

O MOTOR "OPEN ROTOR"

E SEUS 5 MITOS

E-BOOK ESCRITO POR
RAPHAEL GAMA



Engenharia
Aeronáutica

Sumário

1 Introdução
03-04

2 Mito 1 - "Open Rotor é uma nova tecnologia"
05-06

3 Qual a eficiência?
07-10

4 Mito 2 - "Open Rotors" não são eficientes após Mach 0.70
11-12

5 Mito 3 - "Open Rotors" mantém velocidade de ponta de pá subsônica ($M < 1$)
13-14

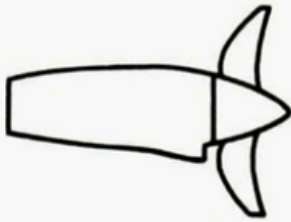
6 Mito 4 - "Open Rotors" são mais leves que turbofans pois não tem nacele
15

7 Mito 5 - "Open Rotors" dependendo da velocidade podem consumir mais que turbofans
16-17

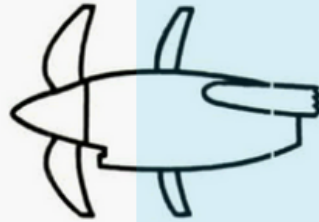
Introdução

Open Rotors são chamados de diversos outros nomes, como "PropFan", "Open Fan", "Contra Rotating OpenRotor" e "Unducted Fan".

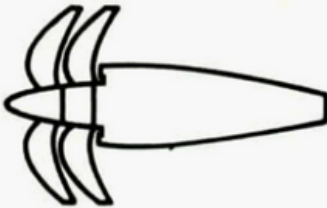
Tal como sua diversidade em nomes, são propulsores de diversas arquiteturas, entretanto, possuem mesmo conceito. Algumas dessas arquiteturas são demonstradas na imagem abaixo:



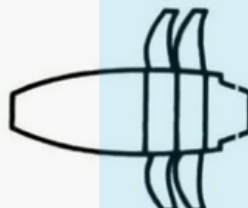
SINGLE ROTATION PUSHER



SINGLE ROTATION WITH STATOR



COUNTER ROTATION TRACTOR



COUNTER ROTATION PUSHER

- GEARED
- GEARLESS

Figure 32. - Future advanced turboprop concepts.

O conceito único de todos estes propulsores é o seguinte, ser um propulsor sem nacele (duto envolta do propulsor) e que, além disso, alcance uma eficiência alta, sendo essa eficiência maior que Mach >0.6 (em 35kft, aprox. 650 km/h, ~350ktas).

Em termos práticos, os open rotors tratam-se de propulsores turbohélice com motores avançados, e que por isso possuem uma eficiência muito maior do que a de outros "Ducted Fans"(fans dutados).

Mito 1 - "Open Rotor é uma nova tecnologia"

O primeiro mito que vamos abordar nesse livro é sobre a ideia de que esses tipos de propulsores são um tipo novo de tecnologia, e que pertence as mais novas inovações da aviação.

Essa ideia é um mito, já que estes já eram utilizados entre a década de 40 e 50. Algumas das aeronaves que os utilizavam são os XP-84H "Thunderscreech" e o Tu-95 "Bear".



XP-84H



Tu-95

Essas duas aeronaves citadas já empregavam um desempenho consideravelmente alto para aeronaves movidas a hélice. Na segunda imagem podemos ver um Tu-95 pareado com duas aeronaves movidas a jato, os caças americanos f-15.

Apesar da alta velocidade empregada, alta eficiência, baixo custo e menor emissão de CO₂, os open rotors possuem o Ruído e a integração como seus principais desafios na sua utilização em aeronaves.

Qual a eficiência?

Afinal, apesar de todo o desempenho e eficiência citados sobre os "Open Rotors", quão alta é essa eficiência e como podemos medi-la?

O que é o Km/L de uma aeronave?

Normalmente quando falamos de automóvel medimos sua eficiência pela quantidade de combustível gasta dividida pela quantidade de Km rodados. O "Km/L" de uma aeronave é chamado de SAR, ou, Specific Air Range. Essa medida é calculada pela distância percorrida pela aeronave, em milhas náuticas, dividida pela quantidade de energia fornecida a aeronave, em kg de querosene.

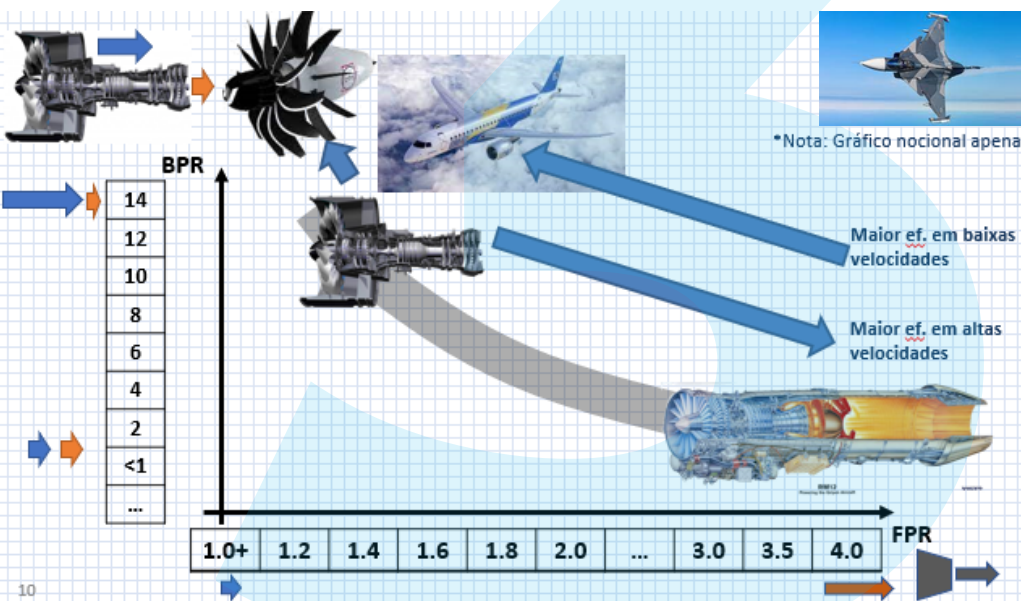
$$SAR = \frac{NM}{KG}$$

Para um voo reto nivelado, essa equação pode ser traduzida por quatro novos termos. O termo L/D , que representa a eficiência aerodinâmica da aeronave, vezes a velocidade desta aeronave, divididos pelo peso da aeronave vezes o consumo de combustível específico em tração dessa aeronave, ou, TSFC.

$$SAR = \frac{NM}{KG} = \frac{\left(\frac{L}{D}\right) * V}{(W * TSFC)}$$

Basicamente, o TSFC é inversamente proporcional ao ETA, a eficiência total propulsiva de um motor, que é dada pelo produto da eficiência térmica e da eficiência propulsiva desse sistema propulsivo. A eficiência térmica é função do ciclo termodinâmico, já a eficiência propulsiva está ligada a velocidade de exaustão do sistema, ou seja, quanto mais próxima a velocidade de exaustão estiver da velocidade de voo, maior a eficiência propulsiva.

Essa medida nos leva a um gráfico de relação inversamente proporcional entre a razão de pressão do fan (FPR), com a razão de passagem do sistema propulsivo (BPR). O FPR demonstra o salto de velocidade em seu escoamento, já o BPR demonstra a razão entre a vazão fria do propulsor, dividida pela razão quente gerada pelo gerador de gases.



10

Como podemos ver, os open rotors se alocam na parte superior esquerda do gráfico, possuindo uma razão de passagem extremamente alta, e conseqüentemente, uma razão de pressão de fan extremamente baixa. Ou seja, open rotors deslocam uma grande quantidade de ar por um pequeno delta velocidade.

Mito 2 - "Open Rotors" não são eficientes após Mach 0.70

Outro mito é a ideia de que esses propulsores não são eficientes após atingirem Mach 0.70.

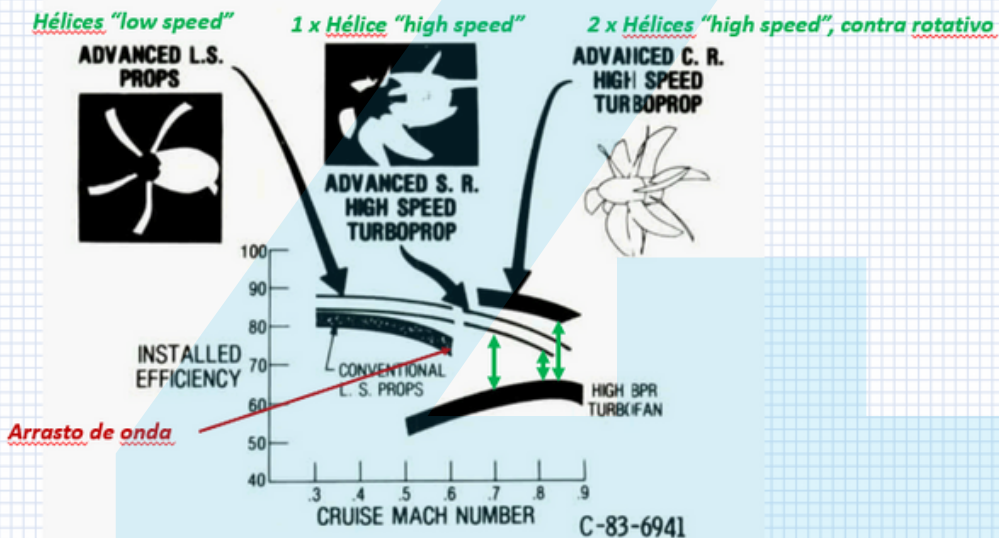
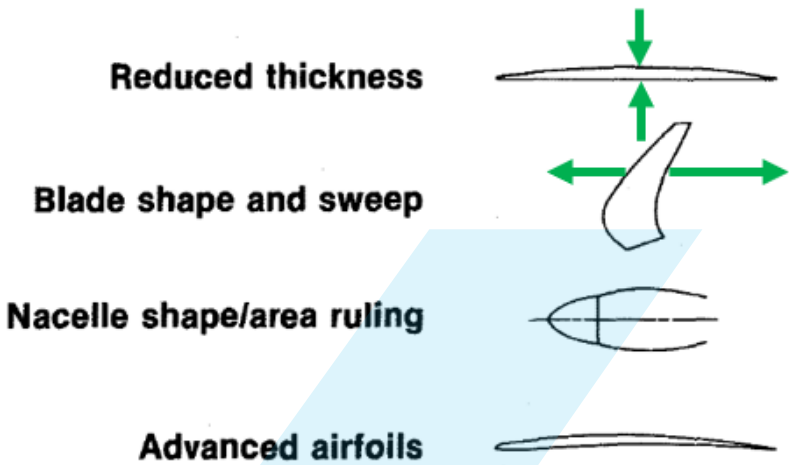


Figure 4. - Installed cruise efficiency trends.

(AGARD CP-366: Summary of Recent NASA Propeller Research)

Com este gráfico, podemos ver a eficiência de alguns propulsores em relação ao número de mach de cruzeiro da aeronave. Podemos ver que mesmo com uma perda de eficiência após atingirmos Mach 0.7, eles não se tornam ineficientes.



Podemos perceber uma utilização de aerofólios mais finos nesses propulsores, além de possuir um enflechamento da pá, reduzindo assim os números de Mach locais e atrasando o aparecimento de ondas de choque e arrastos de onda, além disso possuem uma maior atenção entre a integração entre a hélice e a nacelle, além do desenvolvimento de aerofólios avançados responsáveis por manter a alta eficiência mesmo em números mais altos de Mach.

Mito 3 - “Open Rotors” mantêm velocidade de ponta de pá subsônica ($M < 1$)

O terceiro mito que iremos falar, é o qual algumas referências indicam que os "Open Rotors" mantêm a velocidade de ponta de pá subsônica, ou seja, que a velocidade da ponta de pá desses propulsores é sempre menor que 1.

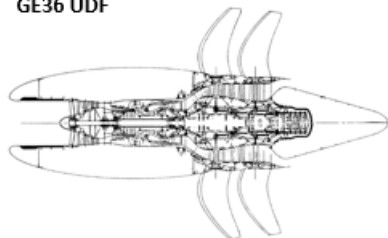
8.3.1 Design Requirements

The design requirements are divided into categories which are explained as follows:

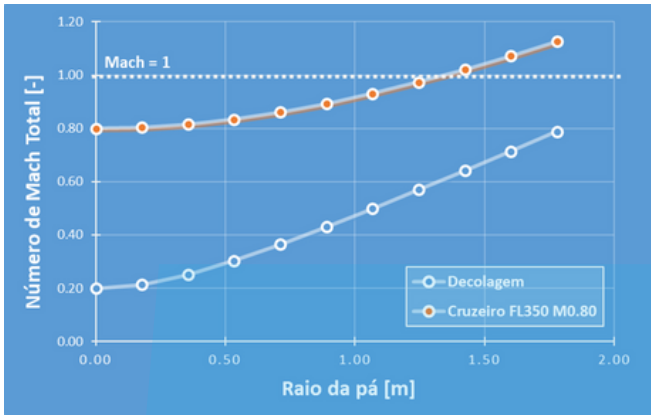
Configuration

- Number of Stages 2
- Number of Blades/Stage 8
- Tip Diameter 3.56m (11.67 ft)
- **Tip Speed at Cruise 238 mps (780 fps)**
- Tip Speed at Takeoff 259 mps (850 fps)
- Activity Factor per Blade 150
- Direction of Rotation, Aft Looking Forward (ALF)
 - Stage 1 - Counterclockwise
 - Stage 2 - Clockwise

GE36 UDF



A imagem acima se trata de um relatório feito pela NASA sobre o propulsor GE36, que voou no fim dos anos 80 em aeronaves MD-80 modificadas. Nos temos nesse relatório as velocidades de Tip Speed em decolagem e em cruzeiro.



O gráfico acima retrata o número de Mach total baseado no relatório. Nele conseguimos ver que ao longo do raio da pá em decolagem ele realmente não ultrapassa Mach 1, porém, em cruzeiro esse número é ultrapassado aos 1.4 m de raio da pá. Ou seja, o aerofólio irá aumentar ainda mais a velocidade localmente.

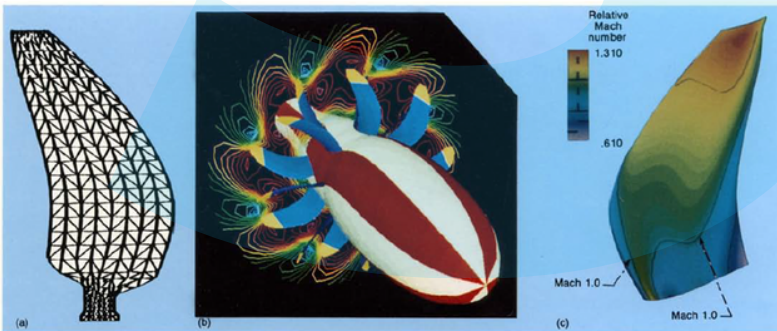


Figure 84.—Output of design codes for counterrotating blade rows. (a) ASTROP aeroelastic code. (b) Three-dimensional aerodynamic code. (c) Aeroacoustic prediction codes.

Mito 4 - “Open Rotors” são mais leves que turbofans pois não tem nacele

TABLE 4.—COMPARISON OF ADVANCED TURBOFAN AND OPEN ROTOR ENGINES

Engine parameter		Geared turbofan	Direct drive turbofan	Open rotor ^a
Top of climb, M0.80, 35000 ft	OPR	42	42	42
	Net thrust, lbf	5000	5000	4960
	TSFC, lbm/hr/lbf	0.502	0.525	0.441
Sea level static, M0.0, 0 ft, ISA+27 °F	OPR	32.7	33.8	29.4
	Net thrust, lbf	23400	22700	27300
	TSFC, lbm/hr/lbf	0.257	0.290	0.158
Fan or propeller diameter, ft		6.2	5.5	13.8
Nacelle maximum diameter, ft		7.6	6.7	5.6
Total engine pod weight, lbm		6630	6100	9220

^aNote that the open rotor engine was designed for a top of climb flight condition of M0.78 at 35000 ft in order to match propeller design characteristics. This table presents open rotor engine performance characteristics at M0.80, 35000 ft for top of climb for comparison to the previously designed turbofan engines of Reference 2.

A tabela acima disponibilizada pela NASA nos permite verificar o quarto mito deste livro. A tabela compara turbofans e o open rotor. Nela podemos perceber que o open rotor direcionado para as mesmas trações que o turbofan, é cerca de 39% mais pesado. Isso ocorre pela diferença no diâmetro do propulsor, com os dados podemos ver uma diferença de 222% a mais de diâmetro no open rotor.

Mito 5 - “Open Rotors” dependendo da velocidade de voo, podem consumir mais que turbofans

Table 3. Fuel Consumption (lb) by Mission Segment

Mission Segment	500 nm Mission		3250 nm Mission	
	Adv. Geared TF	Adv. Open Rotor	Adv. Geared TF	Adv. Open Rotor
Taxi Out	142	102 (-28%)	142	102 (-28%)
Takeoff	395	284 (-28%)	395	284 (-28%)
Climb	2602	2045 (-21%)	2983	2353 (-21%)
Cruise	1786	1643 (-8%)	26,366	23,601 (-10%)
Descent	304	224 (-26%)	304	223 (-27%)
Approach	126	91 (-28%)	126	91 (-28%)
Taxi In	79	57 (-28%)	79	57 (-28%)
TOTAL	5,435	4,444 (-18%)	30,396	26,709 (-12%)

O quinto mito, também pode ser desmentido por mais um dado fornecido pela NASA sobre esses propulsores. Na tabela acima são fornecidos dados de consumo do open rotor e de outros propulsores, no qual podemos ver uma redução de consumo realmente maior em Mach < 0.75, mas ainda existindo um bom potencial em Mach 0.78 (Velocidade de Cruzeiro).

Com isso, temos todos os mitos revelados falsos, com dados e apurações sobre os famosos open rotors e seus concorrentes.

Pudemos ver a diferença de eficiência entre open rotors e turbofans, podendo verificar a tentativa de produzir esses propulsores com objetivo de garantir uma alta eficiência em altas velocidades.

Porém, "não existe almoço grátis", esses propulsores ainda possuem necessidade de avanço na questão do ruído, e esses avanços vem ocorrendo para reduzir cada vez mais o "gap" contra turbofans.

OBRIGADO!



Engenharia
Aeronáutica