

Propulsão

- Para a determinação do desempenho da aeronave é necessário conhecer o desempenho do sistema propulsivo instalado;
- Para a propulsão a hélice é necessário escolher o hélice adequado ao motor e aos regimes de voo e determinar o desempenho do sistema motor/hélice.

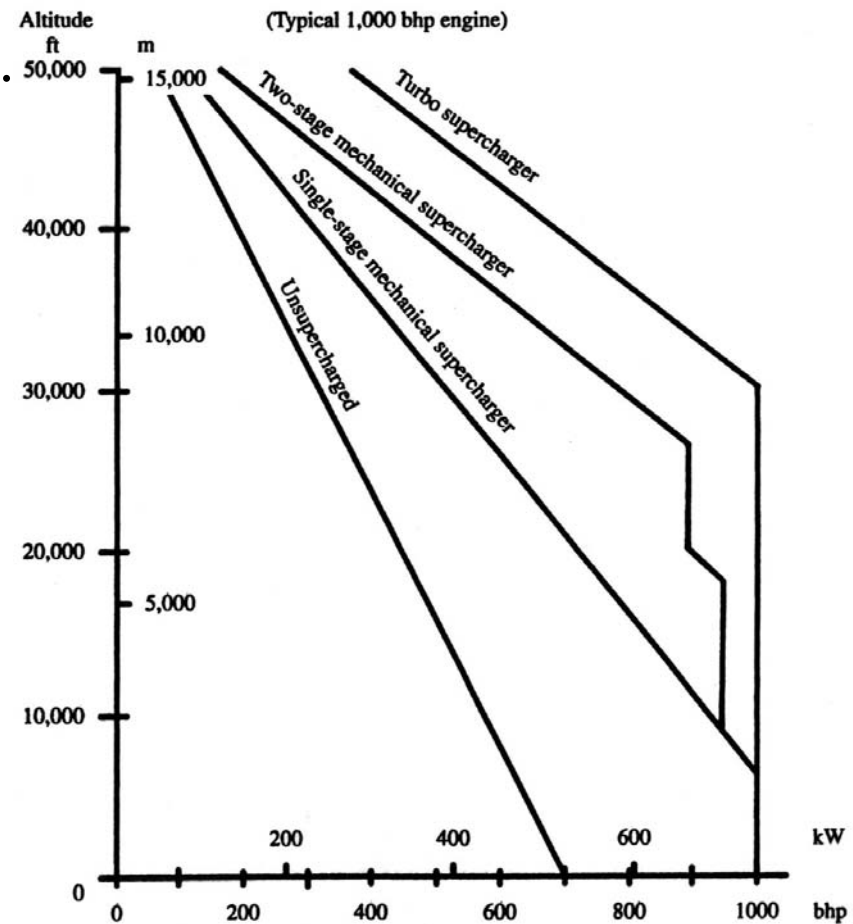
Modelos de motor

Tipo de motor		Potência/tracção	Consumo específico	Obs.
Alternativo	aspirado	$P = P_0(\rho/\rho_0 - (1 - \rho/\rho_0)/7,55)$	$C = C_0$	usar $V = 1$ quando $V = 0$
	turbo	$P = P_0$ $P = P_0(\rho/\rho_L - (1 - \rho/\rho_L)/7,55)$	$C = C_0$	usar $V = 1$ quando $V = 0$
Turbohélice		$P = P_0(\rho/\rho_0)$	$C = C_0$	usar $V = 1$ quando $V = 0$
Turbofan c/ λ elevado		$T = (0,1/M)T_0(\rho/\rho_0)$	$C = C_0(T/T_0)^{0,25}$	usar $M = 0,1$ quando $M < 0,1$
Turbofan c/ λ baixo e turbojacto	s/ pós-queimador	$T = T_0(\rho/\rho_0)$	$C = C_0(T/T_0)^{0,25}$	só para $M < 0,9$
	c/ pós-queimador	$T = T_0(\rho/\rho_0)(1 + 0,7M)$	$C = C_0(T/T_0)^{0,25}$	

T é temperatura

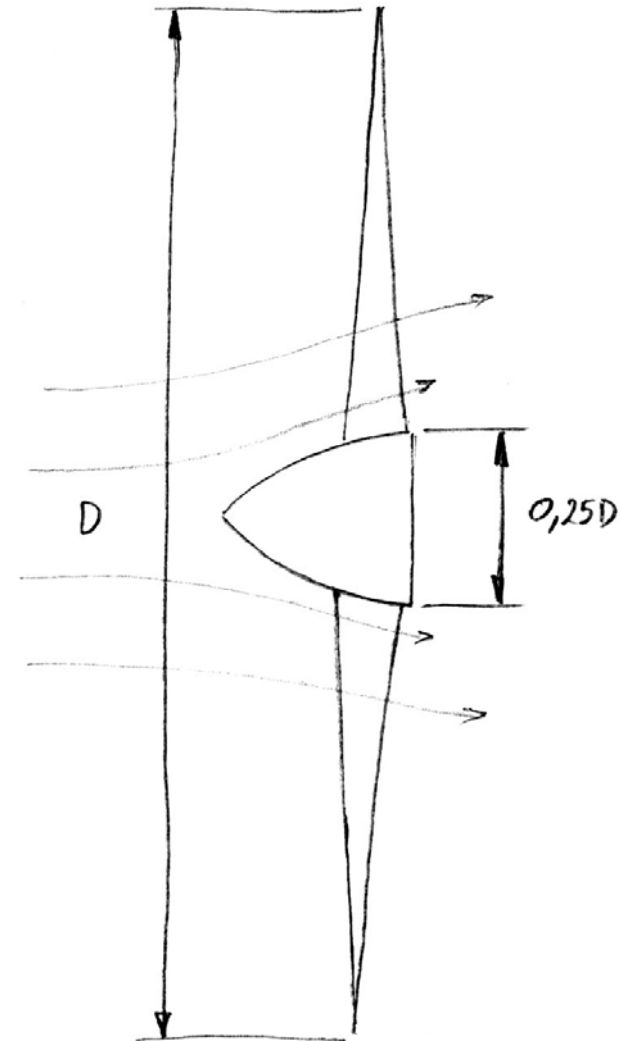
Desempenho do motor alternativo

- A potência é proporcional ao caudal de ar que entra no motor;
- A potência varia com a altitude.



Escolha do hélice (1)

- Dimensionamento do hélice:
 - Inicialmente:
 - 2 pás – $D = 0,556(HP)^{0,25}$ [m]
 - 3 pás – $D = 0,457(HP)^{0,25}$ [m]
 - 3 pás (agrícola) – $D = 0,518(HP)^{0,25}$ [m]
 - Verificação da velocidade de ponta da pá:
 - $V'_{\text{ponta}} = (V^2_{\text{ponta}} + V^2)^{0,5}$ e $M'_{\text{ponta}} = V'_{\text{ponta}}/a$
 - $V_{\text{ponta}} = N\pi DG/60$
 - V – velocidade da aeronave [m/s]
 - N – rotação do motor [rpm]
 - G – redução ($G = 60n/N$)
 - N – rotação do hélice [rot/s]
 - $D = 60/(N\pi G)(V'^2_{\text{ponta}} - V^2)^{0,5}$ [m]



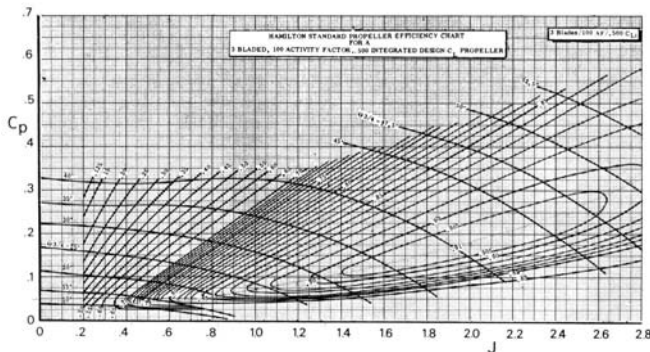
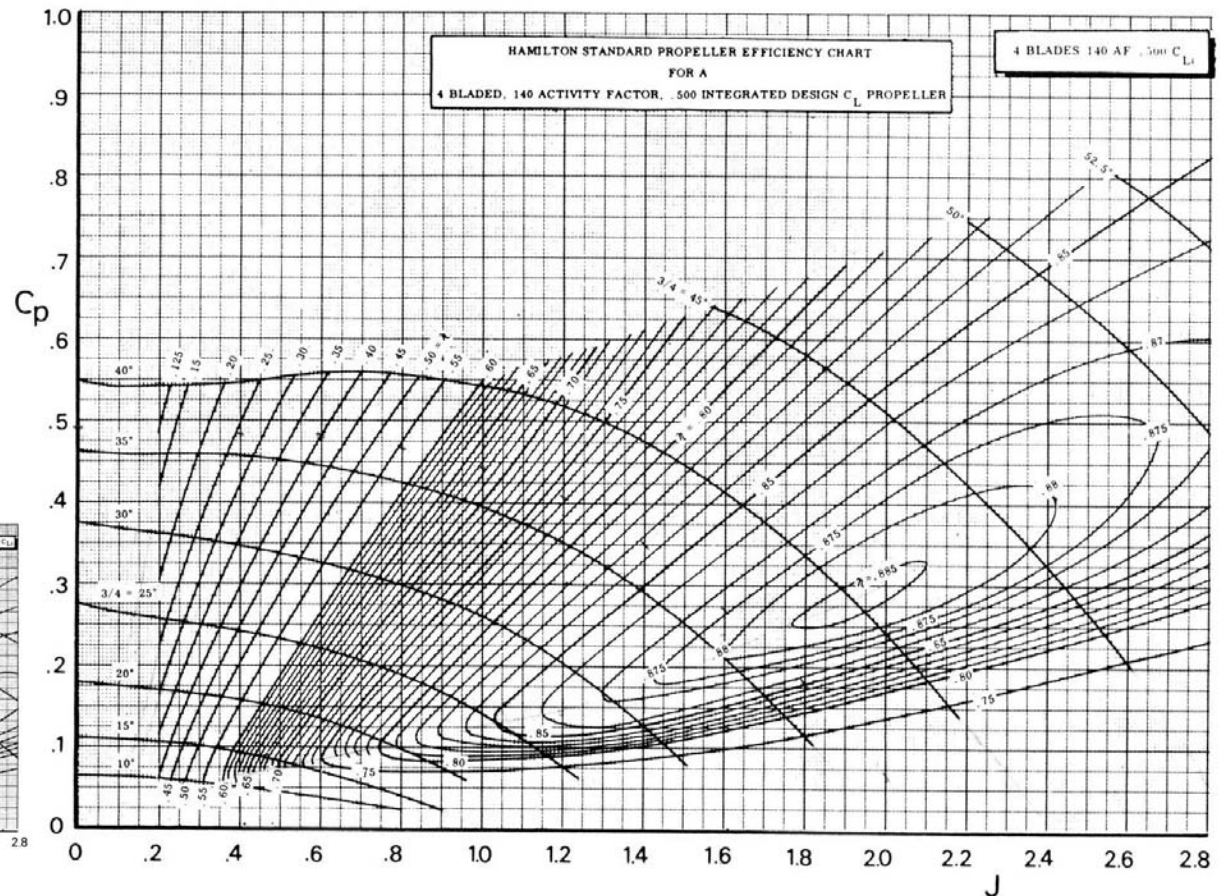
Escolha do hélice (2)

- Dimensionamento do hélice:
 - Escolhe-se o diâmetro menor dos dois anteriores;
 - As velocidades de ponta máximas são:

Tipo de hélice	Mach ponta máximo M'_{ponta}	Velocidade ponta máxima V'_{ponta} [m/s]
Metal/carbono	0,85	290
Madeira (perfil espesso)	0,76	260
Baixo ruído	0,63	213

Desempenho do hélice (1)

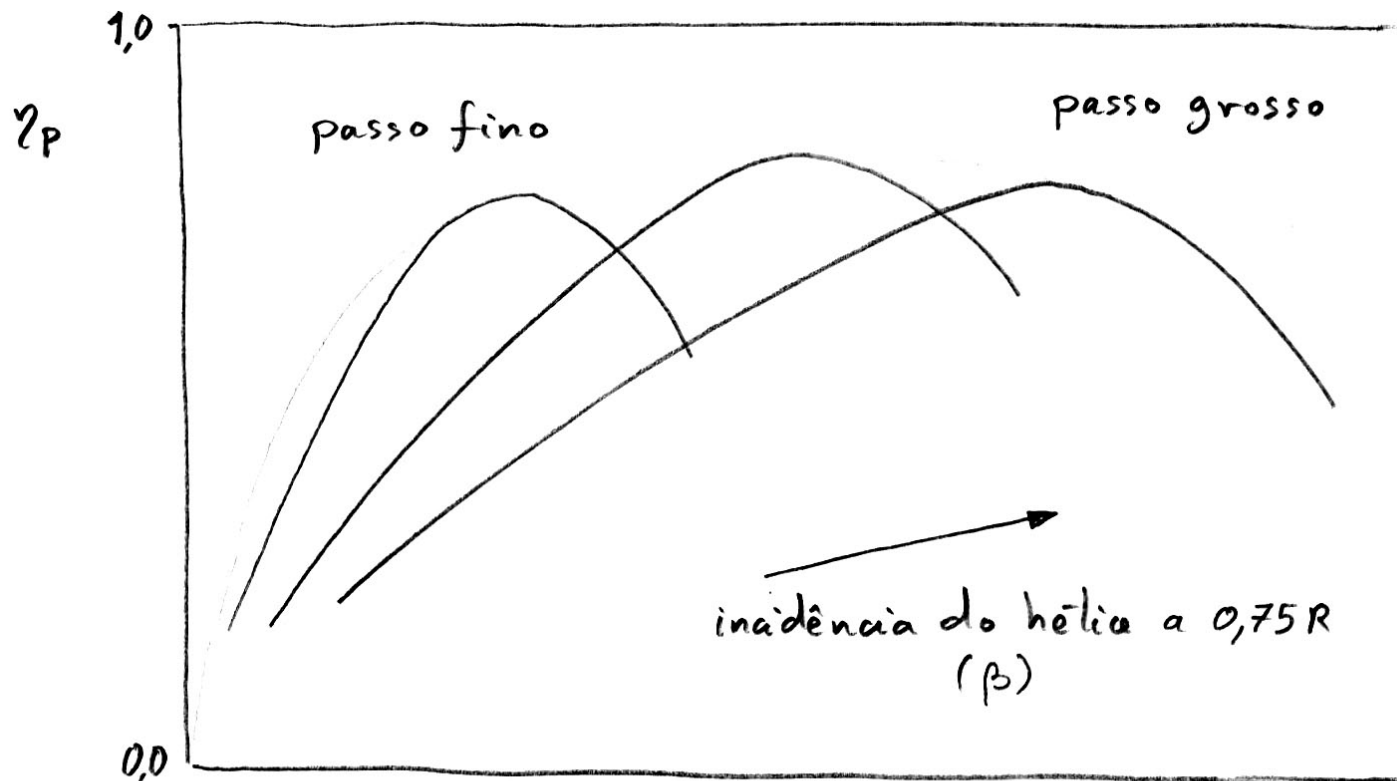
- $C_p = P/(\rho n^3 D^5)$
- $C_T = T/(\rho n^2 D^4)$
- $\eta_p = TV/P$
- $J = V/(nD)$



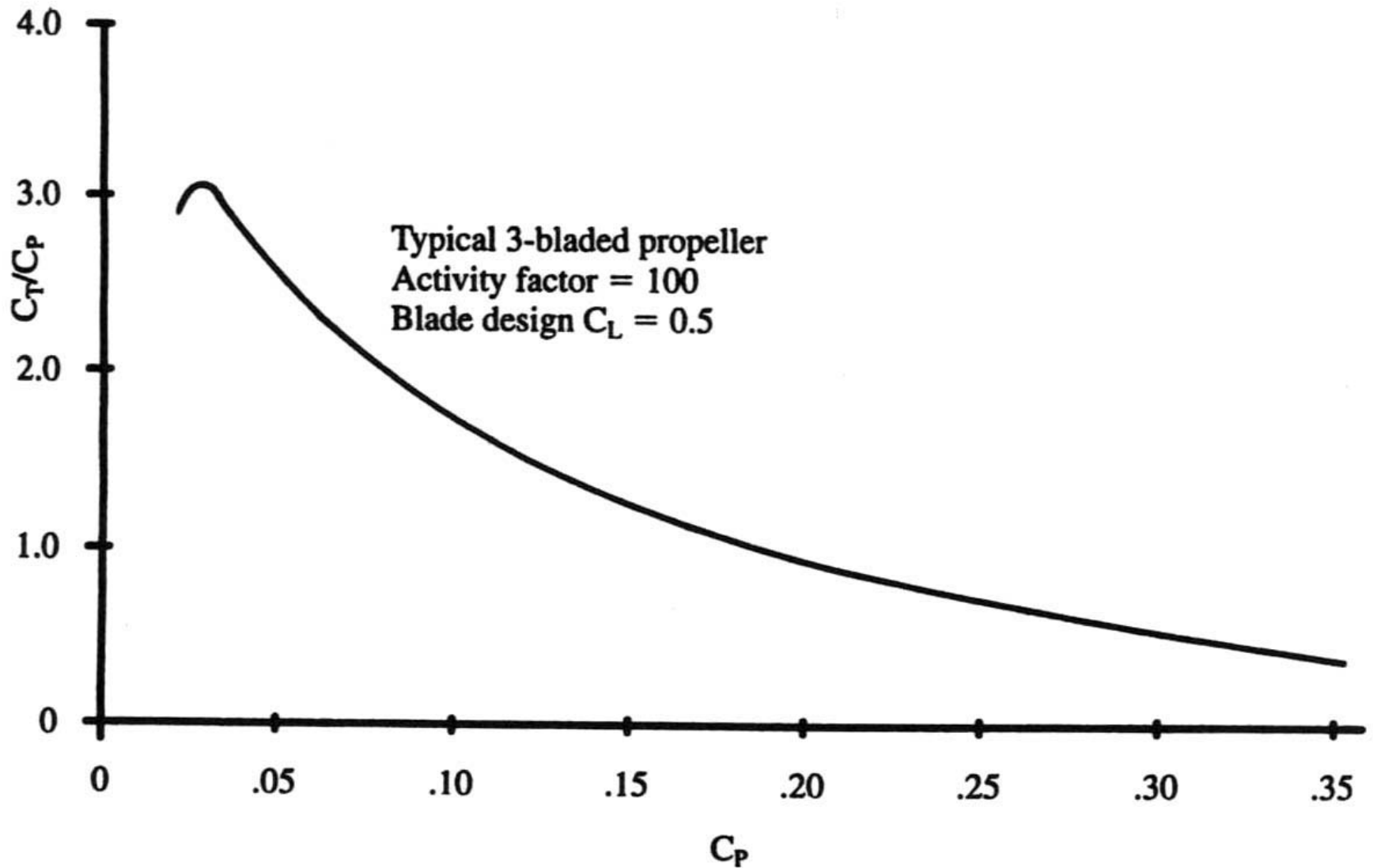
Desempenho do hélice (2)

- Eficiência propulsiva do hélice:

- $\eta_p = TV/P$

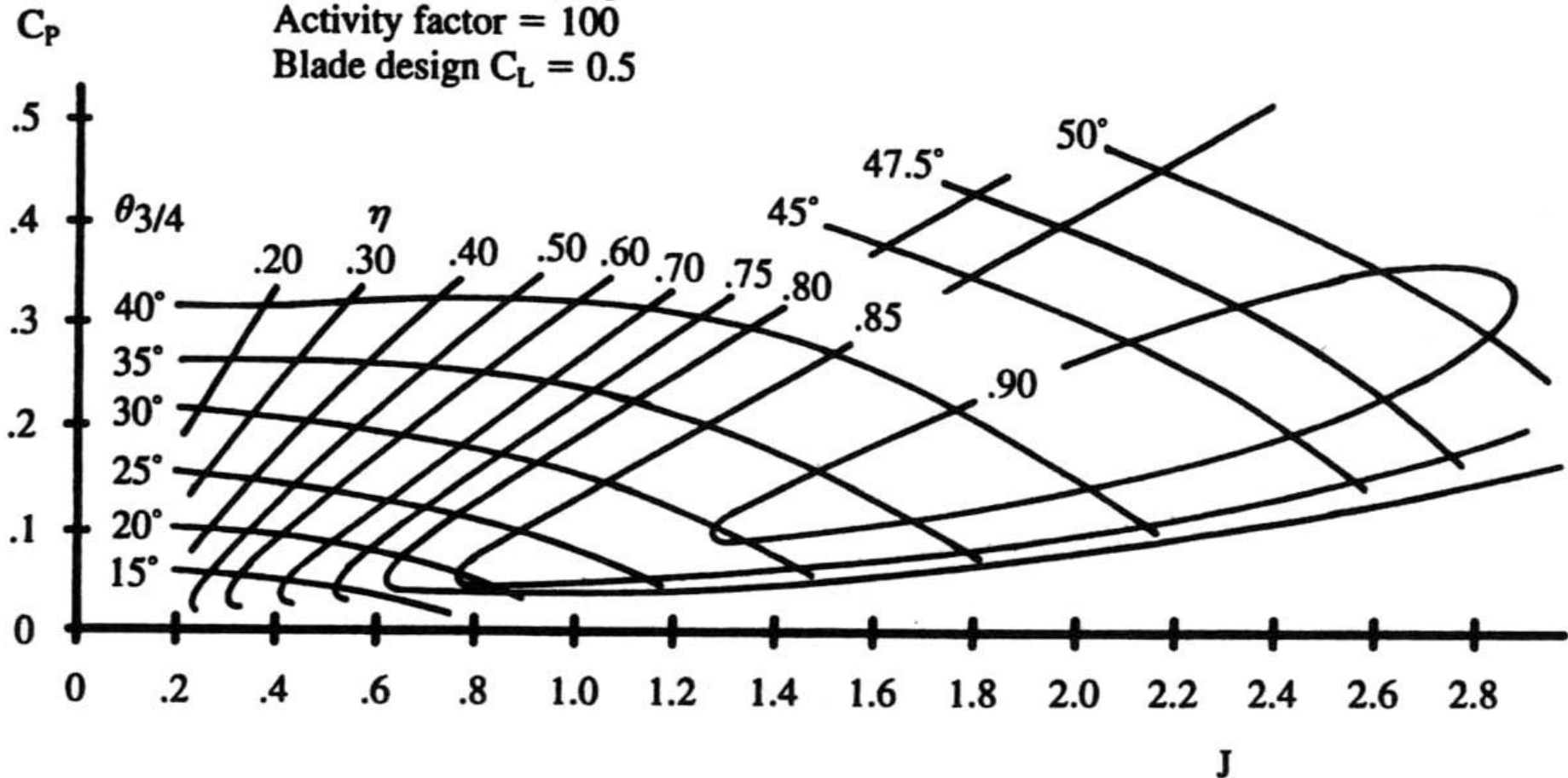


Desempenho do hélice (3)

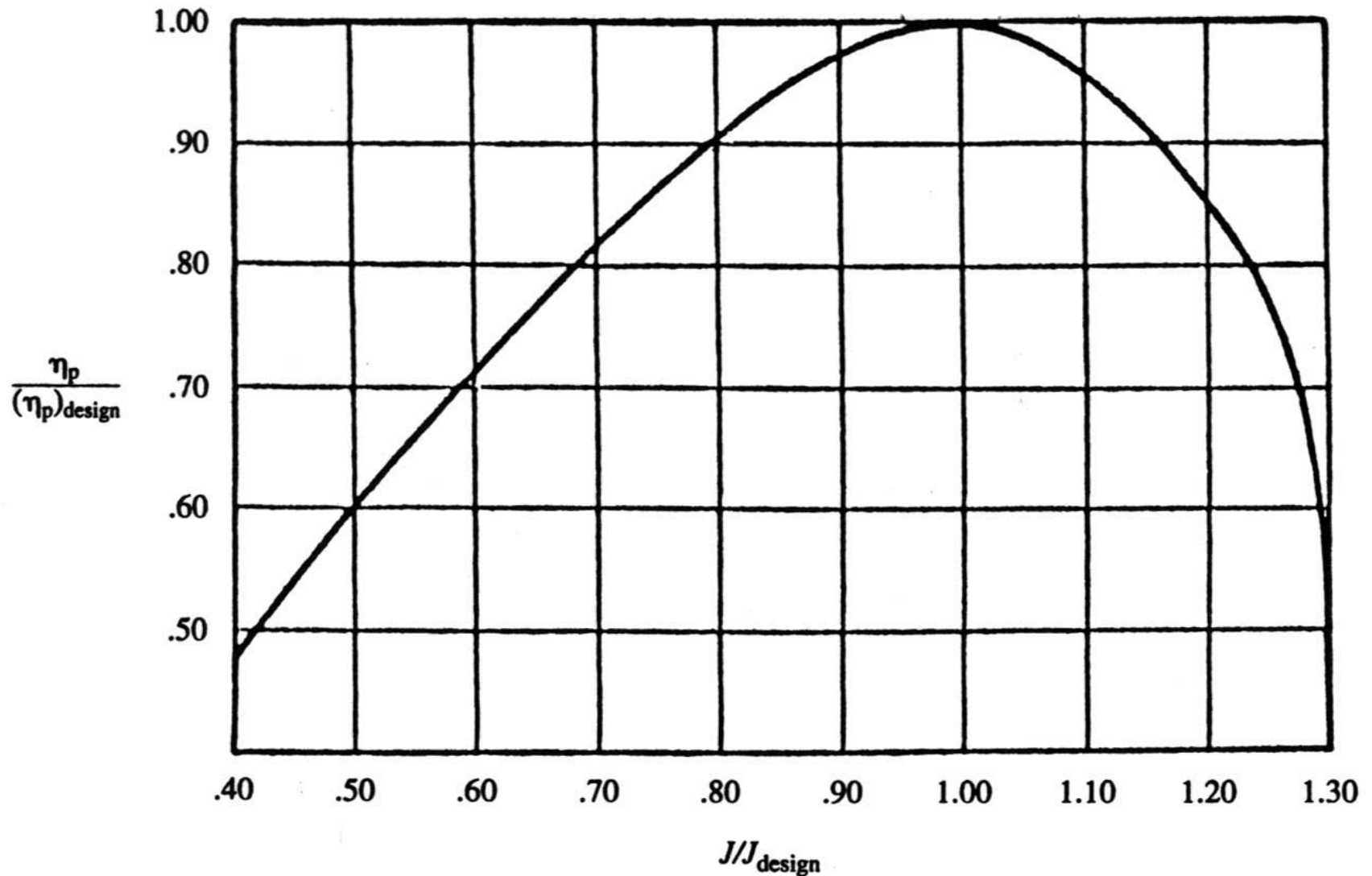


Desempenho do hélice (4)

Typical 3-bladed propeller
Activity factor = 100
Blade design $C_L = 0.5$



Desempenho do hélice (5)



Desempenho do hélice (6)

- Determinação do desempenho do hélice não instalado:
 - Hélice de velocidade constante: usam-se as duas primeiras figuras para qualquer C_p e J ;
 - Hélice de passo fixo: usa-se a segunda com o C_p e J de projecto para determinar θ e depois usa-se a terceira figura para outros J .
- Tendo como referência um hélice tripá o desempenho de hélices de 2 ou 4 pás pode ser estimado da seguinte forma:
 - Para hélices de madeira, devido ao perfil mais espesso, a eficiência da tabela é multiplicada por 0,9.

Desempenho	2 pás	3 pás	4 pás
Eficiência propulsiva	$1,03\eta_P$	η_P	$0,97\eta_P$
Tracção	$0,95T$	T	$1,05T$

Desempenho instalado (1)

- Correção de bloqueio:
 - A nacela do motor atrás do hélice faz com que o escoamento desacelere antes de chegar ao hélice;
 - $J_{\text{cor}} = J(1 - 0,329S_C/D^2)$;
 - S_C – área da secção máxima da nacela/fuselagem;
 - D – diâmetro do hélice;
 - Usar J_{cor} nos gráficos de desempenho do hélice.

Desempenho instalado (2)

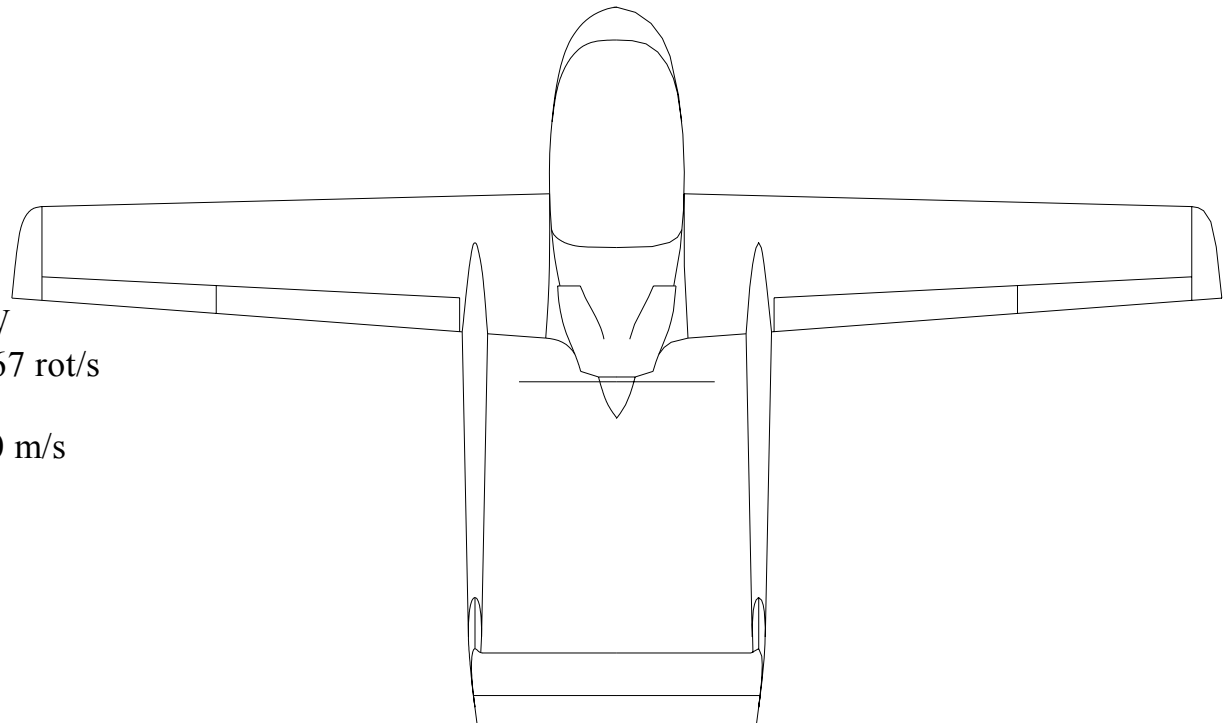
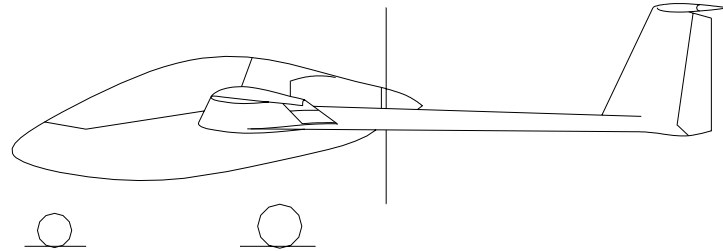
- Correção de compressibilidade:
 - A tracção é reduzida a grandes velocidade e regime devido ao efeito de compressibilidade;
 - $\eta_{Pcor} = \eta_P - (M_{ponta} - 0,89)[0,16/(0,48 - 3t/c)]$ para $M_{ponta} > 0,89$;
 - $M_{ponta} = [V^2 + (\pi n D)^2]^{0,5}/a$;
 - a – velocidade do som;
 - t/c – espessura relativa do perfil do hélice.

Desempenho instalado (3)

- Correção de fricção:
 - As partes do avião dentro da esteira do hélice vão estar sujeitas a maior velocidade e mais turbulência aumentando a resistência de fricção;
 - Pode usar-se uma eficiência efectiva;
 - $\eta_{Pef} = \eta_P [1 - 1,558/D^2(\rho/\rho_0)\Sigma(C_F S_{wet})_{esteira}]$;
 - C_F – coeficiente de fricção;
 - S_{wet} – área molhada;
 - Para hélices empurra deve considerar-se uma perda de eficiência de 2% a 5% devido à esteira da fuselagem, asa e empenagens.

Exemplo (1)

- Características do avião:



Comprimento total	5,86 m
Altura total	1,98 m
Envergadura	9,99 m
Área da asa	9,76 m ²
Potência do motor	80 hp = 59,7 kW
Regime	5500 rpm = 91,67 rot/s
Redutor	1:2,27
Velocidade máxima	216 km/h = 60,0 m/s
Diâmetro do hélice	1,60 m
Número de pás do hélice	3
Passo do hélice	fixo
Densidade do ar	1,225 kg/m ³
Temperatura do ar	288,25 K
Velocidade do som	340,29 m/s

Exemplo (2)

- Verificação do Mach na ponta:
 - Para $M_{\text{ponta}} = 0,8$:
 - $D = [(M_{\text{ponta}}a)^2 - V^2]^{0,5}/(\pi n)$;
 - $D = [(0,8 \times 340,29)^2 - 60,0^2]^{0,5}/(40,38\pi) = 2,09 \text{ m}$;
 - com $n = 91,67/2,27 = 40,38 \text{ rot/s}$;
 - $M_{\text{ponta}} = [V^2 + (\pi n D)^2]^{0,5}/a$;
 - $M_{\text{ponta}} = [60,0^2 + (40,38 \times 1,6\pi)^2]^{0,5}/340,29 = 0,62$.

Exemplo (3)

- Determinação do passo do hélice:
 - $J = V/(nD) = 60,0/(40,38 \times 1,6) = 0,929$;
 - $C_p = P/(\rho n^3 D^5) = 59700/(1,225 \times 40,38^2 \times 1,6^5) = 0,071$
 - Do gráfico:
 - $\theta = 22,5^\circ$;
 - $\eta_p = 0,875$;
 - Como o hélice é empurra não é preciso fazer correcção no J para obter J_{cor} ;
 - Como o hélice é empurra não é preciso corrigir η_p para obter η_{pef} , mas é necessário aplicar o factor de 0,95-0,98 devido à esteira da fuselagem.

Exemplo (4)

- Condições de projecto do hélice:
 - $\eta_{P_{\text{design}}} = 0,95 \times 0,875 = 0,831$;
 - $J_{\text{design}} = 0,929$;
- Determinação da curva de tracção:
 - Usando a curva típica:

V [m/s]	J	J/J_{design}	$\eta_P/\eta_{P_{\text{design}}}$	η_P	T [N]
5	0,077	0,083	0,092	0,076	913
25	0,387	0,417	0,500	0,416	992
40	0,619	0,667	0,777	0,646	964
50	0,774	0,833	0,930	0,773	923
60	0,929	1,000	1,000	0,831	827
70	1,083	1,167	0,896	0,745	635

Exemplo (5)

- Determinação da curva de tracção:
 - Usando a curva do hélice sem iteração:

	V [m/s]	J	C _P (fórmula)	C _P (gráfico)	η _P	T [N]
reduzir regime e potência	5	0,077	0,071	0,137	0,095	1134
	25	0,387	0,071	0,124	0,485	1157
	40	0,619	0,071	0,106	0,703	1049
	50	0,774	0,071	0,090	0,789	941
	60	0,929	0,071	0,071	0,831	827
aumentar regime e potência	70	1,083	0,071	0,048	0,808	689
		p/ regime máximo p/ potência máxima	p/ regime máximo é necessário ajustar o regime para igualar os C _P		0,95η _P do gráfico	

Exemplo (6)

- Determinação da curva de tracção:
 - Usando a curva do hélice com iteração:

V [m/s]	J	C_P (fórmula)	C_P (gráfico)	η_P	T [N]	n [rot/s]	P [W]
5	0,108	0,137	0,137	0,119	1019	29,04	42924
25	0,497	0,116	0,116	0,570	1060	31,46	46506
40	0,722	0,096	0,096	0,760	973	34,65	51223
50	0,837	0,082	0,082	0,809	894	37,35	55223
60	0,929	0,071	0,071	0,831	827	40,38	59700
70	1,002	0,060	0,060	0,827	762	43,65	64536
				0,95 η_P do gráfico			

Exemplo (7)

- Curvas de tracção:

