

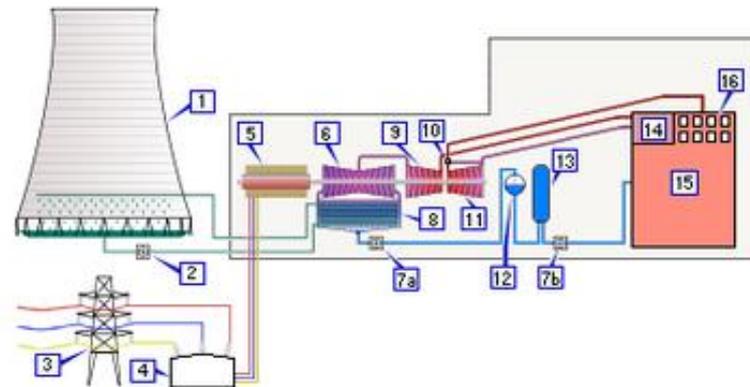
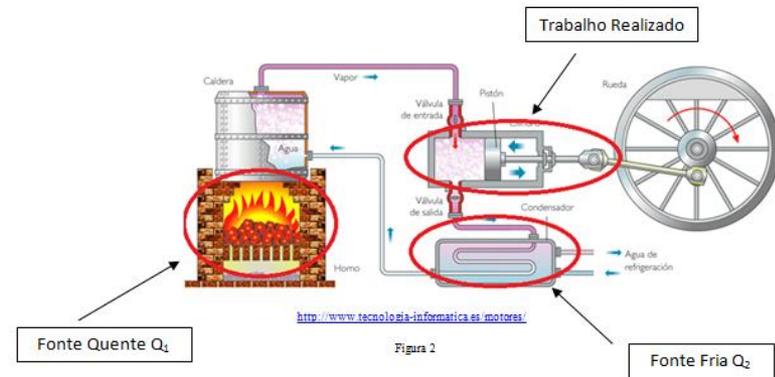
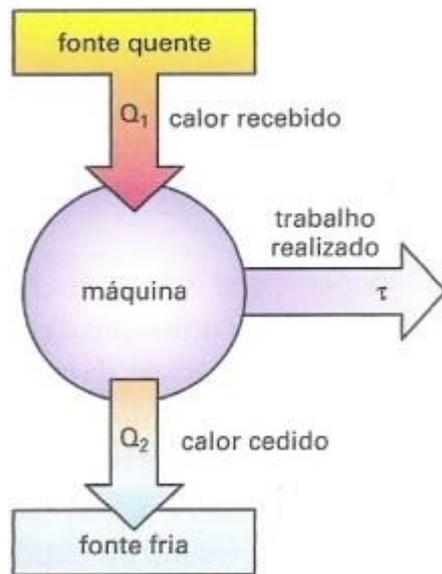


Cogeração de Energia a partir da Biomassa

Professor: Wilson de Aguiar Beninca
Engenheiro Mecânico

Máquinas Térmicas de Geração de Potência

- Máquinas Térmicas: Sistema ou processo destinado a realizar a conversão da energia térmica em trabalho mecânico.



- Assim como todos os demais sistemas desenvolvidos pelo homem, as máquinas térmicas tem sua eficiência e processos limitados a segunda Lei.

Qual o limite da eficiência de uma máquina térmica?



$$\eta = [1 - Q_2/Q_1]$$

$$Q_1 \rightarrow 0$$

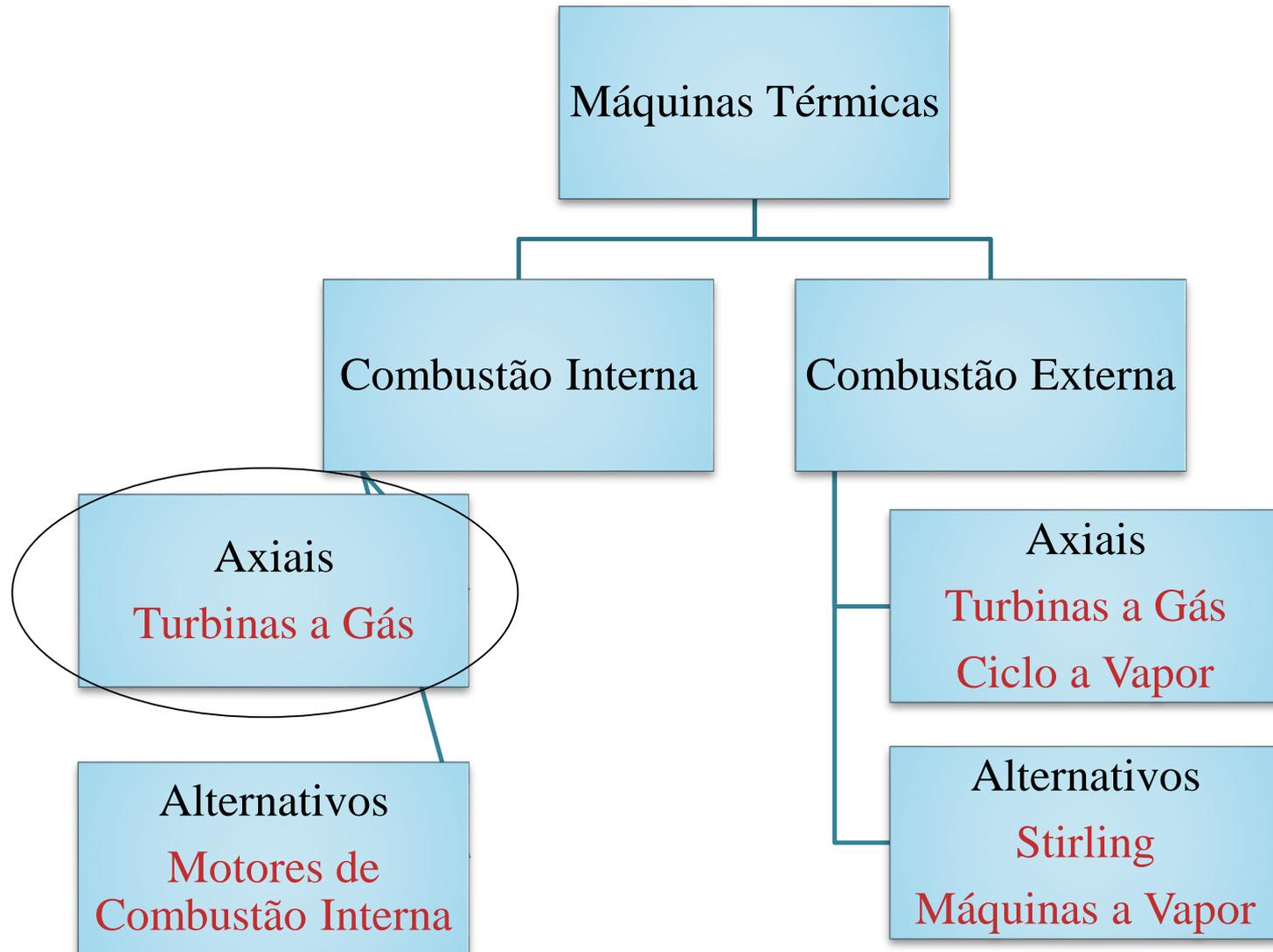
$$\eta \rightarrow 1$$

É possível construir um sistema com esta eficiência?

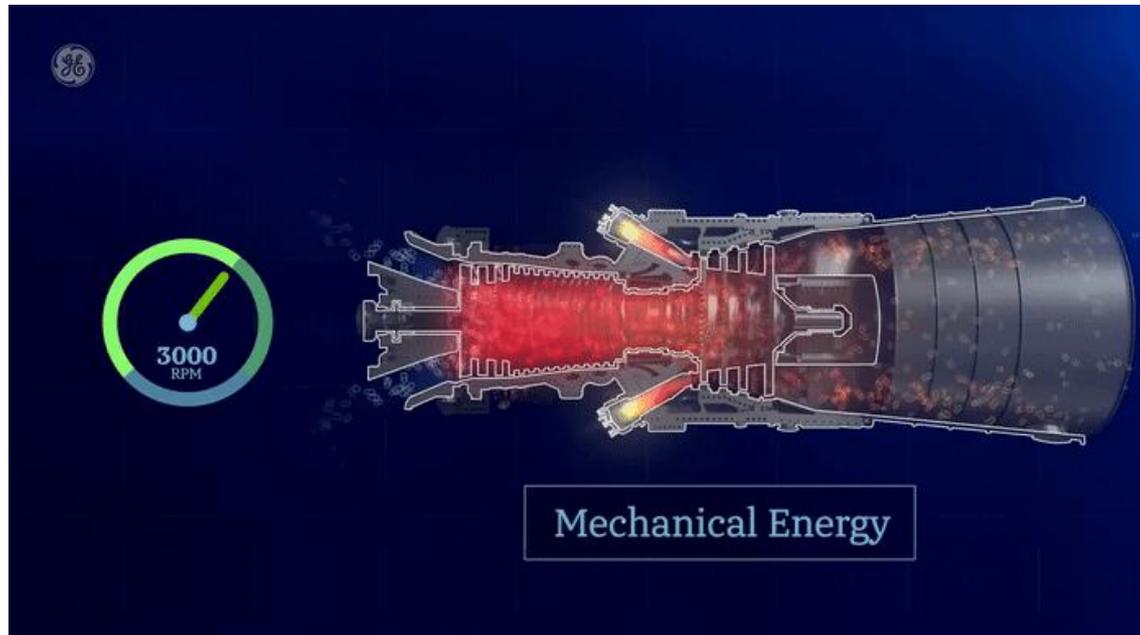
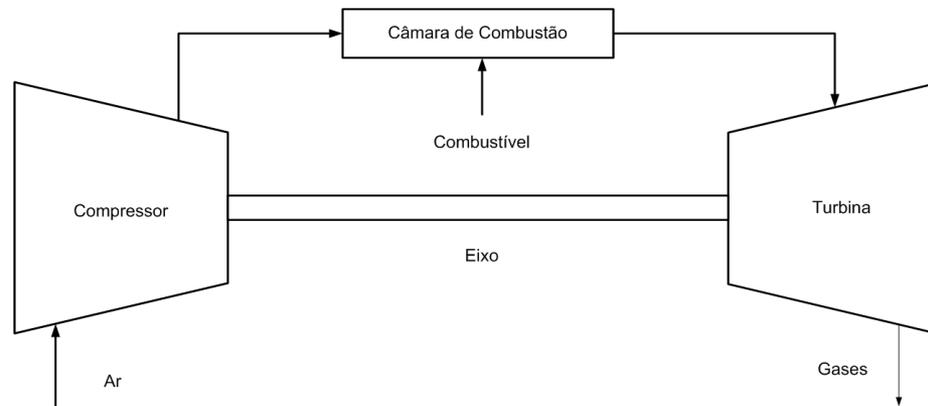
$$\eta \rightarrow 100\%$$

$$\eta = [1 - T_2/T_1]$$

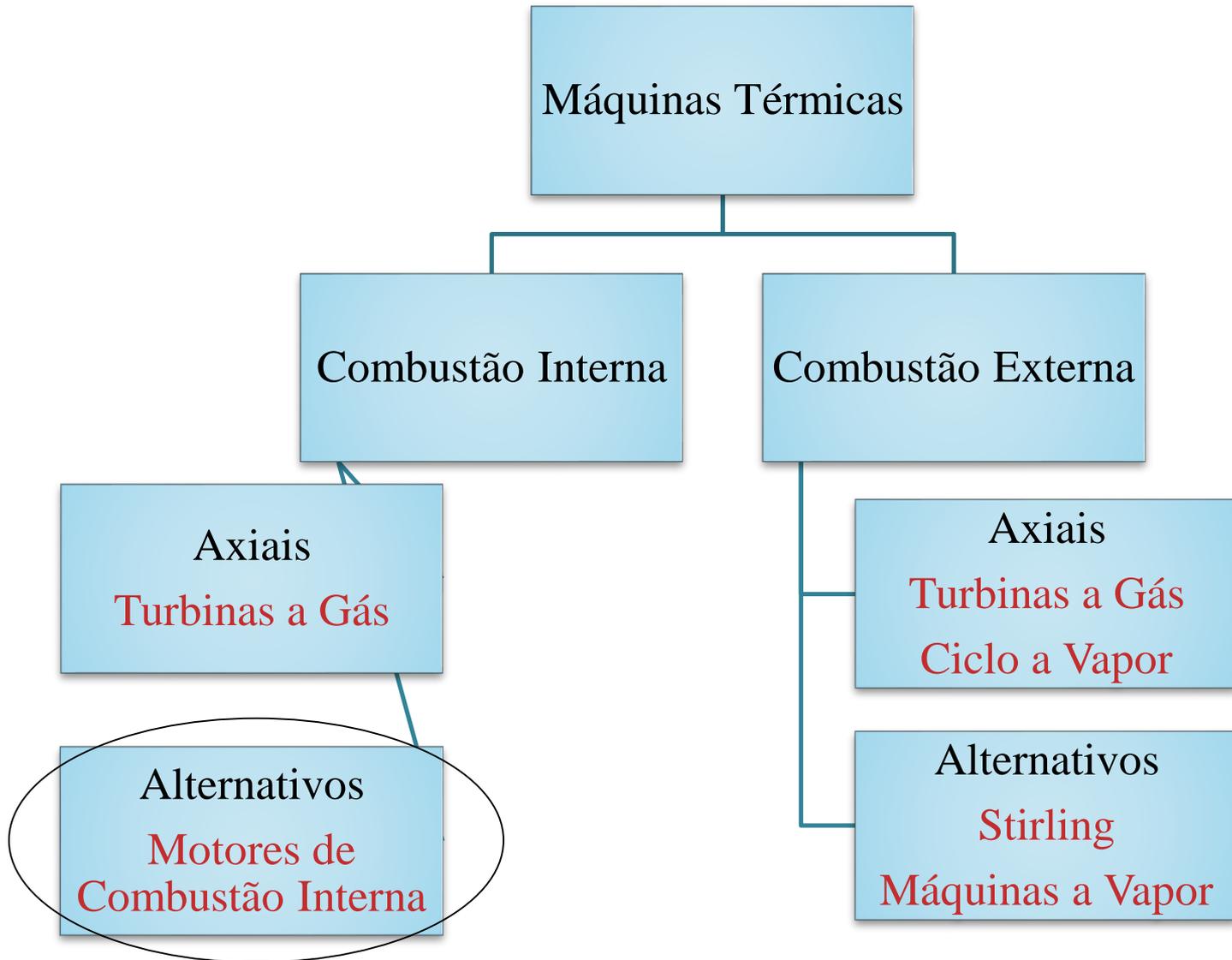
Máquinas Térmicas: Conversão de Calor em trabalho



Turbinas a Gás



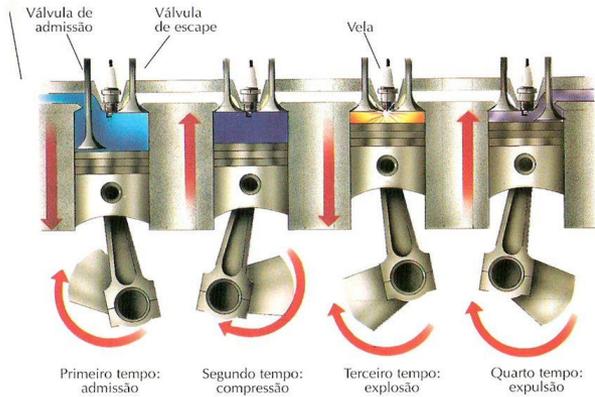
Máquinas Térmicas: Conversão de Calor em trabalho



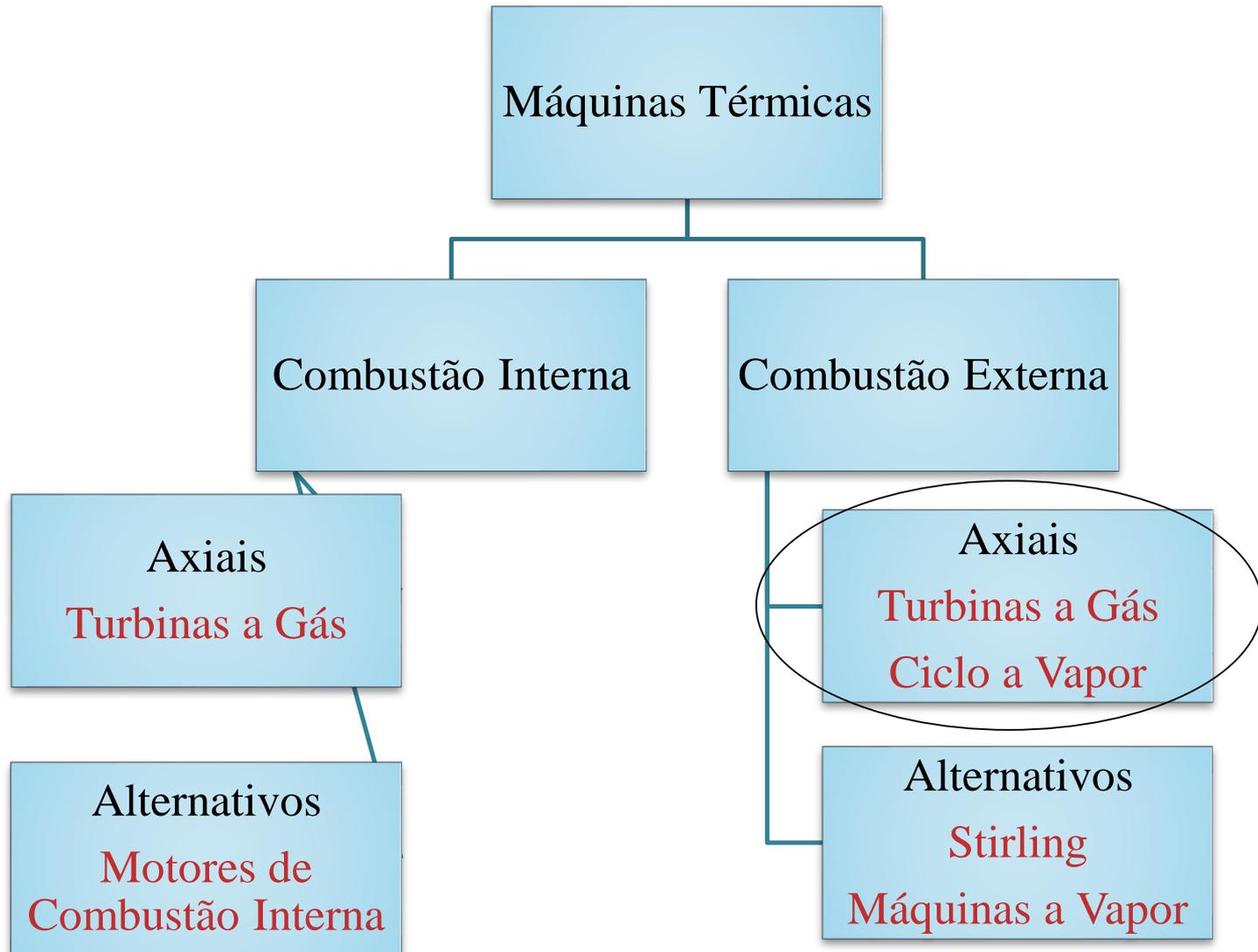
Motores de combustão interna alternativos

CICLOS TERMODINÂMICOS REAIS

Os motores de combustão interna a 4 tempos – o Ciclo Otto



Máquinas Térmicas: Conversão de Calor em trabalho



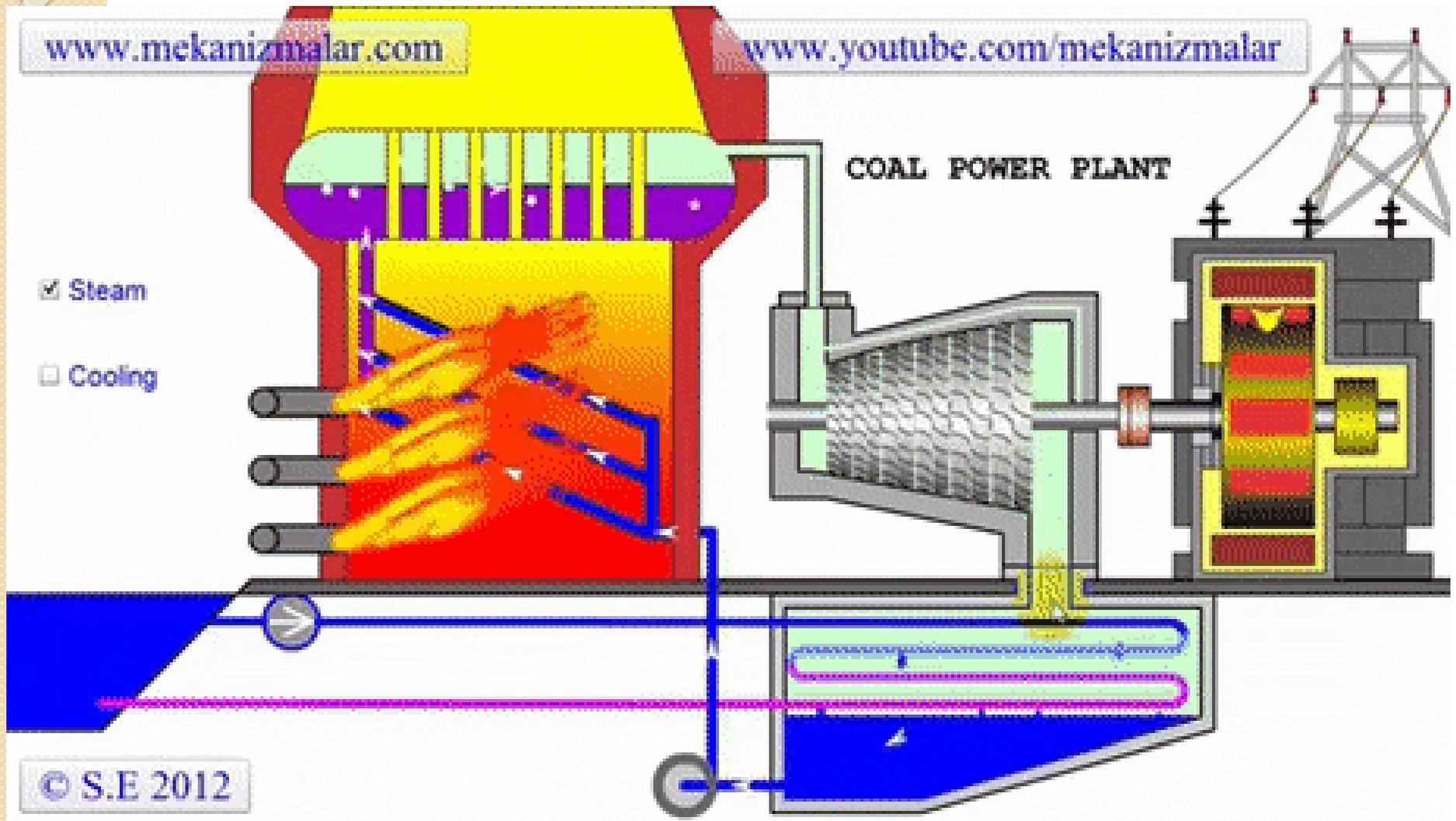
Ciclo a vapor

www.mekanizmalar.com

www.youtube.com/mekanizmalar

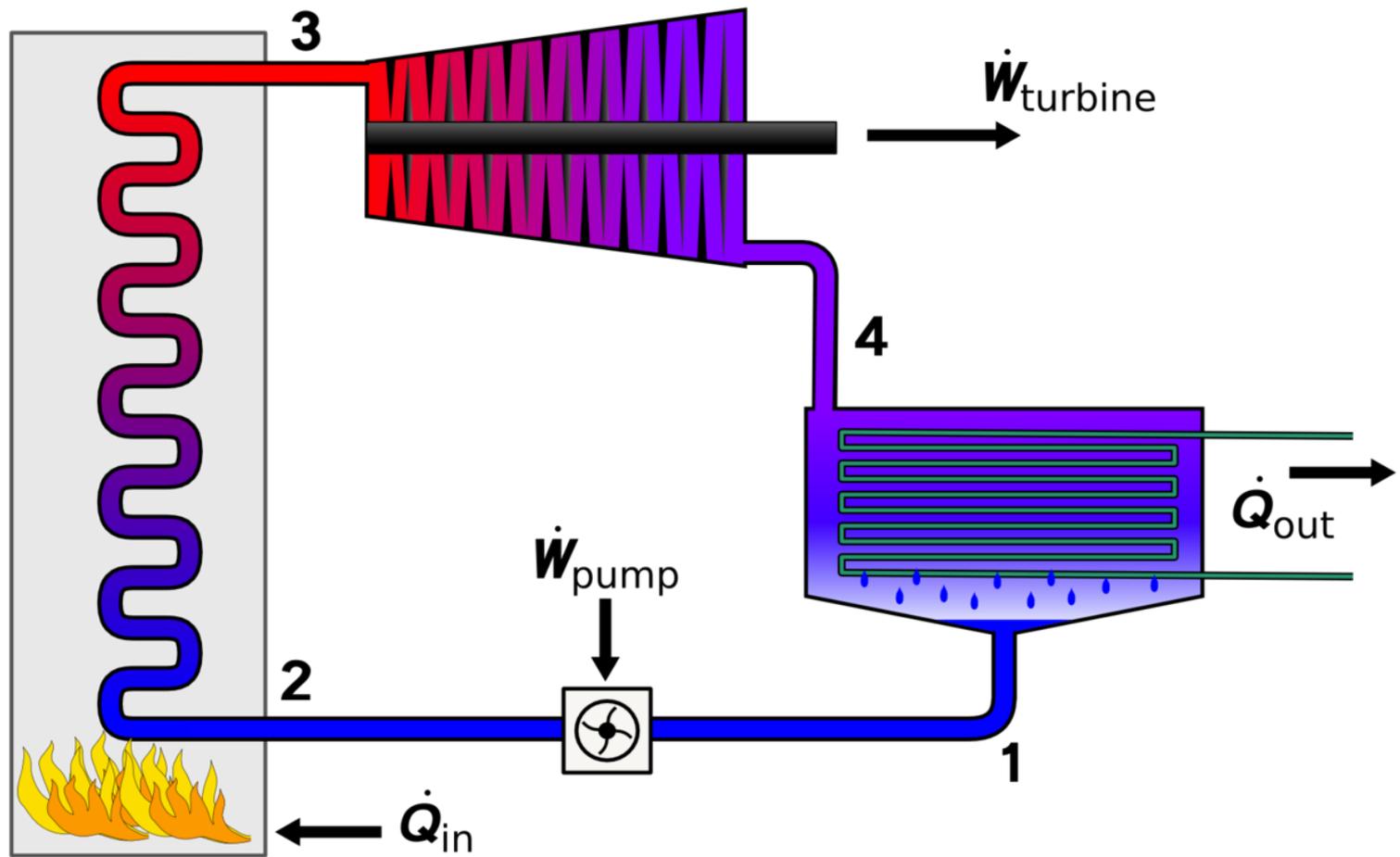
- Steam
- Cooling

COAL POWER PLANT



© S.E 2012

Ciclo a vapor



Ciclo de Potência Combinado



Combined-Cycle Power Plant

Steam Turbine

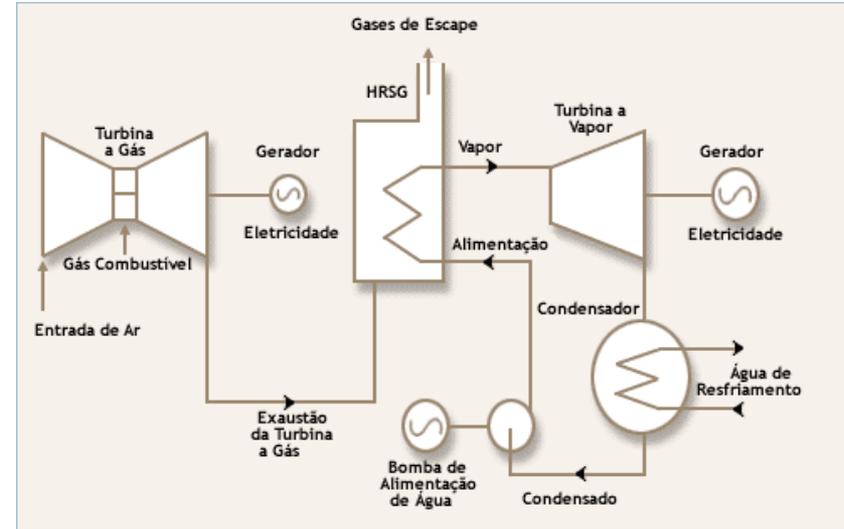
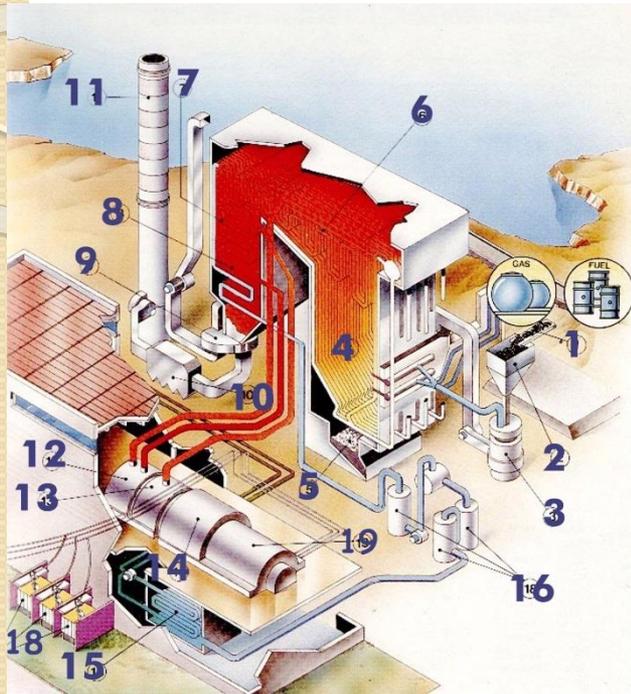
HRSG

Gas Turbine

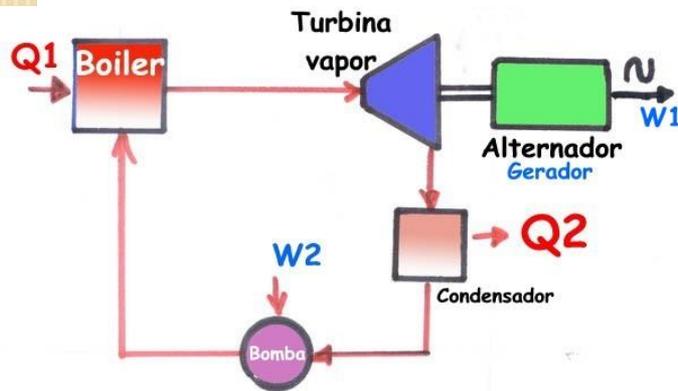
50%
MORE
POWER



Central Termelétrica Energia Elétrica Combinada



Ciclo combinado



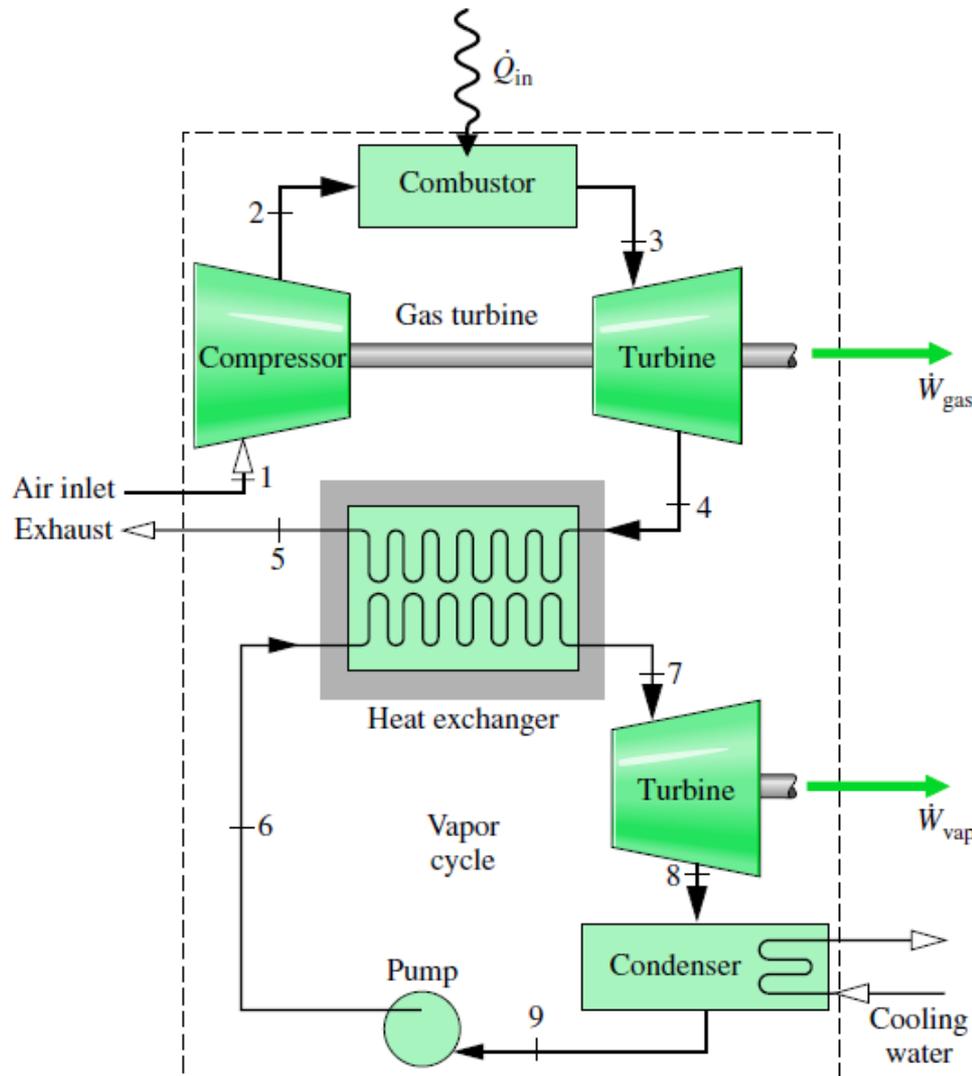
Ciclo de Potência Combinado

- Eficiência do ciclo combinado:

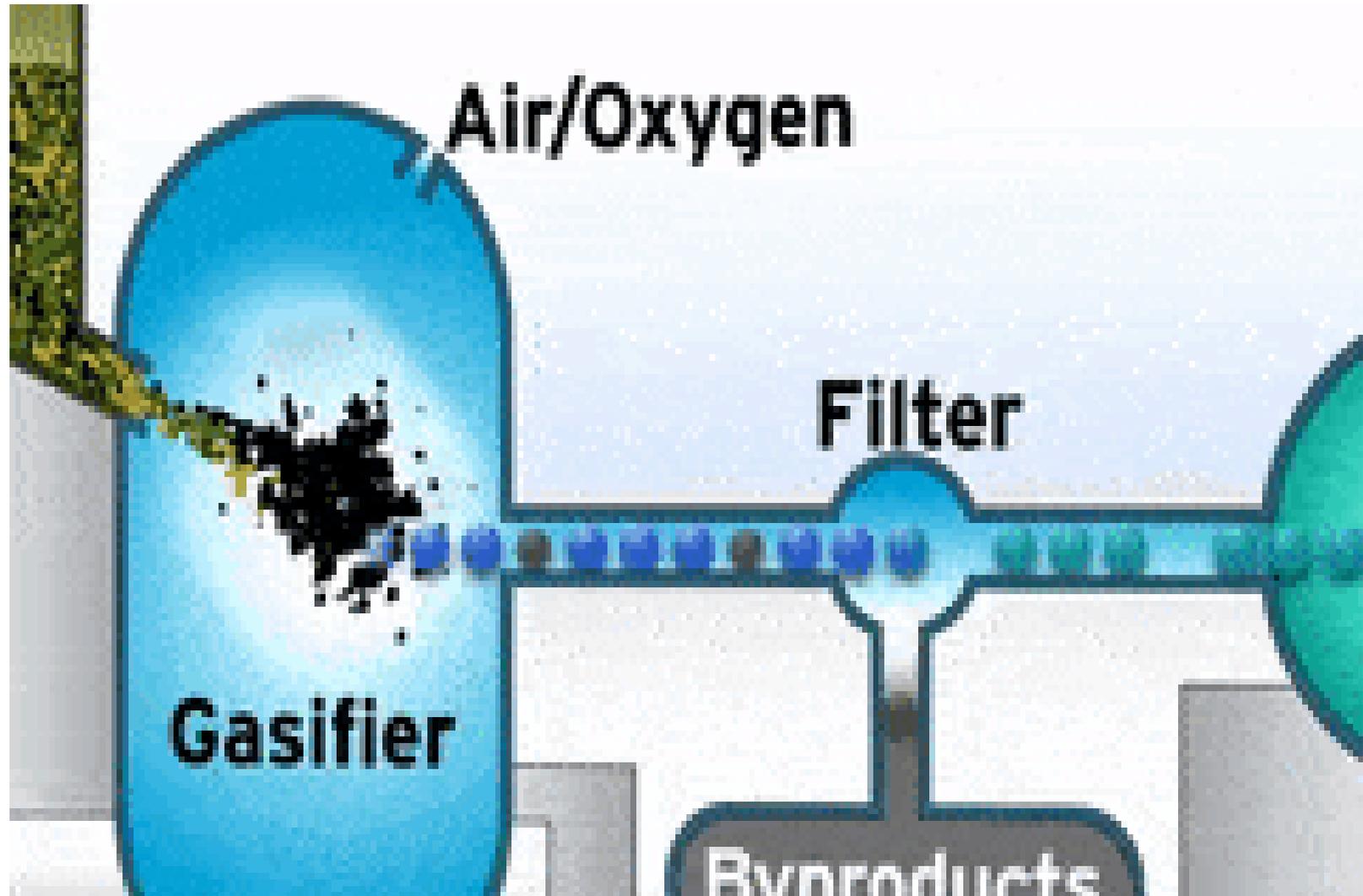
$$\eta = \frac{\dot{W}_{\text{gas}} + \dot{W}_{\text{vap}}}{\dot{Q}_{\text{in}}}$$

- 1ª Lei no Trocador de calor

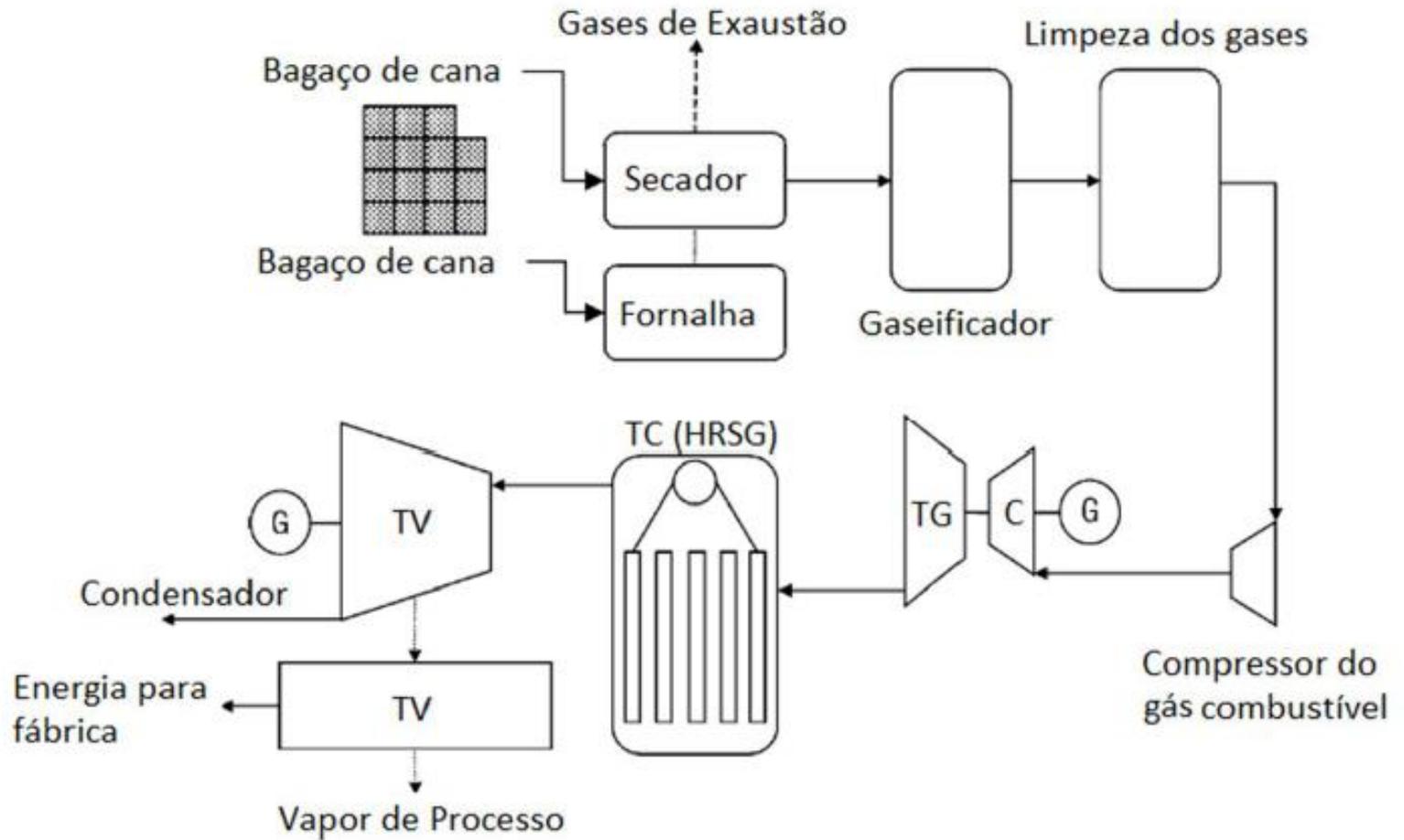
$$\dot{m}_v(h_7 - h_6) = \dot{m}_g(h_4 - h_5)$$



Ciclo de Potência Combinado com biomassa sólida (BIG/GT)



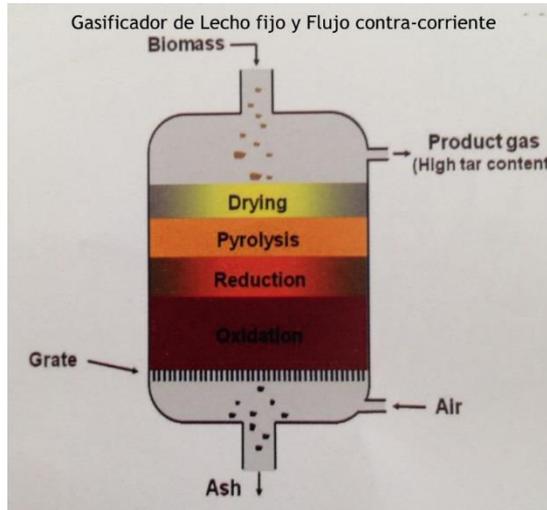
Ciclo de Potência Combinado com biomassa sólida (BIG/GT)



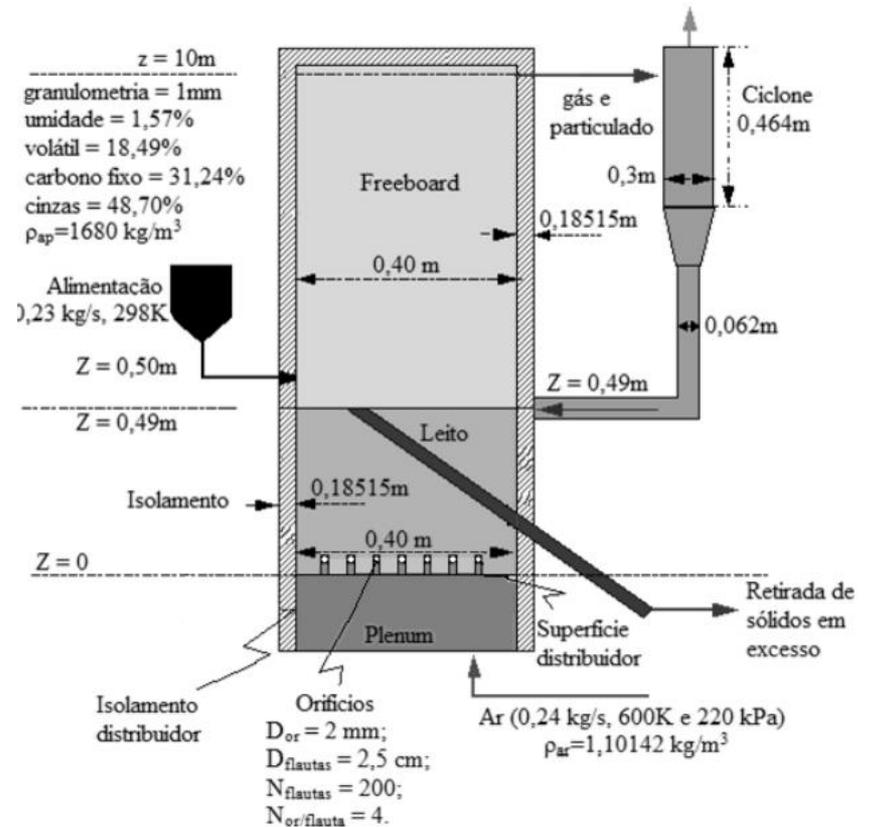
Fonte: Adaptado de (LARSON; WILLIAMS; LEAL, 2001)

Gaseificador de Biomassa

Leito fixo fluxo cruzado

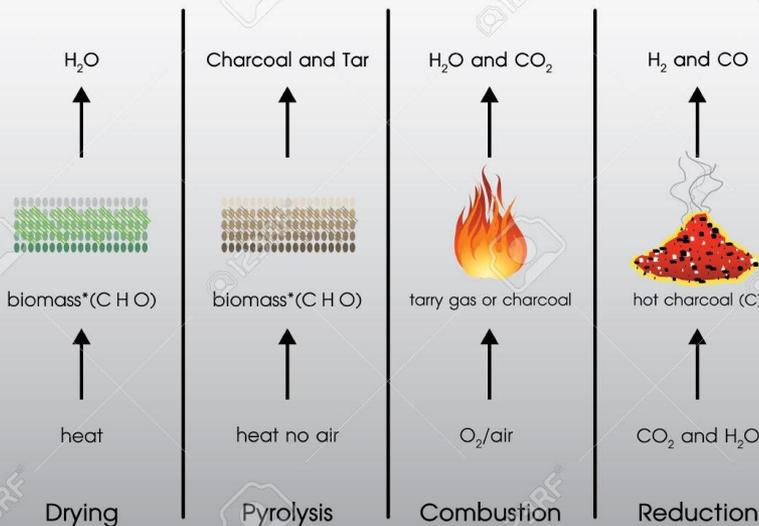


Leito fluidizado



Esquema do gaseificador com os dados utilizados no dimensionamento do distribuidor (de Souza-Santos, 2011).

4 Processes in Gasification



*Biomass is a combination of C, H, and O ($\text{C}_x\text{H}_y\text{O}_z$)

Gaseificador em veículos (Fonte: Internet)



Peugeot 402



Trator Ford (Suécia)



([Finlândia](#), [Junho](#) de [2001](#)).

O que é Cogeração?

- Produção seqüencial de energia elétrica ou mecânica e de energia térmica útil em processos industriais, a partir de uma mesma fonte de energia primária (calor).

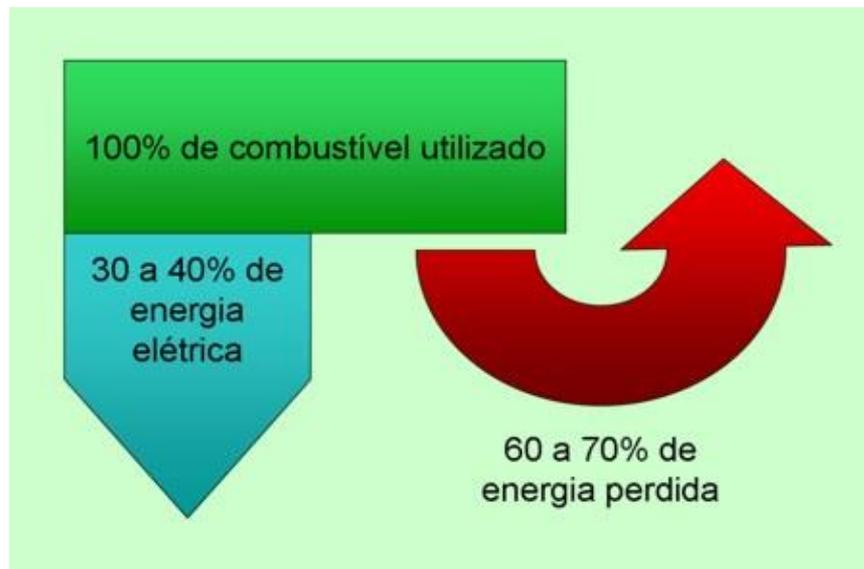


Figura 1 Aproveitamento da energia primária de um combustível num sistema convencional de geração de potencia (INEE, 2007).

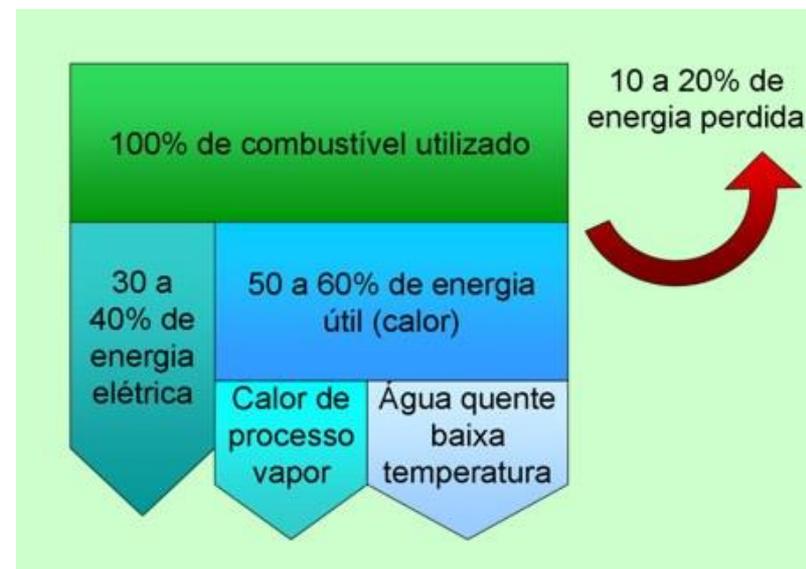
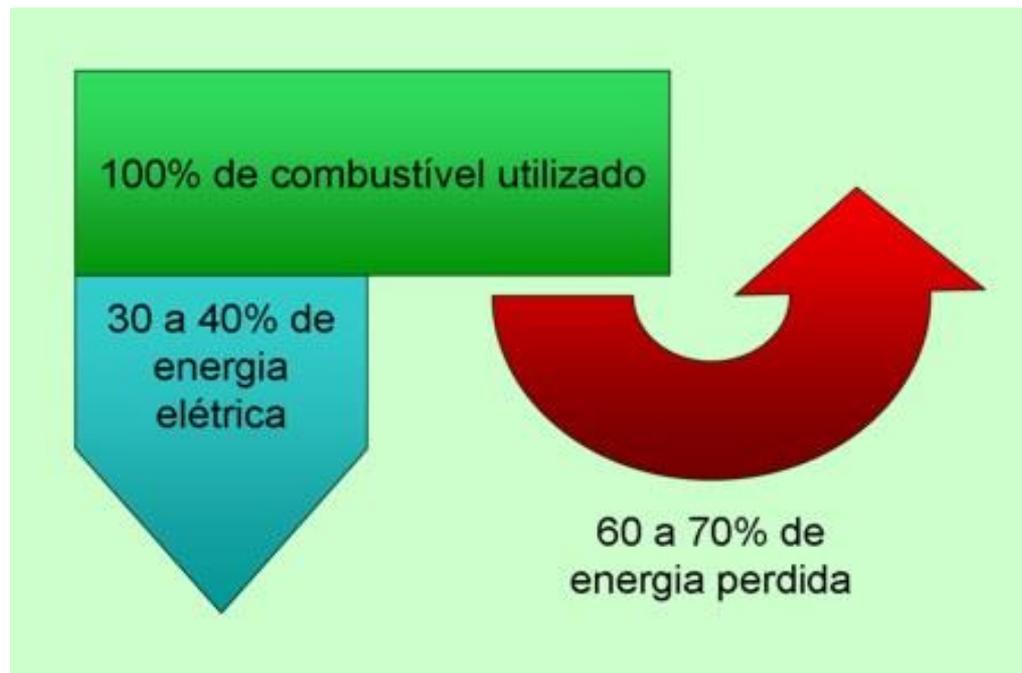


Figura 2 Aproveitamento da energia primária de um combustível num sistema de cogeração (INEE, 2007).

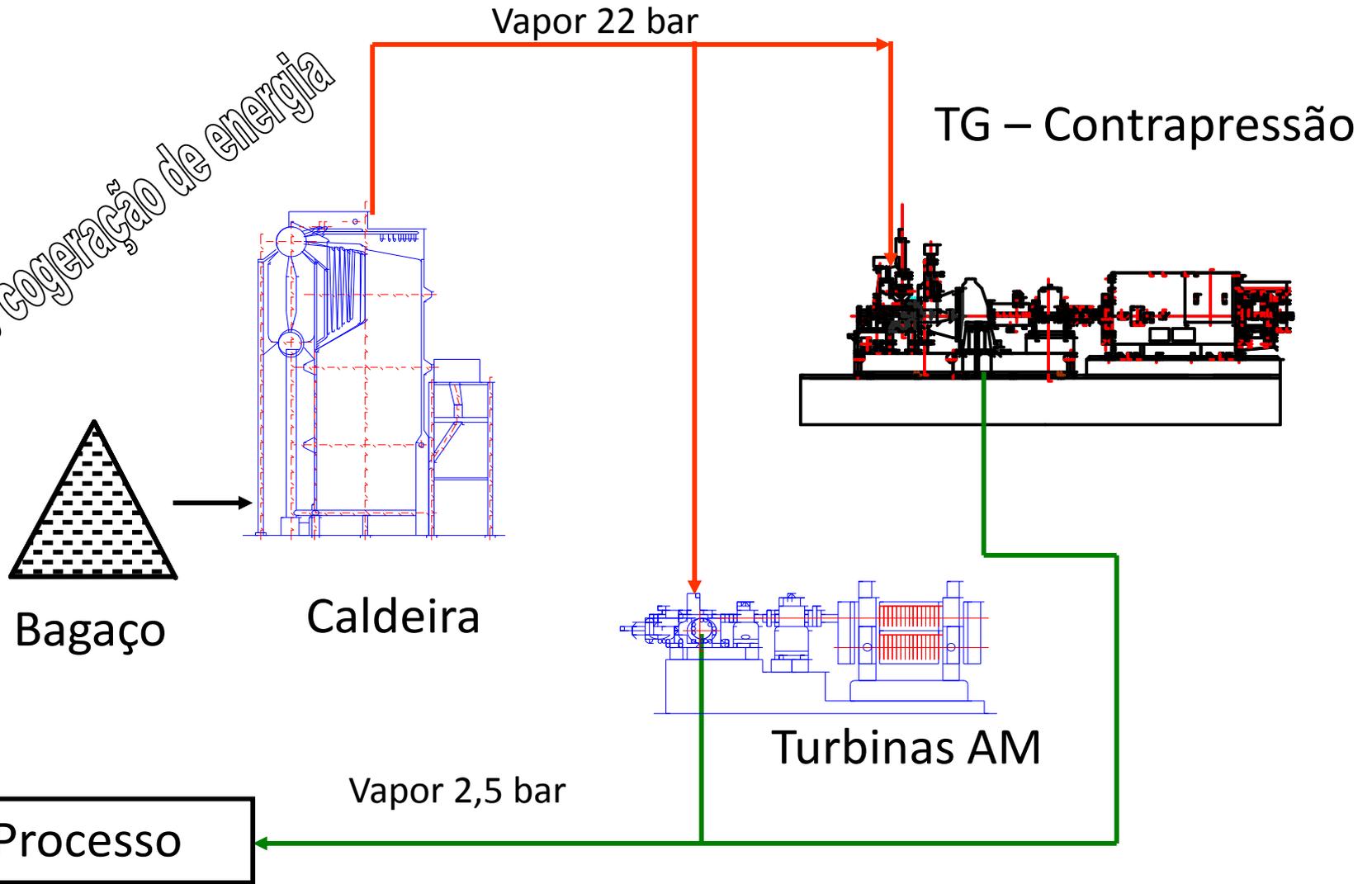
Cogeração, por que integrar os processo?

- A partir do primeiro choque do petróleo em 1973, reforçada em 1978 pelo segundo choque, diversos países criaram programas de conservação de energia, com incentivos que visavam reduzir o consumo e a dependência do petróleo importado.



Cogeração

Isto é cogeração de energia



Cogeração: Geração integrada de mais de uma forma de energia a partir da combustão de um único combustível.

Eficiência dos processo de geração vs Cogeração

	Produção Energia ou calor	Cogeração
Energia consumida	Massa de combustível (kg/s) x PCI (MJ/kg)	Massa de combustível (kg/s) x PCI (MJ/kg)
Potência útil	Trabalho de Eixo ou Calor (kW)	Trabalho de Eixo e Calor (kW)

$$\eta_{Ciclo\ Simple} = \frac{W_{util} [MW]}{E_{Consumida} [MW]}$$

$$\eta_{Combinado} = \frac{W_{util} + Q_{Processo} [MW]}{E_{Consumida} [MW]}$$

Cogeração

- Aspectos Importantes da Cogeração

- Desempenho das centrais de cogeração e objetivos:

- ✓ - Atender a demanda elétrica;
- ✓ - Operar com a máxima eficiência.

Turbina a Gás	Central a Vapor	Motores Alternativos	Ciclo Combinado	Central de Cogeração
37-38 [%]	44 [%]	48 [%]	58 [%]	84 [%]

Geradores de vapor (Cogeração)

O que são geradores de vapor

Utilização da água como fluido de trabalho

Geradores de vapor flamatubulares;

Geradores de vapor aguatubulares;

Princípio básico de operação;

Principais componentes do gerador de vapor.

Motivação

▪ GERADORES DE VAPOR

Definição: Gerador de Vapor (G.V.) é um aparelho térmico (trocador de calor) que opera a pressão superior a atmosférica, produzindo vapor a partir da energia térmica fornecida por uma fonte qualquer:

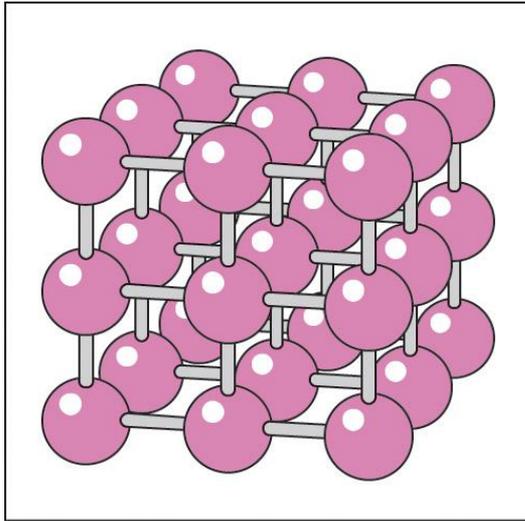
- Energia liberada pela combustão (no Caso da Biomassa);
- Energia elétrica (eletrotermia);
- Energia nuclear (fissão);
- Calor residual de outro processo ou combustível sub produto do processo (caldeira de recuperação).

Conceitos Fundamentais

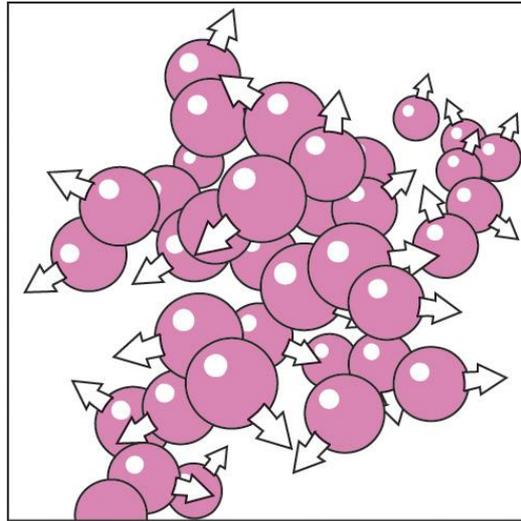
- Porque utilizar o vapor de água como fluido de trabalho:
 - Água é abundante, baixo custo;
 - Não reagente, atóxica;
 - Calor latente elevada;
 - Elevados coeficientes de convecção, reduz área de troca da caldeira;
 - Mudança de fase (líquido vapor em temperatura e pressões aceitáveis ao processos).

Conceitos Fundamentais

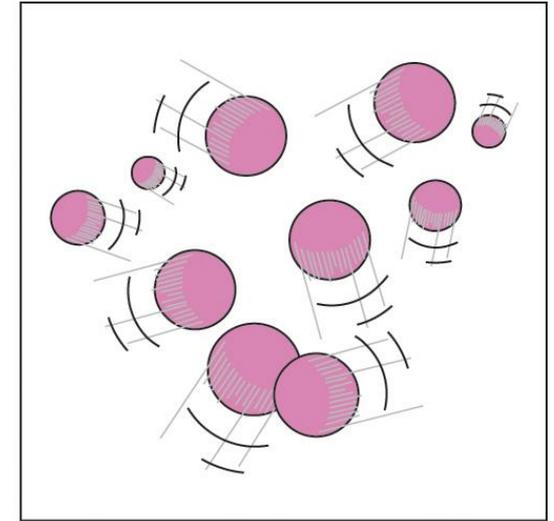
- Processos de mudança de fase, estrutura molecular:



(a)



(b)

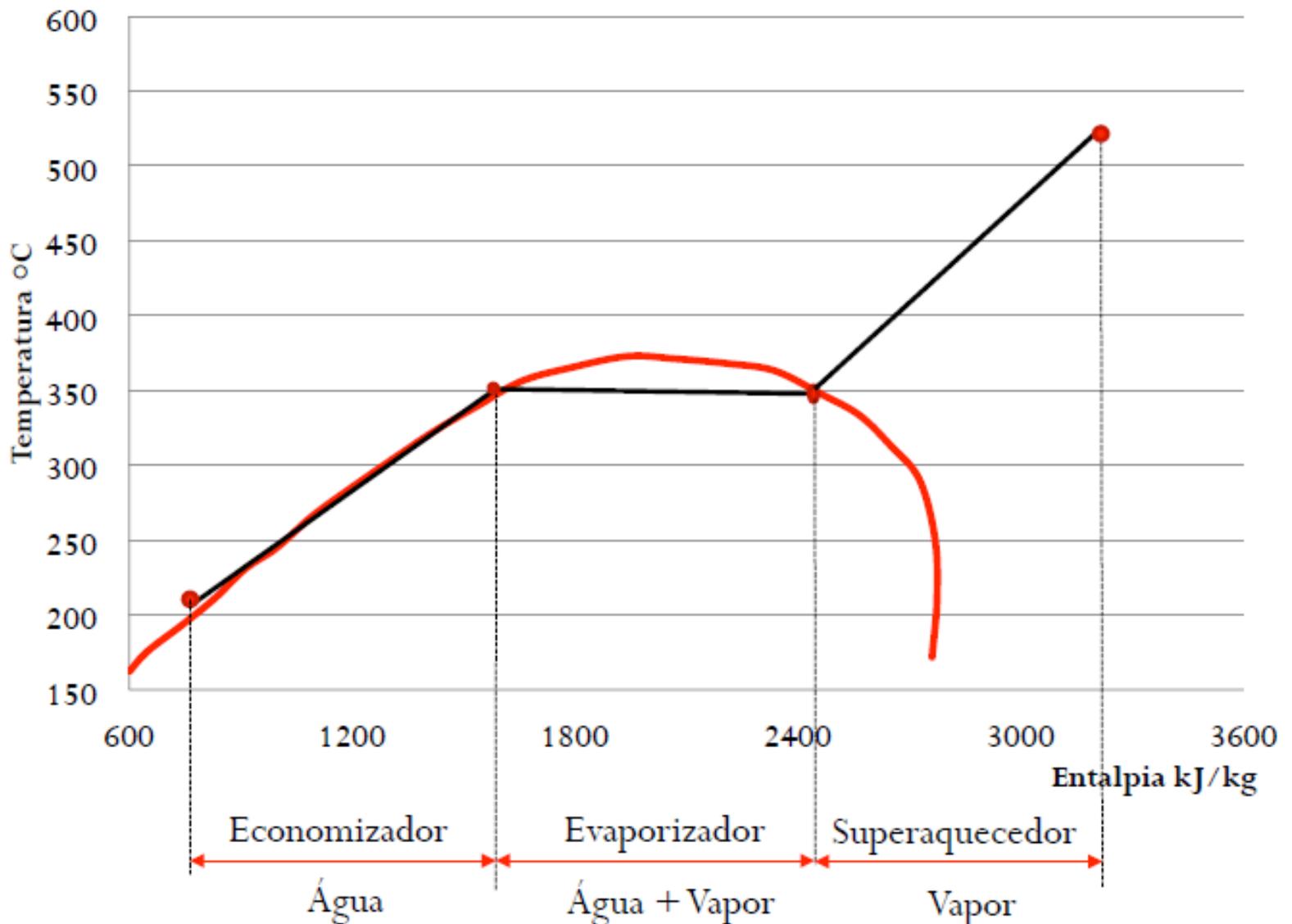


(c)

- Disposição dos átomos nas diferentes fases; (a) num sólido, as moléculas encontram-se em posições relativamente fixas (b) blocos de moléculas flutuam em relação uns aos outros na fase líquida (c) num gás as moléculas deslocam-se de forma aleatória.

Conceitos Fundamentais

- Papel de um gerador de Vapor:



Conceitos Fundamentais

- **Calor Sensível e Calor Latente:**

Adição da Entalpia do Líquido (calor sensível): é a quantidade de calor necessária para elevar 1 [kg] de água de 0 [°C] até sua temperatura de ebulição (“ h_f ” cresce com o aumento de “pressão” e “temperatura”);

Adição da Entalpia de Vaporização (calor latente): é o número de calor necessária para converter 1 [kg] de água líquida em vapor seco à mesma temperatura e pressão (“ h_{fg} ” decresce com o aumento da “pressão absoluta” do vapor, a partir de uma dada pressão).

Classificação das caldeiras

- **Quanto a função ou aplicação do gerador de vapor:**
 - **Caldeiras de Água Quente;** apenas aquece a água, não ocorrendo assim o processo de mudança de fase. Portanto obrigatoriamente a circulação é forçada. (piscinas térmicas);
 - **Caldeiras de Vapor;** Função exclusiva de gerar apenas vapor superaquecido ou não;
 - **Caldeiras de Recuperação;** Aplicação em unidades que aproveitam o calor rejeitado em algum processo para gerar vapor. Em centrais térmicas é bastante comum.
 - **Geradores Reatores Nucleares;** A energia térmica para o processo de aquecimento da água vem da fissão nuclear.

Classificação das caldeiras

- Quanto ao estado físico do combustível consumido:

- Combustíveis:

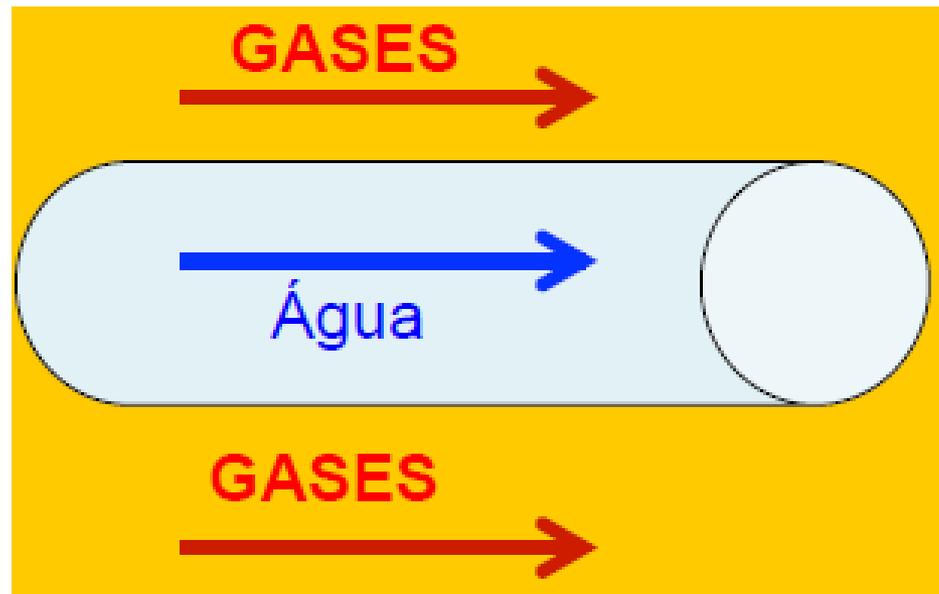
- ✓ **Sólidos (Biomassa)**

- ✓ **Líquidos (Licor Negro)**

- ✓ **Gasosos**

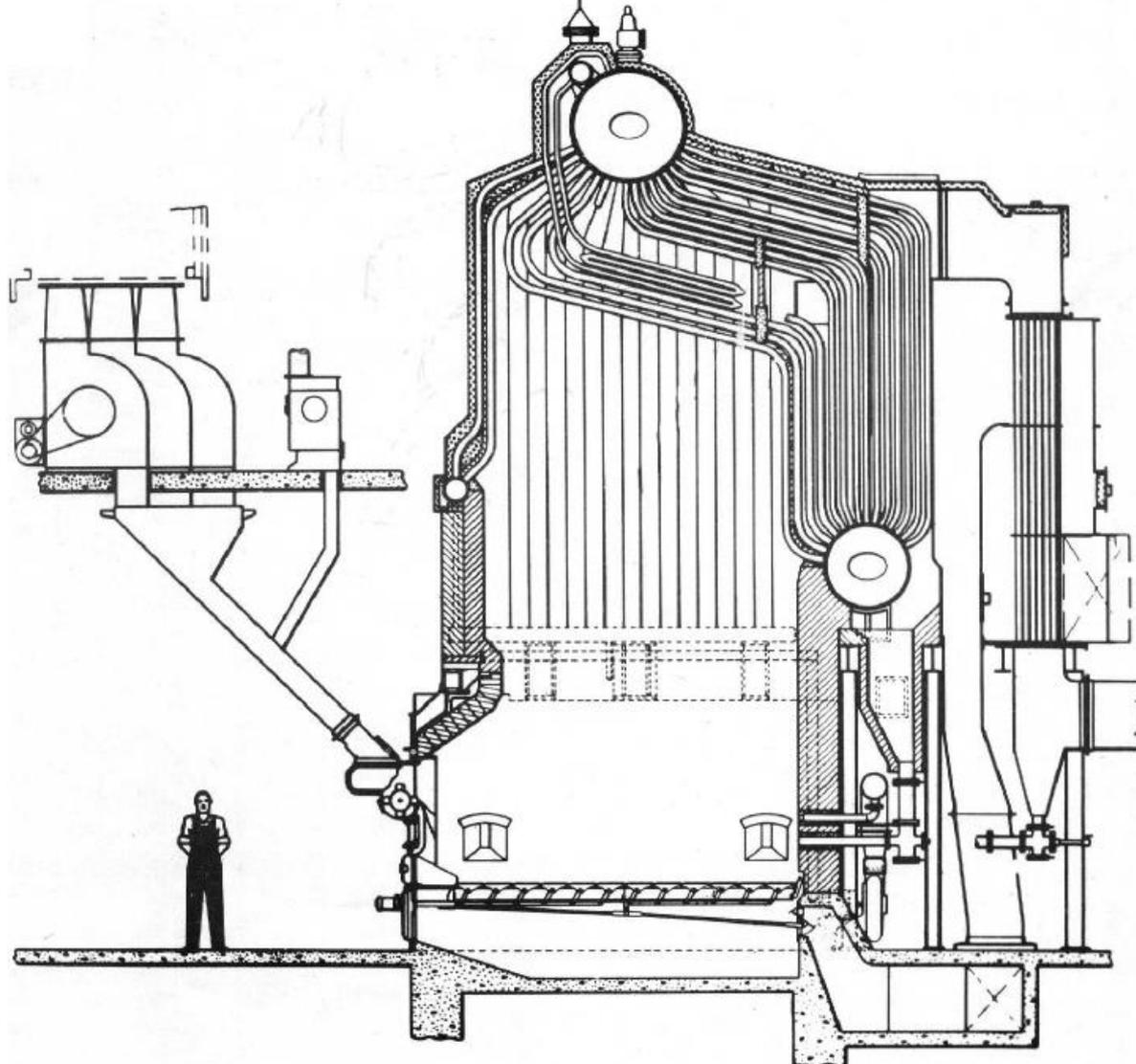
Caldeiras Aguatubulares

- Neste tipo de caldeira, os gases quentes circulam pela parte externa dos tubos e a água se encontra na parte interna dos mesmos, dispostos na forma de paredes de água ou de feixes tubulares;
- São caldeiras mais difíceis de serem construídas e necessitam de maior controle na operação. Suas características operacionais são: Alta produção de vapor, chegando a 750ton/h – normalmente entre 15 e 150ton/h e alta pressão de operação, normalmente entre 90kgf/cm² a 100kgf/cm².



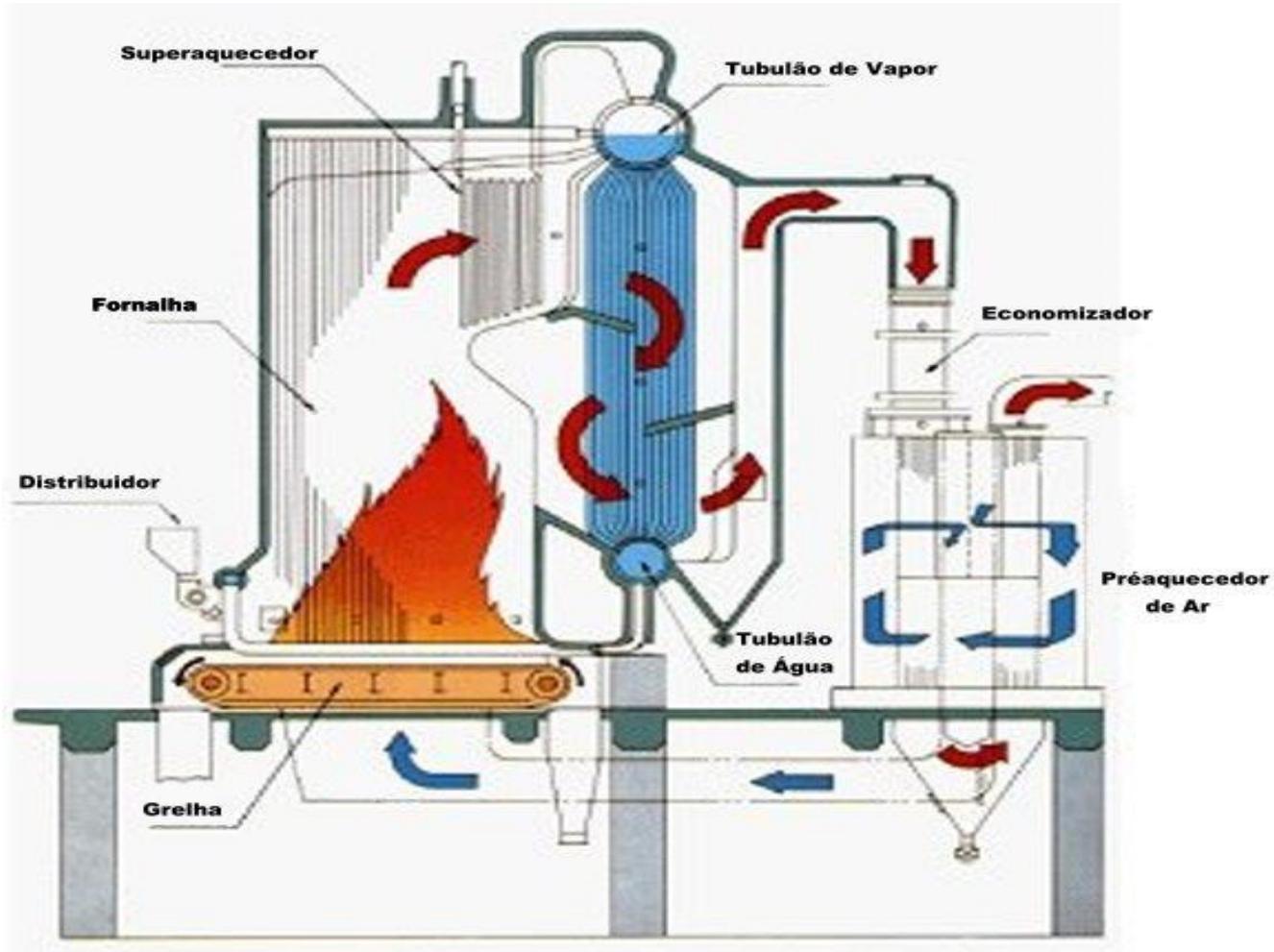
Caldeiras Aguatubulares

- Sem tubos nas paredes da câmara de combustão:



Caldeiras Aguatubulares

- De tubos curvos (na região convectiva, fluxo cruzado)



Caldeiras Aguatubulares

- **Partes e componentes:**

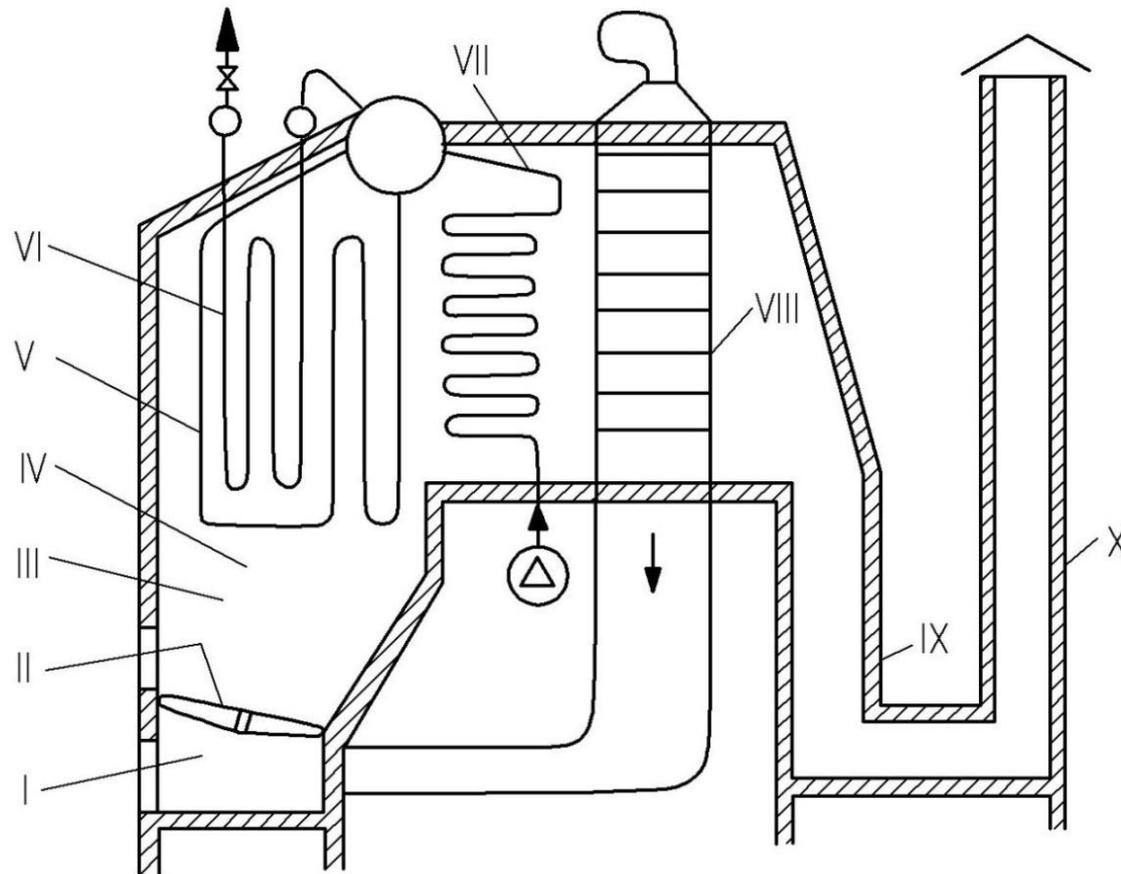
- Grelha queimador;
- Cinzeiro;
- Fornalha;
- Caldeira / Tubulão inferior e superior;
- Superaquecedor;
- Economizador;
- Paredes de água;
- Reaquecedor;
- Pré-Aquecedor de Ar;
- Chaminé;
- Sopradores de Fuligem;
- Válvula de segurança;
- Água de alimentação;

Obs: Lembrando que nem todos geradores de vapor (GV) possuem todos estes componentes. Geradores de vapor para algumas aplicações específicas podem ter outros equipamentos não apresentados.

Caldeiras Aguatubulares

▪ Componentes Principais de um Gerador de Vapor

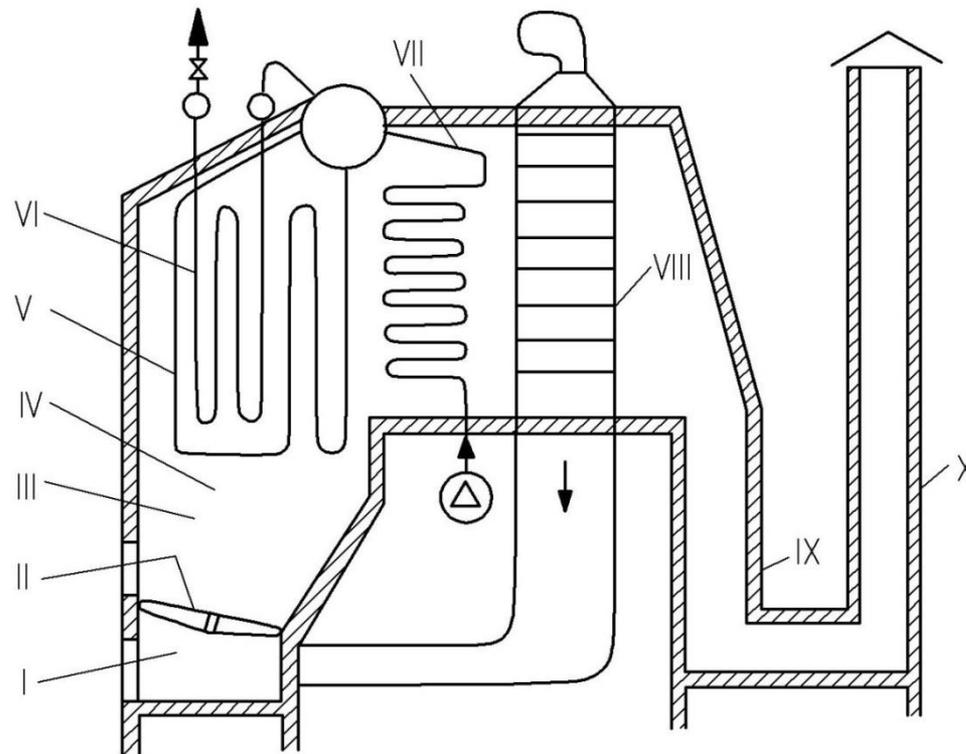
I – **Cinzeiro**: local de deposição das cinzas e restos de combustível que caem da fornalha.



Caldeiras Aguatubulares

- **Componentes Principais de um Gerador de Vapor**

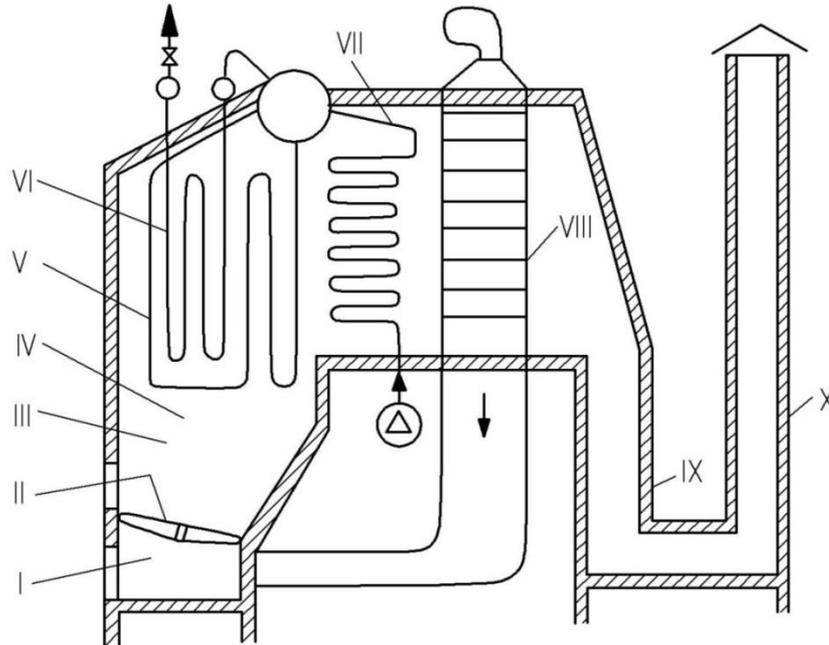
II – **Grelha:** local de deposição do combustível sólido para queima; para G.V. que utilizam combustíveis líquidos ou gasosos, é substituído pelo *atomizador*.



Caldeiras Aguatubulares

- Componentes Principais de um Gerador de Vapor

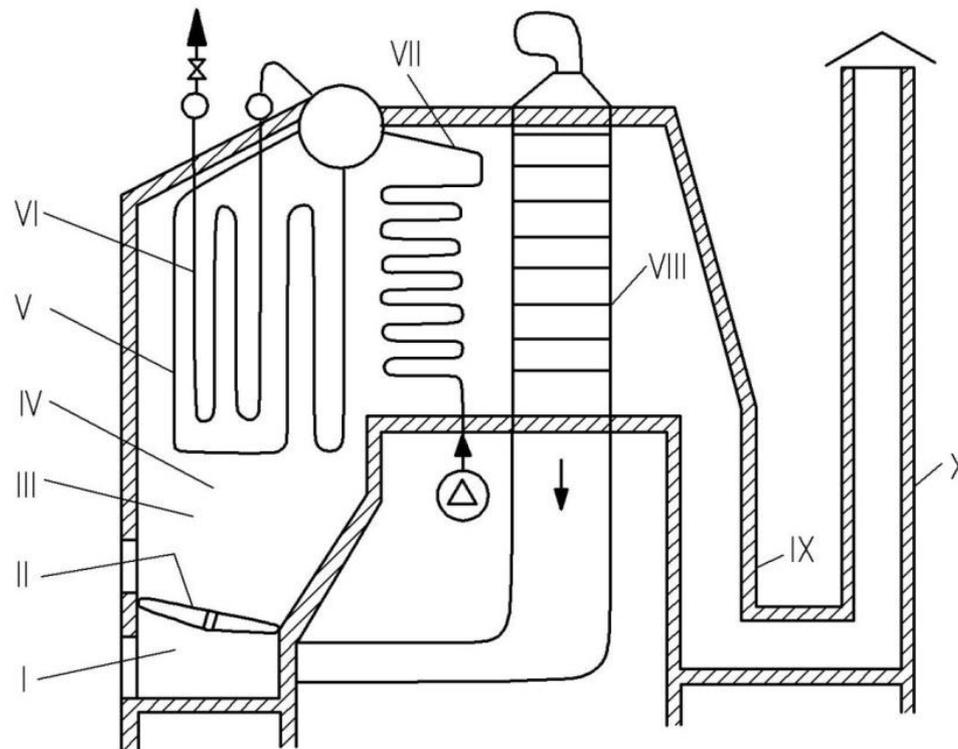
III – **Fornalha:** é o principal equipamento para a queima do combustível. Entre suas funções estão incluídas: a mistura ar-combustível, a atomização e vaporização do combustível e a conservação de uma queima contínua da mistura.



Caldeiras Aguatubulares

- **Componentes Principais de um Gerador de Vapor**

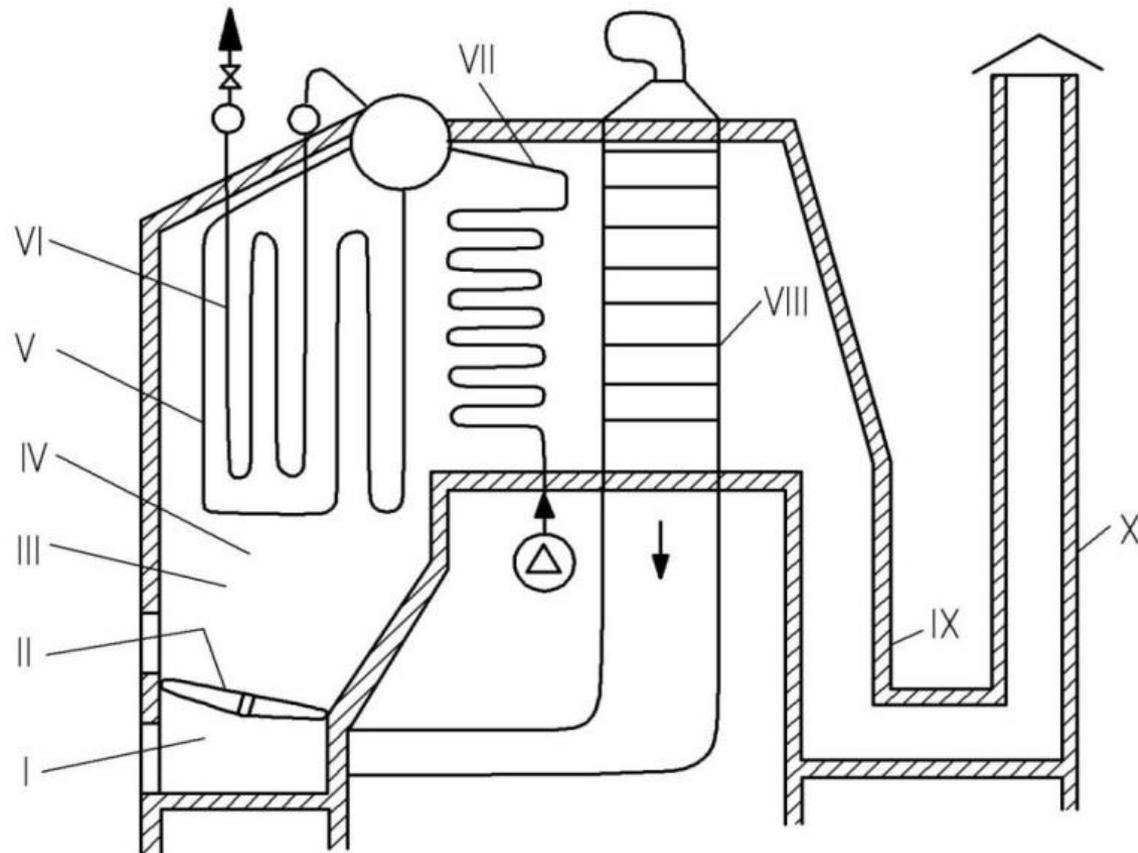
IV - ***Câmara de Combustão***: nada mais é do que um volume que tem a função de manter a chama num valor elevado de temperatura com duração suficiente para que o combustível queime totalmente antes dos produtos alcançarem os feixes de absorção de calor (seção de convecção).



Caldeiras Aguatubulares

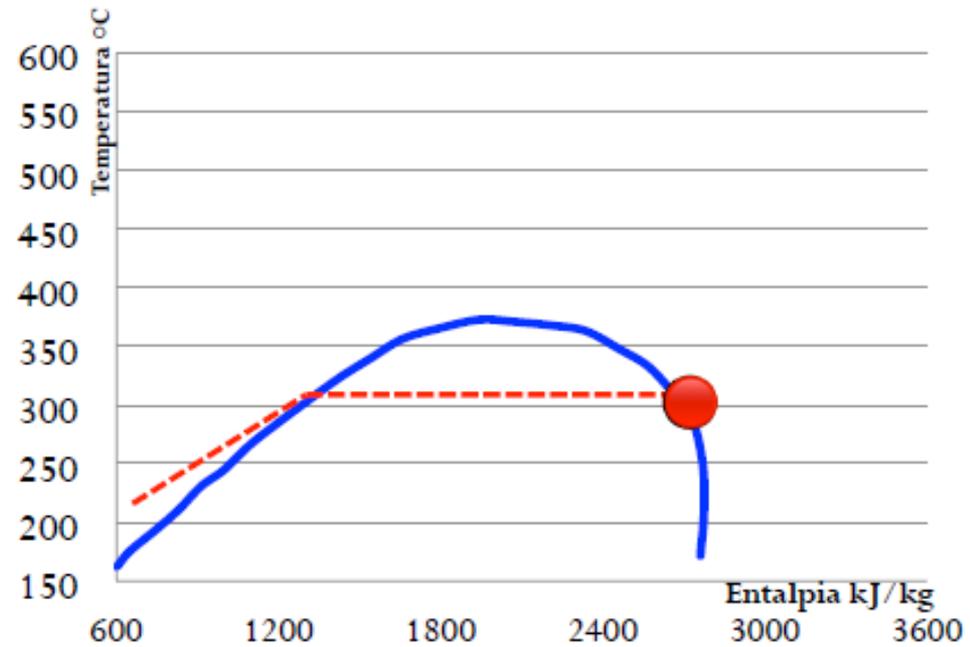
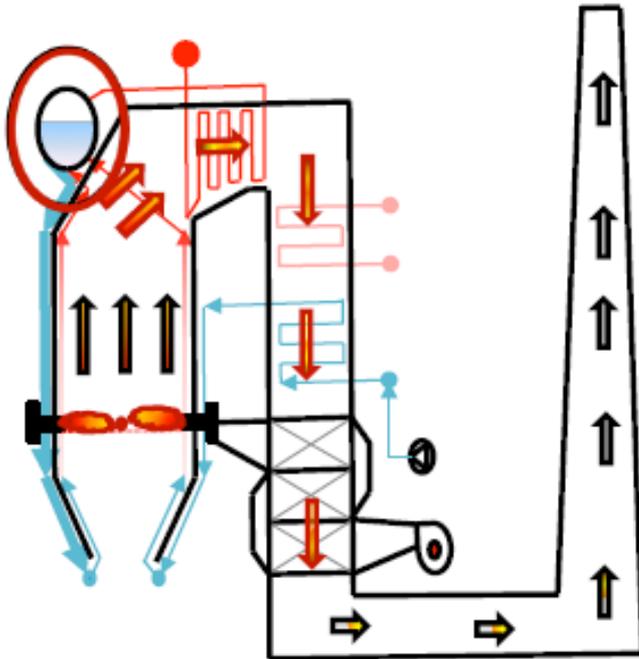
- **Componentes Principais de um Gerador de Vapor**

V - **Caldeira de Vapor:** constituída por um vaso com tubos fechado e pressurizado, contendo água que será transformada em vapor. A caldeira é composto por: **Tubulão superior, tubulão inferior e paredes de água.**



Caldeiras Aguatubulares

- Componentes Principais de um Gerador de Vapor
- Tubulão Superior:



Caldeiras Aguatubulares

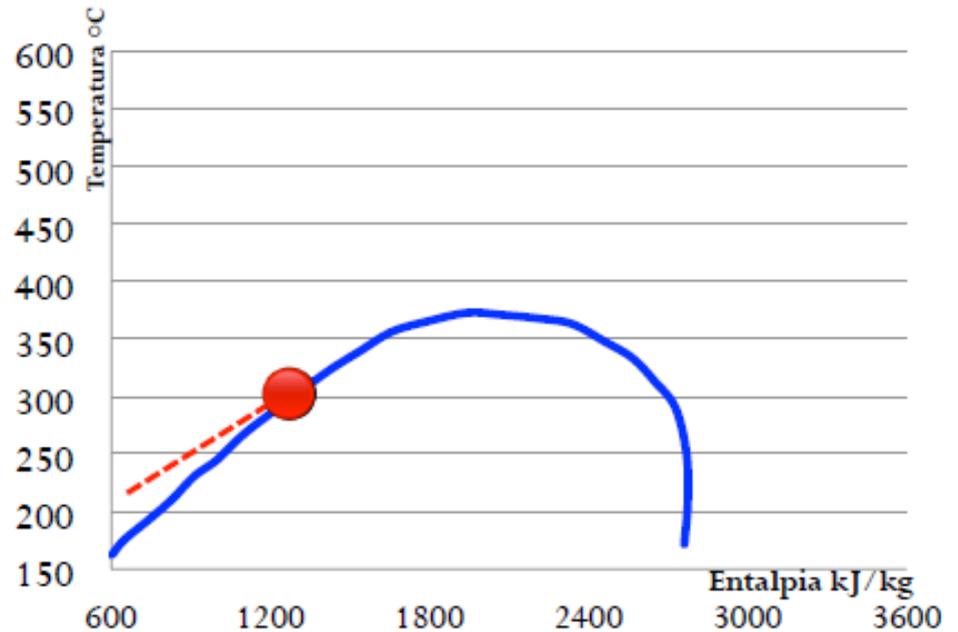
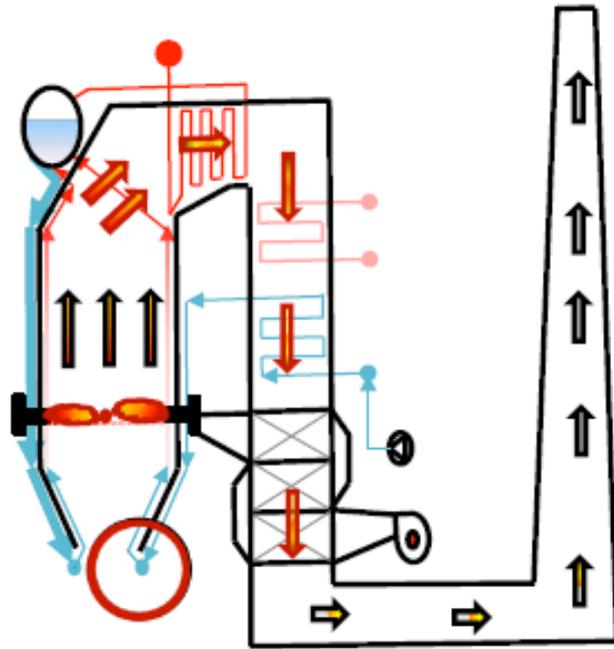
- **Componentes Principais de um Gerador de Vapor**

- ***Tubulão Superior:***

- ✓ O vapor que tenha um pouco de humidade arrastada pode deixar indesejáveis depósitos de sílica nos tubos do superaquecedor. As gotículas de água transportadas para uma turbina de uma caldeira podem corroer as pás e levá-las à destruição. Há muitas ocasiões em que a remoção de líquido de um fluxo de gás ou gás a partir de uma corrente de líquido é necessária.
- ✓ Uma variedade de técnicas existentes para fazer isso. Para as gotas menores (menores de 10 microns) são usados eliminadores de gotas, de fibra. Quando as partículas tornam-se maiores, dispositivos de filtração tais como telas são adoptados. Finalmente, para as gotas grandes, são adoptados os ciclones. Eles podem operar em toda a gama de caudais na fase líquido-gás.

Caldeiras Aguatubulares

- Componentes Principais de um Gerador de Vapor
- Tubulão Inferior:



Caldeiras Aguatubulares

- **Componentes Principais de um Gerador de Vapor**

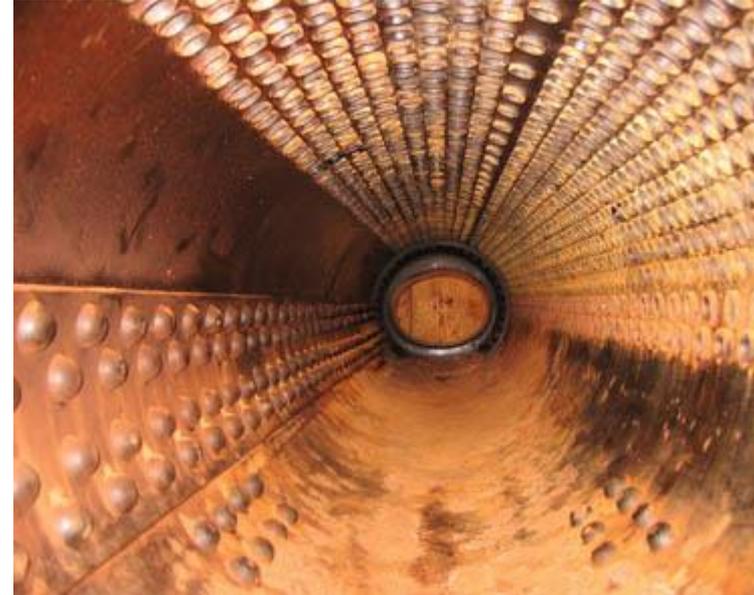
- ***Tubulão Inferior:***

- ✓ O tubulão inferior, tambor de água, tambor de lama ou *barrilet* inferior é maior do que o colector, mas ambos são menores do que o tubulão superior ou tambor de vapor. O tambor de água equaliza a distribuição de água para os tubos geradores. Tanto o tambor de água, como o colector, recolhem os depósitos de oxidação soltos, bem como outras matérias sólidas que se encontrem na água da caldeira. O tubulão inferior e o colector têm no fundo válvulas de purga. Quando estas válvulas são abertas, uma parte da água é forçada a sair do tambor ou do colector transportando com ela as partículas soltas.

Caldeiras Aguatubulares

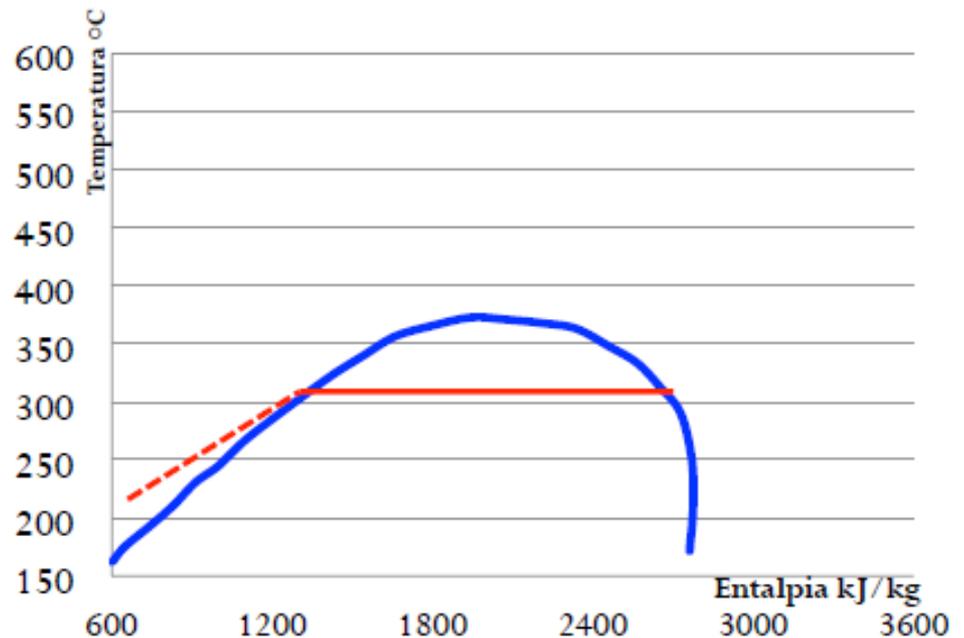
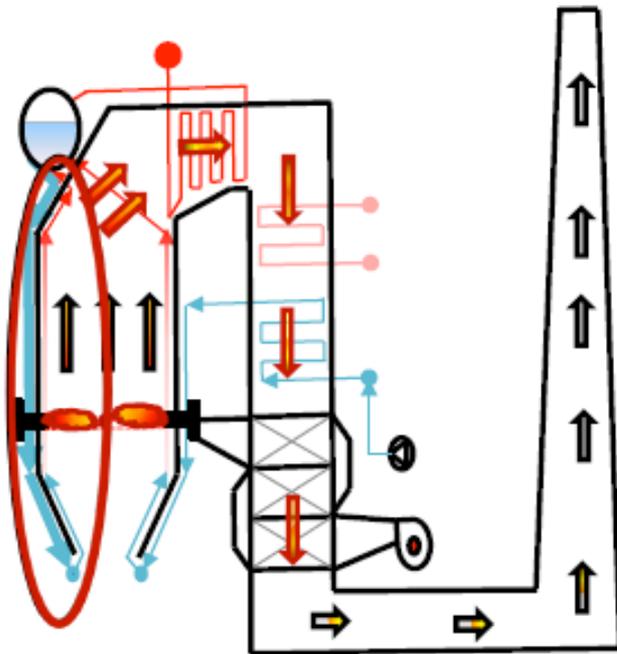
- Componentes Principais de um Gerador de Vapor

Tubulão Inferior:



Caldeiras Aguatubulares

- Componentes Principais de um Gerador de Vapor
- Paredes de água, em contato com a câmara de combustão o principal mecanismo de transferência de calor é a radiação.

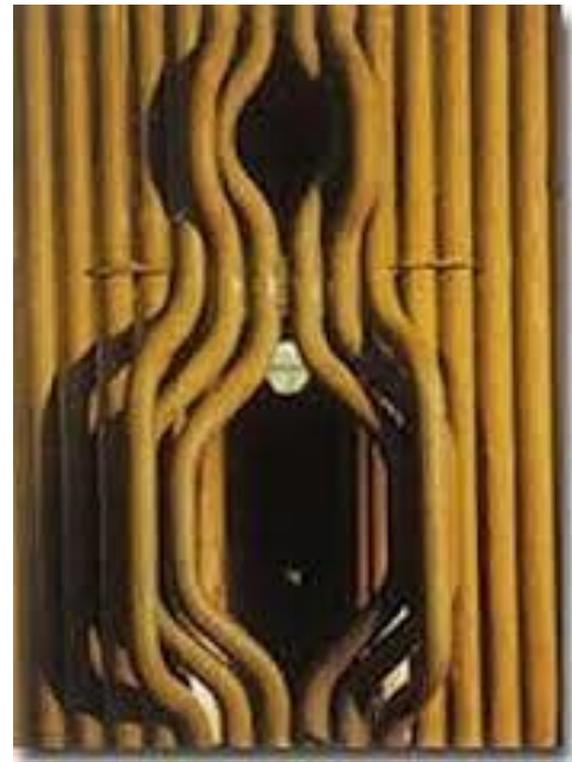


Caldeiras Aguatubulares

- **Componentes Principais de um Gerador de Vapor**

- ***Paredes de água:***

- ✓ São a fornalha ou outra parede no interior de uma caldeira, compostas por numerosos tubos de água dispostos uns perto dos outros. Estes tubos podem estar nus, ou cobertos por uma camada de cimento mineral.



Caldeiras Aguatubulares

- **Componentes Principais de um Gerador de Vapor**

- ***Paredes de água:***

- ✓ **Paredes D'Água (9 [%] Superfície - 47 [%] Calor)**

- . **Vantagens:**

- Protegem os refratários de altas temperaturas da fornalha;
- Aumentam superfície de troca → produz mais vapor.

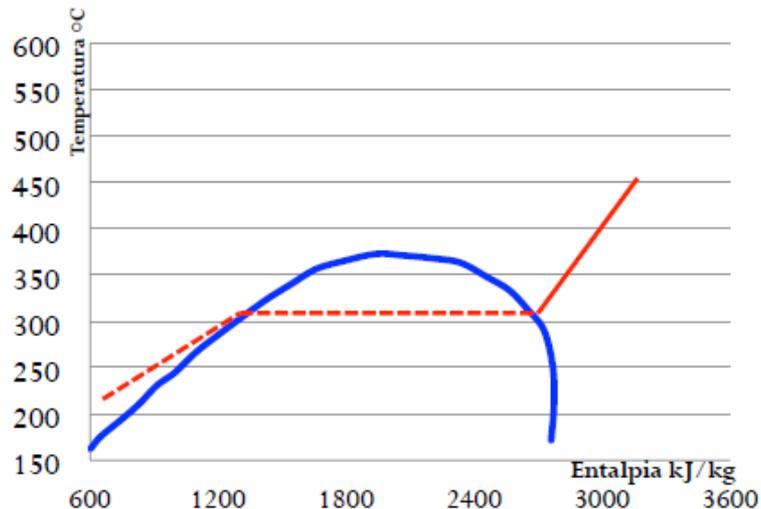
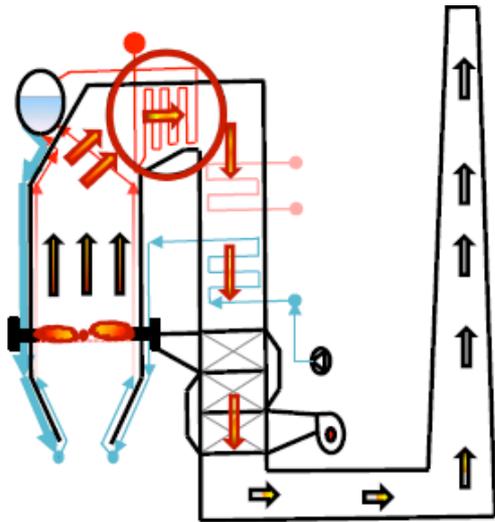
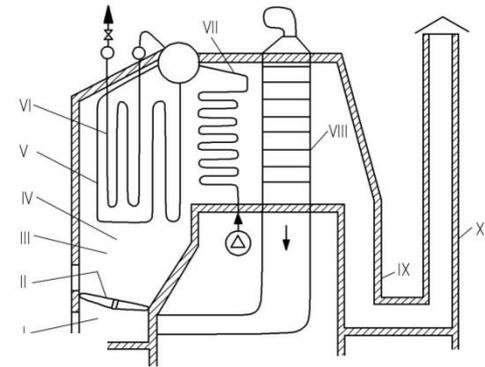
- . **Desvantagens:**

- Dificulta a manutenção;
- Aumento do custo.

Caldeiras Aguatubulares

Componentes Principais de um Gerador de Vapor

VI - **Superaquecedor**: tem a função de elevar a temperatura do vapor acima da sua temperatura de saturação produzindo assim vapor superaquecido. Pode estar ou não em contato com a região de radiação:

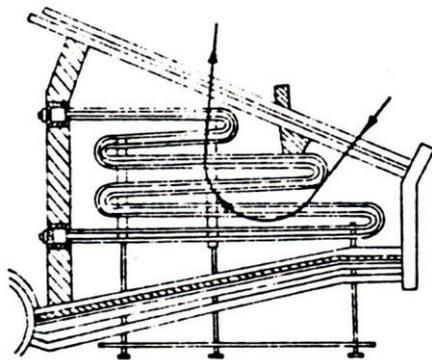


Caldeiras Aguatubulares

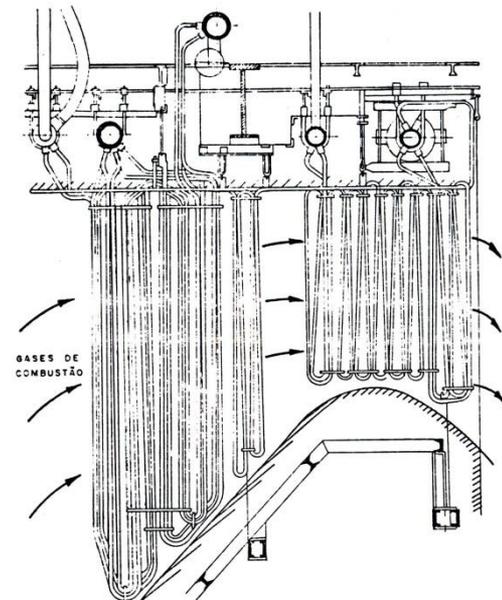
Componentes Principais de um Gerador de Vapor

VI - Superaquecedor: (9 [%] Superfície - 16 [%] Calor)

- ✓ Podem ser de tubos horizontais ou verticais, e são localizados após a caldeira para evitar problemas de superaquecimento dos tubos na partida, quando ainda não existe vapor.



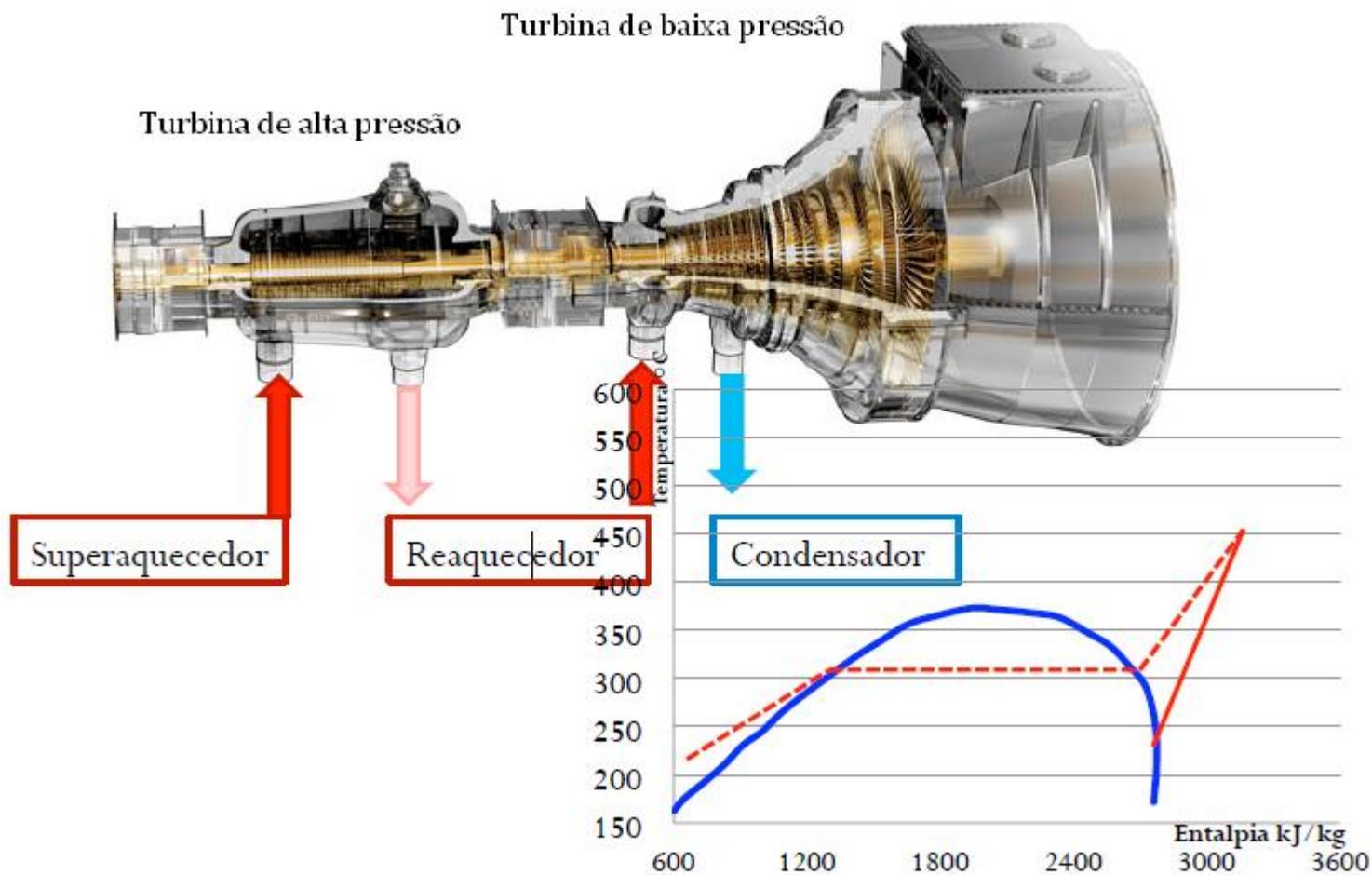
Superaquecedor de vapor - tubo horizontais



Superaquecedor de vapor - tubos verticais

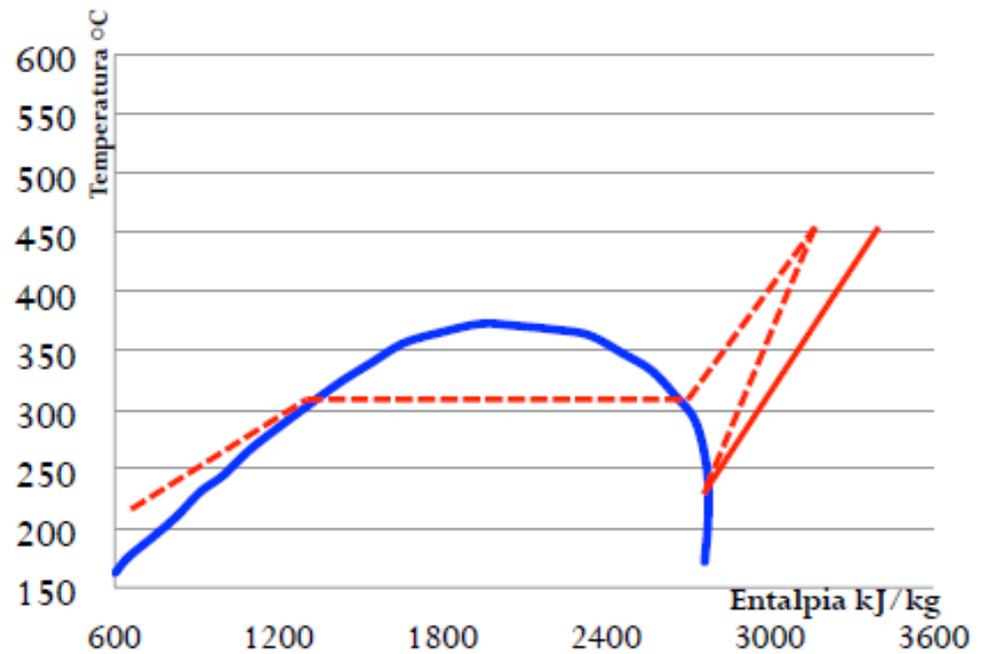
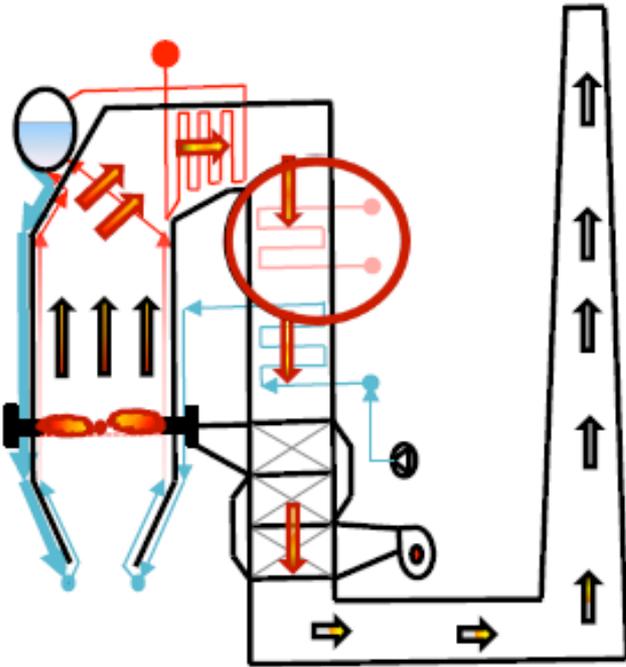
Caldeiras Aguatubulares

- Componentes Principais de um Gerador de Vapor
 - *Reaquecedor*



Caldeiras Aguatubulares

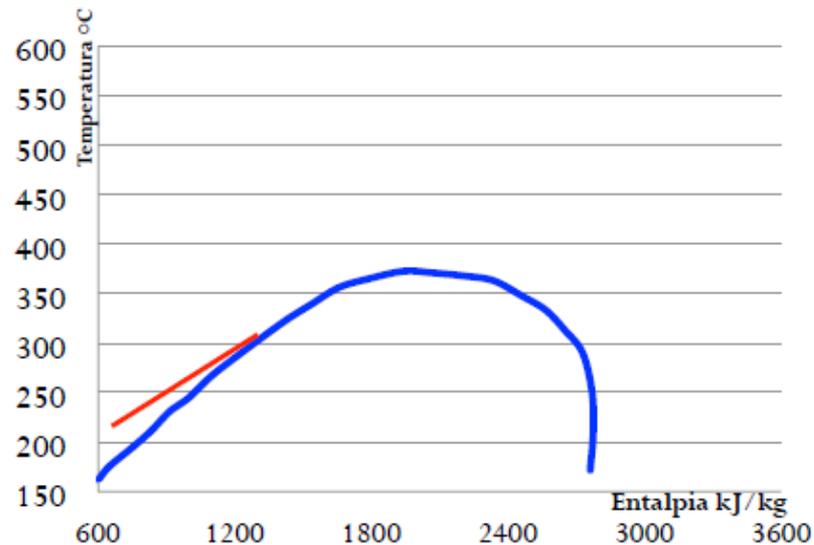
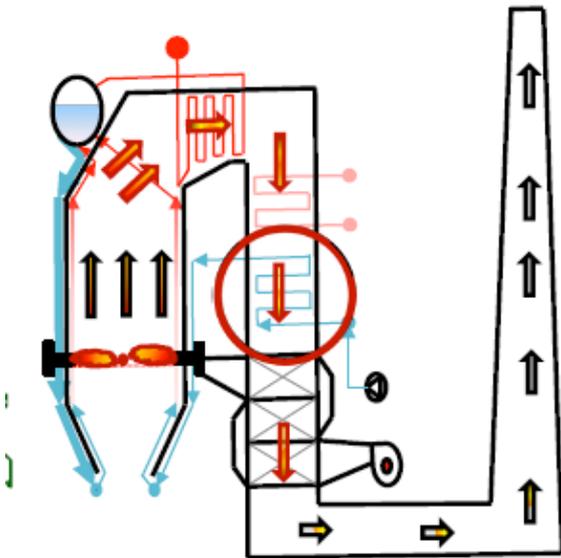
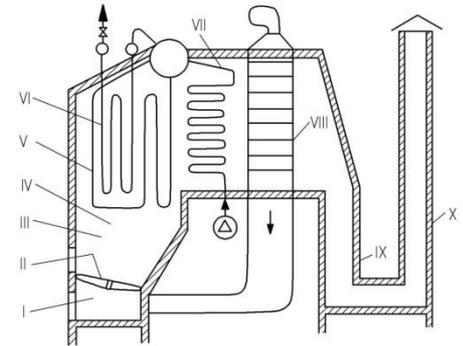
- Componentes Principais de um Gerador de Vapor
 - *Reaquecedor*



Caldeiras Aguatubulares

Componentes Principais de um Gerador de Vapor

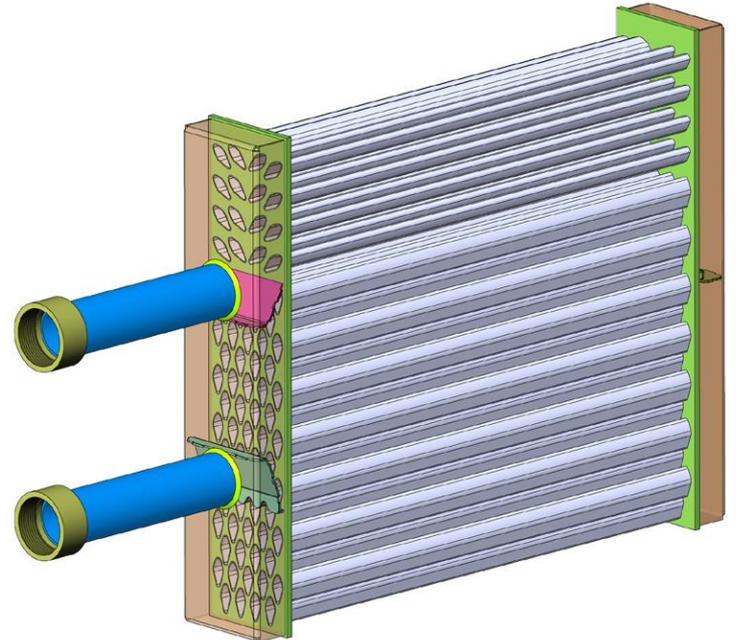
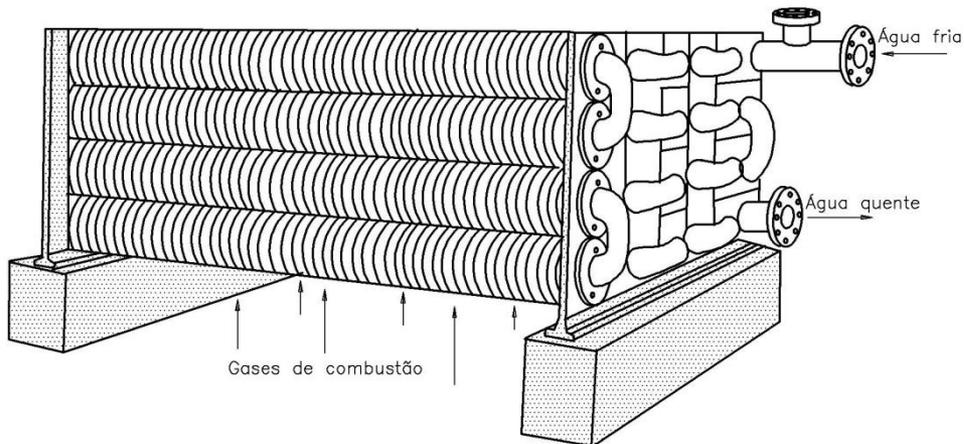
VII - ***Economizador***: tem a função de aquecer a água de alimentação utilizando o calor residual dos gases.



Caldeiras Aguatubulares

- Componentes Principais de um Gerador de Vapor

Economizador:

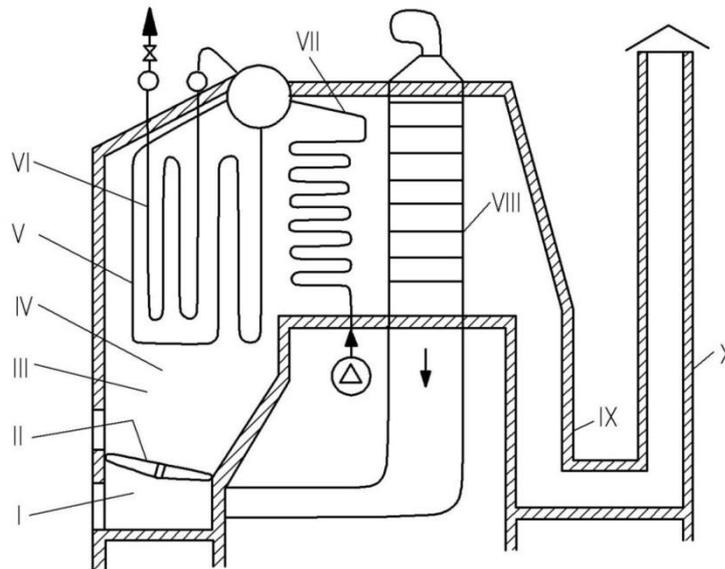


Caldeiras Aguatubulares

- Componentes Principais de um Gerador de Vapor

VIII - Pré-Aquecedor de Ar: (43 [%] Superfície – 12 [%] Calor)

- ✓ Aquece o ar de combustão antes de entrar na fornalha utilizando o calor dos gases. O Pré aquecimento do ar reduz o combustível consumido para se atingir a mesma temperatura na combustão;
- ✓ Temperatura dos gases na saída pode ser superior a 100 [°C] ou \approx 150 [°C] (problemas de corrosão).



Caldeiras Aguatubulares

- **Componentes Principais de um Gerador de Vapor**

- ***Pré-aquecedores de ar:***

- Os pré-aquecedores de ar são instalados nas caldeiras para pré-aquecer o ar de combustão. Existem dois tipos principais de aquecedores de ar: os recuperativos e os regenerativos. Os pré-aquecedores de ar tubulares ou de recuperação são instalados em caldeiras de média e pequena capacidade de geração de vapor. Este tipo de pré-aquecedor de ar, torna-se de tamanho muito grande se tiver de ser utilizado em caldeiras de alta capacidade, como as 600 toneladas/hora e acima de produção de vapor. Nestes casos são usados pré-aquecedores de ar regenerativos. Os pré-aquecedores de ar regenerativos são compactos e podem ter um corpo fixo ou rotativo. A combinação de pré-aquecedores de ar do tipo tubular e regenerativo é utilizada em caldeiras de alta capacidade. O tubular é utilizado para o aquecimento do ar primário e o regenerativo utilizado para o aquecimento do ar secundário. No caso dos projectistas da caldeira não quererem usar uma combinação de pré-aquecedor de ar tubular e regenerativo, então eles optam pela escolha de um aquecedor de ar regenerativo de três sectores. Normalmente, o ar ambiente é aquecido até cerca de 300-350 graus centígrados o que resulta numa queda da temperatura do gás de combustão de cerca de 230-250 graus centígrados. Assim, para cada grau de aumento da temperatura do ar, corresponde aproximadamente 0,8 grau de redução da temperatura do gás de combustão.

Caldeiras Aguatubulares

- **Componentes Principais de um Gerador de Vapor**

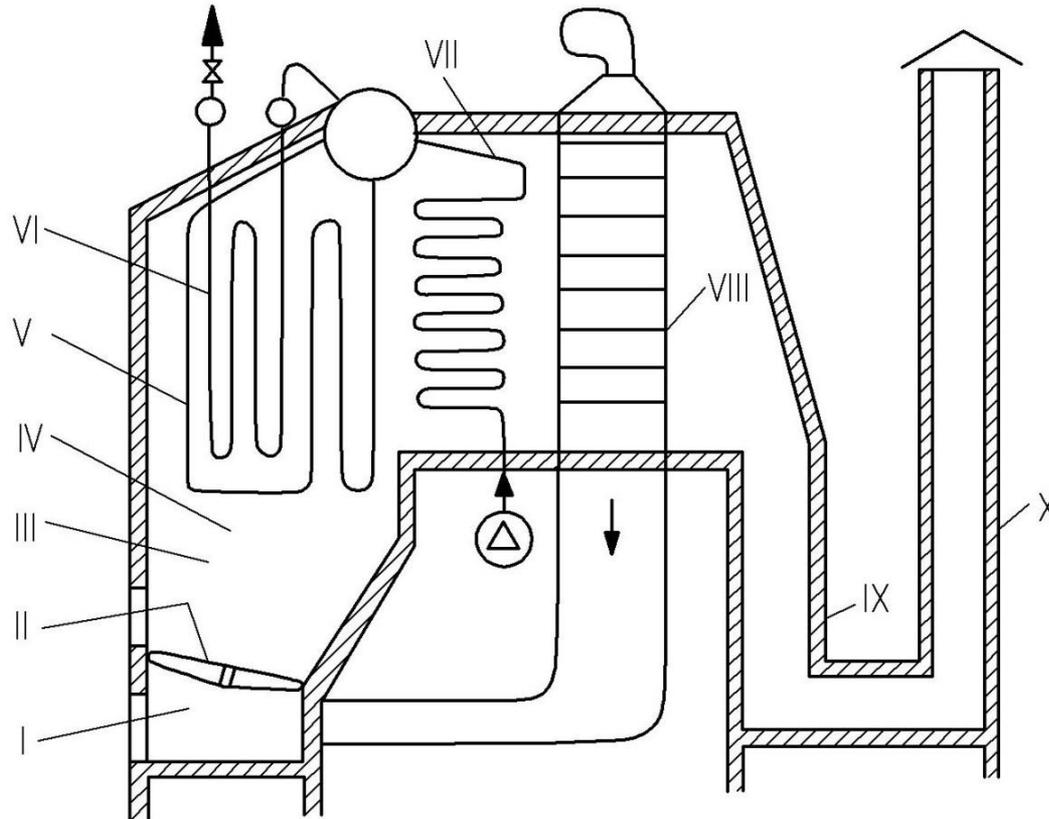
- *Pré-aquecedores de ar:*

- ✓ Tanto os economizadores, como os pré-aquecedores de ar, são chamados sistemas de recuperação de calor de uma caldeira. Se não fosse devido a estes sistemas de recuperação de calor, as caldeiras atuais estariam a operar a níveis de eficiência muito mais baixos. Também é comum caldeiras antigas onde estes sistemas foram incorporados para redução do consumo de oxigenio.

Caldeiras Aguatubulares

- Componentes Principais de um Gerador de Vapor

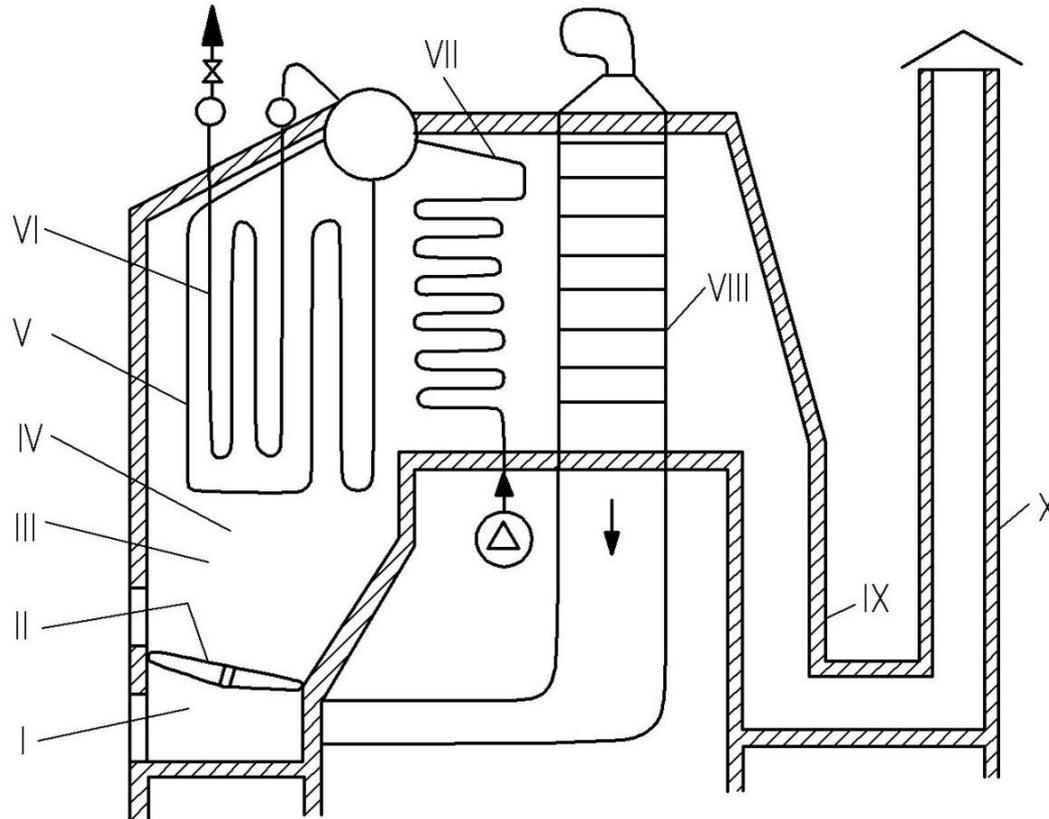
IX - **Conduto de Fumo:** são canais que conduzem os gases da combustão até a chaminé.



Caldeiras Aguatubulares

Componentes Principais de um Gerador de Vapor

X - **Chaminé:** tem a função de retirar os gases da instalação lançando-os para a atmosfera (*tiragem*).



Caldeiras Aguatubulares

- **Componentes Principais de um Gerador de Vapor**

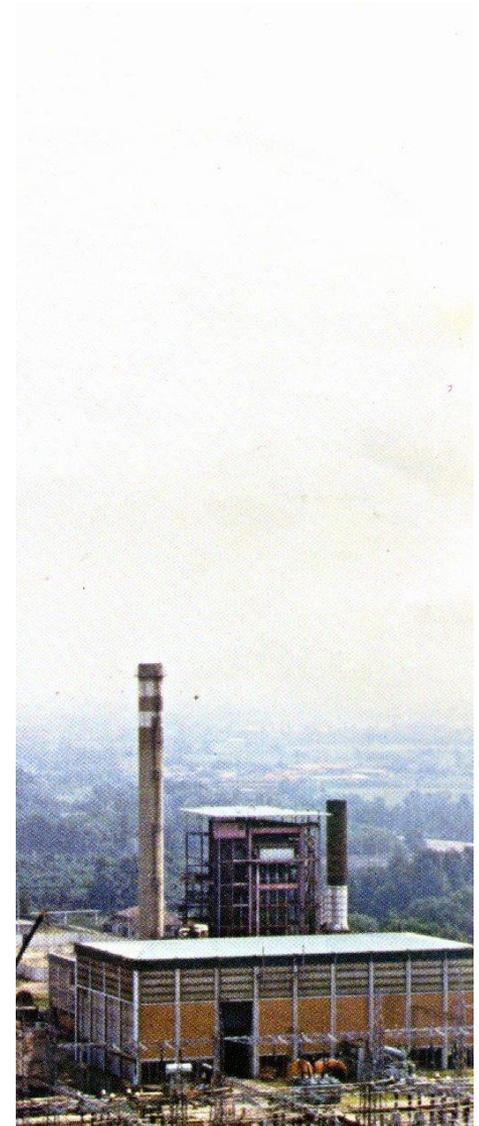
- ***Chaminé***

- ✓ A chaminé tem como função principal a dispersão adequada dos produtos de combustão no meio ambiente. Quanto maior a altura da chaminé, menor deve ser a concentração de material particulado e gases poluentes, emitido pelo sistema de combustão, ao nível do solo circunvizinho.
- ✓ A chaminé também provoca uma depressão no sistema pela diferença da densidade da coluna de fluido dentro da chaminé em comparação a densidade do ar atmosférico. A depressão gerada pela chaminé é calculada pela equação:

Caldeiras Aguatubulares

- Componentes Principais de um Gerador de Vapor

➤ *Chaminé*



Operação do gerador de vapor

- **O perigo de explosão no lado do vapor existe por três principais motivos:**
 - **Excesso de pressão;** controle de pressão limite é realizado pela válvula de segurança;
 - **Falta de água na caldeira,** pode ser provocado por falta de água, problemas de operação das bombas, interrupção no fornecimento de energia para as bombas ;
 - **Excesso de incrustação interna,** formado por resíduos no interior da caldeira dificultando a troca térmica.

Indicadores de Desempenho

- **Rendimento Global**

- Rendimento Global ou eficiência do gerador de vapor é a relação entre o calor transmitido e a energia produzida pelo combustível:

$$\eta_g = \frac{\dot{m}_V (h_g - h_L)}{\dot{m}_c \cdot PCI} \times 100(\%)$$

Onde:

η_g : rendimento global (%);

\dot{m}_c : massa do combustível queimado [kg/h; m³/h];

PCI : poder calorífico inferior do combustível [kJ/kg; kJ/m³];

\dot{m}_V : massa do vapor produzido [kg/h];

Referências Bibliográficas

Cortez, L.A.B.; Lora, E.E.S.; Olivares Gómez, E. Biomassa para energia. Campinas, SP: Ed. Unicamp, 2008.

Nogueira, L.A.H. Dendroenergia: fundamentos e aplicações, 2ª Ed., 2003.

MORAN, Michel J. & SHAPIRO, Howard N. **Fundamentals of Engineering Thermodynamics**. 5th ed. LTC. 2006.

ÇENGEL, Yunus A. & BOLES, Michael M. A. **Thermodynamics: an engineering approach**. 5th ed. McGraw-Hill. 2006.

Hildo Pera, Geradores de Vapor (1963)