

Universidad Nacional de Ingeniería

Facultad de Ingeniería Mecánica



**Estudio Teórico Experimental de un Motor
Diesel de Aspiración Natural en un Banco
de Pruebas para Simulación de la Altura
(Sin Regulación)**

T E S I S

Para Optar el Título Profesional de

INGENIERO MECANICO

PEDRO FLORES CELIS

Promoción 1978 - 2

L i m a - P e r ú

1986

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

Quiero hacer un especial agradecimiento al Dr. Ph. Abelardo Ludeña y al Ing. Antonio García LL. por su reconocida labor de - asesoría, así como por el manifiesto interés en desarrollar temas de investigación en la Universidad.

También debo mencionar a mis colegas, Ings. Guillermo Lira, José Gallardo, por su valiosa colaboración y estimables sugerencias en el desarrollo de este trabajo.

A todo el personal que labora en el Laboratorio de Máquinas Térmicas e Hidráulica de la UNÍ, en especial al Sr. Luis Tapia, quienes fueron de gran ayuda para llevar a cabo la parte experimental.

Deseo, asimismo, dar las gracias a la Srta. Mabel Pereyra F. por su cuidadosa labor en el mecanografiado.

R E S U M E N

En esta tesis se ha realizado un estudio teórico-experimental sobre la influencia de la altura en los diferentes parámetros que condicionan el óptimo rendimiento del motor de encendido por compresión o Diesel. Este análisis resulta necesario por el beneficio económico que tendría en nuestro país, dadas las particulares condiciones geográficas de nuestro medio, la solución parcial o total de los problemas originados en la altura.

Primeramente, se efectuó un estudio teórico integral del efecto de la altura en cada uno de los procesos térmicos del ciclo real de los motores de encendido por compresión. De este estudio se desprende que, básicamente la reducción del flujo de masa de aire por la menor densidad al final del proceso de compresión y la imposibilidad de utilizar eficazmente todo el combustible enviado por la bomba de inyección empeora el proceso de combustión, originando una excesiva penetración del combustible a la cámara de combustión, mayor retardo del encendido, con los consecuentes efectos negativos en el motor.

Así mismo, se presenta una secuencia de cálculo teórico, elaborado en base al estudio realizado y a algunas relaciones matemáticas dadas por otros autores, lo cual permite predecir la variación de los principales parámetros del motor con la altura.

Para realizar la parte experimental, se construyó un banco de pruebas, cuyo diseño fue efectuado de tal manera que permite realizar

variaciones controladas en los parámetros de regulación, con una rápida estabilización del vacío requerido para simular las condiciones de altura.

Una vez instalado el banco de pruebas, dotado con los instrumentos de medición requeridos y debidamente calibrados, y verificado su funcionamiento, se procedió a realizar las pruebas experimentales, sin regulación alguna del motor para condiciones de altura, obteniéndose las curvas características del motor a nivel del mar y, la variación y tendencia de los principales parámetros para diferentes alturas. Es conveniente precisar que las referidas pruebas experimentales se realizaron en forma conjunta con el Sr. Guillermo Lira C. en el Laboratorio de Máquinas Térmicas de la UNI durante el año 1979.

Los resultados muestran que la caída de potencia a grandes alturas es bastante significativa y su consumo específico de combustible elevado y, que manteniendo los valores del coeficiente de exceso de aire en límites aceptables, es posible optimizar su consumo sin disminuir notablemente su potencia efectiva.

Los resultados experimentales obtenidos que verifican las predicciones teóricas, corroboran la propiedad del método utilizado para la simulación de la altura con un banco de pruebas versátil y económico y, determinan los sólidos lineamientos necesarios para estudios posteriores que nos permitan un ahorro significativo de combustible y compensar la pérdida de potencia en la altura de los motores de encendido por compresión de aspiración natural.

I N D I C E
*****INTRODUCCION

- CAPITULO I : ESTUDIO TEORICO DE LA INFLUENCIA DE LA ALTURA EN EL CICLO DE LOS MOTORES DE ENCENDIDO POR COMPRESION.
- 1.1. Proceso de Admisión y Escape
 - 1.2. Proceso de Compresión
 - 1.3. Proceso de Combustión
 - 1.4. Proceso de Expansión
 - 1.5. Parámetros básicos del ciclo
- CAPITULO II : CALCULO TERMICO DE UN MOTOR DIESEL A NIVEL DEL MAR Y A DIFERENTES ALTURAS.
- 2.1. Cálculo Térmico para el motor Petters LHW
 - 2.2. Construcción de las curvas características externas de velocidad
- CAPITULO III : METODOS EXPERIMENTALES PARA EFECTUAR EL ESTUDIO DE LOS MOTORES DE COMBUSTION INTERNA.
- 3.1. Cámara Acondicionada
 - 3.2. Acondicionamiento del aire de ingreso
 - 3.3. Método de estudio experimental "in situ" del motor

CAPITULO IV : ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO DEL MOTOR DIESEL EN LA ALTURA

4.1. Descripción del banco de pruebas experimental

4.2. Equipos e instrumentos utilizados

4.3. Curvas características del Motor Diesel para diferentes alturas sobre el nivel del mar, con regulación óptima para su funcionamiento a nivel del mar.

4.3.1. Fórmulas Utilizadas

4.3.2. Curvas Características

CAPITULO V : ANALISIS COMPARATIVO DE LAS CURVAS TEORICAS Y PRACTICAS

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFIA

ANEXO N° 1 : CALCULO TERMICO DEL MOTOR DIESEL DE ASPIRACION NATURAL PARA DIFERENTES ALTURAS

ANEXO N° 2 : COSTOS DEL ACONDICIONAMIENTO DEL BANCO DE PRUEBAS

INTRODUCCION

En los últimos años, el uso de los motores Diesel en los vehículos de transporte se ha acrecentado notablemente, y debido a sus múltiples aplicaciones industriales se utiliza en centro mineros, comunidades campesinas, centros poblados de nuestra serranía, los cuales están ubicados en lugares de gran altitud.

El presente estudio tiene como propósito, analizar la influencia de la altura en los distintos parámetros que determinan los procesos térmicos en el motor Diesel y, que originan un empeoramiento de su potencia y economía.

La potencia efectiva de un motor Diesel depende fundamentalmente de la densidad del aire, de la utilización del aire y de la eficiencia de la combustión. Estos factores son considerados para lograr un óptimo rendimiento en condiciones normales de funcionamiento.

Debido a la variación de las condiciones atmosféricas con la altura, especialmente por la menor densidad del aire, al aumentar la altura disminuye la potencia proporcionada por el motor y aumenta el consumo específico de combustible, además que las condiciones de trabajo son cada vez más exigentes. El proceso de combustión también se ve afectado por la altura, ya que el motor es incapaz de poder utilizar todo el combustible inyectado debido a la reducción del flujo de masa de aire, cuyo resultado es altas temperaturas en la combustión con el consiguiente recalentamiento del émbolo, culata de los cilindros, formación de sarro ó carbonilla en el

interior del cilindro y altas temperaturas de los gases de escape. Todas estas deficiencias en la altura provocan mayores costos de operación, mayores costos de mantenimiento y reducción de la vida útil del motor.

Parque Diesel que se utiliza en la Serranía Peruana

El alza desmedida del costo de los combustibles, ha originado un -
incesante crecimiento del número de vehículos equipados con moto-
res Diesel que conforman nuestro parque automotor, teniendo como ra-
zones fundamentales que, a diferencia de los motores de encendido -
por chispa (ECH), los motores Diesel tienen un menor consumo espe-
cífico de combustible y disminuídos los porcentajes de los componen-
tes tóxicos en los gases de escape, trabajando en condiciones ambien-
te normales.

Para tener una idea del número de motores Diesel que circulan por -
nuestra serranía, utilizamos información proporcionada por el Minis-
terio de Transportes y Comunicaciones, lo cual podemos resumir en -
el siguiente Cuadro, que reúne los tramos de carretera en las cuales
es elevado el índice medio diario anual (I.M.D.) de vehículos [?].

Cabe destacar que en el tramo San Mateo-Morococha, en el cual más -
del 60% de su I.M.D. anual de vehículos está compuesto por motores
Diesel, transmonta la cordillera en el paso de Anticoná a 4,843 me-
tros de altura.

Como podemos apreciar, el número de motores Diesel utilizados en -

T A B L A N O 1

INDICE MEDIO DIARIO ANUAL Y PORCENTAJE DE VEHICULOS

C A R R E T E R A	AÑO 1977			AÑO 1982		
	I.M.D. ANUAL	% OMNIBUSES	% VEHICULOS DE CARGA	I.M.D. ANUAL	% OMNIBUSES	% VEHICULOS DE CARGA
Lima-Aeropuerto Internacional	38086	16.42	17.70	43145	11.6	11.7
Chosica-Ricardo Palma	3536	20.9	30.0	3964	9.0	13.6
Ricardo Palma-Matucana	2115	7.6	48.27	2299	*	52.5
Matucana-San Mateo	1864	9.7	54.2	-	-	-
San Mateo-Morococha	1445	9.8	56.0	-	-	-
Morococha-Oroya	2122	12.6	41.0	2307	11.7	46.8
Concepción-Huancayo	2205	18.86	17.55	-	-	-
Unish-Cerro de Pasco	658	9.8	53.5	595	15.6	56.1
Repartición-Arequipa	1961	7.8	29.3	2310	*	30.86

* Porcentaje incluido en vehículos de carga.

omnibuses y vehículos de carga, que funcionan en grandes alturas - es elevado, aún sin considerar los motores Diesel estacionarios, - para labores agrícolas, mineras, y otros usos que se les da en zonas de gran altitud de nuestro País.

Por lo expuesto, es imprescindible realizar este estudio como una forma de poder encarar este agudo problema, utilizando para este - fin, la variación de las condiciones ambientales con la altura de acuerdo a las características especiales de nuestra atmósfera.

Características de la atmósfera Peruana

Es conveniente aclarar que, la experiencia extranjera respecto a - la influencia de la altura en la potencia y economía del motor, sólo se circunscribe a alturas menores de 3,000 metros sobre el nivel del mar, además, que se ha tomado en cuenta para estos trabajos de investigación 13, los datos de las propiedades del aire normal - en función de la elevación según la International Normal Atmosphere (INA), que ha sido establecido para comparar prototipos de aviones, misiles y cohetes.

Para determinar la variación de presión con la altura, usamos la siguiente relación:

$$\frac{\partial P}{\partial h} = -\gamma \quad , (1)$$

hallada mediante la ecuación de equilibrio de las fuerzas que actúan sobre el elemento infinitesimal de fluido en reposo, deduciéndose -

que la presión varía únicamente en la dirección en que actúa la gravedad.

El peso específico γ se halla de la conocida relación:

$$\gamma = \frac{P g}{R T} \quad , (2)$$

donde P-presión del aire; g- fuerza de la gravedad; R- constante universal de los gases para el aire; T- temperatura del aire. La INA, supone una variación lineal de la temperatura con la altura que es la siguiente:

$$T = T_0 + K h$$

donde T_0 - temperatura del aire a condiciones normales, 288°K ; K- constante, $- 0.0065$; h- altura s.n.m., en metros.

Derivando la expresión anterior, tenemos:

$$\delta T = K \delta h \quad , (3)$$

Reemplazando las ecuaciones (2) y (3) en (1) e integrando, obtenemos:

$$P = P_0 \left[\frac{T_0}{T_0 + K h} \right]^{g/KR} \quad , (4)$$

Por lo tanto, obtenemos la siguiente expresión:

$$P = P_0 \left[\frac{288}{288 - 0.0065 h} \right]^{-5.2586}$$

Esta fórmula nos da la variación de la presión con la altura según INA y que se encuentra tabulada en el Cuadro N° 2.

La Corriente del Niño y la Cordillera de los Andes determina una configuración singular en el medio geográfico peruano que no responde ciertamente a su situación geográfica de País tropical.

Para alturas superiores a 3,000 mts., la diferencia de temperaturas es notable en un solo día, existiendo marcada diferencia entre el día y la noche.

En el Cuadro N° 3 se indican las temperaturas promedio del aire atmosférico de ciudades que se encuentran a diversas alturas y que se caracterizan por tener un elevado índice medio vehicular [5].

En la Figura N° 1 se han graficado los valores de las temperaturas dados en la tabla anterior y, que para efectos de simplificar la fórmula usada, se toman 2 rectas promedio para la variación de la temperatura y que siguen las siguientes leyes:

$$T = 291.81 - 0.00152 h, \text{ para } 0 < h < 3000 \text{ mts.}$$

$$T = 308.9 - 0.00714 h, \text{ para } 3000 < h < 5000 \text{ mts.}$$

T A B L A N O 2

VARIACION DE LAS PROPIEDADES DEL AIRE EN
FUNCION DE LA ALTURA (INA)

ALTITUD METROS s.n.m.	PRESION ATMOSFERICA		TEMPERATURA		DENSIDAD Kg/m ³	RELACION DE PRESIONES P/P ₀	DENSIDAD RELATIVA P/P ₀
	Bar	Kg/cm ²	t° C	T° K			
0	1.013	1.033	15.00	288.00	1.225	1.000	1.000
500	0.953	0.972	11.75	284.75	1.166	0.942	0.953
1000	0.900	0.917	8.50	281.50	1.111	0.887	0.907
1500	0.847	0.864	5.25	278.25	1.058	0.835	0.864
2000	0.796	0.811	2.00	275.00	1.006	0.785	0.823
2500	0.748	0.763	- 1.25	271.25	0.957	0.737	0.781
3000	0.701	0.715	- 4.50	268.50	0.909	0.692	0.742
3500	0.658	0.671	- 7.75	265.25	0.863	0.649	0.704
4000	0.616	0.628	- 11.00	262.00	0.819	0.608	0.669
4500	0.578	0.589	- 14.25	258.75	0.777	0.570	0.634
5000	0.540	0.550	- 17.50	255.50	0.736	0.533	0.600

T A B L A N O 3

PROPIEDADES DEL AIRE ATMOSFERICO A DIFERENTES
ALTURAS s.n.m. EN EL PERU

L U G A R	ALTITUD m.s.n.m.	TEMPERATURA ATMOSFERICA	
		t° C	T° K
Aeropuerto Internacional- Callao	13	18.81	291.81
Ricardo Palma (Lima)	1040	18.00	291.00
Matucana (Huarochiri)	2020	15.24	288.24
Arequipa	2332	13.60	286.60
San Mateo	3020	15.56	288.56
Huancayo	3350	12.00	285.00
Casapalca	4010	8.50	281.50
Cerro de Pasco	4333	4.10	277.10

T A B L A N O 4

PROPIEDADES DEL AIRE ATMOSFERICO EN EL PERU

ALTITUD m.s.n.m.	PRESION ATMOSFERICA		TEMPERATURA		DENSIDAD Kg/m ³ .	RELACION DE PRESIONES P/P ₀	DENSIDAD RELATIVA ρ/ρ_0
	Bar	Kg/cm ²	t° C	T° K			
0	1.013	1.033	18.81	291.81	1.210	1.000	1.000
500	0.955	0.974	18.04	291.04	1.143	0.943	0.946
1000	0.900	0.918	17.28	290.28	1.080	0.889	0.893
1500	0.848	0.865	16.50	289.50	1.021	0.837	0.844
2000	0.800	0.816	15.76	288.76	0.965	0.790	0.799
2500	0.753	0.768	15.00	288.00	0.911	0.744	0.754
3000	0.718	0.732	14.50	287.50	0.870	0.709	0.720
3500	0.676	0.689	10.90	283.90	0.830	0.667	0.686
4000	0.637	0.649	7.35	280.35	0.792	0.628	0.654
4500	0.598	0.610	3.78	276.78	0.753	0.591	0.623
5000	0.562	0.573	0.20	273.20	0.717	0.555	0.593

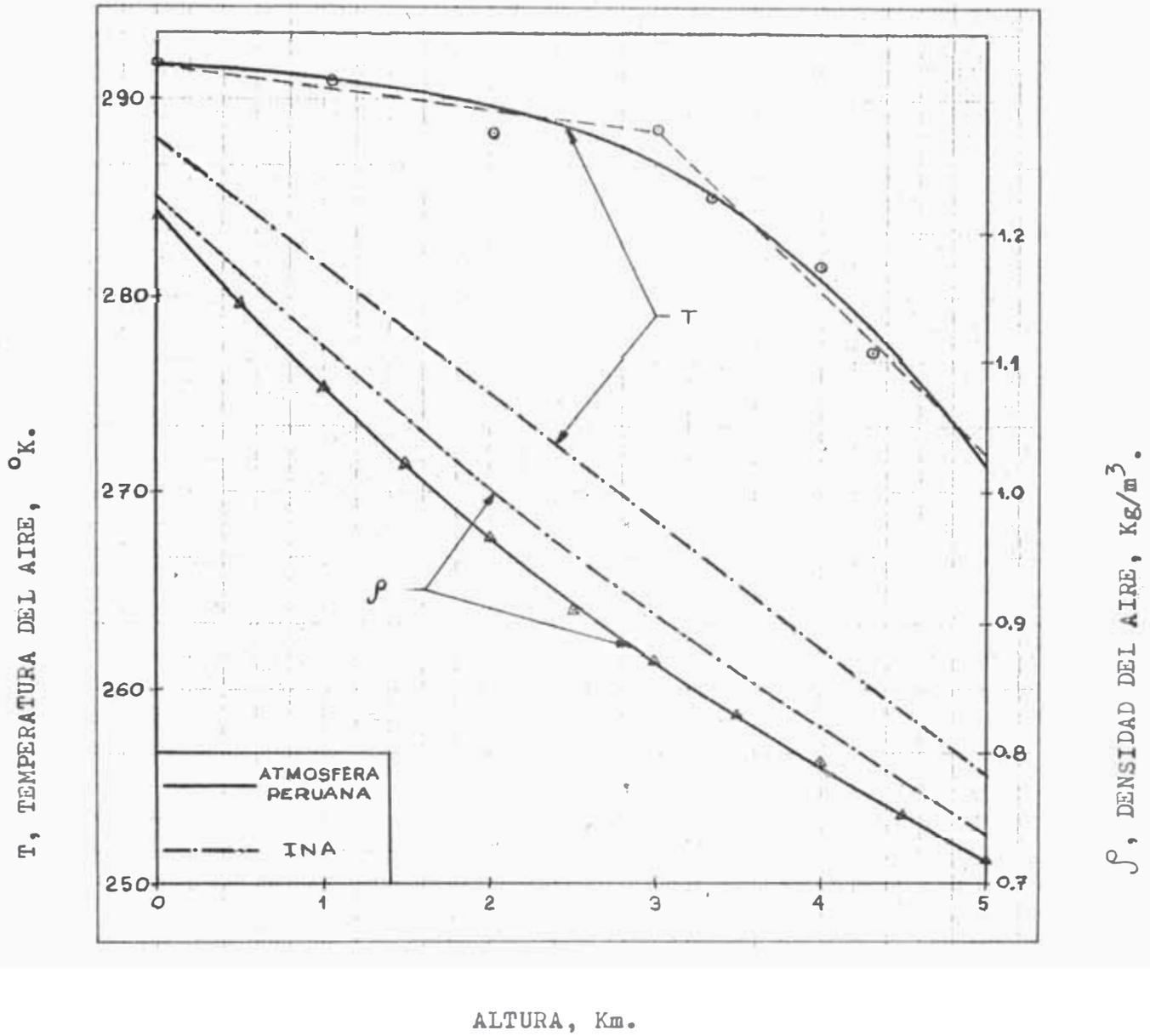


Fig. Nº 1.- Variación de la densidad y temperatura del aire con la altura.

De donde podemos obtener de acuerdo con la ecuación (4) los valores que se dan en la tabla N^o 4.

Estos datos han sido graficados en la Figura N^o 1 conjuntamente con los valores dados por la INA.

Se observa la notable diferencia de temperatura para una altura dada y la menor densidad del aire de la atmósfera peruana, hecho que influye negativamente en el rendimiento económico del motor.

C A P I T U L O I

ESTUDIO TEORICO DE LA INFLUENCIA DE LA ALTURA EN EL CICLO DE LOS
MOTORES DE ENCENDIDO POR COMPRESION

La variación con la altura, de los diferentes parámetros que determinan el carácter de los procesos en el ciclo de los motores Diesel, está basado en un análisis cualitativo, el cual le dá una tendencia determinada y que son complementadas con fórmulas semianalíticas dadas por ciertos autores [4, 9].

Es de esta forma que se puede utilizar los cálculos teóricos que vinculan el comportamiento general del motor y que nos permiten predecir los parámetros de salida del motor.

1.1. Proceso de Admisión

La composición del aire atmosférico es ilustrada en la Tabla Nº 5.

Esta composición del aire varía sensiblemente sólo para alturas que superan los 20 km., por lo tanto, se mantiene constante dicha composición para este estudio. De igual forma la composición del combustible hidrocarburo no varía con la altitud.

Durante el proceso de admisión existen pérdidas hidráulicas en el sistema que hacen que la presión en el cilindro al final de la admisión sea menor que la atmosférica.

Estas pérdidas se incluyen en la fórmula siguiente:

T A B L A N O 5

PRINCIPALES CONSTITUYENTES DEL AIRE

CONSTITUYENTE	SIMBOLO	PESO MOLE- CULAR, KG	ANALISIS VOLUMETRICO	PESO RELATIVO	ANALISIS VOLUMETRICO	VOLUMEN RELATIVO	ANALISIS EN PESO
Oxígeno	O ₂	31.998	0.2095	6.704	0.210	1	0.231
Nitrógeno	N ₂	28.013	0.7809	21.876	0.790	3.773	0.769
Argón	A	39.948	0.0093	0.372			
Dióxido de Carbono	CO ₂	44.010	0.0003	0.013			
Aire Total			1.000	28.965	1.000	4.773	1.000

$$\Delta P_a = (1 + \xi) \frac{C_{val}^2}{2 \cdot 10^5} \times \rho \quad \text{bar} , \quad (5)$$

Donde ξ - coeficiente de resistencia al paso del aire en el sistema de admisión referido a la sección de paso de la válvula; C_{val} - velocidad media del aire en el sección de paso de la válvula, en m/seg; ρ - densidad del aire a las condiciones del medio ambiente, en Kg/m³.

La velocidad media del aire C_{val} varía con la altura según la relación siguiente [12]:

$$\frac{C_{val_H}}{C_{val_0}} = \sqrt{\frac{T_H}{T_0}} \quad , \quad (6)$$

donde T- temperatura del aire atmosférico, en K^o; los sub-índices "0" y "H" nos indican condiciones de referencia a nivel del mar y a una altura dada respectivamente. Por lo cual, la caída de presión en el sistema de admisión varía aproximadamente con la altura de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\frac{\Delta P_{a_H}}{\Delta P_{a_0}} = \left[\frac{C_{val_H}}{C_{val_0}} \right]^2 \times \frac{\rho_H}{\rho_0}$$

Reemplazando y simplificando, obtenemos:

$$\frac{\Delta P_{aH}}{\Delta P_{aO}} = \frac{P_H}{P_O}, \quad (7)$$

donde P-presión del aire atmosférico, en bar.

La presión en el cilindro al final de la carrera de admisión es:

$$P_a = P - \Delta P_a, \quad (8a)$$

Por lo tanto, la variación con la altura de P_a es dada por la siguiente expresión:

$$\frac{P_{aH}}{P_{aO}} = \frac{P_H}{P_O}, \quad (8b)$$

Al disminuir la presión atmosférica, disminuye la masa de aire aspirado aún cuando la temperatura del aire en la altura también - disminuye, ésto es debido a que esta última lo hace más lentamente que la presión.

Una menor masa de aire aspirado trae como consecuencia que disminuya la cantidad de combustible que puede quemarse, con lo cual amimora la potencia indicada.

La masa de la carga o alimentación introducida al cilindro se define en función del rendimiento volumétrico que relaciona:

$$\eta_v = \frac{G_a}{G_o} \quad , (9)$$

donde G_a - cantidad real de carga fresca introducida por ciclo al cilindro, en Kg; G_o - cantidad de carga fresca que sería introducida en el volumen desplazado en condiciones del medio ambiente, en Kg. La variación de la eficiencia volumétrica con la altura es aproximadamente una función de la temperatura del aire de ingreso.

Esta variación es explicable ya que si la temperatura del aire disminuye, la diferencia de temperaturas entre las paredes del cilindro y las válvulas con el aire aumenta y por lo tanto, aumenta la transmisión de calor enrareciendo aún más la carga fresca.

La conocida relación [9] es la siguiente:

$$\frac{\eta_{v_H}}{\eta_{v_o}} = \sqrt{\frac{T_H}{T_o}} \quad , (10)$$

donde T- temperatura del aire atmosférico, en $^{\circ}\text{K}$.

La cantidad de combustible inyectado en cada cilindro por ciclo depende del requerimiento de carga, dependiendo la cantidad máxima de combustible del aire de admisión.

Según Lichty [2] tenemos la siguiente relación:

$$\Delta G_c \sim n_o \times d_o^2 \times (\Delta p)^{0.5} \times t$$

donde ΔG_c - combustible inyectado por ciclo; n_o - número de orificios en la tobera del pulverizador; d_o - diámetro de los orificios de la tobera del pulverizador; Δp - diferencia entre la presión de inyección y la presión de la cámara de combustión; t - tiempo de inyección.

Si el motor trabaja a plena carga y a igual RPM, para diferentes condiciones atmosféricas, tendremos que:

$$\Delta G_c \sim \Delta p^{0.5}$$

La disminución de la presión atmosférica con la altura, aminora la presión en la cámara de combustión al momento de la inyección, en tanto que la presión de inyección de combustible permanece prácticamente constante, lo que trae como resultado, de acuerdo a la expresión anterior, que ΔG_c aumente con la altura ($\sim 1\%$ cada 1000 mts.)

Para que el combustible inyectado se combustione eficientemente debe existir un exceso de aire, a condiciones normales, el cual es de 25 a 50% superior a la relación aire/combustible estequiométrica, a plena carga.

El coeficiente de exceso de aire se define como:

$$\alpha = \frac{G_a}{G_c l_o} \quad , \quad (11)$$

donde G_a - consumo de aire, en Kg/hr; G_c - consumo de combustible, en Kg/hr; l_o - relación aire/combustible estequiométrica.

La disminución notable del consumo de aire con la altura, así como, el pequeño aumento del consumo de combustible hace que este coeficiente de exceso de aire disminuya, haciendo la mezcla cada vez - más rica con lo cual la eficiencia de la combustión empeora.

Sin cometer mucho error podemos considerar que el consumo de combustible G_c permanece constante.

Por lo tanto, la disminución de α con la altura se obtiene de:

$$\frac{\alpha_H}{\alpha_o} = \frac{G_{aH} \times G_{c_o}}{G_{a_o} \times G_{cH}} = \frac{\eta_{vH} \times \rho_H}{\eta_{v_o} \times \rho_o}$$

Luego de reemplazar valores tenemos:

$$\frac{\alpha_H}{\alpha_o} = \frac{P_H}{P_o} \sqrt{\frac{T_o}{T_H}} \quad , \quad (12)$$

donde P y T - presión y temperatura del aire de ingreso, en bar y en $^{\circ}K$ respectivamente.

El empeoramiento de la eficiencia volumétrica al disminuir el exceso de aire debe atribuirse a la influencia antes mencionada de la -

transmisión de calor; con pequeños excesos de aire aumentan las -
temperaturas de las paredes del cilindro a causa de la elevada -
carga térmica, haciendo cada vez más intenso el calentamiento del
aire de ingreso.

Otro de los factores que tienen gran influencia en las condiciones
del aire al final del proceso de admisión son los llamados gases -
residuales.

Al finalizar la carrera de escape, no son expulsados totalmente los
gases quemados del cilindro. Estos gases que permanecen en el ci-
lindro son los llamados residuales.

Según Majaldiani B.B. [4] la variación de la temperatura de los ga-
ses residuales con la altura, se puede determinar mediante la si-
guiente fórmula empírica:

$$\frac{T_{rH}}{T_{r0}} = 1 + 0.07 H \quad , (13)$$

donde T_r - temperatura de los gases residuales, en °K; H- altura -
s.n.m. en kms.

La presión de los gases residuales varía con la altura, según la -
siguiente relación aproximada:

$$\frac{P_{rH}}{P_{r0}} = \frac{P_H}{P_0} \quad , (14)$$

donde P_r - presión de los gases residuales, en bar; P - presión atmosférica, en bar.

El coeficiente de gases residuales, según definición es:

$$\gamma_{gr} = \frac{M_r}{M_a}, \quad (15)$$

donde M_r - cantidad de gases residuales, en Kmol; M_a - cantidad de carga fresca, en Kmol.

También la γ_{gr} se puede expresar aproximadamente como relación de masas, esto es:

$$\gamma_{gr} \approx \frac{G_r}{G_a}$$

En la ecuación anterior, reemplazando y simplificando obtenemos:

$$\gamma_{gr} = \frac{T}{P} \times \frac{P_r}{T_r} \times \frac{1}{\eta_v (\xi - 1)}, \quad (16)$$

donde ξ - relación de compresión.

Utilizando las expresiones (13) y (14) para hallar la variación de γ_{gr} con la altura, obtenemos:

$$\frac{\gamma_{gr_H}}{\gamma_{gr_0}} = \frac{T_H}{T_0} \times \frac{1}{(1 + 0.07 H)}, \quad (17)$$

donde T - temperatura atmosférica, en $^{\circ}\text{K}$; H - altura s.n.m. en -
Km.

Según esta expresión la $\hat{\delta}_{g.r.}$ disminuye con la altura; ésto se -
debe a que la disminución del coeficiente de exceso de aire y el
mayor retardo al encendido del combustible originan altas tempera-
turas de los gases de escape y por ende mayor T_r , este efecto con-
juntamente con la menor P_r dan como resultado la menor masa de ga-
ses residuales en el cilindro.

El calentamiento del aire de ingreso, durante el proceso de admisión,
se obtiene de la siguiente relación, que es válida para cualquier -
altura s.n.m.:

$$\Delta t = T \left[\frac{\epsilon P_a - P_r}{P (\epsilon - 1) \eta_v} - 1 \right] \quad ^{\circ}\text{K}, \quad (18)$$

La siguiente fórmula establece, para cualquier altitud, la tempera-
tura del aire al final del proceso de admisión, considerando la -
transmisión de calor y el calentamiento debido a los gases residua-
les:

$$T_a = \frac{T + \Delta t + \hat{\delta}_{gr} \times T_r}{1 + \hat{\delta}_{gr}} \quad ^{\circ}\text{K}, \quad (19)$$

1.2. Proceso de Compresión

Para estudiar la influencia que tiene la altura en este proceso, -
es necesario un análisis en condiciones de ambiente normales del -
aire de ingreso.

Durante la carrera de compresión se puede distinguir 2 etapas. En la primera parte cuando la temperatura de las paredes del cilindro, culata y cabeza del émbolo es mayor que la de la carga, esta última se calienta. En un instante dado la temperatura de la carga y de estas superficies se igualan. En la segunda etapa la temperatura de la carga es mayor que de las superficies y el flujo de calor se invierte.

El exponente politrópico de compresión n_c depende del carácter del proceso de transformación y se define como:

$$n_c = \frac{c_p - c_n}{c_v - c_n}$$

donde c_p - calor específico a presión cte; c_v - calor específico a volumen cte.; c_n - calor específico de un proceso politrópico.

c_n es hallado mediante la siguiente relación:

$$c_n = c_v \left(\frac{K - n_c}{1 - n_c} \right)$$

donde K - exponente isentrópico, 1.4.

Si $K > n_c > 1$, c_n toma un valor negativo lo que implica un rechazo de calor por la sustancia aunque aumente su temperatura.

Debido a la variación de la temperatura durante este proceso, así como, la influencia de la transmisión de calor, el exponente politrópico n_c varía en cada punto, con un elevado decrecimiento al -

final de la carrera.

En la figura N^o 2 se muestra esta variación para condiciones normales de funcionamiento.

Siendo n_c promedio, menor que el exponente isentrópico ($K = 1.4$), el flujo de calor resultante es, de las cargas hacia las superficies mencionadas.

El exponente politrópico tiene valores comprendidos entre 1.3 y 1.38, disminuyendo al aumentar el efecto refrigerador de las paredes.

Según varios autores [3], los valores medidos experimentalmente difieren extraordinariamente y no se han podido hallar relaciones sencillas entre n_c y las demás magnitudes. Tomando en cuenta que el efecto de la transferencia de calor es pequeño comparado con el efecto máximo que tiene en los procesos de combustión, expansión y escape; podemos considerar, sin mucho error, que n_c promedio no varía con la altura.

La presión y temperatura al final del proceso de compresión se obtiene de:

$$P_c = P_a \xi^{n_c} \quad \text{bar} \quad , (20)$$

$$T_c = T_a \xi^{n_c - 1} \quad \text{°K} \quad , (21)$$

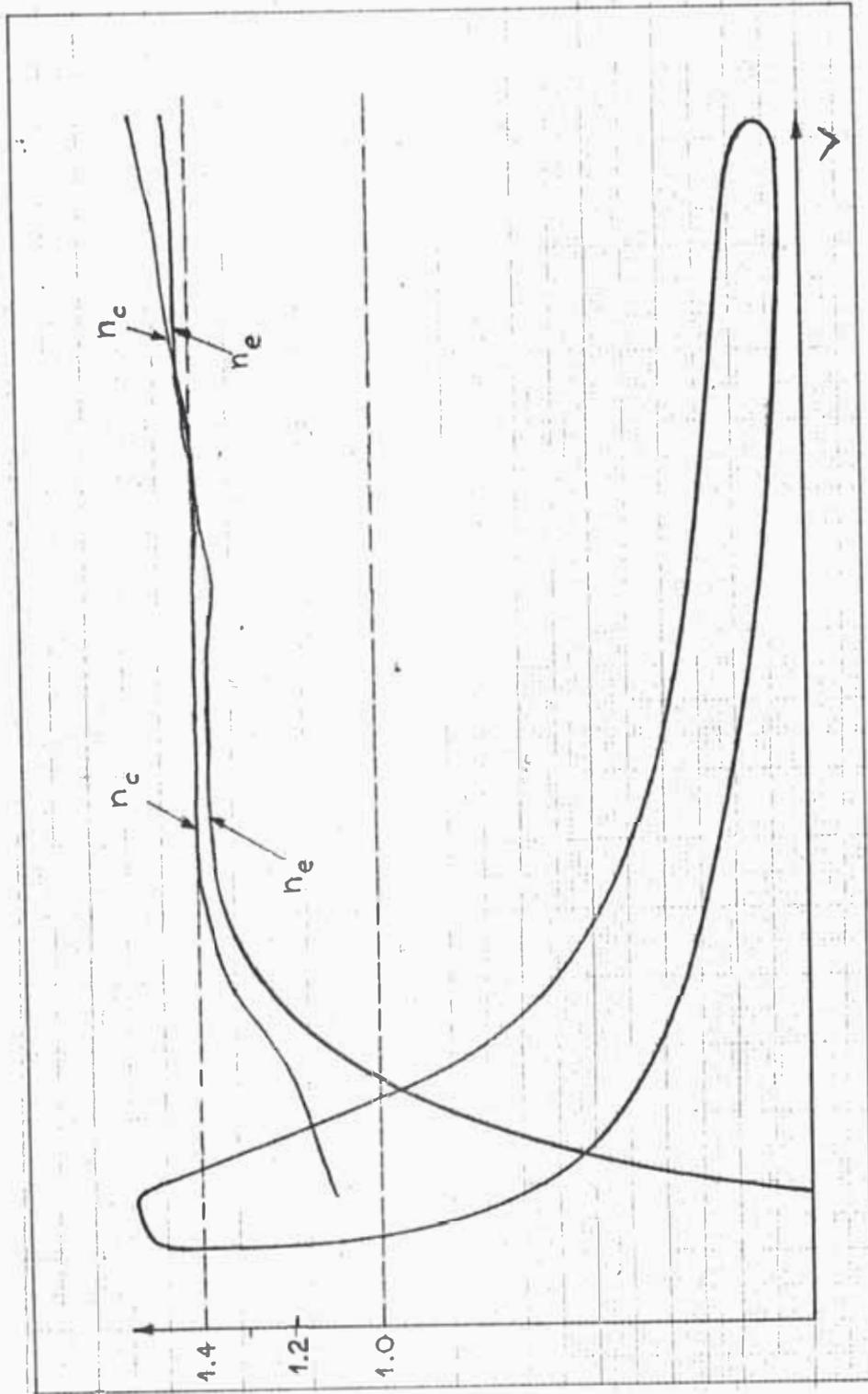


Fig. N° 2.- Diagrama indicado de un motor Diesel con la curva de variación de los exponentes politrópicos de com presión y expansión. [6]

Estos parámetros disminuyen con la altura debido a las menores P_a y T_a alcanzadas al final del proceso de admisión.

La temperatura de inflamación del combustible inyectado al final del proceso de compresión depende de P_c , según se aprecia en la - Figura N^o 3.

La menor P_c con la altura, aminora la diferencia entre la temperatura de compresión del aire y la temperatura de encendido del combustible, afectando a la rápida vaporización de las gotas del combustible pulverizado.

1.3. Proceso de Combustión

Debido a la complejidad del proceso de combustión en sí, se estudia la influencia de la altura aprovechando los resultados de investigaciones experimentales, realizadas por ciertos autores, y fórmulas teóricas que dan una explicación cualitativa del empeoramiento de la combustión, teniendo como causas principales de la desmejora a la menor densidad del aire alcanzadas al final de la compresión y el excesivo enriquecimiento de la mezcla.

La formación del dardo de combustible es influenciado por la densidad del medio en que el combustible se inyecta, las propiedades - del combustible como viscosidad, tensión superficial, volatilidad; las dimensiones, forma y calidad de fabricación del orificio de la tobera, la presión de inyección y del movimiento del aire en el - período de inyección.

Los combustibles para MEC se caracterizan por su baja volatilidad y alta viscosidad con respecto a los combustibles de los MECH.

Al disminuir la temperatura del combustible con la altura, origina un aumento de viscosidad, proporcionalmente mucho mayor al aumento que tendría el combustible para MECH con el mismo descenso de temperatura. Siendo la viscosidad uno de los factores que determina la calidad de pulverización y su mezcla con el aire, su mayor viscosidad hace más difícil su fraccionamiento en partículas finas. Los combustibles para MEC especialmente refinados presentan el mínimo de dificultades a este respecto, pero la tendencia presente es la de utilizar combustible de calidad inferior, debido a su menor precio. El proceso de combustión también es afectado por la menor temperatura del aire al final de la compresión lo que resulta en un mayor tiempo de evaporación del combustible inyectado a la cámara de combustión.

Para graficar este hecho, observemos la Figura N^o 4, en la cual se obtuvo un tiempo de evaporación de 0.58×10^{-3} seg. para una temperatura al final de la compresión de $T_c = 823 \text{ }^\circ\text{K}$ (550°C), y un considerable aumento del tiempo de evaporación a 1.06×10^{-3} seg. para una $T_c = 673 \text{ }^\circ\text{K}$ (400°C); en ambos casos se estima un radio primitivo de las gotas de $r_g = 0.005 \text{ mm}$. En la misma Figura se indica $\Delta G/G_0$ - cantidad evaporada de combustible de 1 gota con respecto al peso inicial, t - temperatura de las gotas de combustible, en $^\circ\text{C}$.

Para relacionar la variación del diámetro de la partícula de combustible con la altura, utilizamos la siguiente expresión [4],

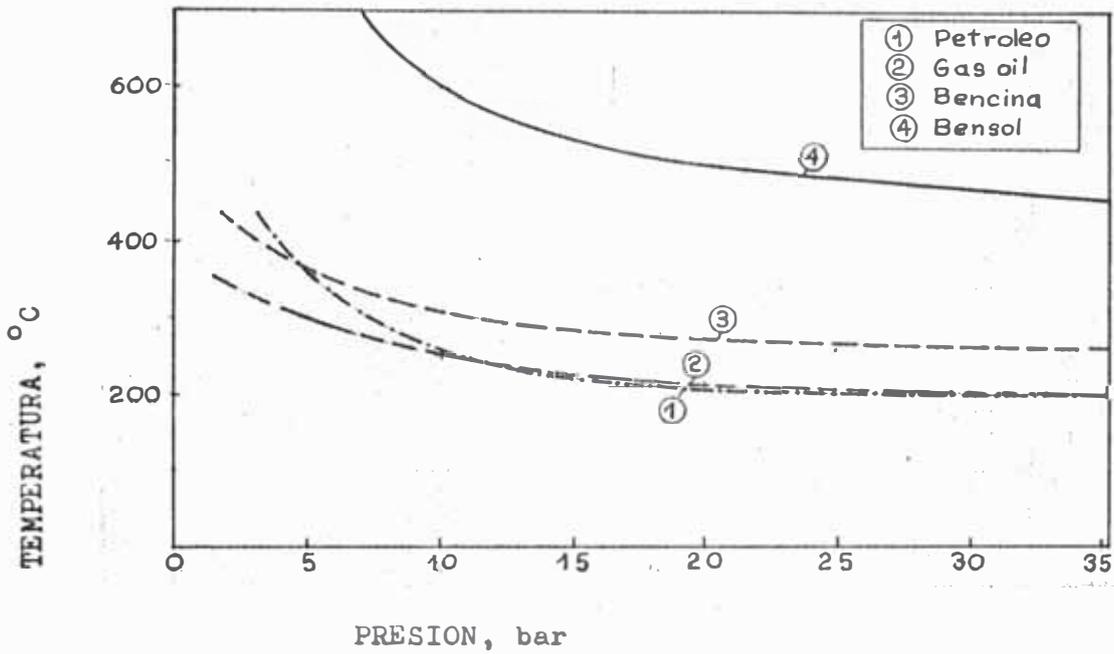


Fig. No 3.- Efecto de la presión del aire en la temperatura de inflamación del combustible.

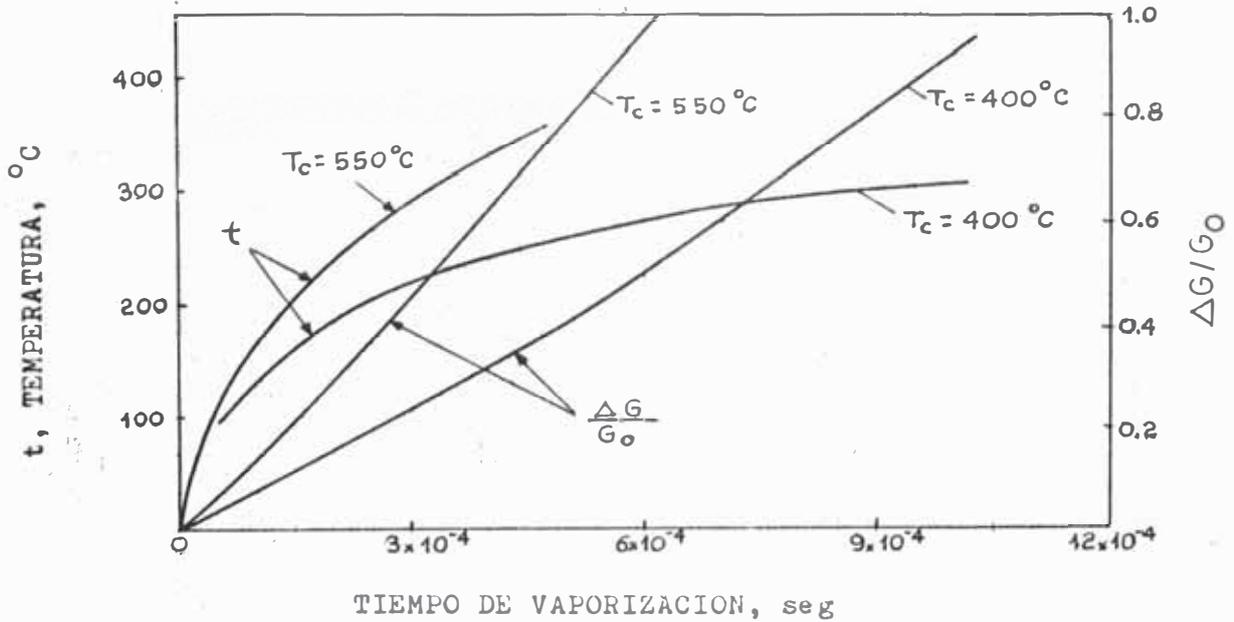


Fig. No 4.- Cantidad evaporada de combustible para dos condiciones de temperatura de compresión. [3]

obtenida en un motor Diesel de inyección directa:

$$d = \frac{18050}{\rho_c \times W^2} \quad \text{m.m.}, \quad (22)$$

donde ρ_c - densidad del aire en el momento en que se forma la partícula, en Kg/m^3 ; W - velocidad de entrada del dardo de combustible, en m./seg ; d - diámetro de la partícula, en m.m. La densidad del aire es calculada según la relación:

$$\rho_c = \frac{P_c \times 10^5}{R \times T_c} \quad \text{Kg/m}^3, \quad (23)$$

La velocidad del dardo de combustible es hallada a partir de la ecuación de Bernoulli:

$$W = \varphi \sqrt{\frac{(P_i - P_c)}{\rho_f} \times 2 \times 10^5} \quad \text{m/seg}, \quad (24)$$

donde P_i - presión de inyección de combustible, en bar; ρ_f - densidad del combustible, en Kg/m^3 . (890 - 900); φ - coeficiente de velocidad en la tobera - (~ 0.5).

De las ecuaciones (23) y (24) obtenemos reemplazando en (22) la siguiente expresión para el diámetro de la partícula de combustible:

$$d = K_1 \frac{T_c}{P_c (P_i - P_c)} = K_2 \frac{1/\rho_c}{(P_i - P_c)}$$

De la ecuación anterior podemos deducir que el diámetro medio de las gotas de combustible aumentan a medida que se incrementa la altura sobre el nivel del mar; esto es debido a la menor densidad del aire que influye en mayor grado que el aumento de la velocidad del dardo que tiende a aminorar esta tendencia - - -

$$(W \sim \sqrt{P_i - P_c}).$$

El mayor diámetro de las gotas con la altura, disminuye la superficie total de estas con lo cual la vaporización es más lenta, pudiendo afectar en un mayor retardo al encendido.

A fin de compensar esta tendencia, se podría utilizar un menor diámetro del orificio que da como resultado una mayor superficie - volumen para el dardo de combustible.

De acuerdo a las investigaciones de Lee [2], se obtuvieron mayores porcentajes de gotas de combustible de menor diámetro con el orificio más pequeño, según los resultados mostrados en la Figura N° 5.

La presión de inyección para RPM constante y a plena carga es prácticamente invariable con la altura, debido al ínfimo efecto de la menor presión inicial del combustible en la bomba de inyección, con respecto a las altas presiones de inyección que se obtienen.

De acuerdo a investigaciones realizadas, se demuestra que aumentando la presión de inyección se reduce el diámetro medio de las partículas, así como, la variación de tamaño.

Estos resultados inducen la posibilidad de aumentar la presión de

inyección en la altura para mejorar la pulverización del combustible.

Sin embargo, la influencia de la variación de presión de inyección, dentro de sus límites prácticos, es casi nula en el retraso al encendido del combustible [3].

Esto se debe a que a cualquier presión se producen claramente, por lo menos en los bordes del chorro, bastantes gotitas finas que se evaporan rápidamente e inician la combustión.

La distancia a la cual la punta de un chorro de combustible pulverizado penetra en la cámara de combustión es función de la velocidad del chorro, de la densidad del aire al momento de la inyección y del diámetro del orificio. La viscosidad del combustible tiene un efecto pequeño sobre la penetración.

Según Lichty [2] obtenemos la siguiente relación:

$$\text{Penetración} \sim (P_i - P_c)^{0.217} (d_o)^{0.515} (1 + \rho_c)^{-0.394} (t)^{0.505}, \quad (26)$$

donde d_o - diámetro del orificio; t - tiempo de inyección.

En condiciones de altura, al ser menor la densidad del aire en la cámara de combustión origina, según la relación anterior, una penetración excesiva del chorro de combustible inyectado.

Debido a este efecto, el combustible pulverizado puede impactar en las paredes del cilindro que por estar refrigeradas interrumpen su

proceso de encendido, haciéndolo en el tubo de escape ó durante - la carrera de compresión del siguiente ciclo. Además, diluye el aceite de lubricación y aumenta el desgaste de las piezas.

En la Figura N^o 6 están graficados los valores de la penetración, así como, la velocidad de la punta del chorro de combustible, para diferentes densidades del aire en la cámara de combustión, de acuerdo a estudios realizados por Schweitzer [2].

El empeoramiento del grado de pulverización con la altura, así como, la excesiva penetración del chorro de combustible, trae consigo mayores retrasos del encendido del combustible.

Existen fórmulas semi-analíticas que nos determinan el retraso del encendido con cierta aproximación, según la siguiente ecuación [4]:

$$\tau \approx \frac{A}{(P_c)^m} e^{E/RT_i \times 10^3} \quad \text{seg. , (27)}$$

donde A- constante que depende del tipo de combustible; m-coeficiente de orden de encendido; E- energía de activación del combustible; T- temperatura de inflamación del combustible.

Como se apreció en la Figura N^o 3, la temperatura de inflamación del combustible T_i , aumenta con la altura al existir una menor presión de compresión P_c en el cilindro.

Para relacionar el retardo al encendido del combustible con la altura, utilizamos la ecuación anterior de donde obtenemos la - -

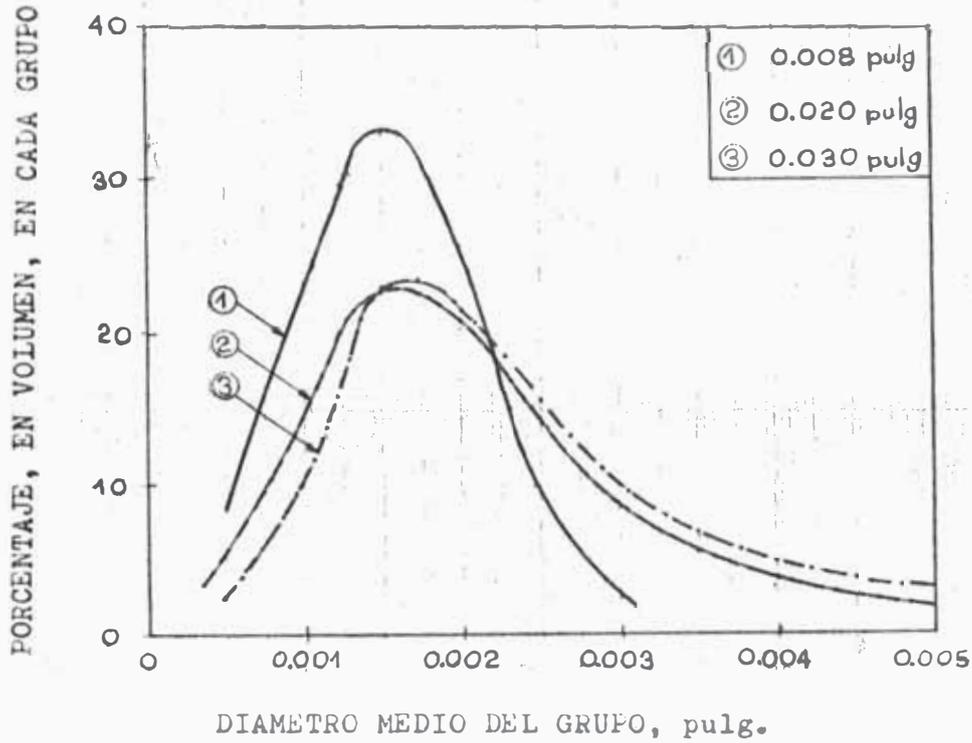
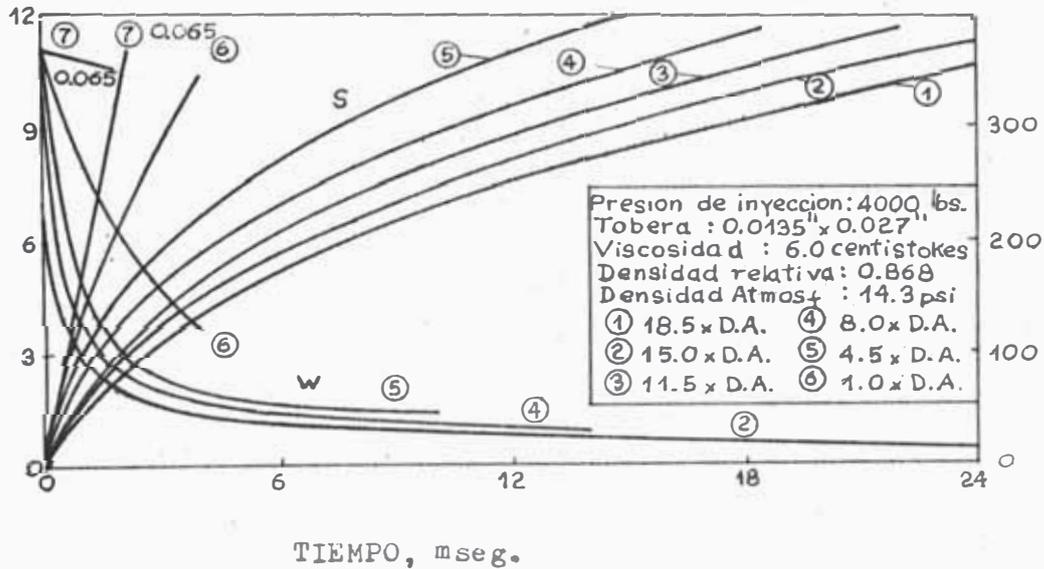


Fig. Nº 5.- Efecto del diámetro del orificio sobre la atomización, $P_i = 270$ bar.

S, DISTANCIA DE LA PUNTA DEL CHORRO A LA TOBERA, cms.



W, VELOCIDAD DE LA PUNTA, pies/seg

Fig. Nº 6.- Efecto de la densidad del aire en la cámara de combustión sobre la penetración (P.H. Schweitzer, Penetration of Oil Sprays)

siguiente expresión:

$$\frac{\tau_H}{\tau_o} = 0.6 \left(\frac{P_{c_o}}{P_{c_H}} \right)^m e^{\frac{E}{R} \left(\frac{1}{T_{i_H}} - \frac{1}{T_{i_o}} \right)}$$

La Figura N° 7 muestra la influencia de la densidad del aire o de la presión al final de la compresión en el retraso del encendido [9]. (La temperatura de compresión se mantiene constante).

De acuerdo con la figura el efecto de la densidad en el retardo al encendido es más importante en la zona de 5 a 10 Kg/m³, careciendo de influencia en la zona de 15 a 25 Kg/m³.

La influencia de la temperatura sobre el retardo al encendido no es de tanta importancia como lo es la presión para el intervalo de funcionamiento del motor. Según Schemdt [9], el variar la temperatura de compresión de 600 a 800° C, se observa una pequeña influencia, que en muchos casos, es del orden de los errores de observación.

Para poder contrarrestar el empeoramiento del proceso de combustión con la altura, se debe incidir en buscar un menor retraso del encendido, u evitar la disminución del coeficiente de exceso de aire, ya sea regulando la cantidad de combustible ó aumentando la densidad del aire en la cámara de combustión, siendo el último el método más usado y efectivo.

Otra de las formas es regular el avance de la inyección de acuerdo

al mayor retraso del encendido y, de ese modo, lograr una menor dureza en el funcionamiento y un consumo mínimo.

Examinando cada una de estas posibles mejoras, se estudio en forma breve su efecto en el menor retraso del encendido y/o en la potencia del motor.

a.- Variación del diámetro del orificio de la tobera de inyección con la altura.

Como se explicó anteriormente, un menor diámetro de orificio, en condiciones de altura, mejora la pulverización al obtenerse menor diámetro promedio de las gotas de combustible pulverizado (ver Figura Nº 5).

Asi mismo, otro de los efectos positivos que se obtendría al realizar esta variación es que disminuye la penetración del dardo de combustible evitando su impacto con las paredes del cilindro. En la Figura Nº 8 apreciamos su influencia.

Una optimización de las características del dardo de combustible en la altura se reflejaría en un menor retardo del encendido, así como, en una combustión más eficiente, que permita lograr una mayor potencia efectiva y favorecer en la economía del combustible.

Según ensayos efectuados en un motor Krupp-Modaag [3] se obtuvieron valores del retardo del encendido para diferentes diámetros de orificio, los cuales se grafican en la Figura Nº 9.

Se requiere analizar las consecuencias de este cambio en la presión

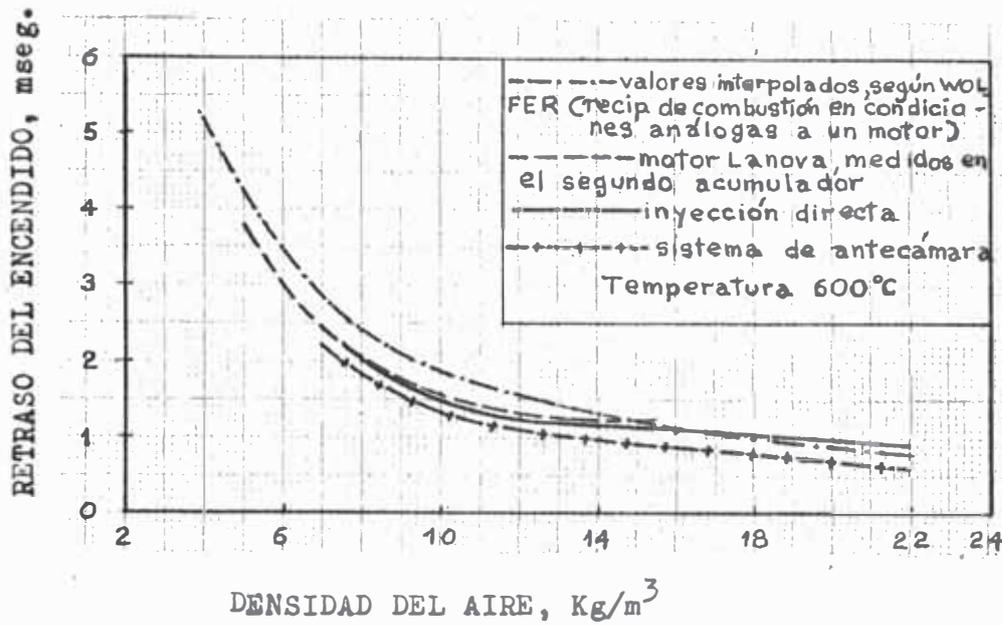


Fig. No 7.- Relación entre el retraso del encendido y densidad del aire, a temperatura constante.

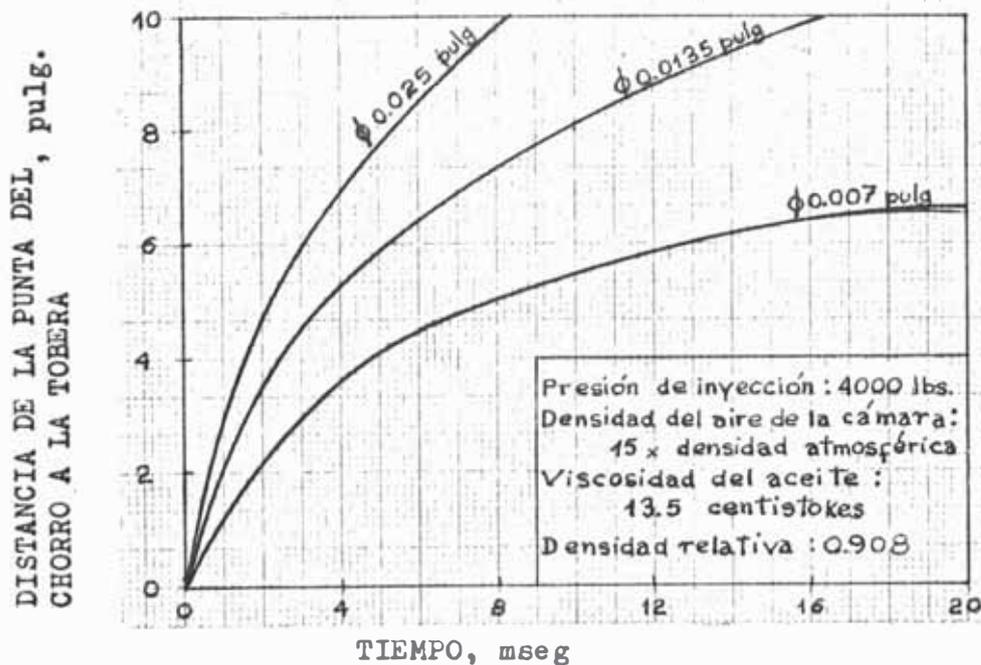


Fig. No 8.- Efecto del diámetro del orificio de la tobera de inyección sobre la penetración en la cámara de combustión.

de inyección requerida y la cantidad de combustible inyectado - por ciclo.

b. Regulación de combustible con la altura

La regulación del combustible inyectado con la altura se realiza para obtener un coeficiente de exceso de aire óptimo, similar al que tenía el motor en condiciones a nivel del mar. La proporción de mezcla más adecuado se obtiene, disminuyendo el consumo de com bustible conforme aumenta la elevación sobre el nivel del mar.

Es importante anotar que la disminución del combustible deberá - realizarse en el último período de la inyección ya que en esta fa se es más difícil, con la altura, tener disponibilidad de oxígeno necesario para la combustión.

Con esta regulación, se evita que la mezcla se enriquezca en forma excesiva, obteniéndose una mejora del proceso de combustión, con - menores temperaturas de combustión y la temperatura de las paredes del cilindro son reducidas (evitando el recalentamiento del motor) y, también una menor temperatura de los gases de escape.

Otra característica interesante expuesta por Taylor [12] es que, - al aumentar el coeficiente de exceso de aire se nota una pequeña - reducción en la gradiente de elevación de presión en la cámara.

Como es lógico suponer, la reducción de combustible inyectado por ciclo disminuye la potencia efectiva del motor pero en forma míni ma y, debido a la mayor eficiencia de la combustión, el consumo -

específico de combustible es reducido considerablemente, tal como se mostrará más adelante. (Ver Figura N^o 24).

Esta posibilidad de mejorar el rendimiento es más significativa - si consideramos que esta regulación no requiere mayores cambios en el diseño del motor.

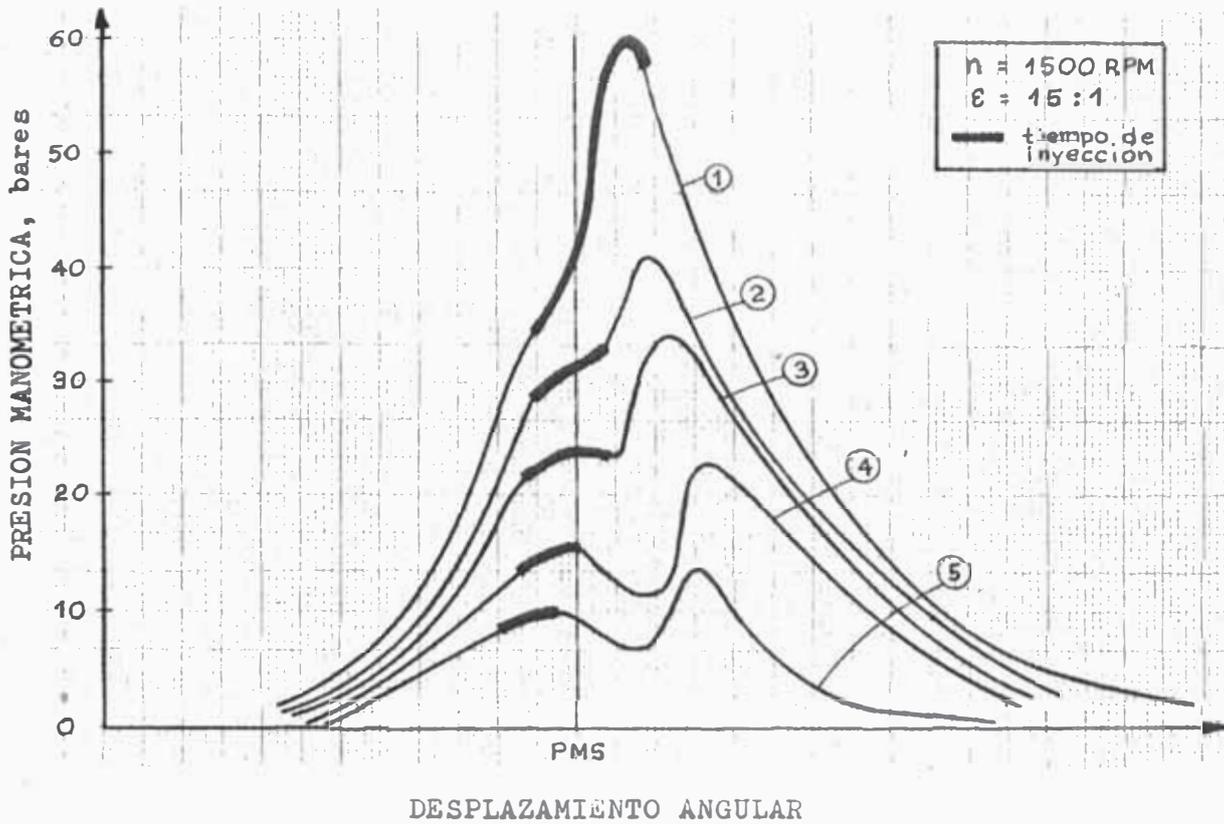
c. Adelanto del ángulo de avance de la inyección del combustible con la altura.

Como se explicó anteriormente, el mayor retardo al encendido con la altura origina que los productos de la combustión empiecen su expansión cuando el pistón no tiene una posición óptima, resultando en una reducción de la relación de expansión efectiva.

En este caso, la velocidad de combustión disminuye considerablemente y la superficie de contacto de los gases calientes con las paredes del cilindro aumenta; gran parte del calor es transmitido - al agua refrigerante y expulsado con los gases quemados.

Por lo expuesto, es necesario que el ángulo de avance de la inyección sea cada vez mayor, a medida que el retardo al encendido aumenta.

En la Figura N^o 10 se muestra los diagramas Presión - Angulo de giro del cigüeñal, realizados en un motor Diesel con cámara tipo La nova [9], para diferentes presiones de admisión del aire, en la cual el comienzo de la inyección se adoptó, en cada caso, de tal forma que el consumo de combustible sea mínimo y que la marcha no



Nº	PRESION DE ASPIRACION ATMOSF. ABS.	p_e Kg/cm ²	COMIENZO DE LA INYECCION, ° ANTES DEL p.m.s.
1	1.03	5.96	9
2	0.81	4.90	10
3	0.62	3.65	12.5
4	0.47	2.35	16
5	0.35	0.85	23

Fig. Nº 10 Diagramas Presión-Angulo del cigueñal para la cámara de combustión principal del sistema Lanova y avance de la inyección, con indicación del retraso al encendido, para varias presiones del aire de admisión. Velocidad del motor 1500 RPM.

sea excesivamente dura.

El avance de la inyección tiene su límite ya que el adelanto implica que el combustible se inyecta en aire de menor presión temperatura, si este avance es excesivo podría llegar incluso el combustible a no encender.

d. Variación del número de cetano para condiciones de altura

Como se ha visto, las características de la combustión depende de muchos factores, los cuales se ven influenciados por la calidad de encendido del combustible Diesel.

La sensibilidad a la calidad del encendido es función del número de cetano, donde un mayor cetanaje resultará en una disminución de la temperatura de inflamación del combustible y, por lo tanto, ayuda a reducir el retardo al encendido.

Aprovechando estas mejoras sería conveniente, en condiciones de altura, utilizar un combustible Diesel de mayor cetanaje que el utilizado a nivel del mar; sin embargo, el aumento de cetanaje no ayuda a reducir los problemas creados por una excesiva alimentación de combustible, tales como pobre eficiencia térmica, alta densidad del smoke y mayores temperaturas de escape.

Creemos necesario el que se realice un estudio experimental para confirmar estas tendencias y conocer la influencia del número de cetano en los demás parámetros del motor.

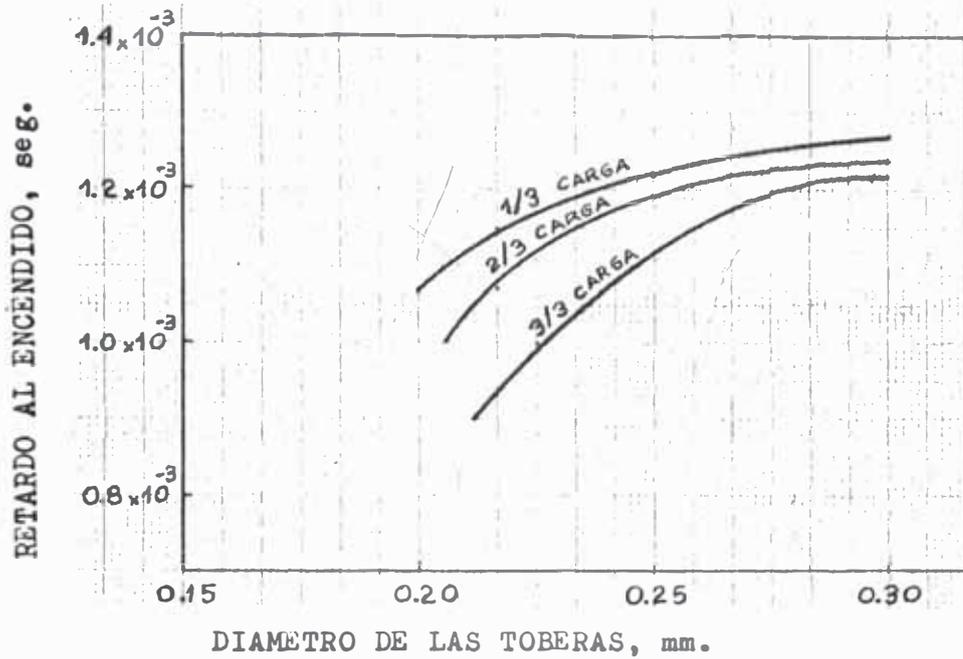


Fig. No 9.- Retardo del Encendido en función del diámetro de las toberas de un motor.

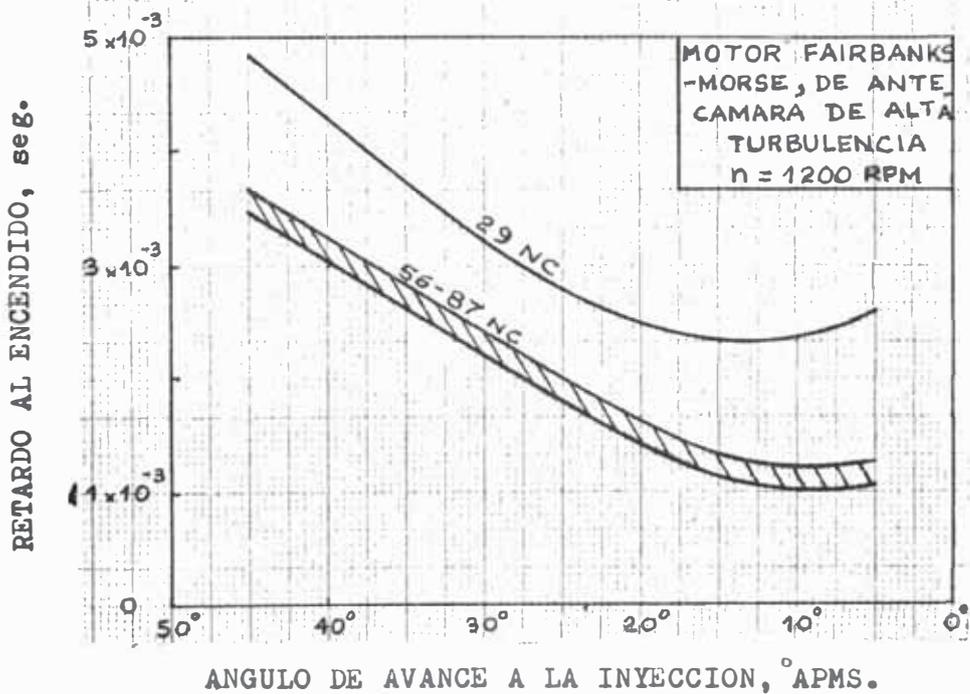


Fig. No 11.- Influencia del Número de Cetano en el retardo del encendido.

En la Figur N^o 11, se grafican los resultados de las pruebas en un motor Fairbanks-Morse para apreciar la influencia del número de cetano en el retardo al encendido.

e. Aumento de la relación de compresión con la altura

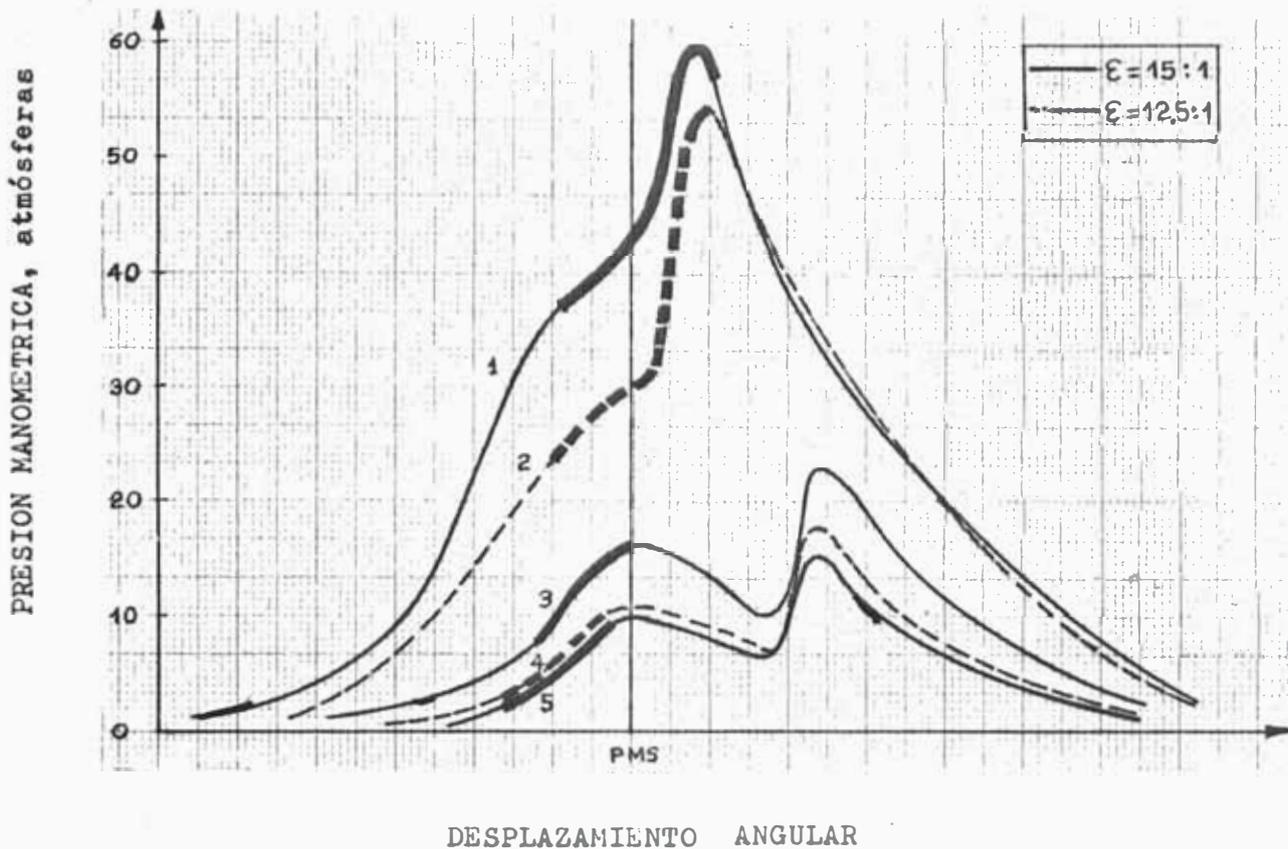
Dentro de las posibilidades existentes para mejorar la potencia y economía del motor en la altura, se encuentra la de aumentar la relación de compresión con la altura, lo que elevaría la presión y temperatura al final de la compresión, tratando de atenuar la disminución de estos parámetros con respecto a los valores que tendrían a nivel del mar.

La mayor densidad del aire al momento de la inyección, obtenida con el aumento de ϵ , disminuye, el retardo al encendido y la penetración del combustible pulverizado en la cámara de combustión.

En la figura N^o 12 se muestra la influencia de la relación de compresión en la forma del diagrama de un motor Lanova, para diferentes presiones de admisión del aire.

En la figura se observa, que para una altura s.n.m. de 6 Km., la presión media efectiva se aumentó un 68.5% de su valor inicial a esa altura cambiando la ϵ de 12.5:1 a 15:1.

Sin embargo, el aumento de la relación de compresión tiene un valor óptimo, más allá del cual las pérdidas por rozamiento se pueden incrementar más rápidamente que el aumento del rendimiento térmico indicado; además este aumento de ϵ obligaría a realizar cambios en el diseño del motor.



Nº	ALTURA Km s.n.m.	PRESION DE ASPIRACION ATMOSF. ABS.	PRESION MEDIA EFECTIVA Kg/cm ² .	COMIENZO DE LA INYECCION ° ANTES DEL p.m.s.
1	0	1.03	5.96	9
2	0	1.03	6.04	13
3	6.1	0.47	2.35	16
4	6.0	0.48	1.40	23
5	8.3	0.35	0.85	23

Fig. Nº 12 Influencia de la relación de compresión y de la presión del aire aspirado en la forma del diagrama de un motor Lanova. Los trazos gruesos indican el ángulo de cigüeñal durante el que se realiza la inyección. [9]

1.4. Proceso de Expansión

Durante esta carrera los productos de combustión se expanden a altas temperaturas, desempeñando un papel importante la transferencia de calor entre los gases de la combustión y las paredes del cilindro. Esta transmisión de calor disminuye el coeficiente politrópico de expansión n_e , siendo su valor entre 1.18 y 1.28.

La variación de n_e durante el proceso de expansión se puede apreciar en la Figura Nº 2.

Dentro de los factores más importantes que afectan la pérdida de calor hacia las paredes del cilindro, se encuentran, la duración de la combustión, la temperatura de combustión, el tiempo de inyección del combustible. También, influyen en dicha pérdida la velocidad del motor, la forma de la cámara de combustión, el tamaño - del cilindro y la turbulencia.

En la altura, debido al enriquecimiento de la mezcla, a medida - que se forman los productos de combustión, la proporción de moléculas de oxígeno se reduce notablemente con el resultado de que la parte final del combustible inyectado necesita un mayor tiempo para mezclarse.

Esto conduce a la prolongación del tiempo de combustión y debido a que todo el combustible no llega a combustionarse en este período, lo hace durante la carrera de expansión aumentando la temperatura durante este proceso; así como, eleva la temperatura de los gases de escape. Por lo cual, la cantidad de transmisión de calor hacia las paredes se incrementa con la mayor duración de la combustión y también con la mayor temperatura de combustión, aunque la menor presión de los gases tiende a disminuir este efecto. La cantidad de calor transferido hacia las paredes, está dado por:

$$Q = (h_r + h_c) A (T_g - T_p) \tau' \quad , (29)$$

donde h_r - coeficiente superficial para la radiación; h_c - coeficiente superficial de transmisión; A - área de transferencia de calor; T_g - temperatura de los gases; T_p - temperatura de las paredes; τ' - tiempo.

Siendo h_r algunas centésimas de h_c , las pérdidas de calor por radiación es aproximadamente un 5% del calor total transferido.

El coeficiente superficial de transmisión está relacionado según la siguiente expresión:

$$h_c \sim b \sqrt[3]{P_g^2 T_g} \quad , (30)$$

donde b - factor que depende de la turbulencia en la cámara; P_g - presión de los gases.

Este coeficiente varía a lo largo de la carrera del pistón, ya que, la velocidad del gas varía con la velocidad del pistón, la densidad varía con la posición del pistón y, parámetros como el calor específico, viscosidad, varían al cambiar la temperatura.

Las diversas condiciones expuestas hacen que el exponente politró

ico promedio n_e sea difícil de hallar mediante relaciones sencillas con estas magnitudes, por lo cual n_e se asume constante para el cálculo teórico. Los resultados experimentales han demostrado que el promedio de n_e varía muy poco con la altura.

1.5. Parámetros básicos del ciclo

Para completar el estudio teórico, se presentan relaciones que permiten conocer la variación de los parámetros de potencia y economía del combustible, en la altura, con respecto a los que tenían a condiciones normales.

Las expresiones siguientes, se basan en parámetros hallados mediante el cálculo térmico del motor a diferentes alturas s.n.m., el cual utiliza las leyes de variación de los factores que influyen en cada proceso, de acuerdo al estudio realizado.

La eficiencia indicada se expresa según:

$$\eta_i = \frac{3 \times P_i \times V_h \times n \times i}{P_{cal} \times G_c} \quad , (31)$$

donde P_i - presión media indicada, en bar; V_h - volúmen de desplazamiento, en lts.; P_{cal} - poder calorífico bajo, en KJ/Kg; G_c - consumo de combustible, en Kg/hr; n - RPM del motor; i - número de cilindros.

Siendo G_c constante para un régimen de igual velocidad y a plena carga, tenemos que:

$$\eta_i \sim P_i$$

de donde obtenemos la siguiente expresión, que nos da la variación de la η_i con la altura:

$$\frac{\eta_{iH}}{\eta_{i0}} = \frac{P_{iH}}{P_{i0}}, \quad (32)$$

El consumo específico indicado viene dado por:

$$g_i = \frac{3600}{P_{cal} \times \eta_i} \quad \text{gr/Kw-hr} \quad (33)$$

Por lo cual, tenemos que su variación con la altitud es:

$$\frac{g_{iH}}{g_{i0}} = \frac{\eta_{i0}}{\eta_{iH}}, \quad (34)$$

La presión media de las pérdidas mecánicas p_m , es parte de la presión media indicada p_i gastada en las pérdidas mecánicas y relaciona:

$$p_m = p_r + p_{m.a.} + p_b \quad , (35)$$

donde p_r - parte de la p_i que se gasta en vencer el rozamiento; - $p_{m.a.}$ - fracción de p_i que se utiliza en accionar los mecanismos auxiliares; p_b - fracción de p_i utilizado en el intercambio de gases.

Debido a las condiciones de altura, las pérdidas por intercambio de gases p_b , y la acción de ventilación de la volante, decrecen con una disminución de la densidad del aire; sin embargo, las pérdidas por fricción (pistón, rodamientos, mecanismos de transmisión, etc.) y las pérdidas en los mecanismos auxiliares (bomba de lubricación, bomba de agua, etc.), permanecen prácticamente constante.

Por lo tanto, las pérdidas mecánicas se pueden subdividir en dos partes; una que es función de las presiones medias indicadas y, por lo cual, varía con la altura, y otra, independiente de la misma [6].

De donde tenemos:

$$p_{mH} = p_{m0} \left(0.7 + 0.3 \frac{p_i H}{p_{i0}} \right) , (36)$$

Con lo cual es factible hallar la presión media efectiva, para cualquier cota s.n.m. según:

$$P_e = P_i - P_m \quad , (37)$$

y, por lo tanto, la eficiencia mecánica:

$$\eta_m = \frac{P_e}{P_i} \quad , (38)$$

La potencia efectiva viene dado por:

$$N_e = \frac{P_e \times V_h \times n \times i}{1200} \quad \text{Kw} \quad , (39)$$

Entonces, tenemos que:

$$\frac{N_{eH}}{N_{eO}} = \frac{P_{eH}}{P_{eO}} \quad , (40)$$

La definición del consumo específico efectivo de combustible, nos relaciona:

$$g_e = \frac{G_c}{N_e} \quad \text{gr/Kw-hr} \quad , (41)$$

Por lo cual hallamos la variación con la altura de g_e :

$$\frac{g_{eH}}{g_{eO}} = \frac{N_{eO}}{N_{eH}} \quad , (42)$$

C A P I T U L O II

CALCULO TERMICO DE UN MOTOR DIESEL A NIVEL DEL
MAR Y A DIFERENTES ALTURAS

Es importante destacar, que mediante el cálculo térmico de un motor, se permite conocer los índices principales de funcionamiento, así como su potencia y economía.

Con la finalidad de realizar el cálculo teórico del motor Diesel a nivel del mar y para diferentes alturas, se utilizan las relaciones halladas anteriormente, tomando en cuenta para las condiciones iniciales las características atmosféricas propias de nuestro medio geográfico (ver tabla N^o 4)

2.1. Cálculo Térmico para el motor Petters. 1HW

El cálculo térmico fue realizado en base a datos técnicos del motor Diesel monocilíndrico, marca "Petters", modelo 1HW, el mismo que se ensayó en el banco experimental de simulación de condiciones de altura y cuyos resultados se muestran en el Capítulo IV.

La secuencia del cálculo teórico para este motor está contenido en el Anexo N^o 1, para la velocidad nominal de 2000 RPM, y del cual se obtuvieron los resultados mostrados en las tablas del 6 al 10.

En la tabla N^o 6 se encuentra la variación de los parámetros de admisión con la altura. Según este cuadro tenemos que el coeficiente de exceso de aire, para una altura de 5000 m.s.n.m. - -

disminuyó en un 43% su valor que tenía a nivel del mar.

La disminución de la eficiencia volumétrica con la altura, provocado por el aumento de la carga térmica, no es tan pronunciada debido a que nuestras condiciones de temperatura del aire atmosférico a grandes alturas en promedio, no son excesivamente bajas, resultando en un menor calentamiento de la carga fresca que ingresa al motor.

La Tabla N^o 7 nos muestra la variación de los parámetros de compresión, combustión y expansión en función de la altura. En ella es notoria la disminución en un 45% de la presión de compresión a 5000 .s.n. del valor que tenía a condiciones normales, así como, el aumento de las temperaturas de combustión y escape.

La influencia de la altura en los parámetros básicos del motor Diesel Petters se presenta en la Tabla N^o 8 y Tabla N^o 9, según las cuales la potencia efectiva obtenida a 5000 .s.n.m. es aproximadamente un 64% de su valor que tenía a nivel del mar, así mismo, aumenta el consumo específico efectivo en un 54%.

2.2. Construcción de las curvas características externas de velocidad

La variación de los índices principales del motor en función de las revoluciones, se han calculado considerando un régimen de funcionamiento estable y que la cremallera de la bomba de inyección se encuentra en la posición de máxima alimentación.

En la figura N^o 13 se presenta la curva característica de velocidad,

T A B L A N O 6

VARIACION DE LOS PARAMETROS DE ADMISION EN FUNCION DE LA ALTURA,
PARA EL MOTOR DIESEL PETERS. VELOCIDAD DEL MOTOR 2000 RPM.

H Km.	ρ_0 Kg/m ³	P ₀ bar	T ₀ °K	α	M ₁ Kmol/Kg	M ₂ Kmol/Kg	P _a bar	P _r bar	T _r °K	η_v	$\gamma_{g.r.}$	Δt °K	T _a °K
0	1.210	1.013	291.81	1.500	0.743	0.774	0.877	1.18	838.0	0.768	0.034	30.0	338.8
1	1.080	0.900	290.28	1.336	0.661	0.693	0.780	1.05	896.7	0.766	0.032	30.8	338.8
2	0.965	0.800	288.76	1.191	0.590	0.621	0.693	0.93	955.3	0.764	0.030	31.4	338.6
3	0.870	0.718	287.20	1.071	0.530	0.562	0.622	0.84	1014.0	0.762	0.028	32.1	338.3
4	0.792	0.637	280.35	0.962	0.476	0.512	0.551	0.74	1072.6	0.753	0.026	34.5	334.0
5	0.717	0.562	273.20	0.860	0.430	0.472	0.487	0.66	1131.3	0.743	0.024	38.3	330.7

T A B L A N º 7

VARIACION DE LOS PARAMETROS DE COMPRESION, COMBUSTION Y EXPANSION EN FUNCION DE LA ALTURA, PARA EL MOTOR DIESEL PETERS. VELOCIDAD DEL MOTOR 2000 RPM

H Km.	β	P_c bar	T_c °K	ϕ	ΔP_{cal} Kj/Kg	T_z °K	P_z bar	f	δ_e	P_b bar	T_b °K	P'_i bar
0	1.040	36.50	854.5	0.79	-	2057.5	65.70	1.391	11.86	2.91	1081.6	8.107
1	1.047	32.46	854.5	0.79	-	2165.0	58.43	1.474	11.20	2.78	1155.2	7.923
2	1.051	28.84	854.0	0.78	-	2263.7	51.91	1.548	10.66	2.63	1223.5	7.596
3	1.059	25.88	853.0	0.77	-	2357.0	46.58	1.626	10.15	2.51	1290.3	7.335
4	1.074	22.93	842.4	0.75	2254.4	2357.0	41.27	1.669	9.88	2.30	1299.3	6.747
5	1.095	20.27	834.0	0.74	8305.7	2247.0	36.49	1.639	10.07	1.99	1232.6	5.811

T.A.B.I.A. No. 8

INFLUENCIA DE LA ALTURA EN LOS PARAMETROS BASICOS DEL MOTOR DIESEL
 PETERS. VELOCIDAD DEL MOTOR 200 RPM

H Km.	p_i bar	p_m bar	p_e bar	η_m	η_i	g_i gr/Kw-hr	g_e gr/Kw-hr	η_e	N_e Kw
0	7.540	1.930	5.61	0.744	0.419	204.7	275.1	0.312	6.16
1	7.370	1.917	5.45	0.740	0.410	209.3	282.8	0.303	5.98
2	7.064	1.894	5.17	0.732	0.393	218.3	298.2	0.287	5.68
3	6.821	1.875	4.95	0.279	0.279	226.1	311.8	0.275	5.43
4	6.275	1.833	4.44	0.708	0.348	246.1	347.6	0.246	4.88
5	5.404	1.866	3.64	0.673	0.300	285.5	424.3	0.202	3.99

T A B L A N O 9

VARIACION DE LOS PARAMETROS DE POTENCIA Y ECONOMIA EN EL MOTOR
DIESEL PETERS. VELOCIDAD DEL MOTOR 2000 RPM

H Km.	η_v	α	η_i	η_m	ϵ_e	Ne/Ne ₀
1	0.997	0.891	0.977	0.995	1.028	0.971
2	0.995	0.794	0.937	0.984	1.084	0.922
3	0.992	0.714	0.905	0.975	1.133	0.881
4	0.981	0.641	0.832	0.952	1.263	0.792
5	0.967	0.573	0.717	0.905	1.542	0.648

VARIACION DE LOS PARAMETROS DE POTENCIA Y ECONOMIA CON LA
ALTURA, PARA DIFERENTES RPM.

H Km.	N = 1000RPM		N = 1200 RPM		N = 1500 RPM		N = 1650 RPM		N = 1800 RPM		N = 2000 RPM	
	Ne Kw	ξ_e gr/Kw-hr	Ne Kw	ξ_e gr/Kw-hr	Ne Kw	ξ_e gr/Kw-hr	Ne Kw	ξ_e gr/Kw-hr	Ne Kw	ξ_e gr/Kw-hr	Ne Kw	ξ_e gr/Kw-hr
0	3.32	255.1	3.93	258.9	4.80	264.7	5.22	267.8	5.63	270.9	6.16	275.1
1	3.23	261.9	3.82	265.8	4.67	272.0	5.07	275.2	5.47	278.4	5.98	283.0
2	3.08	275.3	3.63	279.6	4.44	286.3	4.82	289.8	5.19	293.4	5.68	298.3
3	2.95	287.0	3.43	291.6	4.25	298.8	4.62	302.6	4.97	306.6	5.43	311.8
4	2.67	317.8	3.15	323.4	3.83	332.0	4.16	336.6	4.47	341.3	4.88	347.7
5	2.22	381.8	2.61	389.6	3.16	401.9	3.42	408.3	3.67	414.9	3.99	424.1

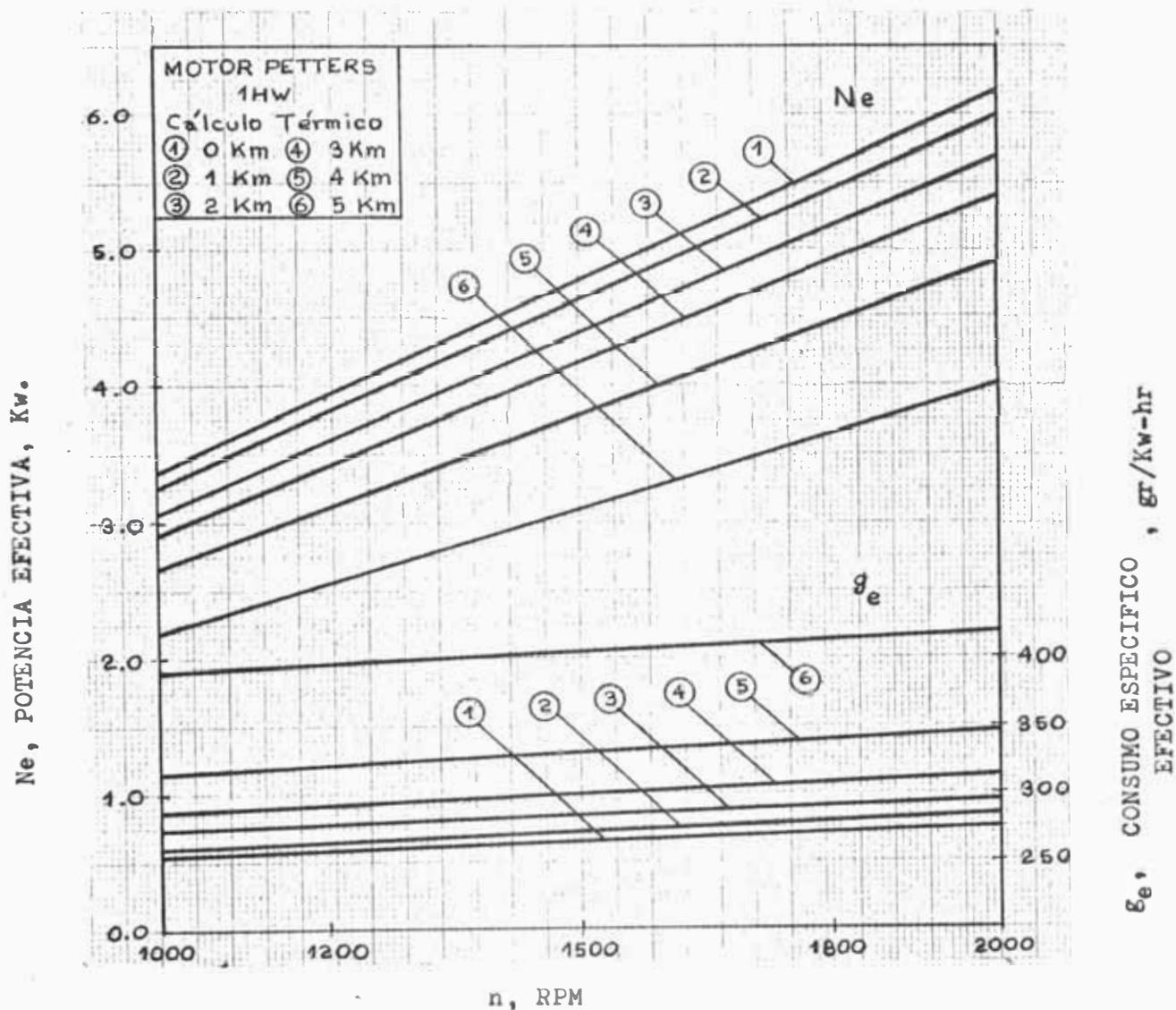


Fig. NO 13.- Curva Característica Externa de Velocidad para diferentes alturas sobre el nivel - del mar.

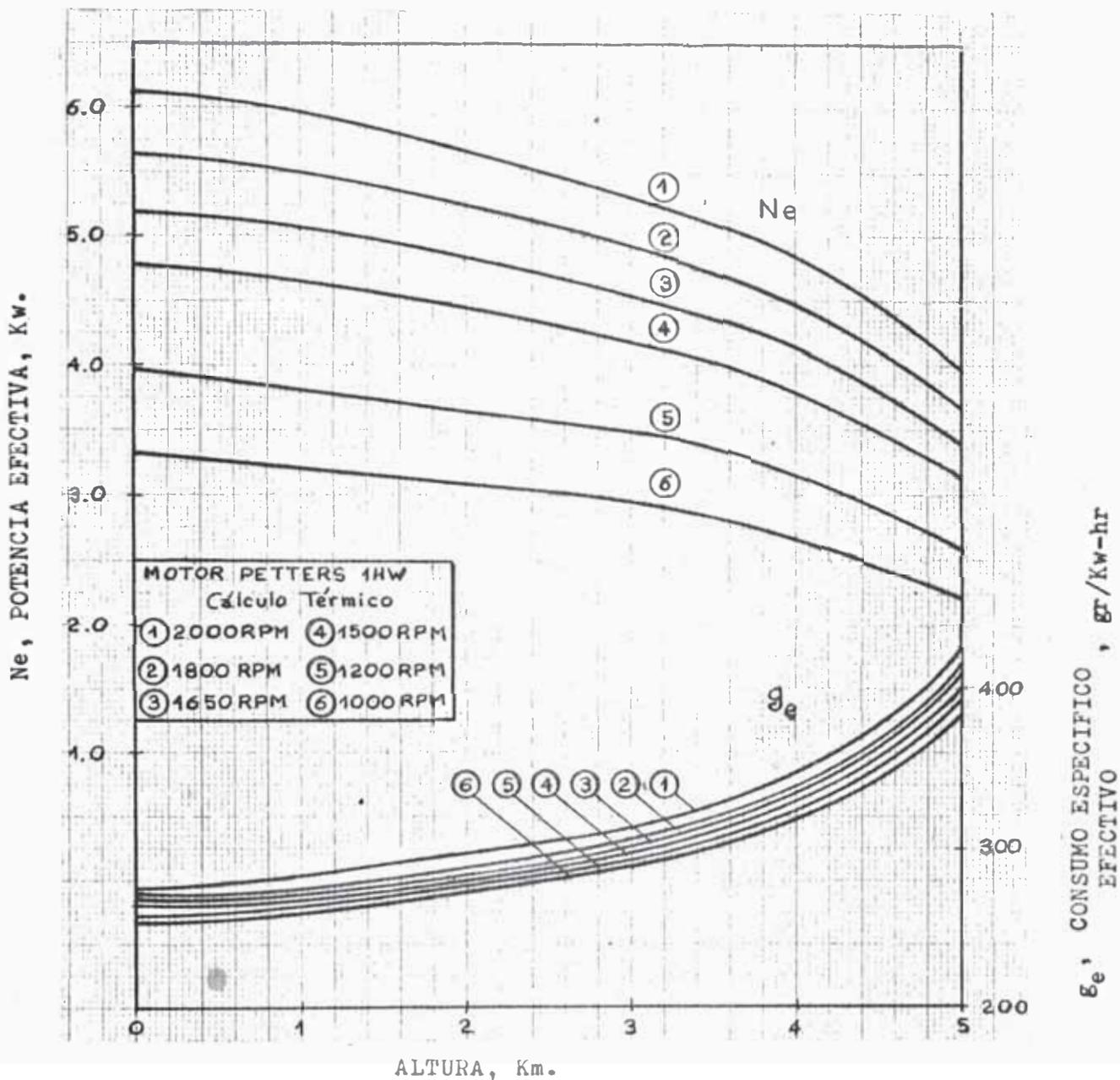


Fig. Nº 14.- Variación de la Potencia efectiva Consumo Específico Efectivo con la altura

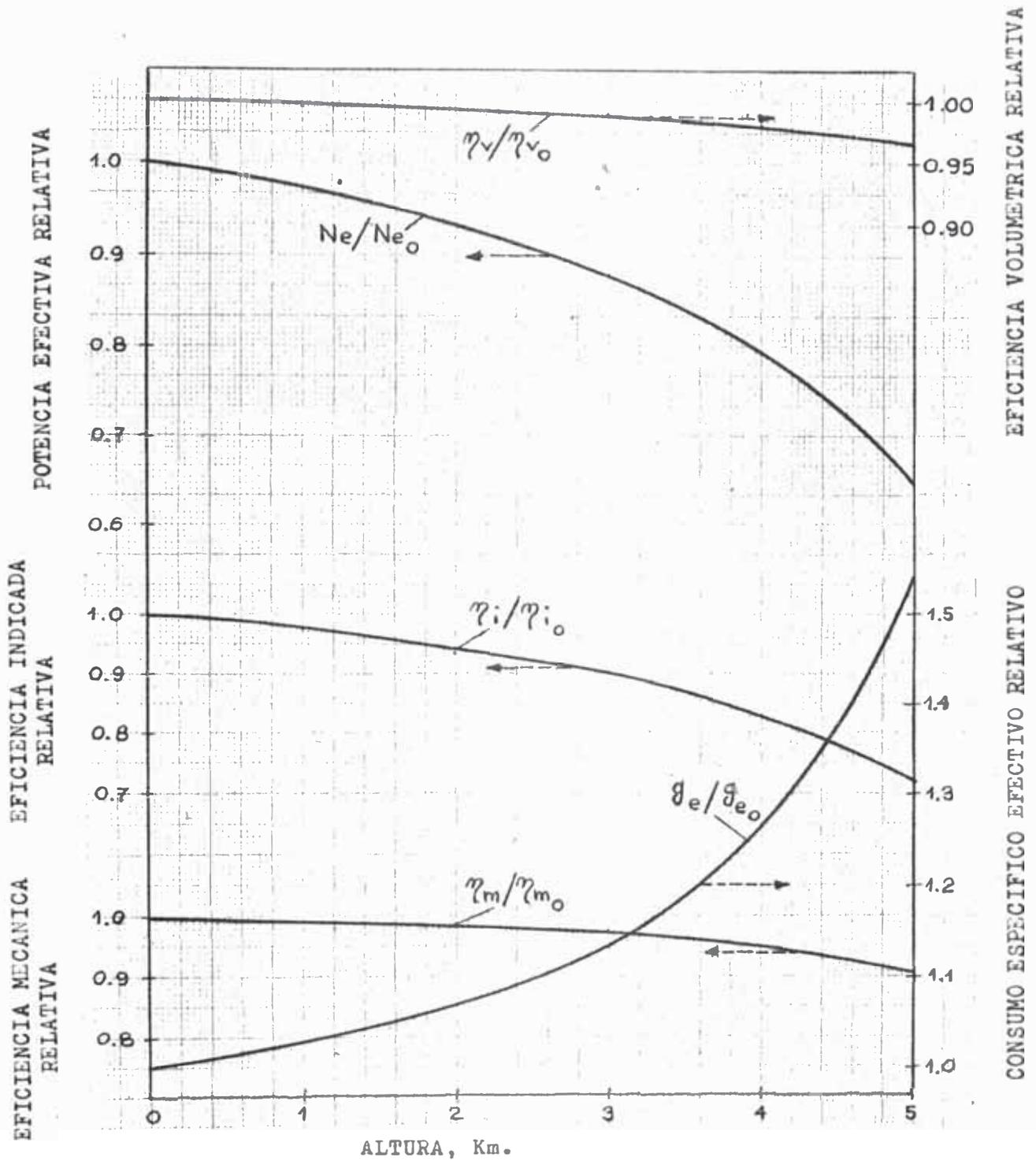


Fig. N^o 15.- Variación de los parámetros básicos del motor con la altura, con respecto a los que tenía a nivel del mar.

para diferentes alturas s.n.m., observándose que la caída de potencia es más acentuada para alturas superiores a los 3000 mts.

La Figura N^o 14 muestra la variación de potencias y consumo específico con la altura, para diferentes RPM. Para una altura dada, las pérdidas mecánicas p_m aumentan al crecer el número de revoluciones, como consecuencia del mayor trabajo de rozamiento. Si consideramos que la presión media indicada p_i se mantiene constante con las RPM, aunque su tendencia es similar a la eficiencia volumétrica, entonces la eficiencia mecánica mejora a menores revoluciones, lo cual resulta en caída de potencia con la altura, proporcionalmente menores cuando disminuye las RPM.

La variación del coeficiente de exceso de aire, eficiencias, consumo específico y potencia con la altura, para RPM. constante, han sido graficados en la Figura N^o 15.

C A P I T U L O III

METODOS EXPERIMENTALES PARA EFECTUAR EL ESTUDIO
DE LA INFLUENCIA DE LA ALTURA EN M.C.I.

Dentro de la técnica existente para el estudio experimental de la influencia de la altura en un motor de combustión interna, podemos considerar 3 métodos cuya diferencia estriba en aspectos técnico-económicos que determinan el diseño, adaptación y construcción de un banco de pruebas experimentales acorde con los recursos disponibles para la investigación.

3.1. Cámara Acondicionada

Según este método, la simulación de las condiciones de presión y temperatura en la altura, se realiza en una cámara en la cual se introduce el motor a ensayar. En esta técnica necesariamente se requiere de una cámara adicional de vacío en donde se desalojen los gases de escape a las condiciones correspondientes de la altura simulada.

Tiene como ventajas, aparte de obtener las condiciones atmosféricas requeridas en la admisión y en el escape, la simulación precisa de: la acción de ventilación de la volante en un medio cuya densidad es la correcta, variando así, la eficiencia mecánica; los problemas derivados de la disminución de la efectividad del sistema de enfriamiento, ya que, si es un motor refrigerado por aire, se reflejará en una menor capacidad de refrigeración debido

a que el ventilador impulsa aire de menor densidad, de igual forma en un motor refrigerado por agua, además, que en este último la temperatura de ebullición del agua disminuye por efecto de la menor presión atmosférica; la menor temperatura del combustible que afecta al proceso de combustión.

Las desventajas de este sistema, consisten en su alto costo, ya que, para lograr el vacío se requiere de bombas ó inyectores de gran capacidad, con un control permanente de presión, temperatura y humedad del ambiente enrarecido en la cámara.

3.2. Acondicionamiento del aire de ingreso

Con esta técnica, solamente el aire de aspiración se introduce en el motor a la presión y temperatura conforme a la altura deseada. En el tubo de escape se aspiran los gases para producir la depresión correspondiente.

La presión de vacío, se consigue colocando una restricción en el camino del fluido causando una caída de presión en éste cuando es succionado por el motor.

Para realizar estos ensayos se encuentra seria dificultad, más crítico aún cuando se trata de motores monocilíndricos, en medir la presión y temperatura en la admisión y escape, así como, para medir el caudal de aire que ingresa al motor. Esto se debe a la natural pulsación del flujo a través del cilindro.

Un arreglo para superar estas dificultades en pruebas, sería en -

equipar el motor con un "tanque estabilizador", para atenuar las pulsaciones y que los gases tengan una velocidad insignificante, tanto en el sistema de admisión como en el escape.

La capacidad de estos tanques debe ser bastante grandes, de acuerdo con la siguiente relación:

$$V_{\text{tanque}} = \frac{200 \times V_h}{i} \quad (43)$$

Estas dimensiones son necesarias para que la presión y la temperatura permanezcan virtualmente constante y no exista error en la medida del flujo de aire.

La presión atmosférica correspondiente a una cierta altitud, se consigue colocando una válvula a la entrada del tanque estabilizador de admisión, el cual estrangula y regula el flujo de aire hacia el interior del cilindro.

Este arreglo se puede apreciar en la Figura N^o 16.

Este método es simple y económico comparado con otros sistemas.

Además, permite la rápida regulación del vacío para régimen de funcionamiento estacionario del motor.

3.3. Método de estudio experimental "in situ" del motor

Es obvio que llevando el motor a las condiciones atmosféricas reales de altura, se lograría un estudio con los efectos de la altura

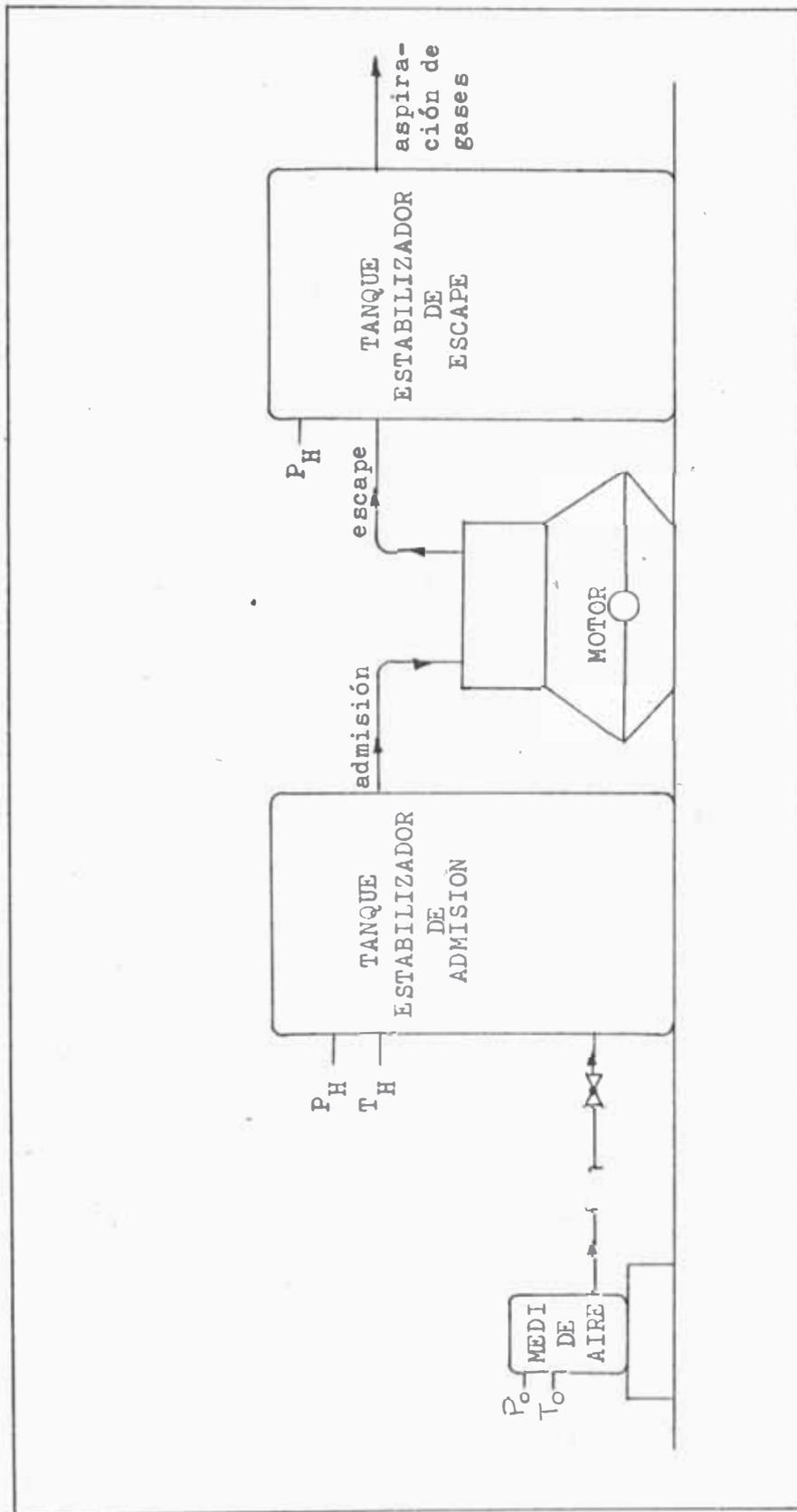


Fig. No 16.- Diagrama del sistema utilizado para la simulación de condiciones de altura.

en todos los aspectos. Sin embargo, tiene ciertas desventajas - que hacen que este método no nos sea aún factible.

En cuanto a las condiciones ambientales, si bien se logra la presión atmosférica deseada, es difícil realizar ensayos a la temperatura atmosférica promedio para esa altura.

Se necesita de personal técnico especializado y un banco de pruebas móvil equipado con los dispositivos e instrumentos de medición necesarios.

También es indispensable una fuente de energía que permita el arranque del motor, así como la absorción de la potencia generada por éste.

La base del bastidor debe lograr que las vibraciones del motor, - producto de las fuerzas de inercia no equilibradas, se encuentren en un nivel normal que no exponga al motor a daños funestos y permita exactitud en las mediciones.

Esta última condición es aún más crítica cuando se utiliza motores monocilíndricos.

C A P I T U L O IV

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO DEL
MOTOR DIESEL EN LA ALTURA

Para realizar el estudio experimental, se utilizó el banco de pruebas automotriz, marca "CUSSONS" y el motor Diesel monocilíndrico, marca "PETTERS", modelo PH1W, complementados por el equipo de vacío para la simulación de las condiciones de altura; los cuales - están ubicados en el Laboratorio de Máquinas Térmicas e Hidráulica de la UNI.

4.1. Descripción del banco de pruebas experimental

El banco de pruebas consta de tres partes fundamentales:

a. Equipo de vacío

Para simular las condiciones de altura, se utilizan: un tanque estabilizador de aire para la admisión y un tanque estabilizador de los gases de escape, con los cuales se mantiene condiciones estables de presión y temperatura en dichos tanques.

En el sistema de admisión, se logra el vacío mediante una válvula que estrangula el flujo de aire succionado por el motor, siendo las condiciones de este aire la que se registra en el tanque estabilizador de admisión.

En el sistema de escape, los gases calientes son llevados al tanque estabilizador, en el cual se logra el vacío succionando los gases mediante un equipo motobomba - eyector hidráulico.

El eyector hidráulico consiste en una tobera - difusor, en donde el agua impulsada por una bomba centrífuga, obtiene a la salida de la tobera una presión de vacío, creando la succión del gas, para salir ambos, agua y gas, por el difusor.

b. Dinamómetro Eléctrico

El dinamómetro de campo basculante, consiste en un motor de corriente continua que puede funcionar indiferentemente como motor ó como generador, siendo su velocidad máxima de 3000 RPM.

Su rotación está limitada por un brazo de palanca para las mediciones del torque de reacción proveniente ó aplicado al motor de combustión interna.

Cuando trabaja como motor de C.C., se utiliza para el arranque del motor y luego para determinar las pérdidas de fricción en el M.C.I.

También actúa como carga al motor, generando energía eléctrica, la cual es disipada en un banco de resistencia, el cual es capaz de conectar tres valores escalonados a la armadura del generador, pudiendo variar la carga gradualmente, mediante un regulador de tensión que varía la intensidad de corriente en los devanados de excitación del freno.

Cuenta con una unidad de control de C.A., que es transformada y rectificadas para los circuitos de campo y armadura.

c. Tablero de control y mando

En el cual se encuentran los mecanismos de control del dinamómetro y del banco de reóstatos, también se encuentran los instrumentos de medición y registro. El esquema del tablero se puede ver en la Figura N^o 17.

El esquema general del banco experimental se aprecia en la Figura N^o 18, según este gráfico, tenemos que; el aire atmosférico, succionado por el motor, ingresa por el medidor de flujo del tipo orificio 1, cuya caída de presión es registrado en el micromanómetro 2, para luego ser estrangulado, de acuerdo al vacío requerido, por la válvula globo 3, y dirigido al tanque de estabilización de admisión 4. De aquí ingresa al motor a las condiciones de presión y temperatura del tanque.

El vacío en el tanque se transmite mediante el conducto flexible al manómetro diferencial de mercurio 5, para medir su presión, el otro conducto comunica el vacío del tanque al respiradero del carter 7 del motor.

Los gases de escape son dirigidos, mediante la tubería de escape, hacia el tanque estabilizador 9, del cual son succionados por el - vacío creado en el venturi del eyector hidráulico.

A la salida del eyector 11, el agua conjuntamente con los gases succionados son llevados al tanque de agua 13; de donde, los gases son dirigidos hacia el medio exterior mediante un sistema de extracción.

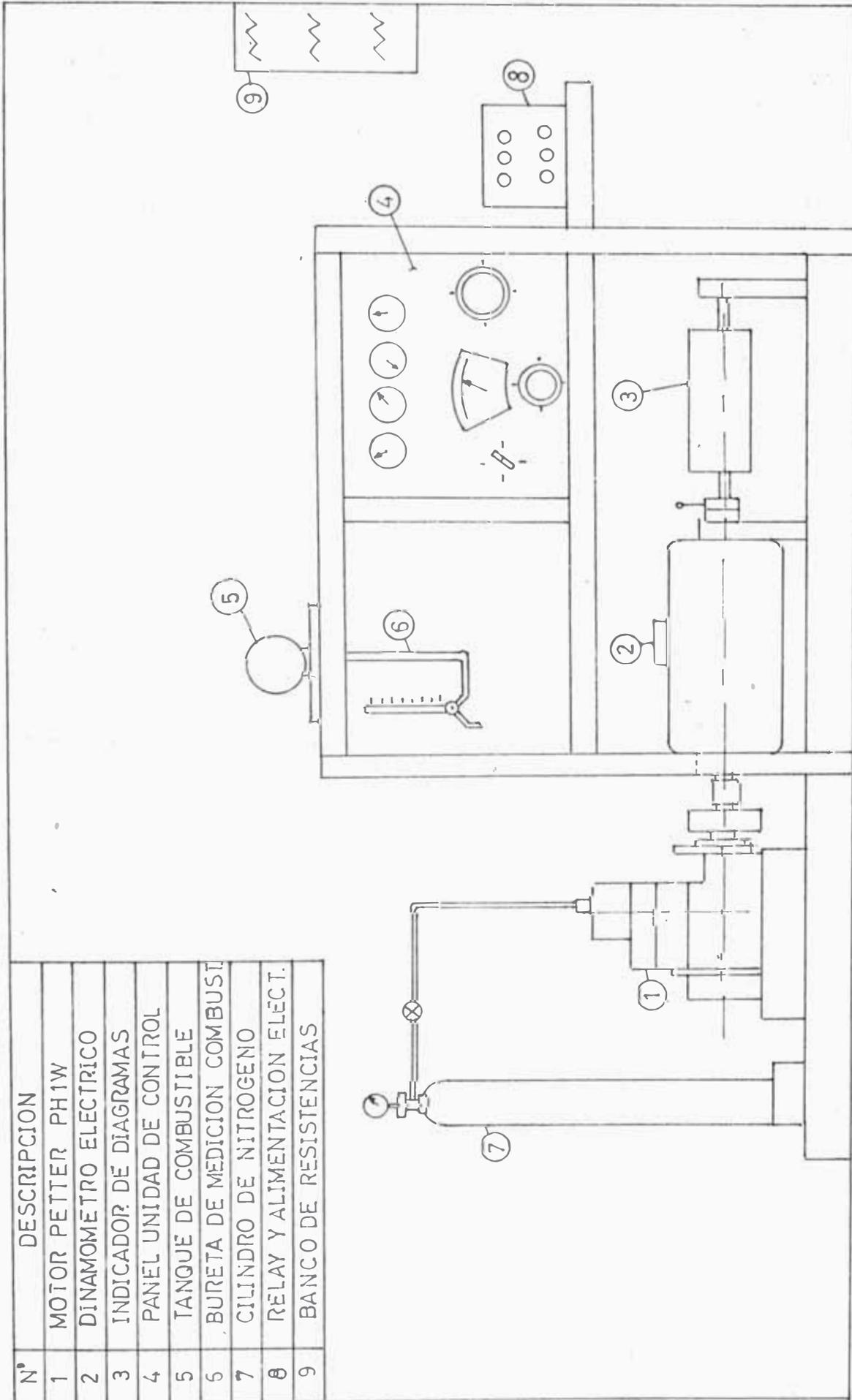


Fig. N° 17.- Esquema del tablero de control y mando.

4.2. Equipos e instrumentos utilizados

Entre los equipos e instrumentos utilizados para el estudio experimental, tenemos:

a. Indicador del Diagrama Farnboro

El indicador Farnboro es del tipo diafragma equilibrado, utilizado para obtener una representación de precisión de la variación de la presión en el cilindro del motor de combustión interno.

En él, se registra el instante en que la presión en el cilindro del motor a ser medida, es balanceada por una presión aplicada proveniente de una botella de gas nitrógeno.

Existirán al menos dos de estos puntos de equilibrio por ciclo, uno cuando la presión se está elevando y el otro cuando está descendiendo; incrementando la presión externa, se logran un conjunto de puntos que cubre todo el rango de presiones en el cilindro del motor.

Cuenta con la unidad captora (PICK - UPS), que contiene el diafragma, el cual señala el instante en que una presión creciente del cilindro iguala a la presión aplicada exteriormente, haciendo contacto entre el diagrama conectado a tierra y un electrodo que se ubica en una de las caras del diafragma, e indica el instante en que la presión del cilindro decreciente iguala a la presión aplicada exteriormente, abriendo este contacto.

Mediante la unidad registradora, se pueden obtener diagramas policíclicos de regulares dimensiones (370 mm. x 190 mm.). Est unidad posee un ensamble, cilindro y pistón controlado - por un resorte. El cilindro está conectado a la misma presión aplicada que la unidad captadora, de tal manera que el recorrido del pistón es proporcional, de acuerdo al resorte calibrado, a la presión aplicada a la unidad captadora.

Hay que tener en consideración, que se necesita tomar varios - diagramas en un período de tiempo para determinar por promedia ción, los valores de los parámetros característicos del funcionamiento del motor.

Para la obtención de los diagramas, es necesario establecer - cuidadosamente la posición de la línea del punto muerto superior (PMS), ya que un error de un grado, causa un error del 5% cuando se calcula la presión media indicada (pmi), a partir del - diagrama medido a lo largo del papel del diagrama.

b. Convertidor de Diagramas

En este aparato, el diagrama abierto, Presión - Angulo de giro del cigueñal (P- θ) es convertido en un diagrama Presión - Volumen (P-V). La conversión es hecha rápidamente mediante un sistema pantógrafo, el cual obtiene el diagrama cerrado a la misma escala del diagrama original, siendo necesario conocer la - relación longitud de la biela a longitud de la manivela del - motor ensayado, para la conversión correcta del diagrama.

c. Planímetro Polar

Utilizado para conocer el área del diagrama cerrado (P-V), y así poder obtener la presión media indicada p_i del motor.

Se necesita repetir la medición varias veces hasta conseguir una coincidencia aceptable en las lecturas sucesivas.

d. Tacómetro

Se utiliza un tacómetro electromagnético, el cual en un pequeño generador de corriente continua acoplado e impulsado por el motor cuya velocidad se quiere medir. La tensión producida es proporcional a la velocidad lo que se registra en un voltímetro calibrado directamente en RPM. Tiene un rango de 0 a 3000 RPM. con una aproximación de 50 RPM.

e. Balanza de Resorte

La balanza de resorte sirve para medir el torque, y su escala está en Newtons. Esta provista de dos posiciones, para mediciones cuando absorbe carga, ó cuando actúa como motor el dinamómetro; lo que permite su uso para motores con diferentes sentidos de rotación.

La balanza tiene un rango de 0 a 150 Newton con una aproximación de 0.5 Newton.

f. Medidor de Combustible

Es un medidor de flujo volumétrico, calibrado en cm^3 , usado en conjunto con un cronómetro.

Tiene un rango de 0 a 10 cm^3 con una aproximación de 0.1 cm^3 .

g. Medidor del Flujo de aire

Se utilizó un medidor del tipo orificio, que está ubicado a la entrada de todo el sistema de simulación de altura, de tal forma que las pulsaciones del motor no afecten la medición.

La caída de presión en este orificio se registra en un manómetro de inclinación variable.

Este manómetro tiene un rango de 0 a 25 cms. de H_2O , con una aproximación de 0.1 cms. de H_2O y con cuatro escalas.

4.3. Curvas Características del Motor Diesel para diferentes alturas sobre el nivel del mar, con regulación óptima para su funcionamiento a nivel del mar.

Las características técnicas del motor Diesel ensayado son:

DATOS TECNICOS

- Tipo	1 HW
- Número de Cilindros	1
- Diámetro del Cilindro	87.3 mm.
- Carrera del pistón	110.0 mm.
- Potencia del motor	8.2 BHP a 2000 RPM.

Cilindrada	659 cm ³
- Relación de Compresión	16.5:1
- Presión de Compresión	36.88 bar
Presión del aceite lubricante	2.41 bar
- Presión de Inyección	
900 - 1099 RPM	137/152 bar
1100 - 2000 RPM	196/217 bar
- Inyección de combustible	
hasta 1650 RPM	24° A PMS
1650 - 2000 RPM	28° A PMS
- Combustible	Petróleo Diesel Nº 2

4.3.1. Formulas Utilizadas

Para la evaluación de los resultados experimentales, se tuvieron los siguientes datos:

1. A , área de la tobera de caudal, 3.34 cm²
2. C_d , coeficiente de descarga de la tobera, 0.8336
3. F , lectura de la balanza del dinamómetro, en Newtons.
4. Δh , caída de presión del aire en el medidor de caudal, en cms. de agua.
5. n , RPM del Motor
6. p_b , presión barométrica, en mm. de Hg.
7. P_{cal} , poder calorífico del combustible, 42.10³ KJ/Kg.
8. r , longitud del brazo de palanca del dinamómetro, 0.254 mts
9. t , tiempo de medida de combustible, en seg.

10. t_a , temperatura de bulbo seco, en $^{\circ}\text{C}$.
11. t_h , temperatura de bulbo húmedo, en $^{\circ}\text{C}$.
12. V_c , volúmen de combustible, 8 cm^3 .
13. ρ'_c , densidad del combustible, 0.8571 gr/cm^3 .

Con los datos anteriores se obtuvo las siguientes relaciones:

a) Caudal de aire

$$Q = C_d A \sqrt{2g \times \Delta h \times \frac{\rho_{\text{agua}}}{\rho_{\text{aire}}}}$$

Reemplazando, obtenemos:

$$Q = 12.9292 \sqrt{\Delta h} \quad \text{m}^3/\text{hr} \quad , (44)$$

b) Flujo de masa real de aire

$$G_a = 6.0036 \frac{P_{b_0} \sqrt{\Delta h}}{(273 + t_a)} \text{ Kg/hr} \quad , (45)$$

c) Flujo de masa teórica de aire

$$G_o = 9.1847 \times 10^{-3} \frac{P_b}{(273 + t_a)} \times n \text{ Kg/hr} \quad (46)$$

d) Flujo de combustible

$$G_c = 3.6 \frac{V_c}{t} \times \rho'_c$$

Por lo cual obtenemos:

$$G_c = \frac{24.6848}{t} \quad \text{Kg/hr} \quad , (47)$$

e) Eficiente volumétrica

$$\eta_v = \frac{G_a}{G_o} \quad , (48)$$

f) Coeficiente de exceso de aire

$$\alpha = \frac{G_a}{G_c l_o} \quad , (49)$$

donde l_o - relación aire/ combustible estequiométrica.

g) Torque

$$T = 0.254 F \quad \text{Newton-m} \quad , (50)$$

h) Potencia efectiva

$$N_e = \frac{F_x n}{37595.6} \quad \text{Kw} \quad , (51)$$

i) Consumo específico efectivo de combustible

$$\xi_e = \frac{G_c}{N_e} \times 10^3 \quad \text{gr(Kw-hr)} \quad (52)$$

4.3.2. Curvas características del motor.

Las experiencias realizadas en el banco de pruebas "Cussons", - con el motor "PETERS", se efectuaron bajo condiciones estables - de operación y con una calibración adecuada de los equipos e instrumentos utilizados.

Inicialmente, se procedió a conocer los parámetros de potencia y economía del motor a nivel del mar, realizándose los ensayos a las condiciones ambientales del Laboratorio de Máquinas Térmicas, ubicado a una altura de 150 mts. sobre el nivel del mar. Los datos mencionados anteriormente, resultando los valores mostrados en la Tabla Nº 11, que permiten graficar la curva característica externa - de velocidad (Ver Figuras 19 y 20).

Cabe señalar que los ensayos fueron efectuados con una regulación óptima de todos los sistemas auxiliares del motor, para las condiciones a nivel del mar; esta regulación permanece invariable durante las pruebas con simulación de altura.

Se realizaron pruebas para conocer la variación de la potencia efectiva y el consumo específico efectivo de combustible con la altura, para diferentes revoluciones del cigueñal, y cuyos resultados son graficados en la Figura Nº 21. Los datos que permiten esta gráfica fueron tomados en condiciones estables del vacío creado en el sistema de admisión y escape del motor, y se muestran en las tablas - Nos. 12, 13, 14, 15 y 16 que corresponden a las velocidades del motor de 2000 RPM, 1760 RPM, 1500 RPM, 1200 RPM, 1000 RPM, respecti-

T A B L A N O 11

DATOS EXPERIMENTALES PARA LA CONSTRUCCION DE LA CURVA CARACTERISTICA EXTERNA DE VELOCIDAD DEL MOTOR PETERS IHW A CONDICIONES NORMALES - PRESION BAROMETRICA :
746.6 mm. Hg.

RPM	Δh cms H ₂ O	t seg	F Newton	G _a Kg/hr	G _o Kg/Hr	η_v	G _c Kg/hr	α	T Newton-m	Ne Kw	ξ_e gr/Kw-hr
2000	6.90	13.2	109.75	39.91	46.49	0.858	1.870	1.48	27.876	5.840	320.2
		13.2	109.50						27.813	5.825	321.0
1760	5.50	14.8	111.25	35.63	40.91	0.871	1.668	1.48	28.257	5.208	320.3
		14.6					1.691	1.46			324.7
1500	3.90	17.6	111.60	30.10	34.97	0.860	1.403	1.48	28.346	4.453	315.1
		17.6					1.395	1.49			
1200	2.64	23.6	105.50	24.76	27.98	0.885	1.046	1.64	26.797	3.370	310.4
	2.62	23.9	105.25	24.67		0.882	1.033	1.65	26.734	3.360	307.4
1000	1.85	32.4	89.40	20.67	23.25	0.889	0.762	1.88	22.710	2.378	320.4
		32.6	88.25				0.757	1.89	22.415	2.347	322.5

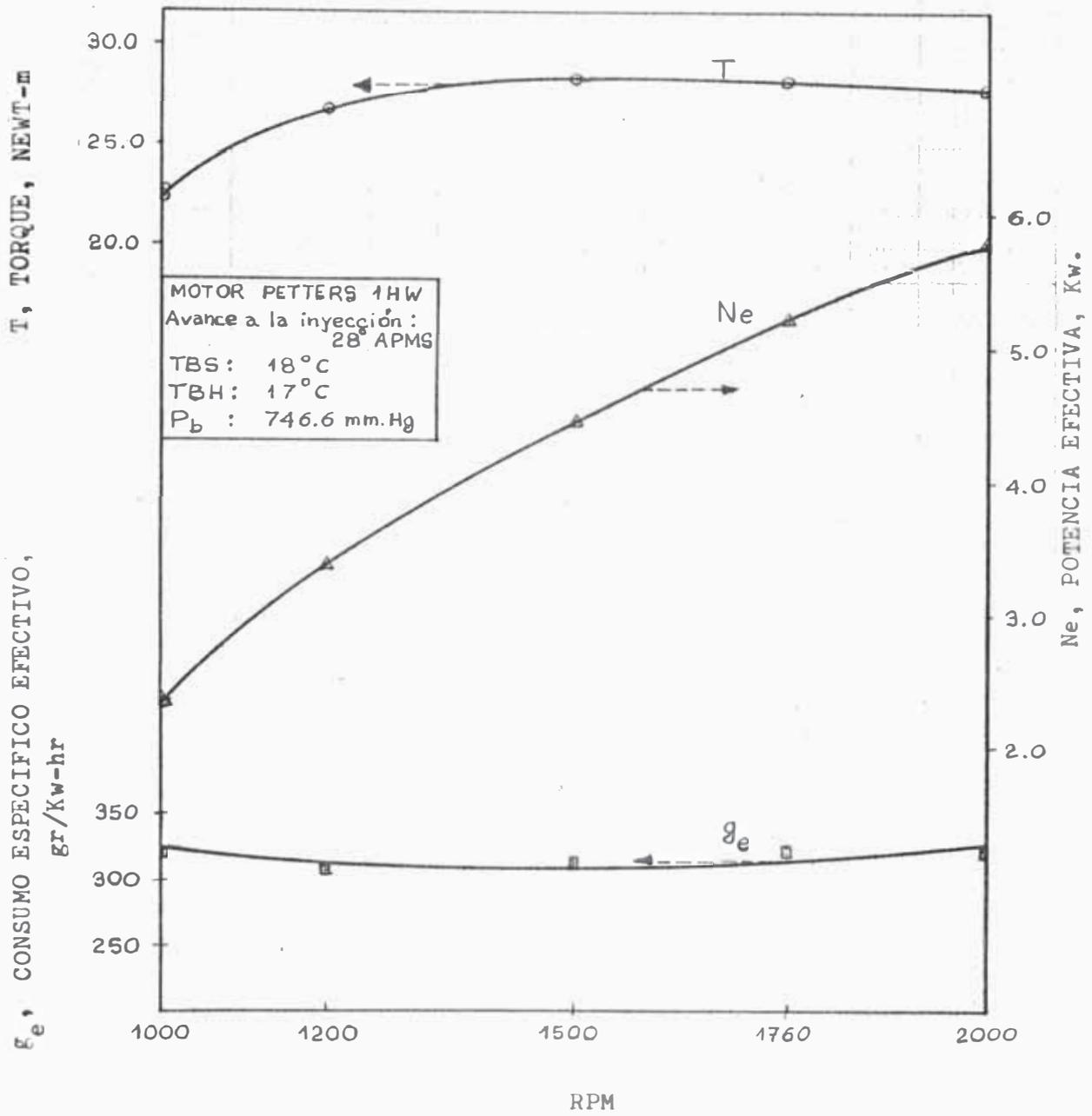


Fig. Nº 19.- Característica externa de velocidad a condiciones normales

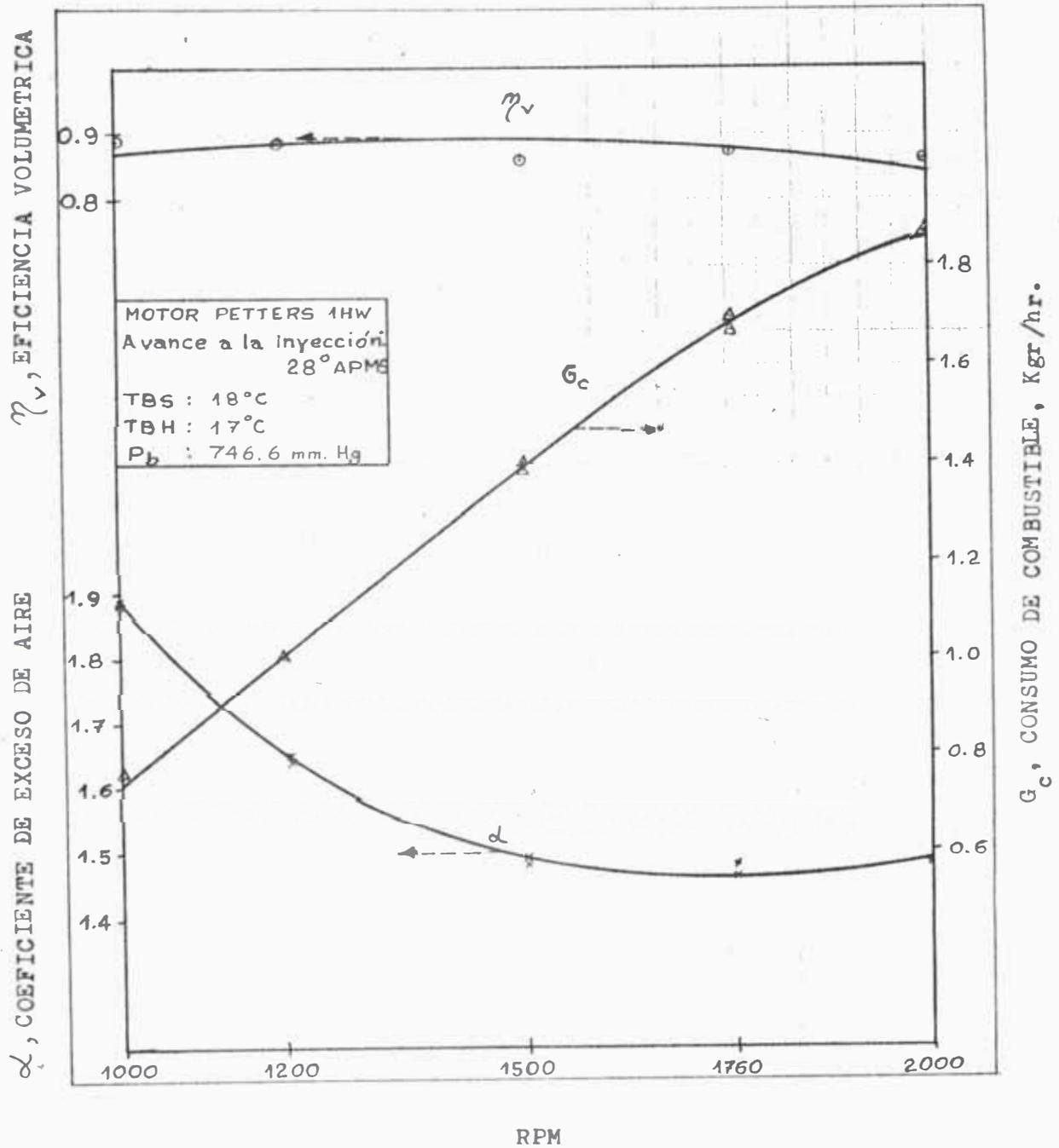


Fig. Nº 20.- Característica externa de velocidad a condiciones normales

T A B L A N O 12

CARACTERISTICAS DEL MOTOR PETERS CON LA VARIACION DE
ALTURA. VELOCIDAD DEL MOTOR 2000 RPM

H m.s.n.m	P _b mm. Hg	Δh cms H ₂ O	t seg	F Newton	G _a Kg/hr	G _o Kg/hr	η _v	G _c Kg/hr	α	Ne Kw	g _e gr/Kw-hr	Ne/Ne _o	g _e /g _{e_o}
150	746.6	6.90	13.2	109.75	39.91	46.49	0.859	1.87	1.48	5.84	320.2	1.0	1.00
1077	670.4	5.40	13.3	108.75	35.31	41.75	0.846	1.86	1.31	5.79	320.8	0.99	1.00
1755	619.6	4.50	13.1	106.25	32.23	38.58	0.835	1.88	1.18	5.65	332.7	0.97	1.04
2491	568.8	3.75	13.5	97.75	29.42	35.42	0.831	1.83	1.11	5.20	352.0	0.89	1.08
3283	518.8	2.95	13.7	97.5	26.10	32.31	0.808	1.80	1.13	5.19	346.8	0.81	1.20
4185	467.2	2.33	14.1	89.25	23.17	29.10	0.796	1.75	1.16	4.75	337.2	0.71	1.33
5176	416.4	1.85	14.0	89.00	20.67	25.93	0.797	1.76	0.99	4.73	385.3	0.61	1.57
			13.9	77.5				1.82	0.98		384.8		
			14.0	77.5				1.78	0.90	4.12	432.0		
			14.1	66.75				1.76	0.91		427.2		
			14.0	66.50				1.75	0.92		424.8		
			13.7					1.80	0.79	3.55	507.0		
			13.8					1.79	0.80	3.54	504.0		
			14.0					1.76	0.81		497.2		

T A B L A N O 13

CARACTERISTICAS DEL MOTOR PETERS CON LA VARIACION DE
ALTURA, VELOCIDAD DEL MOTOR 1760 RPM.

H	P _b mm. Hg	Δ h cms H ₂ O	t seg	F Newton	G _a Kg/hr	G _o Kg/hr	η _v	G _c Kg/hr	α	Ne Kw	g _e gr/Kw-hr	Ne/Ne _o	g _e /g _{e_o}
150	746.6	5.50	14.6	111.25	35.63	40.91	0.871	1.691	1.46	5.21	324.7	1.00	1.00
1077	670.4	4.30	14.7	110.75	31.51	36.74	0.858	1.679	1.30	5.19	323.8	0.99	1.01
1755	619.6	3.48	14.8	110.00	28.34	33.95	0.835	1.668	1.17	5.15	324.3	0.98	1.01
2491	568.8	2.93	14.9	104.00	26.01	31.17	0.835	1.657	1.07	4.87	344.8	0.93	1.07
3283	518.8	2.35	14.8	94.25	23.30	28.43	0.820	1.668	0.98	4.86	338.9	0.85	1.17
4185	467.2	1.83	15.0	94.00	23.14		0.814	1.646	0.96	4.41	379.1	0.75	1.33
5176	416.4	1.40	14.8	83.25	20.55	25.60	0.803	1.668	0.85	3.90	427.7	0.62	1.62
			14.8	69.0	17.98	22.82	0.788	1.691	0.74	3.32	523.5		
			14.8	68.5				1.668	0.75	3.21	520.1		

T A B L A N O 14

CARACTERISTICAS DEL MOTOR PETERS CON LA VARIACION DE
ALTURA VELOCIDAD DEL MOTOR 1500 RPM

H	P _b mm. Hg	Δh _g cms H ₂ O	t seg	F Newt.	G _a Kg/hr	G _o Kg/hr	<i>n_v</i>	G _c Kg/hr	α	Ne Kw	g _e gr/Kw-hr	Ne/Ne _o	g _e /g _{e_o}
150	746.6	3.90	17.6	111.60	30.10	34.97	0.861	1.403	1.485	4.45	315.1	1.00	1.00
1077	670.4	3.05	17.6	111.00	26.62	31.41	0.848	1.403	1.313	4.43	316.8	0.99	1.00
1755	619.6	2.53	17.7	110.20	24.24	29.03	0.835	1.395	1.202	4.40	317.3	0.99	1.00
2491	568.8	2.08	18.0	105.00	21.98	26.64	0.825	1.387	1.209	4.39	316.0	0.94	1.04
3283	518.8	1.63	17.8	96.50	19.46	24.30	0.801	1.371	0.971	3.85	360.3	0.86	1.14
4185	467.2	1.30	18.0	96.25	17.38	21.89	0.794	1.371	0.982	3.84	357.0	0.77	1.28
5176	416.4	0.95	17.7	86.25	15.24	19.51	0.781	1.395	0.862	3.44	405.5	0.66	1.48
		1.00	17.8	74.50	14.85		0.761	1.387	0.867	2.97	403.2		
			18.15	74.00				1.411	0.747	2.95	474.8		
								1.360	0.756		460.7		

CARACTERISTICAS DEL MOTOR PETERS CON LA VARIACION DE ALTURA
VELOCIDAD DEL MOTOR 1200 RPM

H	P _b	Δ h	t	F	G _a	G _o	ρ _v	G _c	α	Ne	g _e	Ne/Ne _o	g _e /g _{e_o}
m.s.n.m	mm. Hg	cms H ₂ O	seg	Newton	Kg/hr	Kg/hr		Kg/hr		Kw	gr/Kw-hr		
150	746.6	2.64	23.6	105.50	24.76	27.98	0.882	1.046	1.64	3.37	310.4	1.00	1.00
		2.62	23.9	105.25	24.67		0.885	1.033	1.65	3.36	307.4		
1077	670.4	2.10	23.8	103.25	22.09	25.12	0.879	1.037	1.47	3.30	314.2	0.98	1.01
			24.0	103.00				1.029	1.49	3.29	312.8		
1755	619.6	1.64	23.8	100.50	19.52	23.22	0.841	1.037	1.30	3.21	323.1	0.95	1.04
			23.9	100.50				1.033	1.31		321.8		
2491	568.8	1.35	23.8	96.75	17.71	21.32	0.831	1.037	1.18	3.09	335.6	0.92	1.08
			24.0	96.75				1.029	1.19		333.0		
3283	518.8	1.09	23.5	91.00	15.91	19.44	0.818	1.048	1.05	2.90	361.3	0.86	1.17
			23.7	90.75				1.040	1.06	2.89	360.0		
4185	467.2	0.87	23.0	83.00	14.18	17.51	0.810	1.076	0.91	2.65	406.2	0.79	1.31
			23.1					1.073			405.0		
5176	416.4	0.68	22.4	72.00	12.57	15.61	0.806	1.102	0.79	2.30	479.1	0.68	1.55
			22.5	72.00				1.097			477.0		

T A B L A N O 16

CARACTERISTICAS DEL MOTOR PETERS CON LA VARIACION DE ALTURA
VELOCIDAD DEL MOTOR 1000 RPM

H	P _b	Δh	t	F	G _a	G _o	η _v	G _c	α	Ne	g _e	Ne/Ne _o	g _e /g _{e_o}
m.s.n.m	mm. Hg	cms. H ₂ O	seg	Newt	Kg/hr	Kg/hr		KG/hr		Kw	gr/Kw-hr		
150	746.6	1.85	32.4	88.25	20.73	23.32	0.889	0.762	1.88	2.35	324.3	1.00	1.00
1077	670.4	1.40	32.6	89.40	18.03	20.94	0.861	0.757	1.89	2.38	318.1	0.97	1.02
1755	619.6	1.38	32.9	86.00	17.90		0.855	0.750	1.66	2.29	327.5		1.00
2491	568.8	1.13	33.6	86.00	16.20	19.35	0.837	0.735	1.69		321.0	0.95	1.05
3283	518.8	1.10	32.8	84.25	15.98		0.826	0.753	1.49	2.24	336.2		
4185	467.2	0.88	32.8	84.25	14.30	17.76	0.805	0.755	1.47	2.10	359.5	0.89	1.11
5176	416.4	0.75	32.7	79.00	13.20	16.20	0.815	0.748	1.31	2.01	379.1	0.85	1.19
		0.58	32.4	75.50	11.61	14.59	0.796	0.779	1.17	1.92	394.3	0.81	1.23
		0.43	32.6	75.75	9.99	13.00	0.768	0.762	1.20	1.93	394.8		
			33.0	72.25				0.757	1.06	1.70	440.0	0.72	1.35
			33.6	64.00				0.748	0.92	1.71	429.8		
				64.25				0.735	0.94				

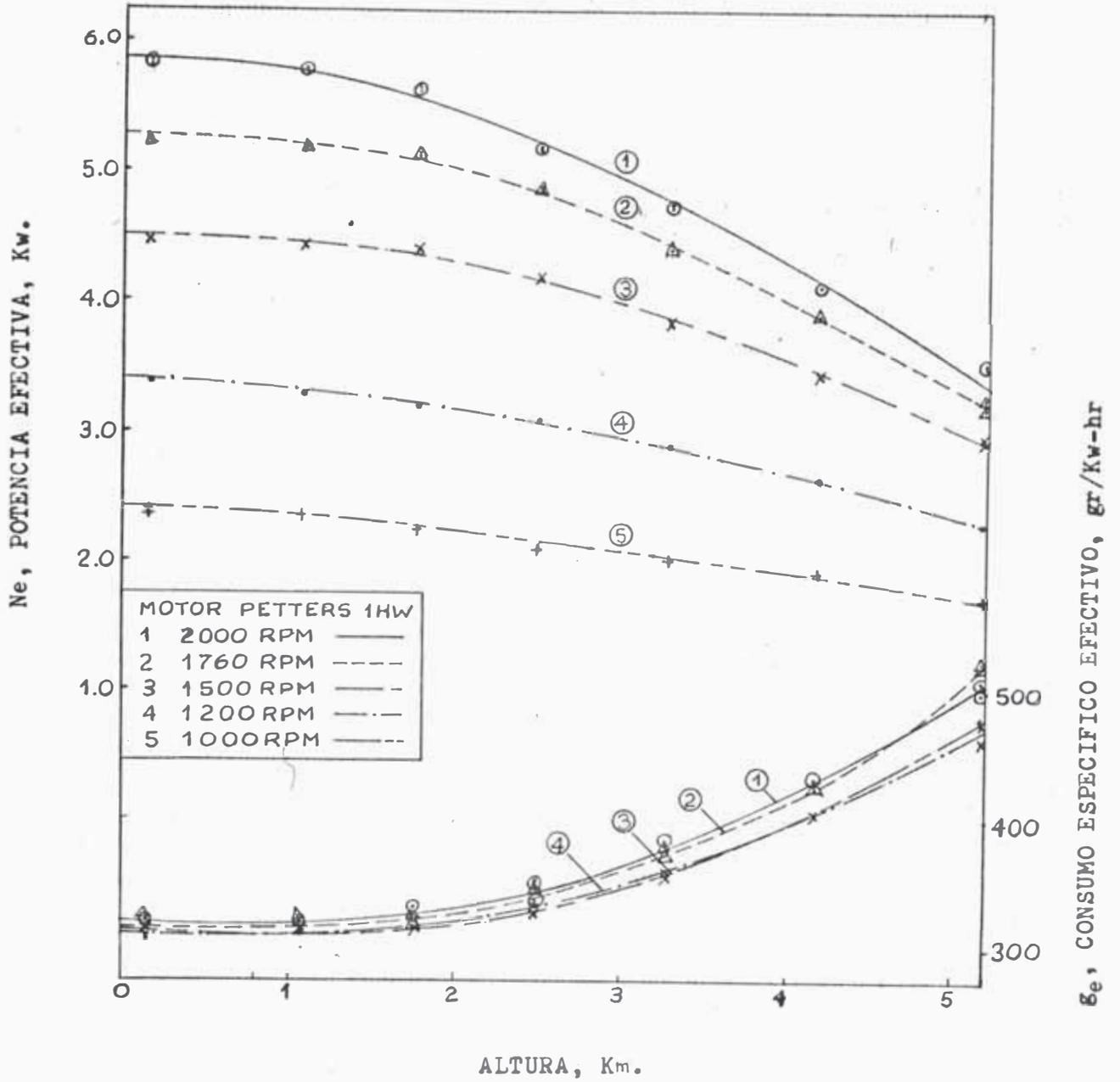


Fig. Nº 21.- Variación de la potencia efectiva y el consumo específico de combustible en función de la altura.

vamente con el fin de obtener la curva característica de carga, es decir, la variación de los principales parámetros del motor en función de la carga a RPM. constante; se realizaron las pruebas variando la carga mediante el regulador del órgano de mando de la alimentación de combustible.

Dichos ensayos se realizaron para diferentes condiciones de simulación de altura, siendo estas 150 mts., 1750 mts. y 5176 mts. sobre el nivel del mar, y cuyos datos obtenidos se registraron en las Tablas Nos. 17, 18 y 19 respectivamente; estos datos permiten la gráfica de la característica de carga del motor ensayado, mostrada en la Figura Nº 22.

La variación del coeficiente de exceso de aire con la carga, para las tres alturas anteriormente mencionadas, es graficado en la Figura Nº 23.

Recordemos que una de las alternativas propuestas, que probablemente podría contrarrestar el efecto perjudicial de la altura en el rendimiento del motor, es la regulación de combustible con la altura.

En la Figura Nº 24 se han graficado la variación de la potencia efectiva y el consumo específico de combustible con la altura, para diferentes coeficientes de exceso de aire, que implica la regulación de la cantidad de combustible inyectado, a una velocidad del motor de 2000 RPM; se puede apreciar que, si bien es cierto que la potencia efectiva disminuye, el consumo específico efectivo

T A B L A N O 17

CARACTERISTICAS DE CARGA DEL MOTOR PETERS
VELOCIDAD DEL MOTOR 2000 RPM
ALTURA: 150 MTS. s.n.m.

h	t	F	G _a	G _o	η_v	G _c	α	Ne	ξ_e	Ne/Ne _o	ξ_e/ξ_{e_o}
cms.H ₂ O	seg	Newt.	Kg/hr	Kg/hr		Kg/hr		Kw	gr/Kw-hr		
	13.2	109.50				1.870	1.47	5.83	321.0		1.01
6.80			39.74	46.63	0.852					1.00	
	13.6	109.25				1.815	1.52	5.81	312.3		0.99
7.15						1.356	2.08	4.40	308.9		0.98
	18.2	82.75	40.75	46.63	0.874						
	17.9	82.50				1.379	2.04	4.39	313.4		0.99
7.18						1.060	2.67	2.98	355.7		1.12
	23.2	56.00	40.84	46.63	0.876					0.51	
	23.0	56.25				1.070	2.64	2.99	357.8		1.13
7.23						0.762	3.73		529.2		1.67
	32.4		40.98		0.879						
	32.0	27.00		46.63		0.770	3.68	1.44	534.7		1.69
7.25						0.781	3.63		542.4		1.71
	31.6		41.04								
	46.4					0.532	5.35				
7.28		0	41.12	46.63	0.882			0	∞	0	∞
	47.7					0.517	5.50				

T A B L A N O 18

CARACTERISTICAS DE CARGA DEL MOTOR PETERS
VELOCIDAD DEL MOTOR 2000 RPM
ALTURA: 1755 MTS. s.n.m.

h	t	F	G _a	G _o	η_v	G _o	α	Ne	ϵ_e	Ne/Ne _o	$\epsilon_e/\epsilon_{e_o}$
cms.H ₂ O	seg	Newt.	Kg/hr	Kg/hr		Kg/hr		Kw	gr/Kw-hr		
	13.48	105.00				1.831	1.22	5.59	337.0		1.02
4.48	13.30		32.26	38.70	0.834	1.856	1.20			1.00	1.00
	13.11	105.25				1.884	1.18	5.60	327.0		0.98
	18.8	79.50						4.23	309.7		
4.63	18.8	79.75	32.79	38.70	0.847	1.310	1.73	4.24	309.0	0.76	0.93
	24.3	54.50				1.016	2.27	2.90	354.0	0.52	1.07
4.78	25.0		33.32	38.70	0.861	0.987	2.34		349.0		1.05
	24.4	54.00				1.012	2.28	2.87	340.3	0.51	1.03
	32.6	28.00				0.757	3.08	1.49	508.1	0.27	1.53
4.88	34.0	28.25	33.67	38.70	0.870	0.726	3.21	1.50	484.0		
	33.6	27.25				0.735	3.17	1.45	506.9	0.26	1.46
4.93	47.6	0	33.84	38.70	0.874	0.519	4.51	0	∞	0	∞

T A B L A N° 19

CARACTERISTICAS DE CARGA DEL MOTOR PETERS VELOCIDAD DEL
MOTOR 2000 RPM. ALTURA: 5176 mts. s.n.m.

h	t	F	G _a	G _o	η_v	G _c	α	Ne	ϵ_e	Ne/Ne _o	$\epsilon_e/\epsilon_{e_o}$
cms. H ₂ O	seg	Newt.	Kg/hr	Kg/hr		Kg/hr		Kw	gr/Kw-hr		
	13.6					1.815	0.78		517.0		1.01
1.82	14.0	66.00	20.56	26.01	0.791			3.51		1.00	
	14.0					1.763	0.81		502.3		0.99
1.95	21.3	52.50				1.160	1.27	2.79	413.5	0.79	0.81
	21.5	53.00	21.28	26.01	0.818	1.150	1.28	2.82	410.0	0.80	0.80
1.97	30.6	31.12	21.39			0.810	1.95	1.66	485.0	0.47	0.95
	31.4			26.01		0.786	1.88		4.70.7		0.92
1.98	32.4	31.50	21.45			0.762	1.83	1.68	456.3	0.48	0.90
2.02	39.0					0.631	2.38		657.3		1.29
	38.0	18.00	21.66	26.01	0.833	0.650	2.31	0.96	677.1	0.27	1.33
	37.6					0.660	2.27		687.5		1.35
2.06	47.6	0	21.87	26.01	0.841	0.520	2.91	0	∞	0	∞
	47.0					0.530	2.86				

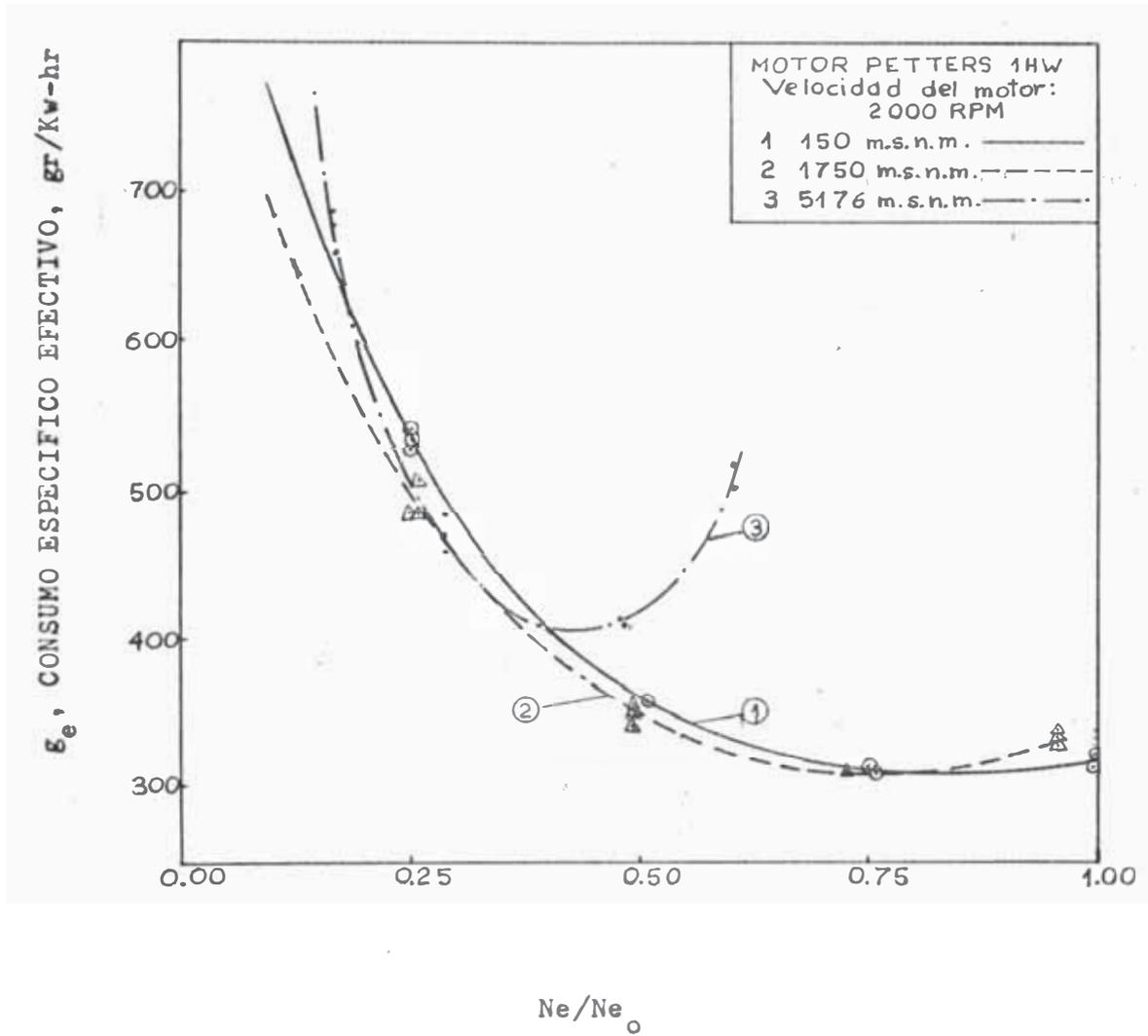


Fig. Nº 22.- Característica de carga experimental del Motor Diesel sin regulación alguna, para diferentes alturas.

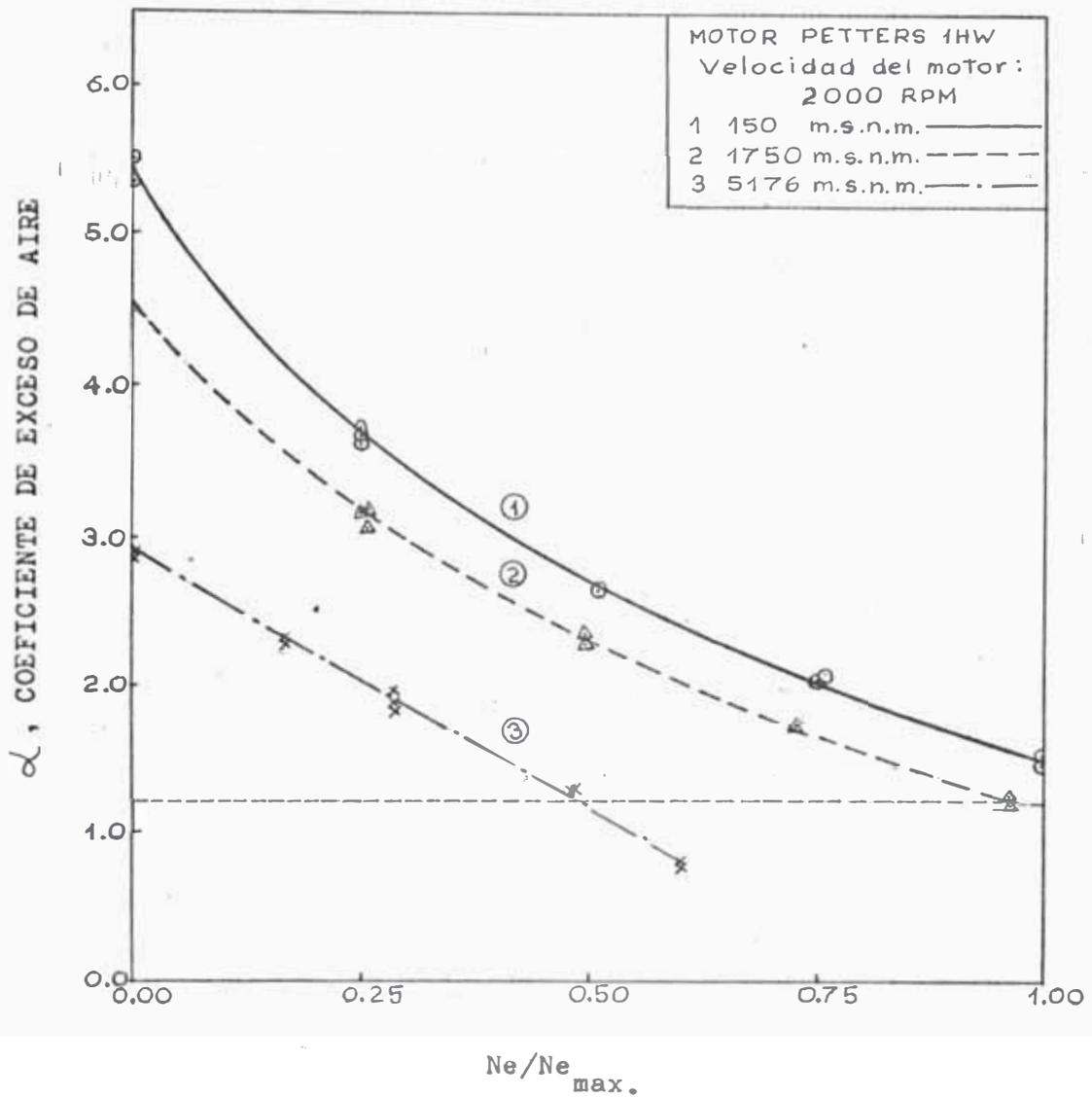


Fig. Nº 23.- Variación del coeficiente de exceso de aire con la carga, para diferentes alturas.

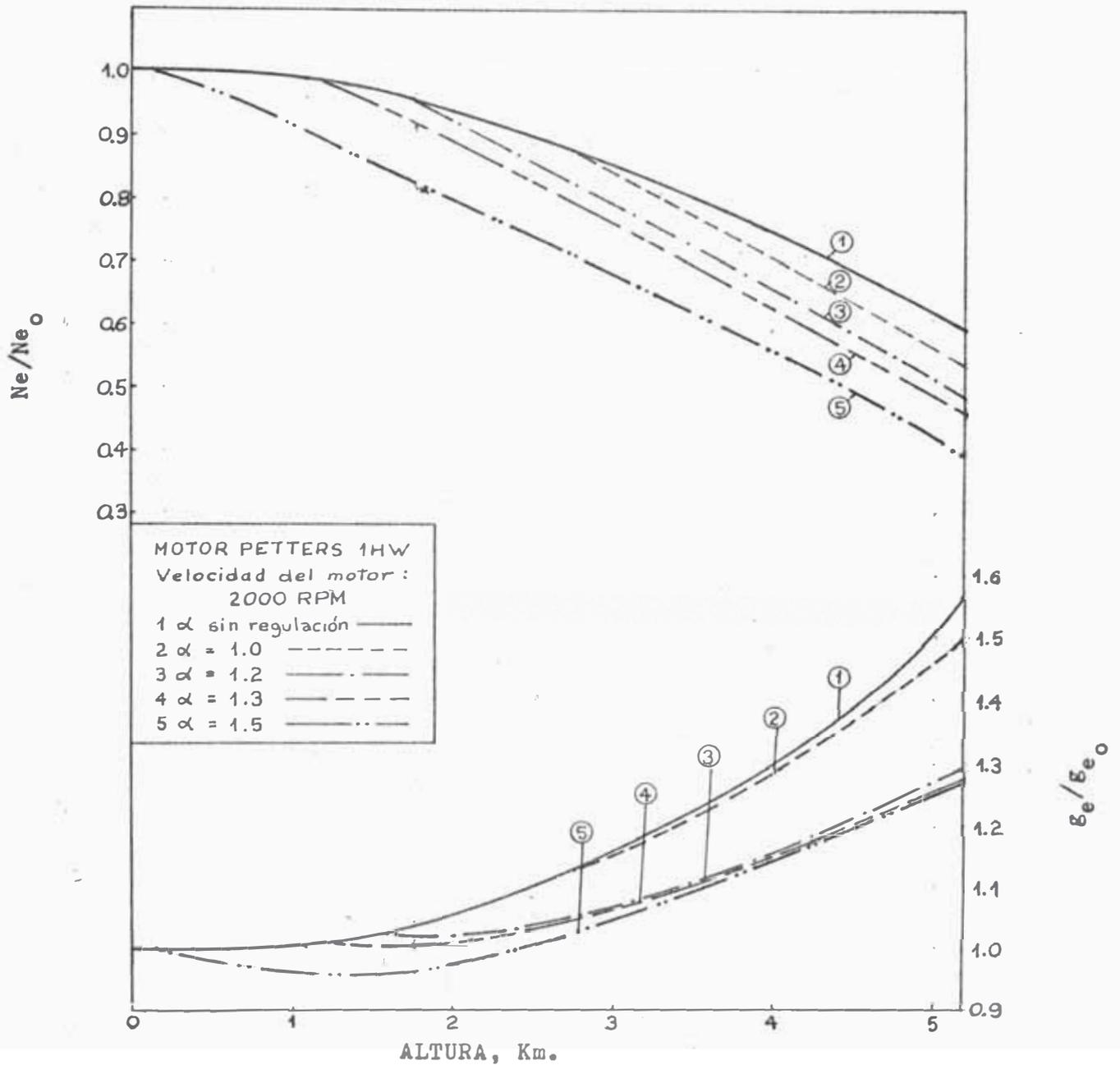


Fig. Nº 24.- Variación de la potencia efectiva y del consumo específico de combustible con la altura, para diferentes coeficientes de exceso de aire.

T A B L A N O 20

VARIACION DE LOS PARAMETROS EFECTIVOS DEL MOTOR PETERS DURANTE LOS
 ENSAYOS CON EL INDICADOR FARNBORO. VELOCIDAD DEL MOTOR
 2000 RPM

CURVAS	H mts.s.n.m	P _b mm. Hg	G _a Kg/hr	G _c Kg/hr	α	P _e bar	N _e Kw	g _e gr/Kw-hr	Ne/Ne _o	g _e /g _{e_o}
1	150	746.6	39.48	1.884	1.45	5.208	5.72	329.4	1.00	1.00
2	1077	670.4	34.69	1.921	1.25	5.176	5.68	338.0	0.99	1.03
3	1755	619.6	31.75	1.863	1.18	5.100	5.60	332.7	0.98	1.01
4	2491	568.8	28.82	1.960	1.02	4.844	5.32	363.4	0.93	1.10
5	3297	518.0	26.11	1.802	1.00	4.352	4.78	377.0	0.84	1.15
6	4185	467.2	23.08	1.892	0.84	3.660	4.02	470.6	0.70	1.43
7	5176	416.4	20.59	1.830	0.78	3.000	3.30	554.6	0.58	1.68

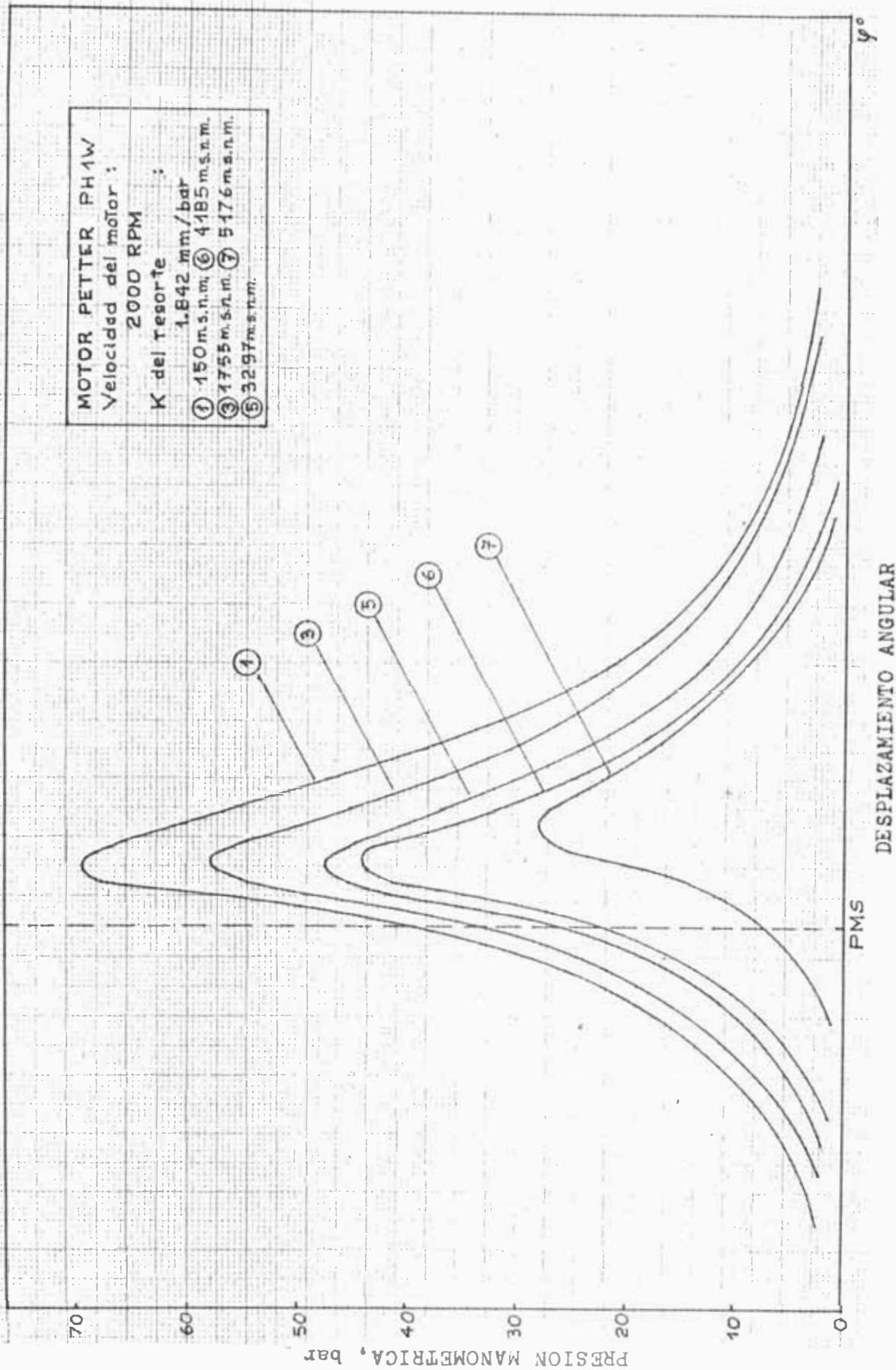


Fig. No 25.- Diagramas obtenidos para el Motor PETERS, a diferentes condiciones de altura simulada, con velocidad constante y a plena carga.

de combustible se aminora en mayor proporción que éste, confirmando nuestras apreciaciones.

Utilizando el indicador de diagramas "Farnboro", se obtuvo los diagramas indicados del ciclo registrándose las variaciones de la presión de acuerdo con el ángulo de giro del cigueñal.

En la figura Nº 25 se han graficado los diagramas obtenidos por el motor ensayado a diferentes condiciones de altura simulada, con velocidad de rotación constante y a plena carga; en ella es notoria la disminución de la presión máxima del ciclo, así como, su desfazamiento angular con respecto a su posición óptima conforme aumenta la cota sobre el nivel del mar.

Estos interesantes resultados prácticos obtenidos son analizados en el siguiente capítulo, haciéndose una comparación con los resultados teóricos hallados anteriormente.

CAPITULO V
*****ANALISIS COMPARATIVO DE LAS CURVAS TEORICAS
Y PRACTICAS

Es necesario, luego del estudio teórico y ensayos realizados, -
comparar los resultados obtenidos que confirmen la magnitud y -
tendencia de los diferentes parámetros que influyen negativamen-
te en el funcionamiento del motor en la altura.

De este análisis se puede afirmar que un motor de encendido por -
compresión (EC) tiene una ligera variación de su potencia efecti-
va y consumo específico hasta los 2,000 m.s.n.m.; a partir de esa
altura estos parámetros empeoran considerablemente, debido básica-
mente a que el coeficiente de exceso de aire disminuye a un nivel
crítico que determina la pobre eficiencia térmica, el mayor smoke
y las altas temperaturas de los gases de escape. Es por esta ra-
zón que la regulación sugerida del combustible inyectado, ó sea -
la variación del coeficiente de exceso de aire, se debe realizar
a partir de la altura antes mencionada.

En los ensayos realizados con el motor "Petters" a 2000 RPM, se
obtuvo que la potencia efectiva a 5000 m.s.n.m. se redujo a un
60% de su valor que tenía a condiciones ambiente normales mien-
tras que el consumo específico aumentó en un 57%; en tanto que -
el estudio teórico determinó una reducción de la potencia efecti-
va, a la misma altura, a 64% de su valor inicial y el consumo -
específico de combustible aumentó en un 54%. La Figura N° 26 -

grafica esta comparación, que confirma plenamente el estudio teó
rico-práctico realizado.

Otra característica importante es que a menores velocidades de -
rotación la caída de potencia es menos severa y el consumo espe-
cífico aumenta en menor proporción aunque siempre manteniendo la
tendencia obtenida a su velocidad nominal; este efecto es expli-
cable dado el mayor tiempo disponible para la combustión.

El análisis de la curva característica de carga (Figura N^o 22) -
nos permite observar el natural desplazamiento de los puntos de
consumo mínimo de combustible, para las tres diferentes alturas
ensayadas, hacia la zona de menor carga ubicándose su valor ópti-
mo a 0.75 - 0.80 del valor a plena carga. Este gráfico nos permi
te hacer una regulación del combustible que optimize su consumo -
sin disminuir notablemente su potencia efectiva, especialmente -
útil en motores Diesel estacionarios que funcionan en gran altura.

Como explicamos anteriormente, un coeficiente de exceso de aire -
menor a 1.2 trae consecuencias negativas en el rendimiento del mo
tor da una explicación clara del empeoramiento de sus principa
les parámetros; en la figura N^o 23 se ha destacado esta zona sub
rayándola.

Los resultados experimentales obtenidos que verifican las predic
ciones teóricas, corroboran la propiedad del método utilizado pa
ra la simulación de la altura con un banco de pruebas versátil,
económico que inclusive permite el estudio más detallado de -

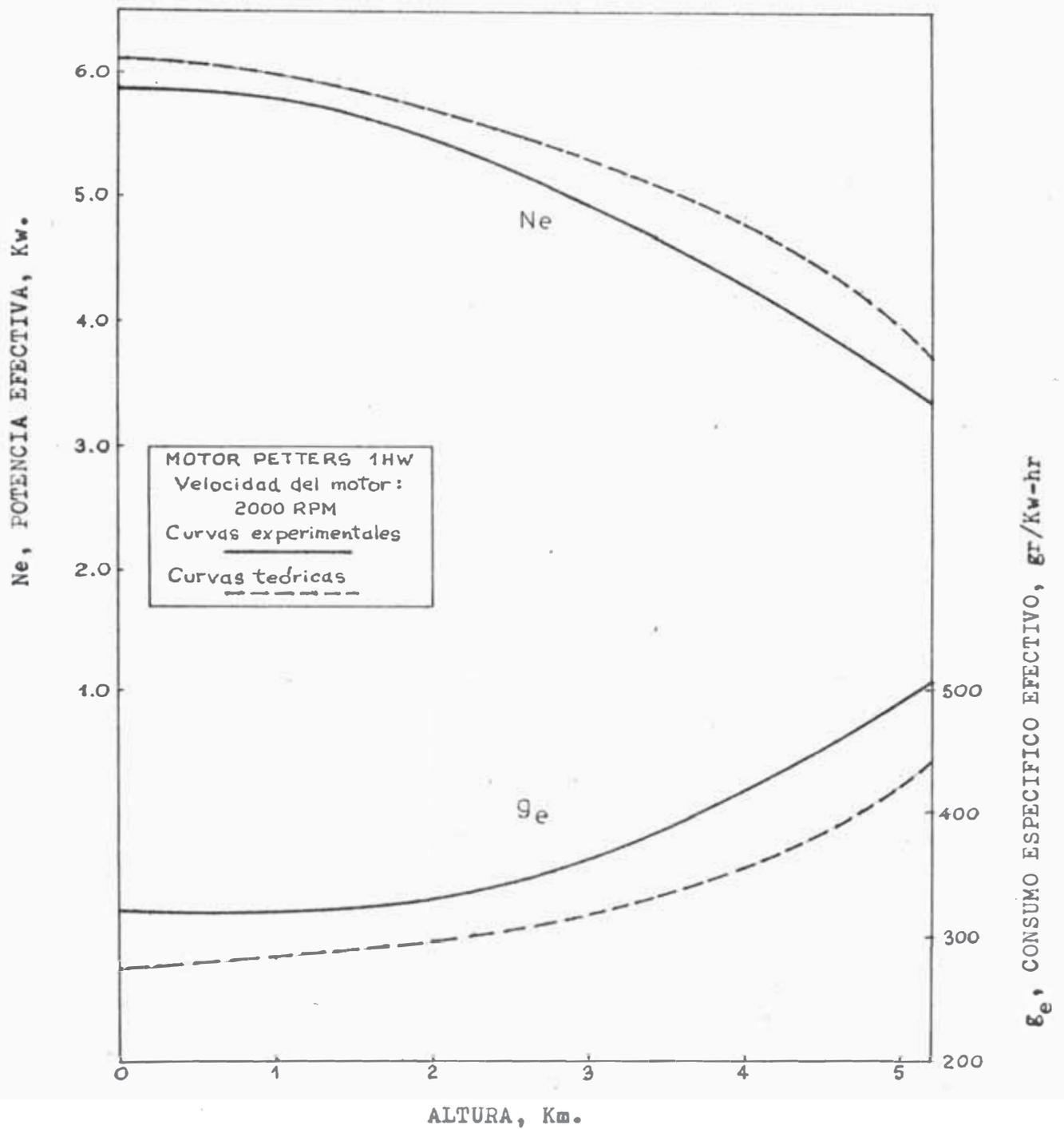


Fig. Nº 26.- Comparación de las curvas reales, obtenidas en los ensayos del motor Petters, y las curvas teóricas, obtenidas del estudio realizado, de la potencia efectiva y el consumo específico efectivo en función de la altura.

algunas de las alternativas propuestas para un mejoramiento de las condiciones de operación del motor Diesel como es, la regulación de combustible, optimización del ángulo de avance a la inyección del combustible y la variación del número de cetano.

C O N C L U S I O N E S

- 1.- En base al detallado estudio teórico de los factores que -
afectan el ciclo real de los motores de encendido por compresión (MEC), se ha logrado formular un procedimiento para el cálculo térmico del motor con la altura que inclusive vincula las condiciones ambientales propias de nuestro medio.
- 2.- El banco de pruebas utilizado para la simulación de la altura ha demostrado, por los resultados experimentales obtenidos, ser adecuado para esta investigación siendo un equipo relativamente económico, provisto con los instrumentos necesarios de medición, control, velocidad, indicador neumoelectrico y con una rápida regulación del vacío que permite realizar ensayos en condiciones estables de operación.
- 3.- Los resultados experimentales les confirman que la caída de potencia es mínima hasta los 2,000 m.s.n.m., sobre esta altura la potencia disminuye ostensiblemente llegando a un 60% de su potencia normal cuando opera a 5,000 m.s.n.m. y aumentando su consumo específico de combustible en un 57% de su valor a condiciones normales, para esa altura.
- 4.- Los factores que afectan al motor en la altura se ven reflejados en el coeficiente de exceso de aire que disminuye a límites inadmisibles que empeoran el proceso de combustión; - es así como la mezcla aire-combustible tiende a enriquecerse en un 11% a 12% por cada mil metros de altura.

- 5.- Con la regulación del coeficiente de exceso de aire, o sea la disminución del combustible enviado por la bomba de inyección, se reduce el consumo específico de combustible y - si bien la potencia disminuye, ésta lo hace en forma proporcionalmente menor. Esta regulación conduce a que los costos de operación y mantenimiento sean menores y aumente la vida útil del motor.
- 6.- El incrementar sustancialmente la economía del combustible, solucionando parcial o totalmente los problemas técnicos que la altura origina en los motores de encendido por compresión, significa realizar un esfuerzo consciente dada la situación actual que no vislumbra aún un sustituto para el petróleo. Para ello se sugiere los siguientes trabajos de investigación:
- Determinación de la influencia de la variación del ángulo de avance del comienzo de la inyección, con la altura.
 - Regulación de la presión de inyección de combustible en función de la altura.
 - Limitación del suministro de combustible mediante reguladores o correctores.
 - Posibilidad de variar el número de cetano del combustible empleado por los MEC en la altura.
 - Influencia de la variación de la relación de compresión de los MEC con la altura.
 - Influencia de la sobrealimentación en los MEC con la altura.

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

- 1.- JOVAV M.S. y MASLOV G.S., Motores de Automóvil, Edit. MIR, MOSCU 1973 (Traducción del ruso).
- 2.- LICHTY LESTER, Proceso de los Motores de Combustión, Edit. McGraw-Hill 1970 (Traducción del Inglés).
- 3.- LIST HANS, Motores de Combustión Interna, Capítulo VII, Edit. Labor S.A. (Traducción del Alemán)
- 4.- LUDEÑA ABELARDO, FLORES PEDRO y LIRA GUILLERMO, "Estudio Teórico sobre la influencia de la altura en el ciclo real de los motores de encendido por compresión", Memorias de Trabajos de la 5ta. reunión de CONIMERA, Lima 1979.
- 5.- LUDEÑA ABELARDO y GARCIA ANTONIO, "Fundamentos para la construcción de un banco de pruebas estacionario para el estudio de la influencia de la altura sobre los motores de combustión interna", Memorias de Trabajos de la 5ta. reunión de CONIMERA, Lima 1979.
- 6.- MALEEV V.L., Internal Combustión Engines, International Student Edition (Traducción del inglés)
- 7.- MINISTERIO DE TRANSPORTES Y COMUNICACIONES, Dirección de Ingeniería, División de Estudios de Tráfico, 1977 y 1982.
- 8.- OBERT E.F., Motores de Combustión Interna, Edit. CESCA, 1976 (Traducción del Inglés)

- 9.- SCHMIDT A. FRITZ, Máquinas de Combustión, Edit. Labor S.A., 1960 (Traducción del Alemán)
- 10.- SEYMOUR D.J., El Laboratorio del Ingeniero Mecánico, Edit. Hispano-Americana S.A., 1971 (Traducción del Inglés)
- 11.- SHAMES IRVING, La Mecánica de los Fluidos, Edit. McGraw-Hill 1967 (Traducción del Inglés)
- 12.- TAYLOR AND TAYLOR, The Internal Combustion Engine, Edit. - International Text Book Company.
- 13.- WU. T. and McAULAY K.J. Predicting Diesel Engine Performance at Various Ambient conditions, SAE TRANSACTIONS 1973 (730148)
