142	1.147	1.149
9.45	1.172	1.153	1.139	1.124	1.113	1.104	1.099	1.096	1.094	1.092	1.093	1.098	1.106	1.113	1.119	1.132	1.140	1.143	1.148	1.150
9.50	1.178	1.159	1.144	1.129	1.118	1.109	1.103	1.100	1.098	1.096	1.097	1.102	1.109	1.116	1.122	1.134	1.142	1.145	1.150	1.152
9.55	1.182	1.164	1.149	1.134	1.122	1.113	1.107	1.104	1.101	1.099	1.100	1.104	1.111	1.118	1.124	1.136	1.143	1.147	1.151	1.153
9.60	1.189	1.169	1.154	1.139	1.127	1.118	1.111	1.108	1.104	1.102	1.103	1.107	1.114	1.121	1.126	1.139	1.145	1.149	1.153	1.155
9.65	1.194	1.174	1.158	1.143	1.132	1.122	1.115	1.112	1.108	1.105	1.106	1.110	1.117	1.123	1.128	1.141	1.147	1.150	1.154	1.156
9.70	1.200	1.179	1.163	1.148	1.137	1.127	1.120	1.116	1.112	1.109	1.109	1.113	1.120	1.126	1.131	1.143	1.149	1.152	1.156	1.158
9.75	1.205	1.184	1.168	1.153	1.141	1.131	1.124	1.120	1.115	1.113	1.113	1.116	1.122	1.128	1.133	1.145	1.150	1.154	1.157	1.159
9.80	1.210	1.189	1.173	1.158	1.146	1.135	1.128	1.124	1.119	1.117	1.117	1.119	1.125	1.131	1.136	1.148	1.152	1.156	1.159	1.161
9.85	1.215	1.194	1.178	1.162	1.150	1.139	1.132	1.128	1.123	1.120	1.120	1.122	1.127	1.133	1.138	1.150	1.154	1.157	1.160	1.162
9.90	1.221	1.200	1.183	1.167	1.155	1.143	1.137	1.132	1.127	1.123	1.123	1.126	1.130	1.135	1.140	1.152	1.156	1.159	1.162	1.164
9.95	1.226	1.205	1.187	1.171	1.159	1.147	1.141	1.136	1.130	1.126	1.126	1.129	1.133	1.138	1.142	1.154	1.158	1.161	1.163	1.165
10.00	1.231	1.210	1.192	1.176	1.164	1.152	1.145	1.140	1.134	1.130	1.130	1.132	1.136	1.141	1.144	1.156	1.160	1.163	1.165	1.167
10.05	1.236	1.215	1.197	1.180	1.168	1.156	1.149	1.144	1.138	1.134	1.133	1.135	1.139	1.143	1.146	1.158	1.162	1.164	1.166	1.168
10.10	1.242	1.220	1.202	1.185	1.173	1.160	1.153	1.148	1.142	1.138	1.137	1.138	1.141	1.145	1.149	1.160	1.164	1.166	1.168	1.170
10.15	1.247	1.225	1.206	1.190	1.177	1.164	1.157	1.152	1.145	1.141	1.140	1.141	1.144	1.147	1.151	1.162	1.165	1.167	1.169	1.171
10.20	1.252	1.230	1.211	1.195	1.181	1.169	1.162	1.155	1.149	1.145	1.143	1.144	1.147	1.150	1.154	1.164	1.167	1.169	1.171	1.173
10.25	1.257	1.235	1.216	1.199	1.185	1.174	1.166	1.159	1.153	1.148	1.146	1.147	1.149	1.152	1.156	1.166	1.169	1.171	1.173	1.175
10.30	1.263	1.240	1.221	1.204	1.190	1.179	1.170	1.163	1.157	1.152	1.149	1.150	1.152	1.155	1.159	1.168	1.171	1.173	1.175	1.177
10.35	1.268	1.245	1.226	1.208	1.194	1.183	1.174	1.167	1.160	1.156	1.152	1.153	1.155	1.157	1.161	1.170	1.173	1.174	1.176	1.178
10.40	1.274	1.250	1.231	1.213	1.199	1.188	1.178	1.171	1.164	1.160	1.156	1.156	1.158	1.160	1.164	1.172	1.175	1.176	1.178	1.180
10.45	1.270	1.255	1.236	1.218	1.203	1.192	1.182	1.175	1.168	1.164	1.159	1.159	1.160	1.162	1.166	1.174	1.177	1.177	1.179	1.181
10.50	1.285	1.260	1.241	1.223	1.208	1.196	1.186	1.179	1.172	1.168	1.162	1.162	1.162	1.165	1.169	1.176	1.179	1.179	1.181	1.183
10.55	1.290	1.265	1.246	1.227	1.212	1.200	1.190	1.183	1.176	1.171	1.165	1.165	1.165	1.168	1.171	1.178	1.181	1.181	1.182	1.184
10.60	1.296	1.270	1.251	1.232	1.217	1.204	1.195	1.187	1.180	1.174	1.169	1.168	1.168	1.171	1.174	1.181	1.183	1.183	1.184	1.186
10.65	1.301	1.275	1.256	1.236	1.221	1.208	1.199	1.191	1.183	1.177	1.172	1.170	1.171	1.174	1.176	1.183	1.184	1.184	1.185	1.187
10.70	1.307	1.280	1.261	1.241	1.226	1.213	1.203	1.195	1.187	1.181	1.176	1.173	1.174	1.177	1.179	1.183	1.186	1.186	1.187	1.189
10.75	1.312	1.285	1.265	1.246	1.231	1.217	1.207	1.198	1.191	1.185	1.179	1.176	1.176	1.179	1.182	1.187	1.187	1.188	1.189	1.190
10.80	1.318	1.291	1.270	1.251	1.236	1.222	1.211	1.202	1.195	1.189	1.182	1.179	1.179	1.182	1.185	1.189	1.189	1.190	1.191	1.192
10.85	1.323	1.296	1.275	1.255	1.240	1.226	1.215	1.206	1.198	1.193	1.186	1.182	1.182	1.185	1.187	1.191	1.191	1.192	1.192	1.193
10.90	1.329	1.301	1.280	1.260	1.245	1.230	1.219	1.210	1.202	1.197	1.190	1.186	1.186	1.188	1.190	1.193	1.193	1.194	1.194	1.195
10.95	1.334	1.306	1.284	1.265	1.249	1.235	1.223	1.214	1.206	1.200	1.193	1.189	1.189	1.191	1.192	1.195	1.195	1.196	1.196	1.197
11.00	1.339	1.311	1.289	1.270	1.254	1.240	1.228	1.218	1.210	1.204	1.196	1.193	1.192	1.194	1.195	1.197	1.197	1.198	1.198	1.199
11.05	1.344	1.316	1.294	1.275	1.258	1.244	1.232	1.221	1.213	1.208	1.199	1.196	1.194	1.196	1.197	1.199	1.199	1.199	1.199	1.200
11.10	1.350	1.321	1.299	1.280	1.263	1.249	1.236	1.225	1.217	1.211	1.202	1.199	1.196	1.199	1.200	1.201	1.201	1.201	1.201	1.202
11.15	1.355	1.326	1.303	1.284	1.268	1.253	1.240	1.229	1.221	1.214	1.206	1.202	1.199	1.201	1.202	1.203	1.203	1.203	1.203	1.203
11.20	1.360	1.331	1.308	1.289	1.273	1.257	1.245	1.233	1.225	1.218	1.210	1.205	1.202	1.204	1.204	1.205	1.205	1.205	1.205	1.205
11.25	1.365	1.336	1.313	1.294	1.277	1.261	1.249	1.237	1.228	1.221	1.213	1.208	1.205	1.206	1.206	1.207	1.207	1.207	1.207	1.207
11.30	1.370	1.341	1.318	1.299	1.282	1.265	1.253	1.241	1.232	1.225	1.217	1.211	1.208	1.209	1.209	1.209	1.209	1.209	1.209	1.209
11.35	1.375	1.346	1.323	1.303	1.286	1.269	1.257	1.245	1.236	1.228	1.220	1.214	1.211	1.211	1.211	1.211	1.211	1.211	1.210	1.210
11.40	1.381	1.351	1.328	1.308	1.291	1.273	1.261	1.249	1.240	1.232	1.224	1.217	1.214	1.214	1.214	1.214	1.214	1.213	1.212	1.212

Table A-2. Compressibility Factors for Natural Gases (Continued)

Pseudo-reduced pressure P_r	Pseudoreduced temperature T_r																			
	1.05	1.10	1.15	1.20	1.25	1.30	1.35	1.40	1.45	1.50	1.60	1.70	1.80	1.90	2.00	2.20	2.40	2.60	2.80	3.00
11.45	1.386	1.356	1.333	1.313	1.295	1.277	1.265	1.253	1.243	1.236	1.227	1.220	1.217	1.216	1.216	1.216	1.216	1.215	1.214	1.213
11.50	1.391	1.362	1.338	1.318	1.300	1.282	1.269	1.257	1.247	1.240	1.231	1.224	1.220	1.219	1.219	1.219	1.218	1.217	1.216	1.215
11.55	1.396	1.367	1.343	1.322	1.304	1.286	1.273	1.260	1.251	1.244	1.234	1.227	1.223	1.222	1.221	1.221	1.220	1.219	1.218	1.217
11.60	1.402	1.372	1.348	1.327	1.309	1.291	1.277	1.264	1.255	1.248	1.238	1.230	1.226	1.225	1.224	1.223	1.222	1.221	1.220	1.219
11.65	1.407	1.377	1.353	1.331	1.313	1.295	1.281	1.268	1.258	1.251	1.241	1.233	1.229	1.227	1.226	1.225	1.223	1.222	1.221	1.220
11.70	1.412	1.382	1.358	1.336	1.317	1.300	1.286	1.272	1.262	1.255	1.245	1.236	1.232	1.230	1.229	1.227	1.225	1.224	1.223	1.222
11.75	1.417	1.387	1.363	1.340	1.321	1.305	1.288	1.276	1.265	1.259	1.248	1.239	1.235	1.233	1.232	1.229	1.227	1.226	1.225	1.224
11.80	1.423	1.392	1.368	1.345	1.326	1.309	1.294	1.280	1.269	1.262	1.252	1.243	1.238	1.236	1.234	1.231	1.229	1.228	1.227	1.226
11.85	1.428	1.397	1.373	1.350	1.330	1.313	1.298	1.284	1.273	1.266	1.255	1.246	1.240	1.238	1.236	1.233	1.231	1.229	1.228	1.227
11.90	1.433	1.402	1.378	1.355	1.335	1.318	1.302	1.288	1.277	1.270	1.259	1.250	1.243	1.241	1.239	1.236	1.233	1.231	1.230	1.229
11.95	1.438	1.407	1.383	1.359	1.339	1.322	1.306	1.292	1.280	1.274	1.262	1.253	1.246	1.244	1.241	1.238	1.235	1.233	1.231	1.230
12.00	1.444	1.413	1.388	1.364	1.344	1.327	1.310	1.296	1.284	1.278	1.266	1.256	1.249	1.247	1.244	1.240	1.237	1.235	1.233	1.232
12.05	1.449	1.418	1.393	1.368	1.348	1.331	1.314	1.299	1.288	1.281	1.269	1.259	1.252	1.249	1.246	1.242	1.238	1.236	1.235	1.234
12.10	1.454	1.423	1.398	1.373	1.353	1.335	1.318	1.303	1.292	1.285	1.272	1.262	1.255	1.251	1.249	1.244	1.240	1.238	1.237	1.236
12.15	1.459	1.428	1.403	1.378	1.357	1.339	1.322	1.307	1.296	1.288	1.275	1.265	1.258	1.254	1.251	1.246	1.242	1.240	1.238	1.237
12.20	1.465	1.433	1.408	1.383	1.362	1.344	1.326	1.311	1.300	1.292	1.279	1.268	1.261	1.257	1.254	1.248	1.244	1.242	1.240	1.239
12.25	1.470	1.438	1.413	1.388	1.366	1.348	1.330	1.315	1.304	1.295	1.283	1.271	1.264	1.259	1.256	1.250	1.246	1.244	1.242	1.241
12.30	1.475	1.443	1.418	1.392	1.371	1.353	1.334	1.319	1.307	1.299	1.287	1.274	1.267	1.262	1.259	1.252	1.248	1.246	1.244	1.243
12.35	1.480	1.448	1.423	1.397	1.375	1.357	1.338	1.323	1.311	1.303	1.290	1.277	1.270	1.265	1.261	1.254	1.250	1.247	1.246	1.245
12.40	1.486	1.453	1.428	1.402	1.380	1.362	1.342	1.327	1.315	1.307	1.293	1.281	1.273	1.268	1.264	1.256	1.252	1.249	1.248	1.247
12.45	1.491	1.458	1.433	1.407	1.384	1.366	1.346	1.330	1.319	1.310	1.296	1.284	1.276	1.270	1.266	1.258	1.254	1.250	1.249	1.248
12.50	1.496	1.464	1.438	1.411	1.389	1.370	1.350	1.334	1.323	1.313	1.300	1.288	1.279	1.273	1.269	1.261	1.256	1.252	1.251	1.250
12.55	1.501	1.469	1.443	1.416	1.394	1.374	1.354	1.338	1.326	1.317	1.303	1.290	1.282	1.275	1.271	1.263	1.258	1.254	1.252	1.251
12.60	1.507	1.474	1.448	1.420	1.399	1.379	1.358	1.342	1.330	1.321	1.307	1.293	1.285	1.278	1.273	1.265	1.260	1.256	1.254	1.253
12.65	1.512	1.479	1.453	1.425	1.404	1.383	1.362	1.346	1.334	1.325	1.310	1.297	1.288	1.280	1.276	1.267	1.261	1.257	1.256	1.255
12.70	1.517	1.484	1.458	1.430	1.409	1.388	1.367	1.350	1.337	1.329	1.314	1.300	1.291	1.283	1.279	1.269	1.263	1.259	1.258	1.257
12.75	1.522	1.489	1.463	1.435	1.413	1.392	1.371	1.354	1.341	1.332	1.317	1.303	1.294	1.286	1.281	1.271	1.265	1.261	1.259	1.258
12.80	1.527	1.495	1.468	1.439	1.418	1.397	1.375	1.358	1.345	1.336	1.321	1.306	1.297	1.289	1.283	1.273	1.267	1.263	1.261	1.260
12.85	1.532	1.500	1.473	1.444	1.422	1.401	1.379	1.362	1.348	1.339	1.324	1.309	1.299	1.291	1.286	1.275	1.269	1.265	1.263	1.261
12.90	1.537	1.505	1.477	1.449	1.427	1.405	1.383	1.365	1.352	1.342	1.328	1.312	1.302	1.294	1.289	1.277	1.271	1.267	1.265	1.263
12.95	1.542	1.510	1.482	1.454	1.431	1.409	1.387	1.369	1.356	1.346	1.331	1.315	1.305	1.297	1.291	1.279	1.272	1.268	1.266	1.265
13.00	1.548	1.515	1.487	1.458	1.436	1.414	1.391	1.374	1.360	1.350	1.335	1.319	1.308	1.300	1.293	1.281	1.274	1.270	1.268	1.267
13.05	1.553	1.520	1.492	1.463	1.440	1.418	1.395	1.378	1.364	1.354	1.338	1.321	1.310	1.302	1.295	1.283	1.276	1.271	1.269	1.268
13.10	1.558	1.525	1.497	1.468	1.445	1.422	1.399	1.381	1.367	1.358	1.341	1.324	1.313	1.304	1.298	1.286	1.278	1.273	1.271	1.270
13.15	1.563	1.530	1.502	1.473	1.449	1.426	1.403	1.385	1.371	1.361	1.345	1.327	1.316	1.307	1.300	1.288	1.280	1.275	1.273	1.271
13.20	1.568	1.535	1.507	1.477	1.453	1.431	1.408	1.389	1.374	1.364	1.349	1.331	1.320	1.310	1.303	1.290	1.282	1.277	1.275	1.273
13.25	1.573	1.540	1.512	1.482	1.458	1.435	1.412	1.393	1.378	1.368	1.352	1.334	1.322	1.313	1.305	1.292	1.284	1.278	1.276	1.275
13.30	1.578	1.546	1.517	1.486	1.463	1.440	1.416	1.398	1.382	1.372	1.355	1.337	1.325	1.316	1.308	1.294	1.286	1.280	1.278	1.277
13.35	1.583	1.551	1.521	1.491	1.467	1.444	1.420	1.401	1.385	1.375	1.358	1.340	1.328	1.318	1.310	1.296	1.287	1.281	1.279	1.278
13.40	1.589	1.556	1.526	1.495	1.472	1.449	1.424	1.404	1.389	1.379	1.362	1.343	1.331	1.321	1.313	1.298	1.289	1.283	1.281	1.280
13.45	1.594	1.561	1.531	1.500	1.476	1.453	1.428	1.408	1.393	1.382	1.365	1.346	1.334	1.323	1.315	1.300	1.291	1.285	1.283	1.281
13.50	1.599	1.566	1.536	1.504	1.481	1.457	1.432	1.412	1.397	1.386	1.369	1.349	1.337	1.326	1.317	1.302	1.293	1.287	1.285	1.283
13.55	1.604	1.571	1.541	1.509	1.485	1.461	1.436	1.416	1.400	1.389	1.372	1.352	1.340	1.328	1.319	1.304	1.295	1.289	1.287	1.285
13.60	1.609	1.577	1.546	1.514	1.490	1.466	1.440	1.420	1.404	1.393	1.376	1.355	1.343	1.331	1.322	1.306	1.297	1.291	1.289	1.287
13.65	1.614	1.582	1.551	1.518	1.494	1.470	1.444	1.424	1.408	1.396	1.379	1.358	1.346	1.334	1.324	1.308	1.298	1.292	1.290	1.288
13.70	1.619	1.587	1.556	1.523	1.499	1.475	1.448	1.428	1.412	1.400	1.382	1.361	1.349	1.337	1.327	1.310	1.300	1.294	1.292	1.290
13.75	1.624	1.592	1.561	1.527	1.503	1.479	1.452	1.432	1.416	1.404	1.385	1.364	1.351	1.339	1.329	1.312	1.301	1.296	1.293	1.291
13.80	1.630	1.597	1.566	1.532	1.508	1.483	1.456	1.436	1.419	1.408	1.389	1.368	1.354	1.342	1.332	1.314	1.303	1.298	1.295	1.293
13.85	1.635	1.602	1.571	1.537	1.513	1.487	1.460	1.439	1.423	1.411	1.393	1.371	1.357	1.345	1.334	1.316	1.305	1.300	1.297	1.295
13.90	1.640	1.608	1.575	1.542	1.517	1.492	1.465	1.443	1.426	1.414	1.397	1.374	1.360	1.348	1.337	1.318	1.307	1.301	1.299	1.297
13.95	1.645	1.613	1.580	1.546	1.522	1.496	1.469	1.447	1.430	1.417	1.399	1.377	1.363	1.350	1.339	1.320	1.309	1.302	1.300	1.298
14.00	1.650	1.618	1.585	1.550	1.526	1.500	1.473	1.451	1.434	1.421	1.402	1.380	1.366	1.353	1.341	1.322	1.311	1.304	1.302	1.300
14.05	1.655	1.623	1.590	1.555	1.531	1.504	1.478	1.455	1.437	1.425	1.405	1.383	1.369	1.356	1.343	1.324	1.313	1.306	1.303	1.301
14.10	1.661	1.628	1.595	1.560	1.535	1.509	1.482	1.459	1.441	1.429	1.409	1.386	1.372	1.358	1.346	1.326	1.315	1.308	1.305	1.303
14.15	1.666	1.633	1.600	1.565	1.539	1.513	1.486	1.463	1.445	1.432	1.412	1.389	1.375	1.360	1.348	1.328	1.317	1.309	1.307	1.305
14.20	1.671	1.639	1.605	1.570	1.544	1.518	1.490	1.467	1.449	1.436	1.416	1.392	1.378	1.363	1.351	1.330	1.319	1.311	1.309	1.307
14.25	1.676	1.644	1.609	1.575	1.548	1.522	1.494	1.471	1.452	1.439	1.419	1.395	1.381	1.366	1.353	1.332	1.320	1.313	1.310	1.308
14.30	1.681	1.649	1.614	1.580	1.553	1.527	1.498	1.475	1.456	1.443	1.423	1.398	1.384	1.369	1.356	1.334	1.322	1.315	1.312	1.310
14.35	1.686	1.650	1.619	1.584	1.557	1.531	1.502	1.478	1.460	1.446	1.426	1.401	1.387	1.371	1.358	1.336	1.323	1.316	1.313	1.311
14.40	1.692	1.659	1.624	1.589	1.561	1.536	1.506	1.482	1.464	1.450	1.430	1.404	1.390	1.374	1.360	1.338	1.325	1.318	1.315	1.313
14.45	1.697	1.664	1.629	1.594	1.565	1.540	1.510	1.486	1.468	1.454	1.433	1.407	1.393	1.376	1.362	1.340	1.327	1.320	1.317	1.315
14.50	1.702	1.669	1.634	1.598	1.570	1.544	1.515	1.490	1.472	1.458	1.437	1.411	1.396	1.379	1.365	1.342	1.329	1.322	1.319	1.317
14.55	1.707	1.674	1.639	1.603	1.575	1.548	1.520	1.494	1.476	1.461	1.440	1.414	1.398	1.382	1.367	1.344	1.331	1.324	1.321	1.318
14.60	1.712	1.679	1.643	1.608	1.580	1.552	1.524	1.498	1.480	1.465	1.443	1.417	1.400	1.385	1.370	1.346	1.333	1.326	1.323	1.320
14.65	1.717	1.684	1.648	1.613	1.584	1.556	1.528	1.502	1.484	1.468	1.446	1.420	1.403	1.387	1.372	1.348	1.334	1.327	1.324	1.321
14.70	1.722	1.690	1.653	1.617	1.589	1.561	1.532	1.505	1.488	1.472	1.450	1.423	1.407	1.390	1.375	1.350	1.336	1.329	1.326	1.323
14.75	1.727	1.695	1.658	1.622	1.594	1.565	1.536	1.509	1.491	1.475	1.453	1.426	1.410	1.392	1.377	1.352	1.338	1.330	1.327	1.325
14.80	1.733	1.700	1.663	1.627	1.598	1.570	1.540	1.513	1.495	1.479	1.457	1.429	1.413	1.395	1.380	1.354	1.340	1.332	1.329	1.327
14.85	1.738	1.705	1.668	1.632	1.603	1.574	1.544	1.517	1.498	1.483	1.460	1.432	1.416	1.398	1.382	1.356	1.341	1.334	1.331	1.328
14.90	1.743	1.710	1.673	1.636	1.607	1.579	1.549	1.521	1.502	1.487	1.463	1.436	1.419	1.401	1.385	1.358	1.343	1.336	1.333	1.330
14.95	1.748	1.715	1.678	1.641	1.612	1.583	1.553	1.525	1.505	1.490	1.466	1.439	1.421	1.403	1.387	1.360	1.345	1.338	1.334	1.331
15.00	1.753	1.720	1.682	1.645	1.616	1.588	1.558	1.529	1.508	1.493	1.470	1.442	1.424	1.406	1.390	1.362	1.347	1.340	1.336	1.333

SOURCE: Read from Fig. 4-16 (*API Drill. Prod. Practice*, 7-31).

APENDICE G

P = 698,5 mmHg T = 27,5 °C T_R = 1,42

rpm	t(seg)	P1	P_{R1}	z_1	P2	P_{R2}	z_2	mgn
5000	15,7	102	2,05	0,773	92	1,85	0,798	4,44
4500	16,3	100	2,01	0,777	90	1,81	0,796	3,99
4000	14,2	99	1,99	0,781	90	1,81	0,796	4,04
3500	17,3	98	1,97	0,782	88	1,77	0,801	3,72
3000	20,3	97	1,95	0,784	87	1,75	0,8016	3,13
2500	24,8	95	1,91	0,786	85	1,71	0,805	2,57
2000	30,3	93	1,87	0,790	83	1,67	0,809	2,09
1500	55,6	80	1,61	0,815	70	1,41	0,836	1,08
1000	61,5	93	1,87	0,790	85	1,71	0,805	0,82

Nota:

→ P1 & P2 en Kg/cm^2

→ mgn [gr/s]

La masa de gas natural se obtiene aplicando la ecuación del apéndice H.

APENDICE H

A continuación se presenta las ecuaciones utilizadas para la obteción de los datos de las pruebas respectivas. las ecuaciones están planteadas de forma tal que permiten utilizar los datos en las unidades en que son proporcionados por los diferentes instrumentos.

- Potencia efectiva.

$$N\,[KW] = P\,[kg]\; n\,[RPM]\; (7{,}3550\; 10^{-4})$$

- Torque efectivo.

$$M\,[mN] = P\,[kg]\; (7{,}0240)$$

- Consumo horario de gas natural.

$$m[gr/s] = \frac{p[kg/cm^2]\; 0{,}0053[m^3]\; 20{,}086[kg/kg\ mol]\; 1\times10^3}{z\; 0{,}08314[bar\ m^3/kg\ mol\,°k]\; (T[°C]+ 273)\; 1{,}097}$$

- Consumo horario de aire.

$$m_a\,[gr/s] = k\; y\; (\Delta p\,[cm\ ca]\; \delta_a\,[kg/m^3])^{1/2}\; (10{,}9396)$$

$$\delta_a = \frac{p\ [mmHg]\ (0{,}4653)}{(T\ [°C] + 273{,}15)}$$

- Consumo horario de aire teórico.

$$m_{at}[gr/s] = \frac{n[RPM]\ \delta a[kg/cm^3]}{75{,}71}$$

- Consumo horario de gasolina.

$$m_g[gr/s] = q_g[cm^3/s]\ \delta_g[gr/cm^3]\ \{1+0{,}00108(T_g[°C]-25)\}$$

- Consumo específico de gas natural.

$$mesp_{gN}[gr/KWh] = \frac{m_{gN}[gr/s]\ (3.600)}{N[KW]}$$

- Consumo específico de aire.

$$mesp_a = \frac{m_a[gr/s]\ (3.600)}{N[KW]}$$

- Consumo específico de gasolina.

$$mesp_g[gr/KWh] = \frac{m_g[gr/s]\ (3.600)}{N[KW]}$$

- Relación aire-combustible.

$$rac = m_a[gr/s]\ /\ m_{gN}[gr/s]$$

- Rendimiento volumétrico.

$$n_v[\%] = m_a[gr/s]\ 100\ /\ m_{at}[gr/s]$$

- Rendimiento total.

$$n_T[\%] = \frac{N[KW]\ (100)\ (1.000)}{m_{eN}[gr/s]\ LHV[KJ/kg]}$$

- Balance térmico del freno.

$$N'[KW] = q_A[m^3/s]\ \delta_A[kg/m^3]\ \Delta h[KJ/kg]$$

$$e\ (error) = \frac{N'[KW] - N[KW]}{N\ [KW]}$$

- Balance térmico del motor.
- Potencia introducida o indicada.

$$Ei[KW] = \frac{m_{eN}[gr/s]\ LHV[KJ/kg]}{1.000}$$

- Potencia perdida en refrigeración.

$$Er[KW] = q_A[m^3/s]\ \delta_A[kg/m^3]\ \Delta h[KJ/kg]$$

- Potencia perdida en los gases.

$$Eg[KW] = \frac{m_a[gr/s]\ \Delta h[KJ/kg]}{1.000}$$

$$\Delta h = h_{gs} - h_{ai}$$

h_{ai} = entalpia del aire que ingresa.

h_{gs} = entalpia de los gases de escape.

- Potencia perdida por radiación.

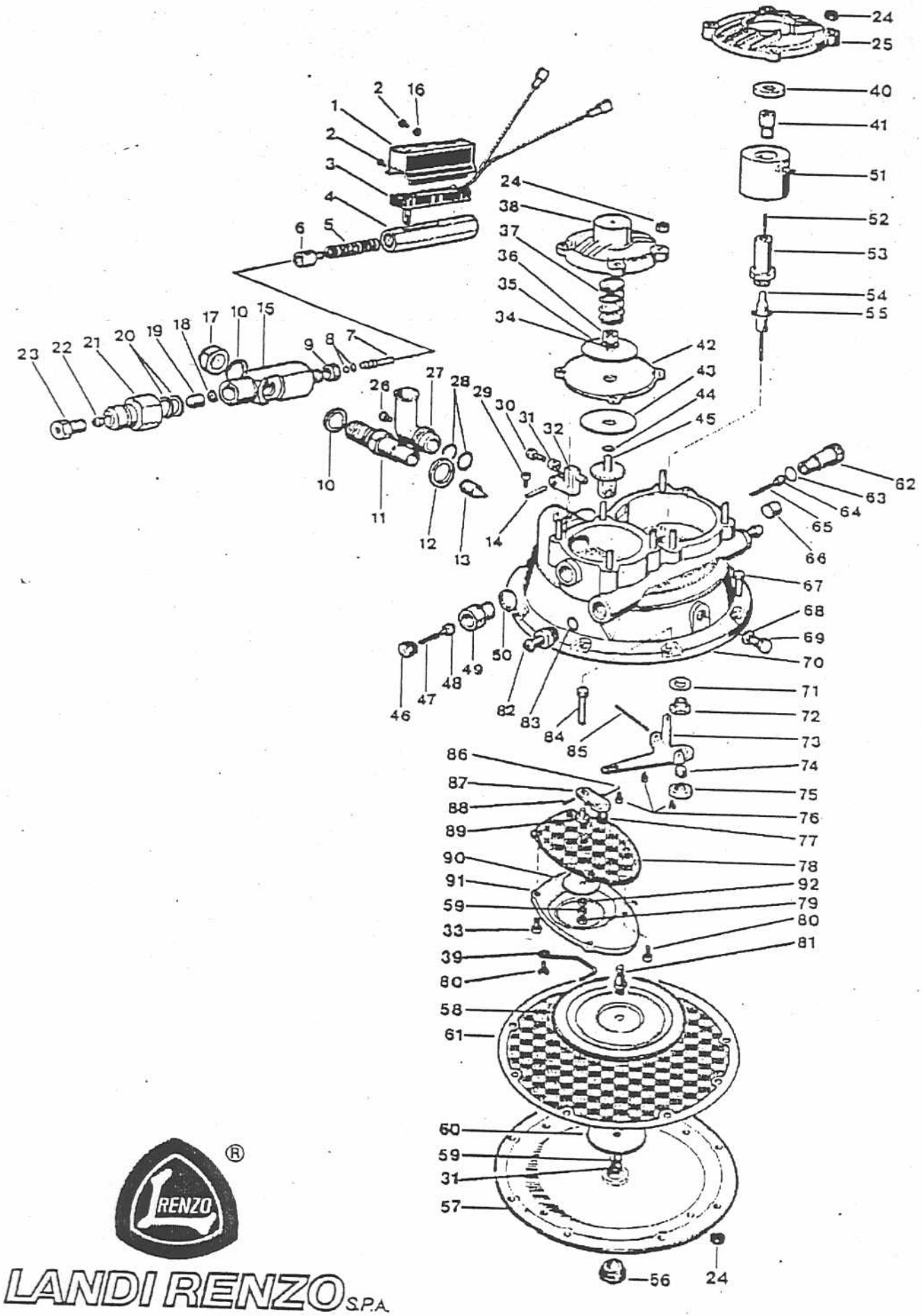
$$Erad[KW] = Ei[KW] - Er[KW] - Eg[KW] - N[KW]$$

APENDICE I

Reductor de Presión (despiece).

RIDUTTORE TN2 ELETTRONICO

UCAB 241



LANDI RENZO S.P.A.

RIDUTTORE TN2 ELETTRONICO

UCAB 242

POS.	DESCRIZIONE	CODICE	Nr.Pz.
1	Coperchio potenziometro	133500300	1
2	Vite TC tag.croce M3x5 UNI 7687	308011031	2
3	Potenziometro	203018001	1
4	Supporto porta molla trasduttore	284004100	1
5	Molla D 2.5x11x44.5 Acc. C 92	209020030	1
6	Nucleo mobile trasduttore	215019100	1
7	Perno trasduttore	218018100	1
8	Guarnizione OR 2010 D 2.57x1.78	173005371	2
9	Dado 1/4 gas ch. 16 H 4.5	143039100	1
10	Rondella di alluminio D 16.3x22x1.5	254019201	2
11	Sede valvola primo stadio D 4 TN1	260043030	1
12	Rondella di alluminio D 18.3x23x1.5	254008201	1
13	Valvola primo stadio TN1	302022100	1
14	Perno leva primo stadio TN1 D 4 H 24	218015010	1
15	Raccordo entrata gas con attacco trasduttore	236341100	1
16	Rondella piana M 3 UNI 6592	254257031	1
17	Dado cieco M 16x1.5 ch. 22 H 18	143038030	1
18	Disco di filtraggio bombato	149027030	1
19	Filtro in feltro	161004450	1
20	Rondella di alluminio D 12.3x18x2	254016201	2
21	Raccordo riduzione per raccordo e bicono	236320030	1
22	Bicono in ferro per tubo D. 6	115050030	1
23	Raccordo per bicono M 12x1 tubo D. 6	236330030	1
24	Dado esagonale alto M 6 UNI 5587	143407031	20
25	Coperchio minimo elettronico TN1	133410200	1
26	Vite TC tag. croce.M 4x7 testa D 9	308001030	1
27	Spola uscita gas D 19	278051200	1
28	Guarnizione OR 1715 D 15x1	173031371	2
29	Vite TC tag. croce M 5x8 UNI 7687	308007031	2
30	Vite TE M 5x12 UNI 5739	308058031	1
31	Dado esagonale medio M 5 UNI 5588	143405031	2
32	Leva primo stadio TN1	194051030	1
33	Vite TSC tag. croce M 5x16 UNI 7689	308220031	2
34	Rondella elastica convessa M7 DIN 137/A	254260021	1
35	Disco membrana primo stadio TN1 D 44x4	149015200	1
36	Dado esagonale medio M7 UNI 5588	143412031	1
37	Molla D 3.5x21x30.5 Acc. tipo D	209031050	1
38	Coperchio primo stadio TN1	133405200	1
39	Molla gancio filo 2.2 Acc. tipo D	209032050	1
40	Dado M 11x1 ch. 18 H 5	143010030	1
41	Inserto in ferro registrabile	188007030	1
42	Membrana primo stadio D 69.5 H 3 -40°C	206031350	1
43	Disco inferiore membrana primo stadio TN1	149013200	1
44	Guarnizione OR 2031 D 7.66x1.78	173030371	1
45	Snodo leva primo stadio TN1 Ø 16	269012030	1
46	Tappo valvola di sicurezza	287008100	1
47	Molla D 0.7x6.5x16 Acc. tipo C	209013050	1
48	Valvola di sicurezza	302040100	1
49	Corpo valvola di sicurezza	136397030	1
50	Rondella di alluminio D 13.9x19x1.5	254023201	1
51	Bobina plasticata 12 V 14 W	118102000	1
52	Molla D 0.5x4x31 Acc. tipo C	209035050	1
53	Canotto per bobina minimo	127001100	1
54	Nucleo mobile minimo TN1	215002040	1
55	Guarnizione OR 1412 D 12x1	173003371	1
56	Tappo coperchio bassa pressione	287025410	1
57	Coperchio bassa pressione TN1	133401200	1
58	Disco D 105 ondulato	149014230	2
59	Rondella elastica ondulata tipo A D 5	254250021	2
60	Disco D 47 Sp. 0,5	149001230	1
61	Membrana D 191.5 H 20 preformata	206039350	1
62	Registro minimo metano TN1 M 11x1	242008100	1
63	Guarnizione OR 108 D 8.73x1.78	173007371	1
64	Perno registro minimo D 6 H 5	218003100	1
65	Molla D 0.55x6.1x30.5 Acc. tipo C	209062050	1
66	Tappo STEI conico 1/4 gas DIN 906	287301021	1
67	Vite TE M 6x16 UNI 5739	308053031	4
68	Rondella di alluminio D 8.3x12x1.5	254011201	1
69	Vite TE M 8x10 UNI 5739	308059031	1
70	Corpo riduttore metano TN1	136351200	1
71	Rondella di alluminio D 11.3x15x1.5	254002201	1
72	Sede valvola bassa pressione D 5	260002100	1
73	Leva bassa pressione M 12x1	194002030	1
74	Valvola bassa pressione M 12x1	302010100	1
75	Dado valvola bassa pressione M 12x1 ch. 20	143005100	1
76	Vite TC tag. croce M 4x7 UNI 7687	308003031	4
77	Valvola alta pressione M 11x1	302001100	1
78	Membrana alta pressione H 2.5 -40°C	206006350	1
79	Dado esagonale alto M 5 UNI 5587	143404031	1
80	Vite TC tag. croce M 5x16 UNI 7687	308004031	3
81	Snodo leva bassa pressione TN1	269004200	1
82	Spola acqua D 10 M 14x1.25	278012100	2
83	Guarnizione OR 112 D 9.92x2.62	173009371	2
84	Vite TE M 6x30 UNI 5739	308051031	4
85	Perno leva bassa pressione D 2 H 52	218002010	1
86	Perno leva alta pressione D 2	218001010	1
87	Leva alta pressione M 11x1	194031030	1
88	Spina elastica leggera 2x12 UNI 6874	275001021	1
89	Snodo leva alta pressione	296001030	1
90	Disco D 31 sp. 1	149020030	1
91	Coperchio secondo stadio TN1	133022200	1
92	Rondella piana extralarga M5 UNI 6593	254261021	1

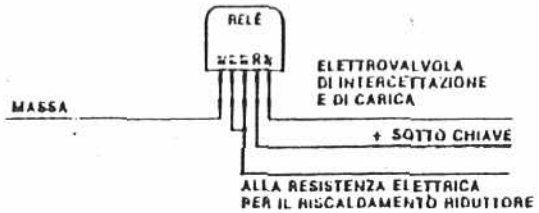
APENDICE J

Sistema Eléctrico del Equipo.

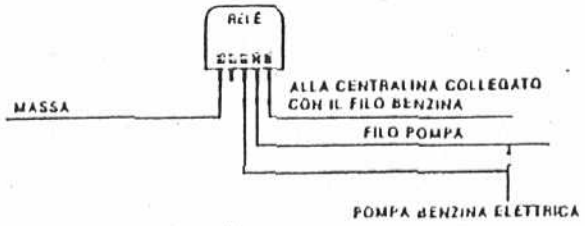
SCHEMA MONTAGGIO ELETTRICO

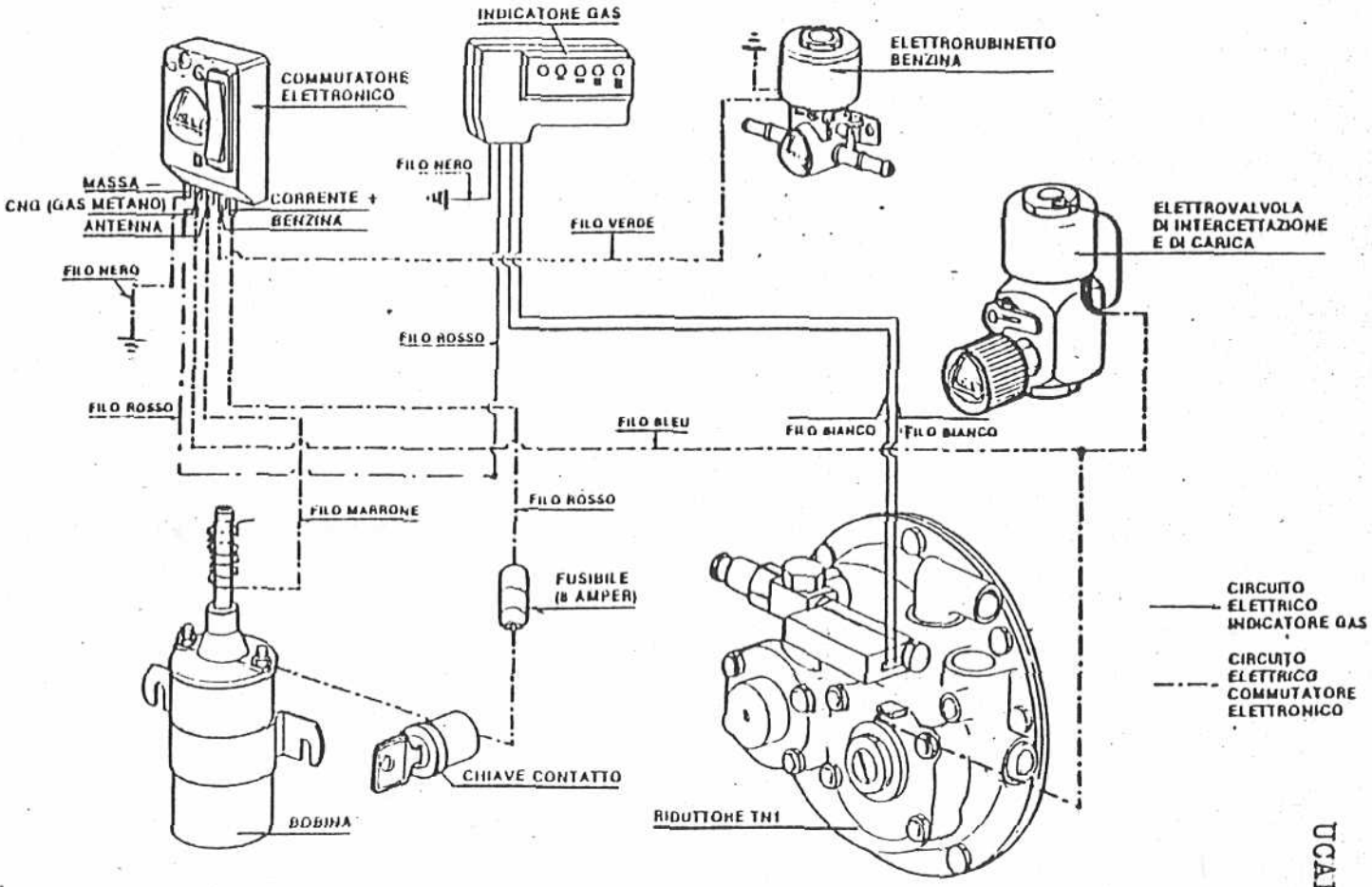
AVVERTENZE GENERALI

Nel caso che si applichi sul Riduttore TN1 1 o 2 resistenze, è necessario montare un relè da 30 Amp. facendo in modo che il carico di assorbimento delle resistenza, non sia sulla centralina.



Sulle automobili ad iniezione è necessario interporre un relè fra l'uscita benzina della centralina e la pompa elettrica della benzina in modo che il carico di assorbimento della pompa non vada a gravare sulla centralina.



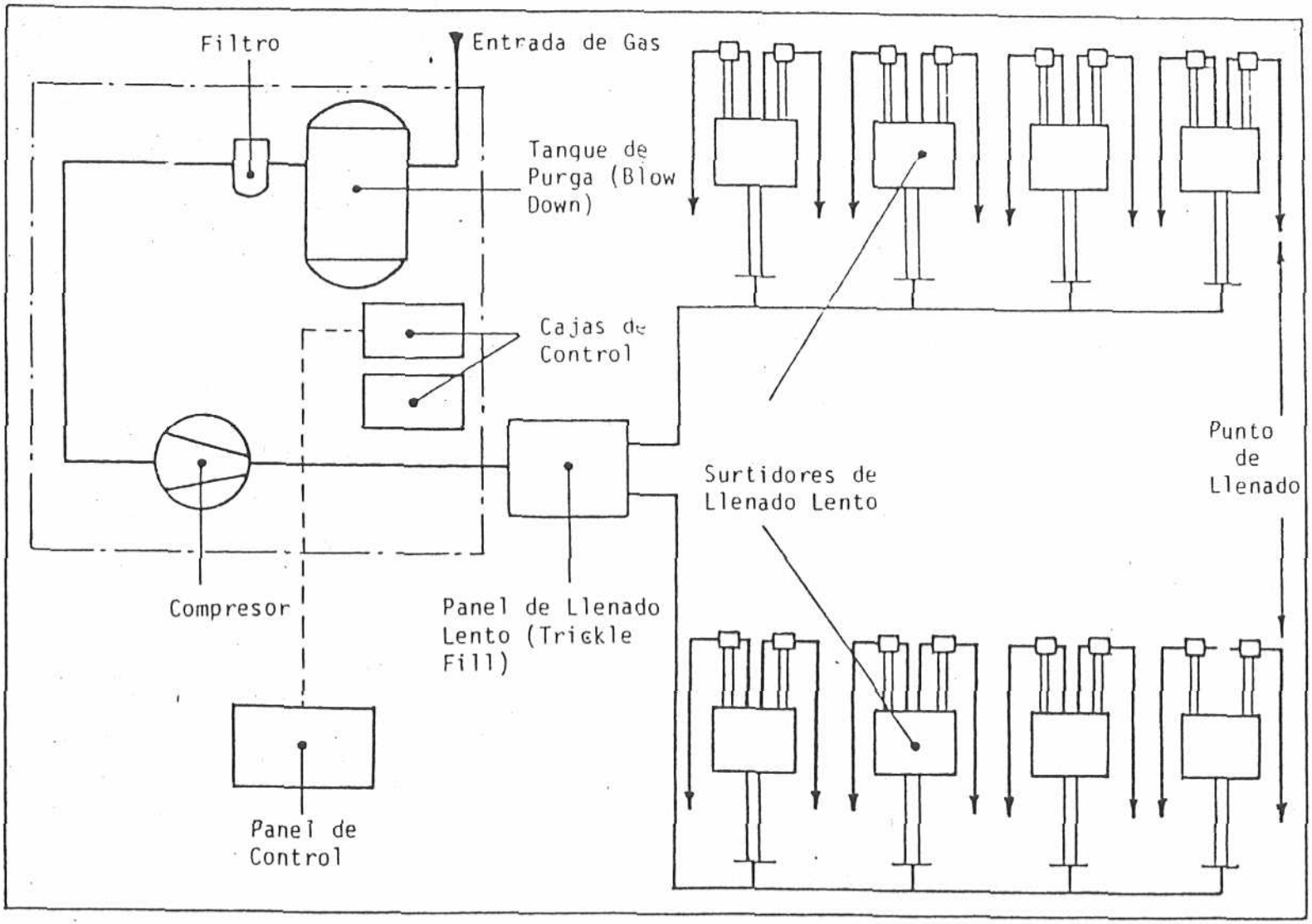


*N.B. L'elettrovalvola di intercettazione e di carica deve essere collegata in modo da avere una alimentazione da 11 + 12 V.c.c. costante anche durante l'avviamento.

APENDICE K

Estaciones de Llenado.

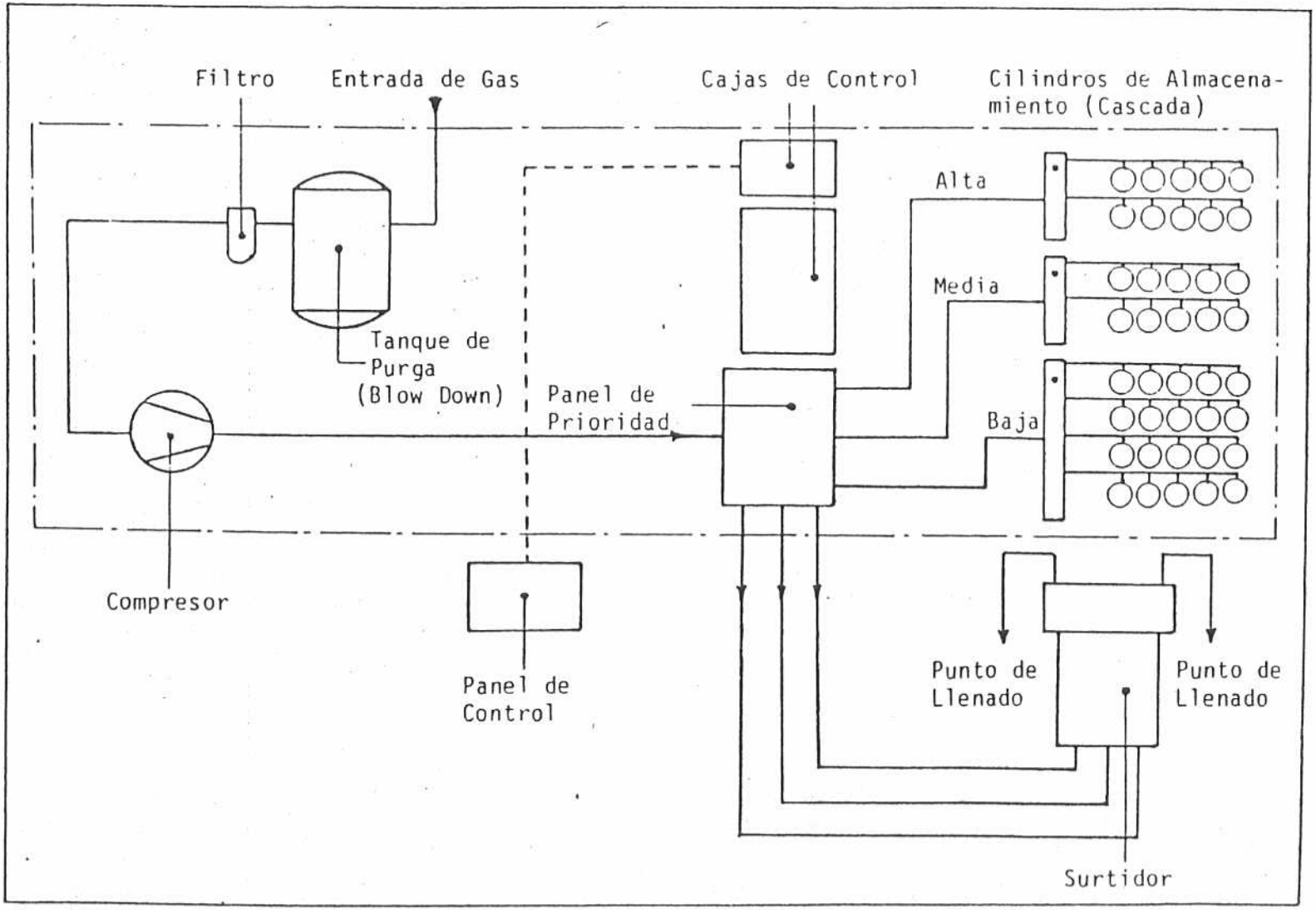
DIAGRAMA DE FLUJO DE UNA ESTACION DE LLENADO LENTO (TRICKLE FILL SYSTEM)



UCAB 247

DIAGRAMA DE FLUJO DE UNA ESTACION DE

LLENADO RAPIDO (FAST FILL SYSTEM)



APENDICE L

Especificaciones del Motor.

12.1. ESPECIFICACIONES DEL MOTOR

MOTOR

Para vehiculos 131 Mirafiori CL

(motor con árbol de levas en la culata)

		motor 1400	motor 1600
Modelo		131 C 000	131 C2 000
Número y posición cilindros		4 en línea	4 en línea
Diametro y carrera de los pistones	mm	78 x 71.5	84 x 71.5
Cilindrada total	cm³	1367	1585
Relación de compresión		9	9.1
Potencia máxima (DIN)	kW	51.5	62.5
	(CV)	(70)	(85)
Par máximo	N m	107.9	124.6
	(kgm)	(11)	(12.7)
Régimen correspondiente	r/m	3000	3000

Para vehiculos 131 Supermirafiori

(motores con dos árboles de levas en la culata)

		motor 1400	motor 1600	motor 2000
Tipo		131 C1.000	131 C3.000	131 C4 000
Número y posición cilindros		4 en línea	4 en línea	4 en línea
Diametro y carrera de los pistones	mm	78 x 71.5	84 x 71.5	84 x 90
Cilindrada total	cm³	1367	1585	1995
Relación de compresion		8.9	9	9
Potencia máxima (DIN)	kW	56.6	71.3	83.1
	(CV)	(77)	(97)	(113)
Par máximo	N m	109.9	127.5	166.8
	(kgm)	(11.2)	(13)	(17)
Régimen correspondiente	r/m	3800	3800	3 600

Distribución

			Para vehículos 131 mirafiori CL	Para vehículos Supermirafiori	
			motores 1 400 y 1 600	motor 1 400	motores 1 600 y 2 000
Árboles de levas y su posición			Un árbol en la culata	Dos árboles en la culata	
Sistema de arrastre			por correa dentada	por correa dentada	
Admisión	libre	antes del P M S	2°	17°	5°
	cierra	después del P M I	42°	37°	53°
Escape	libre	antes del P M I	42°	53°	53°
	cierra	después del P M S	2°	1°	5°
Huelgo de funcionamiento (con motor frío)					
admisión		mm	0,30	0,45	
escape		mm	0,40	0,50	
Huelgo para el control de la puesta en fase		mm	0,70	0,80	

Alimentación

Filtro de aire con cartucho de papel, con regulación termostática de la toma de aire

Bomba de alimentación de la gasolina, de mando mecánico

Carburador vertical de doble cuerpo, con stárter automático para el arranque en frío, bombas de aceleración mecánica y neumática, con funcionamiento por depresión con consentimiento por válvula térmica

Sistema de ventilación cerrada del motor, el que evita que los gases que se escapan de los cilindros y los vapores de aceite que se forman en el interior del motor se descarguen en la atmósfera

Carburadores

Para vehículos 131 mirafiori CL

	WEBER	SOLEX
motor 1 400	32 ADF 51	C 32 TEIE 7
motor 1 600	32 ADF 50	C 32 TEIE 8

Para vehículos 131 Supermirafiori

	WEBER	SOLEX
motor 1 400	32 ADF 52	C 32 TEIE 9
motor 1 600	32 ADF 53	C 32 TEIE 10
motor 2 000	34 ADF 54	

Bujías

Marelli	CW 7 LP
Champion	N 9 Y
Bosch	W 7 D
Fiat	1 L 4 J
Rosca	M 14 × 1,25
Distancia entre los electrodos	de 0,6 a 0,7 mm

Engrase

Activada por bomba de engranajes y válvula de descarga de la presión

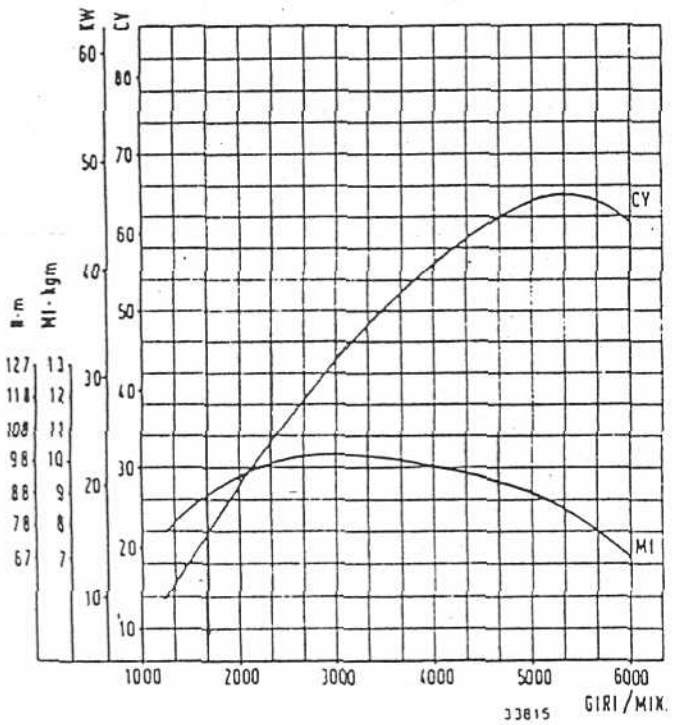
Depuración del aceite mediante filtro con cartucho de flujo total

Presión de engrase, con aceite a 100 C, de 3,43 a 4,90 bar (de 3,5 a 5 kg/cm²)

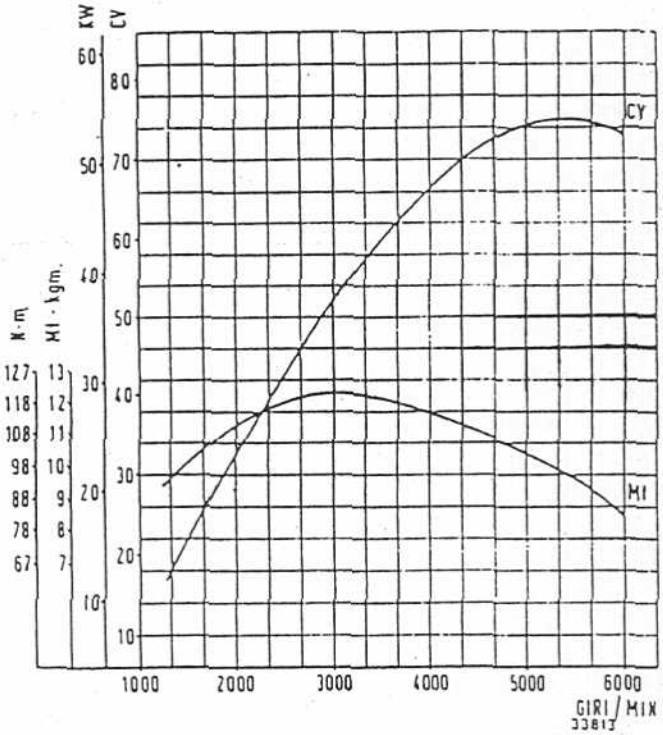
Encendido

Orden de encendido	1 3 4 2
Avance inicial de montaje	10°
Avance automático del distribuidor	
- para el modelo 131 mirafiori CL (motores 1 400 y 1 600) y el modelo 131 Supermirafiori (sólo motores 1 600 y 2 000)	24° ± 2°
- para el modelo 131 Supermirafiori con motor 1 400	28° ± 2°
Juego entre los contactos del ruptor en la posición de apertura	0,40 ± 0,03 mm

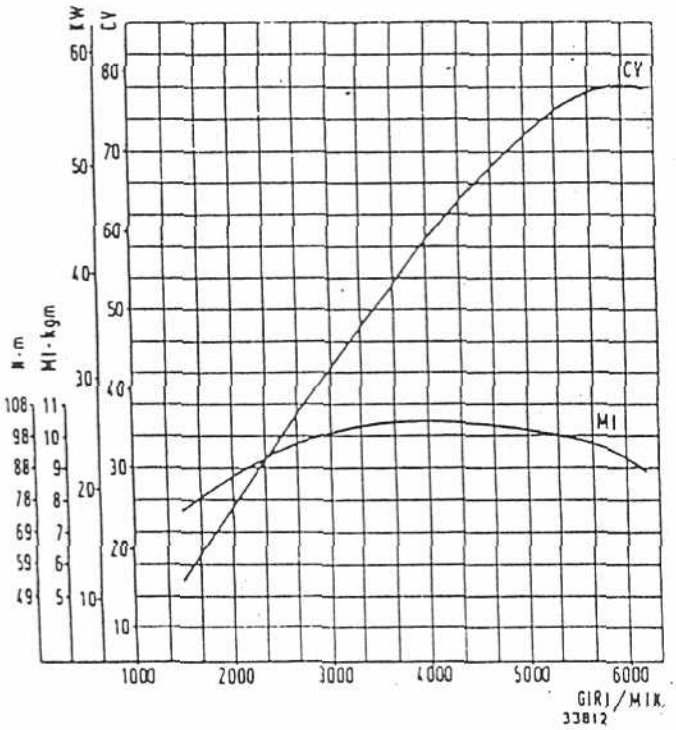
CURVAS CARACTERISTICAS DE LA PRUEBA AL BANCO DE LOS MOTORES OBTENIDAS POR EL METODO DIM



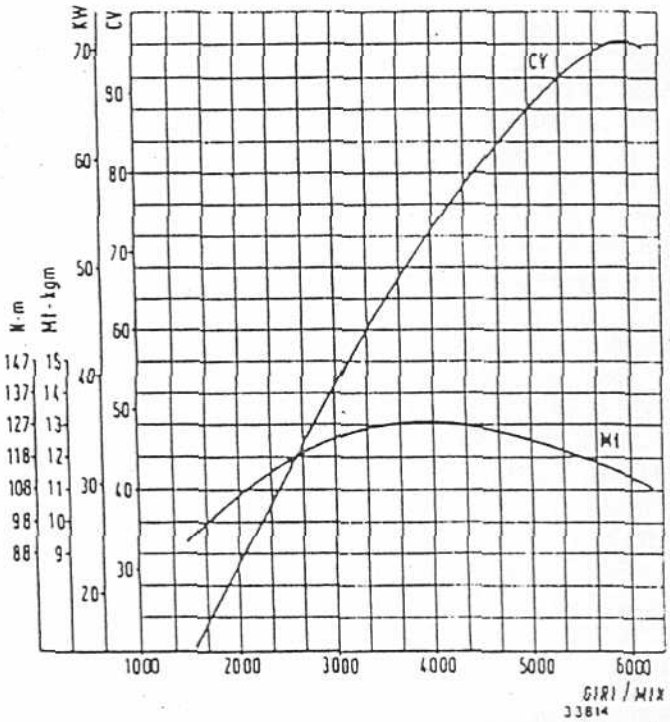
Curvas características de los motores Tipo 131 A.000 y 131 A.7000 (1300 Monoalbero).



Curvas características del motor tipo 131 A1.000 (1600 monoalbero).

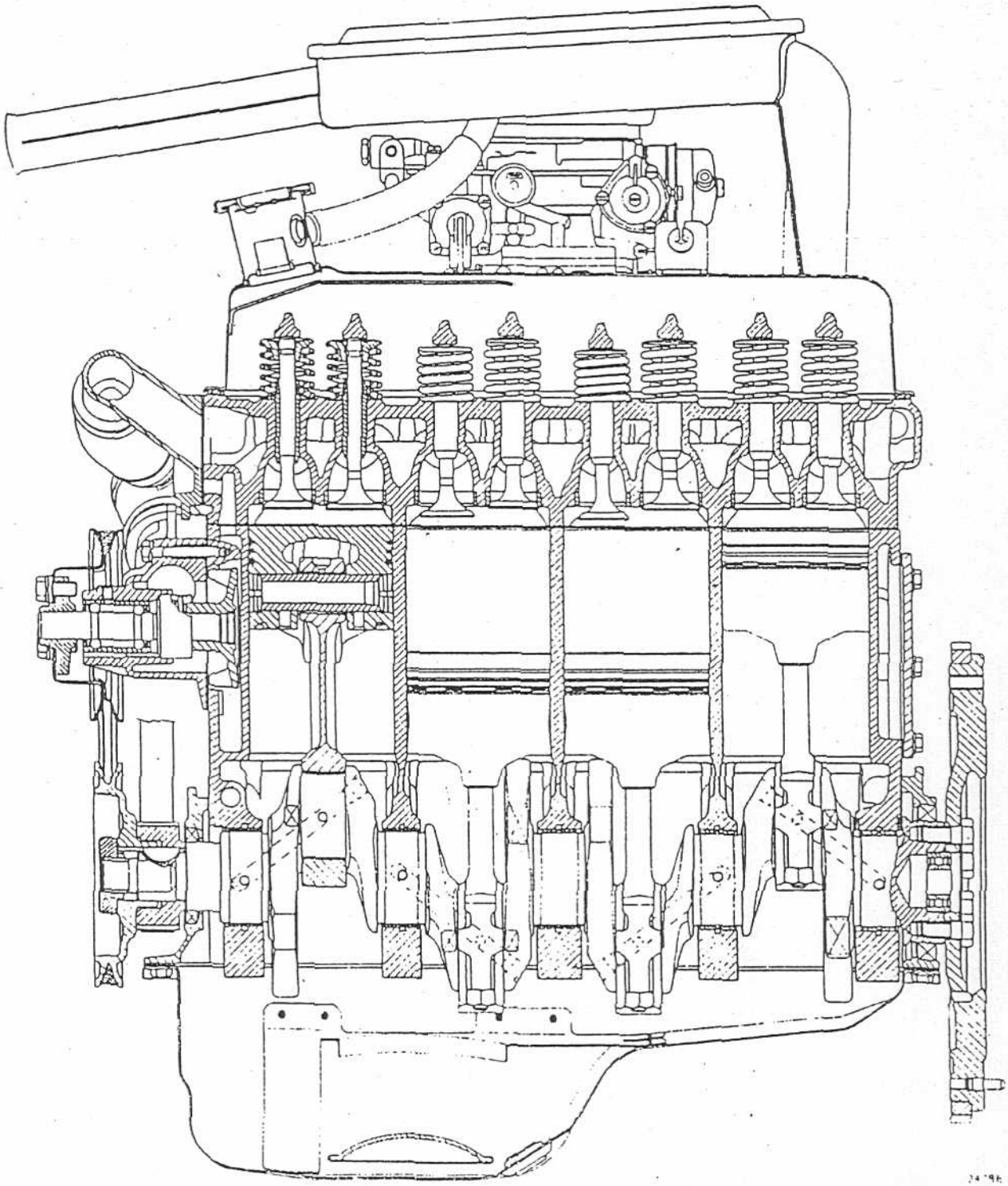


Curvas características de los motores Tipo 131 B.000 y 131 B7.000 (1300 Bialbero)



Curvas características del motor tipo 131 B.1000 (1600 Bialbero).

MOTOR 131 A1.000 (1.600)

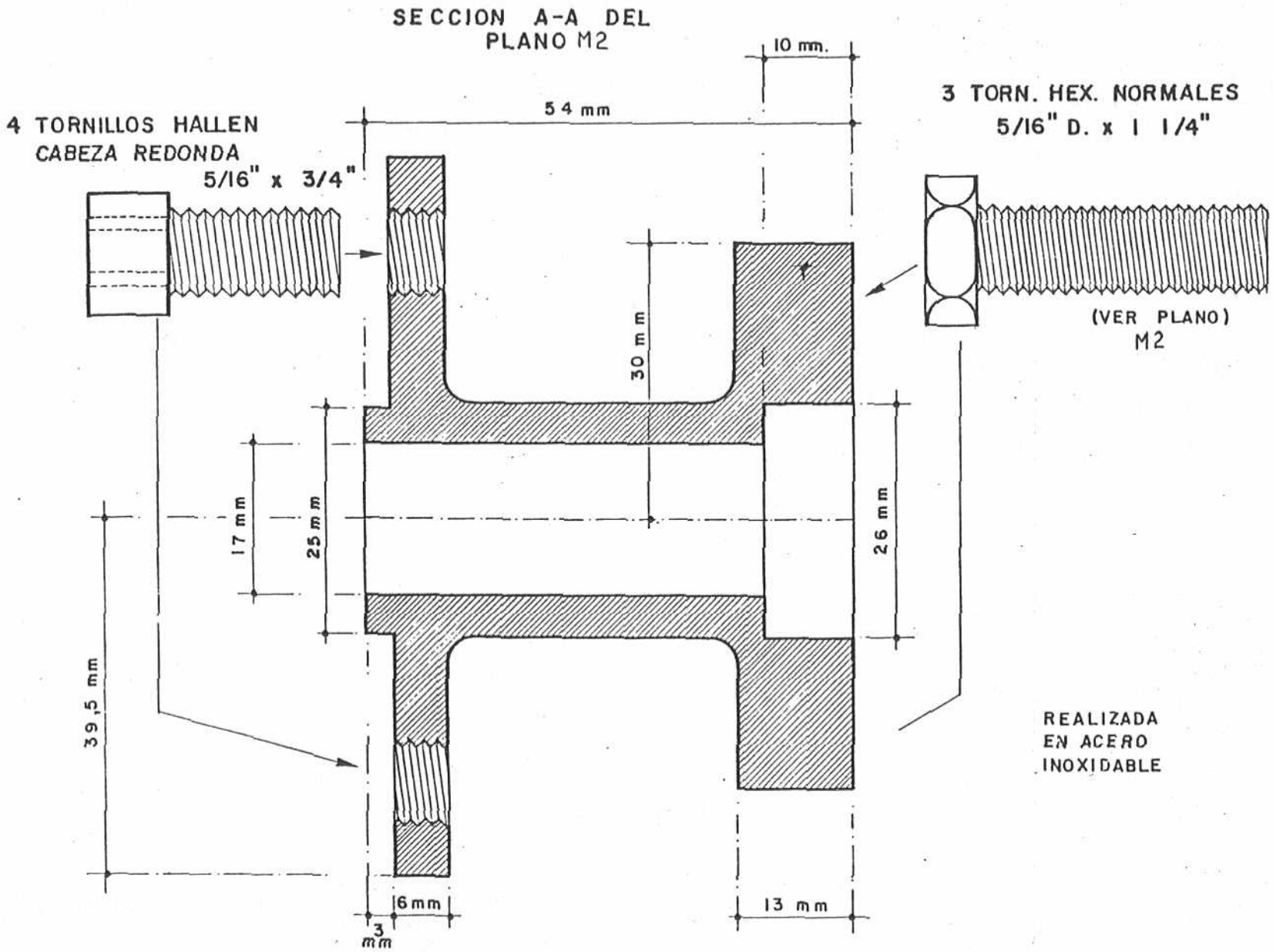


Sección longitudinal del motor 131 A1.000

La sección longitudinal del motor 131 A1.000 para las versiones con cambio automático, varía de esta sección, por la diposición de un volante en lámina y un distancial de centrado para el eje de toma.

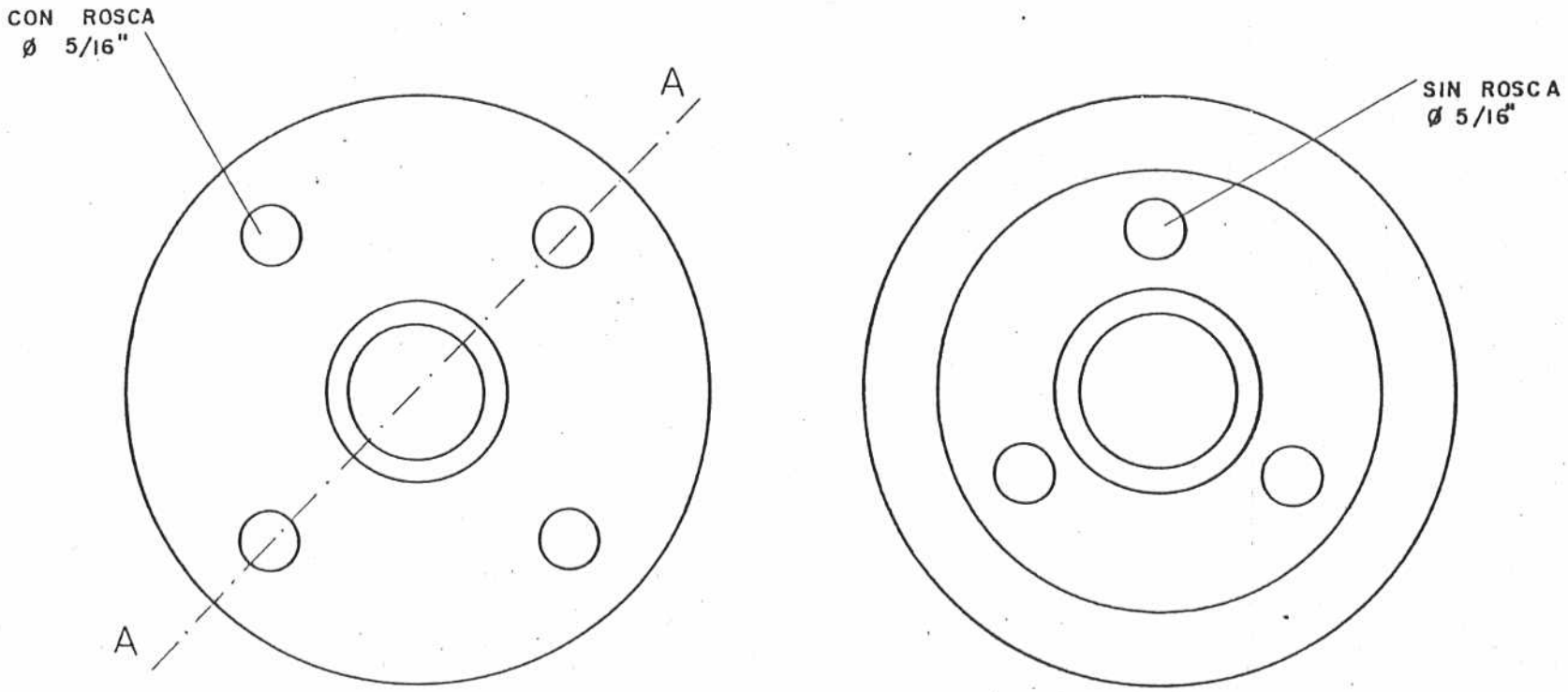
APENDICE M

Planos.



UNIVERSIDAD CATOLICA ANDRES BELLO FACULTAD DE INGENIERIA	EVALUACION DEL USO DEL GAS NATURAL PARA MOTORES DE COMBUSTION INTERNA CICLO OTTO	PIEZA DE ACOPLE DEL VENTILADOR	CALCULADO: IANNICELLI V. LA CIACERA A.	REVISADO: ING. MANUELA HERRERA		M1
			DIBUJADO: IANNICELLI V. LA CIACERA A.	FECHA: SEPT. 1.990	ESC.: 1 : 1.5	

UCAB 254

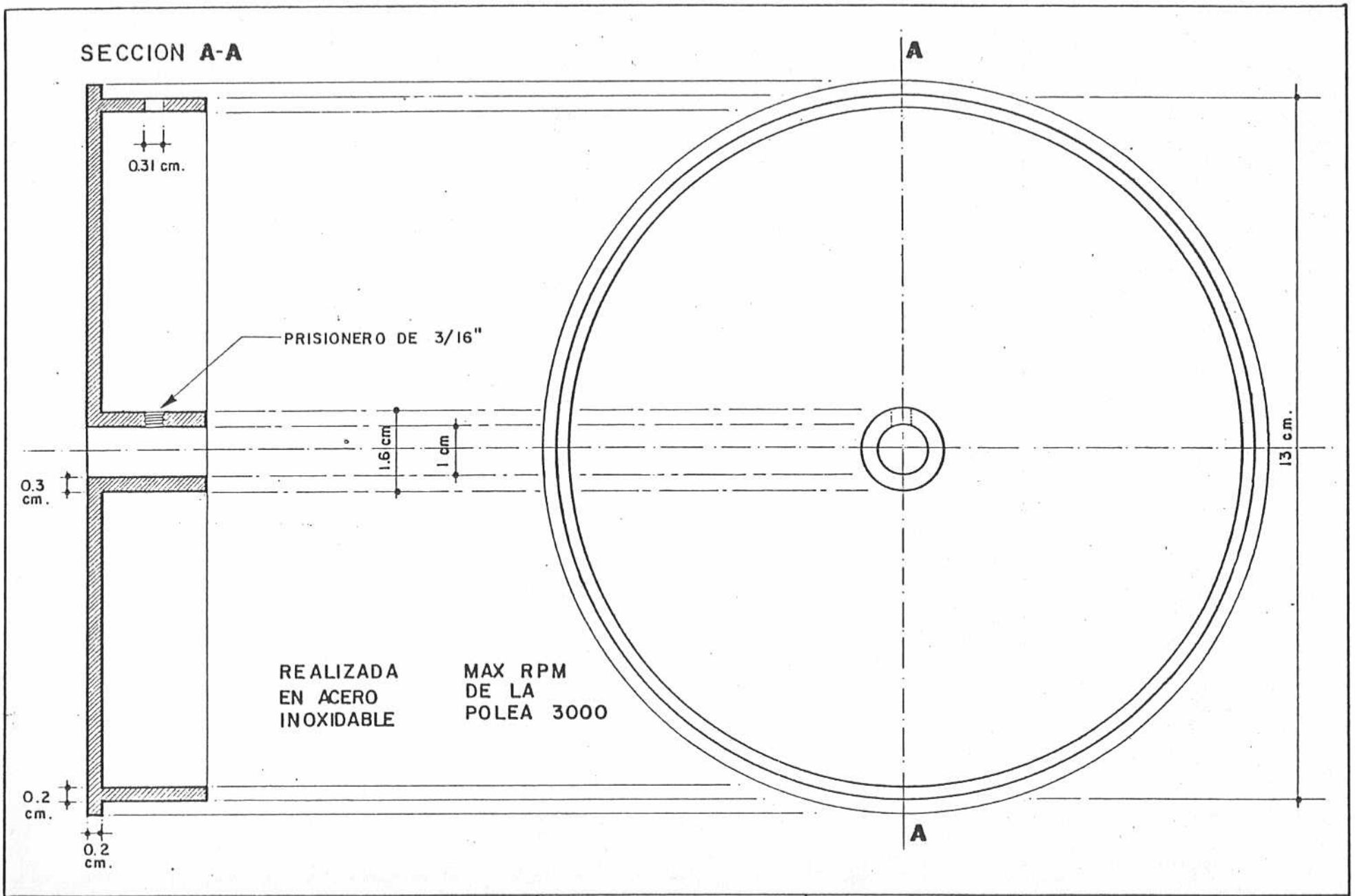


VISTA FRONTAL

VISTA POSTERIOR

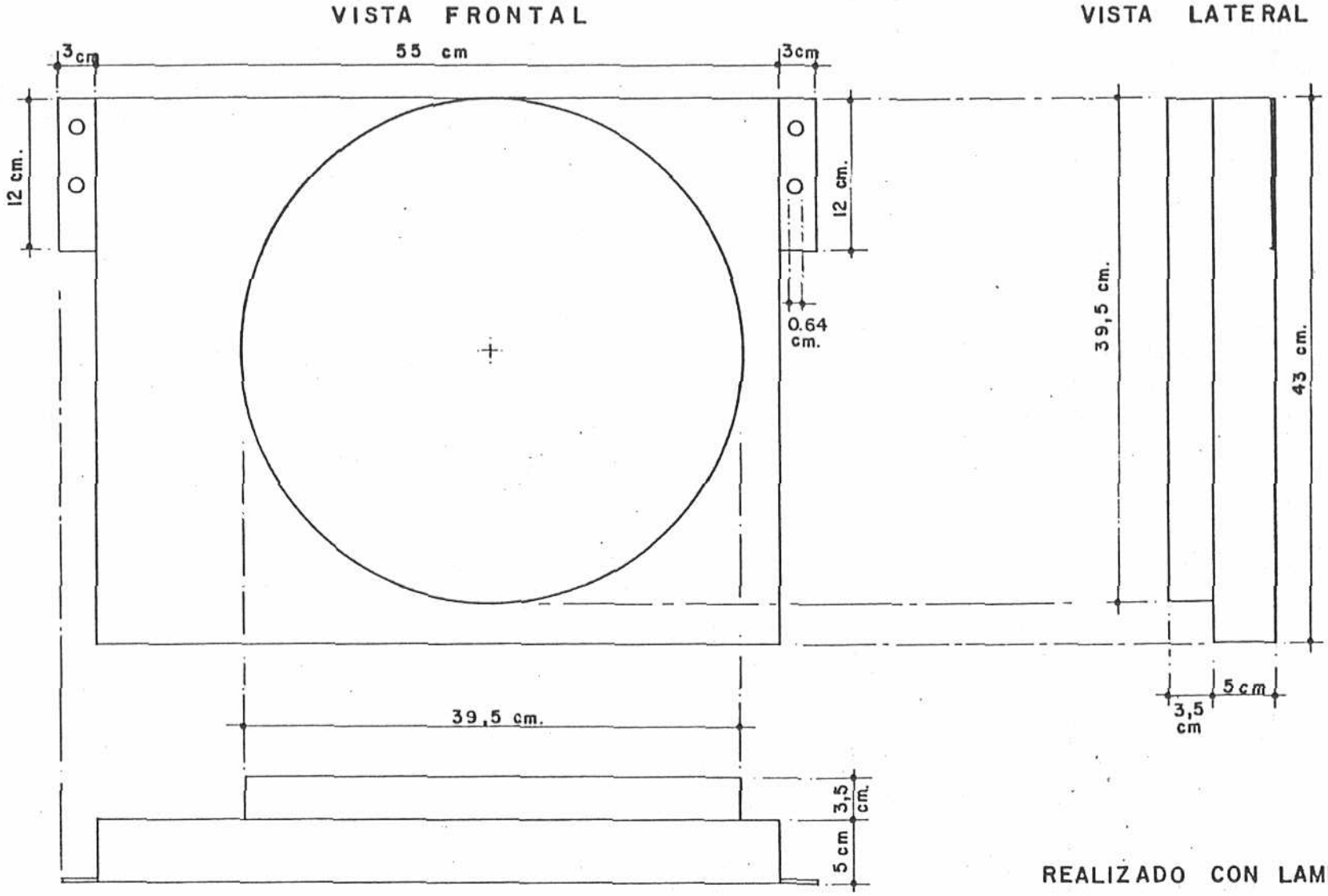
UNIVERSIDAD CATOLICA ANDRES BELLO FACULTAD DE INGENIERIA	EVALUACION DEL USO DEL GAS NATURAL PARA MOTORES DE COMBUSTION INTERNA CICLO OTTO	PIEZA DE ACOPLE DEL VENTILADOR	CALCULADO: IANNICELLI V. LA CIACERA A. DIBUJADO: IANNICELLI V. LA CIACERA A.	REVISADO: ING. MANUELA HERRERA FECHA: SEPT. 1990	ESCALA: 1:1	M2

UCAB 255



UNIVERSIDAD CATOLICA ANDRES BELLO FACULTAD DE INGENIERIA	EVALUACION DEL USO DEL GAS NATURAL PARA MOTORES DE COMBUSTION INTERNA CICLO OTTO	POLEA DEL TACOMETRO	CALCULADO: IANNICELLI V. LA CIACERA A.	REVISADO: ING. MANUELA HERRERA		M3
			DIBUJADO: IANNICELLI V. LA CIACERA A.	FECHA: SEPT. 1.990	ESCALA: 1 : 1	

UCAB 256



REALIZADO CON LAMINA DE HIERRO GALVANIZADO DE 1/16"

UNIVERSIDAD CATOLICA ANDRES BELLO FACULTAD DE INGENIERIA	EVALUACION DEL USO DEL GAS NATURAL PARA MOTORES DE COMBUSTION INTERNA CICLO OTTO	COLECTOR DEL VENTILADOR	CALCULADO: IANNICELLI V. LA CIACERA A.	REVISADO: ING. MANUELA HERRERA		M4
			DIBUJADO: IANNICELLI V. LA CIACERA A.	FECHA: SEPT. 1.990	ESCALA: 1:5	

UCAB 257

CALCULO DE LA PIEZA DE ACOPLE DEL VENTILADOR

La pieza de acople del ventilador se encuentra sometida a una serie de esfuerzos, entre ellos: esfuerzo por flexión, por tracción, por aplastamiento, por torsión. Siendo éste último el más importante.

El ventilador utilizado, no absorve más de 1/2 hp a máximo caudal, y si se toma un valor de 1 kw (mayor a 1/2 hp) como potencia necesaria para mover el ventilador a 6.000 RPM, se tiene que el momento torsor es de:

$$T = \frac{P}{2.\pi.f} = \frac{1\times10^{3}\ W}{2.\pi\,(100\ Rev/seg)} = 1{,}592\ Nm$$

de aquí, que siendo el eje, un eje hueco, el valor del esfuerzo cortante máximo viene dado por:

$$\tau_{máx} = \frac{16.T.D}{\pi.(D^4 - d^4)} = \frac{16(1{,}592)(0{,}026)}{\pi.((0{,}026)^4 - (0{,}017)^4)} = 0{,}564\ MN/m^2$$

tal resultado implica un sobredimensionamiento a la torsión, ya que el acero inox. soporta un esfuerzo cortante por encima de 150 MN/m^2. Hay que destacar que el mayor esfuerzo se presenta en el cambio de sección (por concentración de esfuerzos), pero el sobredimensionamiento anterior es de tal

magnitud que se garantiza también en los puntos críticos el esfuerzo admisible.

El otro esfuerzo importante es el esfuerzo cortante, al que estan sometidos los tornilos que sujetan a la pieza de acople, en la polea, y a los tornillos que sujetan el ventilador, en la pieza de acople. Para los primeros el esfuerzo cortante viene dado por:

$$\tau'_{max} = \frac{T}{(\pi \cdot d^2/4)R.n} = \frac{1,592}{(0,004)^2.3.(0,021)} = 0,503 \ MN/m^2$$

mietras que para los segundos:

$$\tau'_{max} = \frac{T}{(\pi \cdot d^2/4)R.n} = \frac{1,592}{(0,004)^2.4.(0,029)} = 0,277 \ MN/m^2$$

Ambos esfuerzos son mucho menores que el esfuerzo máximo que soporta el acero (Material de los tornillos).