

Motores Térmicos

8° Semestre

4° ano

Aula 25 – Turbinas a Gás - Tópicos

Introdução

Ciclo-padrão de Brayton

Princípio de Funcionamento

Classificação das Turbinas

Turbinas Turbofan

Câmara de Combustão

Compressores

25.1 Introdução



As turbinas a gás são motores térmicos que realizam a **conversão da energia de um combustível** em **potência de propulsão**, **potência de eixo** ou **potência eléctrica**.



Por serem máquinas de combustão interna realizam o processo de conversão da energia do combustível a **altas temperaturas**, começando com temperaturas da ordem de **1000° C** e terminando em temperaturas próximas de **500° C**.



A maior parcela da energia do combustível que não é aproveitada encontra-se nos **gases de exaustão** ainda a **altas temperaturas**.



IDEIA-CHAVE

O desafio das turbinas a gás é aumentar o aproveitamento da energia do combustível, reduzindo as perdas nos gases de exaustão.

25.1 Introdução



O uso da turbina a gás como **máquina motora** tem sido um sonho bastante antigo dos Engenheiros. A evidência disto é a **grande quantidade de estudos** no decorrer da história.



Em **150 A.C.**, um filósofo e matemático egípcio, **Hero**, inventou um brinquedo, o **“Aeolipile”**, que rodava sobre uma pequena caldeira de água.



Ele verificou o efeito da **reação do ar quente** ou o **vapor** movimentado por alguns bocais sobre uma roda.

AEOLIPILE DE HERO



Um dos primeiros registros do princípio da reação a jacto aplicado ao movimento rotativo.



IDEIA-CHAVE

Desde a antiguidade, mentes curiosas exploram o poder do ar quente e do vapor. O progresso nasce da observação, da experimentação e da vontade de transformar ideias em movimento.

25.1 Introdução



Em 1232, os chineses começaram a utilizar foguetes como armas.

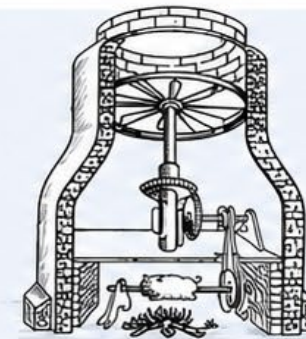
A pólvora que é uma mistura de salitre, enxofre e carvão usa o princípio da reacção para lançar foguetes.



Utilização de foguetes na China antiga.



Em 1500, **Leonardo da Vinci** desenhou um esboço de um dispositivo, o “macaco de chaminé”, que através do efeito dos gases quentes que saiam pela chaminé girava um espeto.



Esboço do “macaco de chaminé”.



IDEIA-CHAVE

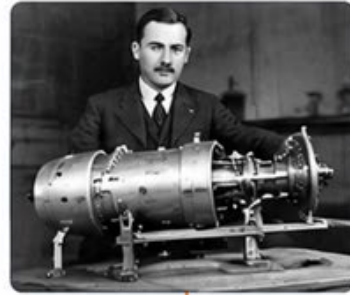
Da pólvora aos primeiros dispositivos movidos pelo calor, a humanidade tem explorado a energia dos gases para criar movimento e transformar o mundo.

25.2 Evolução Histórica das Turbinas



150 a.C.

Heron de Alexandria
Primeiros conceitos de propulsão por reacção.



1930

Frank Whittle
Desenvolvimento do primeiro turbojacto funcional.



1939

Hans von Ohain
Primeiro voo de aeronave a jacto.



1950-1970

Expansão da Aviação Comercial
Introdução dos motores turbofan.



Actualidade

- Alta eficiência térmica
- Sistemas híbridos
- Combustíveis sustentáveis
- Turbinas industriais avançadas

APLICAÇÕES MODERNAS



Aviação Comercial



Centrais Eléctricas



Propulsão Naval



Turbinas Industriais

25.3 Ciclo-padrão de Brayton

O ciclo-padrão de Brayton é um ciclo termodinâmico que consiste em **dois processos de pressão constante**, intercalados por **dois processos de entropia constante**.

1



Compressão isentrópica (1 → 2)

O ar em condição ambiente passa pelo compressor, onde ocorre uma **compressão** adiabática e isentrópica, com aumento da temperatura e conseqüente aumento de entalpia.

2



Adição de calor a pressão constante (2 → 3)

O ar comprimido é direcionado às câmaras, onde mistura-se com o combustível possibilitando a **queima** e o **aquecimento**, à pressão constante.

3



Expansão isentrópica (3 → 4)

Ao sair da câmara de combustão, os gases, à alta pressão e temperatura, se expandem conforme passam pela **turbina**, idealmente sem variação de entropia.

4



Rejeição de calor a pressão constante (4 → 1)

Finalmente, os gases são **descarregados** para a atmosfera, à pressão constante, fechando o ciclo.



IDEIA-CHAVE

O ciclo de Brayton descreve o funcionamento ideal das turbinas a gás, convertendo a energia térmica do combustível em trabalho útil.

ESQUEMA DO CICLO DE BRAYTON

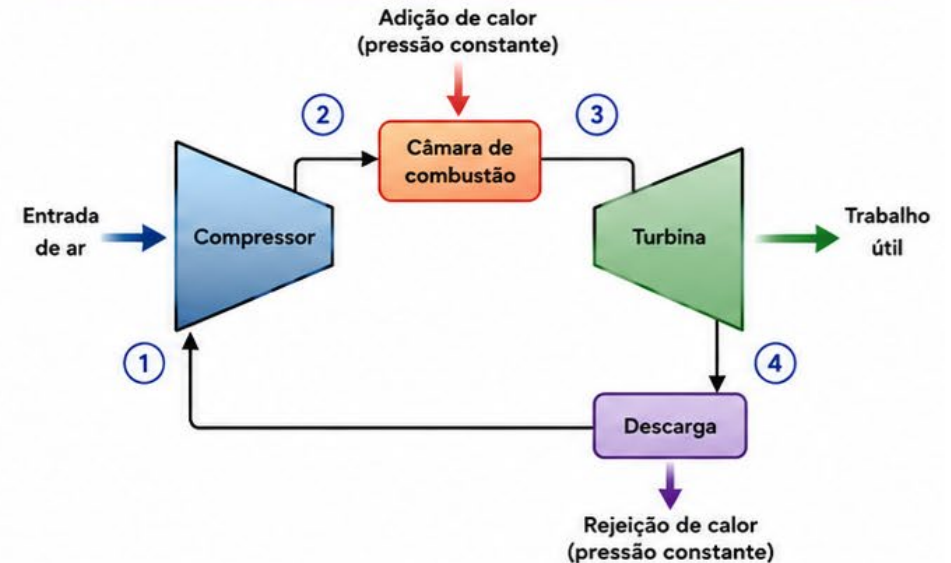


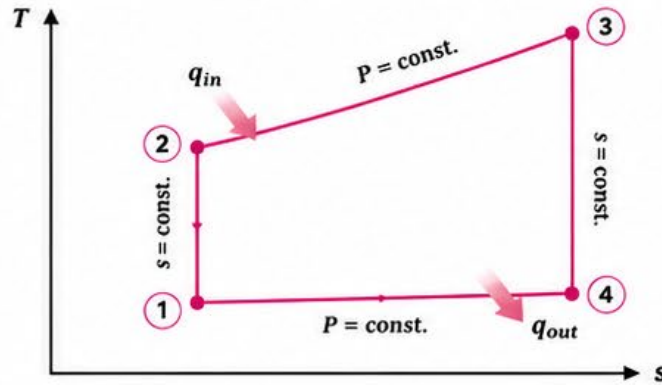
DIAGRAMA T-s (TEMPERATURA vs. ENTROPIA)



25.3 Ciclo-padrão de Brayton

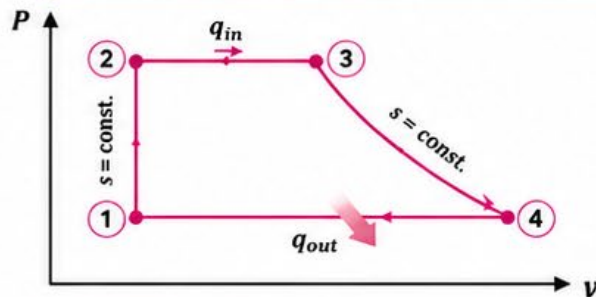
O ciclo-padrão de Brayton (ou ciclo de Joule) é o **ciclo termodinâmico** que representa o **funcionamento ideal das turbinas a gás**.

DIAGRAMA $T-s$ (TEMPERATURA vs. ENTROPIA)



- 1 → 2 Compressão isentrópica
- 2 → 3 Adição de calor (pressão constante)
- 3 → 4 Expansão isentrópica
- 4 → 1 Rejeição de calor (pressão constante)

DIAGRAMA $P-v$ (PRESSÃO vs. VOLUME)



Processos do ciclo:

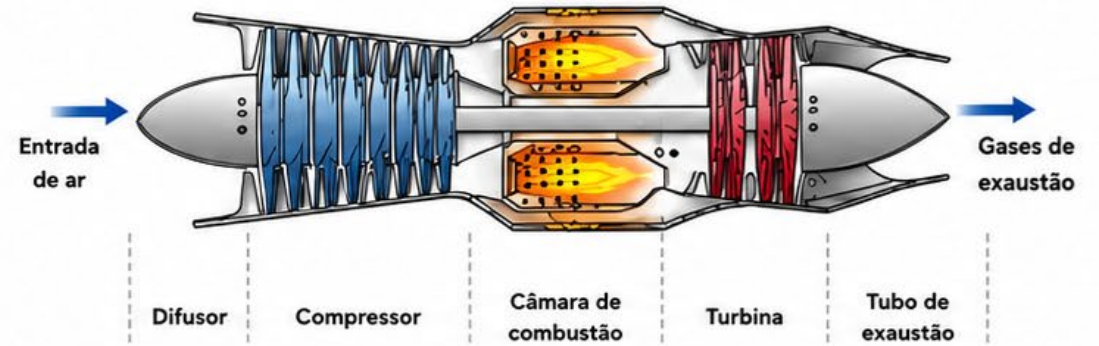
- 1 → 2 Compressão isentrópica
- 2 → 3 Adição de calor (pressão constante)
- 3 → 4 Expansão isentrópica
- 4 → 1 Rejeição de calor (pressão constante)



IDEIA-CHAVE

O ciclo de Brayton converte a energia térmica em trabalho útil através da compressão do ar, da adição de calor na câmara de combustão e da expansão dos gases na turbina, rejeitando o calor remanescente para a atmosfera.

ESQUEMA DE UMA TURBINA A GÁS (CICLO ABERTO)



Função do compressor: comprime o ar, aumentando sua pressão e temperatura.



Função da câmara de combustão: adiciona calor ao ar comprimido através da queima do combustível, à pressão aproximadamente constante.



Função da turbina: os gases quentes se expandem, produzindo trabalho útil no eixo.



Função do tubo de exaustão: direciona os gases para a atmosfera.

25.4 Eficiência Térmica do Ciclo de Brayton

CICLO DE BRAYTON IDEAL

A eficiência térmica ideal do ciclo de Brayton depende apenas da razão de pressão do compressor.

$$\eta_{th,Brayton} = 1 - \frac{1}{r_p^{(\gamma-1)/\gamma}}$$

onde:

$$r_p = \frac{p_2}{p_1} \text{ - razão de pressão}$$

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} \text{ - razão dos calores específicos}$$

(para o ar, $\gamma \approx 1,4$)

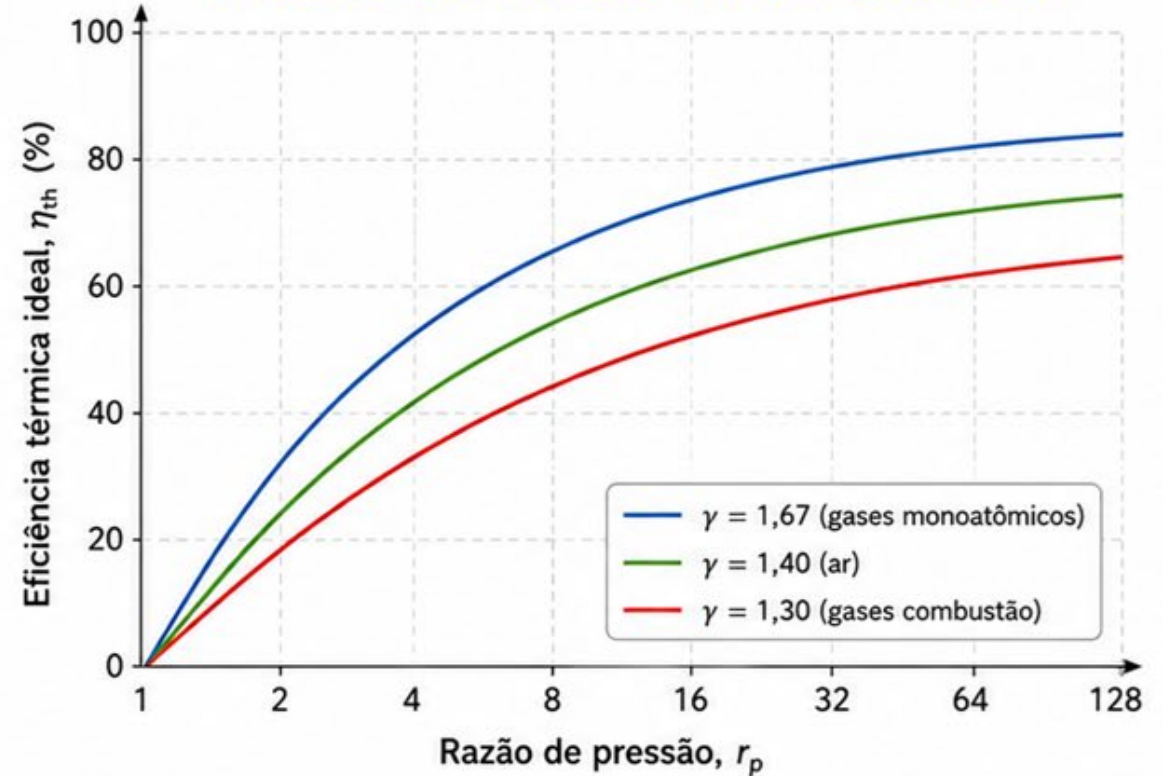
CONCLUSÕES IMPORTANTES

- A eficiência aumenta com o aumento da razão de pressão (r_p).
- Para valores muito altos de r_p , o ganho de eficiência diminui.
- A eficiência é limitada pela temperatura máxima admissível (T_{max}) e pelas perdas reais do ciclo.

EXEMPLO NUMÉRICO (ar, $\gamma = 1,4$)

Razão de pressão (r_p)	2	4	8	16	32
Eficiência térmica ideal (%)	27,0	40,2	52,8	63,1	70,0

EFICIÊNCIA TÉRMICA IDEAL vs RAZÃO DE PRESSÃO



LIMITAÇÕES PRÁTICAS

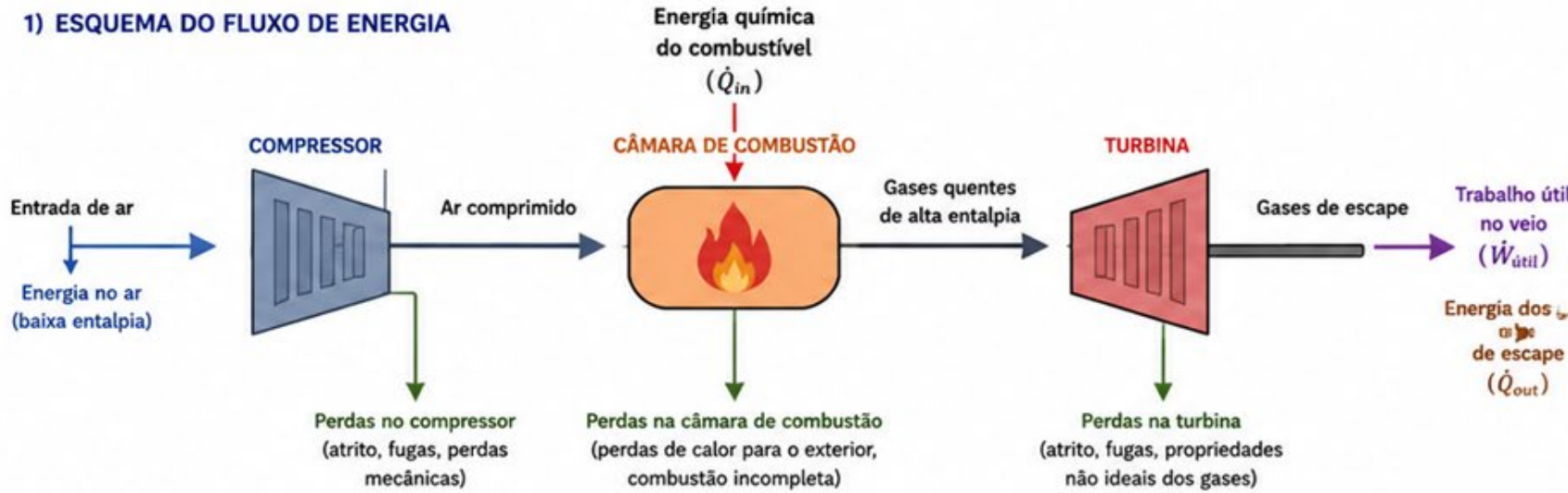
- Temperatura máxima na turbina (materiais) $\sim 1400 - 1700$ K
- Aumento da razão de pressão \rightarrow maior trabalho do compressor
- Perdas reais reduzem a eficiência do ciclo real



25.5 Fluxo de Energia Numa Turbina a Gás

Numa turbina a gás, a energia química do combustível é convertida em energia útil (trabalho no veio) e em energia rejeitada, principalmente na forma de calor nos gases de escape e em perdas internas.

1) ESQUEMA DO FLUXO DE ENERGIA



2) BALANÇO DE ENERGIA GLOBAL

Balanço (regime permanente):

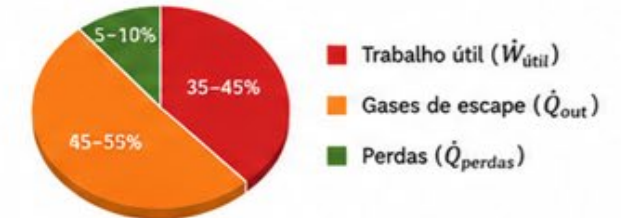
$$\dot{Q}_{in} = \dot{W}_{útil} + \dot{Q}_{out} + \dot{Q}_{perdas}$$

com:

$$\dot{Q}_{perdas} = \dot{Q}_{comp} + \dot{Q}_{cc} + \dot{Q}_{turb} + \dot{Q}_{mec}$$

\dot{Q}_{comp}	perdas no compressor
\dot{Q}_{cc}	perdas na câmara de combustão
\dot{Q}_{turb}	perdas na turbina
\dot{Q}_{mec}	perdas mecânicas (apoios, transmissões, etc.)

3) DISTRIBUIÇÃO TÍPICA DA ENERGIA (VALORES INDICATIVOS)



A maior parcela da energia do combustível deixa a máquina nos gases de escape.

LEGENDA

\dot{Q}_{in}	taxa de calor adicionado (energia do combustível)
$\dot{W}_{útil}$	taxa de trabalho útil no veio
\dot{Q}_{out}	taxa de calor rejeitado nos gases de escape
\dot{Q}_{perdas}	taxa de perdas internas
$\dot{E}x_{comb}$	exergia do combustível

4) EFICIÊNCIAS

- Eficiência térmica:

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_{útil}}{\dot{Q}_{in}}$$

Relação entre o trabalho útil produzido e a energia química fornecida.

- Eficiência exergética:

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{W}_{útil}}{\dot{E}x_{comb}}$$

Relação entre o trabalho útil produzido e a exergia do combustível.

5) PRINCIPAIS CONCLUSÕES

- A turbina converte apenas uma fração da energia do combustível em trabalho útil.
- A redução da temperatura dos gases de escape e das perdas internas aumenta a eficiência.
- O projeto visa maximizar $\dot{W}_{útil}$ e minimizar \dot{Q}_{out} e \dot{Q}_{perdas} .
- A recuperação de calor dos gases de escape (ciclos combinados) pode aumentar significativamente a eficiência global.

25.6 Tipos de câmara de combustão



TEXTO

A câmara de combustão é o componente onde o combustível é misturado com o ar comprimido e queimado de forma estável.

As três configurações principais usadas em turbinas a gás são: **Can**, **Can-annular** e **Annular**.



COMPARAÇÃO RÁPIDA

Nº de câmaras	Muitas	Muitas	1
Complexidade	Alta	Média	Baixa
Distribuição de temperatura	Muito boa	Boa	Excelente
Dimensão / peso	Maior	Médio	Menor



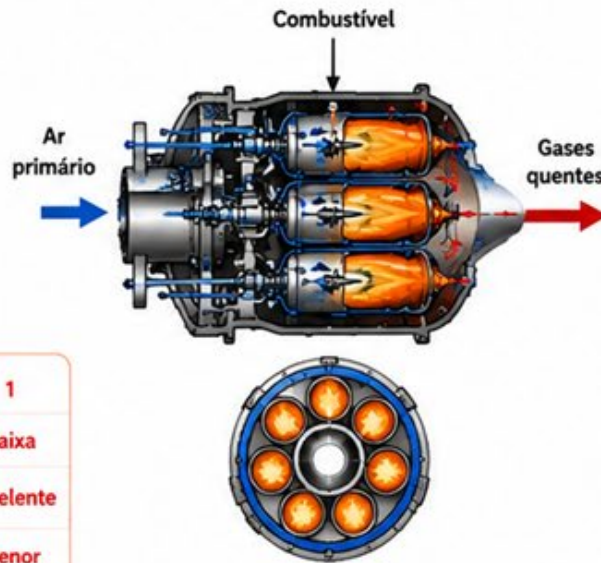
IDEIA PRINCIPAL

Quanto maior e mais uniforme for a mistura e a distribuição da combustão, menores são os picos de temperatura e maiores são a eficiência e a vida útil dos componentes.

CONFIGURAÇÕES

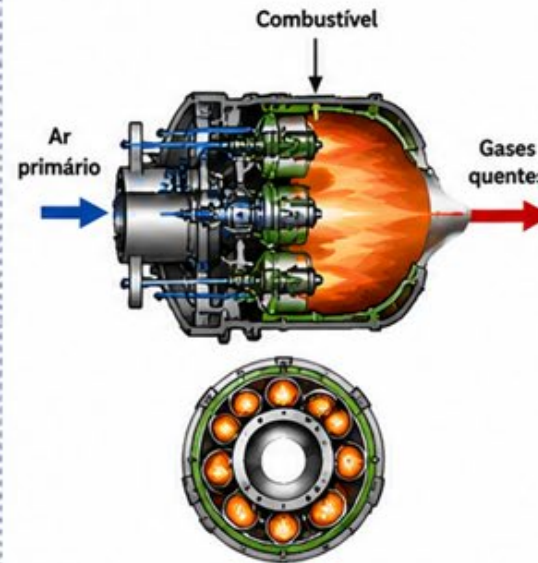
1) CAN

Várias câmaras tipo "lata"



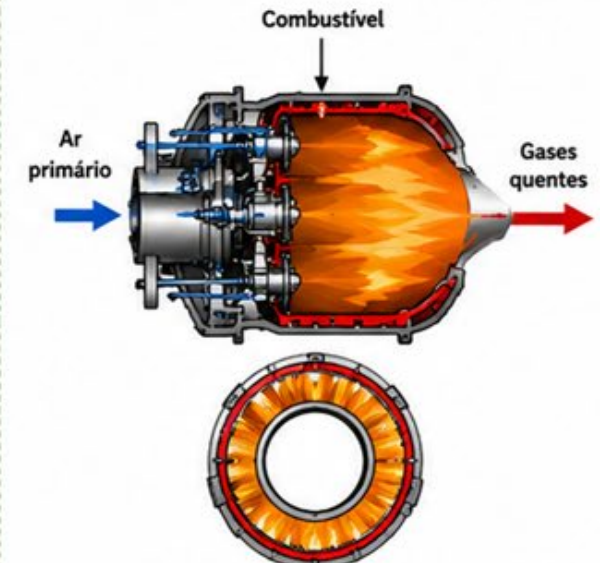
2) CAN-ANNULAR

Várias câmaras dispostas num anel



3) ANNULAR

Uma câmara anular única



VISUAL



25.7 Princípio de Funcionamento das Turbinas (I)

Normalmente denomina-se **Turbina a Gás (TG)** o conjunto completo do motor, ou a instalação da mesma que é composta dos seguintes componentes principais:



1. Compressor

Responsável pela elevação de pressão do ar que entra no sistema.



2. Aquecedor (câmara de combustão)

Adiciona calor ao fluido de trabalho por meio da queima do combustível, a pressão aproximadamente constante.



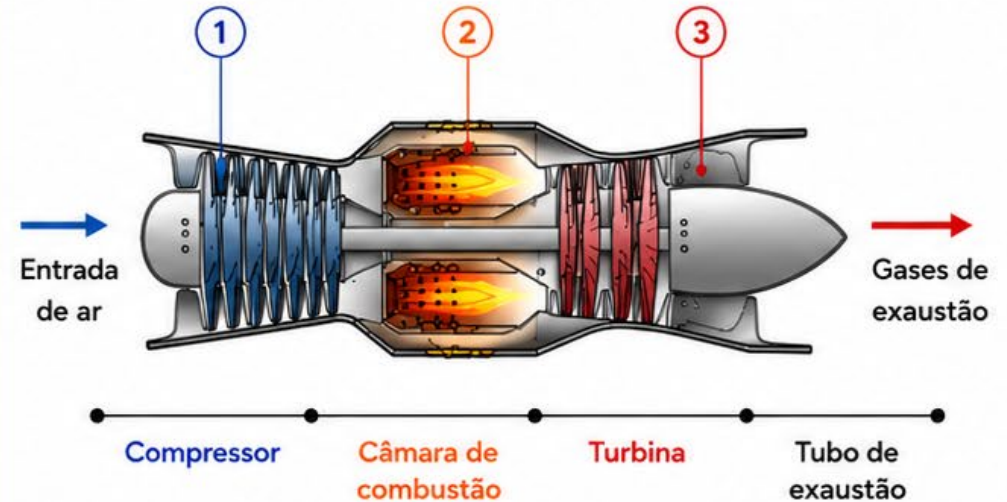
3. Turbina (elemento expensor)

Os gases em alta temperatura e pressão se expandem, convertendo energia térmica em energia mecânica (trabalho).



A turbina é a **única parte do sistema** (conjunto) em que o fluido de trabalho sofre a expansão que é, por ela, transformada em energia ou trabalho mecânico.

ESQUEMA DE UMA TURBINA A GÁS (CICLO ABERTO)



① **Compressor:** comprime o ar, aumentando sua pressão e temperatura.

② **Câmara de combustão:** adiciona calor ao ar comprimido através da queima do combustível, a pressão aproximadamente constante.

③ **Turbina:** os gases quentes se expandem, produzindo trabalho útil no eixo.

Tubo de exaustão: direciona os gases para a atmosfera.

25.7 Princípio de Funcionamento das Turbinas (II)

As partes básicas de uma **turbina a gás** são:



1 Compressor

Aspira o ar do ambiente e comprime-o, aumentando a sua pressão e temperatura.



2 Câmara de combustão

Mistura o ar comprimido com o combustível e promove a combustão, adicionando energia ao fluido.



3 Turbina

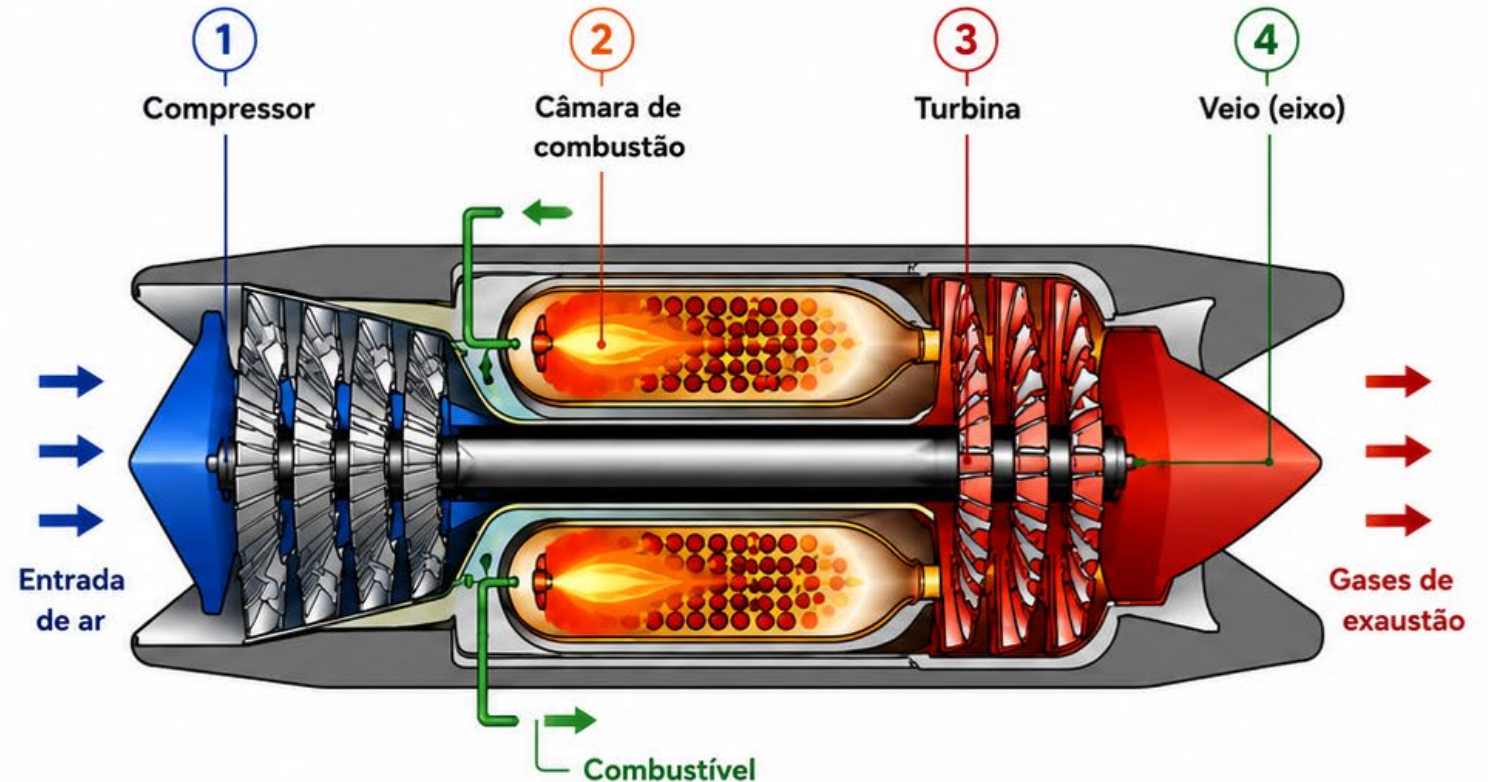
Os gases quentes e a alta pressão expandem-se através da turbina, produzindo trabalho mecânico no eixo.



4 Veio (eixo)

Liga a turbina ao compressor, de modo que, quando um gira, o outro também gira.

ESQUEMA DE UMA TURBINA A GÁS



O veio liga a turbina ao compressor, sendo assim, **quando um gira, o outro também gira.**

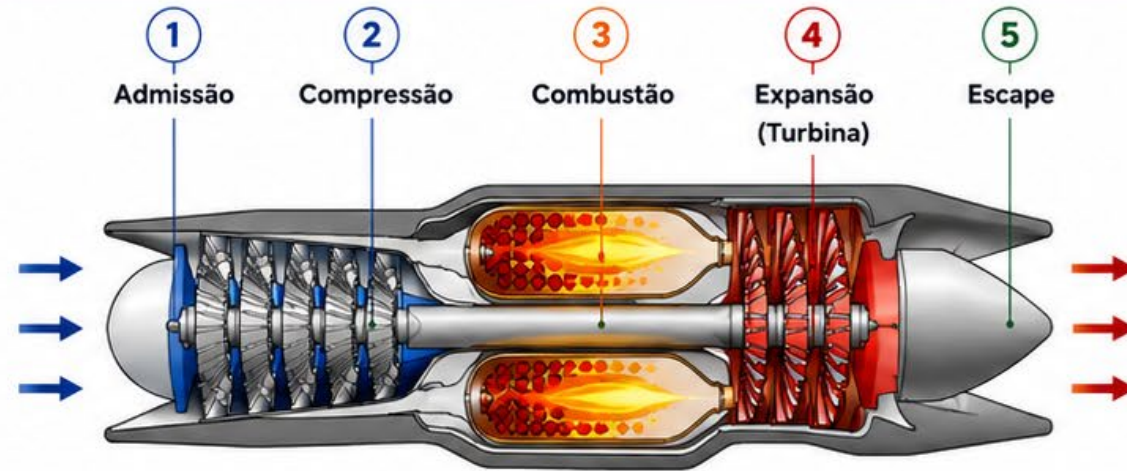
25.7 Princípio de Funcionamento das Turbinas (III)

Comparando a turbina com o motor de combustão interna



TURBINA A GÁS

Funciona de forma contínua (eixo rotativo), com fluxo de ar constante através dos componentes.

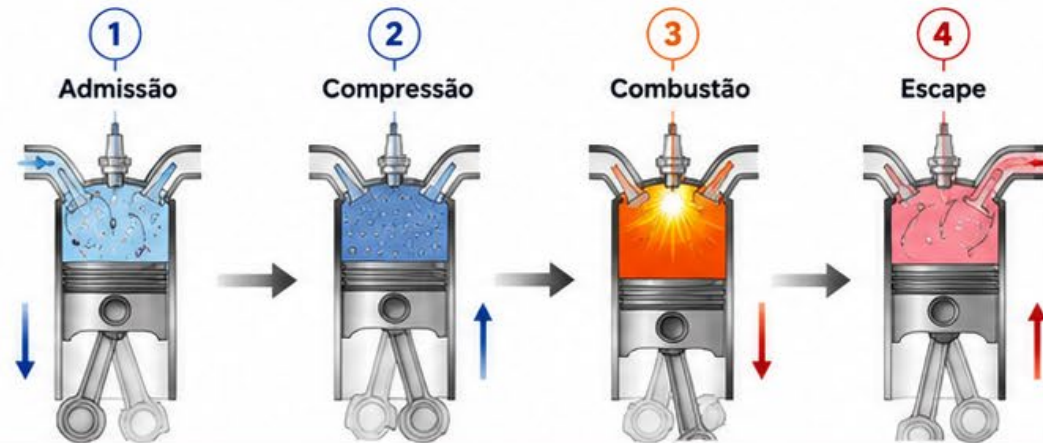


- 1 **Admissão:** o ar entra no compressor.
- 2 **Compressão:** o ar é comprimido, aumentando pressão e temperatura.
- 3 **Combustão:** combustível é queimado na câmara de combustão.
- 4 **Expansão (Turbina):** os gases quentes se expandem nas pás da turbina, produzindo trabalho no eixo.
- 5 **Escape:** os gases são expulsos para a atmosfera.



MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA (CICLO DE 4 TEMPOS)

Funciona de forma cíclica (pistão), com variação periódica de volume no cilindro.



- 1 **Admissão:** mistura ar-combustível entra no cilindro.
- 2 **Compressão:** a mistura é comprimida, aumentando a pressão e a temperatura.
- 3 **Combustão:** a mistura é inflamada pela faísca, gerando alta pressão.
- 4 **Escape:** os gases queimados são expulsos para a atmosfera.

25.7 Princípio de Funcionamento das Turbinas (IV)



A turbina a gás tem uma **rotação mínima de funcionamento**, abaixo da qual não consegue manter seu ciclo. Essa rotação mínima é **muito superior à rotação de um motor de combustão interna** de êmbolos, e as rotações máximas também são muito superiores, o que **dificulta o uso da potência directamente no eixo**.

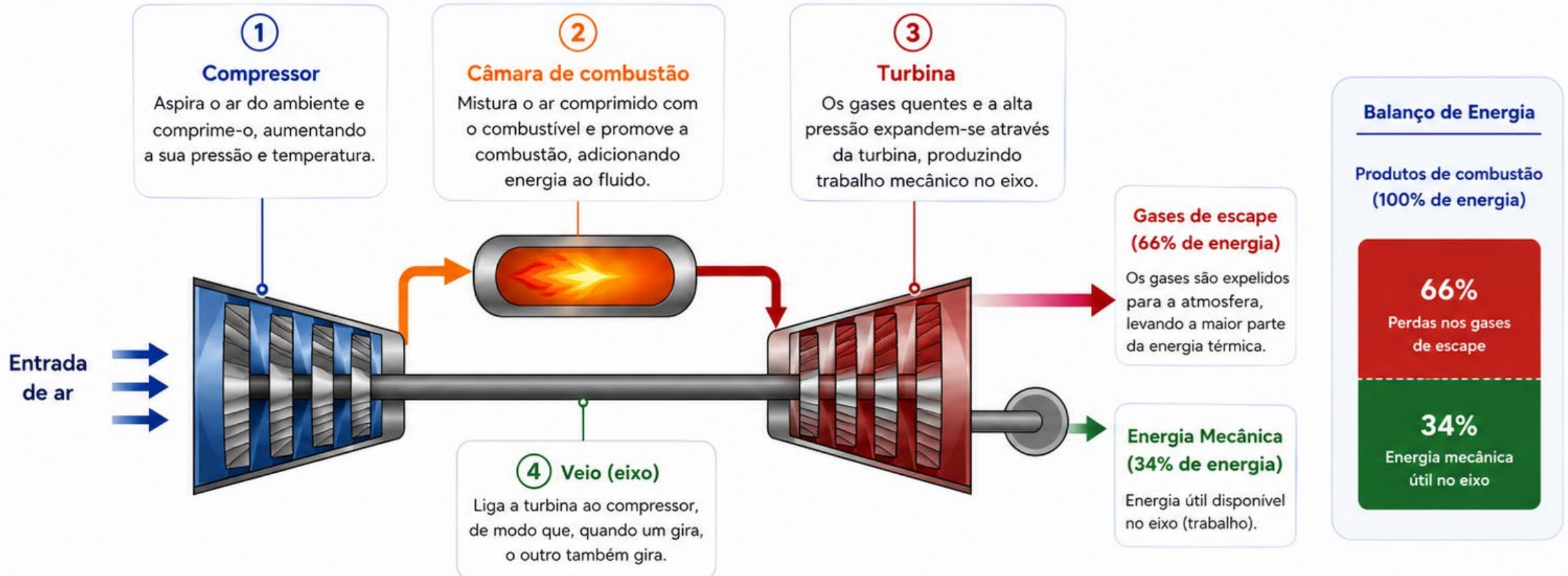


Se uma turbina estiver a operar isoladamente (**ciclo simples**), como nas aeronaves, a sua eficiência térmica é **baixa, da ordem de 34%**, ou seja, cerca de **66% do calor gerado pela queima do combustível é perdido nos gases de escape**.

25.7 Princípio de Funcionamento das Turbinas (V)



Em uma turbina a gás (**ciclo simples**), apenas cerca de **34% da energia** liberada pela queima do combustível é convertida em energia mecânica útil; aproximadamente **66%** é perdida com os gases de escape.



25.8 Classificação das Turbinas

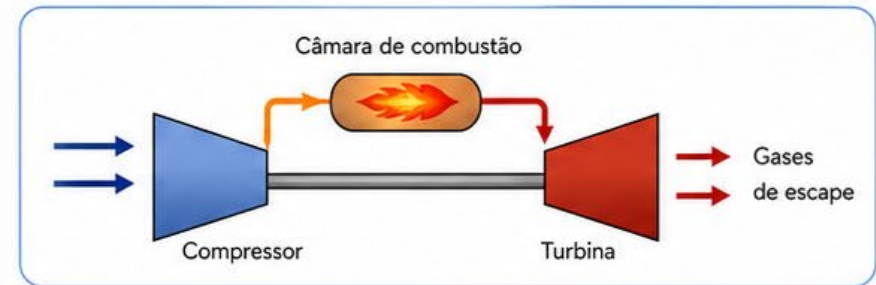


Apesar das **muitas aplicações** e dos **diversos tipos** de turbinas a gás, há entre elas uma série de **aspectos** que possibilitam uma **classificação**. Entre várias classificações, pode-se citar:



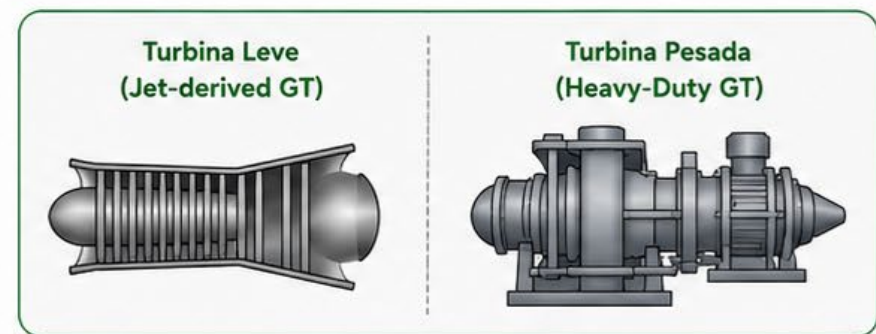
1. Quanto ao Ciclo:

- ▶ Aberto;
- ▶ Fechado.



2. Quanto à Construção:

- ▶ Leves (Jet-derived GT) – derivadas de turbinas aeronáuticas; e
- ▶ Pesadas (Heavy-Duty GT).



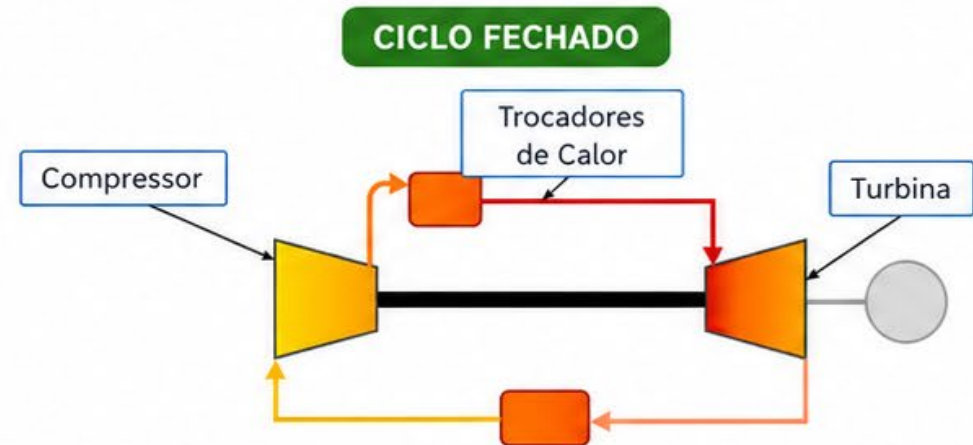
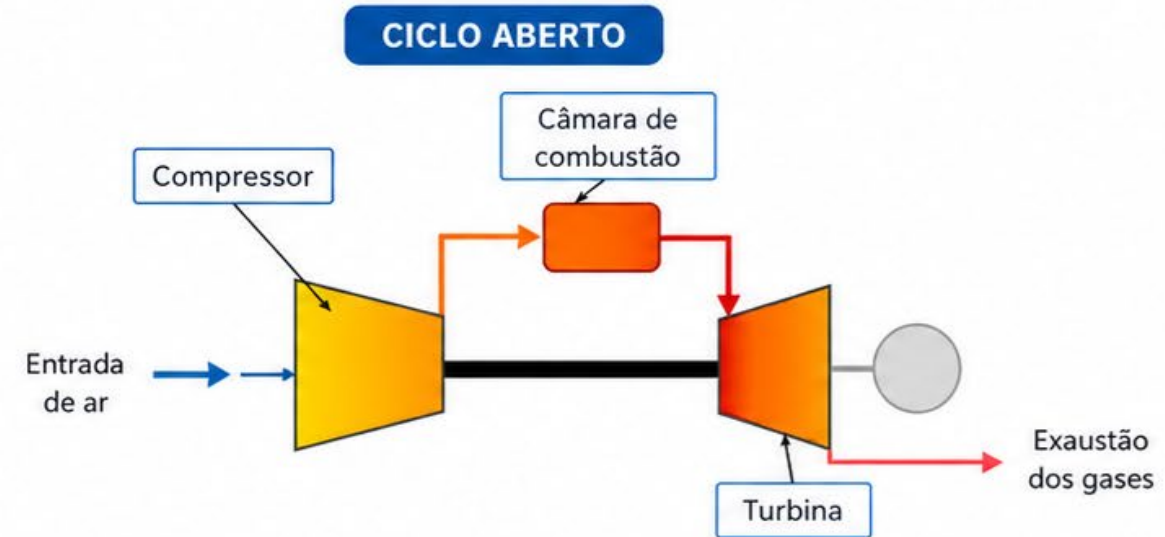
25.8.1 Classificação - Quanto ao Ciclo

Ciclo Aberto

No ciclo aberto, o fluido de trabalho **não retorna ao início** do ciclo. O ar, retirado da atmosfera, é **comprimido**, levado à **câmara de combustão**, onde juntamente com o combustível **recebe uma faísca**, provocando a combustão da mistura. Os gases desta combustão então **expandem-se na turbina**, fornecendo potência à mesma e ao compressor e, finalmente, **saem pelo bocal de exaustão**.

Ciclo Fechado

Ao contrário do ciclo aberto, no ciclo fechado, o fluido de trabalho **permanece no sistema**. Para isso, o combustível é **queimado fora do sistema**, utilizando-se um **trocador de calor** para fornecer a energia da combustão ao fluido de trabalho.



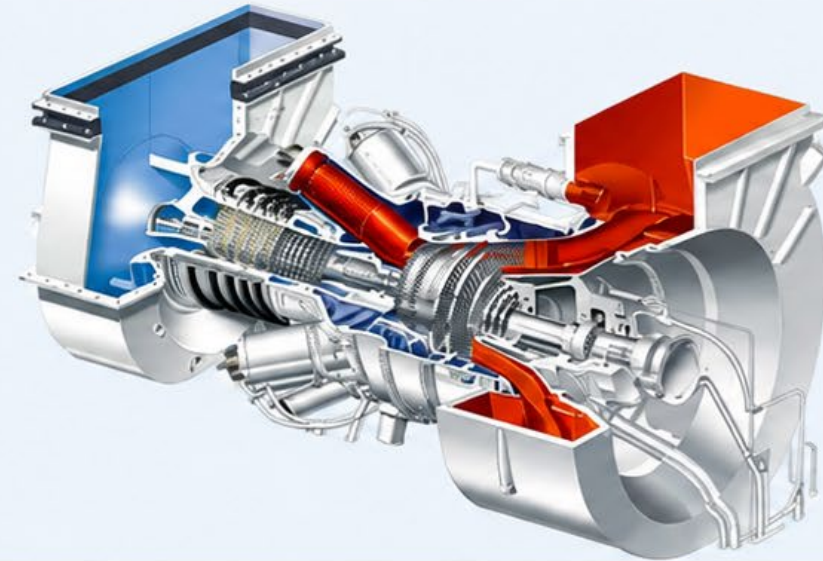
25.8.2 Classificação – Quanto à construção



PESADAS (HEAVY-DUTY GT)

Compreendem uma vasta e diversa gama de máquinas, indicadas para **geração de energia** (de 10 MW até acima de 100 MW).

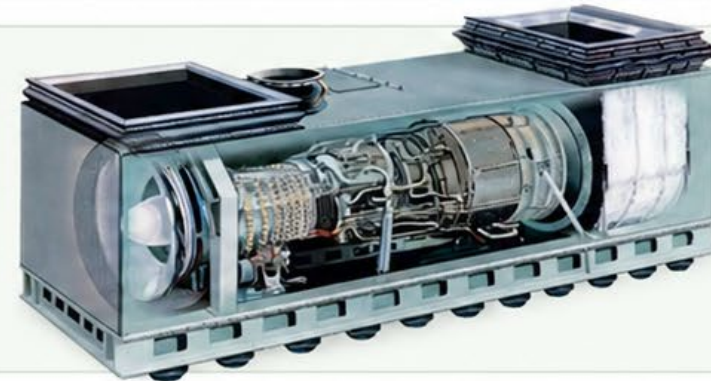
- ✓ Quando máquinas de menor potência são similares às “jet-derived”, as turbinas de média e alta potência possuem **estruturas muito pesadas e volumosas**.
- ✓ As câmaras de combustão **não são necessariamente circulares**, dispostas em torno do cilindro da turbina.
- ✓ Sua principal utilização é na **aeronáutica**.



LEVES (JET-DERIVED GT)

Possuem altas velocidades e podem ter **vários eixos** girando a diferentes velocidades.

- ✓ Têm aplicação na geração de energia mecânica e como motor para máquinas tais como **bombas e compressores**.



Geração de Energia

De 10 MW até acima de 100 MW
(Heavy-duty GT)



Aplicação Principal

Aeronáutica (pesadas) e acionamento
de máquinas (leves)



Características

Estruturas robustas (pesadas) e altas
velocidades (leves)

25.8.2 Classificação – Quanto a construção



MÁQUINAS DE MENOR POTÊNCIA SIMILARES ÀS “JET-DERIVED”

As turbinas de média e alta potência que são similares às “jet-derived” possuem **estruturas muito pesadas e volumosas**.



CÂMARAS DE COMBUSTÃO

Não são necessariamente circulares, dispostas em torno do cilindro da turbina.



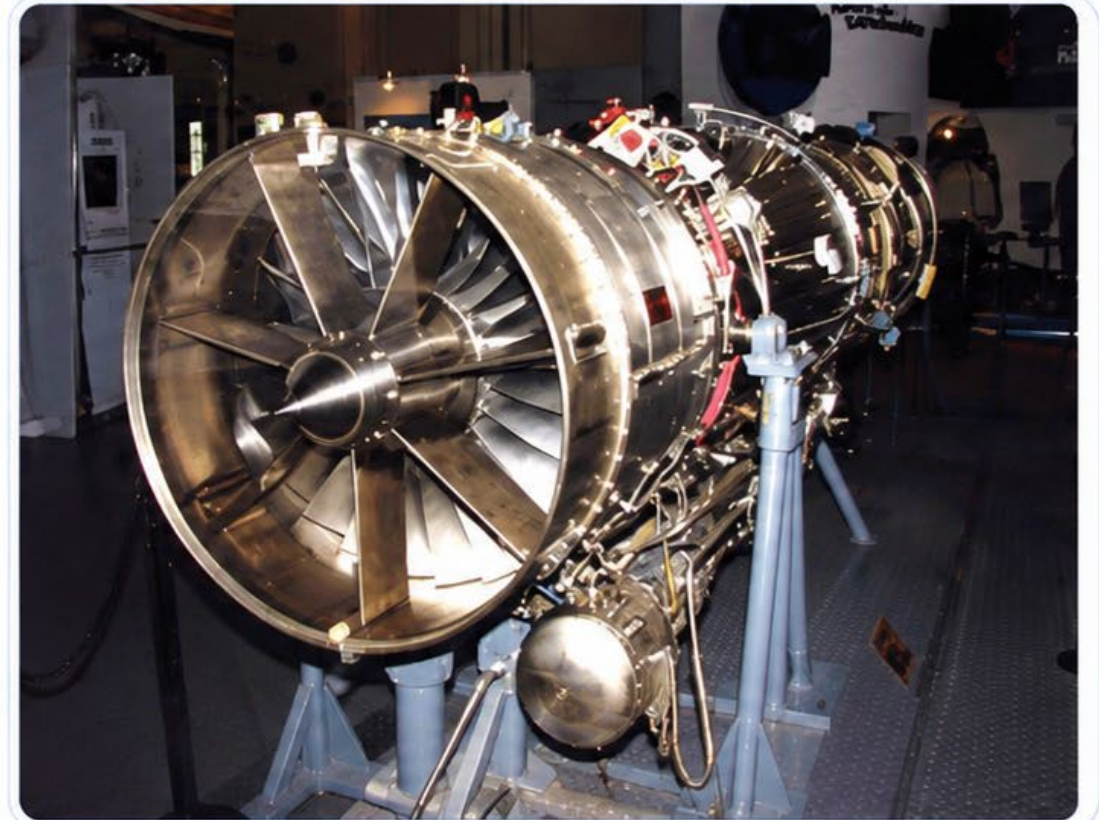
ESTRUTURA ROBUSTA

Projetadas para suportar altas temperaturas e grandes cargas mecânicas.



APLICAÇÃO PRINCIPAL

Aeronáutica (propulsão de aeronaves e geração de energia).



RESUMO

- Estruturas robustas e volumosas
- Câmaras de combustão não necessariamente circulares



IDEIA-CHAVE

Projetadas para operar com grande confiabilidade em condições severas e altas potências.

25.8.3 Classificação – Quanto ao número de veios (I)



O conjunto pode ter um, dois ou três eixos concêntricos com a finalidade de **umentar a razão de pressão do ciclo** e, consequentemente, sua **eficiência térmica**.



OBJETIVO

A divisão do compressor de gás em vários eixos tem o objetivo de aumentar a **eficiência aerodinâmica** da compressão.



IMPORTANTE

A compressão em um único estágio **diminuiria** a operação da turbina e a eficiência térmica.



EM RESUMO

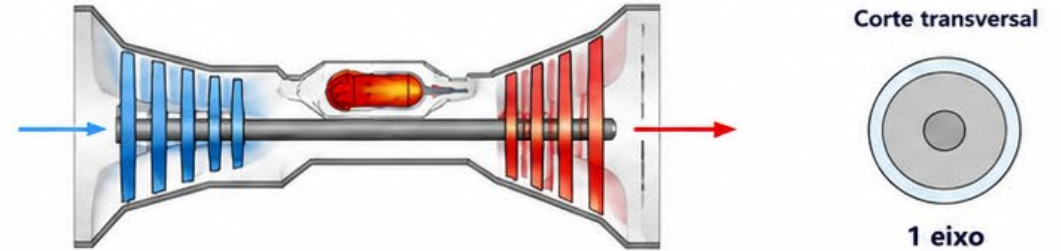
- O uso de 1, 2 ou 3 eixos concêntricos permite **maiores razões de pressão** do ciclo.
- Isso resulta em **maior eficiência do ciclo** e melhor desempenho térmico da turbina.



Os eixos são **concêntricos**: um passa por dentro do outro, compartilhando o mesmo centro.

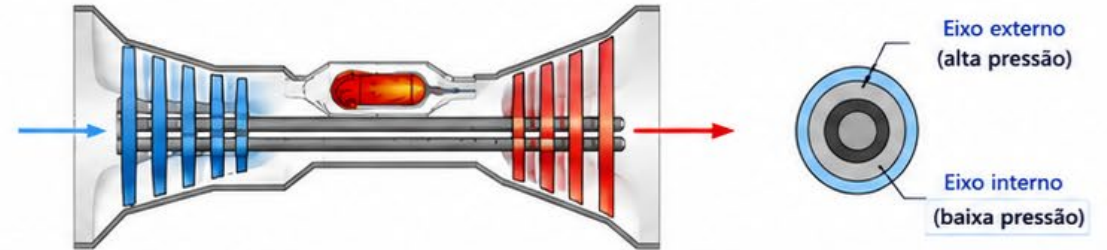
1 UM EIXO (simples)

Um **único eixo** liga o compressor à turbina.



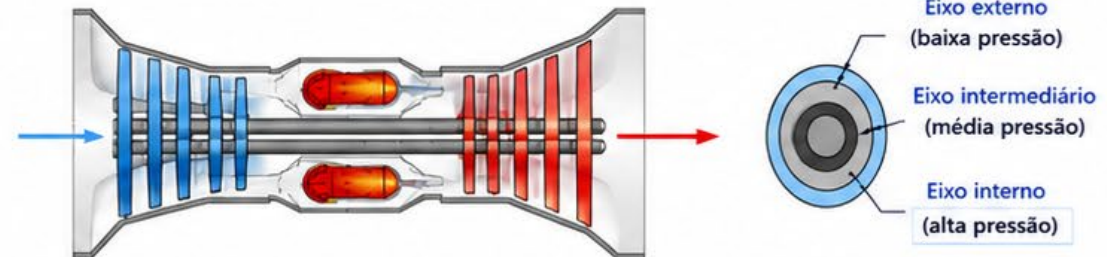
2 DOIS EIXOS (concêntricos)

Dois eixos concêntricos: um **interno** (baixa pressão) e um **externo** (alta pressão).



3 TRÊS EIXOS (concêntricos)

Três eixos concêntricos: **baixa, intermediária e alta pressão**.



25.8.3 Classificação – Quanto ao número de veios (II)



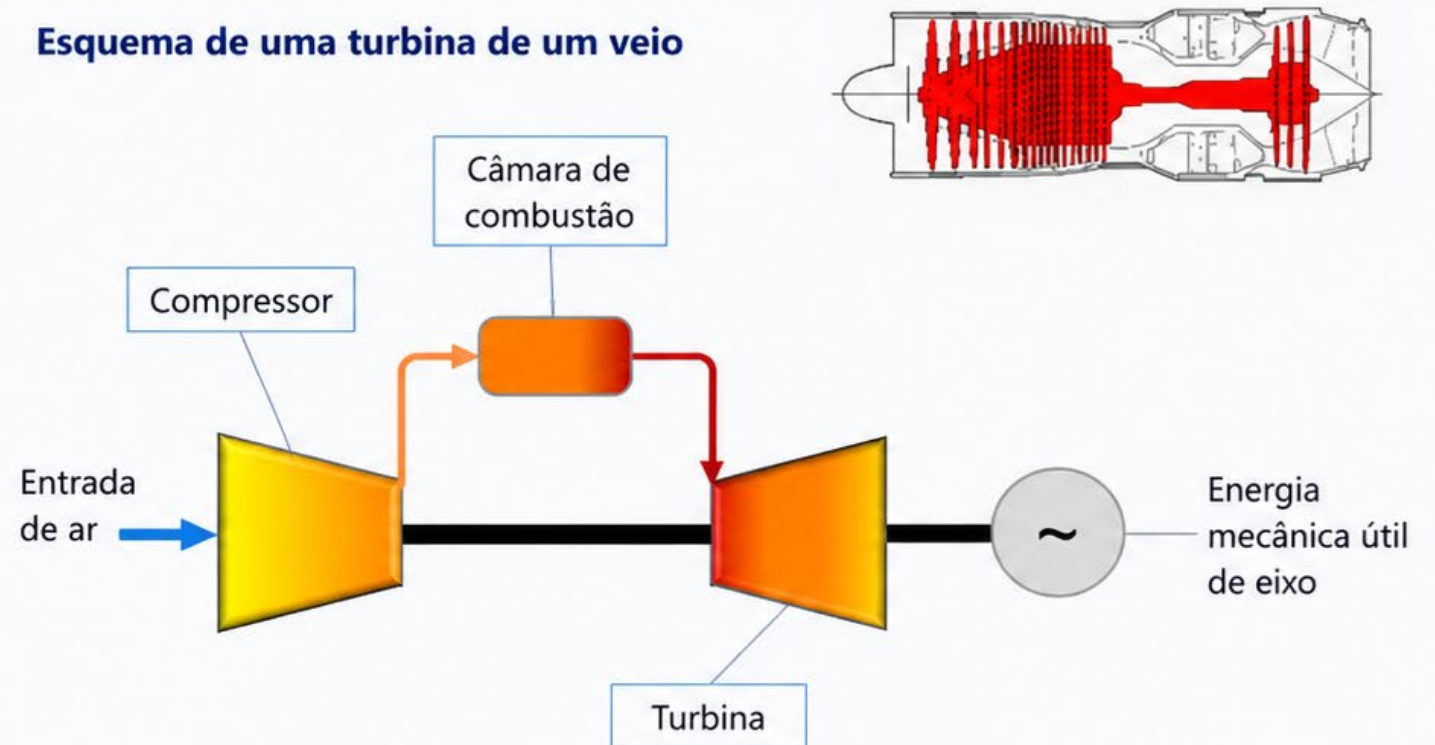
TURBINA DE UM VEIO

Um ciclo com um eixo apenas, parte da potência produzida pela **Turbina** é fornecida ao **Compressor**.

Apenas o restante da potência se destina à **potência útil de eixo**.

No caso de turbinas aeronáuticas, toda a potência gerada será **utilizada internamente**.

Esquema de uma turbina de um veio



EM RESUMO

- Uma parte da potência da turbina é utilizada para **acionar o compressor**.
- Apenas o restante da potência constitui a **potência útil de saída**.
- Em aplicações aeronáuticas, toda a potência é **consumida internamente** pelo próprio sistema.

25.8.3 Classificação – Quanto ao número de veios (III)



TURBINA DE DOIS VEIOS

A turbina de dois veios é formada por um **compressor de alta pressão**, que está ligado pelo primeiro veio à **turbina de alta pressão**, e por um **compressor de baixa pressão**, que está ligado pelo segundo veio à **turbina de baixa pressão**.



Há casos em que se tem uma **turbina de baixa pressão livre** (que não está ligada a nenhum compressor). No caso de turbinas aeronáuticas, a turbina livre é substituída por um **bocal**.



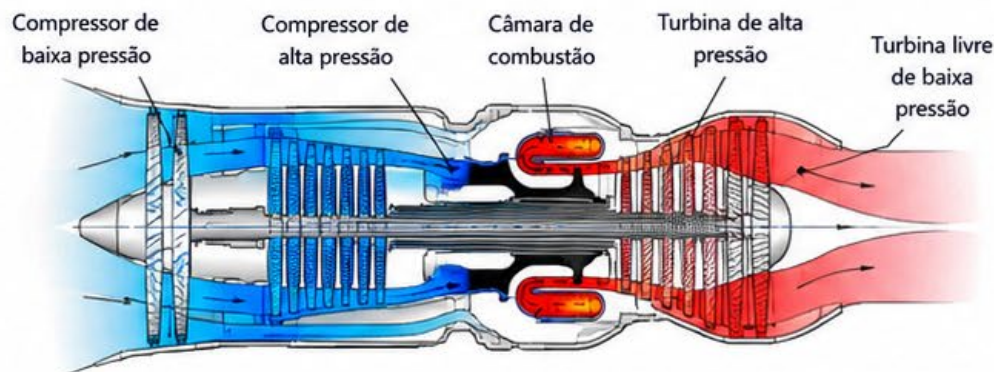
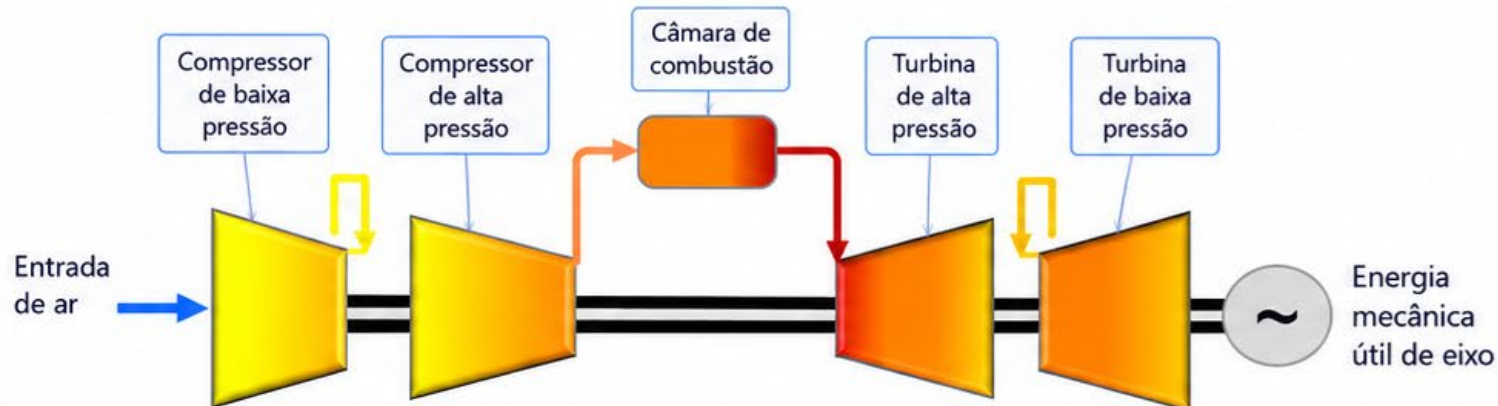
Diferença entre os dois ciclos: está na **operação**.



EM RESUMO

- ✓ Dois veios permitem **separar** as funções de compressão e expansão em estágios de **alta e baixa pressão**.
- ✓ Parte da potência da turbina de alta pressão **aciona o compressor** de alta pressão.
- ✓ A parte remanescente, juntamente com a potência da turbina de baixa pressão, constitui a **potência útil de saída**.

ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO



Em **aplicações aeronáuticas**, a turbina livre é substituída por um **bocal** para aumentar a eficiência propulsiva.

25.8.3 Classificação – Quanto ao número de veios (IV)

CICLO COM VÁRIOS VEIOS

Um ciclo com **vários veios** tem aplicação na aeronáutica.

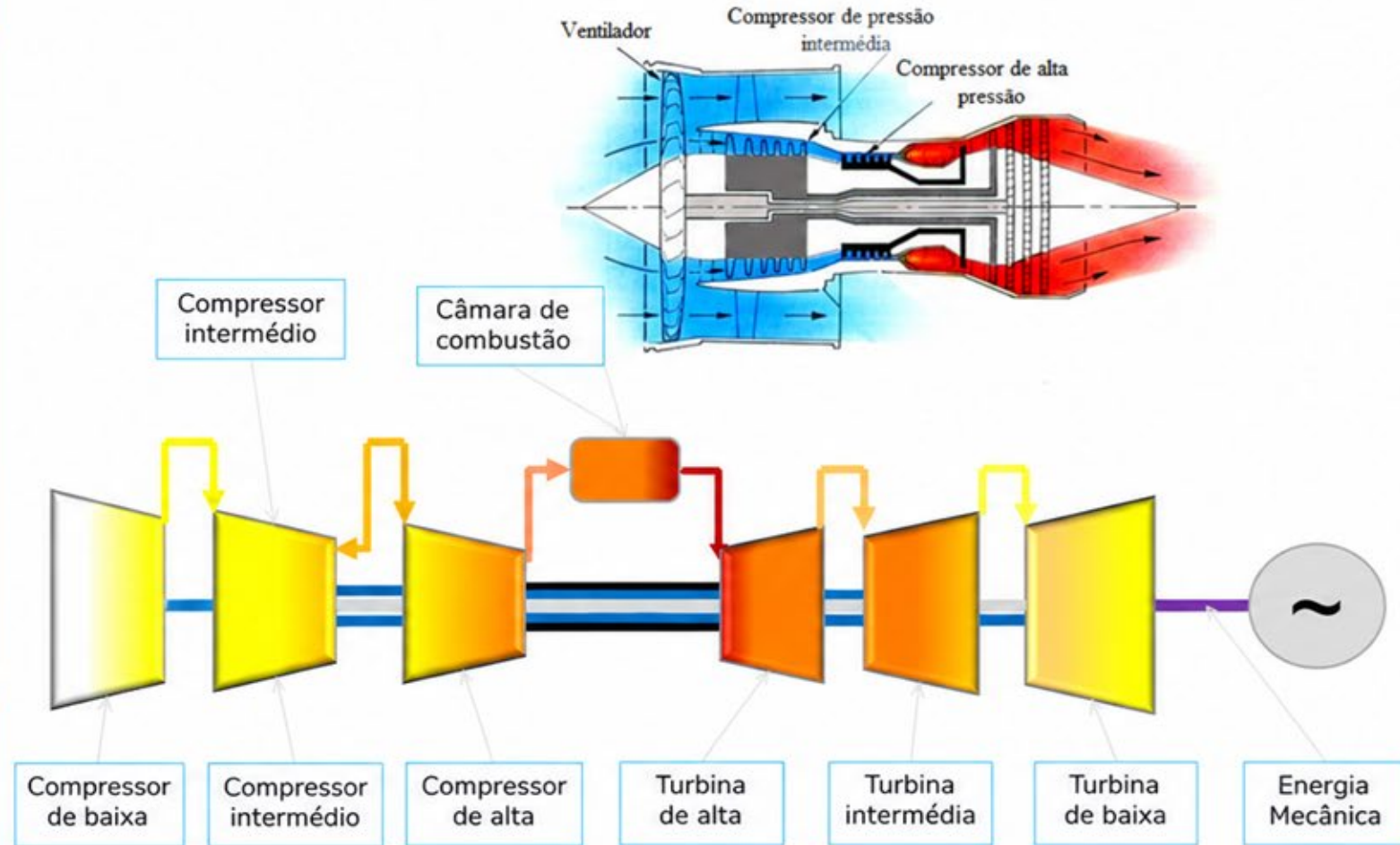
Neste caso, o conjunto pode ter um, dois ou três veios concêntricos com a finalidade de **aumentar a razão de pressão do ciclo** e conseqüentemente sua **eficiência térmica**.

A divisão em vários veios do compressor de gás tem objectivo de **aumentar a eficiência aerodinâmica** da compressão pois, a compressão em um único estágio diminuiria a operação da turbina e a eficiência térmica.



Na prática aeronáutica, os motores mais comuns utilizam **dois veios concêntricos** (um de baixa pressão e outro de alta pressão).

Exemplo de motor com dois veios concêntricos



Cada veio (também designado por **eixo** ou **shaft**) aciona o conjunto de componentes que lhe corresponde, permitindo **otimizar o desempenho** global do motor.

25.9 Turbinas Turbofan

TURBOFAN: PRINCÍPIO E FUNCIONAMENTO

Estas turbinas possuem um **grande conjunto frontal de pás** que succionam o ar para dentro da turbina. A maior parte do ar succionado passa por fora do motor, i.e., ele não é comprimido ou sofre uma baixa compressão. Esse fluxo de ar é chamado de **Bypass**. Esse ar faz a turbina ser **mais silenciosa** e fornece um **maior empuxo** à aeronave a baixas velocidades, **sem aumentar o consumo de combustível**. A maioria das aeronaves, principalmente as comerciais, são movidas por turbinas com turbofan, onde **85% do empuxo** tem origem no ar de bypass.



IDEIA-CHAVE

O turbofan combina a eficiência do núcleo (núcleo quente) com a força do fluxo de bypass (núcleo frio).



MAIS SILENCIOSO

O ar de bypass reduz o ruído gerado pelo motor.



MAIS EFICIENTE

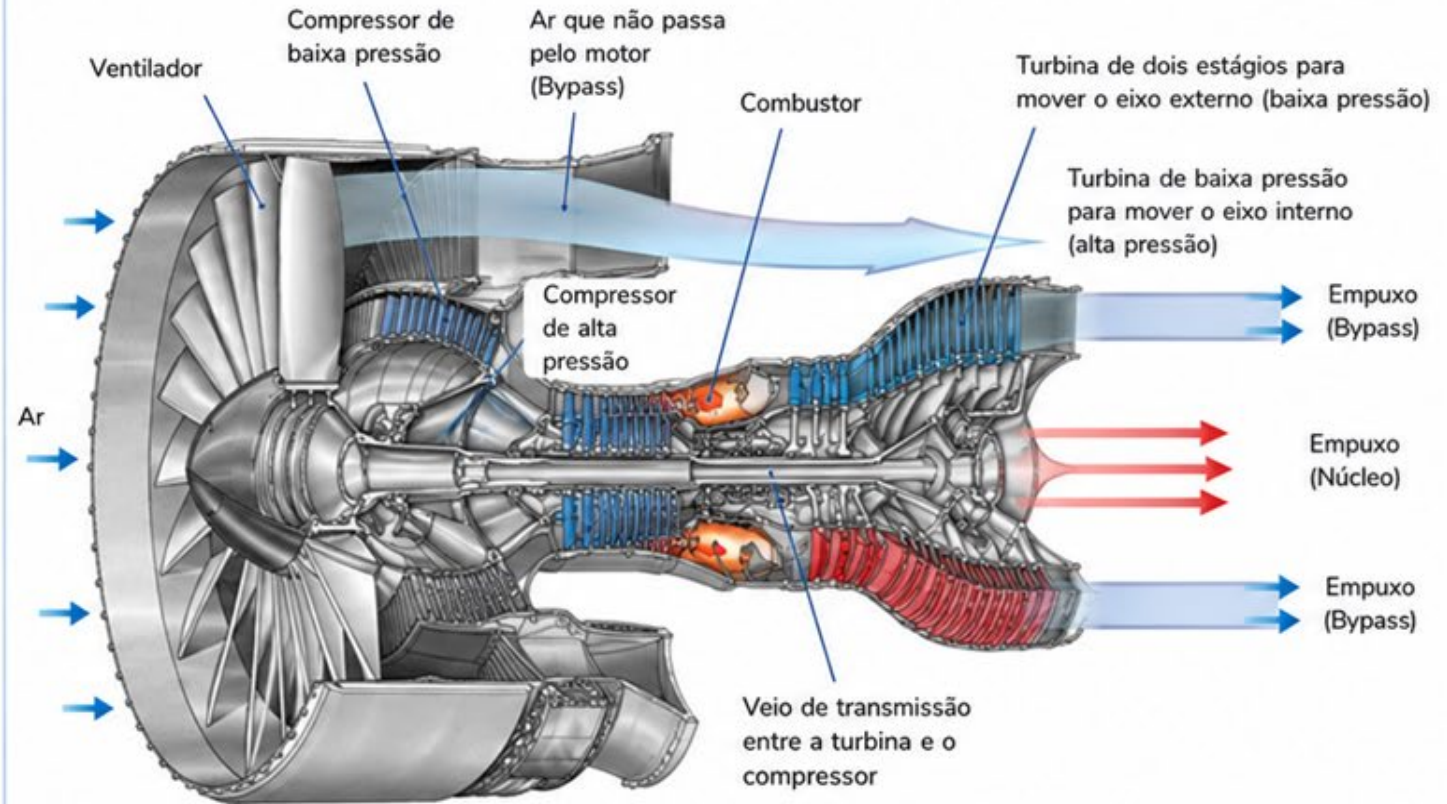
Maior empuxo com menor consumo de combustível.



IDEAL PARA AVIAÇÃO COMERCIAL

Até 85% do empuxo vem do ar de bypass.

COMPONENTES E FLUXO DE AR



- Fluxo de ar de bypass (não comprimido)
- Fluxo de ar do núcleo (comprimado e expandido)

25.10 Câmara de Combustão (I)

FUNÇÃO E IMPORTÂNCIA

A câmara de combustão tem a difícil tarefa de queimar grandes **quantidades de combustível**, fornecido através dos bocais de combustível, com **grandes volumes de ar**, fornecido pelo compressor e libertando o calor de tal forma que o ar seja **expandido e acelerado** para dar um fluxo suave de gás aquecido uniformemente em todas as condições exigidas pela turbina.

Esta tarefa deve ser realizada com o **mínimo de perda de pressão** e com a **libertação máxima de calor** para o espaço disponível.

OBJETIVOS PRINCIPAIS

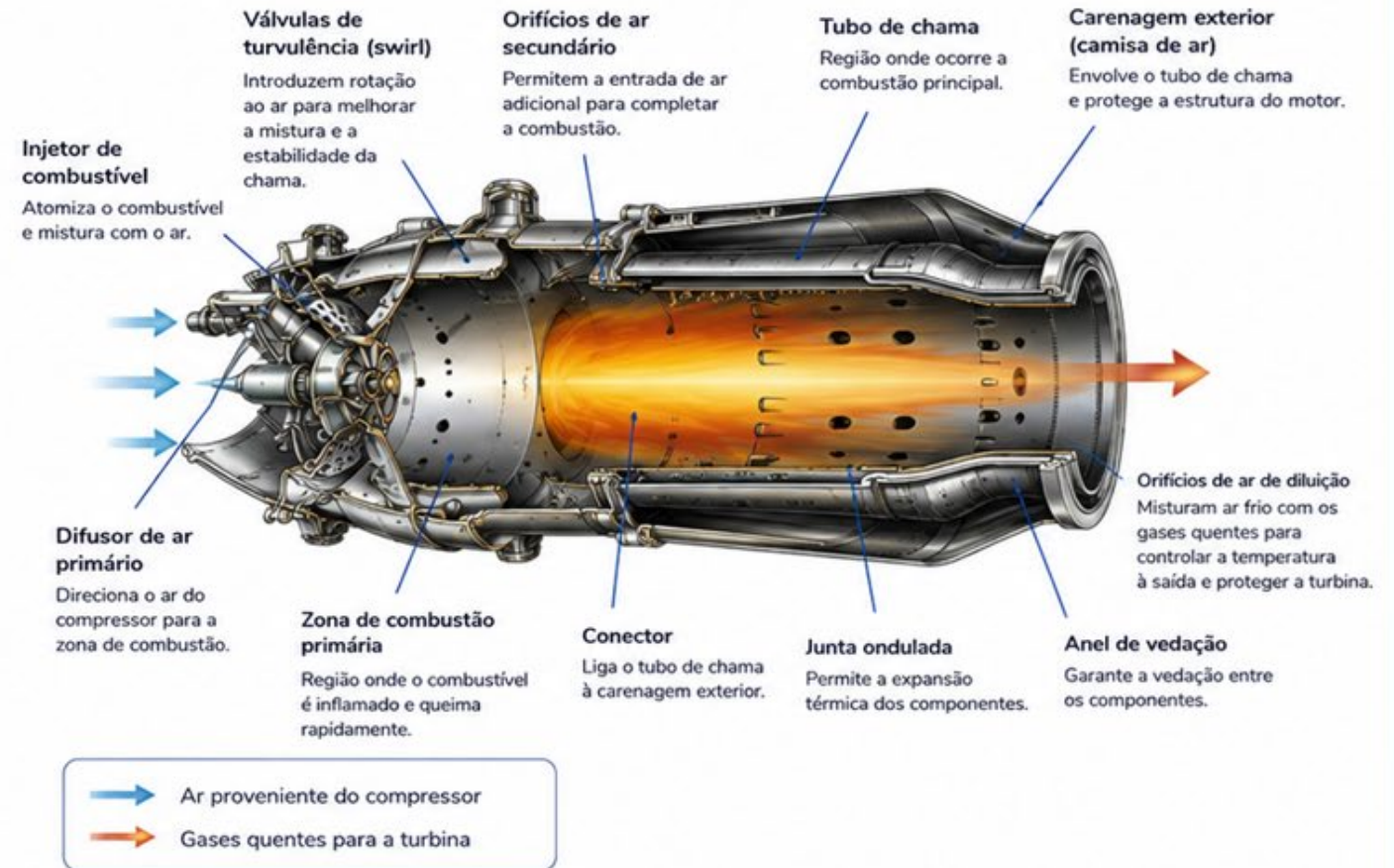
- ✓ **Combustão eficiente:** queimar o máximo de combustível possível.
- ✓ **Distribuição uniforme de temperatura:** garantir um fluxo de gás aquecido uniforme para a turbina.
- ✓ **Baixa perda de pressão:** minimizar as perdas para manter a eficiência.
- ✓ **Operação estável:** garantir combustão estável em todas as condições.
- ✓ **Durabilidade:** suportar altas temperaturas e esforços térmicos.



IDEIA-CHAVE

A câmara de combustão atua como o "coração térmico" do motor, transformando energia química do combustível em energia térmica para acionar a turbina.

PRINCIPAIS COMPONENTES DA CÂMARA DE COMBUSTÃO



ALTAS TEMPERATURAS

Opera tipicamente entre 1 400 °C e 1 800 °C.



MISTURA EFICIENTE

A boa mistura ar-combustível é essencial para a eficiência.



BAIXA PERDA DE PRESSÃO

Projetada para minimizar as perdas no escoamento.



ALTA DURABILIDADE

Materiais resistentes ao calor e à corrosão.

25.10 Câmara de Combustão (II)

INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA COMBUSTÃO



A quantidade de combustível adicionada ao ar depende da **elevação de temperatura**.



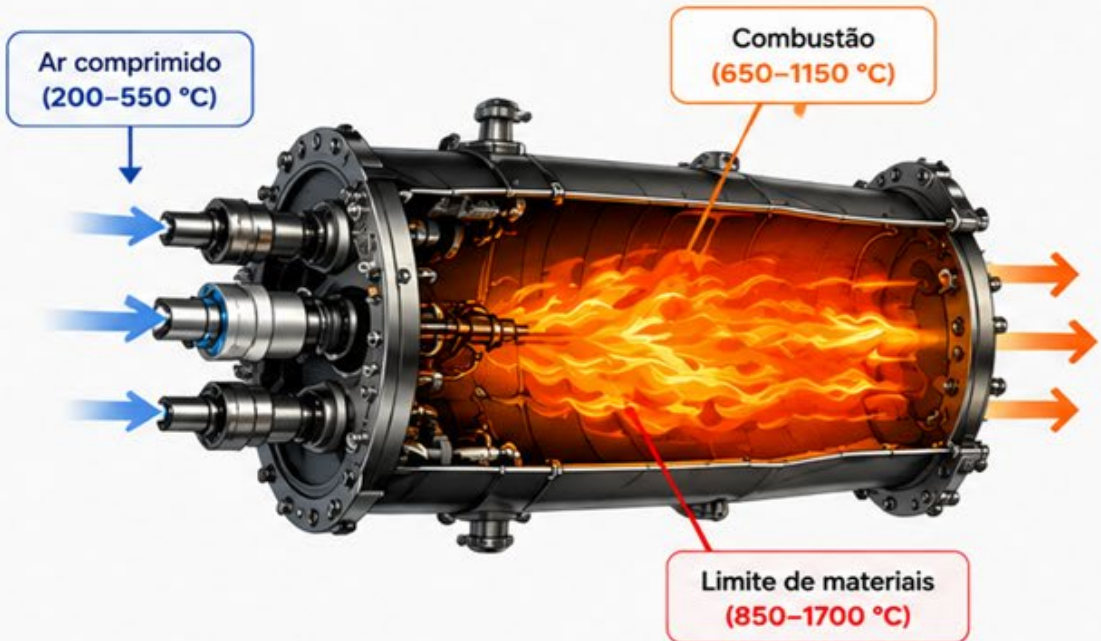
A temperatura máxima é limitada entre **850–1700 °C** pelos materiais das pás da turbina e dos bicos combustores.



O ar, já aquecido entre **200 e 550 °C** pela compressão, exige um aumento de temperatura de **650–1150 °C** na combustão.



A temperatura do gás à entrada da turbina varia conforme a propulsão e a potência requerida. A câmara de combustão deve manter uma combustão **estável e eficiente** numa ampla gama de condições.



FAIXAS DE TEMPERATURA TÍPICAS



OBJETIVO

Fornecer energia térmica suficiente para gerar potência, respeitando os limites de temperatura dos materiais e garantindo eficiência, baixa perda de pressão e estabilidade da combustão.

25.10 Câmara de Combustão (III)

VARIAÇÃO DA PROPULSÃO E FUNÇÕES PRINCIPAIS

VARIAÇÃO POR PROPULSÃO



Motor a jato (turboreator/turbofan)

A temperatura dos gases à entrada da turbina varia com a potência requerida (decolagem, cruzeiro, etc.).



Maior potência → maior temperatura na entrada da turbina.



Motor turbo-hélice

Deve manter combustão estável e eficiente mesmo com grandes variações de potência.

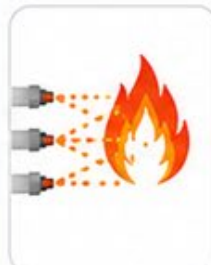


Grande faixa de potência → requer combustão estável e adaptável.

FUNÇÕES PRINCIPAIS DA CÂMARA DE COMBUSTÃO



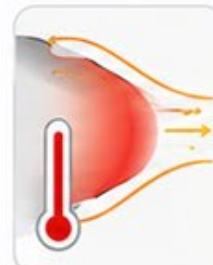
Queimar o máximo de combustível possível de forma segura.



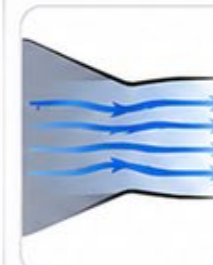
Misturar combustível e ar para garantir uma combustão eficaz.



Liberar calor de forma controlada, dentro dos limites de temperatura.



Fornecer um fluxo de gases suave e uniforme para a turbina.



Manter a combustão estável e eficiente em toda a faixa de operação.





RESUMO

A câmara de combustão é o "coração térmico" do motor. Deve adaptar-se às variações de potência e propulsão, garantindo combustão estável, eficiente e segura, fornecendo energia térmica suficiente para gerar potência, respeitando os limites dos materiais e as exigências de desempenho.

- ✓ Adapta-se a diferentes tipos de motores e potências
- ✓ Controla a temperatura dentro dos limites dos materiais
- ✓ Garante eficiência, baixa perda de pressão e estabilidade da combustão

25.11 Compressores

Os compressores (turbocompressores) são apresentados em dois tipos principais, de acordo com a direção do escoamento na saída do rotor em relação ao eixo de rotação:

RADIAL (CENTRÍFUGO)	AXIAL
 <ul style="list-style-type: none">• O ar entra axialmente no centro do rotor.• Saída do rotor radialmente para a periferia.• Adequado para grandes aumentos de pressão em um único estágio.	 <ul style="list-style-type: none">• O ar flui paralelamente ao eixo de rotação.• Saída do rotor na mesma direção (axial).• Adequado para grandes vazões de ar com aumentos moderados de pressão por estágio.

PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO



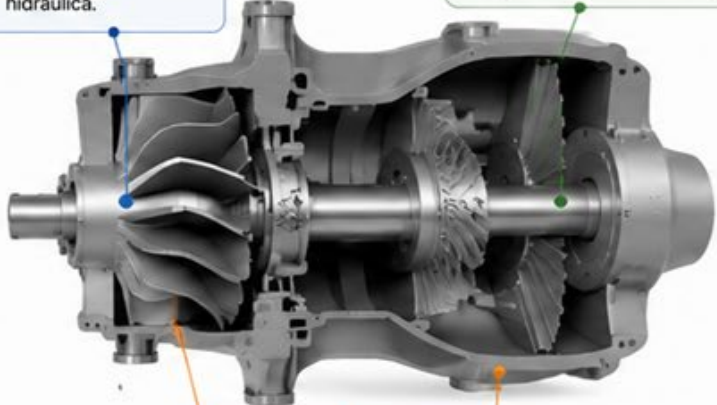
O ar entra no compressor com baixa pressão e baixa velocidade.

O rotor em rotação acelera o ar, transferindo energia ao fluido.

O difusor desacelera o ar e converte a velocidade em pressão.

O ar sai com maior pressão e é direcionado para a câmara de combustão.

COMPONENTES PRINCIPAIS



- 1 ROTOR**
Conjunto de pás em rotação que transfere energia mecânica do eixo para o ar, na forma de potência hidráulica.
- 2 DIFUSOR (ALHETAS FIXAS)**
Conjunto de pás fixas que formam passagens divergentes, desacelerando o ar e convertendo velocidade em pressão (aumento de pressão).
- 3 CARÇAÇA**
Estrutura que abriga e suporta os componentes do compressor, garantindo o direcionamento do fluxo de ar.



IDEIA PRINCIPAL: O compressor é um dos componentes essenciais da turbina a gás, responsável por elevar a pressão do ar antes da combustão, fornecendo as condições necessárias para um processo eficiente e para a geração de potência.

25.11.1 Compressores Centrífugos

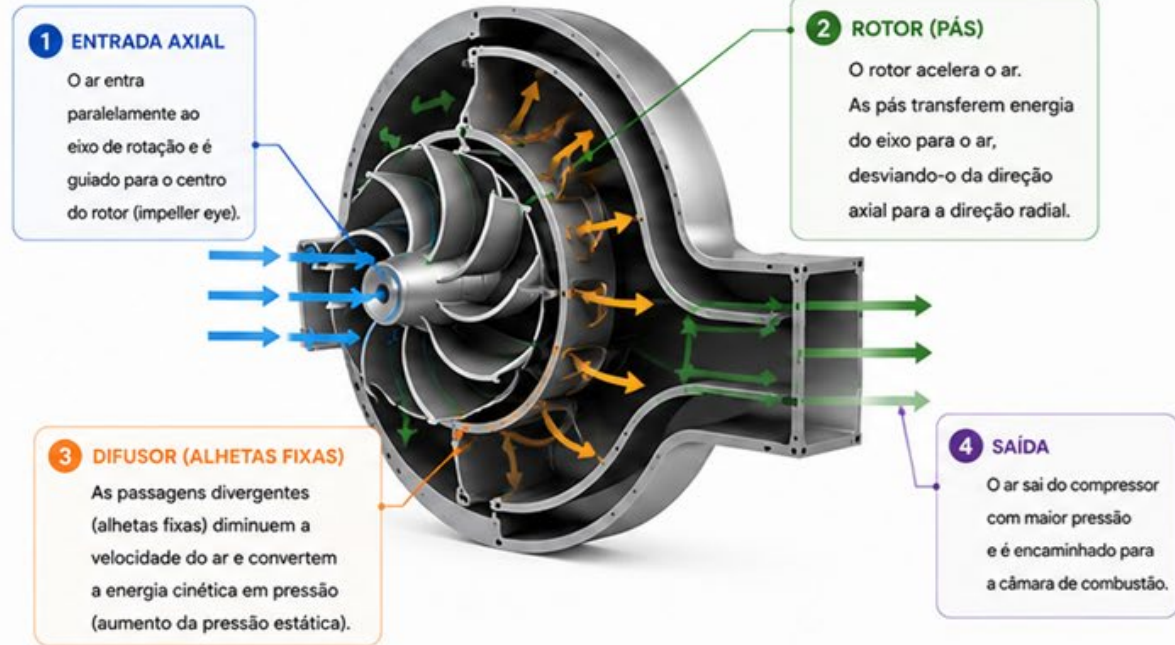
COMPRESSOR RADIAL (CENTRÍFUGO)

No compressor **RADIAL** (centrífugo), o ar entra na **direção axial** do rotor, recebendo energia do rotor. É então desviado para a **direção radial**, saindo do rotor e entrando num sistema de passagens divergentes (**difusores** ou **alhetas fixas**) que **desaceleram** o ar, **aumentando**, conseqüentemente, a sua **pressão estática**.



O ar é succionado na **entrada do rotor** (impeller eye) e, em seguida, gira a alta rotação pelas pás do rotor, impulsionado pela energia do motor.

VISTA EM CORTE (CORTE PARCIAL LONGITUDINAL)



PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO



CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS



- ✓ Elevação significativa da pressão do ar.
- ✓ Adequado para grandes vazões e aumentos moderados a elevados de pressão por estágios.
- ✓ Alta eficiência quando operado próximo do ponto de projeto.
- ✓ Construção robusta e compacta.
- ✓ Utilizado em quase todas as turbinas a gás (multiestágios).



Em resumo: o compressor radial converte energia mecânica do rotor em energia de pressão do ar. O ar entra axialmente, é acelerado e desviado radialmente pelo rotor e, nos difusores, tem a sua velocidade reduzida e a pressão aumentada.

25.11.2 Compressores radiais

COMPRESSOR AXIAL – FLUXO DO AR

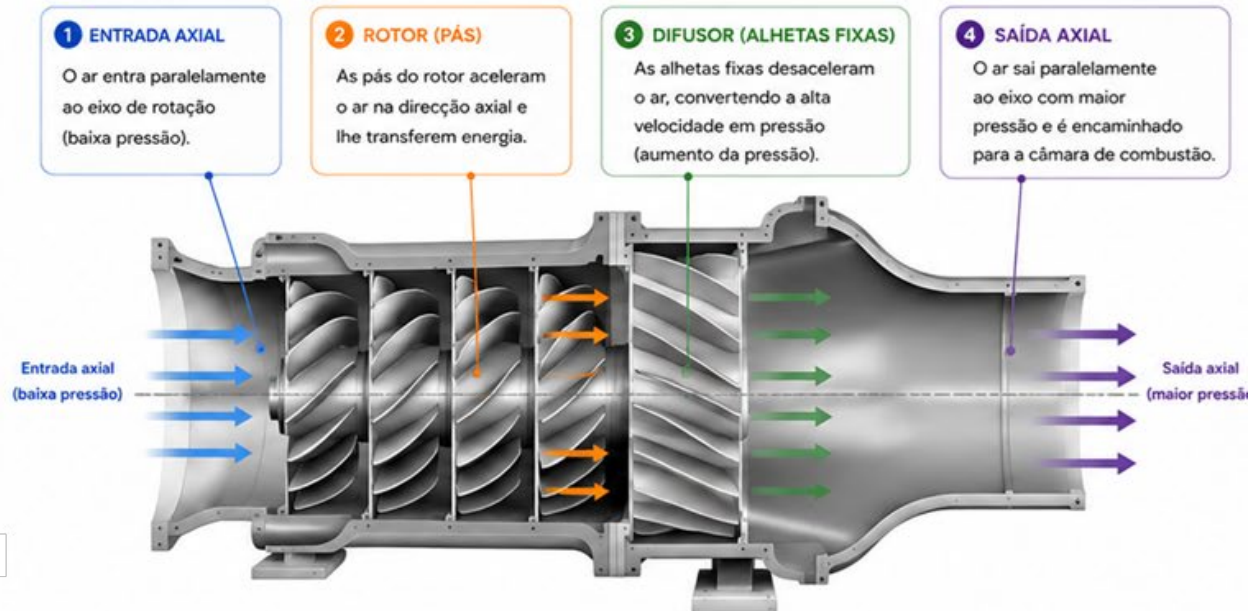
No compressor axial (de fluxo axial), o ar entra e sai na direcção **paralela ao eixo** de rotação.

No **rotor**, o ar em escoamento é sujeito à acção das pás, que transferem energia ao fluido. A **força centrífuga tem pouca influência**, uma vez que o movimento predominante é axial.

O aumento da pressão é obtido essencialmente no **difusor (alhetas fixas)**, onde o ar é desacelerado, transformando a sua elevada velocidade em pressão estática.

É usual projectar o compressor de forma que cerca da **metade do aumento da pressão** ocorra no rotor e a outra metade no difusor.

VISTA EM CORTE – FLUXO DO AR (AXIAL)



ETAPAS DO PROCESSO (DO FLUXO DO AR)



CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS



- ✓ Fluxo de ar paralelo ao eixo de rotação (axial).
- ✓ A força centrífuga tem pouca influência.
- ✓ Alta razão de pressão por vários estágios.
- ✓ Elevada eficiência e boa faixa de operação.
- ✓ Utilizado em compressores de motores turbo-hélice e turbojato.



Em resumo: No compressor axial, o ar mantém a direcção paralela ao eixo. As pás do rotor aceleram o ar e o difusor desacelera-o, convertendo velocidade em pressão. Aproximadamente metade do aumento da pressão ocorre no rotor e a outra metade no difusor.

Nota:

D_1 = diâmetro na entrada do rotor | D_2 = diâmetro na saída do rotor

25.11.3 Compressor Axial



CONCEITO

No compressor AXIAL, o ar entra na direção axial do rotor, recebendo energia das pás, e prosseguindo, na mesma direção, para entrar no sistema difusor constituído por alhetas (pás fixas) fixadas na carcaça.

Neste tipo de máquina:

- Não há o efeito da força centrífuga ou má compressão, resultando num menor aumento da pressão, por estágio.
- Por isso, este tipo de compressor sempre usa diversos estágios em série.
- Tanto as pás (rotor) como as alhetas (difusor) possuem perfis aerodinâmicos (semelhantes aos de sustentação).
- A variação de velocidade através das pás e alhetas não é grande, o que permite funcionar com velocidades mais altas (no momento já existem em uso compressores trans-sônicos).



CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS



Menor aumento da pressão por estágio



Grande número de estágios em série

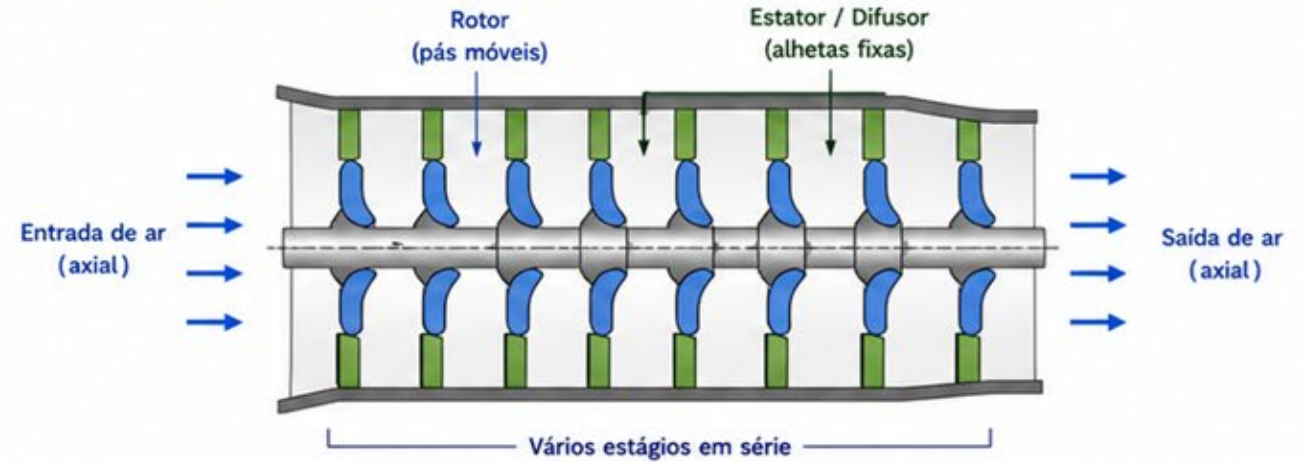


Perfis aerodinâmicos (semelhantes aos de sustentação)

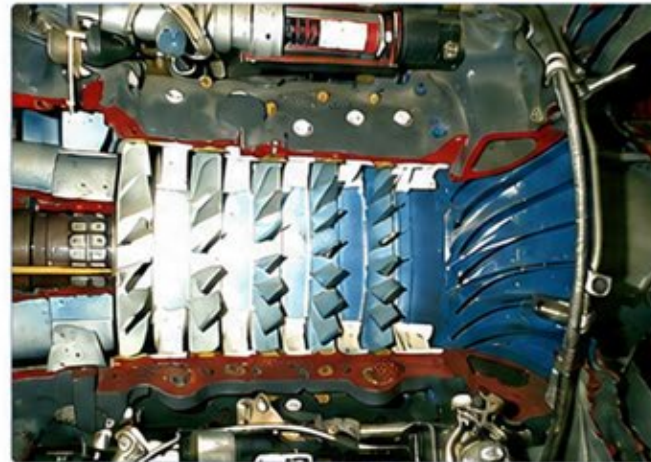


Varição de velocidade reduzida → permite velocidades mais altas (até regime trans-sônico)

ESQUEMA FUNCIONAL (VISTA AXIAL)



EXEMPLOS REAIS



Corte de um compressor axial de múltiplos estágios



Rotor (pás móveis) de um compressor axial



25.12 Turbinas

FUNÇÃO E PRINCÍPIO

É a parte motriz da unidade. O gás, ao escoar através da turbina, perde pressão e temperatura, à medida que se expande e transforma a sua energia em trabalho.

As turbinas podem ser de dois tipos principais:



- **Tipo radial** (baixas potências)



- **Tipo axial** (mais comuns, altas potências)

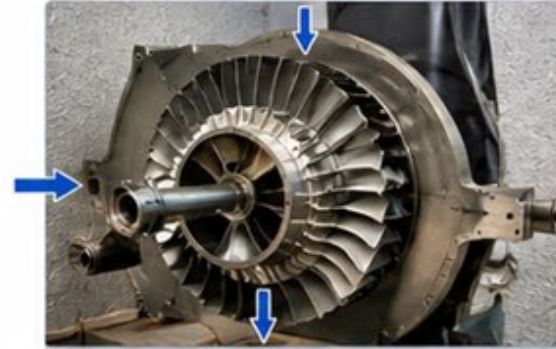
COMO A TURBINA CONVERTE ENERGIA



- Perda de pressão e temperatura do gás
- Transformação da energia do gás em trabalho útil
- Acionamento do compressor, gerador ou carga externa

TIPOS DE TURBINAS

TURBINA RADIAL (CENTRÍFUGA)



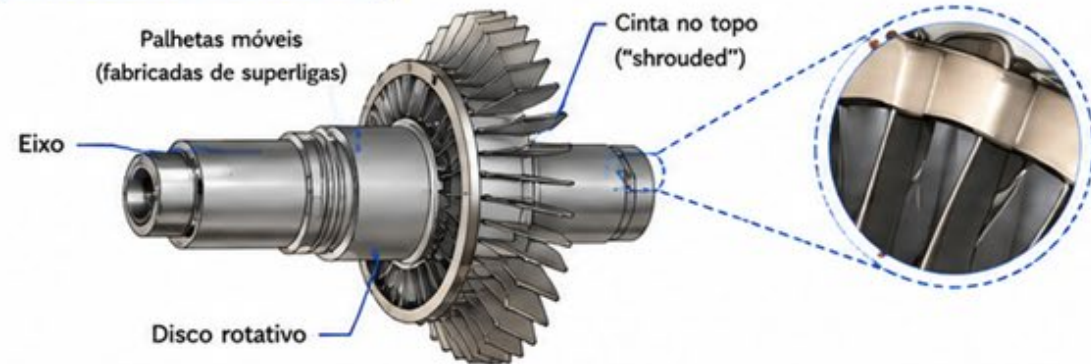
O gás entra radialmente, é desviado para a direção axial e sai com menor pressão e temperatura.

TURBINA AXIAL



O gás escoa paralelamente ao eixo, passando através de várias filas de pás fixas e móveis, expandindo-se e produzindo trabalho.

O ROTOR DA TURBINA



As palhetas são unidas por uma cinta no seu topo ("shrouded"), formando uma banda no perímetro externo das palhetas que serve para reduzir a vibração das mesmas.

Rodas dinamicamente balanceadas

Fixação das palhetas ao disco rotativo

Redução de vibrações e aumento da fiabilidade

Funcionamento eficiente em altas velocidades

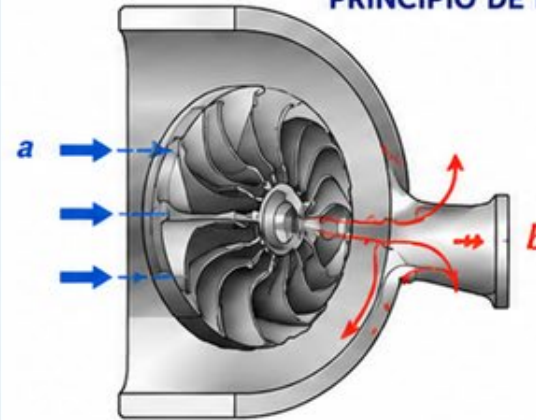
25.12.1 Turbinas Radiais



CONCEITO E APLICAÇÃO

- Apresentam somente um estágio com rotor semi-aberto, muito semelhante ao do compressor radial.
- O escoamento segue contra o efeito da força centrífuga no sentido radial de fora para dentro.
- Desta forma é muito comum a denominação **turbina centrípeta**.
- Elas são normalmente utilizadas para pequena potência, como, por exemplo, nas turboalimentadores ou turbinas automáticas.
- Podem atingir até **4500 kW** em instalação com potência efectiva de **1500 kW** (o compressor consome cerca de 2/3 da potência da turbina).

PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

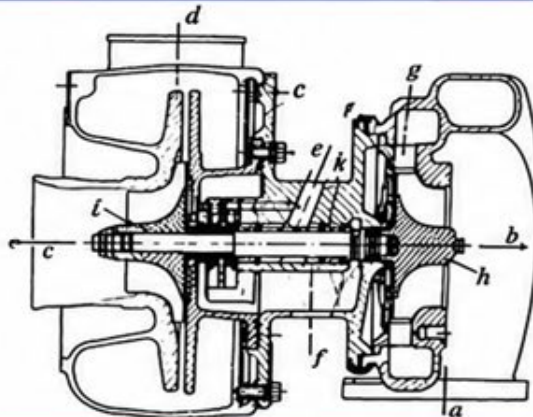


- a** → Entrada do gás (radial, de fora para dentro)
- b** → Saída do gás (após atravessar as palhetas)

O gás entra radialmente na periferia da turbina, atravessa as palhetas móveis do rotor e sai com menor pressão e temperatura, transformando a sua energia em trabalho no eixo.

IDENTIFICAÇÃO DOS COMPONENTES

- a-** admissão do gás de escape;
- b-** saída do gás de escape;
- c-** admissão do ar;
- d-** saída do ar;
- e-** entrada do óleo lubrificante;
- f-** saída do óleo lubrificante;
- g-** roda motriz da turbina;
- h-** rotor da turbina;
- i-** rotor da ventoinha;
- k-** bucha flutuante do mancal.



ROTOR E RODA MOTRIZ



- g-** roda motriz da turbina;
- h-** rotor da turbina;
- i-** rotor da ventoinha.

O rotor possui palhetas móveis fabricadas de superligas e é fixado ao disco rotativo. As palhetas são unidas por uma cinta no topo ("shrouded") formando uma banda no perímetro externo que serve para reduzir as vibrações.

CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS



Um único estágio com rotor semi-aberto



Escoamento radial de fora para dentro (centrípeto)



Aplicações de pequena potência



Até 4500 kW (instalação)



Relação típica:
 $P_{comp} \approx 2/3 P_{turbina}$

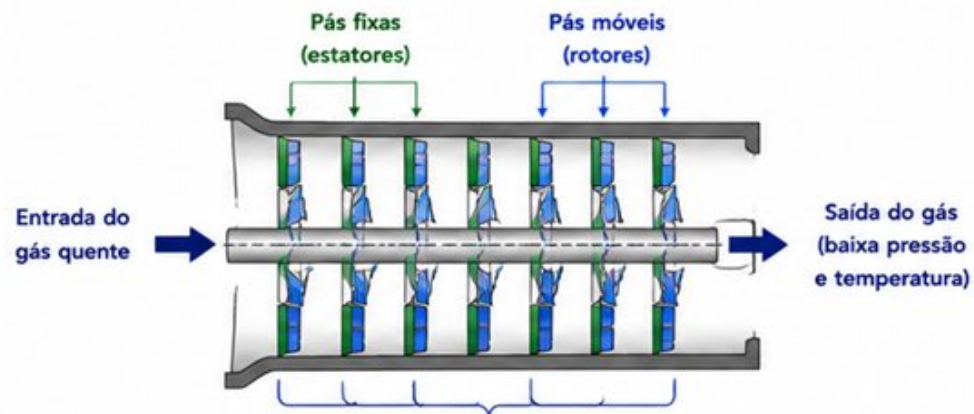
25.12.2 Turbinas Axiais



CONCEITO E FUNCIONAMENTO

- O escoamento do gás na turbina axial ocorre predominantemente **na direção do eixo**.
- O gás atravessa sucessivos estágios formados por **pás fixas (estatores)** e **pás móveis (rotores)**.
- A energia do gás é convertida em trabalho à medida que ele se expande, perdendo pressão e temperatura ao longo dos estágios.
- As turbinas axiais são as mais comuns em aplicações de **média e alta potência** devido ao elevado rendimento e compactidade.

PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO



Vários estágios em série: cada estágio aumenta a extração de energia do gás

EXEMPLOS DE TURBINAS AXIAIS



CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS



Elevado rendimento

Aproveitamento eficiente da energia do gás em cada estágio.



Compactas e leves

Grande potência para dimensões reduzidas.



Adequadas para alta potência

Utilizadas em aplicações aeronáuticas, industriais e de geração de energia.

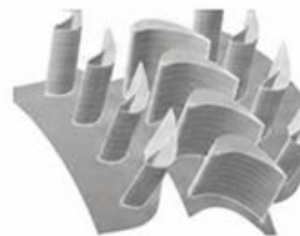


Vários estágios em série

Permitem grandes quedas de pressão e geração de elevado trabalho.

DETALHE DAS PÁS E DO ESCOAMENTO

Perfil das pás



Escoamento do gás sobre as pás



Pás fixas (estatores):

direcionam o gás e transformam a energia de pressão em energia cinética.



Pás móveis (rotores):

extraem a energia cinética do gás, convertendo-a em trabalho no eixo.

APLICAÇÕES TÍPICAS



Aviação: motores a jato e turbofans.



Geração de energia: centrais a gás.



Propulsão naval: turbinas a gás marítimas.



Indústria: compressores e acionamentos de alta potência.



RESUMO: As turbinas axiais utilizam o escoamento na direção do eixo em múltiplos estágios de pás fixas e móveis para converter a energia do gás em trabalho com elevada eficiência, sendo a solução preferida para aplicações de média e alta potência.

Energia do gás (pressão + temperatura) → Trabalho no eixo (rotação)

25.13 Aplicação das Turbinas

As turbinas a gás são máquinas versáteis, compactas e de alta densidade de potência, utilizadas numa ampla gama de aplicações onde são valorizados o peso reduzido, a fiabilidade, a partida rápida e a elevada relação potência/peso.



1) AVIAÇÃO

Propulsão aeronáutica



- Propulsão de aeronaves comerciais, militares e executivas.
- Elevada relação potência/peso e compactabilidade.
- Funcionamento em regime variável e em altitude.
- Exigências críticas de fiabilidade, eficiência e emissões.



2) CENTRAIS ELÉCTRICAS

Geração de eletricidade



- Geração em ciclo simples ou ciclo combinado (maior eficiência).
- Arranque rápido e flexibilidade operacional.
- Suporte à rede elétrica e resposta a picos de procura.
- Emissões inferiores às de centrais a carvão e fuelóleo.



3) PLATAFORMAS OFFSHORE

Produção de energia e compressão



- Geração de eletricidade para sistemas da plataforma.
- Acionamento de compressores (gás lift, reinjeção, exportação).
- Equipamentos compactos e robustos para ambientes severos.
- Alta disponibilidade e baixos requisitos de manutenção.



4) NAVIOS

Propulsão e geração de bordo



- Propulsão principal em navios militares e de alta velocidade.
- Geração de eletricidade para sistemas de bordo.
- Menor volume e peso comparado com motores alternativos.
- Operação com diferentes combustíveis (incl. GNL).



5) TURBOALIMENTADORES

Aumento de desempenho



- Aproveitamento dos gases de escape para comprimir o ar de admissão.
- Aumento da potência e do binário dos motores de combustão interna.
- Melhoria da eficiência volumétrica e redução do consumo específico.
- Aplicação em motores automóveis, industriais e marítimos.

FECHO APLICADO

As turbinas a gás são a tecnologia de eleição sempre que se exige elevada relação potência/peso, arranque rápido, flexibilidade operacional e fiabilidade em ambientes exigentes. A sua aplicação é transversal à aviação, à produção de energia, à indústria de petróleo e gás, ao transporte marítimo e à melhoria do desempenho de motores, contribuindo para sistemas mais eficientes, limpos e competitivos.

- ✓ Alta densidade de potência
- ✓ Flexibilidade e resposta rápida
- ✓ Fiabilidade e disponibilidade
- ✓ Menores emissões que tecnologias convencionais
- ✓ Versatilidade de aplicações

25.14 Tendências Futuras



O FUTURO DAS TURBINAS

As turbinas a gás continuarão a desempenhar um papel essencial na transição energética global. A inovação tecnológica, novos combustíveis e a digitalização irão tornar estas máquinas mais eficientes, limpas, flexíveis e competitivas nas próximas décadas.



1

COMBUSTÍVEIS SUSTENTÁVEIS (SAF)



- Substituição gradual do querosene fóssil por Combustíveis de Aviação Sustentáveis (SAF).
- Redução significativa das emissões de CO₂ ao longo do ciclo de vida.
- Compatíveis com a infraestrutura e motores atuais (drop-in fuels).
- Essenciais para a descarbonização da aviação.

2

H₂ HIDROGÉNIO



- Elevado potencial como combustível de zero carbono.
- Queima limpa: apenas vapor de água como produto da combustão.
- Desafios: armazenamento, transporte, segurança e adaptação de materiais.
- Projetos-piloto já em curso para misturas e 100% H₂.

3

ELECTRIFICAÇÃO HÍBRIDA



- Integração de turbinas a gás com motores elétricos e baterias.
- Maior eficiência global e flexibilidade operacional.
- Redução do consumo específico e das emissões.
- Soluções híbridas para aviação, navios e geração de energia.

4

REDUÇÃO DE EMISSÕES



- Melhoria contínua da eficiência térmica e da relação potência/peso.
- Combustão avançada (muito pobre, pré-misturada, lean-burn).
- Tecnologias de controlo de NO_x e CO₂.
- Captura e utilização de carbono (CCUS) em aplicações estacionárias.

5

INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA MONITORIZAÇÃO



- Monitorização em tempo real com sensores inteligentes.
- Manutenção preditiva e deteção antecipada de falhas.
- Otimização contínua do desempenho e do consumo.
- Maior disponibilidade, fiabilidade e redução de custos operacionais.



VISÃO PARA O FUTURO

As turbinas a gás serão cada vez mais eficientes, sustentáveis e digitais. A combinação de novos combustíveis, eletrificação, controlo avançado e inteligência artificial garantirá um papel central na transição para um sistema energético mais limpo e resiliente.



SUSTENTÁVEL



EFICIENTE



FIÁVEL



INTELIGENTE