

Aerotecnia y Material

Determinación de la potencia tractora disponible FUNCIONAMIENTO DEL GRUPO MOTOPROPULSOR

Por **Felipe Lafita Babio**
Coronel de Ingenieros Aeronáuticos
E INGENIERO NAVAL

1.—GENERALIDADES

Una vez realizada la adaptación de la hélice al motor, mediante cualquiera de los métodos conocidos, con arreglo a la potencia del motor que se disponga, así como a las cualidades de vuelo exigidas al avión, puede determinarse inmediatamente la potencia disponible para las condiciones de adaptación.

Ahora bien: la ecuación fundamental para la determinación de las cualidades de vuelo de un avión sabemos es

$$V_s = \frac{dA}{dt} = \frac{P_D - P_N}{W}$$

V_s = velocidad de subida.
 A = altura.
 P_D = potencia disponible.
 P_N = potencia necesaria.

Ella exige, por tanto, el conocimiento de P_D para cada velocidad aerodinámica del avión, con el fin de determinar la velocidad óptima de subida.

La potencia disponible es igual al producto de la potencia del motor por el rendimiento de la hélice. Este depende del factor de funcionamiento V/ND (V = velocidad aerodinámica del avión; n = número de r. p. s.; D = diámetro), es decir, del número de revoluciones del motor. Por todo esto parece natural hacer un pequeño recordatorio sobre algunos aspectos del funcionamiento del motor.

2.—CONSIDERACIONES SOBRE EL MOTOR

Los dos tipos actuales de motor son:

- a) Motor normal (potencia máxima al nivel del mar).
- b) Motor sobrealimentado.

3.—MOTOR NORMAL

Vamos a examinar a continuación:

1.º La variación de la potencia al freno con el número de r. p. s.

2.º La variación de la potencia con la altura.

1.º Los constructores de motores, aparte de otras curvas, suelen suministrar la curva de potencia al freno en función del número de r. p. s. En general la variación de la potencia con el número de r. p. s. suele ser aproximadamente lineal, tal como se indica en la figura 1.

Ahora bien: como se ve en la citada figura, esa suposición no es más que aproximada, y puede comprobarse en ella que la misma variación del número de r. p. s. en las distintas curvas da lugar a distintas potencias del motor en motores que

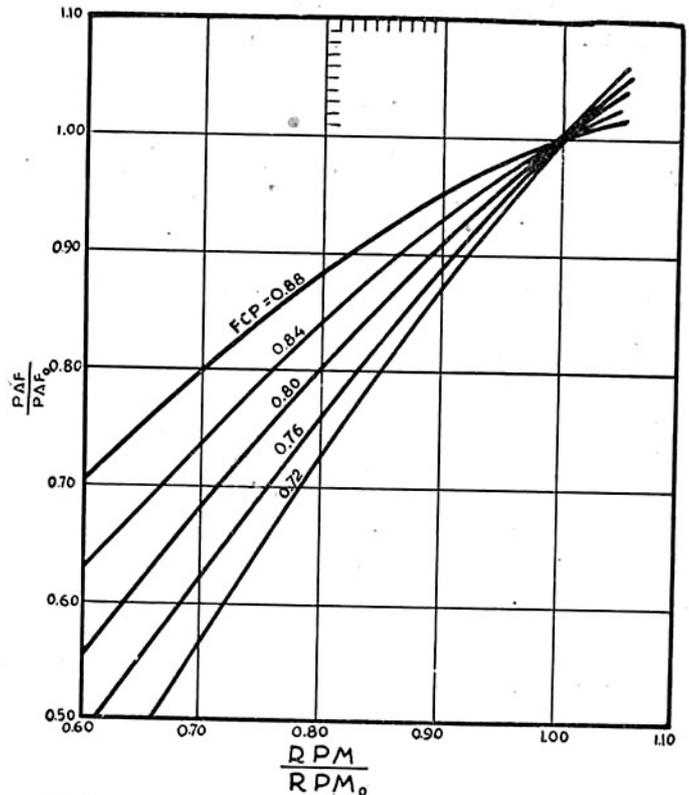


FIG. 1.— Curvas de potencia al freno en función del número de RPM.

dán la misma potencia máxima para el mismo número máximo de r. p. s. Esto, naturalmente, ejerce una gran influencia en algunas cualidades del avión, en especial la velocidad de subida.

Por esta razón en la actualidad en E. U. se define en cada motor el "Factor de Caída de Potencia" (F. C. P.), que representa la relación

$$\frac{PAF}{PAF_0}$$

correspondiente a la relación de

$$r. p. s. \frac{n}{n_0} = 0,8.$$

PAF = Potencia al freno para r. p. s. = n .

PAF_0 = " " " " r. p. s. máximo = n_0 .

Los valores del F. C. P. en los motores actuales oscila entre 0,85 y 0,75.

2.º De resultados de experiencias de Laboratorios climáticos de motores, se han deducido diversas expresiones para la variación de la potencia con la altura a número de revoluciones por segundo constante. Una de las más empleadas es

$$\frac{PAFA}{PAF_{NM}} = \sigma^{1.305}$$

- PAFA = potencia al freno a la altura a n. r. p. s.
- PAF_{NM} = » » al nivel del mar n. r. p. s.
- $\sigma = \rho/\rho_0$
- ρ = masa específica del aire a la altura A.
- ρ_0 = » » al nivel del mar.

En la figura 2 están trazadas algunas de las expresiones indicadas.

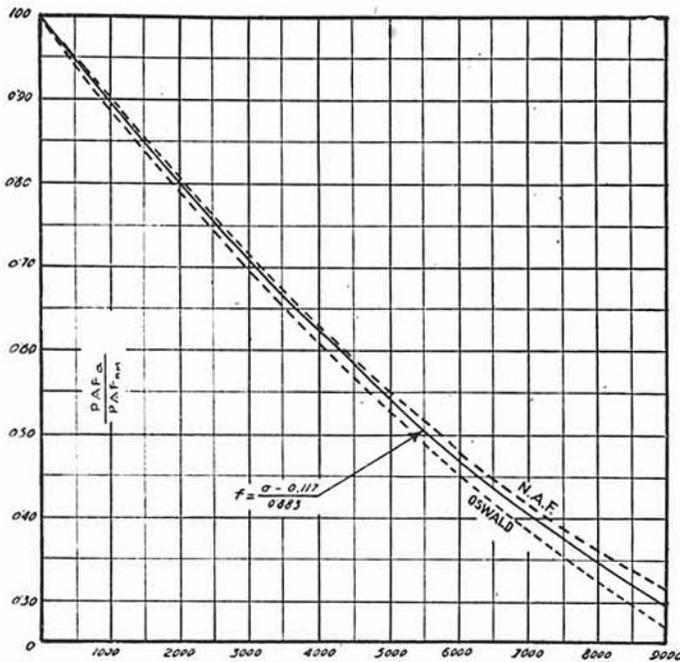


FIG-2. VARIACION CON LA ALTURA DE LA POTENCIA AL FRENO A NUMERO DE R. P. M. CONSTANTE.

4.—MOTOR SOBREALIMENTADO

Estudiaremos en este caso las mismas condiciones que en el motor normal.

- 1.ª Variación de la potencia con las r. p. s.
- 2.ª Variación de la potencia con la altura.

1.º Se comprende fácilmente que en un motor sobrealimentado la disminución de potencia con el número de revoluciones por segundo ha de ser mayor que en los motores normales, ya que tendremos la misma pérdida que en éstos, aumentada en la pérdida producida por la disminución del efecto sobre la alimentación. Esta última pérdida dependerá de la altura de restablecimiento. De todo esto vemos que con los motores sobrealimentados la pérdida de potencia con el número de r. p. s. es muy elevada. Esto exige que con motores de este tipo se empleen siempre hélices de paso regulable. En la figura 3 se da el F. C. P. para diversas alturas de restablecimiento.

2.º En los motores sobrealimentados nunca pueden meterse totalmente los gases por debajo de la altura de restablecimiento (excepto para el momento del despegue), lo cual da lugar a que para aquellas alturas las potencias sean me-

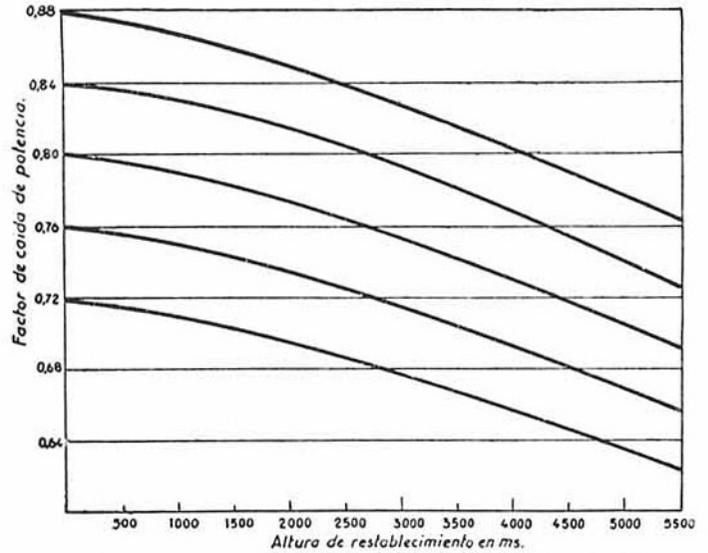


FIG-3.— Efecto de la sobrealimentación en el factor de caída de potencia.

nores que la correspondiente a la altura de restablecimiento, a c. usa de la potencia absorbida por el compresor.

Para la determinación de la variación de potencia por debajo de la altura de restablecimiento puede emplearse la expresión

$$\frac{PAFA}{PAF_{NM}} = 1 + 0,04 \frac{A}{1.000}$$

A = altura en metros.

Por encima de la altura de restablecimiento la caída de potencia con la altura se ha considerado hasta h. ce muy poco que era la misma que en un motor no sobrealimentado; pero lo cierto es que esa caída es mayor, tal como se indica en la figura 4.

Una vez expuestas estas ideas, pasemos ahora al estudio del funcionamiento del grupo motopropulsor.

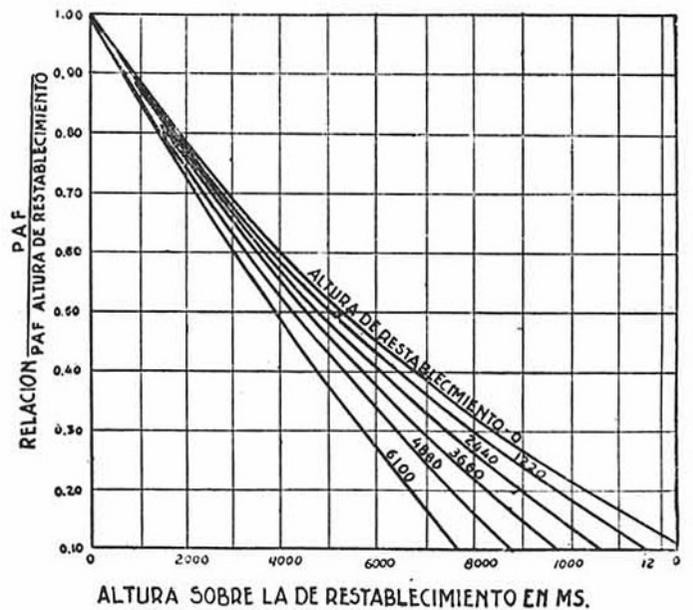


FIG-4 -Variación de potencia al freno con la altura en motores sobrealimentados.

5.—GRUPO MOTOPROPULSOR

Los casos más corrientes actualmente de grupo motopropulsor, son los siguientes:

- 1.º Motor no sobrealimentado; hélice de paso fijo.
- 2.º Motor no sobrealimentado; hélice de paso regulable en vuelo.
- 3.º Motor sobrealimentado; hélice de paso regulable en vuelo.

A continuación voy a estudiar cómo puede determinarse la potencia disponible en los casos anteriores para condiciones de funcionamiento distintas a aquellas para las que se ha realizado la adaptación.

6.—MOTOR NO SOBREALIMENTADO.
HELICE DE PASO FIJO

Como la adaptación se hace para una cierta velocidad y una cierta altura, es preciso examinar la influencia de una variación de velocidad y una variación de altura.

a) *Influencia de la velocidad a altura constante.*

El método general de resolución de este problema es el siguiente:

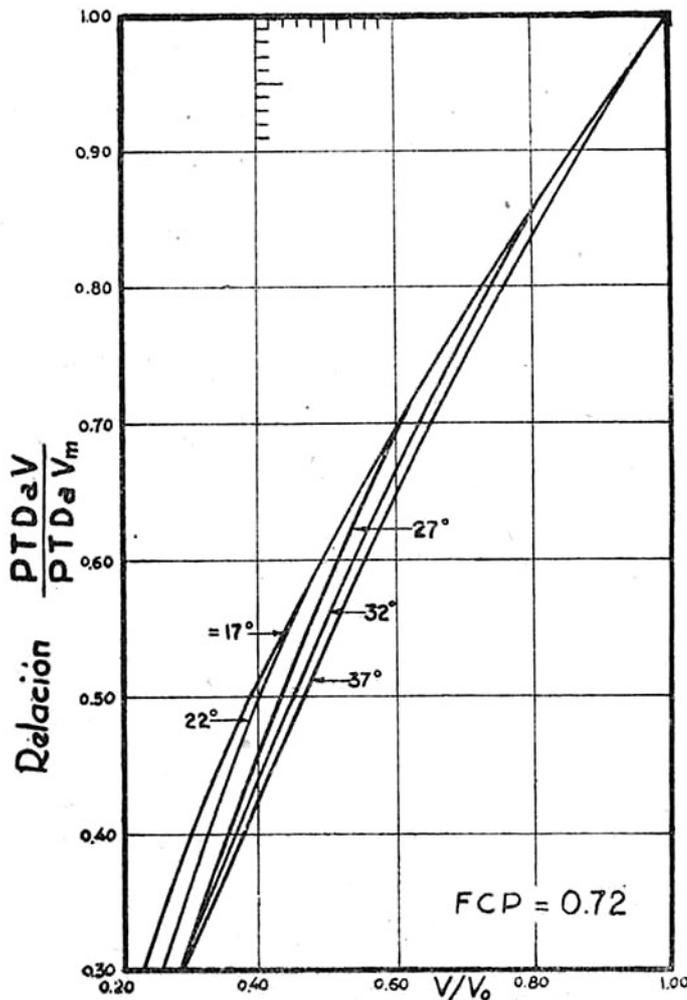


FIG-5 Variación de PTD con V (Hélice de paso fijo FCP = 0,72)

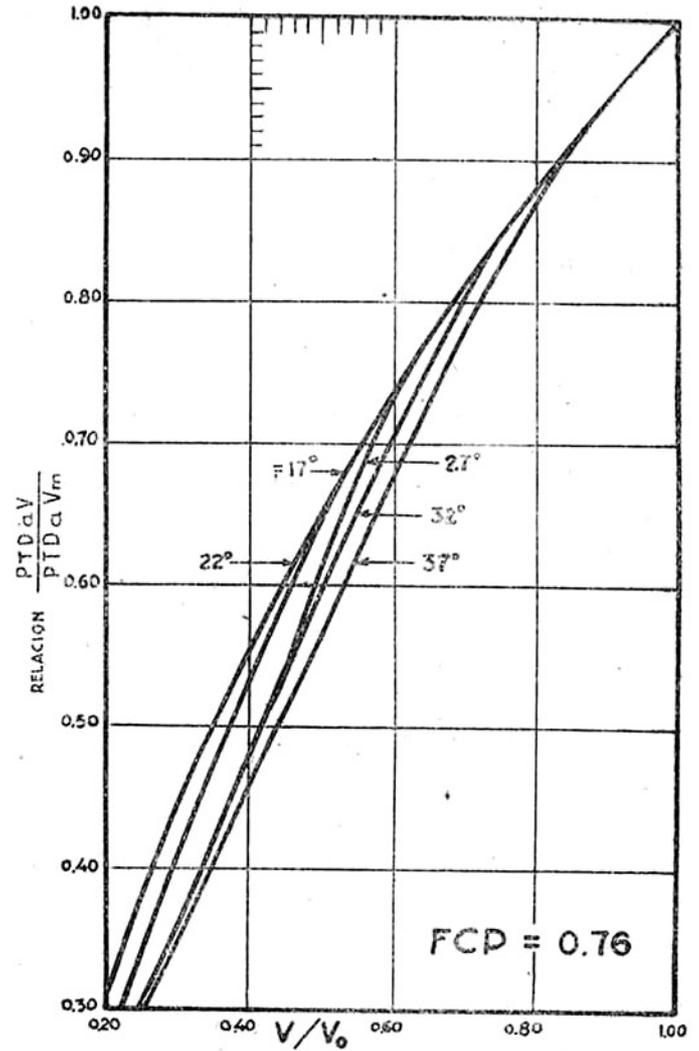


FIG- 6 Variación de PTD con V (Hélice de paso fijo FCP = 0,76)

Disponemos de las cinco ecuaciones siguientes:

$$\left. \begin{aligned} \gamma &= V/nD \\ C_p &= P/n^3 D^5 \\ C_p &= F_1(\gamma) \\ P &= F_2(n) \\ \gamma &= F_3(\gamma) \end{aligned} \right\} (1)$$

las cuales relacionan cinco incógnitas (V, C_p, γ, P).

Para mayor facilidad en la resolución del problema, puede efectuarse con las cinco incógnitas anteriores, y la cantidad a determinar, la siguiente tabulación:

$\frac{n}{n_o}$	$\frac{P}{P_o}$	$\frac{n^3}{n_o^3}$	$\frac{C_p}{C_{p_o}}$	γ	γ/γ_o	$\frac{V}{V_o}$	$\frac{\gamma_1}{\gamma_o}$	$\frac{PTD}{PTD_o}$
-----------------	-----------------	---------------------	-----------------------	----------	-------------------	-----------------	-----------------------------	---------------------

Si las condiciones para las que se ha realizado la adaptación son: nivel del mar, P_o, n_o, V_o , podemos determinar inmediatamente

$$\gamma_o = \frac{V_o}{n_o D}$$

y mediante las curvas características de la hélice, η_o , y por tanto, la potencia tractora disponible al nivel del mar, y a $P_o n_o V_o$; es decir,

$$(PTD_o) = \eta_o P_o n_o$$

Determinemos ahora la potencia tractora disponible relativa

$$\frac{PTD}{PTD_o}$$

a otra velocidad cualquiera V .

Supongamos que sea n el número de r. p. s. correspondiente a esa velocidad V . La potencia relativa suministrada por el motor será:

$$\frac{P}{P_o} = \left(\frac{n}{n_o}\right)^3 \quad (2)$$

que puede obtenerse de (1).

Como durante el funcionamiento la potencia suministrada por el motor debe ser absorbida por la hélice, su coeficiente relativo de potencia será:

$$\frac{C_p}{C_{p_o}} = \frac{P}{P_o} \left(\frac{n_o}{n}\right)^3$$

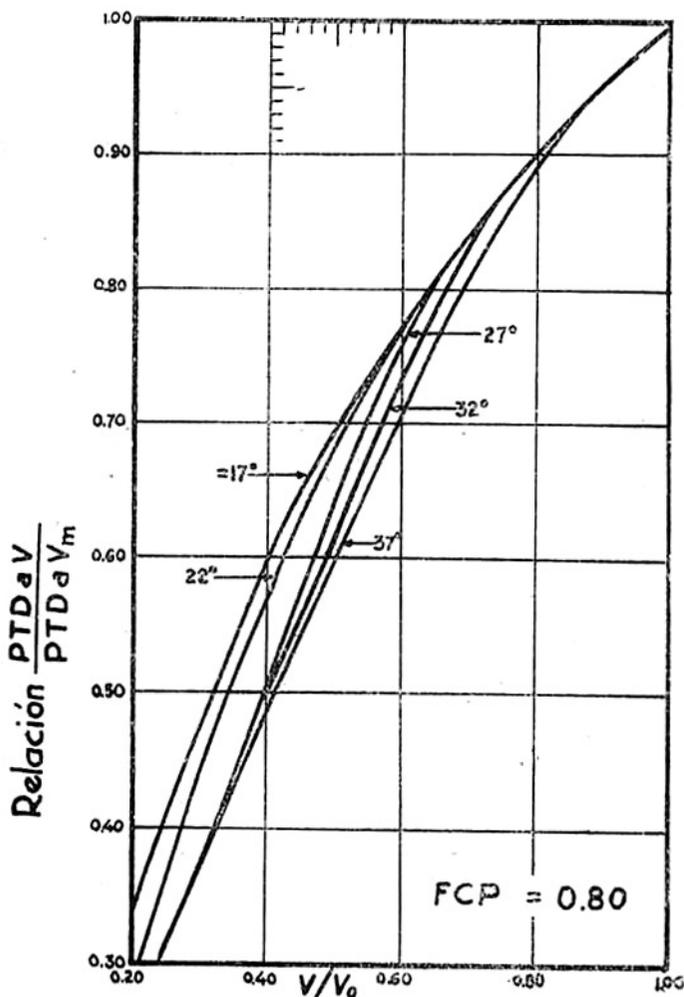


FIG.- 7 Variación de PTD con V (Hélice de paso fijo $FCP = 0,80$)

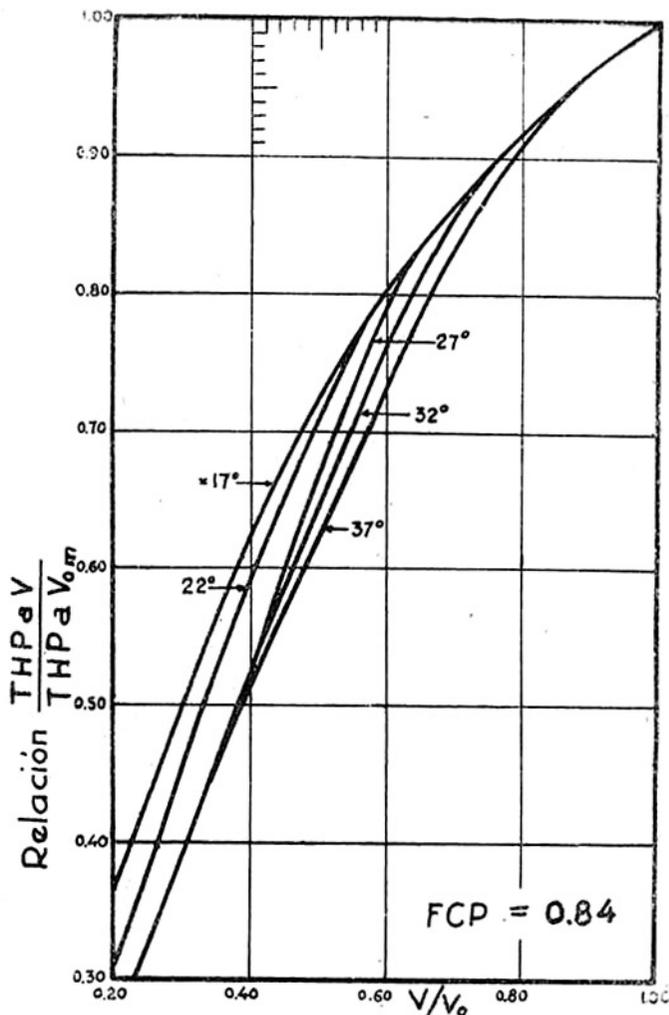


FIG.- 8 Variación PTD con V (Hélice de paso fijo $FCP = 0,84$)

(En el supuesto de que la hélice tuviese reductor, las revoluciones por segundo de ella no serían las del motor, sino las que les correspondiesen.)

Mediante las curvas características de la hélice

$$[C_p = f(\gamma)]$$

podemos determinar γ/γ_o .

Conocida esta relación, podemos determinar la velocidad relativa

$$\frac{V}{V_o} = K \frac{n}{n_o}$$

Igualmente, mediante las curvas características de la hélice $\eta = f(\gamma)$, podemos determinar el rendimiento relativo $\frac{\eta}{\eta_o}$.

Conocido este rendimiento relativo mediante (2), podemos determinar la potencia tractora relativa, ya que

$$\frac{PTD}{PTD_o} = \frac{\eta P}{\eta_o P_o}$$

Repetiendo esta operación para distintos valores de n , podemos establecer la variación de potencia disponible con la velocidad. Ahora bien: para las aplicaciones prácticas es suficien-

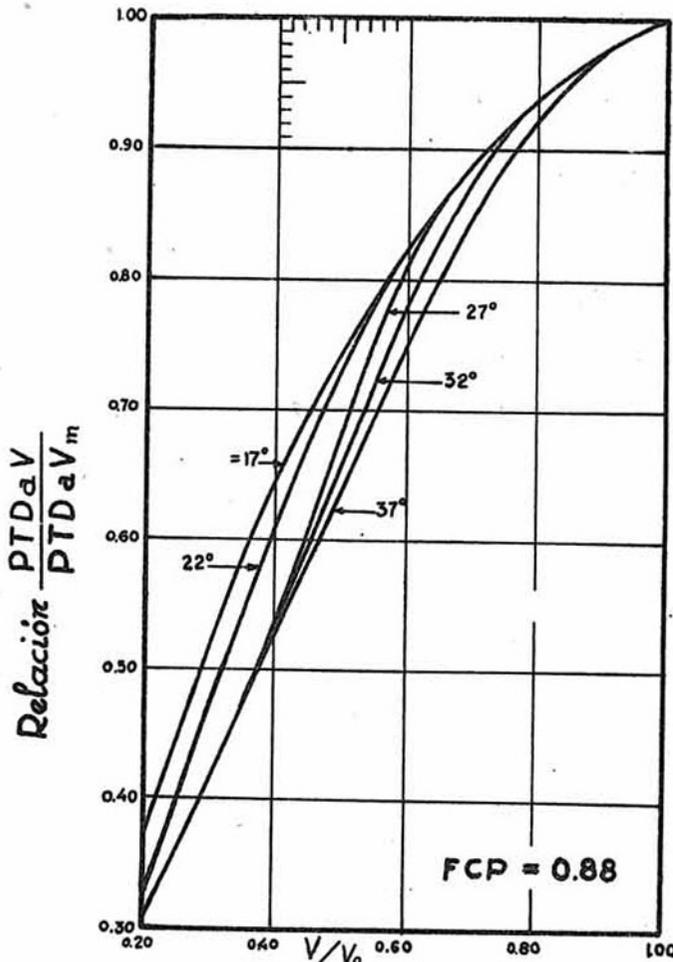


FIG- 9 Variación dePTD con V (Hélice de paso fijo FCP = 0,88)

temente exacto emplear las curvas de las figuras 5, 6, 7, 8 y 9 dadas por Diehl.

Esta figura corresponde a motores con distintos factores de caída de potencia (FCP) y hélices de distintos pasos.

b) Influencia de la altura a velocidad constante.

Según hemos dicho anteriormente, la variación de potencia con la altura a r. p. m. constante puede expresarse por

$$\frac{P_A}{P_o} = \sigma^{1.305} \quad (1)$$

La variación con la altura de potencias absorbidas por la hélice a número de revoluciones constantes puede expresarse, según (1), por

$$\frac{P'_A}{P_o} = \sigma \quad (2)$$

Comparando las expresiones (1) y (2), vemos que la disminución de potencia del motor con la altura, a número de revoluciones por minuto constante, es más rápida que la disminución de potencia absorbida por la hélice a r. p. m. constante; por tanto, para que el motor pueda suministrar la potencia absorbida por la hélice, será preciso que el número de revoluciones por segundo disminuya, ya que n entra en P_A a la primera potencia, y en P'_A a la tercera.

En general, dada la forma de la curva de rendimientos, como al disminuir n aumenta V/nD , el rendimiento aumentará; pero en conjunto, como la disminución de potencia del motor es mayor que ese aumento, la potencia tractora resultante será siempre inferior a la potencia tractora al nivel del mar (PTD_o), y la disminución de PTD con la altura es siempre superior a la disminución con la altura de la potencia del motor a r. p. s. constante.

Para determinar la variación de PTD con la altura puede seguirse el método siguiente:

Supongamos que al nivel del mar tenemos una potencia del motor P_o , una velocidad V_o y un número de r. p. s. de la hélice n_o . Empecemos por determinar el número de revoluciones de funcionamiento n_A a una altura cualquiera A .

A esta altura, para el número de vueltas n_o , la potencia relativa del motor será

$$\frac{P_A}{P_o} = \sigma_A^{1.305} \quad \text{y} \quad P_A = P_o \times \sigma_A^{1.305}$$

La variación de esta potencia P_A con el número de revoluciones por segundo será la misma que la de P_o ; es decir, estará dada por

$$P_A = f_1(n),$$

y por tanto, podemos trazar gráficamente la variación de potencia relativa con el número de r. p. s. para la altura A , tal como se indica en la figura 10.

A esa misma altura y las revoluciones n_o , la potencia relativa absorbida por la hélice será

$$\frac{P'_A}{P_o} = \sigma_A \quad \text{y} \quad P'_A = \sigma_A P_o$$

donde P_o representa la potencia absorbida por la hélice al nivel del mar y al número n_o de r. p. s.

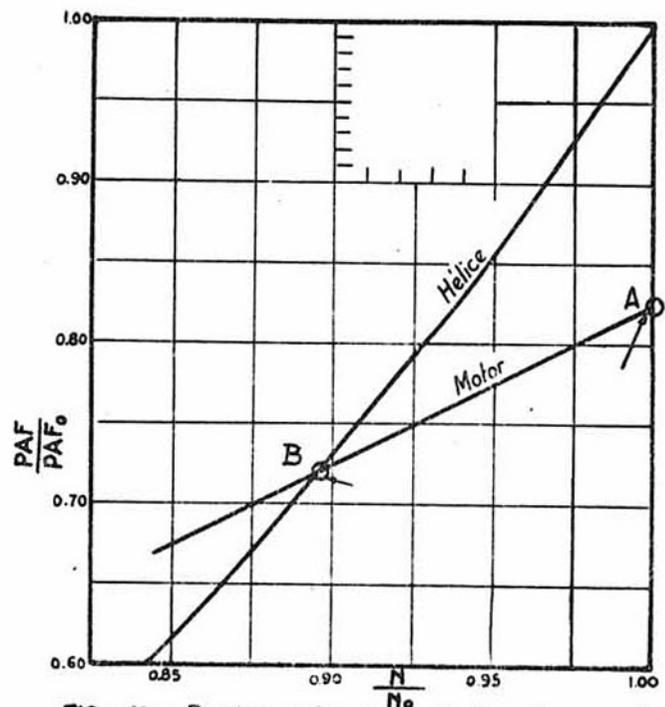


FIG- 10.- Puntos de funcionamiento a diversas alturas (Hélice de paso fijo. Motor no sobrealimentado)

La variación de potencia relativa absorbida por la hélice a la altura A es la misma que al nivel del mar; es decir,

$$P_A = f_2(n^3),$$

y por lo tanto, podemos trazar gráficamente esta variación, tal como se indica en la figura 10.

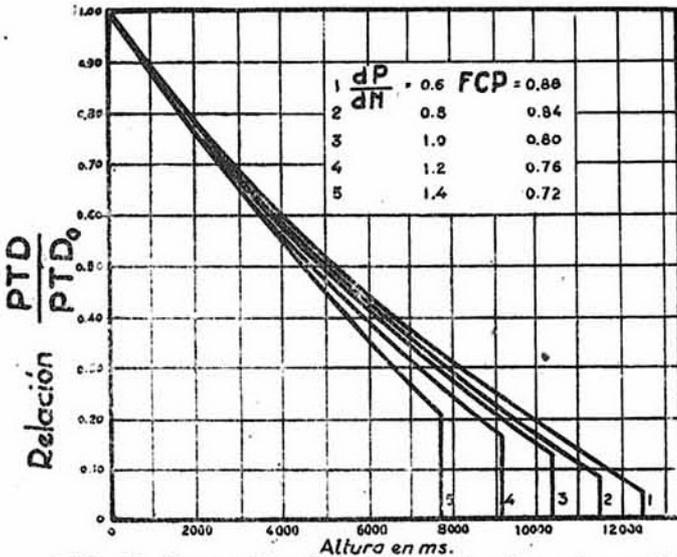


FIG- 11 Variación de potencia tractora disponible con la altura (Hélice de paso fijo).

El punto de intersección de

$$P_A = f_1(n) \quad \text{y} \quad P'_A = f_2(n)$$

nos dará el punto de funcionamiento y por tanto el número de r. p. s. correspondiente a esa altura A . En ese punto se verifica, naturalmente, que

$$P_A = P'_A.$$

Una vez conocido n podemos determinar V/nD , y por tanto, de las curvas características de la hélice $\eta = f(\gamma)$ determinaremos η , y como conocemos de la citada figura P_A , determinaremos inmediatamente ηP_A ; es decir, la potencia tractora disponible a la velocidad V y altura A .

En la citada figura 10 vemos la influencia que tiene en la determinación del punto de funcionamiento la forma de la función de $P_0 = f_1(n)$, es decir, del FCP.

Igualmente vemos en dicha figura que existirá una altura para la cual la línea trazada por A de $\frac{P'_A}{P_0}$ sea tangente a

la curva $\frac{P_A}{P_0}$. Esta altura será el límite de funcionamiento;

a partir de ella la hélice parará el motor, ya que cualquiera que sea el número de r. p. s. la potencia absorbida por la hélice será superior a la suministrada por el motor.

En la figura 11 se han trazado unas curvas dadas por Diehl para determinar la variación de potencia con la altura, que son de suficiente exactitud para las aplicaciones prácticas.

7.—MOTOR NO SOBREALIMENTADO. HELICE DE PASO REGLABLE EN VUELO

a) Influencia de la velocidad a altura constante.

Por ser la hélice de revoluciones constante $n = \text{conste.}$, y cualquiera que sea la velocidad

$$\frac{V}{V_0} = \frac{\gamma}{\gamma_0} \quad \text{y} \quad \gamma = \gamma_0 \frac{V}{V_0}.$$

La relación de coeficientes de adaptación o de Weick,

$$C_s = \frac{0,396 V}{P^{1/5} N^{1/5}}$$

V = velocidad en kms./h.

P = potencia en cv.

N = número de revoluciones por minuto,

será

$$C_s = R_v C_{s0},$$

con

$$R_v = \frac{V}{V_0} i$$

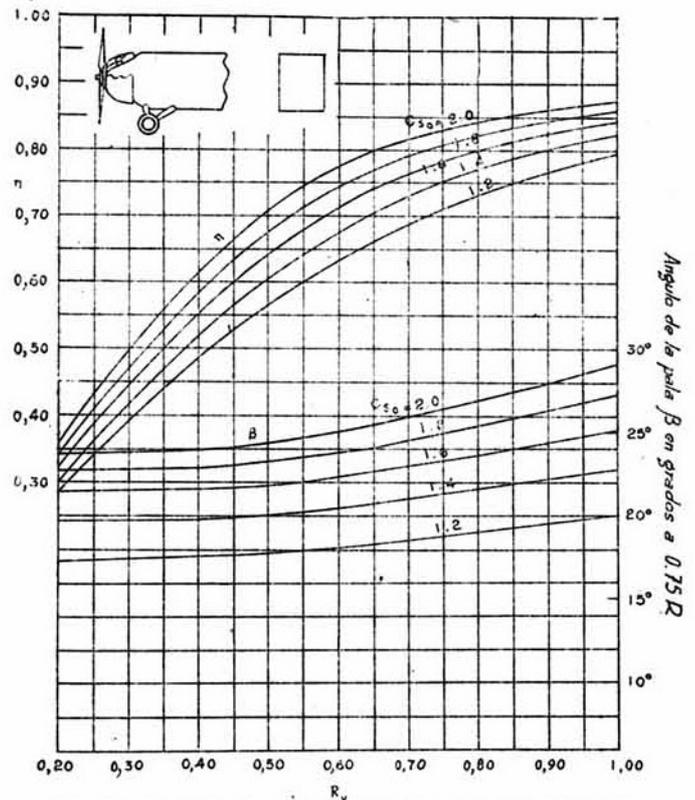


FIG-12- CARACTERISTICAS DE UNA HELICE BIPALA DE PASO VARIABLE Y RENDIMIENTO OPTIMO

y mediante las figuras 12 y 13 podemos determinar para cada valor de R_v , η y β^0 ($\beta^0 = \text{ángulo de la pala a } 0,75 \text{ del radio}$), y por tanto, la potencia tractora disponible, ya que la potencia del motor será la correspondiente a n_0 , a la altura a la que se opere.

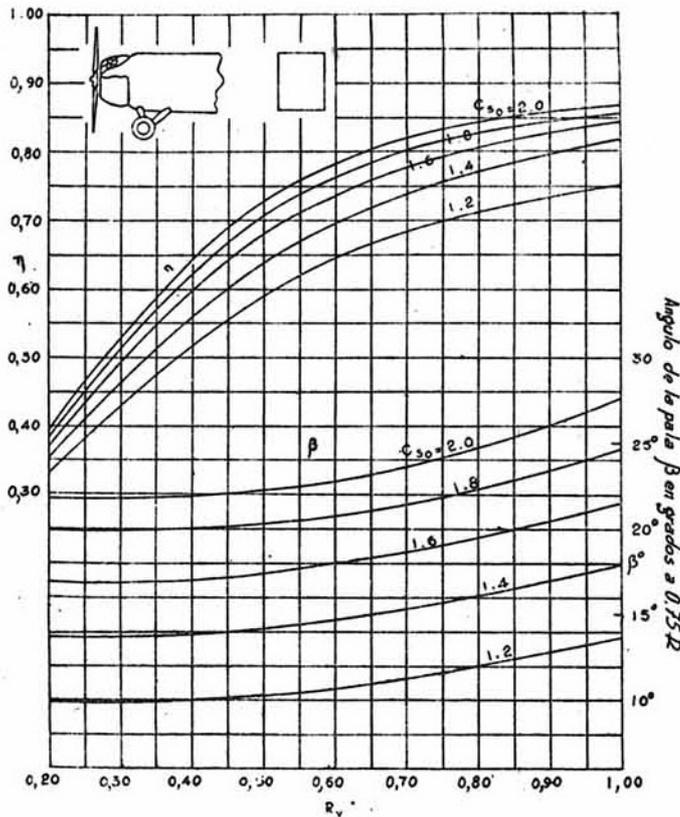


FIG. 13.- CARACTERÍSTICAS DE RENDIMIENTO DE UNA HÉLICE BIPALA DE PASO VARIABLE DE RENDIMIENTO MÁXIMO

Con arreglo a las figuras 12 y 13 se ha construido la figura 14, que da la variación de la potencia tractora relativa en función de la velocidad.

Debe observarse que los valores que afectan a las diversas curvas de la figura 14 representan la relación de rendimientos de la hélice a 0,6 V_{max} y a la velocidad máxima.

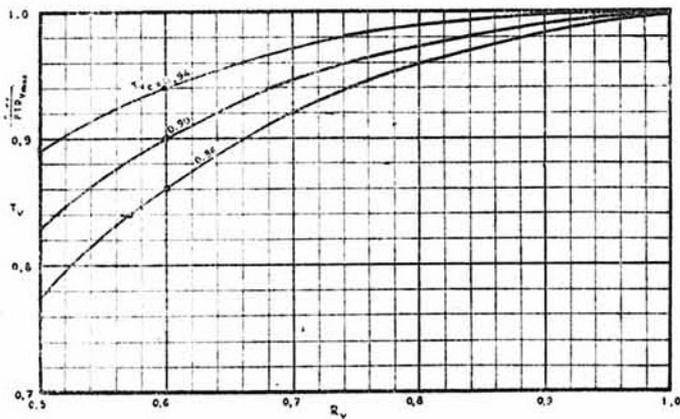


Fig. 14.- Variación de la potencia disponible con la velocidad con hélice de paso variable en vuelo.

b) Influencia de la altura a velocidad constante.

Por ser la velocidad y el número de r. p. s. constantes, $V/nD = \text{constante}$.

Ahora bien: como la potencia que suministra el motor a la altura A y el número de r. p. s. n_o es

$$P_A = P_o \sigma^{1.305}$$

la potencia que debe absorber la hélice a la altura A y número de revoluciones n_o debe ser:

$$P_A = C'_p \rho_A n_o^3 D^5 = P_o \sigma^{1.305}, \quad (1)$$

pero

$$P_o = C_{p0} \rho_o \cdot n_o^3 D^5. \quad (2)$$

Luego

$$C'_p \cdot \rho_A \cdot n_o^3 \cdot D^5 = C_{p0} \cdot \rho_o \cdot n_o^3 \cdot D^5 \cdot \sigma^{1.305}$$

$$\frac{C'_p}{C_p} = \frac{\rho_o}{\rho_A} \sigma^{1.305} = \sigma^{0.305}$$

Por tanto,

$$C'_p = C_{p0} \sigma^{0.305}$$

De las curvas características de la hélice de paso regulable empleada se puede determinar el valor de β , ya que se conocen V/nD y C'_p , y por tanto, el valor de η y la potencia tractora disponible. También pueden emplearse las figuras 12 y 13, ya que conocemos $R_o = 1$ y el nuevo valor de C_{p0} .

Cuando las características de la hélice se den en función del coeficiente de Weick C_s , se puede fácilmente determinar este coeficiente C_s mediante P_A .

8.—MOTOR SOBREALIMENTADO. HÉLICE DE PASO REGLABLE EN VUELO

En general, se hará la adaptación de la hélice, en este caso, para la altura de restablecimiento. Como para esa altura se conoce la potencia del motor P_A , el número de revoluciones por minuto N_A se puede fijar por comparación con aviones semejantes la velocidad aproximada del avión.

A continuación se determina el diámetro y el paso de la hélice, mediante el mismo método seguido para la determinación del diámetro y el paso de la hélice con un motor no sobrealimentado y hélice de paso fijo.

a) Variación de la PTD_A con la velocidad a la altura de restablecimiento.

Este problema se resuelve del mismo modo que para un motor no sobrealimentado y hélice de paso regulable en vuelo.

b) Variación de PTD_A con la altura (sobre la de restablecimiento) con la velocidad.

Este problema es también el mismo que el del motor no sobrealimentado y hélice de paso regulable; pero debe tenerse en cuenta que la variación de potencia con la altura (por encima de la de restablecimiento) no es la misma que para un motor no sobrealimentado, ya que aquella variación depende de la altura de restablecimiento del motor. Esa variación está dada en la figura 4.

Además habrá que tener en cuenta que la relación de densidades σ ha de contarse a partir de la altura de restablecimiento, y que P_o y C_o son la potencia del motor y el coeficiente de la hélice para la altura de restablecimiento.

9.—FUNCIONAMIENTO A GASES REDUCIDOS. HELICE DE PASO FIJO

Para fijar la PTD_V a una velocidad determinada, así como el número de r. p. s. correspondiente, seguiremos el método siguiente:

A la velocidad relativa considerada $\frac{V}{V_o}$ podemos determinar la potencia suministrada por la hélice, del siguiente modo:

La potencia necesaria al vuelo a la velocidad V_o será:

$$P_{NV_o} = (C_{Dp} + C_{Di}) \rho S V_o^3,$$

y a la velocidad V ,

$$P_{NV} = (C_{Dp} + C'_{Di}) \rho S V^3.$$

C_{Dp} = coeficiente de resistencias independientes de C_L .

C_{Di} = de resistencia inducida = $\frac{C_L^2}{\pi \lambda}$.

λ = alargamiento.

Como

$$\frac{C'_{L_o}}{C_L} = \left(\frac{V'}{V_o}\right)^2,$$

tendremos:

$$C'_{Di} = C_{Di} \left(\frac{V_o}{V'}\right)^4,$$

y

$$\frac{P_{NV}}{P_{NV_o}} = \frac{C_{Dp} + C_{Di} \frac{V_o}{V'}}{C_{Dp} + C'_{Di}} \times \left(\frac{V}{V_o}\right)^3.$$

Como conocimos C_{Dp} y C_{Di} , podemos construir gráficamente $\frac{P_{NV}}{P_{NV_o}}$ en función de V_o , tal como se indica en la figura 15. Del mismo modo, las potencias relativas suministradas por la hélice serán:

$$\frac{\eta P}{\eta_o P_o} = \frac{\eta C_p}{\eta_o C_{p_o}} \left(\frac{n}{n_o}\right)^3,$$

con $K = 0,8$.

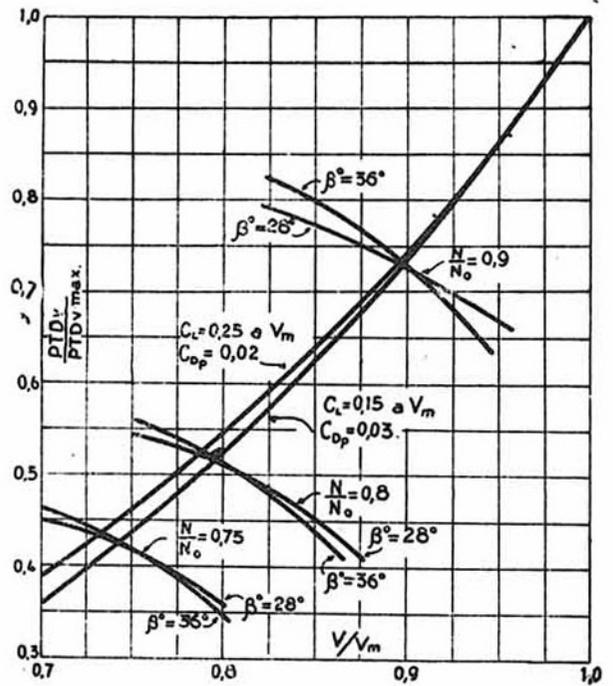


FIG.-15.- Puntos de funcionamiento a distintas velocidades y revoluciones con distintas hélices

Como para el funcionamiento será preciso que

$$\frac{\eta P}{\eta_o P_o} = \frac{P_{NV}}{P_{NV_o}}$$

podemos trazar gráficamente $\frac{\eta P}{\eta_o P_o}$ en función de $\frac{V}{V_o}$ para cada valor de $\frac{n}{n_o}$, y los puntos de intersección nos darán los de funcionamiento, es decir, n y ηP .

La figura 15 corresponde a valores de $\frac{n}{n_o} = 0,9-0,8-0,75$, y ángulos de pala de 36° y 28° a $0,75 R$ para hélices de la familia Navy 4.412.

Para aplicaciones prácticas basta tomar

$$\frac{n}{n_o} = K \sqrt{\frac{PTD_V}{PTD_o}}$$

