

SISTEMAS TÉRMICOS DE POTÊNCIA

PROF. RAMÓN SILVA



Engenharia de Energia

Dourados MS - 2013

GERADOR DE GASES

GERADOR DE GASES

- O conjunto **gerador de gases** é composto basicamente de três componentes: compressor, câmara de combustão e a turbina propriamente dita (Figura 2.15).

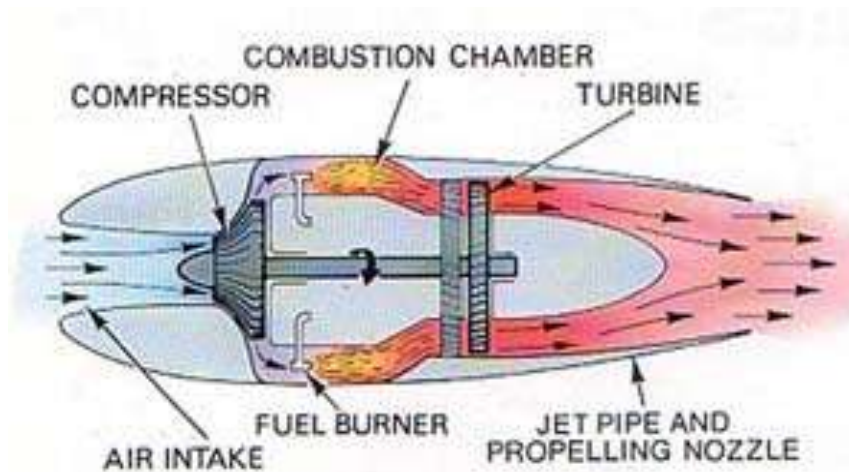


Figura 2.15 -Gerador de gases

GG - COMPRESSORES

- A função do compressor é aumentar a pressão do ar ambiente para a entrada da câmara de combustão.
- A eficiência do ciclo está diretamente correlacionada com a taxa de compressão

GG - COMPRESSORES

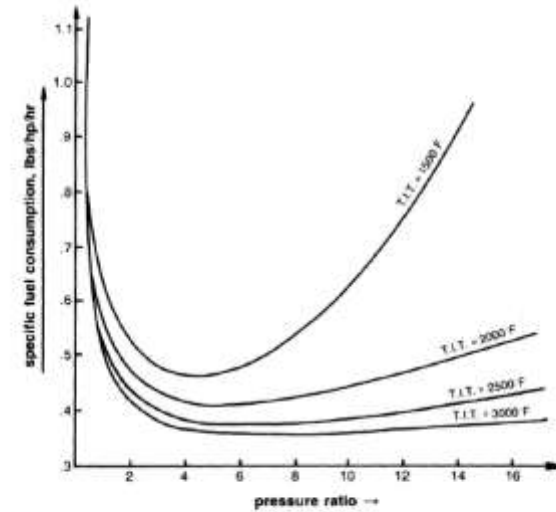
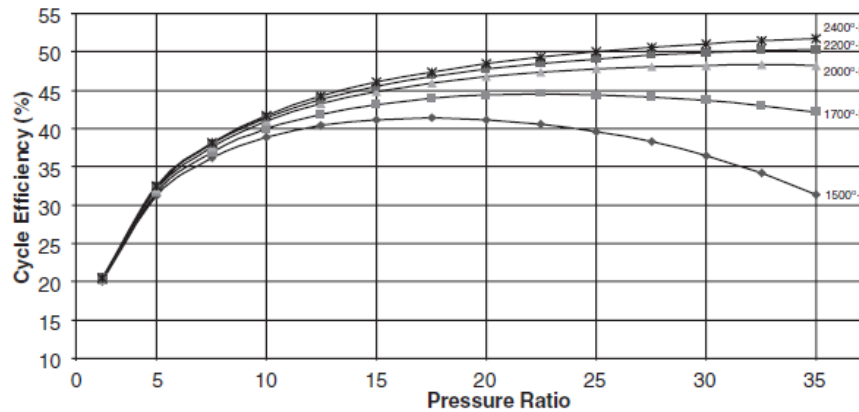
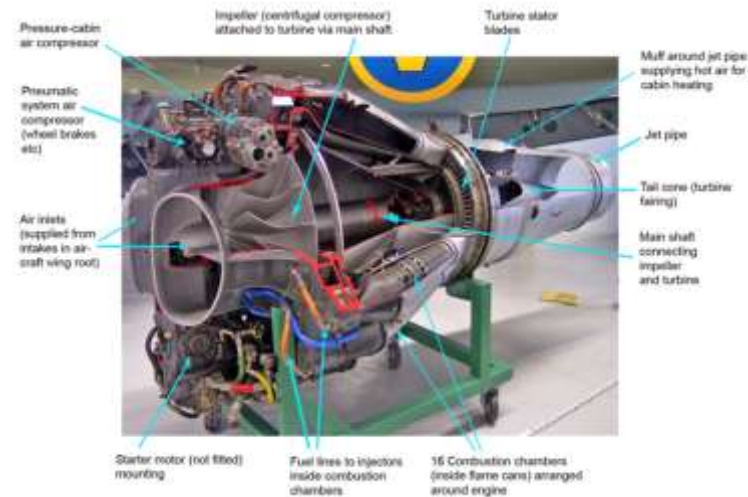
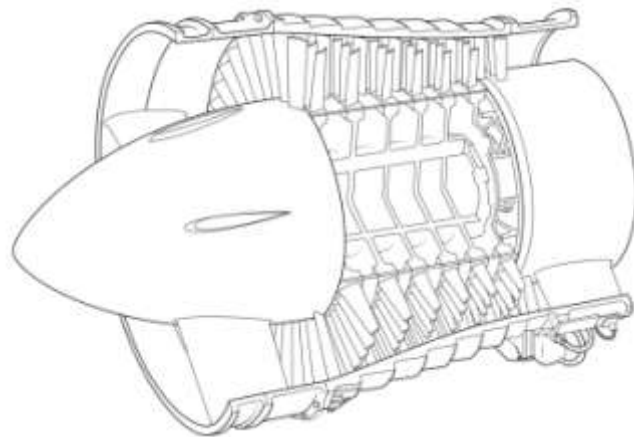


Figure 11-1b. Specific fuel consumption versus pressure ratio and turbine inlet temperature.

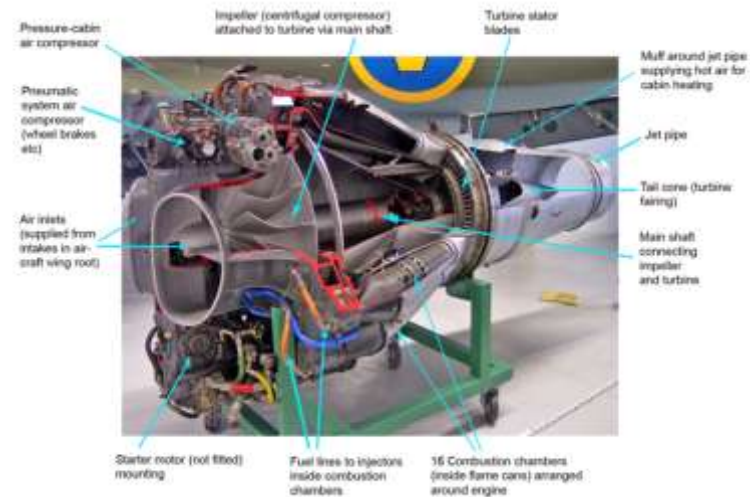
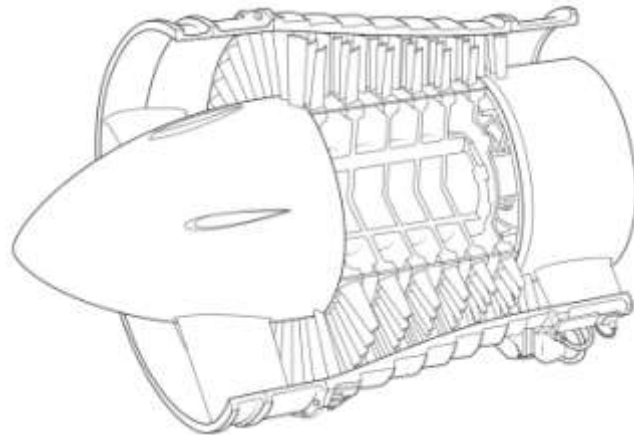
GG - COMPRESSORES

- Os compressores são classificados como **radiais** ou **centrífugos** e **axiais**.



GG - COMPRESSORES

- Os compressores são classificados como **radiais** ou **centrífugos** e **axiais**.



GG – COMPRESSORES RADIAIS

- O **compressor centrífugo** trabalha com pequenas e médias vazões de ar e com altas taxas de compressão, podendo chegar a 12:1 em modelos experimentais.
- Normalmente tem maiores eficiências que os compressores radiais para baixas vazões.

GG – COMPRESSORES RADIAIS

- Os compressores radiais foram a primeira forma de compressão de turbinas a gás e são a principal forma de compressão de turbinas a gás de pequeno porte.



GG – COMPRESSORES RADIAIS

- São utilizados também nos últimos estágios de compressão onde os problemas de tolerância são mais críticos.



Turbina PT6A com último estágio centrífugo

GG – COMPRESSORES RADIAIS

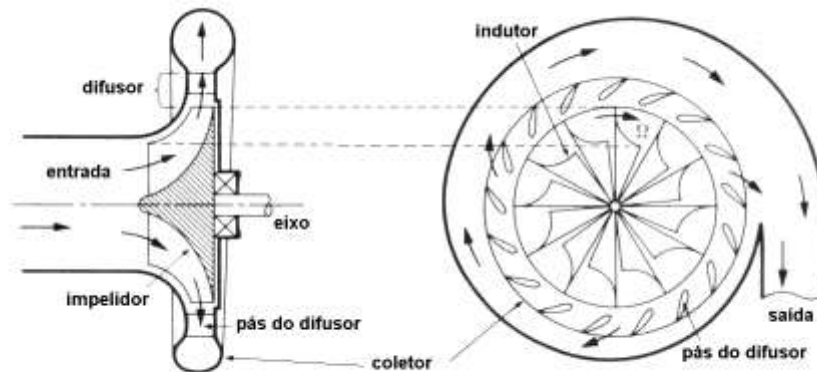
- Utilizado em sistema turbo/compressor para sobrealimentação de motores a pistão de uso aeronáutico ou aumento de potência de motores automotivos.



Compressor centrífugo de um turbocompressor automotivo

GG – COMPRESSORES RADIAIS

- Construtivamente o compressor possui dois componentes principais: o **impelidor** e o **difusor**.



GG – COMPRESSORES RADIAIS

- A função do **impelidor** rotativo ou **rotor** é impor uma velocidade tangencial ao fluxo, promovendo sua desaceleração e o aumento da pressão estática do fluido.
- No **difusor** outra parte da energia cinética do fluxo é convertida em energia de pressão.

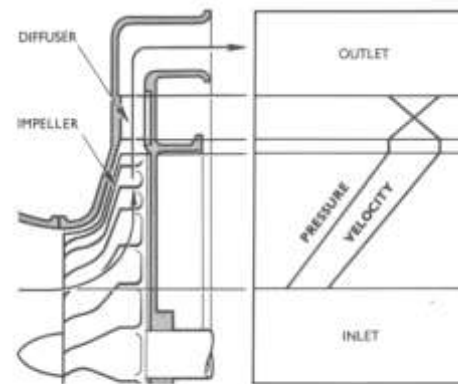


Figure 3-3 Pressure and velocity changes through a centrifugal compressor

GG – COMPRESSORES RADIAIS

- Normalmente o compressor é projetado para que metade da pressão seja gerada no rotor e o restante no impelidor.
- O difusor consiste de palhetas divergentes e tangenciais ao rotor e o aumento de pressão em cada estágio é tal que normalmente não se utilizam mais do que dois estágios.



GG – COMPRESSORES RADIAIS

- As pás do impelidor podem ser curvadas de forma que o escoamento de ar tenha uma entrada suave no difusor.



GG – COMPRESSORES AXIAIS

- O **compressor axial** é constituído uma série de palhetas com perfil aerodinâmico (a) engastadas em um disco chamado de **rotor** (b) e um conjunto estacionário de palhetas de perfil aerodinâmico colocadas ao longo da carcaça chamado **estator** (c).



- Cada conjunto rotor/estator é chamado de estágio, sendo que o compressor é formado por uma série de estágios

GG – COMPRESSORES AXIAIS

- entrada para a saída do compressor existe uma redução da área anular.
- Isso acontece para manter a velocidade média do ar aproximadamente constante a medida que a densidade do ar aumenta através do comprimento do compressor.

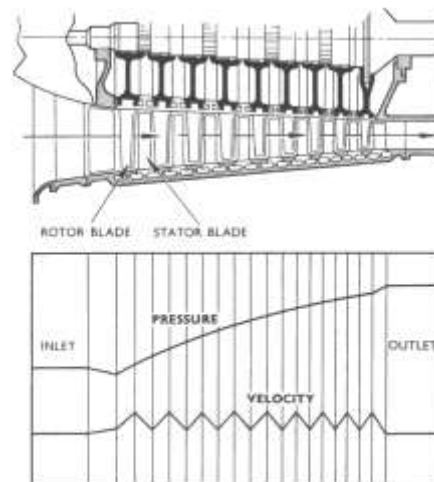


Figure 3-9 Pressure and velocity changes through an axial compressor

GG – COMPRESSORES AXIAIS

- Alguns projetos de compressores têm dois ou mais compressores ou carretéis, os quais são acionados por diferentes turbinas e são portanto livres para girar em diferentes velocidades.



Motor com dois eixos e dois carretéis de compressor - GEJ85-5

GG – COMPRESSORES AXIAIS

- Conforme pode-se observar o fluido de trabalho é inicialmente acelerado pelo rotor e então desacelerado no estator onde a energia cinética transferida no rotor é transformada em energia de pressão.
- O processo é repetido em vários estágios, tantos quanto forem necessários para atingir a razão de pressão necessária.

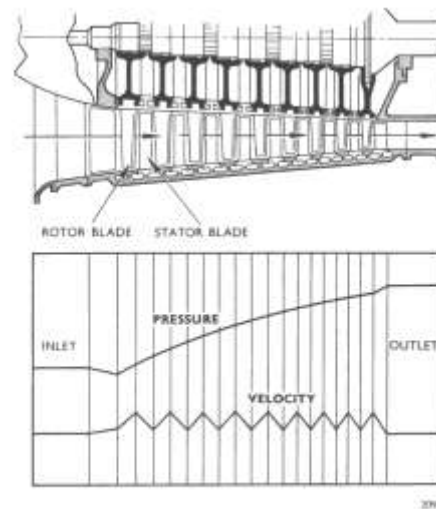
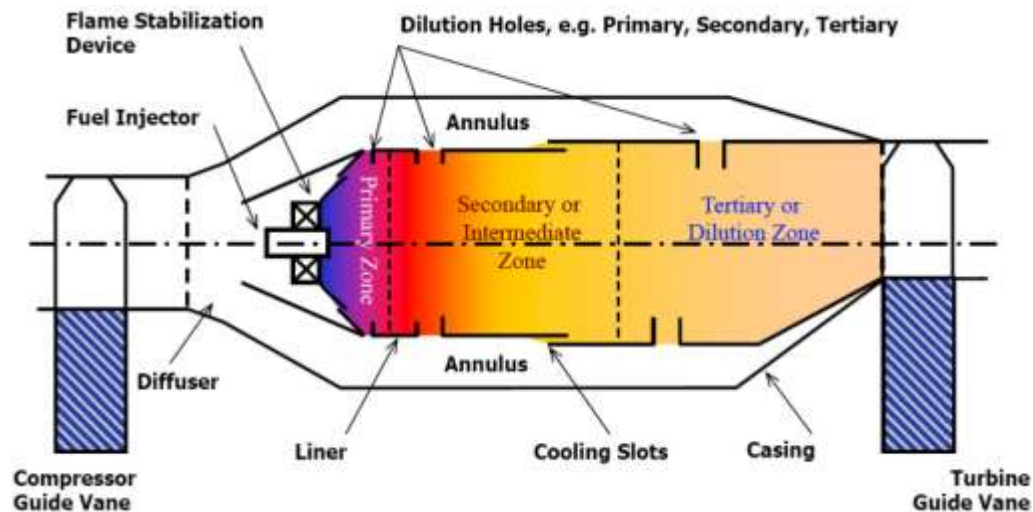


Figure 3-9 Pressure and velocity changes through an axial compressor

CÂMARA DE COMBUSTÃO

- Na câmara de combustão, o ar pressurizado do compressor é misturado ao combustível e ignitado.
- Após a combustão na câmara os gases queimados seguem em direção à turbina.



CÂMARA DE COMBUSTÃO

- LEFEBVRE (1999) define como características necessárias à câmara de combustão:
 - Elevada eficiência da combustão, o combustível deve ser completamente oxidado de forma que toda energia química seja liberada na forma de calor;
 - Fácil ignição, em solo a baixa temperatura ou em caso de apagamento da chama a elevadas altitudes;
 - Limite de estabilidade amplo, de acordo com os regimes de operação do motor;
 - Indiferença às pulsações, pressões e outras instabilidades induzidas pela combustão;
 - Perda de pressão reduzida;

CÂMARA DE COMBUSTÃO

- LEFEBVRE (1999) define como características necessárias à câmara de combustão:
 - Uniformidade de temperatura na saída da câmara de maneira a maximizar a vida útil da turbina;
 - Manutenção da combustão unicamente na câmara, sem deslocamento da chama após a saída dos gases;
 - Baixa emissão de poluentes (fuligem, CO, hidrocarbonetos não queimados, NO_x , SO_2);
 - Dimensionamento compatível ao propósito do motor;
 - Baixo custo de projeto, desenvolvimento e manutenção;
 - Durabilidade; e
 - Capacidade de operar com vários combustíveis.

CÂMARA DE COMBUSTÃO

- As variáveis que afetam a operação do combustor são: pressão, temperatura do ar de entrada, razão ar/combustível e velocidade de escoamento.

- Conforme Lefebvre (1983) Estas variáveis podem afetar:
 - a) **eficiência de combustão**
 - b) **faixa de estabilidade de operação**
 - c) **distribuição de temperatura**
 - d) **partida**
 - e) **depósito de carbono**
 - f) **temperatura e resfriamento**

CÂMARA DE COMBUSTÃO

- **eficiência de combustão** - um aumento na pressão do ar de entrada no combustor aumenta a eficiência de combustão. O aumento da razão combustível/ar aumenta a eficiência de combustão até um certo valor. O enriquecimento da mistura diminui a eficiência de combustão;

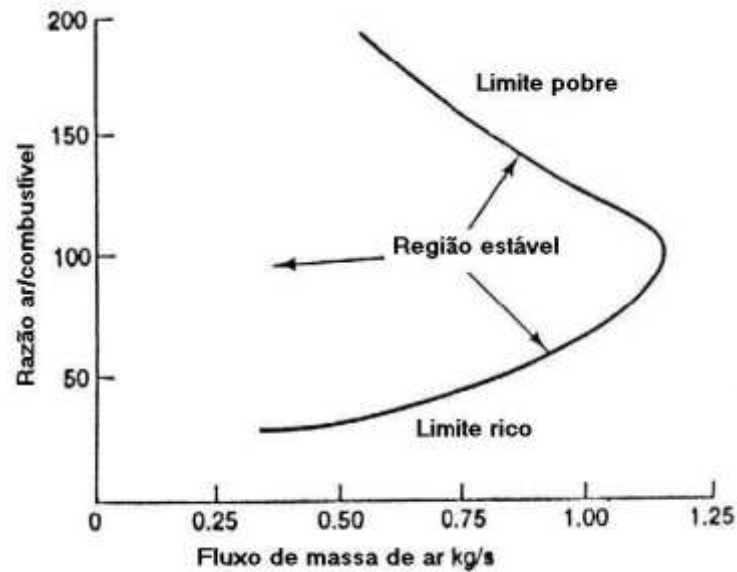


CÂMARA DE COMBUSTÃO

- **faixa de estabilidade de operação** - muda com a variação de pressão e a velocidade do escoamento.
- A diminuição da pressão diminui a faixa de operação até não haver mais queima.
- Se a velocidade aumenta, a faixa de operação diminui até atingir a velocidade crítica, acima da qual a combustão não ocorrerá.
- A velocidade dos escoamento também afeta a razão ar/combustível reduzindo os limites da mistura rica e pobre onde a combustão é estável.

CÂMARA DE COMBUSTÃO

- faixa de estabilidade de operação



Curva de estabilidade (Cohen & Rogers, 1954)

CÂMARA DE COMBUSTÃO

- **distribuição de temperatura** - se a razão combustível/ar e a velocidade do escoamento são aumentadas, a temperatura de saída do combustor tende a ficar menos uniforme porque mais calor é liberado e existe menos tempo para a mistura na zona de diluição;



CÂMARA DE COMBUSTÃO

- **partida** - a partida normalmente é fácil se a temperatura e a pressão são altas e a velocidade de escoamento baixa. Além disso existe um valor ótimo de razão ar/combustível para a partida, abaixo ou acima do qual a partida se torna mais difícil;



CÂMARA DE COMBUSTÃO

- **depósito de carbono** - o aumento da razão combustível/ar provoca uma tendência no aumento do depósito de carbono na câmara por causa da diminuição da proporção de oxigênio na zona de combustão, o que dificulta a oxidação do combustível;



CÂMARA DE COMBUSTÃO

- **depósito de carbono** - o aumento da razão combustível/ar provoca uma tendência no aumento do depósito de carbono na câmara por causa da diminuição da proporção de oxigênio na zona de combustão, o que dificulta a oxidação do combustível;



CÂMARA DE COMBUSTÃO

- **temperatura e resfriamento** - se a temperatura e a pressão do ar de entrada da câmara de combustão são aumentadas, mais calor é transferido dos gases quentes para o tubo de chama.
- Se a razão ar/combustível aumenta, a temperatura da combustão se torna mais elevada e novamente a temperatura do tubo de chama aumenta.
- Por outro lado o aumento da velocidade de escoamento na região anular entre o tubo de chama e a carcaça melhora a troca de calor por convecção, o que reduz a temperatura.

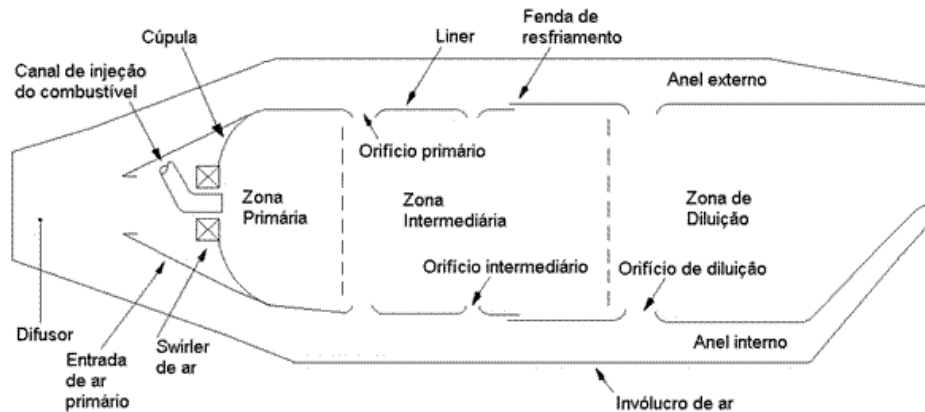


CÂMARA DE COMBUSTÃO

- Para motores aeronáuticos, tamanho e peso são as características mais importantes a ser observadas.
- Para motores industriais, o tempo de vida e capacidade de operar com vários combustíveis se torna mais importante.
- Baixo consumo e emissões de poluentes são desejáveis para qualquer tipo de motor (LEFEBVRE, 1999).

CÂMARA DE COMBUSTÃO

- Uma câmara de combustão é dividida em três zonas principais: **zona primária**, **zona intermediária** e **zona de diluição**.

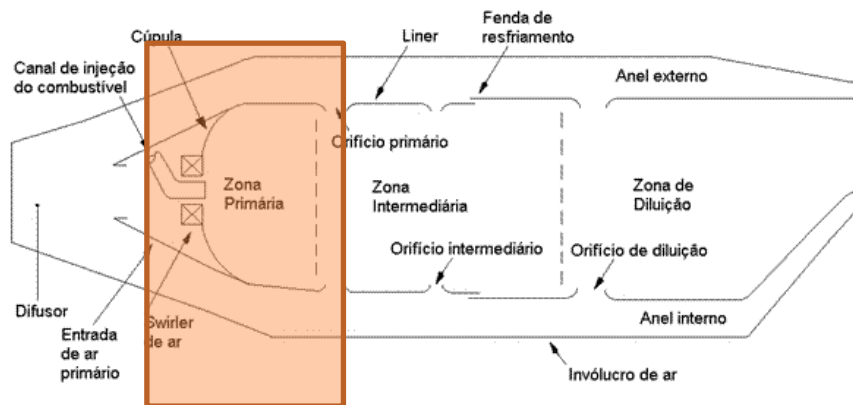


região primária região intermediária região de diluição



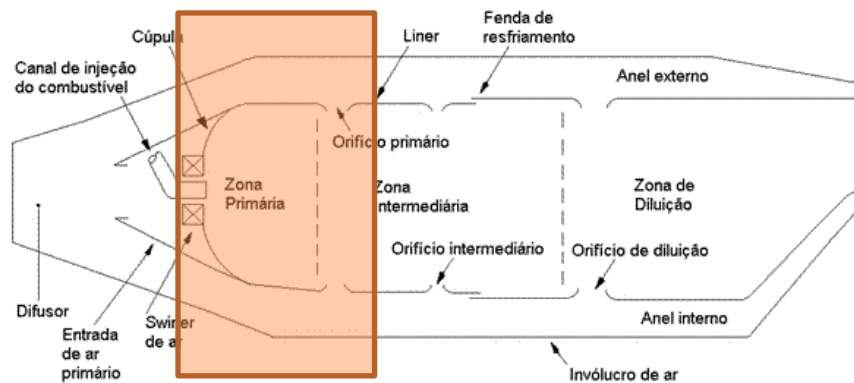
CÂMARA DE COMBUSTÃO

- A **zona primária** é a região onde o combustível é injetado e a combustão é próxima a estequiométrica. Entre 15 a 20% do fluxo de ar proveniente do compressor é admitido nessa região e é onde ocorre a maior parte da combustão



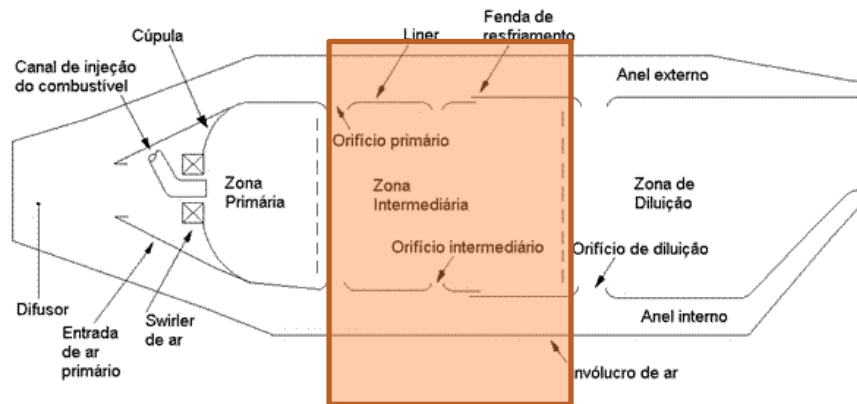
CÂMARA DE COMBUSTÃO

- A função da zona primária é a de ancorar a chama garantindo tempo, temperatura e turbulência suficiente para que a mistura ar/combustível encontre combustão completa (LEFEBVRE, 1999).



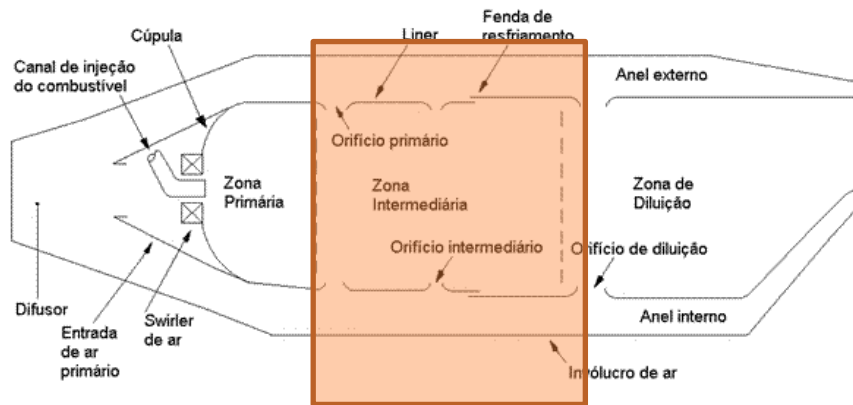
CÂMARA DE COMBUSTÃO

- A **zona intermediária** ou **zona secundária** segue como uma extensão da zona primária, terminando a combustão que eventualmente chegue incompleta. Recebe aproximadamente 30% do fluxo de ar (LACAVA, 2003).



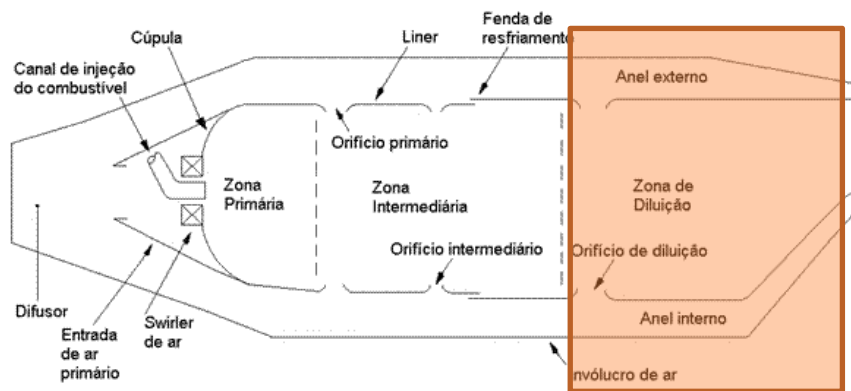
CÂMARA DE COMBUSTÃO

- Se na zona primária as temperaturas são superiores a 2000K, reações de dissociação podem resultar em concentrações significantes de CO e H₂ nos gases de saída. Temperaturas intermediárias na zona intermediária evitam o resfriamento rápido do CO e de hidrocarbonetos não queimados.



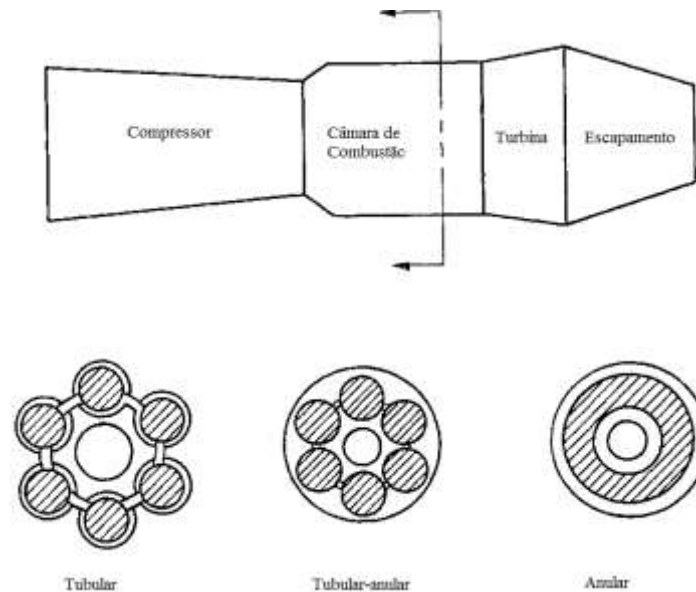
CÂMARA DE COMBUSTÃO

- Na **zona de diluição** o restante do fluxo de ar saído do compressor é misturado ao ar admitido promovendo um controle de temperatura na entrada da turbina e reduzindo a temperatura dos gases de combustão a valores aceitáveis pelas palhetas da turbina (LEFEBVRE, 1999).



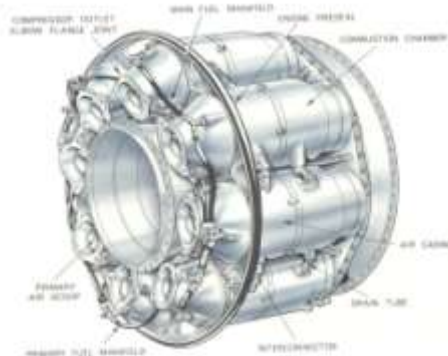
CÂMARA DE COMBUSTÃO

- Ainda de acordo com LEFEBVRE (1999), as câmaras de combustão podem ser divididas em três configurações típicas: tubular, anular e tubo-anular.



CÂMARA DE COMBUSTÃO

- A **configuração tubular** consiste em um tubo de chama montado concentricamente a uma camisa cilíndrica.
- Sua grande vantagem é o fato de ser simples de projetar e construir, porém possui peso e tamanho que a tornam proibitiva para a utilização em aeronaves, porém,
- a facilidade de acesso e manutenção a torna interessante para a utilização em unidades industriais.



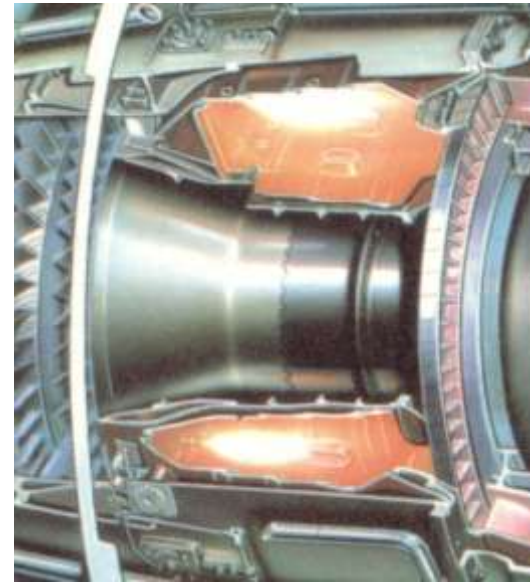
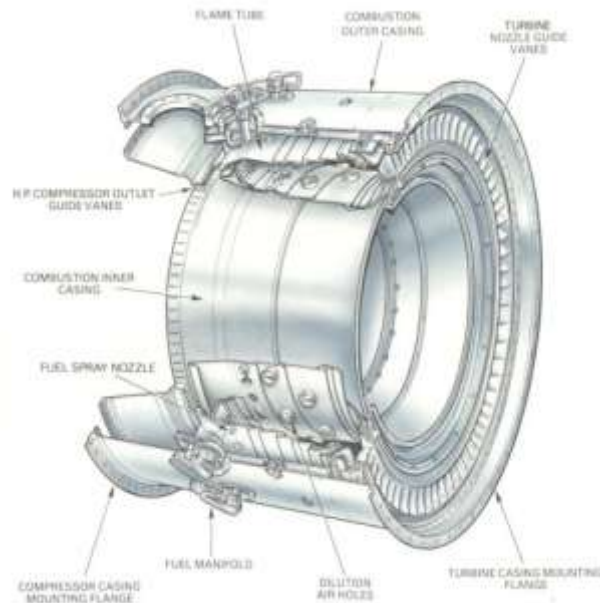
CÂMARA DE COMBUSTÃO

- A câmara de combustão **anular** é empregada principalmente em motores aeronáuticos em razão de sua menor área frontal (BOYCE, 2006).



CÂMARA DE COMBUSTÃO

- Consiste de uma estrutura circular de quatro cilindros concêntricos ao eixo de acionamento do motor, os cilindros formam entre si três passagens anulares



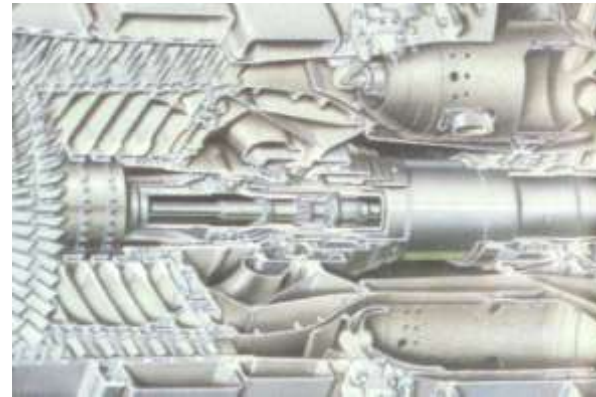
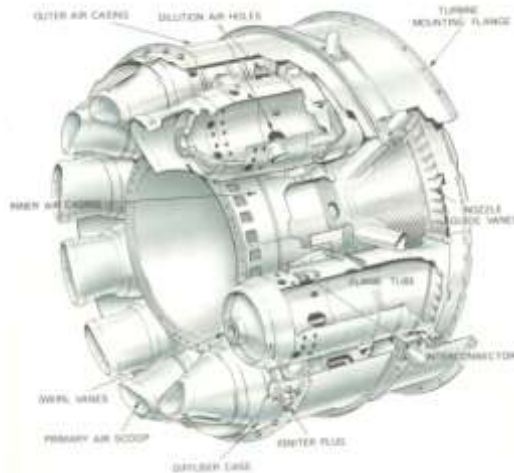


CÂMARA DE COMBUSTÃO

- As principais características desta configuração são:
 - melhor mistura do ar com o combustível,
 - maior tempo de residência,
 - boa razão entre área interna e fluxo de ar, facilitando o arrefecimento, baixa perda de pressão,
 - menor área frontal, baixa rigidez, e
 - manutenção dificultada (necessidade de remoção do motor para desmontagem e inspeção).

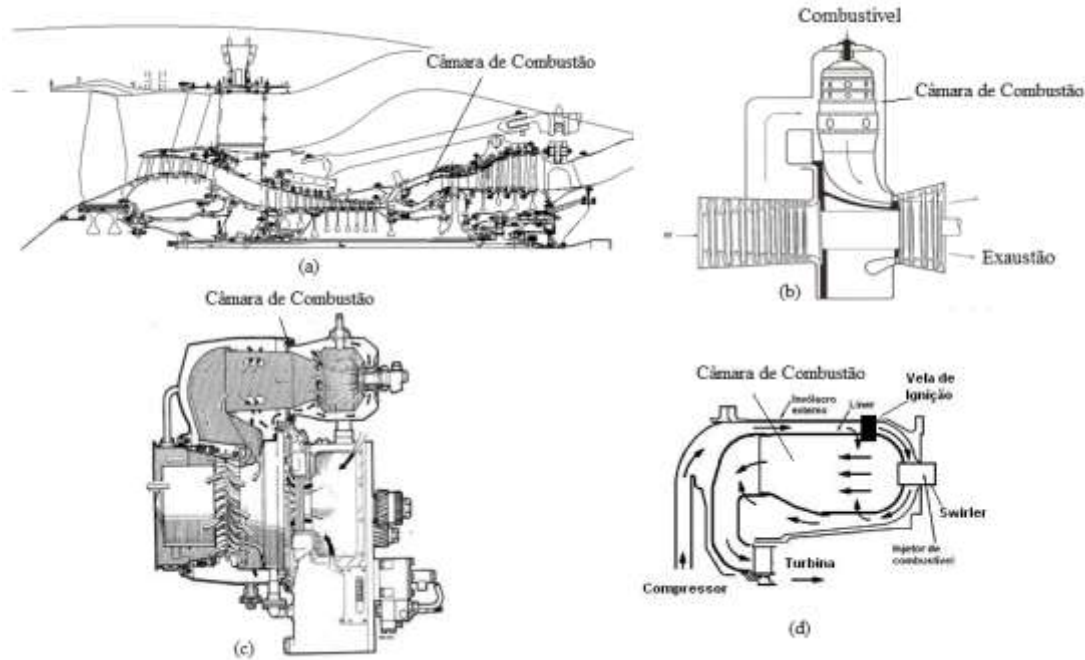
CÂMARA DE COMBUSTÃO

- A configuração **tubular-anular**, adequada para compressores axiais, é um arranjo das duas outras combinações combinando suas vantagens.



CÂMARA DE COMBUSTÃO

- Configurações.



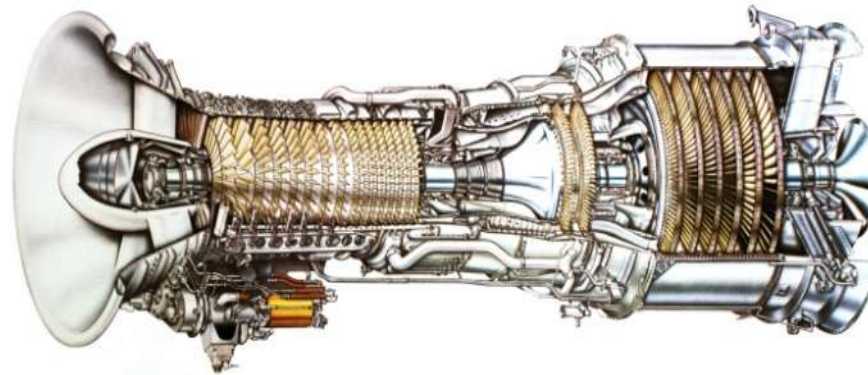


TURBINAS

- A turbina tem a tarefa de fornecer potência para acionar o compressor e os acessórios, e no caso de turbinas a gás não utilizadas para propulsão, fornecer potência de eixo.
- A turbina extrai energia dos gases quentes provenientes da câmara de combustão promovendo a expansão para uma temperatura e pressão.
- Assim como os compressores, as turbinas também são classificadas em **radiais** ou **centrífugas** e **axiais**.

TURBINAS AXIAIS

- A grande maioria das aplicações utilizam turbinas de fluxo axial.
- A turbina de fluxo axial tem a mesma forma construtiva que o compressor de fluxo axial e assim como este pode ser composta de vários estágios.



Turbina aeroderivativa LM2500 - GE

TURBINAS AXIAIS

- A figura mostra a variação de pressão, temperatura, velocidade e energia em uma turbina de fluxo axial.

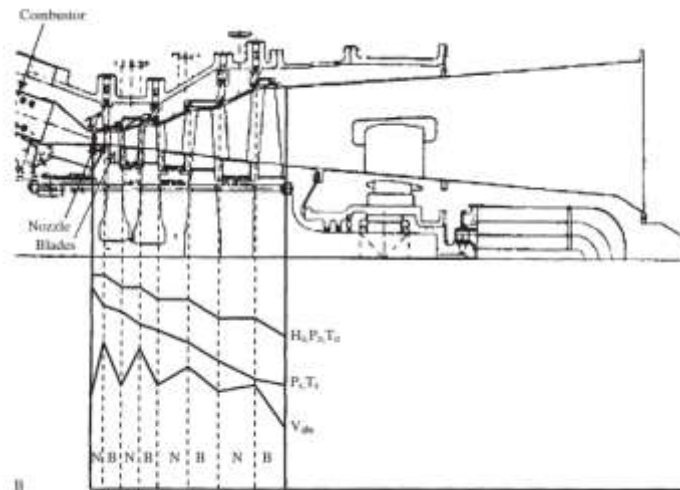
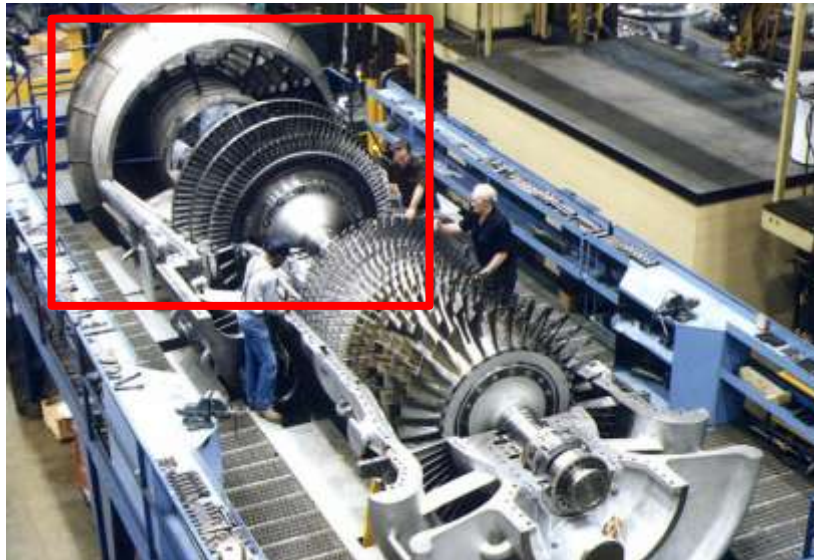


Figure 9-1. Schematic of an axial flow turbine flow characteristics.

TURBINAS AXIAIS

- Para produzir o torque necessário a turbina pode ter vários estágios, cada um com um empalhetamento estacionário, estator ou bocal, e um empalhetamento rotativo, rotor.
- O número de estágios depende da relação entre a potência necessária retirada do gás, rotação a ser produzida e o diâmetro permitido para o projeto.



TURBINAS AXIAIS

- Existem três tipos de turbina axial:
 - ação,
 - reação
 - combinada.

TURBINAS AXIAIS

- Na turbina tipo **ação** a queda de pressão total através de cada estágio ocorre no estator, que pela sua forma convergente aumenta a velocidade do gás.
- O gás é direcionado para dentro das palhetas do rotor, que sofrem a ação de uma força impulsiva causada pelo impacto do gás nas palhetas.

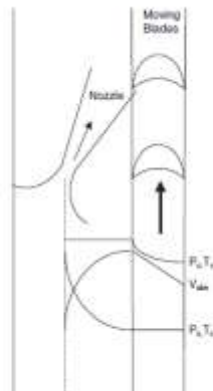


Figure 9-6. Schematic of an impulse turbine showing the variation of the thermodynamic and fluid mechanical properties.



TURBINAS AXIAIS

- Nas turbinas a **reação** as palhetas do estator são projetadas para alterar a direção do fluxo do gás sem mudar a pressão.
- As passagens convergentes entre as palhetas produzem uma força de reação, resultado da expansão e da aceleração do gás.

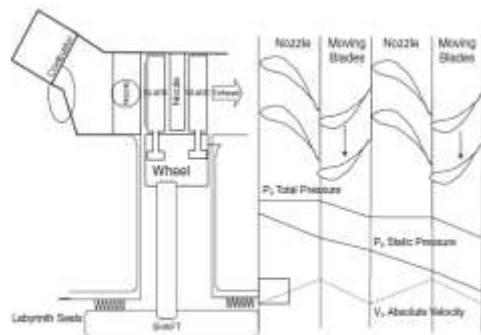
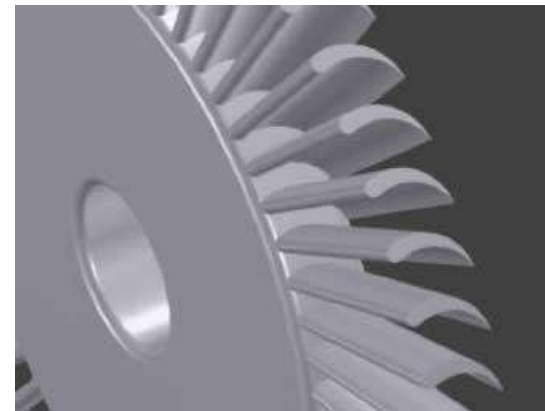


Figure 9-10. Schematic of a reaction-type turbine showing the distribution of the thermodynamic and fluid mechanic properties.





TURBINAS AXIAIS

- Normalmente as turbinas a gás utilizam uma forma **combinada** de turbinas de ação e reação.

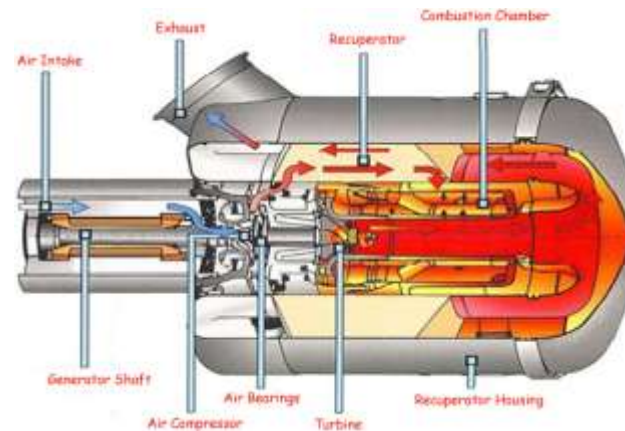


TURBINAS RADIAIS

- Em uma turbina de fluxo **radial** o fluxo de gás com alta velocidade radial é direcionado ao interior do rotor e deixa a carcaça com uma velocidade baixa, próxima à velocidade de rotação do rotor.

TURBINAS RADIAIS

- A turbina centrífuga é bastante similar ao compressor centrífugo e opera com baixos fluxos de maneira mais eficiente que a turbina axial e é largamente utilizada em turbocompressores automotivos e microturbinas.





BIBLIOGRAFIA

Boyce, M. P. Gas turbine engineering handbook Boston Gulf, ;
c2006. 936 p. : il.

Cohen, H. Rogers, G.F.C. Saravanamuttoo, H.I.H., Gas turbine
theory.E, Pearson, 5th Ed. 2001

Lacava, P.T. Propulsão aeronáutica (PRP-20) ____ . Apostila.
Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos SP

Lefebvre, A. H., 1983. "Gas turbine combustion", Taylor & Francis.

Lora, E.E.S. Nascimento M.A.R. Geração termelétrica:
planejamento, projeto e operação. Ed. Interciência, 1º ed 2004

Mazurenko, A.S., Souza, Z. e Lora, E.E.S. Máquinas térmicas de
fluxo. Ed. Interciência, 1º ed 2013