

Motores Térmicos

8° Semestre

4° ano

Aula 28. Motores de propulsão

- ▶ Introdução
- ▶ Motor Turbo-Hélice
- ▶ Motor Prop-jet
- ▶ Motor Turbojacto
- ▶ Motor TurboFan
- ▶ Motor Pulso Jacto
- ▶ Motor Ramjet (Estado jacto)
- ▶ Motor Scramjet
- ▶ Pós Combustor (Afterburner)

28.1 Introdução

Os motores de propulsão utilizam o ar atmosférico para oxidar o combustível e gerar empuxo, convertendo a energia química do combustível em energia mecânica necessária ao voo.

Os primeiros aviões eram movidos por hélices accionadas por motores semelhantes aos automóveis. O grande avanço da aviação comercial ocorreu com a introdução dos motores a jacto, que permitiram velocidades mais elevadas e maior eficiência em longas distâncias.

Tanto os motores a hélice como os motores a jacto apresentam vantagens e limitações. Por esta razão, foram desenvolvidas soluções híbridas, como os motores turbo-hélice e propfan (propjet), que procuram combinar a elevada eficiência das hélices com o desempenho dos motores a jacto.

28.1 Introdução

Duas dessas modificações são o motor propjet e o turbofan.

O motor mais amplamente utilizado na propulsão de aeronaves é o motor turbofan (ou ventilador a jacto), em que um grande ventilador accionado pela turbina força uma quantidade considerável de ar através de um ducto (carenagem) ao redor do motor.

28.1 Introdução

Os motores de turbinas a gás são geralmente usados para propulsar aviões devido a apresentarem uma alta potência específica.

As turbinas a gás de aviões funcionam num ciclo aberto denominado **Ciclo de Propulsão a Jacto** que difere do de Brayton pelo facto de os gases não serem expandidos da turbina até à pressão ambiente.

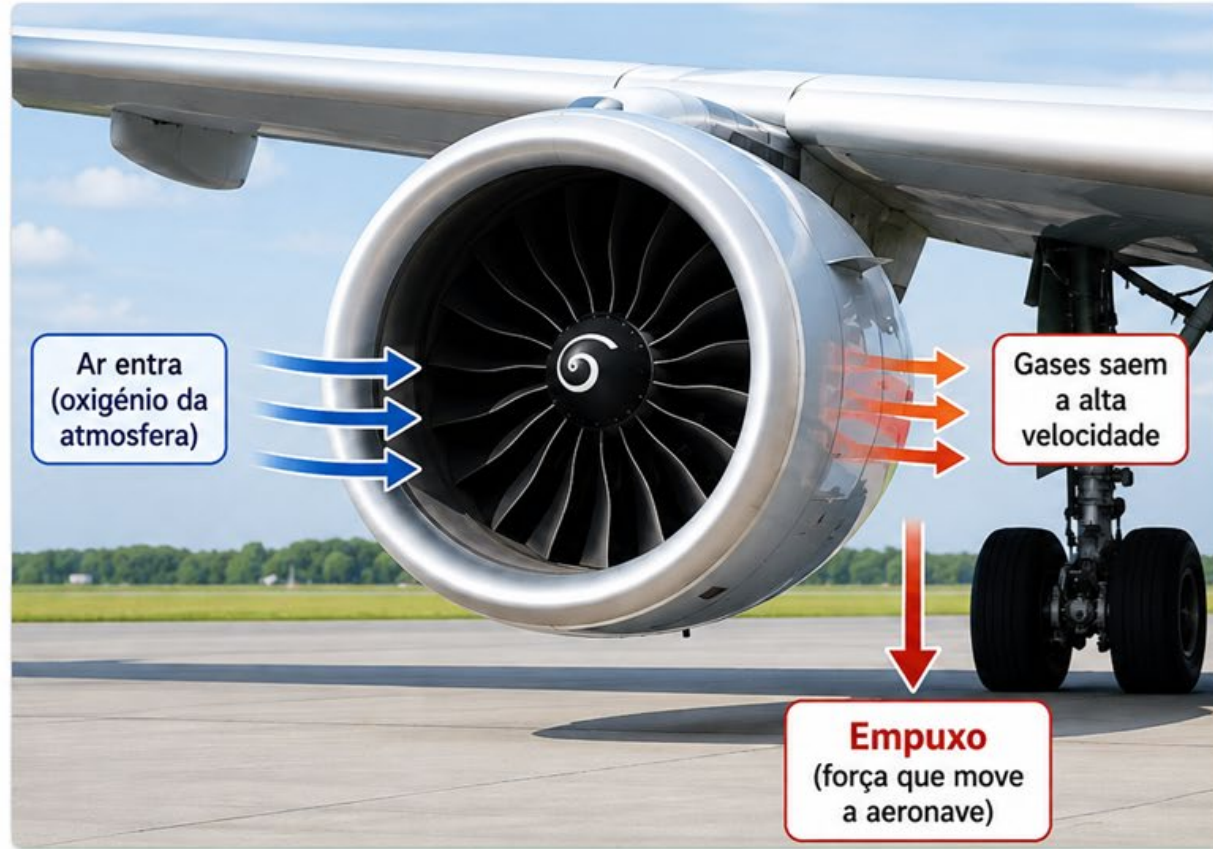
28.1 Introdução



FUNÇÃO PRINCIPAL

Produzir **empuxo** para mover a aeronave.

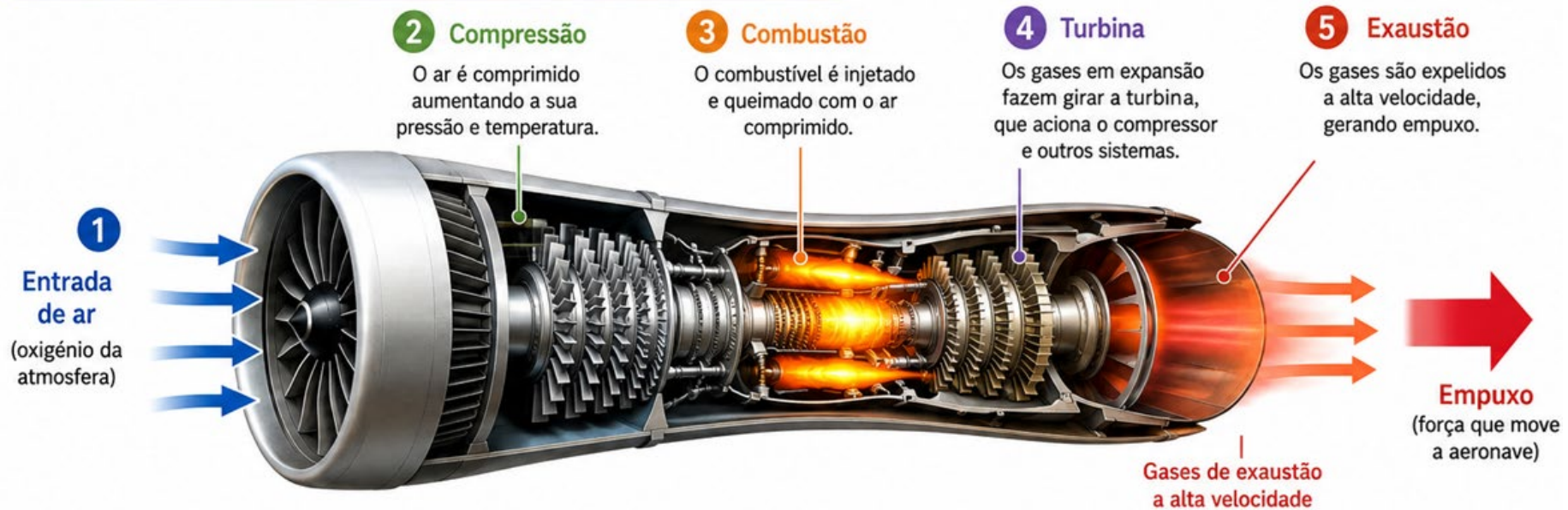
COMO FUNCIONAM?



Os motores de propulsão utilizam o oxigênio presente na atmosfera e, por isso, **não necessitam transportar oxidante, ao contrário dos motores-foguete.**

28.1 Introdução

Função principal: Produzir empuxo para mover a aeronave



Os motores de propulsão utilizam o oxigénio do ar atmosférico e, por isso, não necessitam transportar oxidante, ao contrário dos motores-foguete.

28.1 Introdução

1. TURBOJACTO



O ar é comprimido por um compressor, o combustível é queimado e os gases expelidos através da turbina e do bocal.

Aplicação:
Aviões militares, alta velocidade e grande altitude.



2. TURBOFAN



Semelhante ao turbojacto, mas com um grande ventilador frontal que aumenta a eficiência e reduz o consumo de combustível.

Aplicação:
Aviação comercial, alta eficiência e baixo consumo.



3. TURBO-HÉLICE



A turbina aciona uma hélice que produz empuxo. Ideal para baixas velocidades.

Aplicação:
Aviões regionais e de transporte, baixas velocidades.



4. RAMJET



Não possui compressor ou turbina. Utiliza a velocidade do avião para comprimir o ar.

Aplicação:
Mísseis e aeronaves supersônicas (Mach 2 – Mach 6).



5. SCRAMJET




Ramjet que opera em regime supersônico em todo o motor. Usado em veículos hipersônicos.

Aplicação:
Veículos hipersônicos (Mach 6 ou superior).




COMPARAÇÃO GERAL	
Tipo de Motor	Aplicação / Características
1 Turbojacto	Aviões militares, alta velocidade e grande altitude.
2 Turbofan	Aviação comercial, alta eficiência e baixo consumo.
3 Turbo-hélice	Aviões regionais e de transporte, baixas velocidades.
4 Ramjet	Mísseis e aeronaves supersônicas (Mach 2 – Mach 6).
5 Scramjet	Veículos hipersônicos (Mach 6 ou superior).


TODOS OS MOTORES REALIZAM TRÊS PROCESSOS FUNDAMENTAIS



COMPRESSÃO


O ar é comprimido, aumentando a sua pressão e temperatura.






COMBUSTÃO


O combustível é injetado e queimado com o ar comprimido.






EXPANSÃO


Os gases em expansão são acelerados para produzir empuxo.






EMPUXO

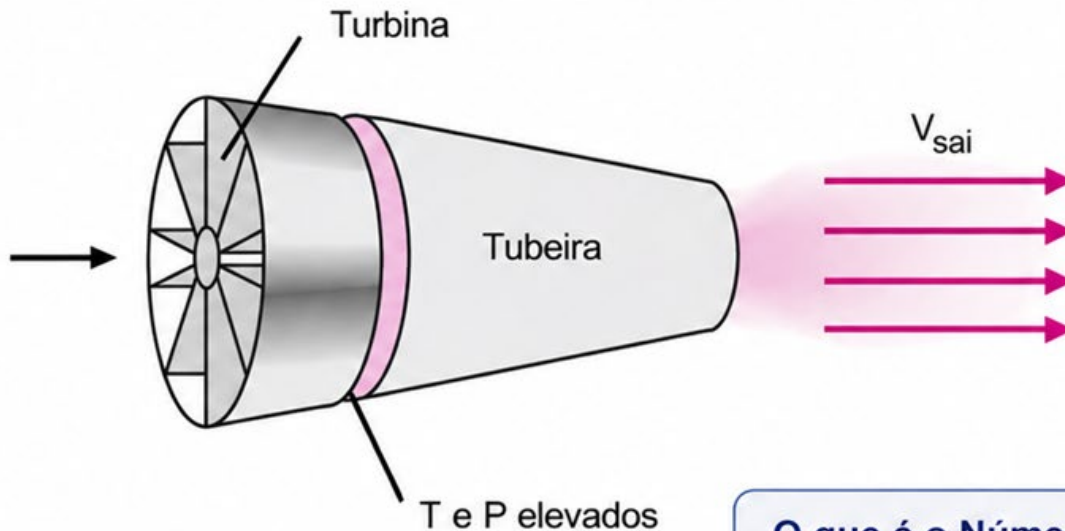
Os gases são expelidos a alta velocidade, gerando empuxo.





Todos os motores têm o mesmo objetivo: transformar energia em empuxo.

28.1 Introdução



$$Mach = \frac{V}{a}$$

Onde:

V – é a velocidade de escoamento (m/s)

a – é a velocidade do som (m/s)

O que é o Número de Mach?

Número de Mach (M) é a razão entre a velocidade de um objeto ou do escoamento e a velocidade do som no meio envolvente.

Fórmula:

$$M = \frac{V}{a}$$

Exemplos:

- Se $V = 340$ m/s e $a = 340$ m/s → **Mach = 1**
- Se $V = 680$ m/s e $a = 340$ m/s → **Mach = 2**

28.1 Introdução



De acordo com o **número de Mach**, os escoamentos podem ser classificados como: **Subsônico**, **Transônico**, **Supersônico** e **Hipersônico**.

1	$0 \leq Mach < 0,8$	ESCOAMENTO SUBSÔNICO A velocidade do escoamento é menor que a velocidade do som.	
2	$0,8 \leq Mach < 1,2$	ESCOAMENTO TRANSÔNICO A velocidade do escoamento é próxima da velocidade do som.	
3	$1,2 \leq Mach < 5$	ESCOAMENTO SUPERSÔNICO A velocidade do escoamento é maior que a velocidade do som.	
4	$Mach \geq 5$	ESCOAMENTO HIPERSÔNICO A velocidade do escoamento é muito maior que a velocidade do som.	



Lembre-se: $Mach = \frac{\text{Velocidade do escoamento}}{\text{Velocidade do som (a)}}$

A velocidade do som (a) depende das condições do meio (temperatura, composição, etc.).

28.2 Motor Turbo-Hélice

O motor turbo-hélice combina um **turboreactor** com uma **hélice propulsora**, utilizando uma turbina para converter a energia dos gases quentes em potência mecânica. Essa potência é transmitida à hélice por meio de uma **caixa redutora**, responsável por grande parte do empuxo produzido.

Ao contrário do turbojacto, onde o empuxo é gerado principalmente pelos gases de escape, no turbo-hélice cerca de **90% do empuxo é produzido pela hélice**, tornando-o mais eficiente em voos de baixa e média velocidade.

28.2 Motor Turbo-Hélice



O motor turbo-hélice combina um **turboreactor** e uma **hélice propulsora** num único sistema, sendo ideal para aeronaves de transporte regional e de carga.

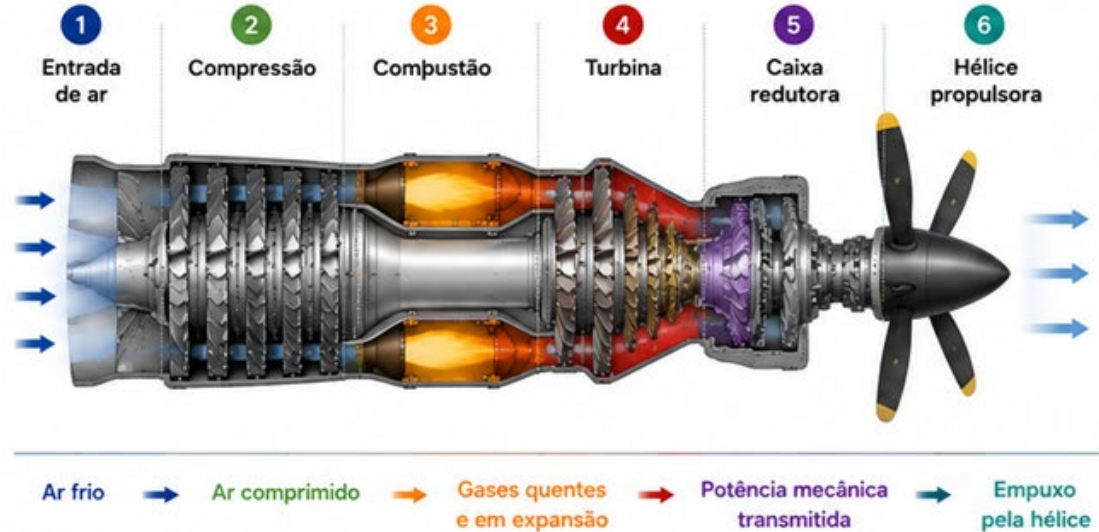


Os gases de escape da turbina não são usados diretamente para a propulsão: a turbina aciona uma **caixa redutora**, que transmite potência à hélice, permitindo **maior eficiência** em baixas e médias velocidades.



Oferece **baixo consumo de combustível**, **maior autonomia** e **menor ruído na cabine**, comparado com os turbojactos, sendo amplamente utilizado em aeronaves regionais e militares.

PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO



APLICAÇÕES TÍPICAS



Aviação regional
Ligações de curta e média distância com elevada eficiência.



Transporte de carga
Capacidade de operar em pistas curtas e não pavimentadas.



Aplicações militares
Vigilância, patrulha marítima e transporte tático.



28.2 Motor Turbo-Hélice

Principais características

- ▶ Elevada eficiência energética.
- ▶ Baixo consumo específico de combustível.
- ▶ Menor ruído comparativamente aos turbojactos.
- ▶ Excelente desempenho em pistas curtas.
- ▶ Grande autonomia de voo.

Aplicações típicas

- ▶ Aviação regional de passageiros.
- ▶ Transporte de carga.
- ▶ Patrulha marítima e vigilância.
- ▶ Aviação militar de transporte tático.
- ▶ Aeronaves operando em zonas remotas.

28.2 Motor Turbo-Hélice

Vantagens

- ▶ ✓ Maior eficiência até cerca de 700 km/h.
- ▶ ✓ Menor consumo de combustível.
- ▶ ✓ Custos operacionais reduzidos.
- ▶ ✓ Boa capacidade de descolagem e aterragem em pistas curtas.

Exemplos de aeronaves

- ▶ ATR 72
- ▶ Dash 8 Q400
- ▶ C-130 Hercules
- ▶ Embraer EMB-120 Brasília
- ▶ Airbus C295

28.3 Motor Prop-Jet

O motor **turbo-hélice** é extremamente eficiente em velocidades baixas e médias (até aproximadamente Mach 0,6–0,7). Contudo, quando a velocidade da aeronave aumenta, a eficiência da hélice convencional diminui devido aos efeitos de compressibilidade e à aproximação da velocidade do som nas pontas das pás.

Para ultrapassar esta limitação, surgiu o **Prop-Jet (Propfan)**. Este utiliza hélices aerodinamicamente mais avançadas, com pás em forma de sabre e otimizadas para operar a velocidades mais elevadas, permitindo que a aeronave voe próximo das velocidades dos aviões a jacto (Mach 0,75–0,85), mantendo um consumo de combustível significativamente inferior ao dos turbofans convencionais.

28.3 Motor Prop-Jet

Principais Características

- ▶ Elevada taxa de desvio (bypass ratio), podendo ultrapassar **30:1** e atingir valores próximos de **100:1**.
- ▶ Menor consumo específico de combustível em comparação com motores turbo-fan convencionais.
- ▶ Velocidades de cruzeiro da ordem de **Mach 0,75 a Mach 0,82**.
- ▶ Operação eficiente a altitudes até cerca de **12 200 m**.
- ▶ Redução dos custos operacionais devido ao menor consumo de combustível.

28.3 Motor Prop-Jet

Vantagens

- ▶ ✓ Elevada eficiência propulsiva.
- ▶ ✓ Menor consumo de combustível.
- ▶ ✓ Menores emissões de CO₂ por passageiro transportado.
- ▶ ✓ Boa combinação entre economia e velocidade.

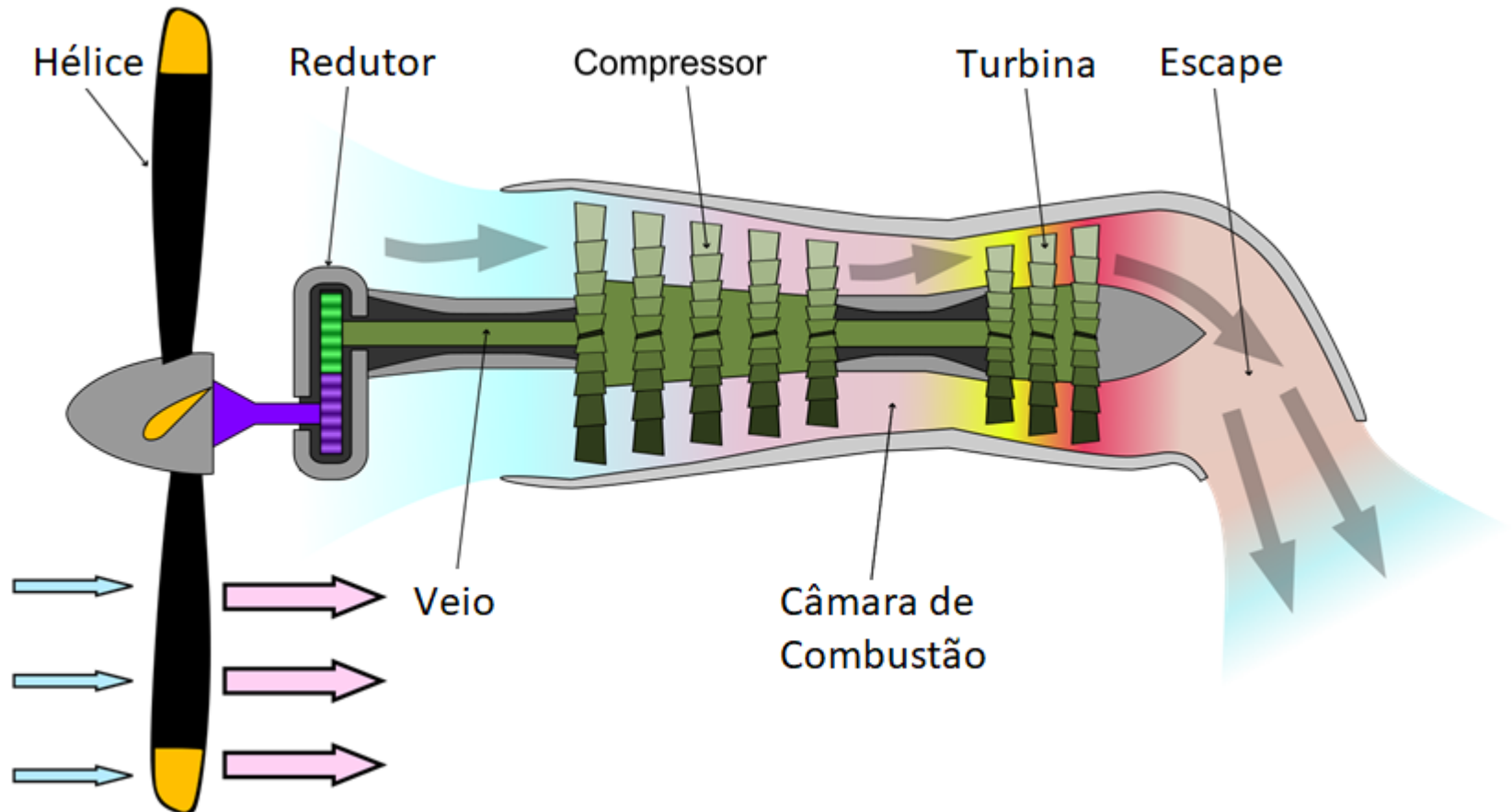
Desvantagens

- ▶ ✗ Níveis de ruído mais elevados do que os turbo-fans modernos.
- ▶ ✗ Maior complexidade aerodinâmica das hélices.
- ▶ ✗ Vibrações superiores às dos motores turbo-fan.

Aplicações

- ▶ Os motores **Prop-Jet** são particularmente adequados para:
- ▶ Aviões regionais de médio alcance;
- ▶ Aeronaves de transporte comercial de elevada eficiência energética;
- ▶ Futuras aeronaves concebidas para reduzir o consumo de combustível e as emissões ambientais.

28.3 Motor Prop-Jet



28.3 Comparação entre Motor Turbo-hélice e Motor Prop-Jet (Propfan)

Motor Turbo-hélice

- Hélice convencional com menor número de pás (geralmente 4 a 6).
- Maior eficiência a baixas velocidades.
- Velocidade típica: até Mach 0,6–0,7.
- Altitude típica: até cerca de 9 100 m.
- Exemplo: ATR 72, Dash 8, C-130 Hercules.



Exemplo: Motor Pratt & Whitney PW127M (ATR 72)



Motor Propjet (Propfan)

- Hélices avançadas com muitas pás finas e enfilechadas (em forma de foice).
- Maior eficiência em velocidades mais elevadas.
- Velocidade típica: até Mach 0,75–0,82.
- Altitude típica: até cerca de 12 200 m.
- Exemplo: GE36 (demonstrador), Pratt & Whitney/Allison 578-DX.



Exemplo: GE36 UDF (Unducted Fan) – Demonstrador

Principais Diferenças



Turbo-hélice:
melhor em baixas velocidades.

Propjet:
melhor em velocidades elevadas.



Turbo-hélice:
até cerca de 9 100 m.

Propjet:
até cerca de 12 200 m.



Turbo-hélice:
menor ruído.

Propjet:
ruído geralmente mais elevado.



Turbo-hélice:
mais eficiente em curtas distâncias.

Propjet:
mais eficiente em médias/longas distâncias.

Em resumo: O motor propjet (propfan) combina a **elevada eficiência das hélices** com **velocidades próximas das dos turbo-fans**, sendo uma alternativa promissora para o transporte aéreo eficiente.

28.4 Motor Turbojacto



O turbojacto, ou turboreactor, é o tipo **mais simples e mais antigo** de motor a jacto para fins gerais.

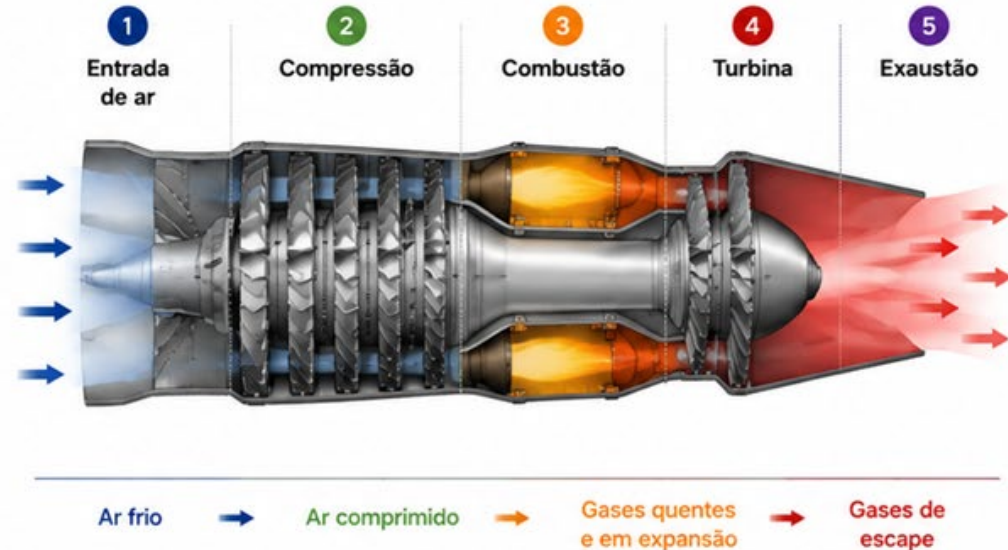


Dois engenheiros distintos, **Frank Whittle**, no Reino Unido, e **Hans von Ohain**, na Alemanha, desenvolveram independentemente o conceito durante o fim da década de 1930.



Em 27 de Agosto de 1939, o **Heinkel He 178** se tornou o primeiro avião do mundo a voar sob a propulsão do turbojacto, transformando-se assim no **primeiro avião funcional a jacto**.

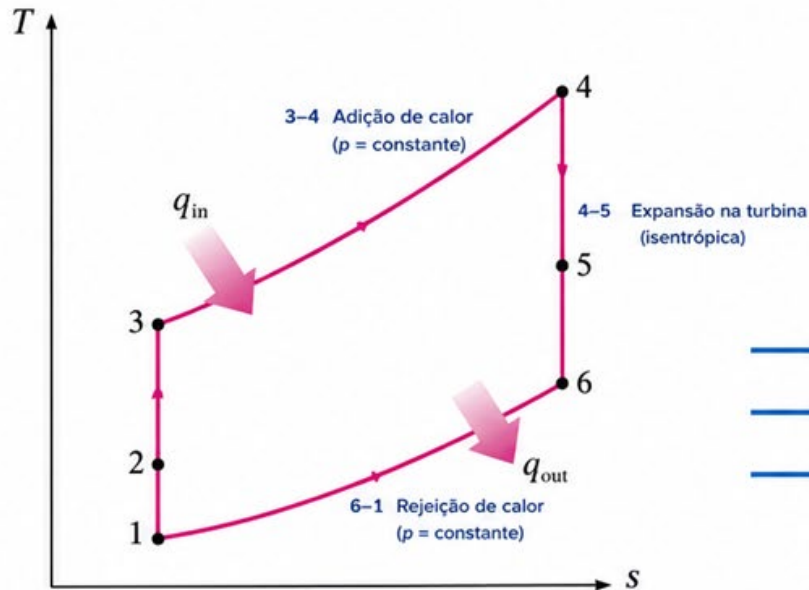
PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DE UM TURBOJACTO



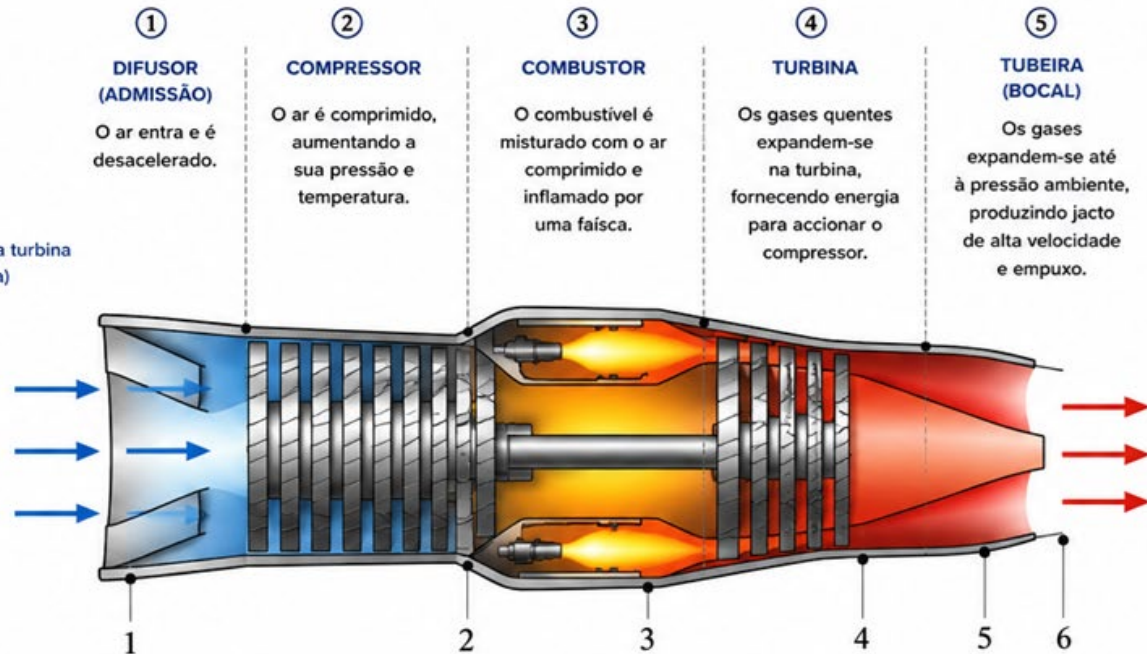
Heinkel He 178
(27 de Agosto de 1939)
Primeiro avião do mundo a voar com um turbojacto.

28.4 Motor Turbojacto

CICLO BRAYTON IDEAL ($p = \text{constante}$)



COMPONENTES DO MOTOR TURBOJACTO



PROCESSO TERMODINÂMICO

- 1-2 Compressão isentrópica no compressor.
- 2-3 (Não mostrado no gráfico) Pequena elevação de pressão no difusor.
- 3-4 Adição de calor no combustor ($p = \text{constante}$).
- 4-5 Expansão isentrópica na turbina.
- 5-6 Expansão adicional na tubeira até à pressão ambiente.
- 6-1 Rejeição de calor ($p = \text{constante}$).

PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

- O ar é admitido, comprimido e misturado com o combustível.
- A combustão aumenta a temperatura e a energia dos gases.
- Os gases expandem-se na turbina, que fornece potência para o compressor.
- Os gases remanescentes expandem-se na tubeira, produzindo o empuxo.

28.4 Motor Turbojacto

Aplicação

- ▶ Utilizado principalmente na propulsão de aeronaves.
- ▶ Produz empuxo por meio da aceleração dos gases de escape.

Componentes Principais

- ▶ Tomada de ar
- ▶ Compressor
- ▶ Câmara de combustão
- ▶ Turbina
- ▶ Bocal de propulsão

▶ Vantagens

- ▶ ✓ Elevada relação potência/peso
- ▶ ✓ Capacidade de operar a altas velocidades
- ▶ ✓ Construção relativamente compacta

28.4 Motor Turbojacto

Princípio de Funcionamento

Admissão e Compressão

- ▶ O ar entra pela tomada de ar.
- ▶ O compressor aumenta a pressão do ar antes da combustão.

Combustão

- ▶ O combustível é misturado com o ar comprimido.
- ▶ A mistura é inflamada por uma faísca.
- ▶ A combustão eleva significativamente a temperatura e a energia dos gases.

Expansão na Turbina

- ▶ Os gases quentes expandem-se através da turbina.
- ▶ Parte da energia é extraída para accionar o compressor.

Produção de Empuxo

- ▶ Os gases remanescentes expandem-se no bocal de propulsão.
- ▶ A saída dos gases a alta velocidade gera o empuxo necessário para mover a aeronave.

28.5 Motor TurboFan

O **motor turbofan** é um motor de reacção que combina as vantagens dos motores **turbojacto** e **turbo-hélice**. É constituído por uma turbina a gás associada a uma grande ventoinha frontal (*fan*), responsável por acelerar um volume significativo de ar.

O termo "**fan**" refere-se à ventoinha de múltiplas pás situada na entrada do motor. Esta ventoinha comprime e acelera o ar, gerando uma parcela significativa do empuxo. Uma fracção do ar passa pelo núcleo do motor, onde ocorre a combustão, enquanto outra fracção contorna o núcleo através de um ducto exterior, contribuindo directamente para a propulsão.

Comparativamente aos motores turbojacto, os turbofans apresentam:

- Menor consumo específico de combustível;
- Menor nível de ruído;
- Maior eficiência propulsiva;
- Melhor desempenho em voos comerciais de média e longa distância

28.5 Motor TurboFan

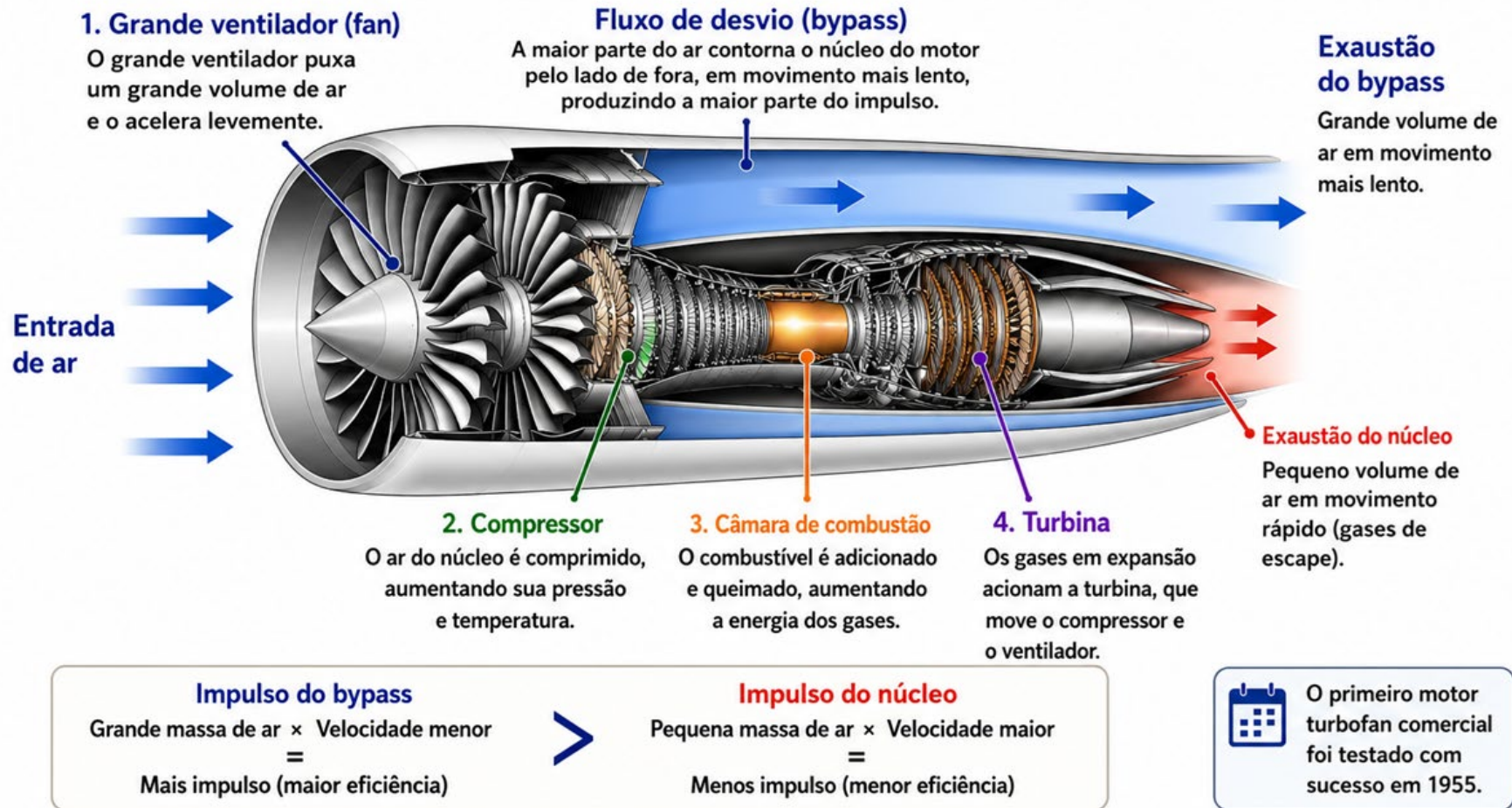
Entre a admissão e o escape do motor totalmente rotativo, eles são formados por:

- ▶ Fan
- ▶ Compressores de Baixa Pressão
- ▶ Compressores de Alta Pressão
- ▶ Turbinas de Alta Pressão
- ▶ Turbinas de Baixa Pressão

Os compressores e turbinas de baixa e alta pressão, são normalmente, dois módulos: Módulo de Baixa Pressão (compressores e turbinas de baixa pressão + fan) LP Module, e o Módulo de Alta pressão (compressores e turbinas de alta pressão) HP Module.

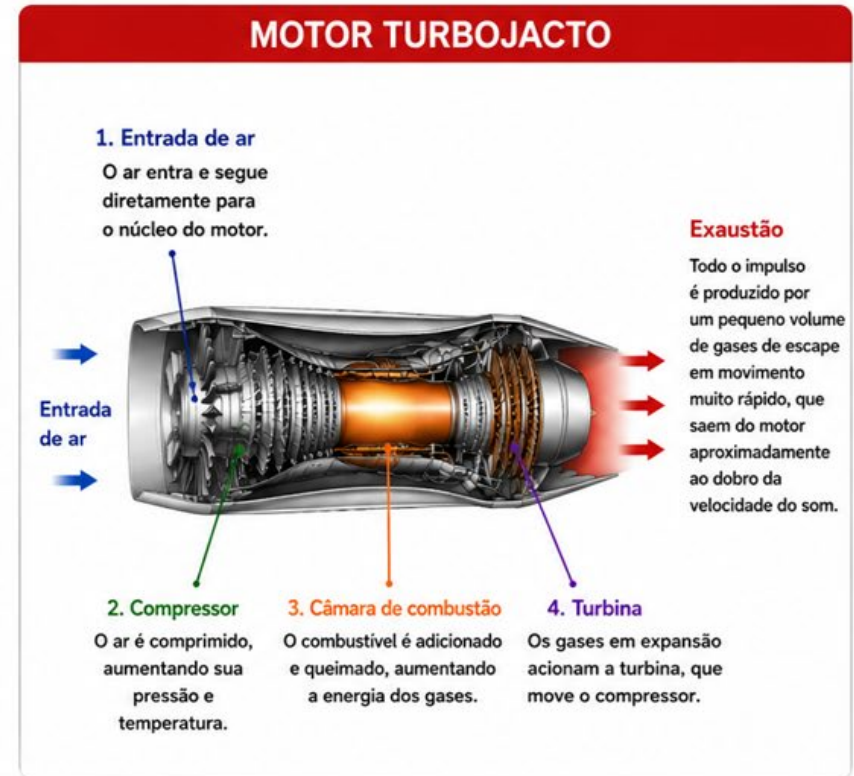
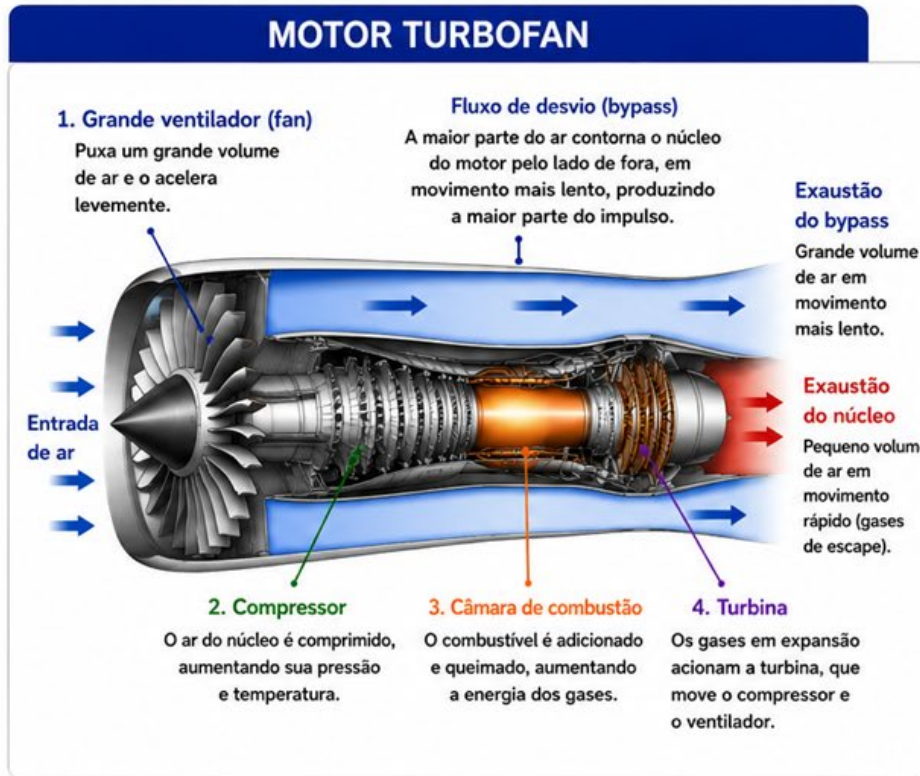
28.5 Motor TurboFan

O motor turbofan de um avião pode ser diferenciado do motor turbojacto de baixo custo por seu capot que cobre o grande ventilador. Todo o impulso de um motor turbo-jacto é devido aos gases de escape que deixam o motor aproximadamente ao dobro da velocidade do som.



28.5 Motor TurboFan

O motor turbofan de um avião pode ser diferenciado do motor turbojacto de baixo custo por seu capot que cobre o grande ventilador. Todo o impulso de um motor turbo-jacto é devido aos gases de escape que deixam o motor aproximadamente ao dobro da velocidade do som.



PRINCÍPIO DE IMPULSO

Turbofan (mais eficiente)

Grande massa de ar × Velocidade menor = Mais impulso
(maior eficiência)



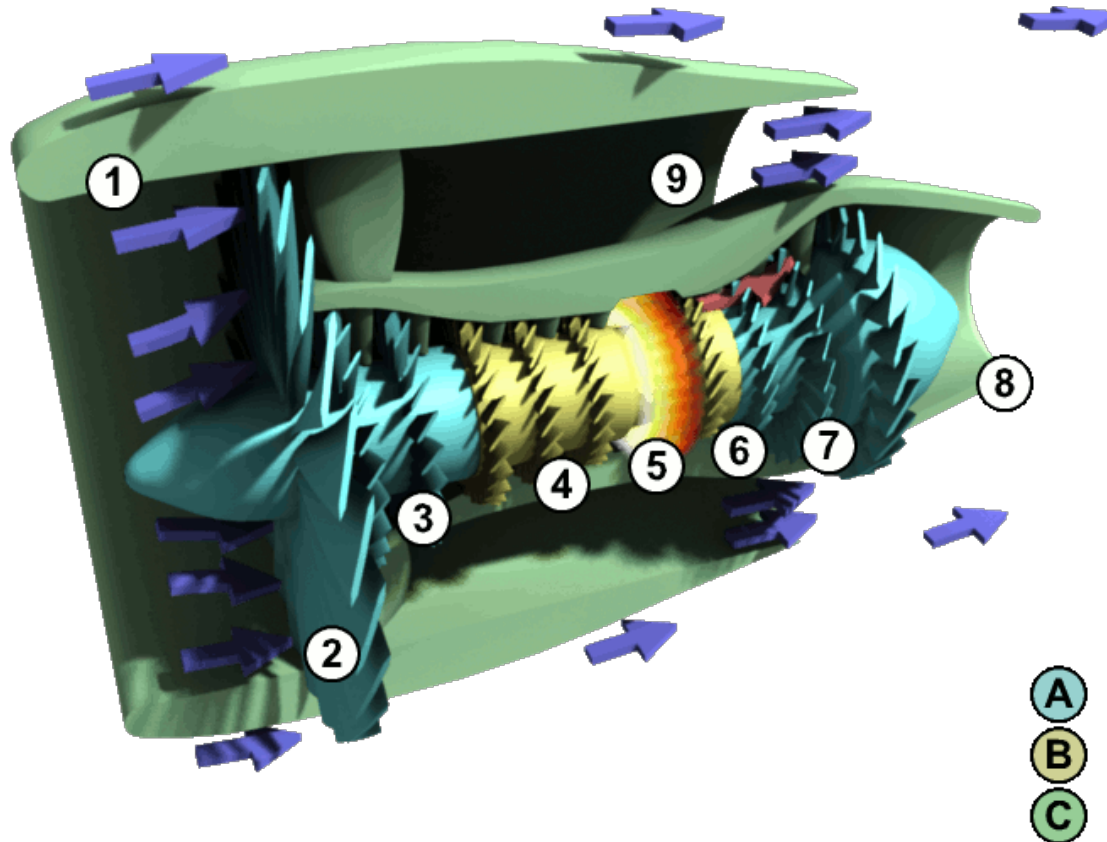
Turbojacto (menos eficiente)

Pequena massa de ar × Velocidade maior = Menos impulso
(menor eficiência)



O primeiro motor turbofan comercial foi testado com sucesso em 1955.

28.5 Motor TurboFan

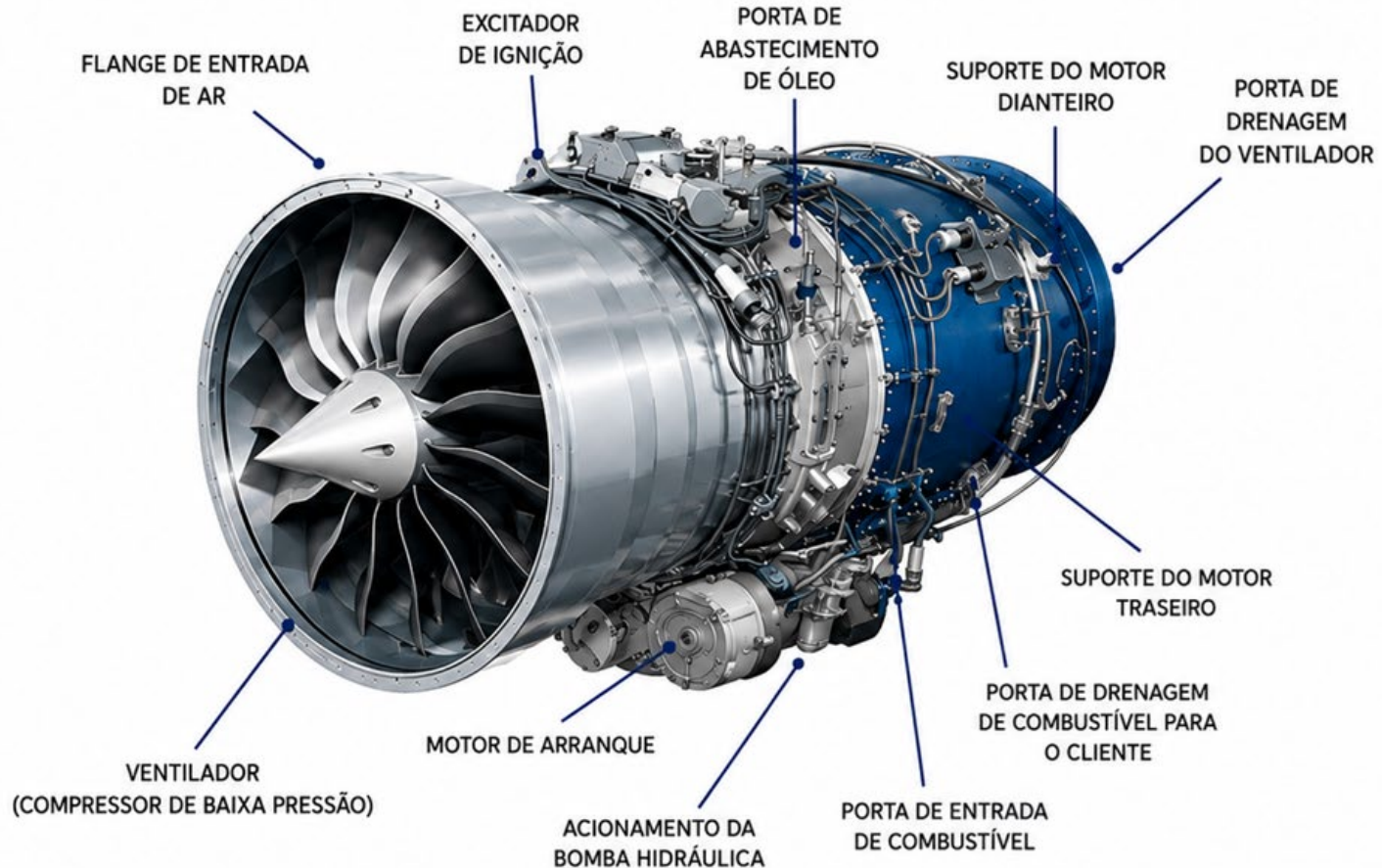


1. Nacela
2. Ventilador
3. Compressor de baixa pressão
4. Compressor de alta pressão
5. Câmara de combustão
6. Turbina de alta pressão
7. Turbina de baixa pressão
8. Bocal do núcleo
9. Bocal do ventilador

A: rotor de baixa pressão. **B:** rotor de alta pressão. **C:** componentes fixos

28.5 Motor TurboFan

MOTOR TURBOFAN – ALTO FLUXO DE DESVIO (HIGH BYPASS)



Nota: O turbofan possui um grande ventilador de baixa pressão que desvia a maior parte do ar para fora do motor (fluxo de desvio), aumentando a eficiência e reduzindo o consumo de combustível.

28.5 Motor TurboFan



REDUÇÃO DO RUÍDO

Num motor turbo-fan, os gases de escape a alta velocidade são misturados com o ar a baixa velocidade, o que resulta numa **redução considerável no ruído**.



MAIOR EFICIÊNCIA

As novas técnicas de arrefecimento resultaram em aumentos consideráveis na eficiência, permitindo que a temperatura do gás na saída do queimador atinja mais de **1500°C**, que é mais de **100°C** acima do ponto de fusão dos materiais das pás da turbina.

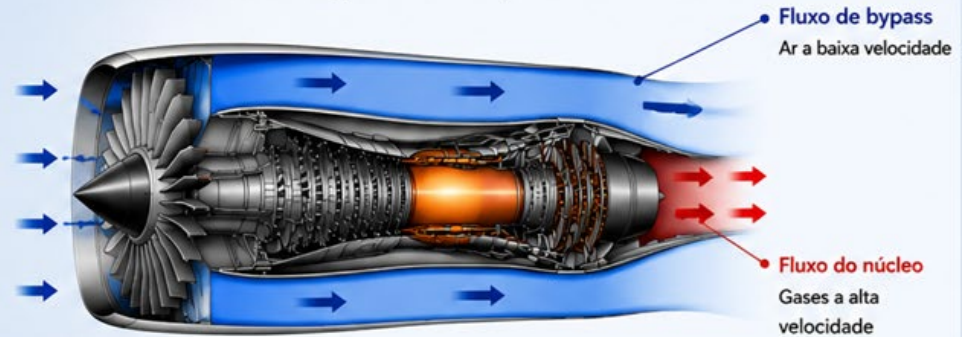


CAPACIDADE E DESEMPENHO

Os motores turbofan merecem grande crédito pelo sucesso dos grandes aviões que pesam quase **400.000 kg** e são capazes de transportar **mais de 400 passageiros** numa distância de **10.000 km** à velocidades acima de **950 km/h**, com pouco combustível por **quilómetro-passageiro**.

COMO O TURBOFAN REDUZ O RUÍDO

Os gases de escape rápidos são misturados com o ar de bypass mais lento, reduzindo o ruído.



Resultado: redução considerável do ruído e aumento da eficiência.



O primeiro motor turbofan comercial foi testado com sucesso em 1955.

28.5 Motor TurboFan

A razão entre a vazão mássica do ar que passa pela câmara de combustão e a do ar que passa por fora dela é chamada de relação de ar secundário. Os primeiros motores comerciais com alta relação de ar secundário apresentavam um valor de 5. Aumentar a relação de ar secundário de um motor turbo-fan aumenta o empuxo. Portanto, não faz sentido remover o capot do ventilador.

28.6 Motor Pulso Jacto



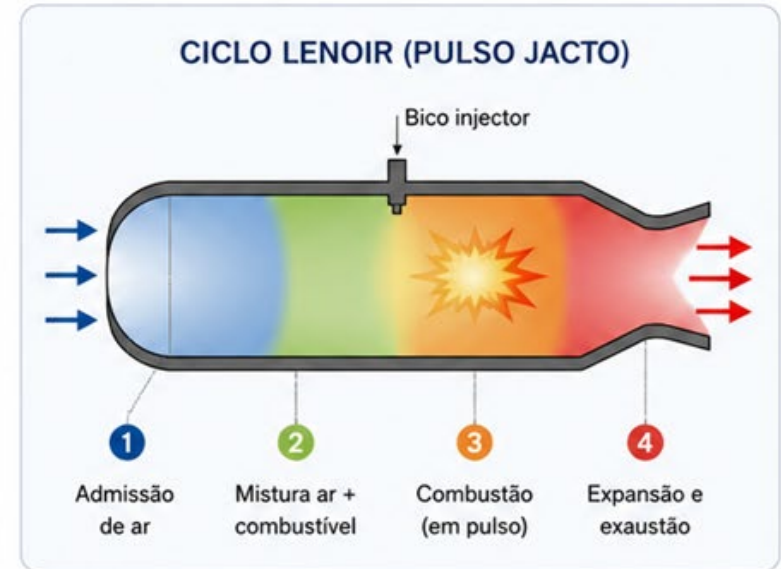
O motor pulso jacto foi inventado por **Karavodine**, em **1908**, e aperfeiçoado e patenteado pelo engenheiro alemão **Paul Schmidt**, em **1931**.



Após inúmeros testes e ajustes, em **1942** o motor, baptizado de **Schmidt-Argus**, foi utilizado nos mísseis **V-1**, sendo o precursor dos actuais mísseis de cruzeiro.



O pulso jacto funciona utilizando um processo de combustão em pulsos, ou combustão ressonante. O ciclo termodinâmico que mais se aproxima deste funcionamento é o chamado **ciclo Lenoir**: a combustão inicia com a **admissão de ar** através do difusor frontal, onde o ar se mistura com o **combustível**, que é injectado ou aspirado a partir do bico injector.



28.6 Motor Pulso Jacto

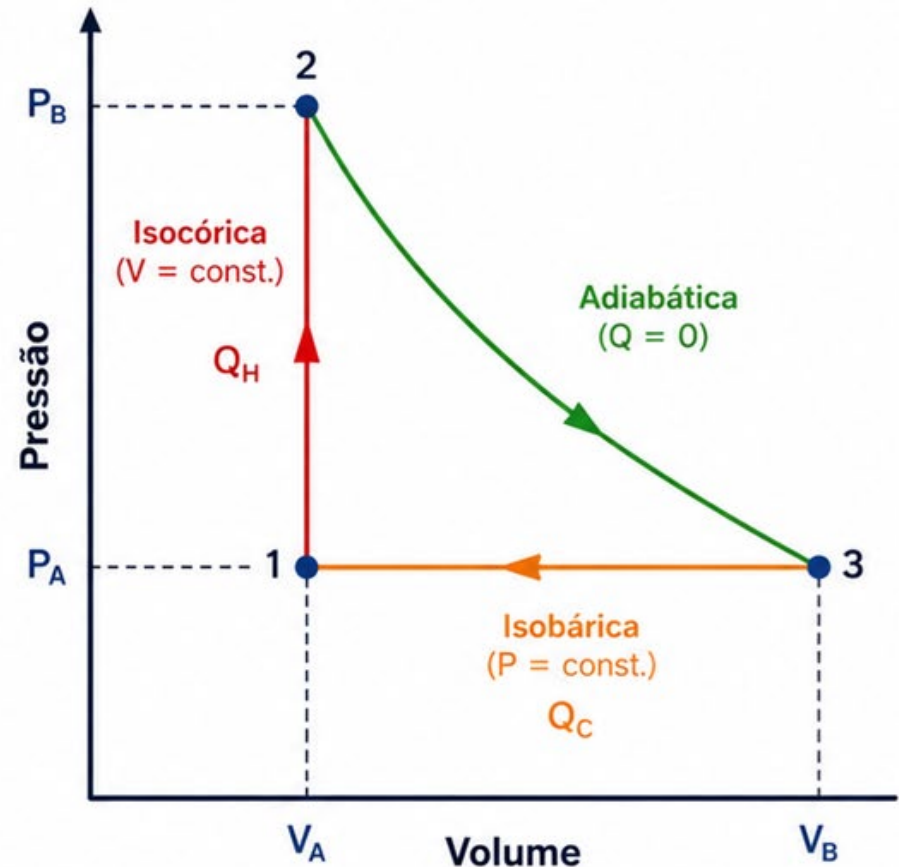
CICLO LENOIR

O ciclo Lenoir é composto por três processos termodinâmicos:

- 1 Linha isocórica (1–2)**
O calor é admitido a volume constante (aumento da pressão).
- 2 Adiabática (2–3)**
Expansão adiabática: o gás realiza trabalho e a pressão diminui.
- 3 Linha isobárica (3–1)**
Rejeição de calor a pressão constante (retorno ao estado inicial).



O calor é admitido a **volume constante** e liberto a **pressão constante**.



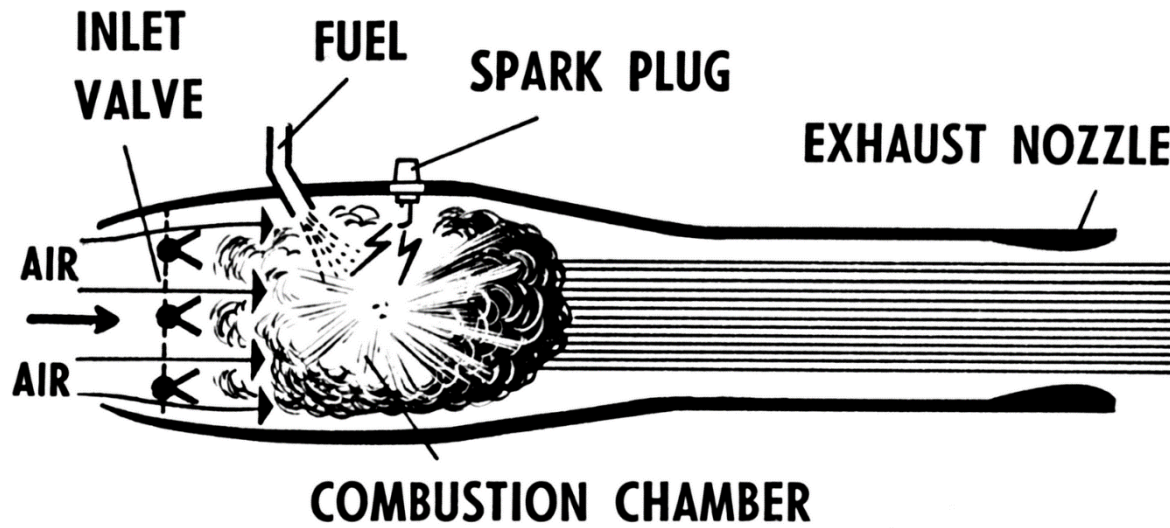
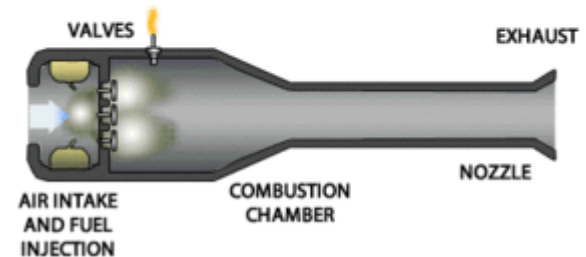
28.6 Motor Pulso Jacto

A mistura ar-combustível é admitida pela válvula e introduzida na câmara de combustão e, em contacto com a faísca eléctrica da vela (ou com as paredes já aquecidas), a mistura entra em combustão.

Devido à combustão ocorre o aumento de pressão na câmara. Com isso, a válvula “margarida” fecha-se, impedindo a entrada de ar. Os gases de combustão são então expelidos pelo tubo de escape, fazendo surgir a força propulsora.

28.6 Motor Pulso Jacto

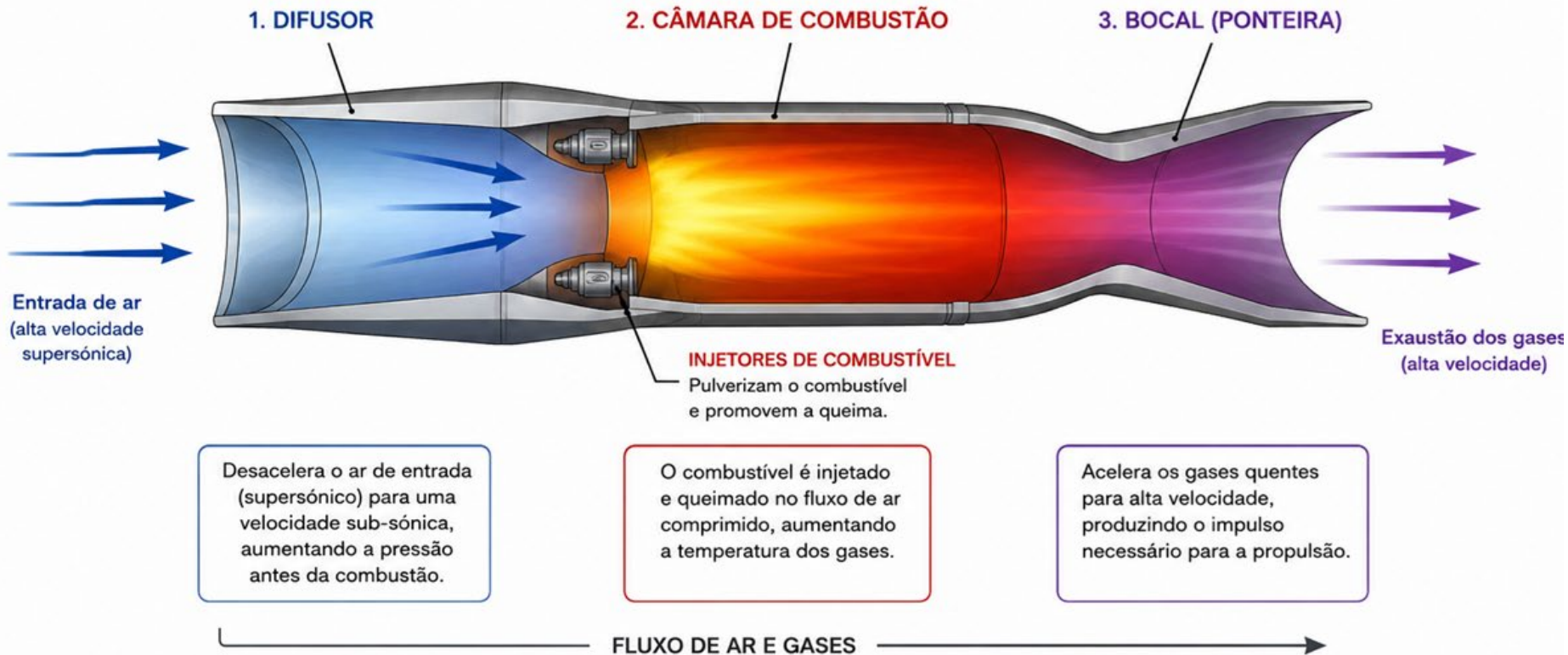
ANIMATION OF A PULSE JET ENGINE



28.7 Motor Ramjet (Estatu jacto)

Este motor consiste de um difusor, uma câmara de combustão e bocal para exaustão dos gases.

Por não possuir partes móveis tais como compressor e turbina, este motor é de manufactura mais simples em comparação aos demais motores de propulsão. Devido sua simplicidade e bom desempenho em altas velocidades, o motor Ramjet é de interesse em aplicações militares sendo muito utilizado em mísseis. Mísseis Ramjet precisam de um foguete para que a velocidade supersónica adequada de operação seja atingida de modo a se iniciar a operação do motor. A figura abaixo esquematiza alguns dos componentes principais do motor.



28.7 Motor Ramjet (Estado jacto)

Características do Motor Ramjet

O Ramjet é um motor de propulsão a jacto que utiliza a própria velocidade do veículo para comprimir o ar admitido.

A sua construção é simples, sendo constituída apenas por:

- ▶ **Difusor**
- ▶ **Câmara de combustão**
- ▶ **Bocal de exaustão**

Princípio de Funcionamento

1. O ar entra no difusor a alta velocidade.
2. A velocidade do ar é reduzida, o que aumenta a sua pressão.
3. O combustível é injectado e queimado na câmara de combustão.
4. Os gases quentes expandem-se através do bocal, produzindo empuxo.

28.7 Motor Ramjet (Estado jacto)

Limitação Operacional

O Ramjet não consegue produzir empuxo quando está parado.

Necessita de uma velocidade inicial elevada para funcionar correctamente.

Por essa razão, é normalmente acelerado por:

- ▶ um foguete auxiliar;
- ▶ outra aeronave;
- ▶ ou um sistema de lançamento.

Aplicações

- ▶ Mísseis supersónicos
- ▶ Veículos de alta velocidade
- ▶ Aplicações militares e aeroespaciais

28.7 Motor Ramjet (Estado jacto)

Desempenho

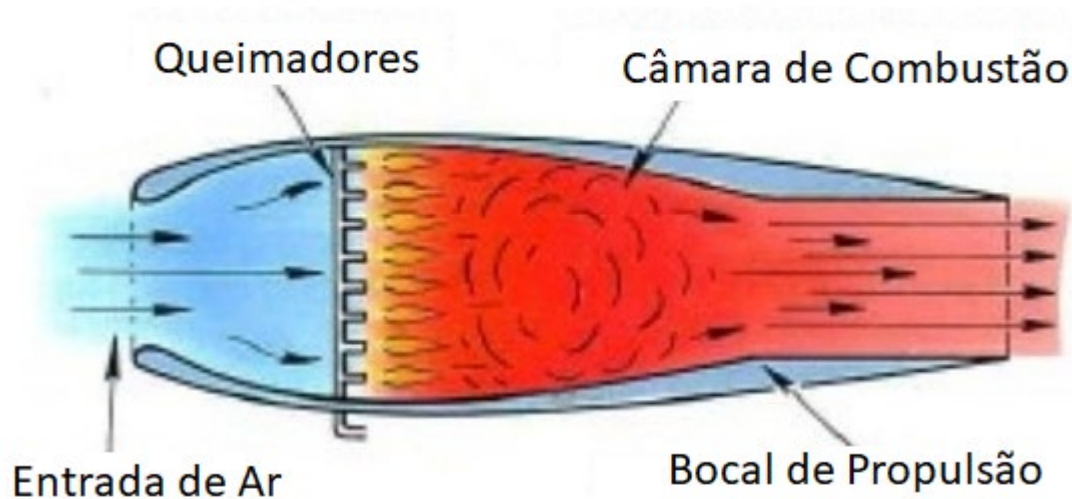
- ▶ Apresenta melhor rendimento a velocidades supersónicas.
- ▶ Opera eficientemente acima de **Mach 2 a Mach 3**.
- ▶ É especialmente adequado para voos de alta velocidade e aplicações militares.

Vantagens

- ▶ ✓ Construção simples
- ▶ ✓ Baixo peso
- ▶ ✓ Poucas partes móveis
- ▶ ✓ Elevado desempenho em velocidades supersónicas

28.7 Motor Ramjet (Estatu jacto)

Motor Ram Jet

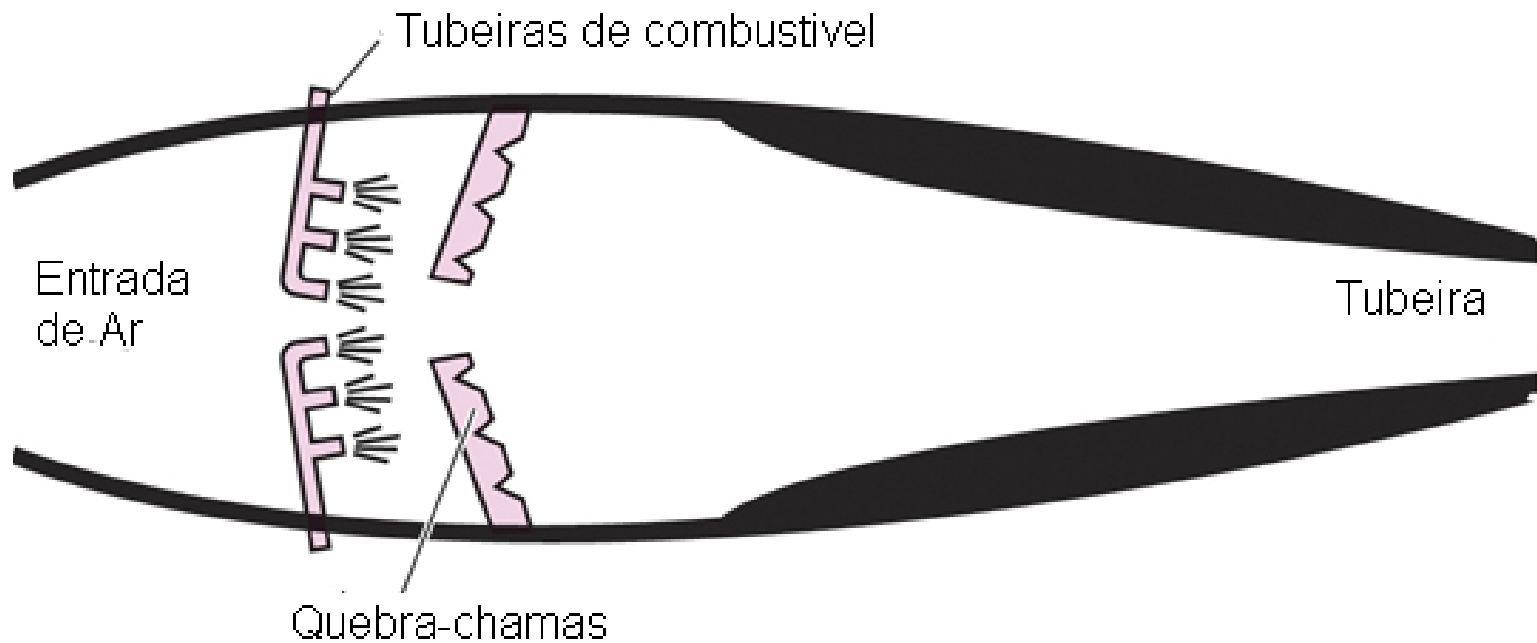


28.7 Motor Ramjet (Estatu jacto)

Os Ramjets geralmente não são capazes de gerar impulso útil com pressões geradas a velocidades de aproximadamente metade da velocidade do som e são ineficientes até que a velocidade aerodinâmica exceda 1000 km/h.

Mesmo acima da velocidade mínima necessária, vários factores podem determinar a eficiência do Ramjet, como, por exemplo, a altitude do voo.

28.7 Motor Ramjet (Estado jacto)



28.8 Motor Scramjet

Conceito

- ▶ O **Scramjet (Supersonic Combustion Ramjet)** é uma evolução do motor Ramjet, concebida para operar a velocidades hipersónicas.

Princípio de Funcionamento

- ▶ O ar admitido é comprimido pela própria velocidade de voo da aeronave.
- ▶ Ao contrário do Ramjet, o escoamento do ar mantém-se **supersónico** no interior da câmara de combustão.
- ▶ O combustível é injectado e queimado enquanto o ar continua a deslocar-se a velocidades superiores à do som.
- ▶ Os gases resultantes da combustão expandem-se na tubeira, gerando empuxo.

Características

- ▶ Não possui compressor nem turbina.
- ▶ Estrutura mecânica simples e leve.
- ▶ Adequado para velocidades extremamente elevadas.

28.8 Motor Scramjet

Faixa de Operação

- ▶ Funciona eficientemente a velocidades superiores a **Mach 5**.
- ▶ Os protótipos actuais têm demonstrado sucesso em ensaios entre **Mach 6 e Mach 8**.
- ▶ É considerado uma das tecnologias mais promissoras para veículos hipersónicos.

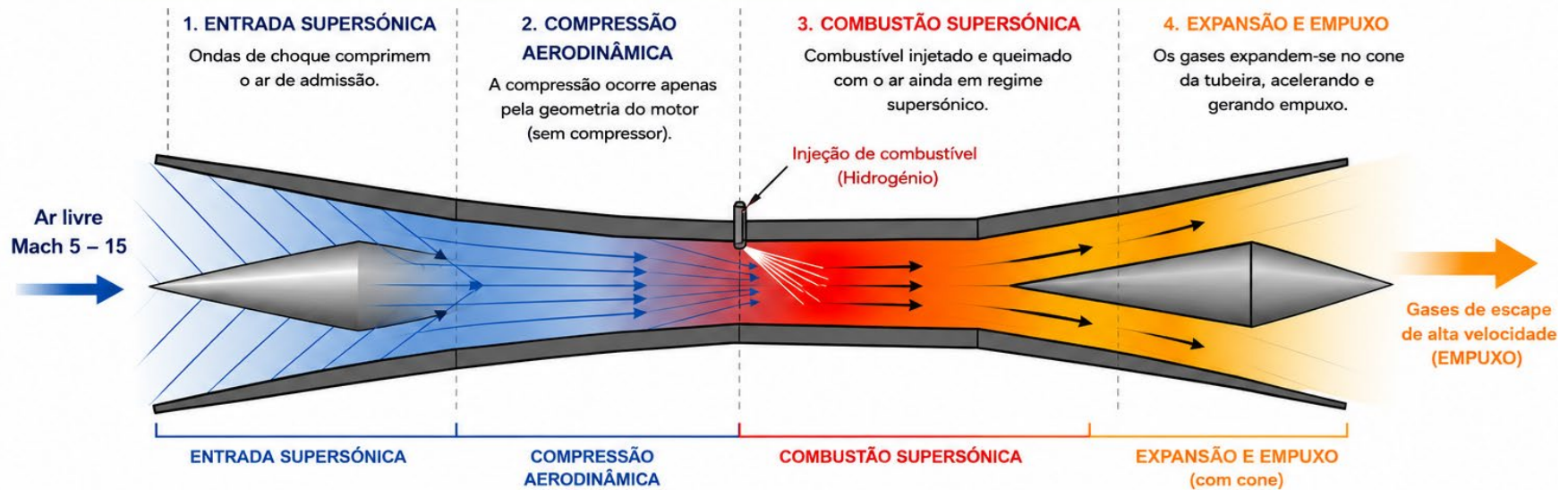
Aplicações

- ▶ Mísseis hipersónicos
- ▶ Veículos aeroespaciais avançados
- ▶ Transporte de alta velocidade
- ▶ Acesso ao espaço com sistemas de lançamento reutilizáveis

O Scramjet é um Ramjet de combustão supersónica, capaz de operar a velocidades hipersónicas sem recorrer a compressores ou turbinas.

28.8 Motor Scramjet

O **Scramjet (Supersonic Combustion Ramjet)** é um motor hipersônico. Usa a velocidade da aeronave para comprimir o ar; a combustão ocorre com o escoamento ainda supersônico, permitindo velocidades superiores a Mach 5.



SCRAMJET vs RAMJET

RAMJET

- Combustão SUBSÔNICA ($M < 1$)
- Adequado para Mach 4 - 5
- Menor temperatura



Combustão SUBSÔNICA

SCRAMJET

- Combustão SUPERSÔNICA ($M > 1$)
- Adequado para Mach > 5
- Maiores temperatura e eficiência



Combustão SUPERSÔNICA

CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS

- Operação hipersônica (Mach 5 - 15+)
- Compressão apenas pela geometria (sem partes móveis)
- Combustão em regime supersônico
- Elevado empuxo específico em altas velocidades



O Scramjet não consegue operar a partir do repouso (necessita de ser acelerado a Mach 3 - 5 por outro meio, como um foguete ou turbojato).

28.9 Pós Combustor (Afterburner)

Conceito

- ▶ O pós-combustor é um dispositivo instalado entre a turbina e a tubeira de escape dos motores turbojacto e turbofan militares, destinado a aumentar temporariamente o empuxo do motor.

Princípio de Funcionamento

- ▶ Após a passagem pela turbina, os gases de escape ainda contêm oxigénio disponível para combustão.
- ▶ Quando é necessário um impulso adicional, combustível é injectado na secção de pós-combustão.
- ▶ A combustão suplementar aumenta significativamente a temperatura e a energia dos gases.
- ▶ Os gases expandem-se na tubeira a uma velocidade mais elevada, produzindo maior empuxo.

28.9 Pós Combustor (Afterburner)

Aplicações

- ▶ Descolagens curtas
- ▶ Intercepção de aeronaves
- ▶ Combate aéreo
- ▶ Voos supersónicos

Vantagens

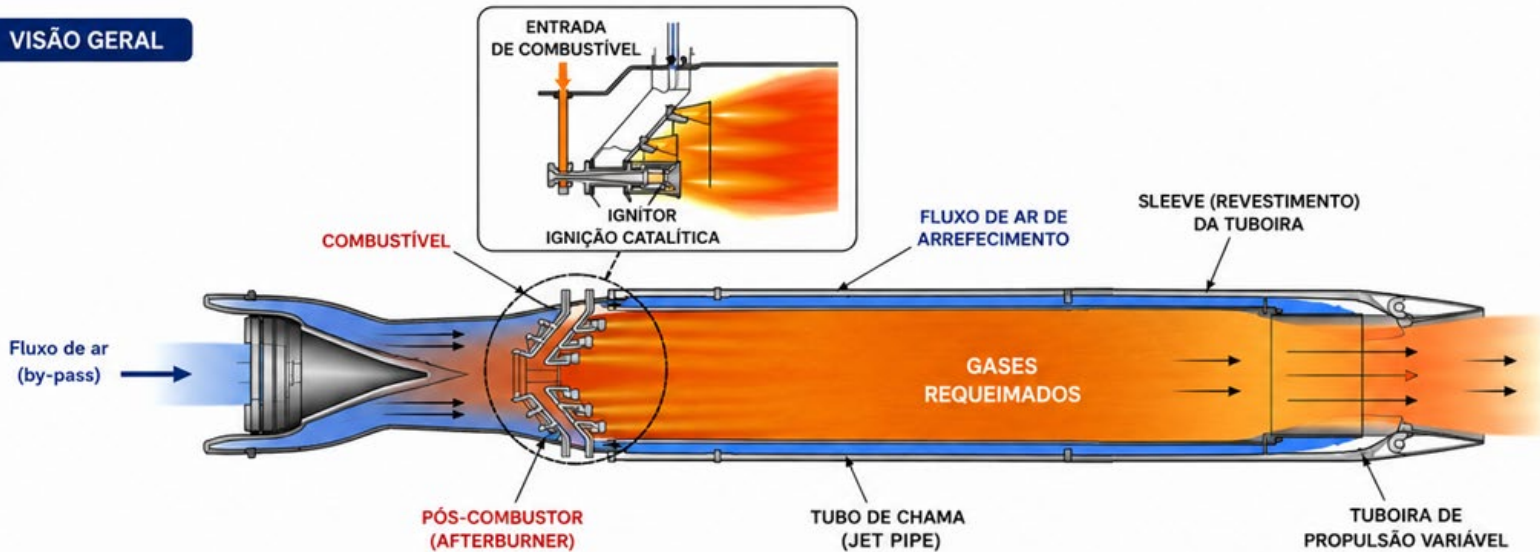
- ▶ ✓ Aumento rápido do empuxo
- ▶ ✓ Melhor aceleração da aeronave
- ▶ ✓ Possibilidade de atingir velocidades supersónicas

Limitações

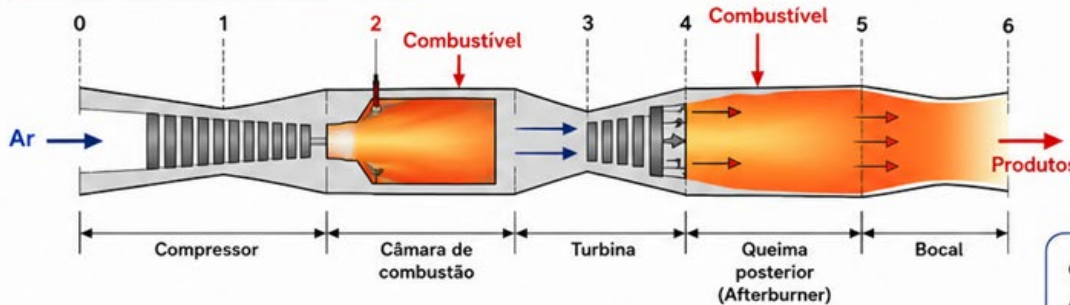
- ▶ ✗ Elevado consumo de combustível
- ▶ ✗ Maior emissão de calor e ruído
- ▶ ✗ Utilização limitada a períodos curtos

28.9 Pós Combustor (Afterburner)

VISÃO GERAL



ESQUEMA FUNCIONAL (SECCÕES)



0 Entrada de ar

1 Compressão do ar

2 Entrada de combustível – câmara de combustão

3 Saída dos gases para a turbina

4 Entrada de combustível – pós-combustor (afterburner)

5 Gases requeimados

6 Saída dos gases – bocal de propulsão

PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

O **combustível adicional** é injectado na secção de pós-combustão. A combustão suplementar **aumenta a temperatura e a energia** dos gases. Os gases saem a **maior velocidade** , produzindo **maior empuxo** .

UTILIZAÇÃO TÍPICA

- Descolagens curtas
- Combate aéreo
- Intercepção
- Voos supersónicos

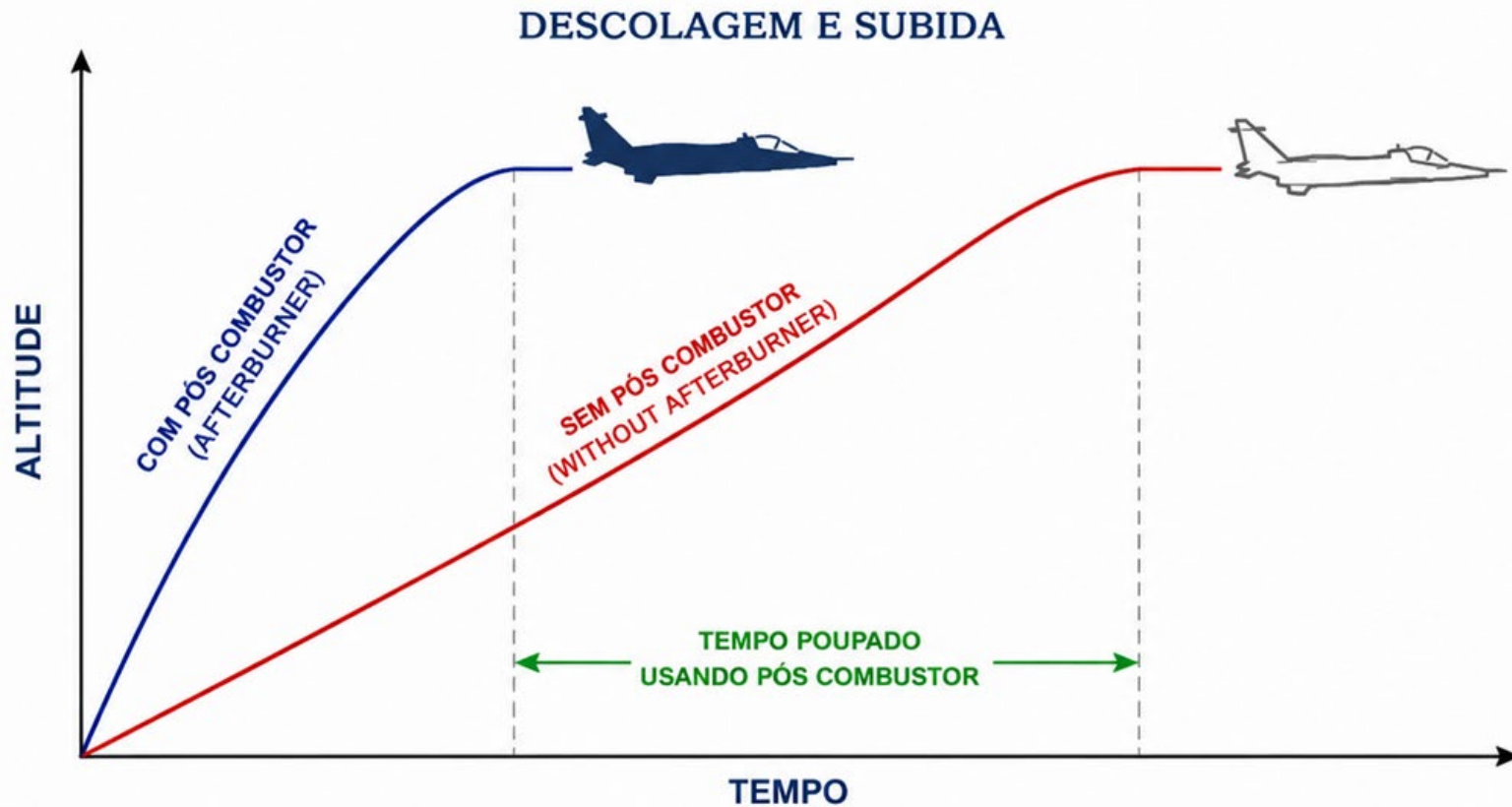
VANTAGENS

- ✓ Aumento rápido do empuxo
- ✓ Melhor aceleração
- ✓ Permite atingir velocidades supersónicas

LIMITAÇÕES

- × Elevado consumo de combustível
- × Maior emissão de calor e ruído
- × Utilização limitada a períodos curtos

28.9 Pós Combustor (Afterburner)



COM PÓS COMBUSTOR

- Subida mais rápida
- Alcança a altitude desejada em menos tempo
- Maior consumo de combustível
- Usado para descolagem e subida

SEM PÓS COMBUSTOR

- Subida mais lenta
- Demora mais tempo para alcançar a altitude
- Menor consumo de combustível
- Usado para voo cruzeiro (mais eficiente)

NOTA: O pós combustor (afterburner) fornece empuxo adicional para descolagem e subida rápida. Uma vez atingida a altitude desejada, é desligado para economizar combustível.

28.10 Eficiência Propulsiva em Função da Velocidade (Número de Mach)

A eficiência propulsiva dos diferentes motores aeronáuticos varia significativamente com a velocidade de voo. Por essa razão, cada tipo de motor apresenta uma faixa de operação na qual o seu desempenho é maximizado.

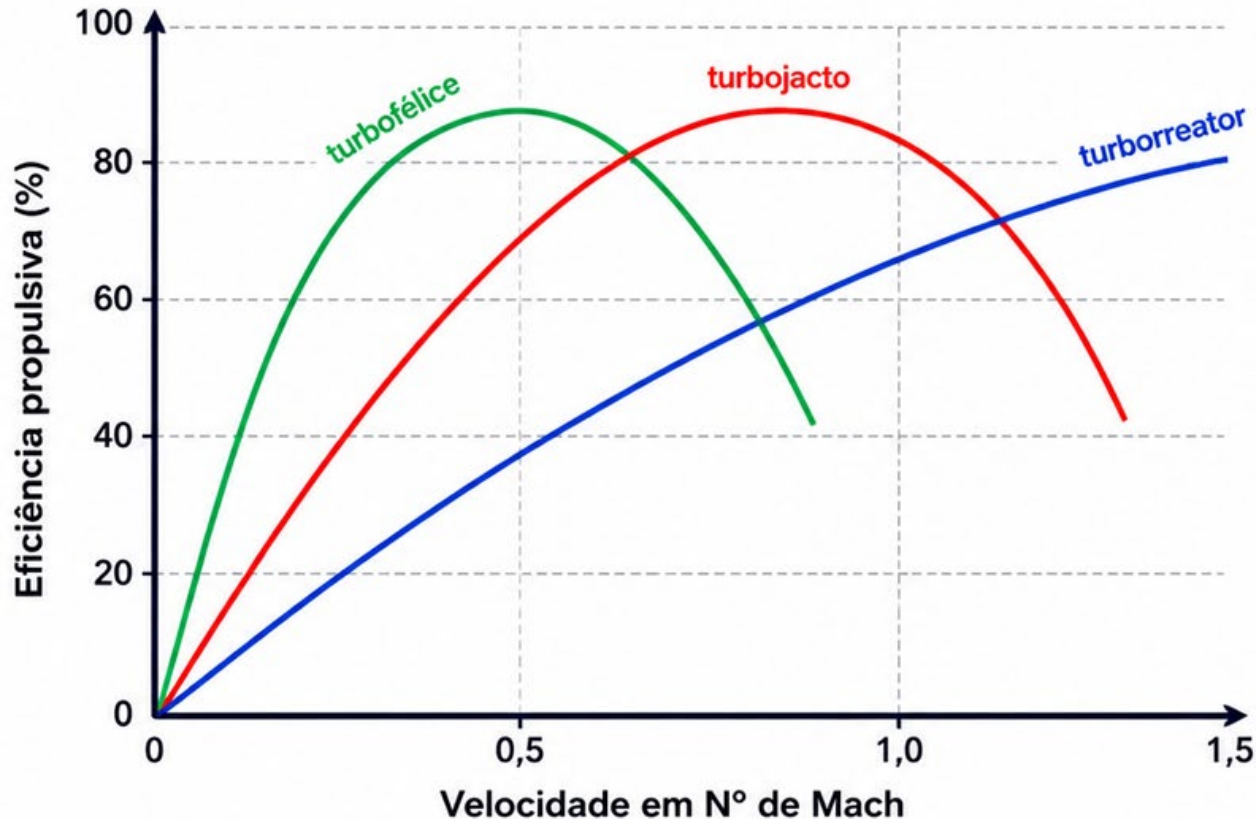
O **turbo-hélice** apresenta a maior eficiência em baixas velocidades, atingindo o seu desempenho óptimo em torno de **Mach 0,5**. À medida que a velocidade aumenta, a eficiência diminui devido aos efeitos de compressibilidade nas pás da hélice.

O **turbojacto** é mais adequado para velocidades intermédias, apresentando a sua eficiência máxima entre **Mach 0,6 e Mach 1,0**. Acima desta faixa, a sua eficiência propulsiva começa a diminuir gradualmente.

O **turborreator (ramjet/scramjet)** torna-se mais eficiente em velocidades elevadas, especialmente em regime supersónico. A sua eficiência aumenta com a velocidade, sendo particularmente adequado para voos acima de **Mach 1**.

28.10 Eficiência Propulsiva em Função da Velocidade (Número de Mach)

EFICIÊNCIA PROPULSIVA vs. VELOCIDADE (Nº DE MACH)



TURBOFÉLICE

- Alta eficiência em baixas velocidades
- Desempenho ótimo até ~ Mach 0,5
- Eficiência decresce rapidamente em velocidades supersônicas

TURBOJACTO

- Boa eficiência em velocidades médias
- Desempenho ótimo entre ~ Mach 0,6 e Mach 1,0
- Eficiência reduz-se em velocidades mais elevadas

TURBORREATOR

- Eficiência aumenta com a velocidade
- Melhor desempenho em velocidades elevadas e supersônicas
- Adequado para Mach > 1



IDEIA PRINCIPAL

Cada tipo de motor tem uma faixa de velocidade onde apresenta a máxima eficiência propulsiva. A escolha do motor depende da velocidade de operação desejada da aeronave.