



# Máquinas Térmicas Turbinas a Gas

Jurandir Itizo Yanagihara



## Geração Elétrica com Turbinas a Gas

- Capacidade Instalada EUA (2010) – 1.137 GW(e)
- Turbinas a Gas respondem por 32 % desta capacidade instalada = 364 GW(e)
- Previsão da DoE: em 2020, TG responderá por 39% da capacidade instalada de geração de energia elétrica nos EUA
- No caso do Brasil => previsão de aumento da capacidade instalada.



## Vantagens da Turbina a Gas

- Vantagens
  - Turbinas a gás tendem a ser mais compactas, isto é, tem uma maior razão potência/peso (até 70% em relação a outros motores). Por isso, elas são adequadas para sistemas de transportes como aviões, navios e até mesmo transporte terrestre.
  - Partida e parada mais rápidas.
  - Tempo de resposta baixo.
  - Equipe de operação e manutenção reduzida.
  - Consome menos matéria prima na fabricação.
  - Menor custo.
  - Produz menos vibração.
  - (Quase) não requer água de resfriamento.



## Desvantagens da Turbina a Gas

- Desvantagens
  - Menor potência específica.
  - Menor eficiência.
  - Menor vida útil.
  - Mais sensível à qualidade do combustível.
  - Muitos componentes sob alta tensão mecânica.
  - Ruído de alta frequência.
  - Necessidade de grande quantidade de ar.
  - Produção de grande quantidade de gases quentes (objetivo).
  - Não pode ser consertado na planta.



## Ciclo de Turbina a Gas

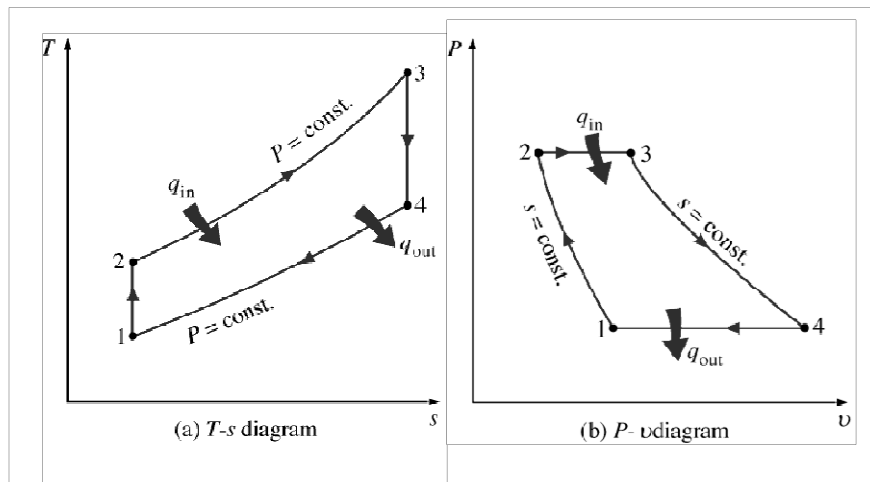
EXHAUST  
GAS

Turbina a Gas

Jurandir Itizo Yanagihara



## Ciclo Brayton

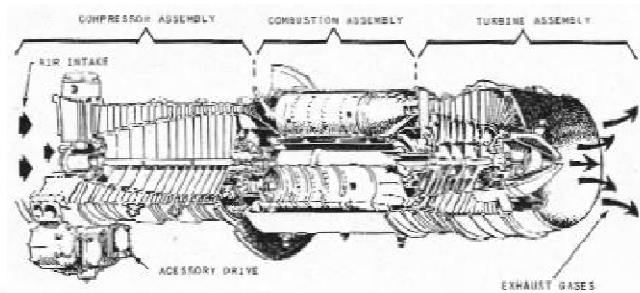
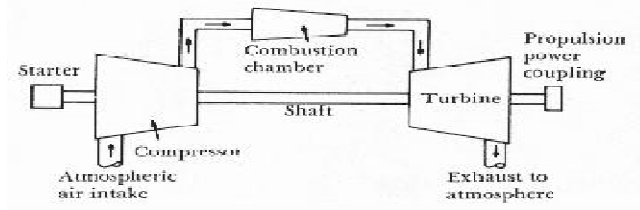


Turbina a Gas

Jurandir Itizo Yanagihara



## Componentes Básicos

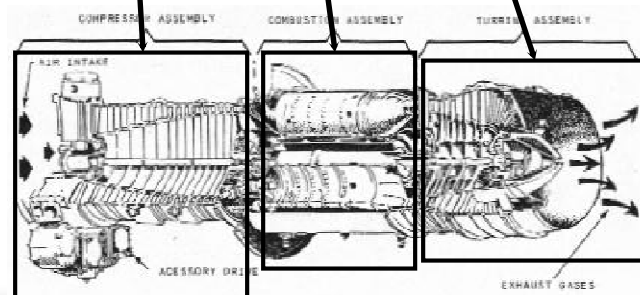
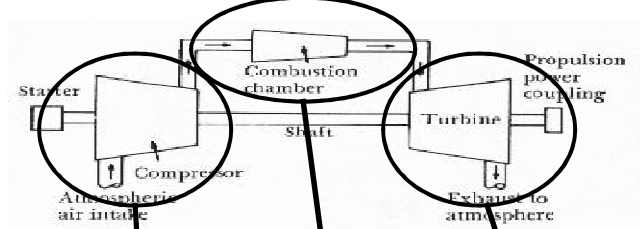


Turbinas a Gas

Jurandir Itzo Yanagihara



## Componentes Básicos



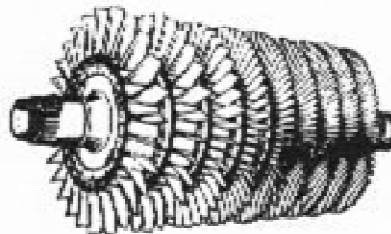
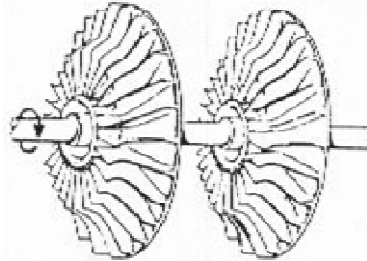
Turbinas a Gas

Jurandir Itzo Yanagihara



## Compressor

- Compressor Radial
  - Projeto simples.
  - Adequado para baixas taxas de compressão.
  - Difícil de estagiar.
  - Menos eficiente.
- Compressor Axial
  - Adequado para altas taxas de compressão (20:1).
  - Mais comumente utilizado.
- Seções
  - Para assegurar máxima eficiência e flexibilidade, o compressor pode ser dividido nas seções de alta pressão e baixa pressão.



Turbina a Gas

Jurandir Itizo Yanagihara



## Distribuição do Ar do Compressor

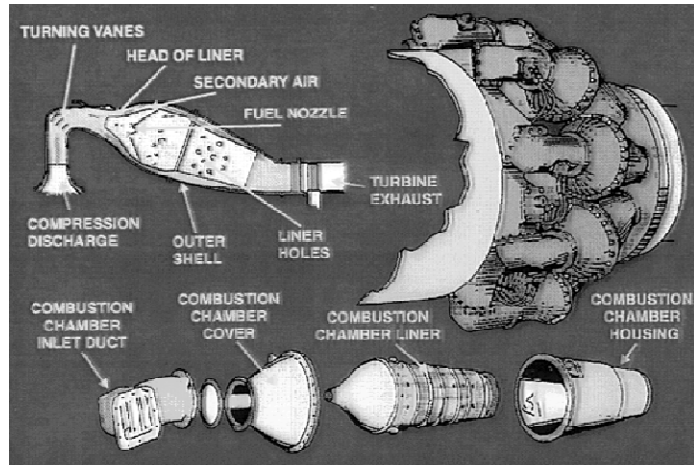
- Ar primário (30%)
  - Ar que vai diretamente para o combustor, para alimentar o processo de combustão.
- Ar secundário (65%)
  - Passa através de furos na carcaça do combustor para misturar com ar e resfriar os gases de combustão.
- Ar para resfriamento das palhetas (5%)
  - Protege e resfria as palhetas dos estágios iniciais da turbina.

Turbina a Gas

Jurandir Itizo Yanagihara



## Câmara de Combustão



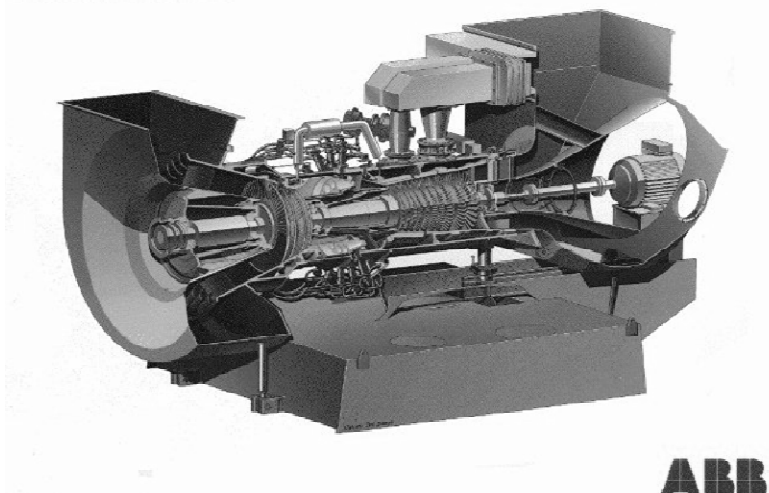
Turbina a Gas

Jurandir Itizo Yanagihara



## Turbina a Gas

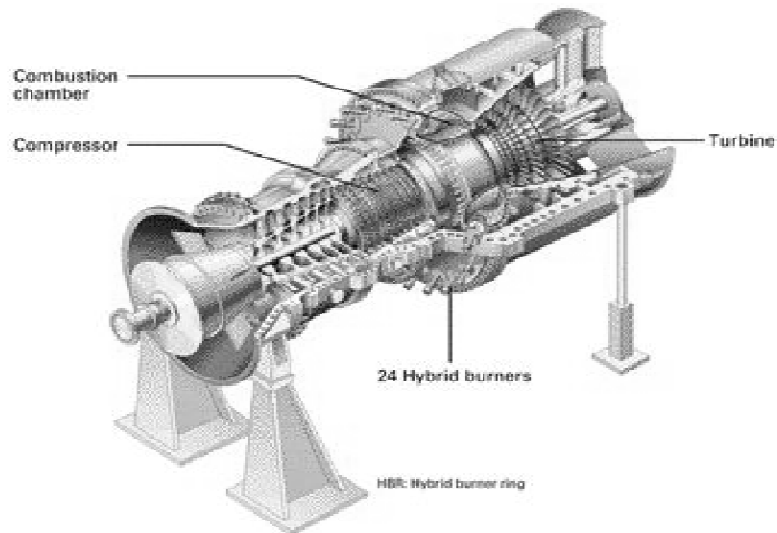
25MW Gas Turbine GT10



Turbina a Gas

Jurandir Itizo Yanagihara

## Turbina a Gas



Turbina a Gas

Jurandir Itizo Yanagihara

## Eficiência do Ciclo Brayton

- O Ciclo Brayton ideal tem eficiência térmica dada por

$$\eta_{\text{Brayton}} = 1 - \frac{1}{r_p^{1/k}}$$

onde  $r_p = P_{\text{max}}/P_{\text{min}}$  é a razão de pressão e  $k$  é a razão de calores específicos.

- A eficiência térmica de um Ciclo Brayton simples aumenta com o aumento da razão de pressão.

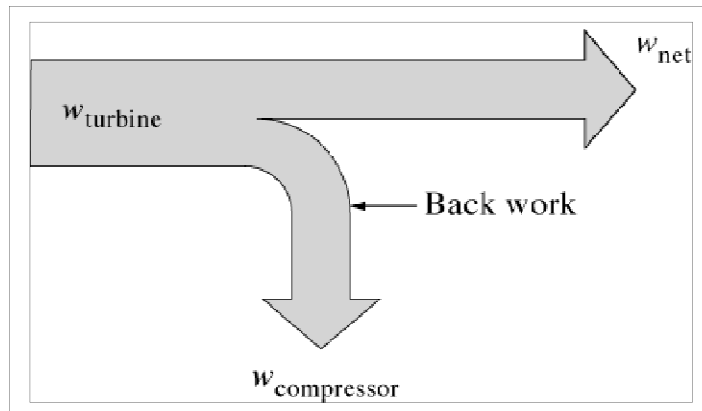
Turbina a Gas

Jurandir Itizo Yanagihara



## Razão de Potência

- Parcela significativa da potência da turbina é utilizada para acionar o compressor (back-work).

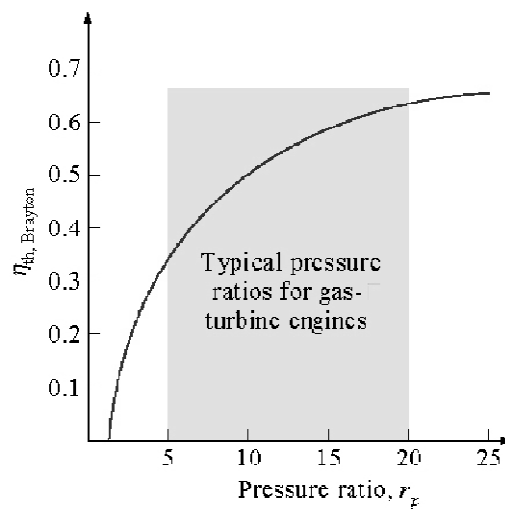


Turbina a Gas

Jurandir Itizo Yanagihara



## Eficiência do Ciclo Brayton



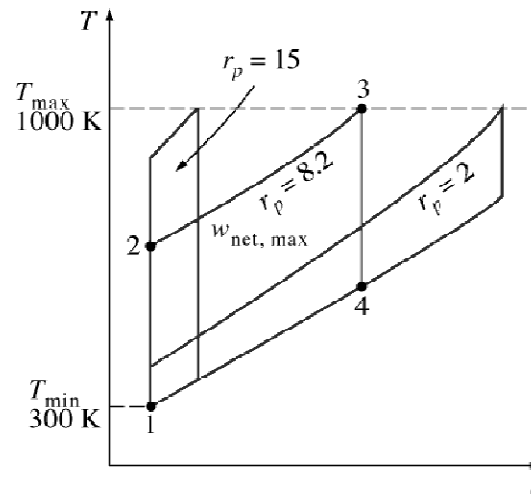
Turbina a Gas

Jurandir Itizo Yanagihara





## Trabalho Líquido do Ciclo Brayton

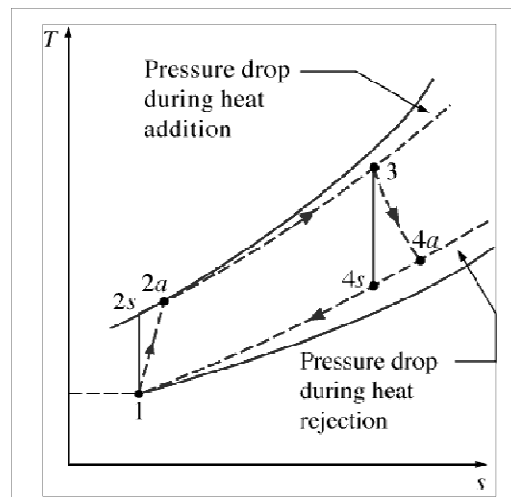


Turbina a Gas

Jurandir Itizo Yanagihara



## Desvio do Ciclo Brayton

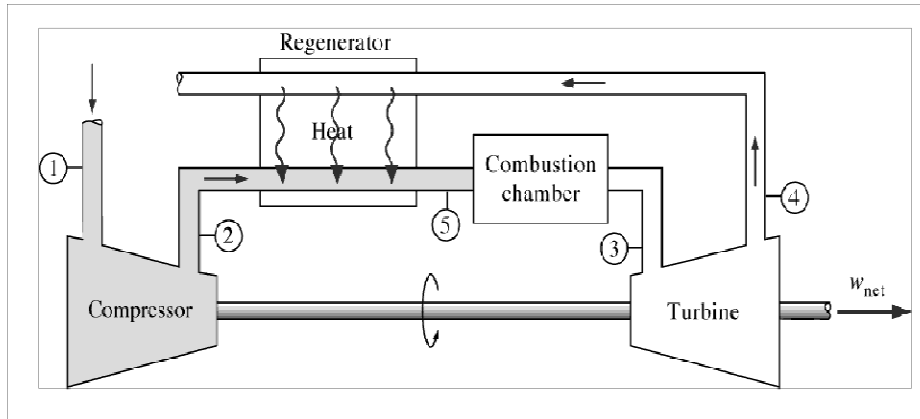


Turbina a Gas

Jurandir Itizo Yanagihara



## Ciclo Brayton com Regenerador

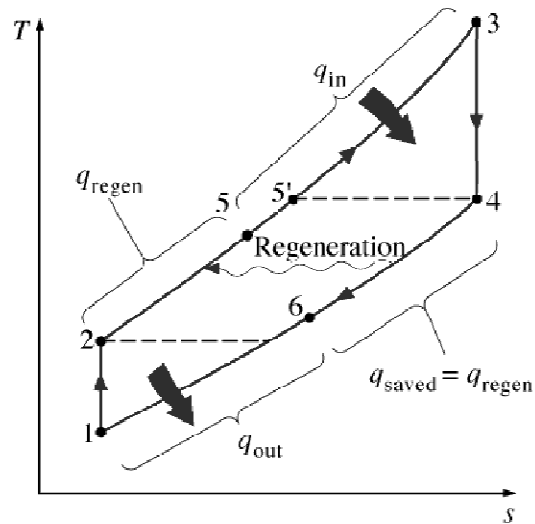


Turbina a Gas

Jurandir Itizo Yanagihara



## Diagrama T-s : TG com Regenerador



Turbina a Gas

Jurandir Itizo Yanagihara



## Eficiência: TG com Regenerador Ideal

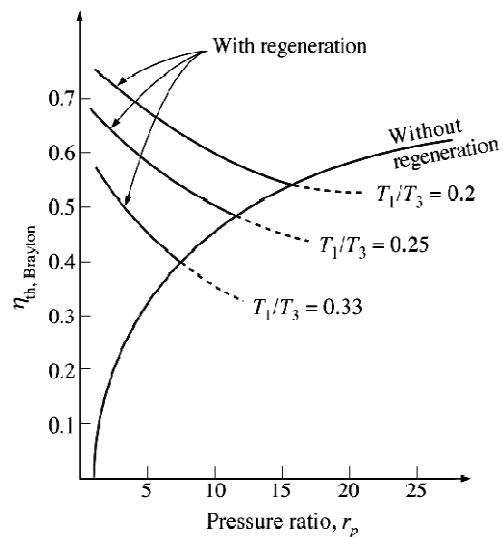
- O Ciclo Brayton ideal com um regenerador tem eficiência térmica dada por

$$\eta_{\text{Brayton}} = 1 - \left( \frac{T_1}{T_3} \right)^{\frac{k-1}{k}}$$

onde  $r_p = P_{\text{max}}/P_{\text{min}}$  é a razão de pressão,  $k$  é a razão de calores específicos,  $T_1$  é a menor temperatura e  $T_3$  é a maior temperatura do ciclo.

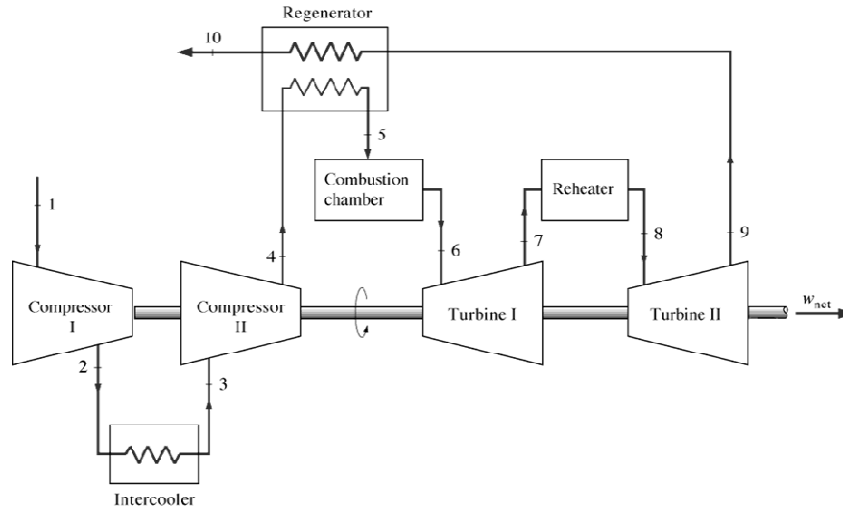


## Eficiência Térmica : TG com Regenerador





## TG com "Intercooler", Reaquecedor e Regenerador

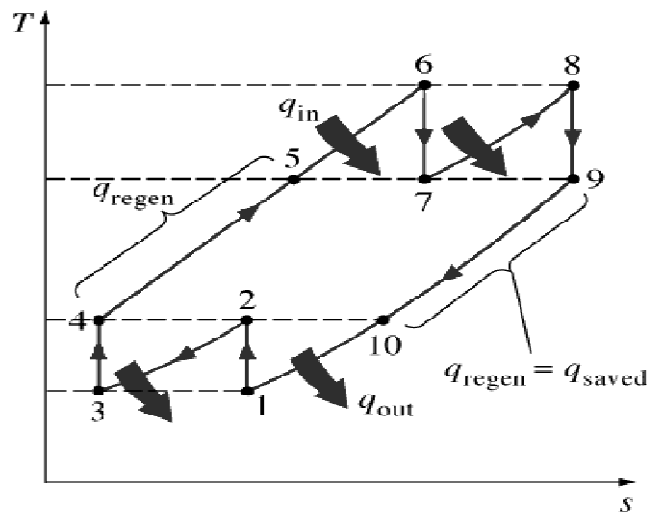


Turbina a Gas

Jurandir Itizo Yanagihara



## Diagrama T-s : TG com "Intercooler", Reaquecedor e Regenerador



Turbina a Gas

Jurandir Itizo Yanagihara





## Economia na Geração com Turbinas a Gas

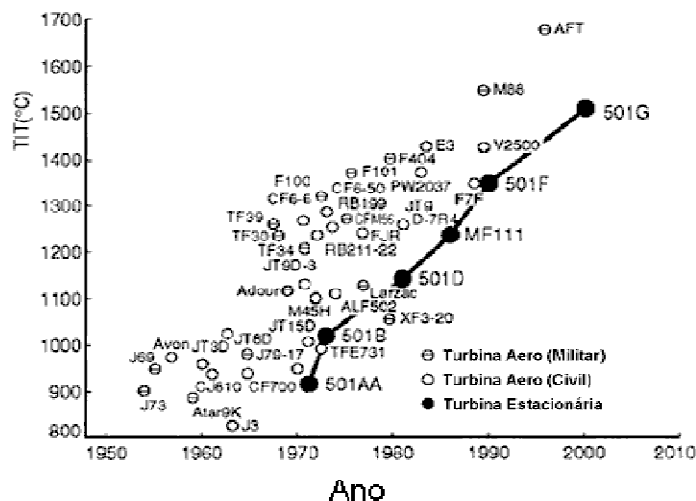
- Capacidade Instalada – EUA (2010) – 1.137 GW(e)
- TG => 32 % desta capacidade instalada = 364 GW(e)
- Considerando custo de combustível de US\$ 10 por milhão de BTU e fator de carga = 100% (365 dias/ano, 24 h/dia)
- Aumento de 1% na eficiência das turbinas a gás utilizadas (40% para 41%)
- Economia = US\$ 8,64 bilhões
- Previsão da DoE: em 2020, TG responderá por 39% da capacidade instalada de geração de energia elétrica nos EUA
- No caso do Brasil => aumento da capacidade instalada

Turbina a Gas

Jurandir Itizo Yanagihara



## Evolução Anual da Temperatura de Entrada da Turbinas

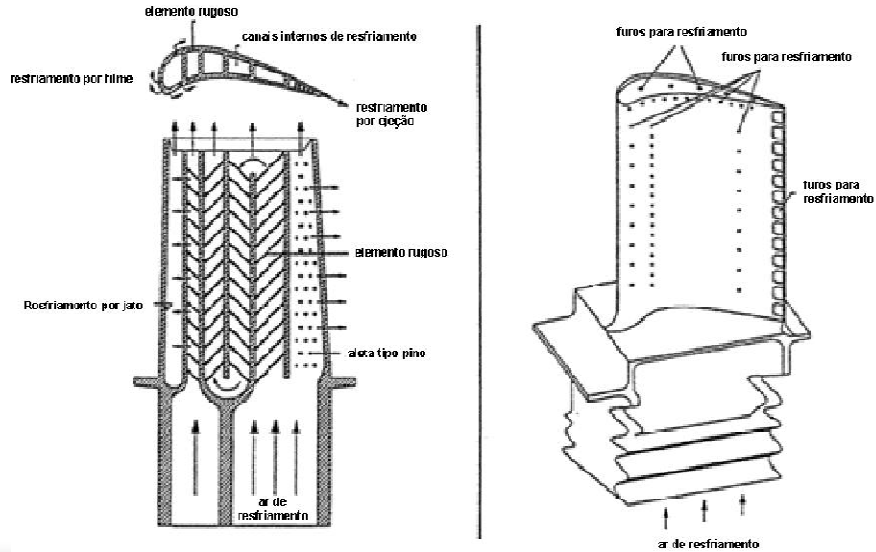


Turbina a Gas

Jurandir Itizo Yanagihara



## Resfriamento de Palhetas de Turbinas a Gás

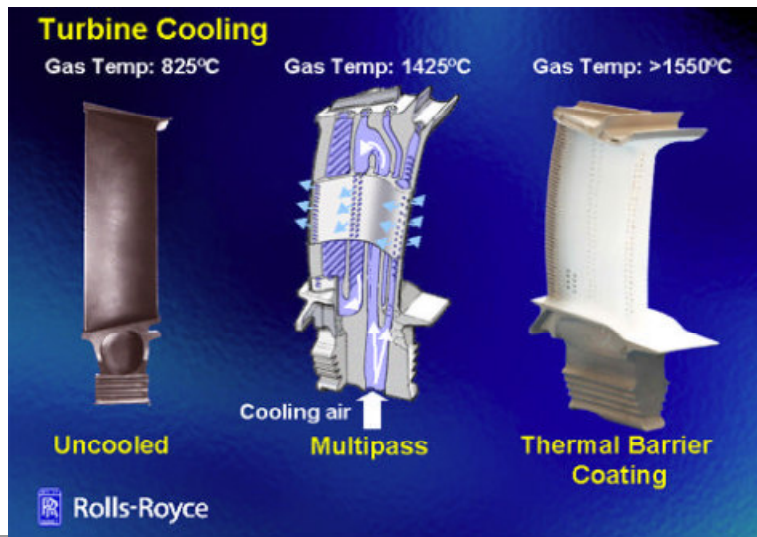


Turbina a Gas

Jurandir Itizo Yanagihara



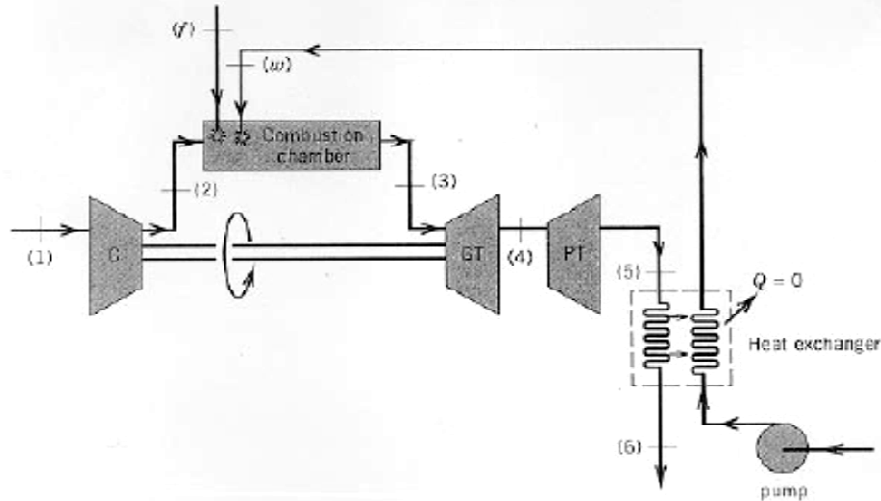
## Resfriamento de Palhetas de Turbinas a Gás



Turbina a Gas

Jurandir Itizo Yanagihara

## Ciclo com Injeção de Vapor



Turbina a Gas

Jurandir Itizo Yanagihara

## Ciclo com Injeção de Vapor

- Vantagens
  - Fácil implementação
  - Ajuda na redução de NOx (redução da temperatura)
  - Aumenta potência líquida
  - Maior rendimento térmico
  - Menor custo comparado com ciclo combinado
  - Pode ser convertido em ciclo combinado
- Desvantagens:
  - Suprimento constante de água tratada
  - Necessita de gerador de vapor (HRSG)
  - Cuidado com injeção de vapor: possibilidade de extinção parcial ou até completa da chama
    - Quantidade de vapor injetado: 2 a 3 %, máximo 5% do fluxo de ar do compressor
    - Vapor tem que ser superaquecido em qualquer condição do processo, com pressão maior que a do compressor

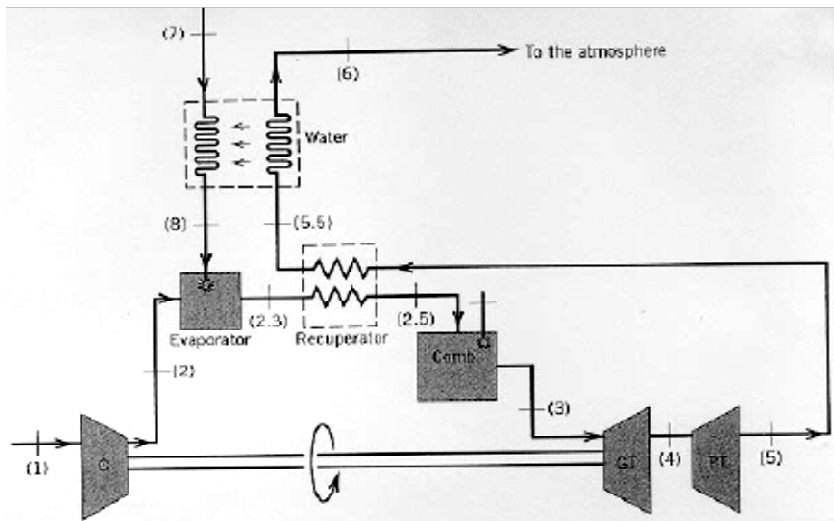
Turbina a Gas

Jurandir Itizo Yanagihara





## Ciclo com Evaporador e Regenerador



Turbina a Gas

Jurandir Itizo Yanagihara



## Ciclo com Evaporador e Regenerador

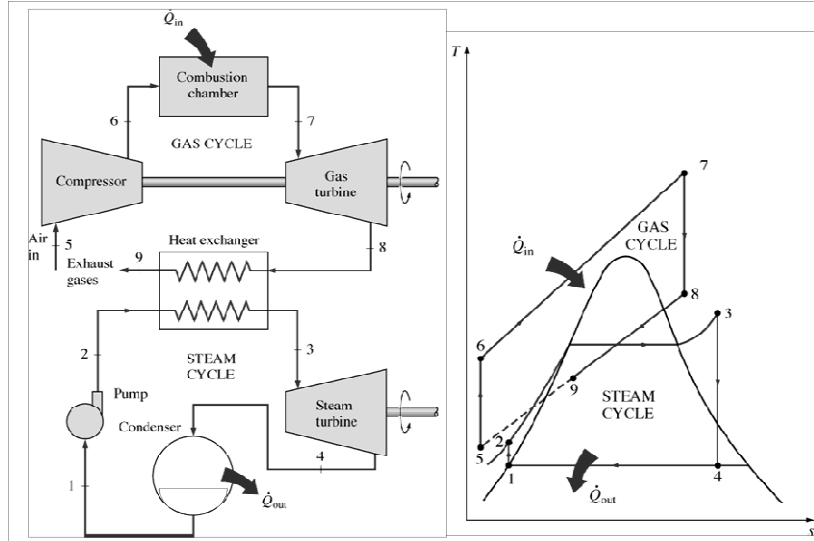
- Objetivo: Aumento de potência específica
- Água é pulverizada na saída do compressor
- Evaporação: aumenta massa específica do ar (úmido) e carrega maior entalpia (água / ar)
- Aumenta  $\Delta T$  entre ar e gases de combustão – melhora processo regenerativo
- Quantidade teórica máxima de água: saturação de ar
- Deve-se garantir a evaporação completa

Turbina a Gas

Jurandir Itizo Yanagihara



## Ciclo Combinado



Turbina a Gas

Jurandir Itizo Yanagihara



## Ciclo Combinado (Brayton & Rankine)

Turbina a Gas

Jurandir Itizo Yanagihara



## Ciclo Combinado

- Usa os gases de combustão que saem da Turbina a Gás para produzir vapor para a Turbina a Vapor.
- Produz 40 - 50% de potência adicional.
- Exemplo: Turbina a Gás de 13 MW fornece 18,5 MW numa configuração de Ciclo Combinado.
- Aumento de 15 - 20% na eficiência térmica do ciclo.
- Exemplo: Turbina a Gás de 13 MW e 35% de eficiência (energia elétrica) => 50 % de eficiência (energia elétrica) numa configuração de Ciclo Combinado.
- Aumento do custo de investimento.
- Necessita de Caldeira de Recuperação (Heat Recovery Steam Generator – HRSG) e Turbinas a Vapor de alta pressão.
- Aumento de espaço necessária para construção.

Turbina a Gas

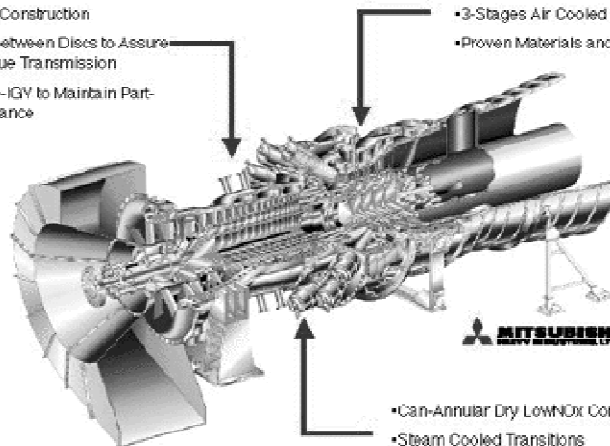
Jurandir Itizo Yanagihara



## TG para Ciclo Combinado (250 MW)

- Advanced Profile Airfoils
- Bolted Rotor Construction
- Radial Pins between Discs to Assure Reliable Torque Transmission
- One Variable-IGV to Maintain Part-Load Performance

- 4 Stages of Full 3-D Blades and Vanes
- 3- Stages Air Cooled
- Proven Materials and Coatings



- Can-Annular Dry LowNOx Combustors
- Steam Cooled Transitions
- By-pass Valve for Part Load Stability
- 1500°C Class Combustor Outlet Temperature

Turbina a Gas

Jurandir Itizo Yanagihara



## Exercício - TG

- Uma turbina a gás industrial de 60 MW utiliza metano ( $\text{CH}_4$ ) como combustível e opera com 400% de ar teórico (não é 400% de excesso de ar). O combustível tem  $\text{PCI} = 50.000$  kJ/kg e entra no combustor a  $T_{\text{amb}} = T_{\text{ref}} = 25$  °C. Ar entra no compressor a  $T_1 = 25$  °C e  $P_1 = 100$  kPa. A relação de pressão na turbina é de 12. Considerando-se que o rendimento isoentrópico do compressor é de 0,87 e o da turbina é de 0,92, pede-se: (a) Razão ar-combustível, em massa (RAC = 68,95); (b) Temperatura na saída do compressor ( $T_2 = 696,4$  K); (c) Temperatura dos gases de combustão na saída do combustor ( $T_3 = 1360$  K); (d) Temperatura da saída da turbina ( $T_4 = 723,8$  K); (e) Vazão mássica de combustível ( $m_{\text{comb}} = 2,98$  kg/s); (f) Rendimento térmico do equipamento ( $\eta = 40,2\%$ ). Dados:  $C_{p_{\text{ar}}} = C_{p_{\text{gases}}} = 1,0$  kJ/kg K;  $k = 1,4$ .