

Geração Termelétrica

Prof. José Antônio Perrella Balestieri

(perrella@feg.unesp.br)

Departamento de Energia

Faculdade de Engenharia

Campus de Guaratinguetá/UNESP

Perfil da geração elétrica no Brasil

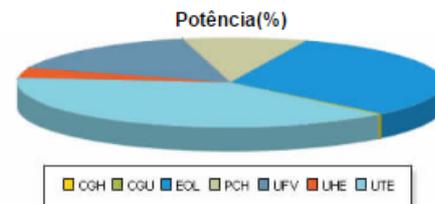
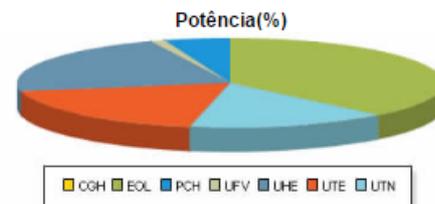
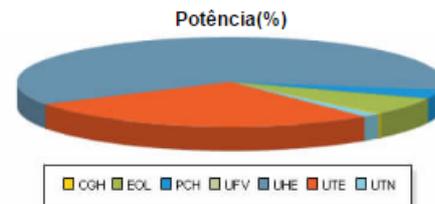
Empreendimentos em Operação				
Tipo	Quantidade	Potência Outorgada (kW)	Potência Fiscalizada (kW)	%
CGH	557	438.589	438.671	0,3
EOL	379	9.315.408	9.284.730	6,29
PCH	450	4.881.782	4.841.143	3,29
UFV	40	28.952	22.982	0,02
UHE	220	101.053.425	90.166.353	61,19
UTE	2.910	42.305.485	40.632.723	27,57
UTN	2	1.990.000	1.990.000	1,35
Total	4.558	159.999.651	147.356.582	100

Os valores de porcentagem são referentes a Potência Fiscalizada. A Potência Outorgada é igual a considerada no Ato de Outorga. A Potência Fiscalizada é igual a considerada a partir da operação comercial da primeira unidade geradora.

Empreendimentos em Construção				
Tipo	Quantidade	Potência Outorgada (kW)		%
CGH	1		848	0,01
EOL	148		3.385.330	37,88
PCH	34		454.956	5,09
UFV	3		90.000	1,01
UHE	7		1.987.100	22
UTE	25		1.094.488	18,95
UTN	1		1.350.000	15,1
Total	219		8.942.723	100

Empreendimentos com Construção não iniciada				
Tipo	Quantidade	Potência Outorgada (kW)		%
CGH	38		28.151	0,15
CGU	1		50	0
EOL	238		5.680.050	31,76
PCH	118		1.098.088	9,53
UFV	107		2.876.997	16,15
UHE	6		629.000	3,53
UTE	148		6.928.876	38,88
Total	656		17.819.190	100

Legenda	
CGH	Central Geradora Hidrelétrica
CGU	Central Geradora Undi-elétrica
EOL	Central Geradora Eólica
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
UFV	Central Geradora Solar Fotovoltaica
UHE	Usina Hidrelétrica
UTE	Usina Termelétrica
UTN	Usina Termonuclear



<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>, acesso em 08/08/2016

Processo e ciclo termodinâmico

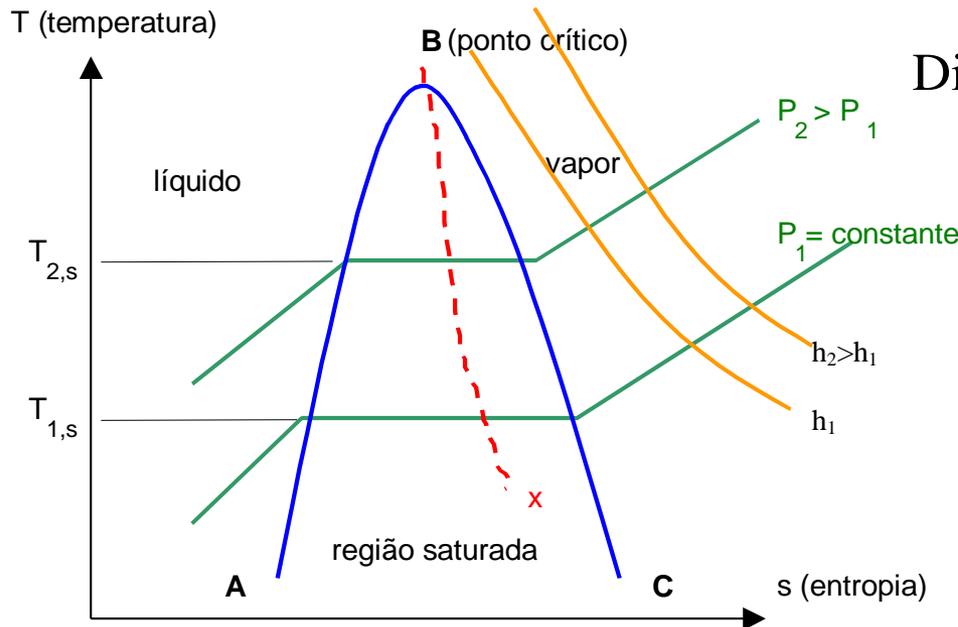
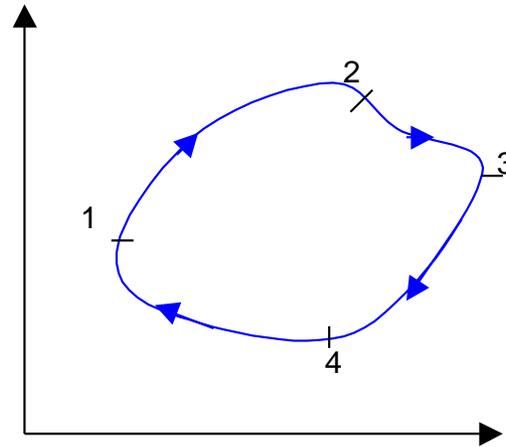
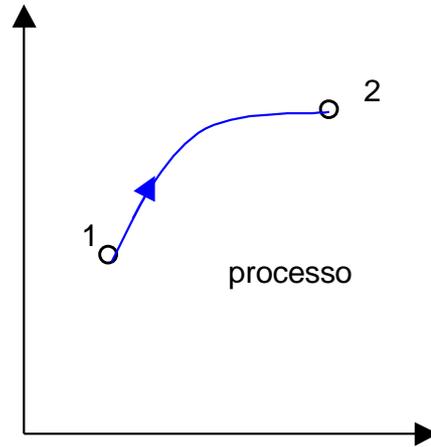
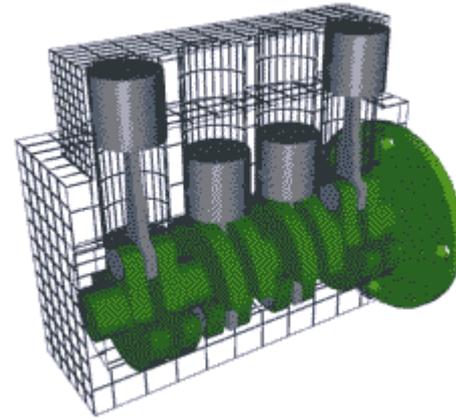
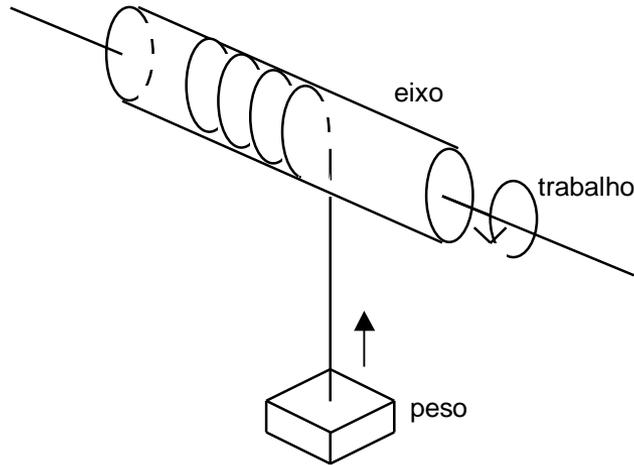


Diagrama T-s para vapor



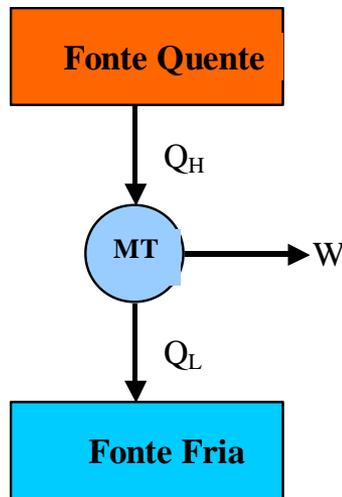
Conservação de Massa e Energia: regime permanente

$$\sum \rho_e v_e A_e = \sum \rho_s v_s A_s$$

$$\dot{Q}_{vc} - \dot{W}_e = \sum \dot{m}_s h_s - \sum \dot{m}_e h_e$$

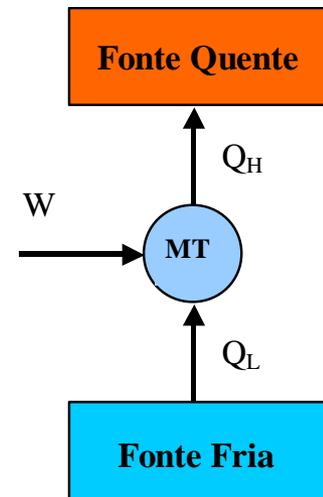


Eficiência de 1ª lei



$$\eta_t = \frac{\dot{W}}{\dot{Q}_H}$$

(a) Máquina Térmica Motora

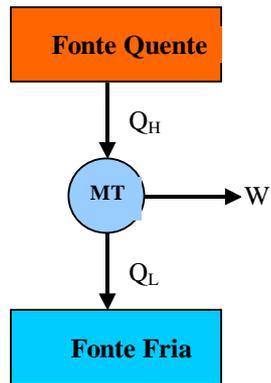


$$\text{COP} = \beta = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}}$$

(a) Máquina Térmica Geradora

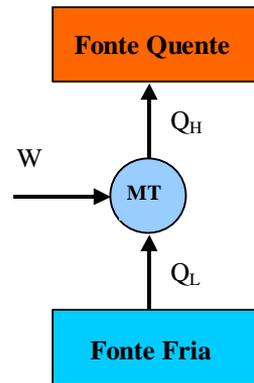
2ª Lei da Termodinâmica

- Todo processo real ocorre em uma direção preferencial, enquanto que processos ideais (ou reversíveis) ocorrem de modo indiferente à direção;
- O processo real ou irreversível apresenta, então, perdas em relação ao processo ideal.
- As perdas ou irreversibilidades estão presentes em todo processo físico real.



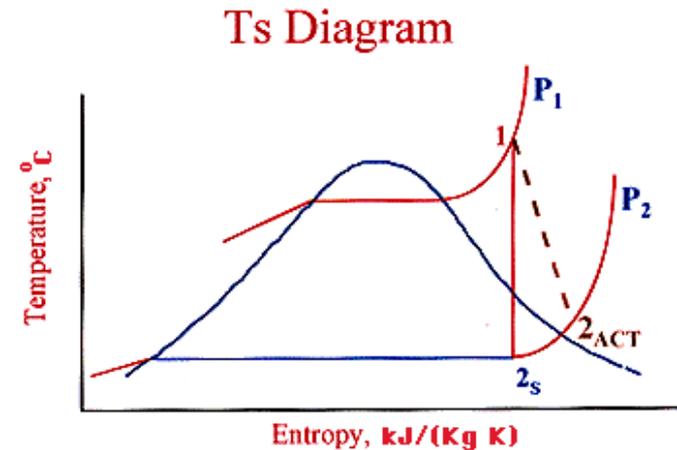
$$\eta_t = \frac{\dot{W}}{\dot{Q}_H}$$

(a) Máquina Térmica Motora



$$\text{COP} = \beta = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}}$$

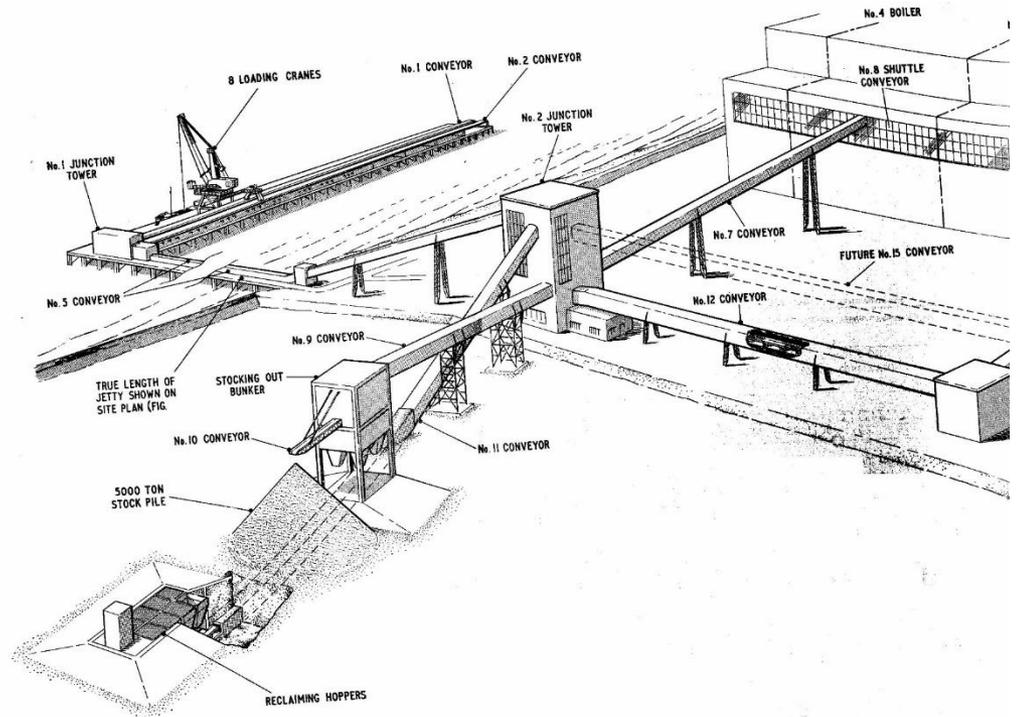
(a) Máquina Térmica Geradora

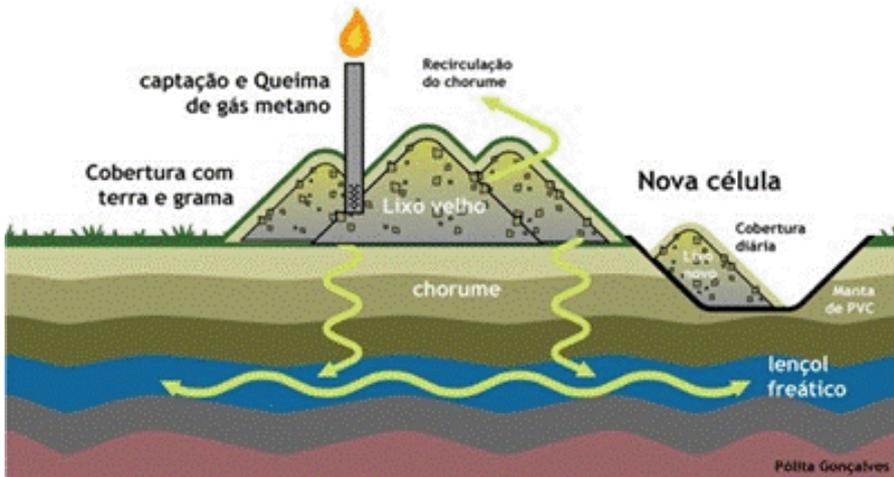


Combustão

- Combustíveis são substâncias que se queimam intencionalmente para a obtenção de calor; a energia química contida nessas substâncias orgânicas é convertida em calor a partir de um processo conhecido como combustão; o aproveitamento de uma certa substância como combustível está condicionado à viabilidade econômica do seu emprego nas condições em que se apresenta.
- Os combustíveis podem ser identificados em um dos três estados: sólido, líquido ou gasoso; além disso, podem ser ainda classificados em naturais e artificiais.

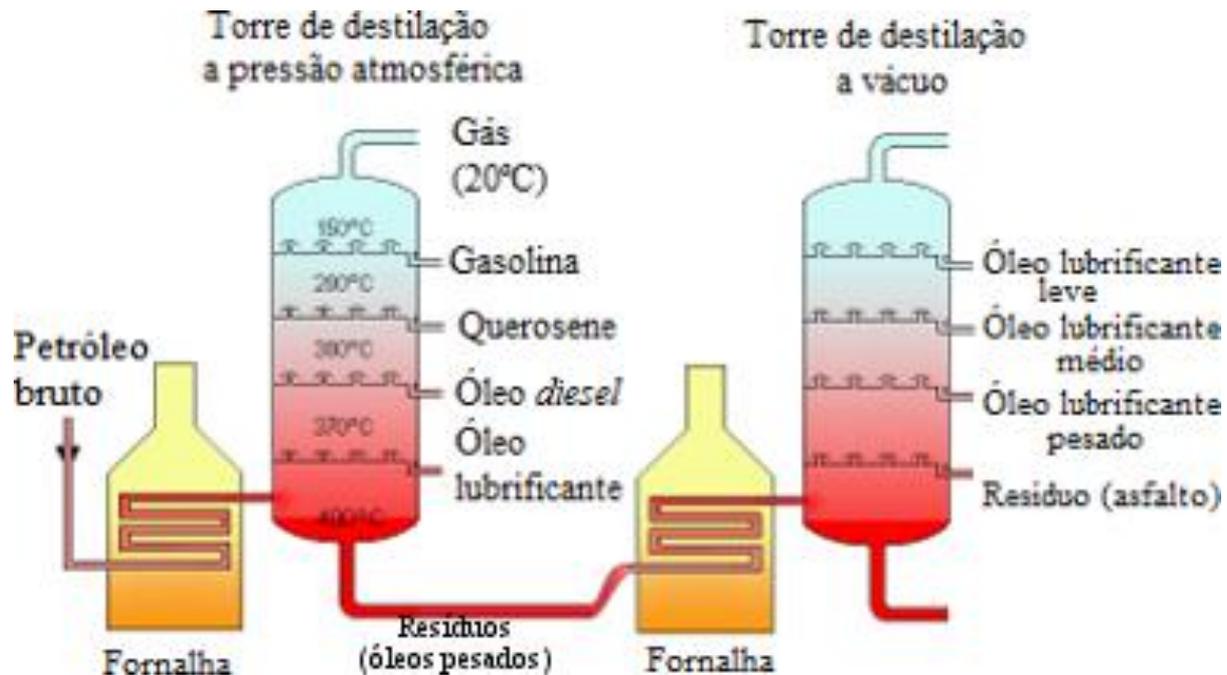
- Madeira
- carvão mineral e vegetal
- biomassas vegetais
- lixo urbano





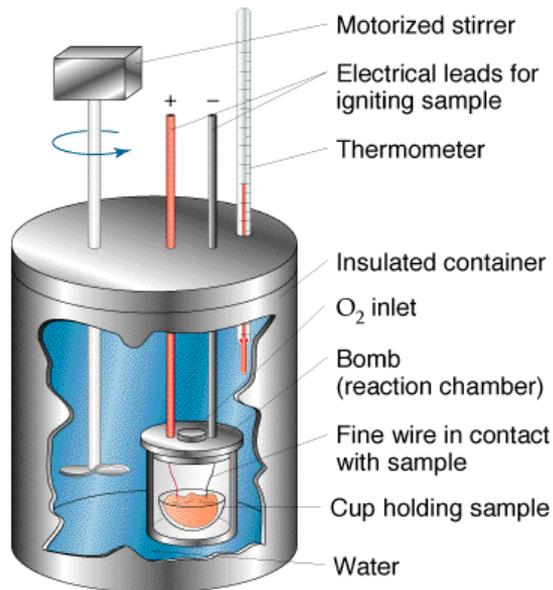
Combustíveis líquidos e gasosos

- Os combustíveis líquidos de origem fóssil se obtém mediante o processo de transformação do petróleo (craqueamento); o petróleo cru é aquecido de 300 a 370°C para que se formem os vapores que, separados, se condensam em temperaturas diferenciadas



Poder calorífico

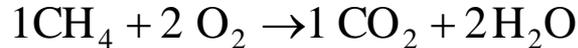
- Todo combustível é caracterizado por seu **poder calorífico**, isto é, a quantidade de calor que se desprende na queima total de uma unidade de massa do mesmo; o calor que se proporciona a combustão dos produtos sólidos e líquidos se refere a 1 kg e dos produtos gasosos a 1 m³
- O poder calorífico é determinado através de **bomba calorimétrica**, um vaso metálico no qual se coloca uma amostra do combustível e se injeta oxigênio a determinada pressão; o recipiente que contém o combustível é colocado em um calorímetro cheio de água a temperatura ambiente, através do qual se determina a quantidade de calor que se desprende na combustão.



- Em certas bombas calorimétricas, os produtos de combustão depositam e esfriam até a temperatura ambiente; se os vapores de água formados durante a queima do hidrogênio, juntamente com a evaporação da umidade do combustível, se condensam em conjunto com os demais produtos, o valor obtido no processo de combustão se denomina **Poder Calorífico Superior (PCS)**.
- Se o dispositivo utilizado na determinação do poder calorífico permite a evacuação dos vapores, o valor obtido corresponde ao **Poder Calorífico Inferior (PCI)**.
- O valor correspondente à diferença entre os valores superior e inferior é o calor latente de vaporização da água:

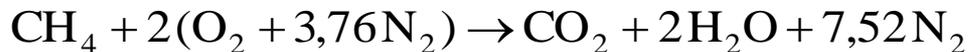
$$\gg \text{PCS} = \text{PCI} + m_v h_{lv}$$

- Combustão completa de metano com oxigênio (base molar):

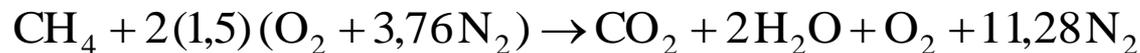


- Solução por balanço de espécies químicas: $1\text{CH}_4 + \text{A O}_2 \rightarrow \text{B CO}_2 + \text{D H}_2\text{O}$
 - Balanço de C: $1.1 = \text{B}.1 \rightarrow \text{B} = 1$
 - Balanço de H: $1.4 = \text{D}.2 \rightarrow \text{D} = 2$
 - Balanço de O: $\text{A}.2 = \text{B}.2 + \text{D}.1 \rightarrow \text{A} = 2$
- $\underbrace{\hspace{1.5cm}}_{\text{combust.}} + \underbrace{\hspace{1.5cm}}_{\text{ar}} \rightarrow \underbrace{\hspace{3.5cm}}_{\text{produtos da combustão}}$
 $\text{F} + \text{A} \rightarrow \text{P}$
- $\text{A}, \text{B}, \text{D} \rightarrow$ coeficientes estequiométricos
 - $x_{\text{CO}_2} = \text{B} / (\text{B} + \text{D})$ e $x_{\text{H}_2\text{O}} = \text{D} / (\text{B} + \text{D})$ - frações molares dos gases produtos da combustão

- Combustão completa de metano com ar atmosférico (base molar): 21% O_2 + 79% N_2



- Combustão completa de metano, ar atmosférico, 50% de excesso de ar (base molar):



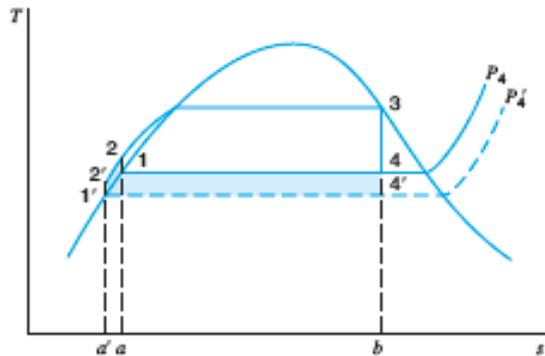
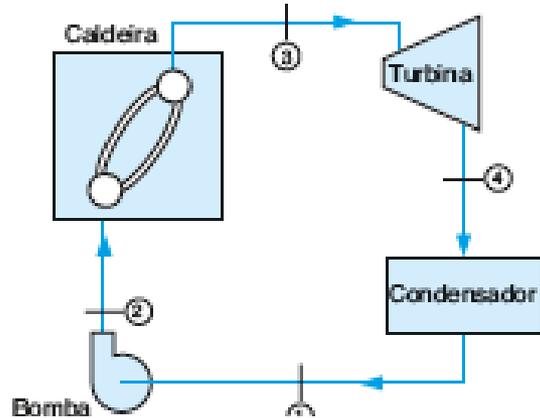


Figura 9.4
Efeito da pressão de descarga da turbina sobre o rendimento do ciclo Rankine.

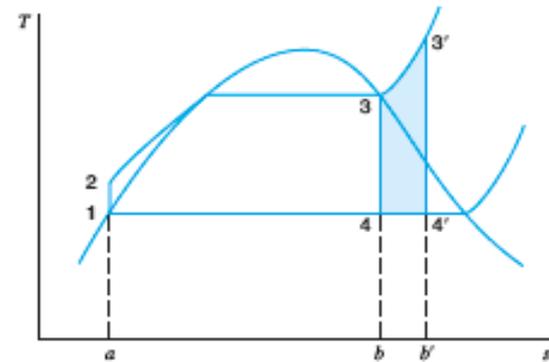


Figura 9.5
Efeito do superaquecimento sobre o rendimento do ciclo Rankine.

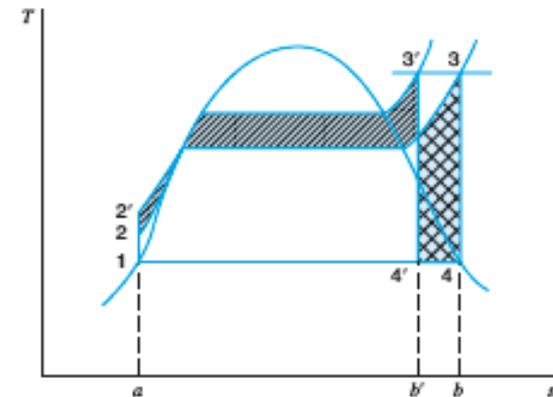
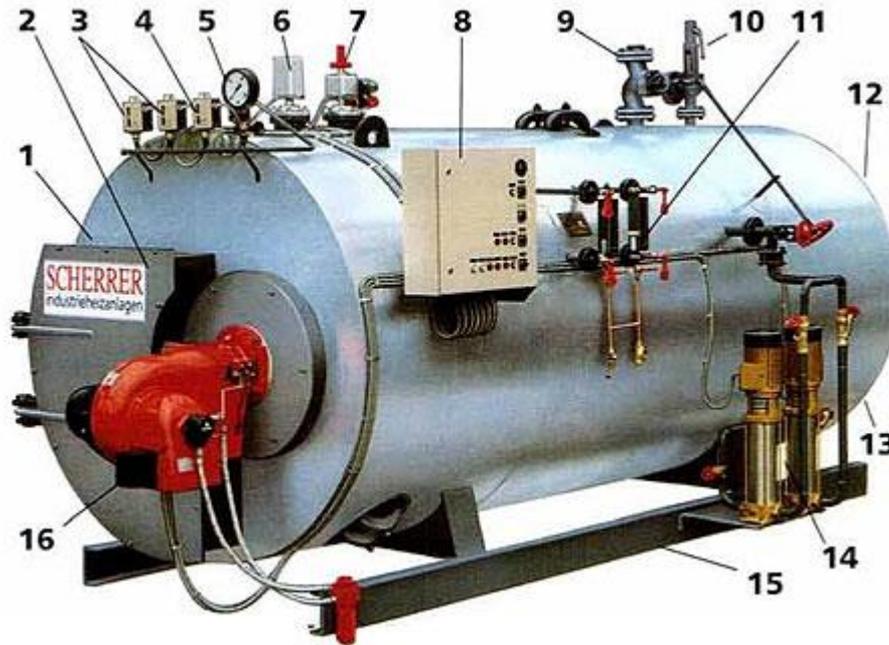
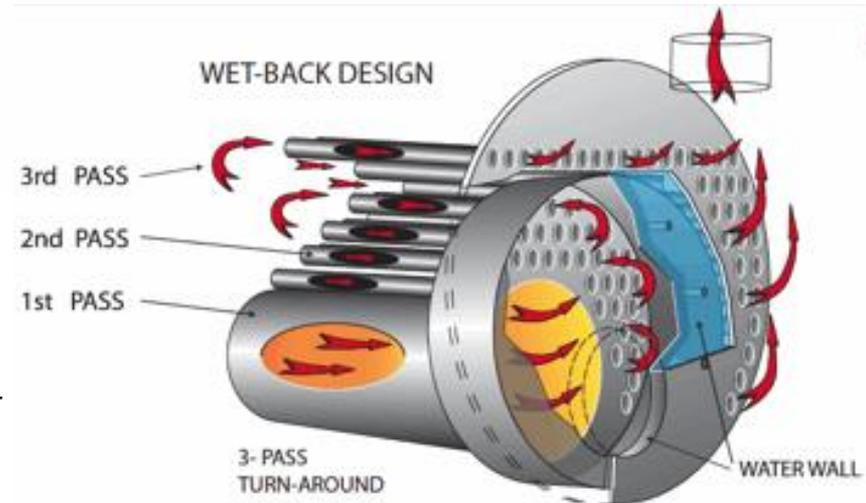


Figura 9.6
Efeito da pressão na caldeira sobre o rendimento do ciclo Rankine.

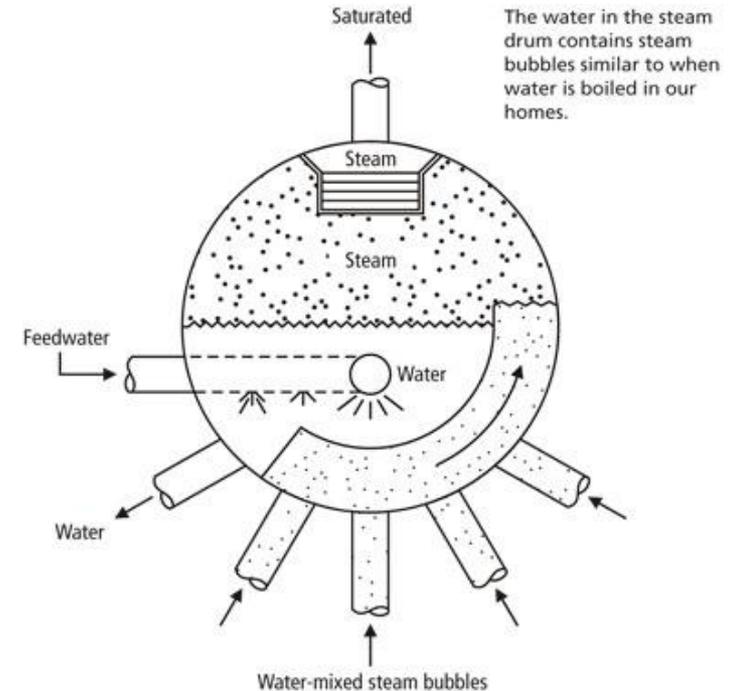
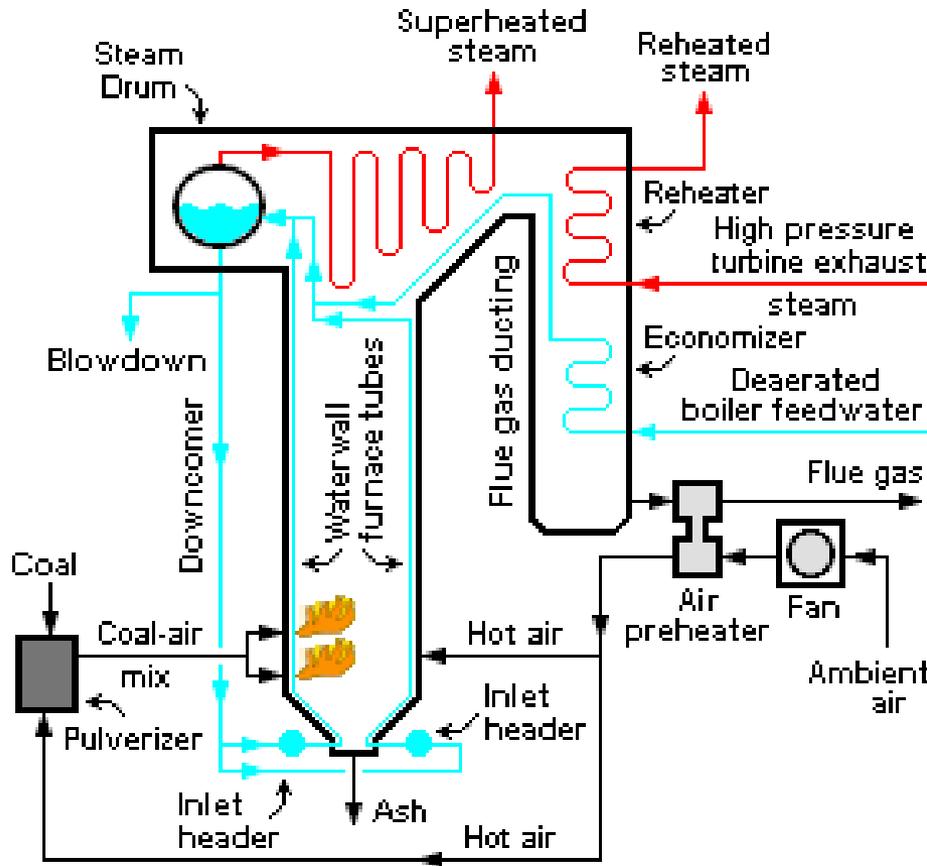
Caldeiras – elementos principais



1. Tubulão com isolamento térmico
2. Câmara de reversão
3. Reguladores de pressão
4. Controlador de sobrepressão
5. Manômetro com válvula de controle
6. Regulador de nível de água e alívio de 1° nível
7. Alívio de 2° nível
8. Painel de controle
9. Válvula de vapor principal
10. Válvula de segurança
11. Indicador de nível de água
12. Conexão para saída dos gases de escape
13. Aba de segurança
14. Bomba de alimentação de água
15. Base metálica
16. Queimador a óleo, gás ou dual



- Caldeiras convencionais



- Caldeiras convencionais

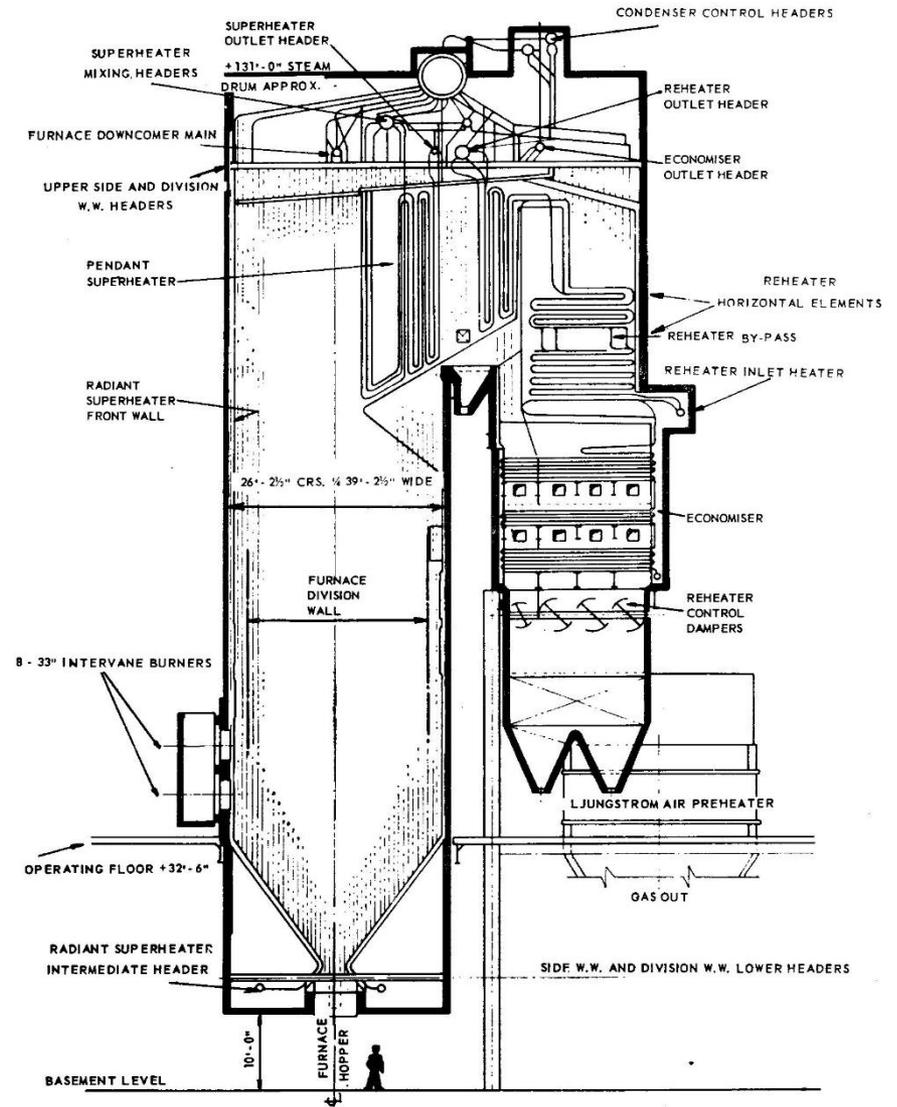
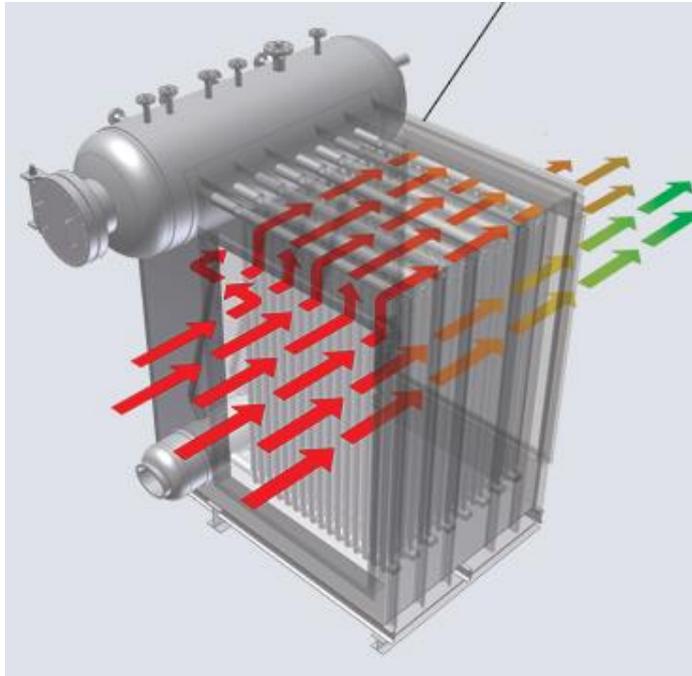
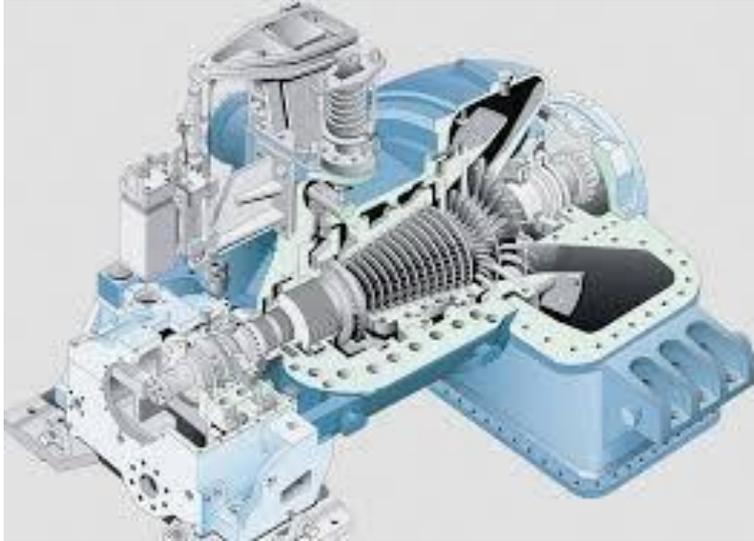


FIG. 1.1d. Typical arrangement of 860,000 lb/hr p.f.-fired boiler

- Caldeiras convencionais
- Queimador de combustíveis líquidos:
 - ventilador
 - injetor de combustível
 - fracionamento de partículas líquidas



- Turbinas a vapor



condensação // condensação e extrações

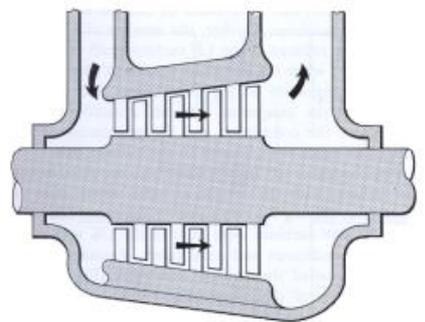
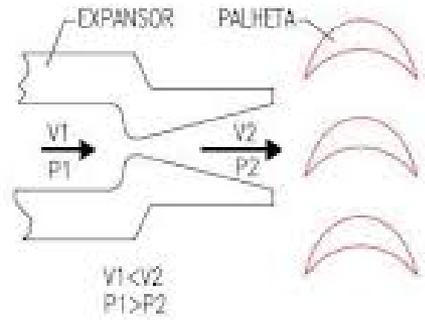
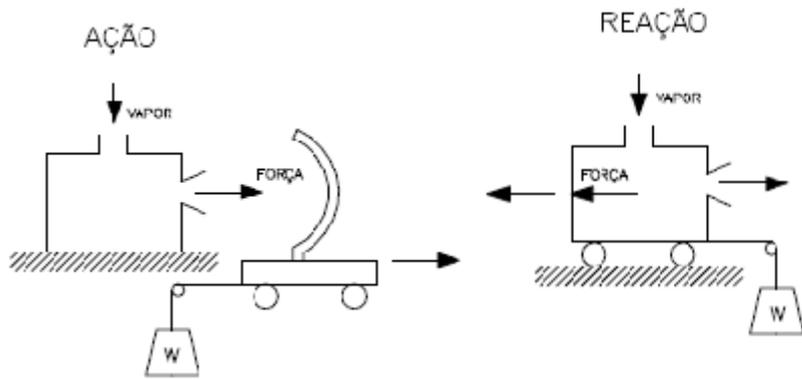


contrapressão // contrapressão e extrações



Ciclos térmicos de potência (a vapor)

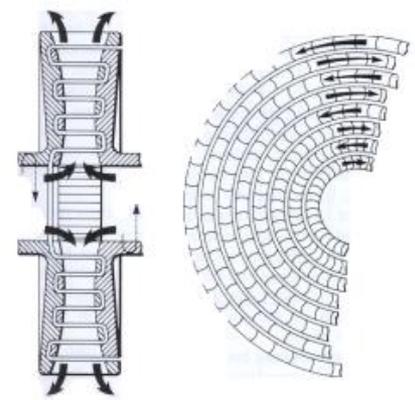
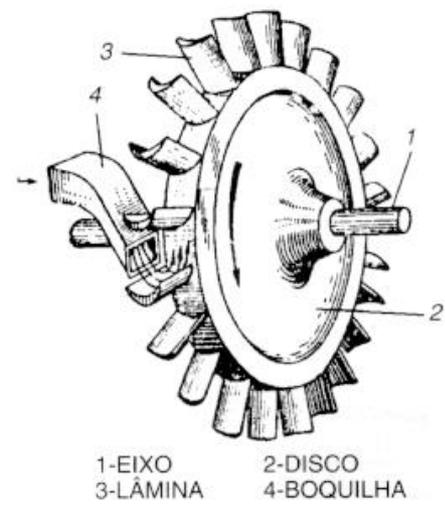
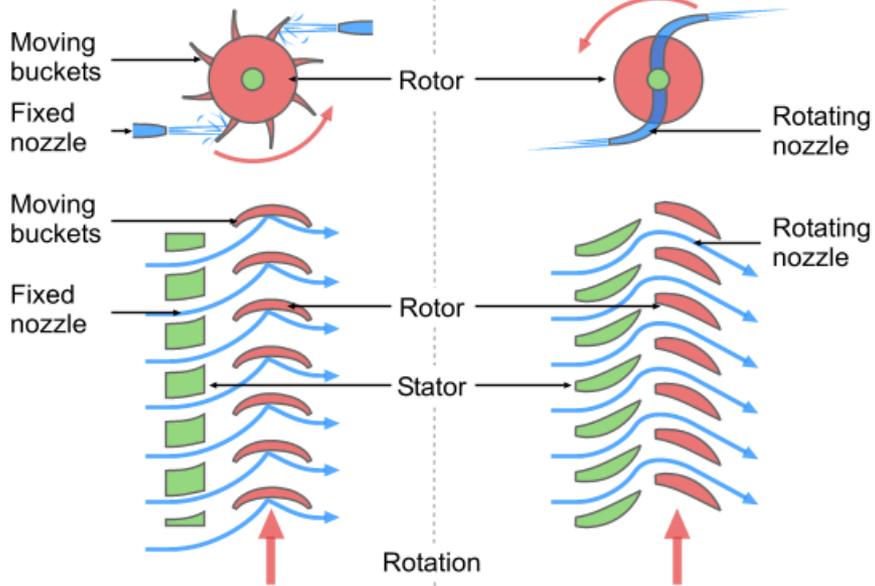
Turbinas a vapor – classificação como ação/reação e axial/radial



Impulse Turbine

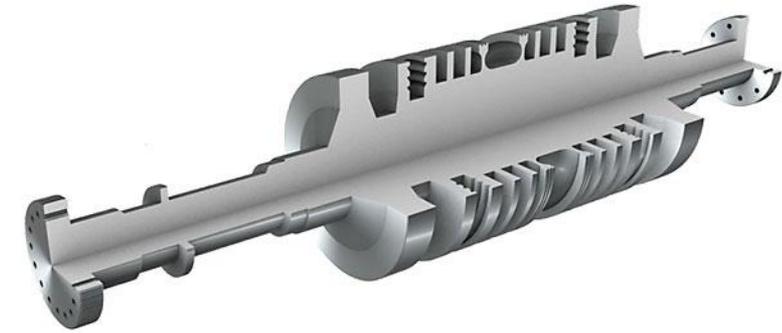
Reaction Turbine

Turbina de fluxo axial



Turbina de fluxo radial

- Turbinas a vapor



Centrais termelétricas a vapor

torre de resfriamento em casca de concreto,
124 m de diâmetro e 133 m de altura

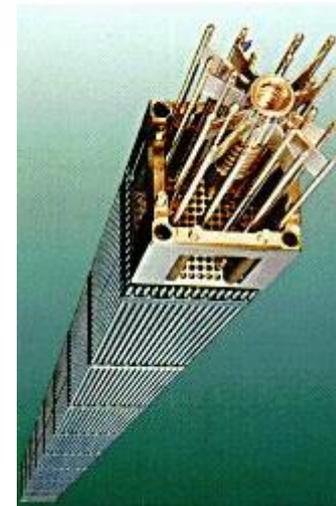
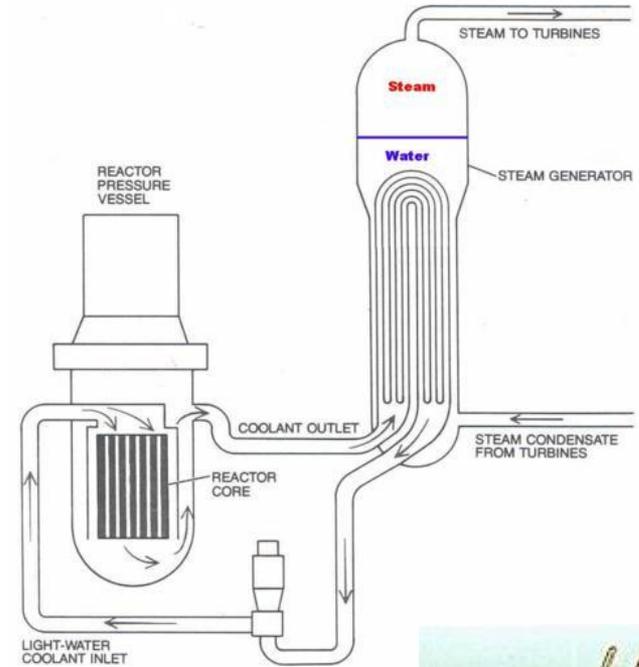
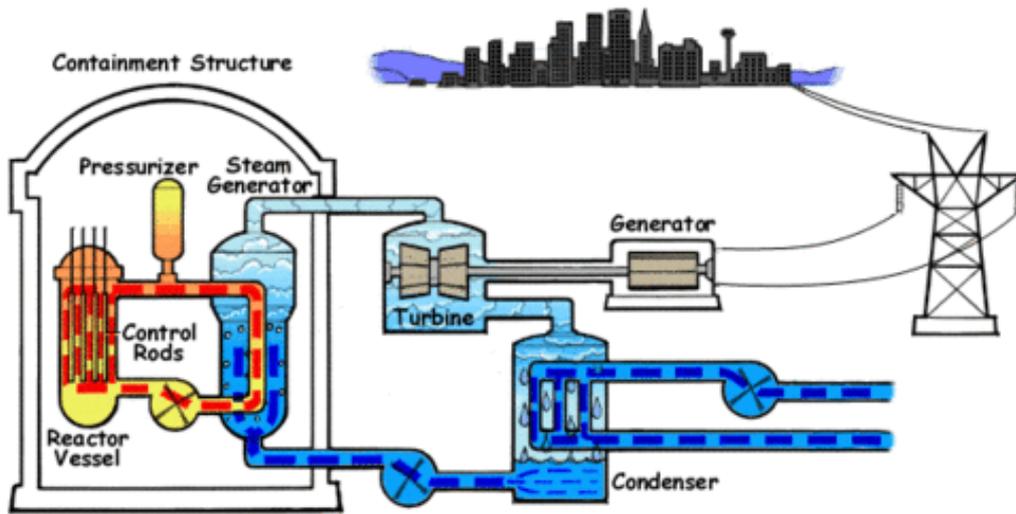


Termelétrica Candiota 3, RS – 350 MW de capacidade instalada (carvão mineral)



Cogeração – usina Santa Cândida (foto maior) e Coruripe Energética

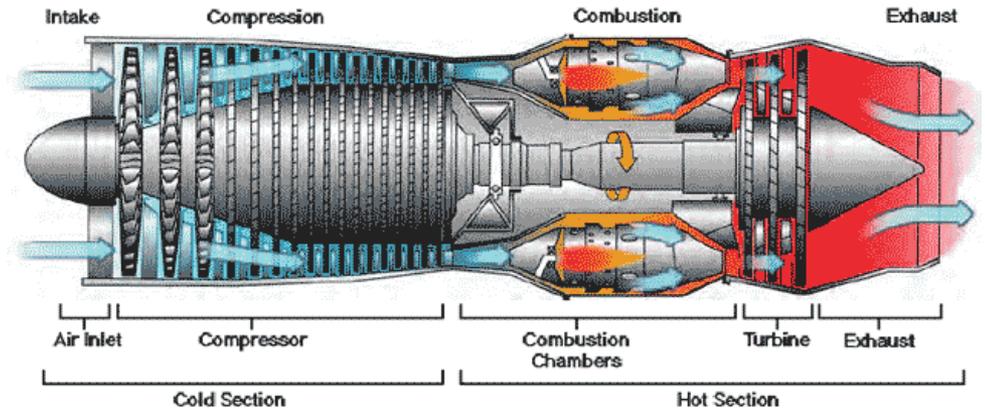
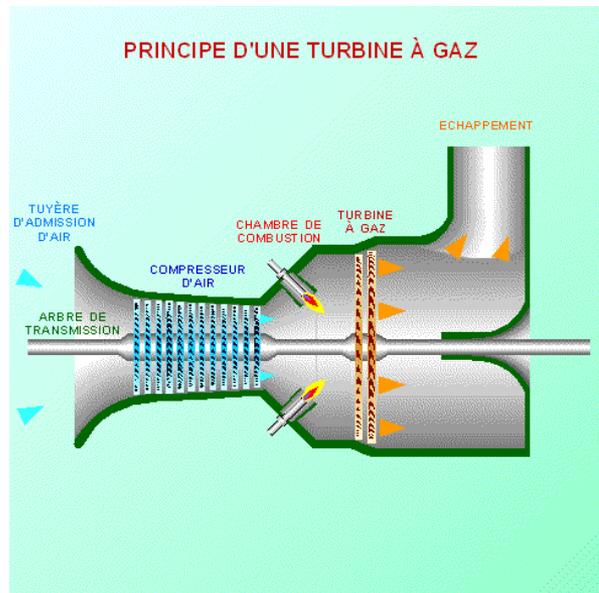
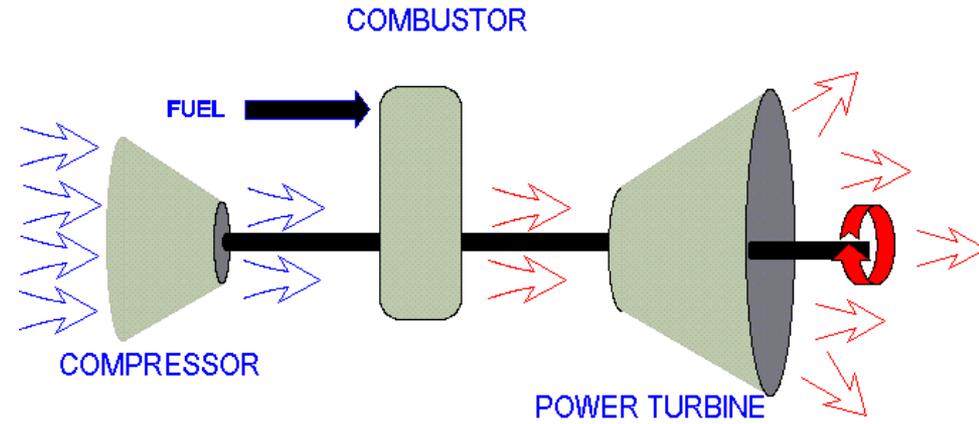
- Centrais termonucleares



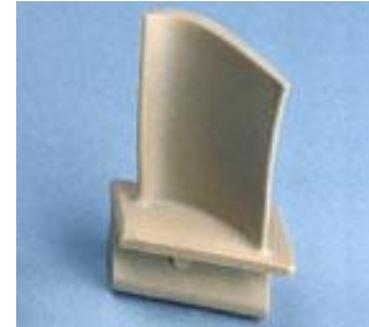
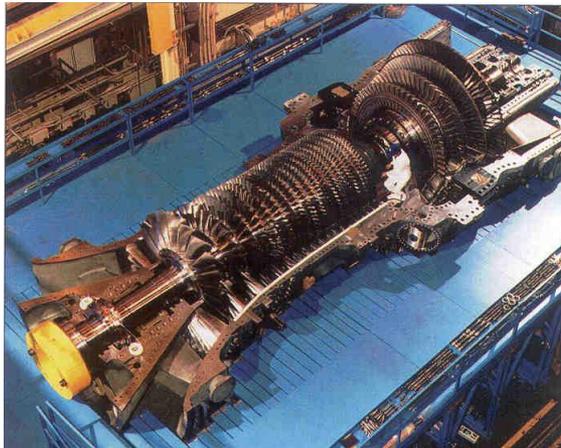
Centrais termonucleares



- Conjuntos a gás:
 - compressor
 - câmara de combustão
 - turbina a gás



- Conjuntos a gás:
- Aspectos construtivos:
 - palhetas para resistir a alta temperatura dos gases, da ordem de 1100 °C na entrada da TG (algumas máquinas já alcançam 1600-1700 °C)
 - temperaturas entre 400 e 600 °C na saída da TG
 - resfriamento das palhetas do compressor para melhorar aumentar vazão e eficiência
 - câmara de combustão anular em turbinas aeronáuticas e em torre em estacionárias

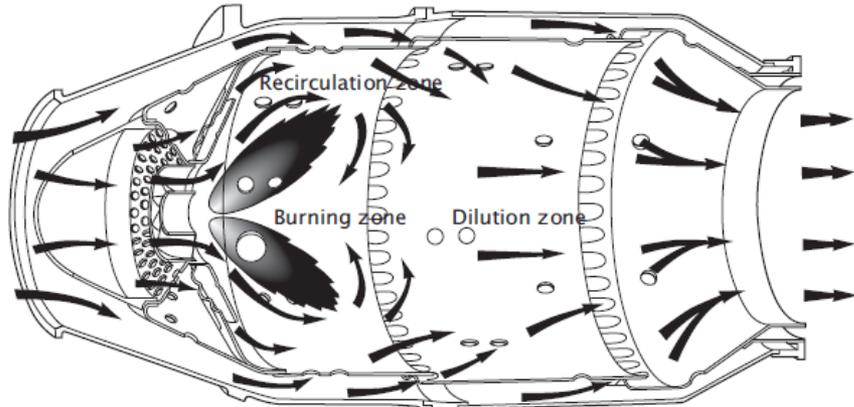
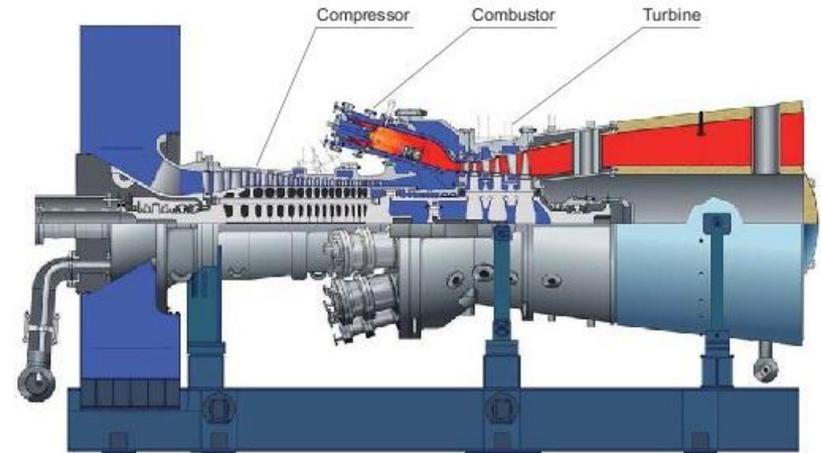


- Conjuntos a gás: câmaras de combustão

ALSTOM GT11N Combustion Chamber I

Model: ABB GT11N

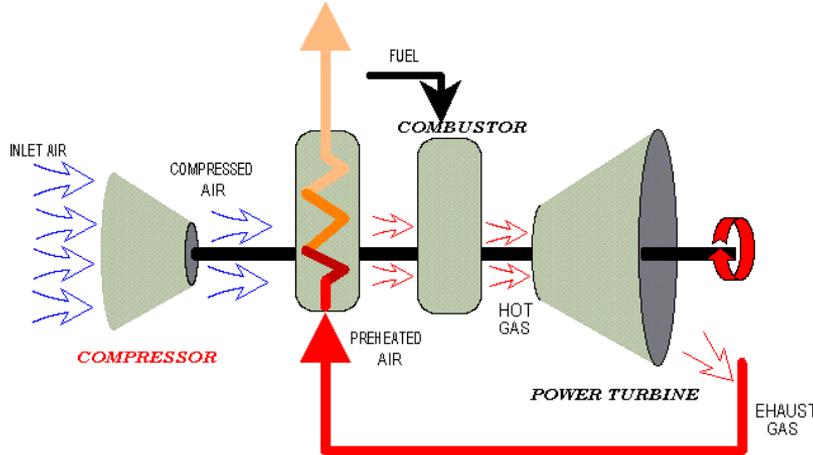
Customers: Korea South East Power Co., Ltd. (KOSGS Power)



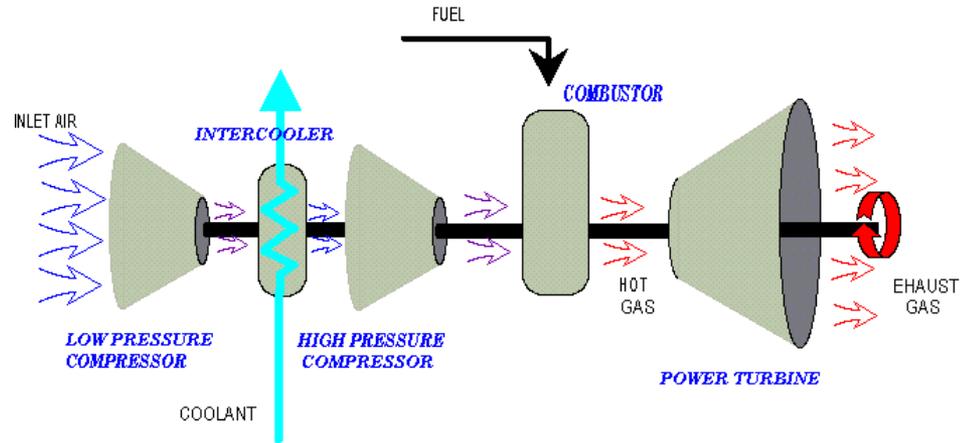
Ciclos térmicos de potência (a gás)

- Conjuntos a gás: opções de melhoria tecnológica

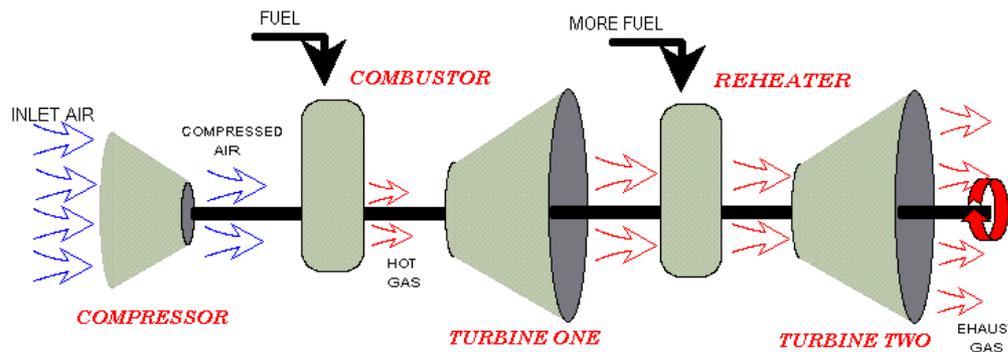
GAS-TURBINE WITH REGENERATION



GAS-TURBINE WITH INTERCOOLING



GAS-TURBINE WITH REHEATER



Ciclos térmicos de potência (a gás)

- Conjuntos a gás: correções necessárias em parâmetros

A potência e a vazão engolida pelo compressor devem ser corrigidas:

- Com a variação da altitude (pressão barométrica)
- Com a variação da temperatura
- Com a variação da umidade relativa do ar

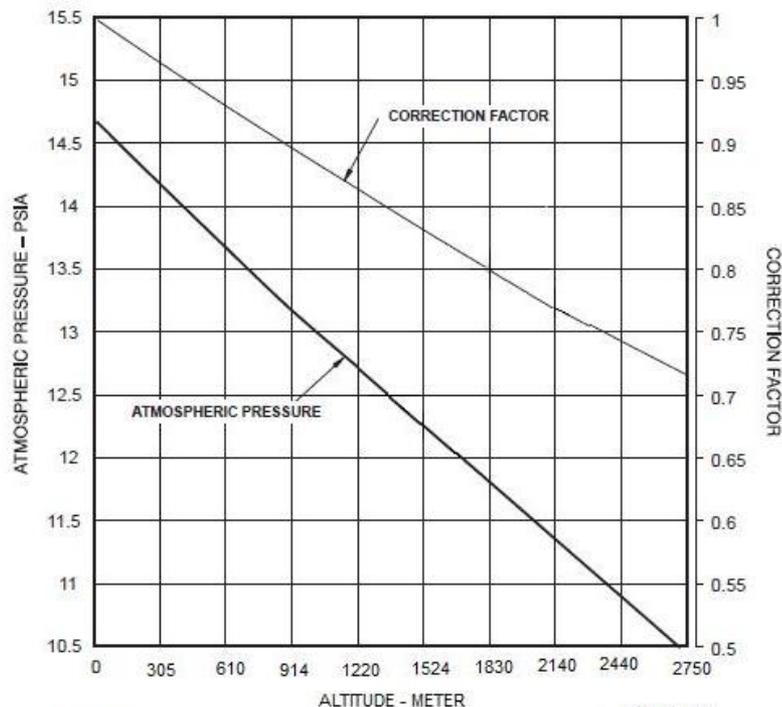
Destas, a variação da altitude é a que tem maior impacto

GE Power Systems. **Estimating Gas Turbine Performance.** Reference GTS-111D. S.d.

GENERAL ELECTRIC GAS TURBINE
ALTITUDE CORRECTION FACTOR
ALTITUDE VS ATMOSPHERIC PRESSURE
AND
ALTITUDE VS CORRECTION FACTOR
FOR GAS TURBINE OUTPUT AND FUEL CONSUMPTION

NOTES:

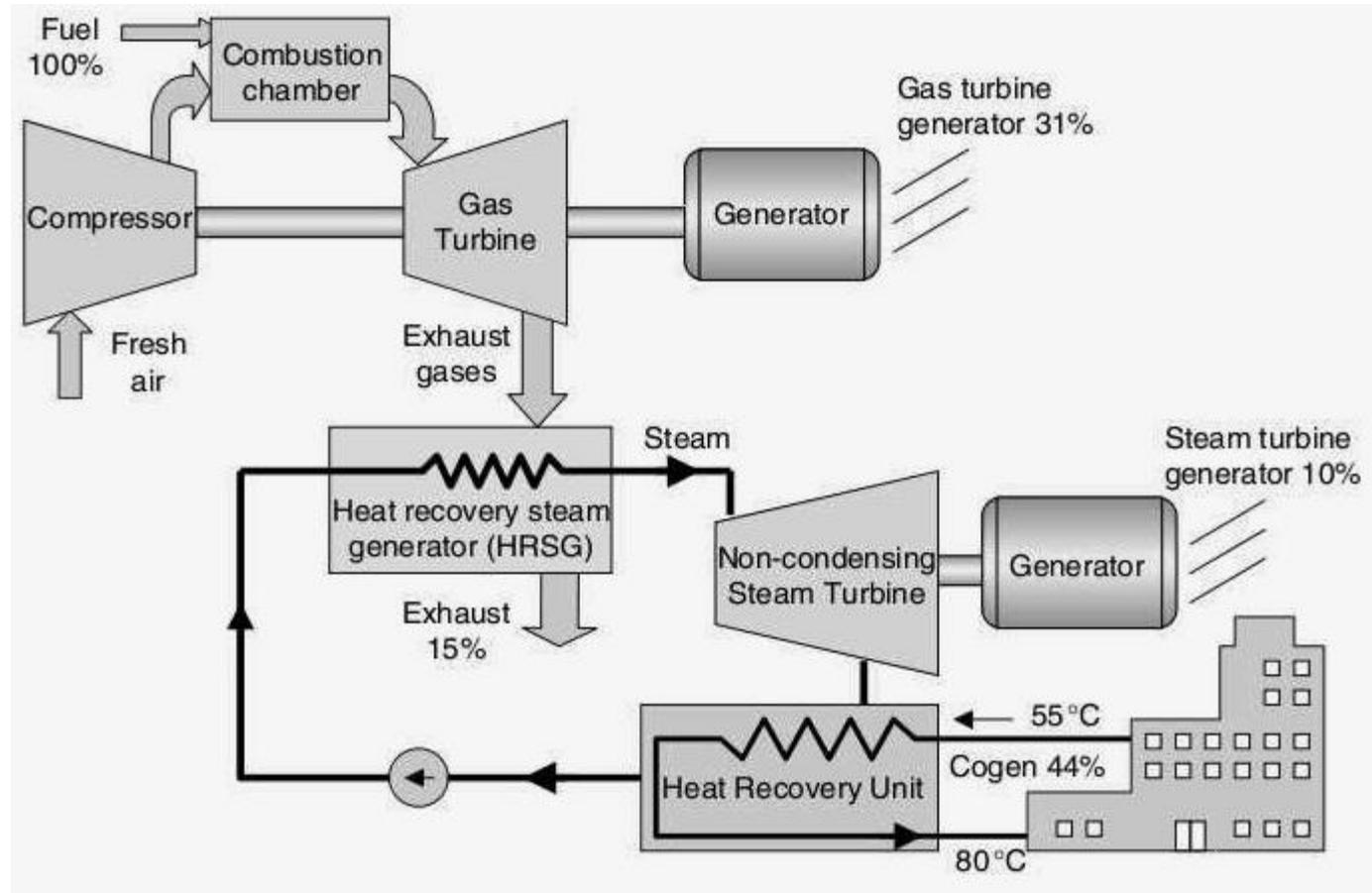
1. Heat Rate and Thermal Efficiency are not affected by altitude.
2. Correction Factor = $P(atm)/14.7$



4/24/90
F.J. BROOKS

416HA662
REV A

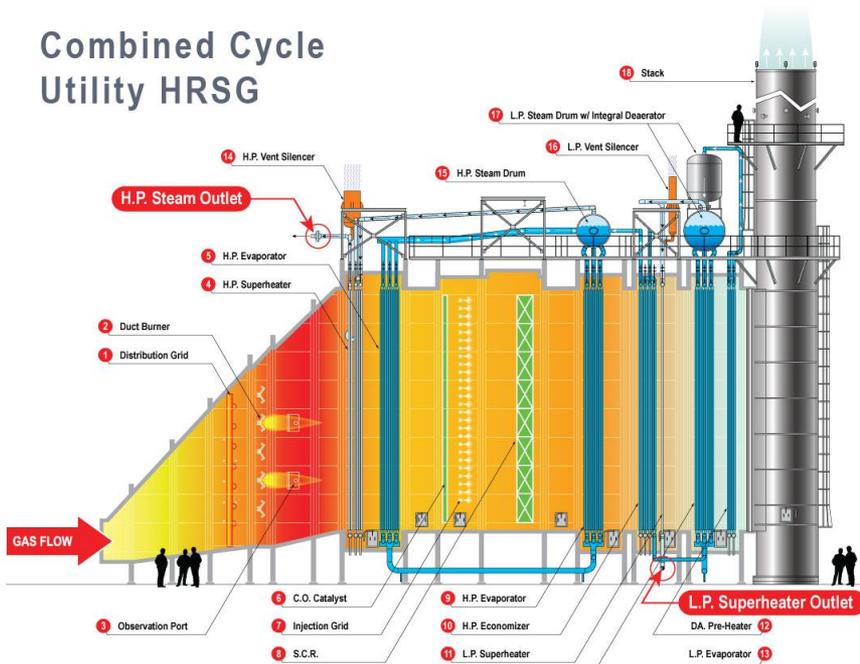
Ciclos térmicos de potência (ciclo combinado)



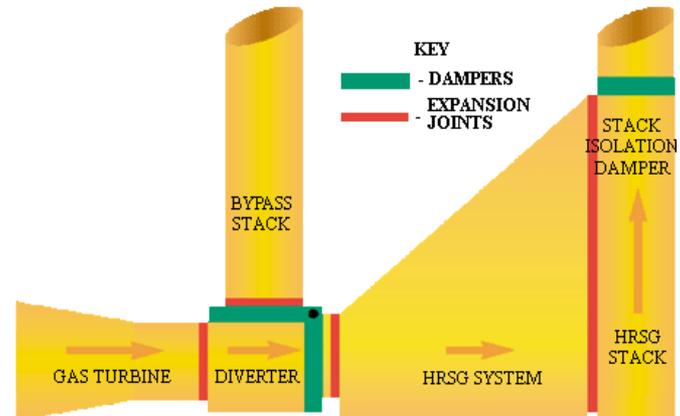
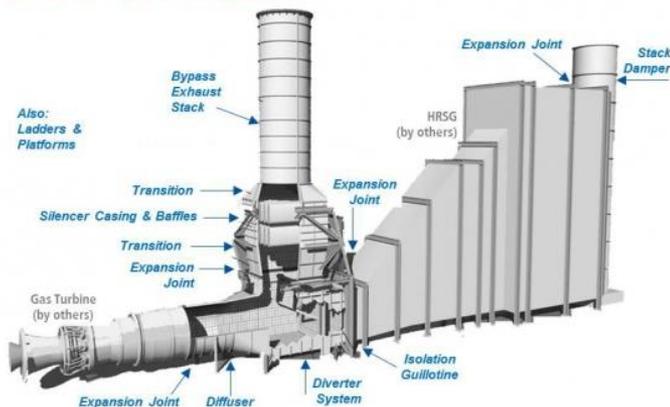
Ciclos térmicos de potência (a gás)

Caldeiras de recuperação térmica (HRSG, *heat recovery steam generator*, HRSG)

Combined Cycle Utility HRSG



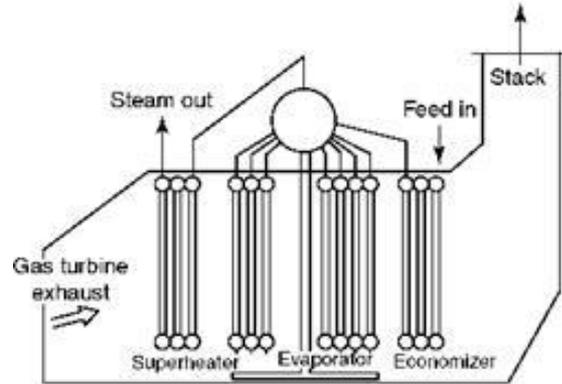
GT Exhaust System Components



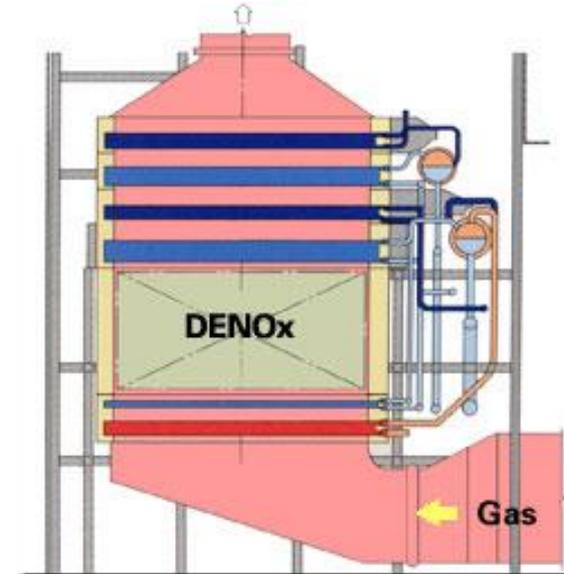
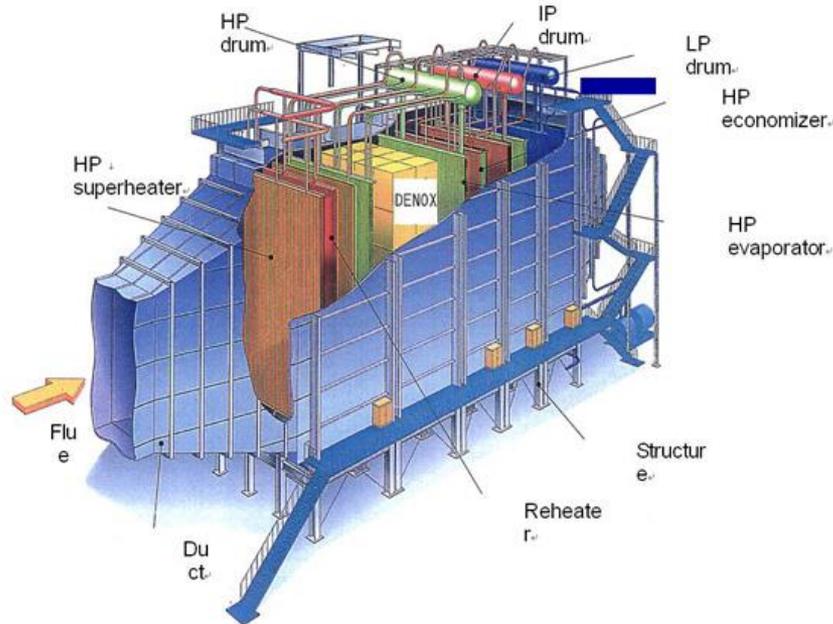
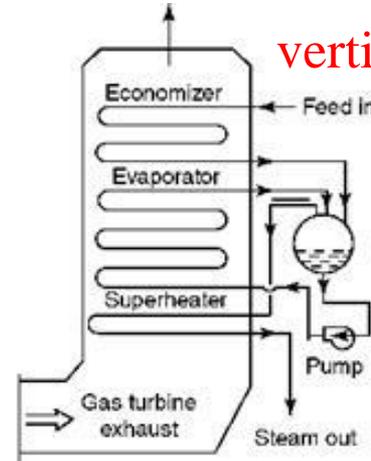
Ciclos térmicos de potência (a gás)

Caldeiras de recuperação térmica

horizontal



vertical





UTE Araucárias, PR - 484,5 MW; UTE Luís Carlos Prestes, Três Lagoas, MS – 368 MW

Observação

Este material refere-se às notas de aula da palestra “**Geração Termelétrica**”, oferecida pelo autor em diferentes oportunidades.

Este material não pode ser reproduzido sem autorização prévia do autor. Quando autorizado, seu uso é exclusivo para atividades de ensino e pesquisa em instituições sem fins lucrativos, desde que citada a fonte.