

# SISTEMAS TÉRMICOS DE POTÊNCIA

PROF. RAMÓN SILVA

A decorative graphic on the left side of the slide consists of several orange circles of varying sizes, arranged in a vertical line. The largest circle is at the top, followed by a smaller one, then a medium-sized one, and a very small one at the bottom. The circles are set against a background of vertical orange stripes.

Engenharia de Energia

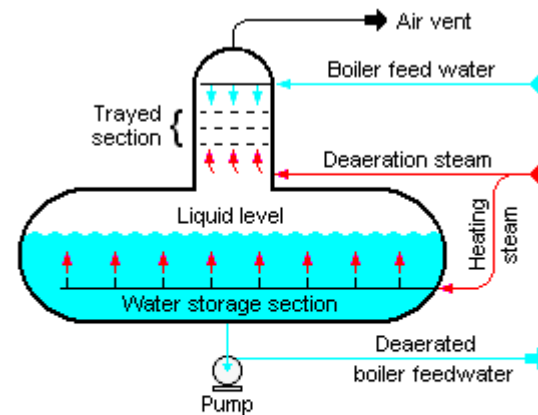
Dourados MS - 2013



# CALDEIRAS

# CALDEIRAS

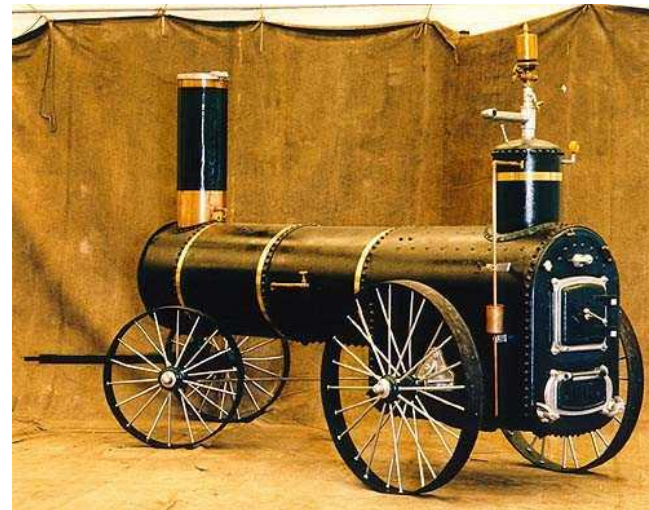
- Caldeira de vapor é todo equipamento que utilizando a energia química liberada durante a combustão de um combustível promove a mudança de fase da água do estado líquido para o de vapor a uma pressão várias vezes maior que a atmosférica.



- Internal steam distributor piping
- Internal perforated pipe (water distributor)
- - - Perforated trays
- Low pressure steam
- Boiler feedwater

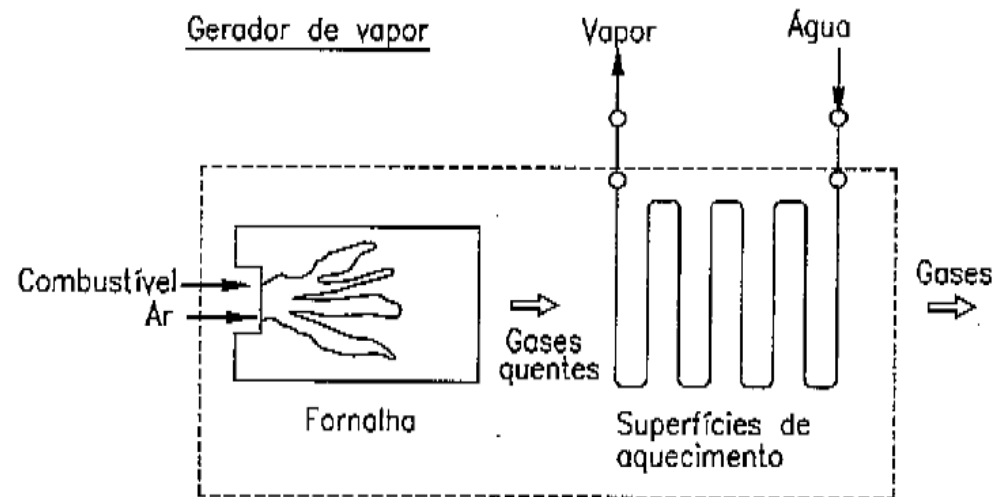
# CALDEIRAS

- O vapor resultante é utilizado para o acionamento de máquinas térmicas, para a geração de potência térmica e mecânica.



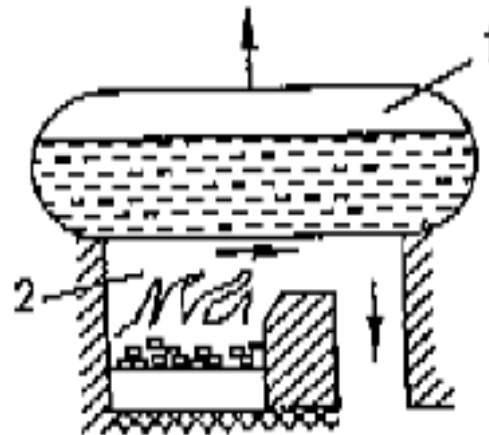
# CALDEIRAS

- A Figura mostra a caldeira de vapor na sua forma mais simples mostrando a presença dos dois componentes principais: a fornalha (onde acontece a combustão) e as superfícies de aquecimento, onde ocorre a troca de calor dos gases quentes com o fluido de trabalho (água, mistura de água e vapor).



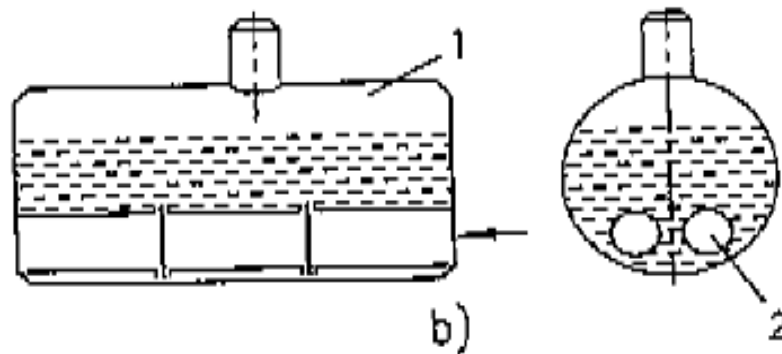
# CALDEIRAS

- Uma das caldeiras mais antigas já encontradas data do século XVIII e consistia de um único tambor ou balão com a fornalha localizada na sua parte inferior



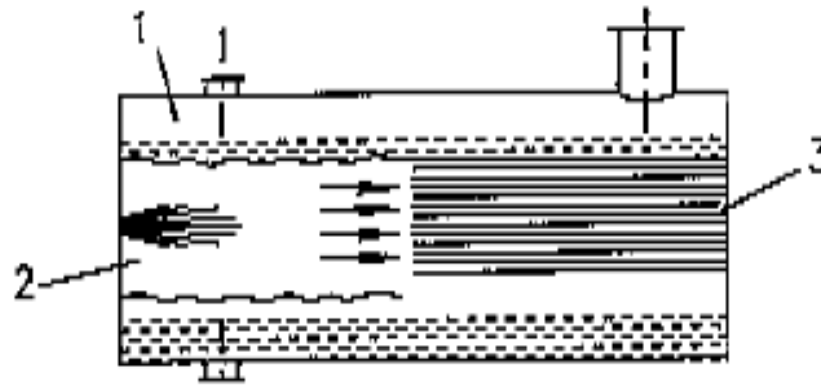
# CALDEIRAS

- Por volta de 1740 surgiram caldeiras de tubos de fogo, onde se tem a combustão acontecendo no interior dos tubos imersos no volume de água permitindo aumentar a eficiência de utilização de combustível



# CALDEIRAS

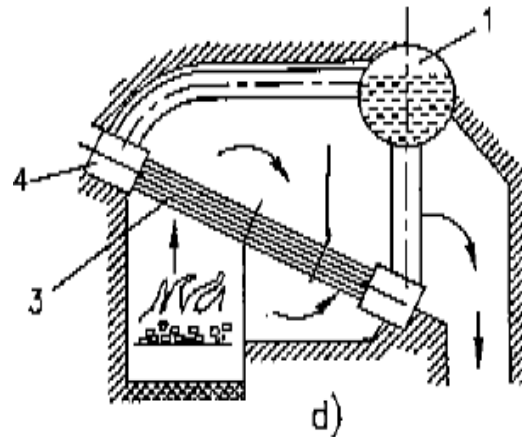
- Nessa mesma época surgem as caldeiras de tubos de fogo e gás. Nessas caldeiras os gases quentes saem da fornalha e passam pelo interior de um feixe de tubos localizado no interior do volume de água. Essa solução permite maior eficiência de troca de calor





# CALDEIRAS

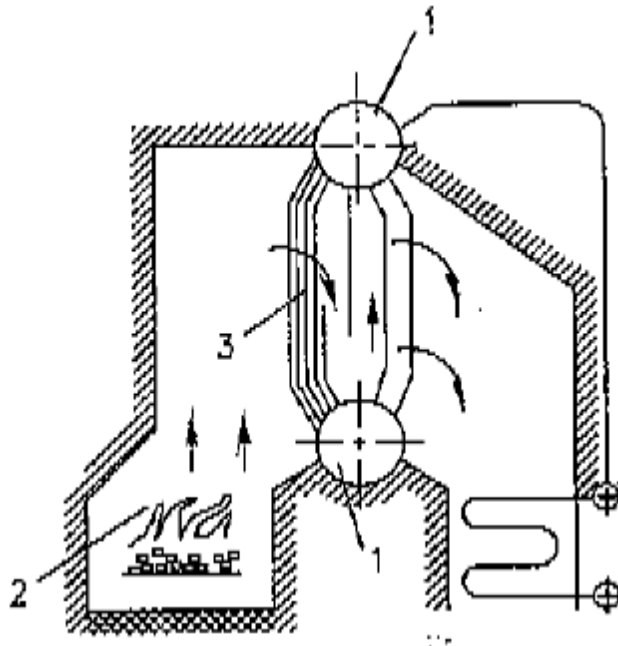
- Como a capacidade e pressão deste tipo de caldeira são limitados pelo diâmetro e resistência do tambor, James Ramsey propôs a solução de uma caldeira com tubos de água inclinados. Surge a caldeira aquatubular.



- Neste tipo de caldeira os gases de combustão circulam pelo lado externo dos tubos e a água pelo interior dos mesmos.

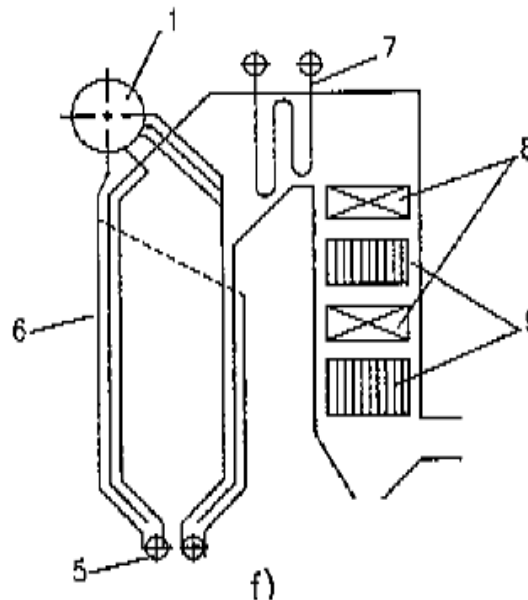
# CALDEIRAS

- Em 1846, Stephen Wilcox fez o requerimento da patente de uma caldeira aquotubular de tubos verticais com maiores superfícies de troca de calor e maior fluxo de água



# CALDEIRAS

- Em 1886, Wilcox associa-se a George Babcock e juntos criam a Babcock & Wilcox Co. e as caldeiras que até então possuíam tubos inclinados passaram a ser projetadas com tubos verticais a semelhança das caldeiras atuais



# CALDEIRAS

## ○ Critérios de Seleção de Caldeiras

- As caldeiras a vapor podem ser classificadas atendendo os seguintes critérios:
- aplicação final;
- disposição relativa dos gases e do fluido de trabalho;
- força motriz para a circulação do fluido de trabalho;
- nível de pressão de operação;
- tipo de combustível ou fonte de calor;
- tecnologia de combustão;
- organização da tiragem de ar e gases de combustão;
- disposição da fornalha e superfícies de aquecimento.



# CALDEIRAS

## ○ *Aplicação Principal - Termelétricas*

- As caldeiras utilizadas nas **centrais termelétricas** são normalmente projetadas para operar com vapor superaquecido na faixa de 400 a 560 °C com pressões típicas entre 6 e 18 MPa, podendo chegar a pressões supercríticas de até 34 MPa.
- Sua capacidade varia entre 200 e 4500 t/h de vapor.



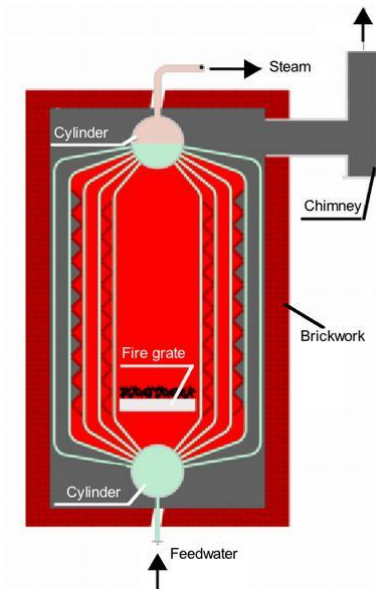
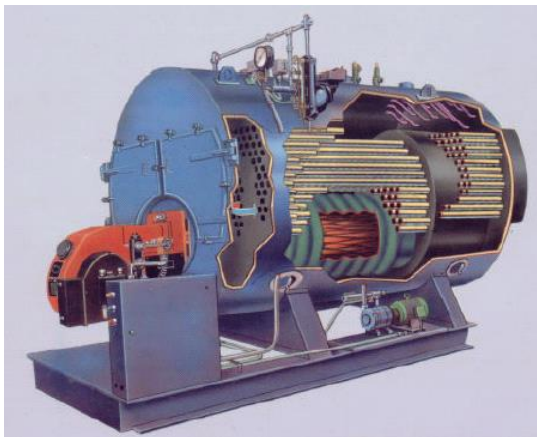
# CALDEIRAS

## ○ *Aplicação Principal - Industrial*

- As caldeiras utilizadas no **setor industrial** operam com pressão inferior a 2 MPa desde que utilizadas para fins de geração térmica.
- No caso de cogeração as caldeiras são projetadas para operar com pressões entre 2 e 8 MPa com temperaturas típicas entre 340 e 440 °C e capacidade entre 40 e 140 t/h.

# CALDEIRAS

- *Disposição Relativa dos Gases e Fluido de Trabalho*
- Quanto à disposição relativa entre os gases e o fluido de trabalho as caldeiras podem ser: **flamotubulares** e **aquotubulares**.



# CALDEIRAS

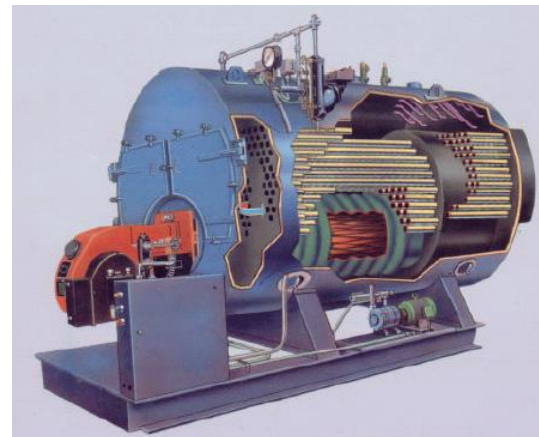
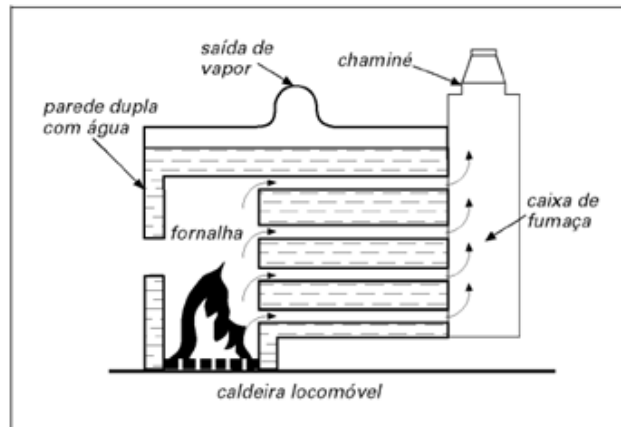
## ○ *Disposição Relativa dos Gases e Fluido de Trabalho - Flamotubulares*

- Nas caldeiras flamotubulares também conhecidas como caldeiras pirotubulares os gases fluem por dentro de tubos imersos e água.
- Este tipo de caldeira é frequentemente utilizado em aplicações de pequeno porte como indústrias, lavanderias e aquecimentos distritais.
- São caldeiras com capacidade de produção de até 2 ton/h e são utilizadas em operações que necessitem de vapor saturado



# CALDEIRAS

- *Disposição Relativa dos Gases e Fluido de Trabalho - Flamotubulares*



# CALDEIRAS

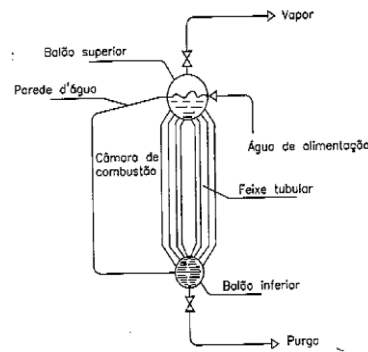
- ***Disposição Relativa dos Gases e Fluido de Trabalho - Aquotubulares***
  - Nas caldeiras aquotubulares a água circula pelos interior dos tubos e os gases trocam calor com a água pela parede desses.



# CALDEIRAS

## ○ *Disposição Relativa dos Gases e Fluido de Trabalho - Aquotubulares*

- As superfícies de troca de calor são arranjadas de forma de um conjunto de tubos verticais, as paredes d'água, revestindo a fornalha.



- Nas paredes d'água o calor é transferido predominantemente por radiação.



# CALDEIRAS

## ○ *Disposição Relativa dos Gases e Fluido de Trabalho – Aquotubulares*

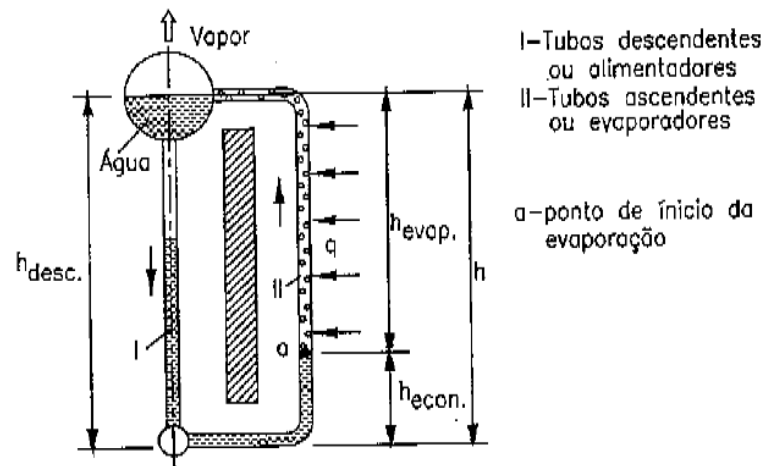
- As caldeiras aquotubulares são empregadas nas centrais termelétricas e indústrias que consomem grandes quantidades de vapor e/ou necessitem de vapor superaquecido.
- A taxa de produção de vapor por área de troca de calor é maior que nas caldeiras flamotubulares.

# CALDEIRAS

- *Circulação do Fluido de Trabalho*
- Atendendo o critério de classificação relativo ao fluido de trabalho as caldeiras pode ser de três tipos: **circulação natural**, **circulação forçada** e **passe único**.

# CALDEIRAS

- *Circulação do Fluido de Trabalho*
- Nas caldeiras de **circulação natural** a circulação do fluido de trabalho no interior dos tubos ocorre por diferença de densidade da água líquida e a mistura água/vapor



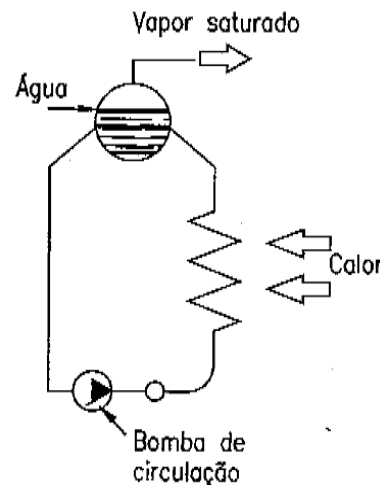


# CALDEIRAS

- ***Circulação do Fluido de Trabalho - Natural***
- A circulação natural pelas paredes d'água e feixes tubulares é garantida utilizando-se tubos de grande diâmetro e com inclinações recomendadas com a finalidade de obter baixa perda de pressão no circuito.
- É comum a utilização de tubos de 50-80 mm de diâmetro interno com espessura de 4 mm para as caldeiras de pequeno e médio porte.

# CALDEIRAS

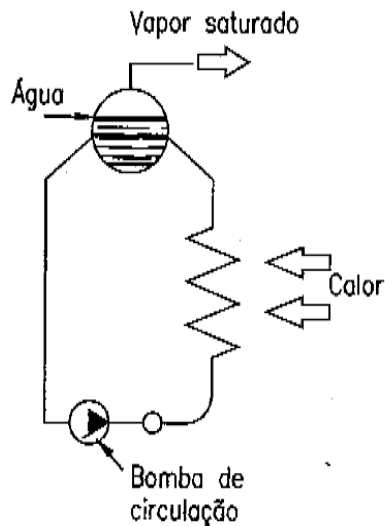
- *Circulação do Fluido de Trabalho - Forçada*
- As caldeiras aquotubulares de **circulação forçada** são geralmente construídas com paredes de água e um único tambor separador (vapor-líquido).





# CALDEIRAS

- ***Circulação do Fluido de Trabalho - Forçada***
  - A água é continuamente movimentada por bombas de recirculação, o que elimina a exigência em relação aos tubos, permitindo diâmetros menores que os dos tubos utilizados em caldeiras de circulação natural.





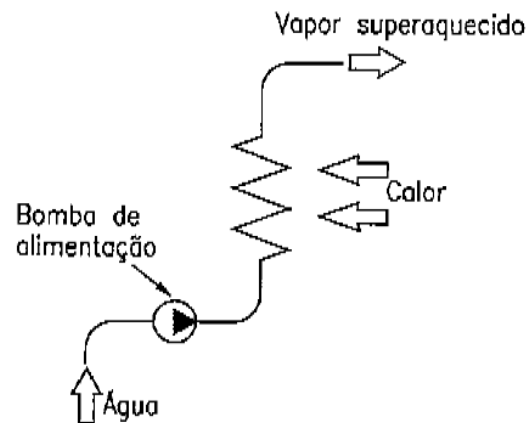
# CALDEIRAS

## ○ *Circulação do Fluido de Trabalho - Forçada*

- Não há exigências em relação à disposição vertical ou inclinada dos tubos proporcionando caldeiras mais compactas.
- Além da economia de material, a utilização de tubos de menor diâmetro melhora a eficiência de troca de calor com os gases de combustão.
- São comuns tubos de diâmetro interno nas faixas de 25 a 40 mm.

# CALDEIRAS

- ***Circulação do Fluido de Trabalho – Passe Único***
  - As caldeiras de **passe único** foram projetadas inicialmente para atender usinas termelétricas de alta potência. Nesse tipo de caldeira não há recirculação de água



# CALDEIRAS

- *Nível de Pressão de Operação*
- **caldeiras de vapor de baixa pressão:**  
geralmente do tipo industrial com feixe de convecção e sem reaquecedor.
- Pressões inferiores a 10 MPa;



# CALDEIRAS

- *Nível de Pressão de Operação*
- **caldeiras de pressão de alta pressão:** utilizadas nas centrais termelétricas com circulação natural com reaquecedor.
- Pressões entre 10 e 16 MPa.



# CALDEIRAS

- *Nível de Pressão de Operação*
- **caldeiras de vapor de pressão super alta:** utilizadas nas centrais termelétricas com circulação forçada e reaquecedor.
- Pressões superiores a 17 Mpa.



# CALDEIRAS

- *Nível de Pressão de Operação*
- **caldeiras de vapor de pressão supercrítica:** utilizadas nas centrais termelétricas de passe único e com reacondicionador.
- Pressões superiores a 22 MPa.



# CALDEIRAS

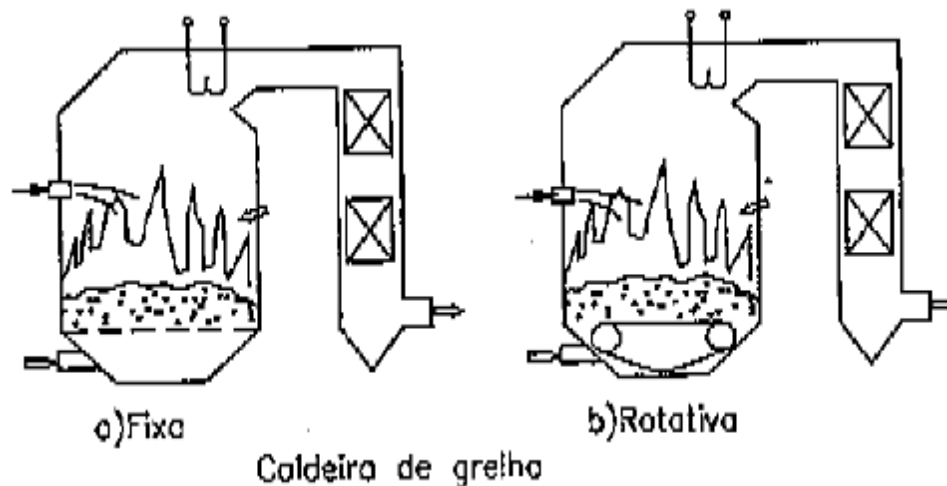
- *Nível de Pressão de Operação*
- **caldeiras de vapor com pressão deslizante:**  
opera a cargas parciais em uma pressão de vapor menor que a nominal.



# CALDEIRAS

## ○ *Tecnologia de Combustão*

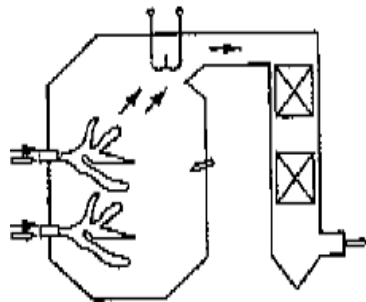
- **grelha fixa** ou **grelha rotativa** para queima de biomassa ou resíduos agroindustriais em caldeiras de pequeno porte



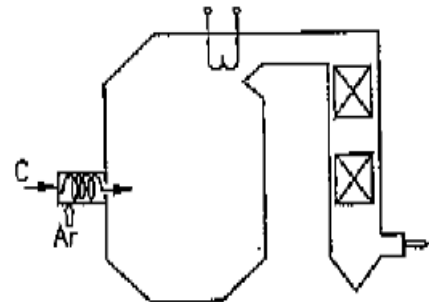
# CALDEIRAS

## ○ *Tecnologia de Combustão*

- de **queima em suspensão** para queima de combustível sólido pulverizado, óleo combustível e gás natural



Caldeira de queima em suspensão  
com queimadores

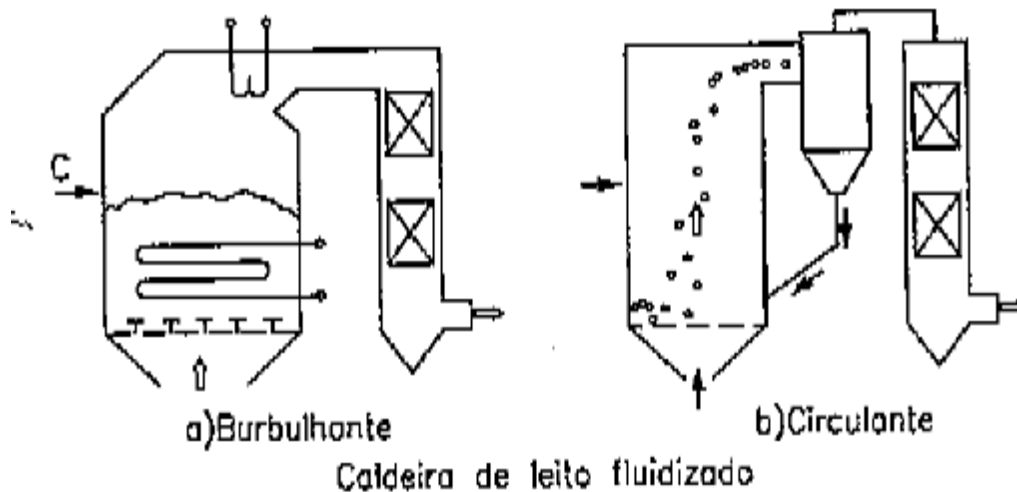


Gerador de vapor com  
préformalha ciclônica

# CALDEIRAS

## ○ *Tecnologia de Combustão*

- **leito fluidizado**, borbulhante ou circulante, para queima de combustíveis sólidos em geral. No Brasil é utilizada para queima de resíduos de cortiça e árvores na indústria de papel e celulose





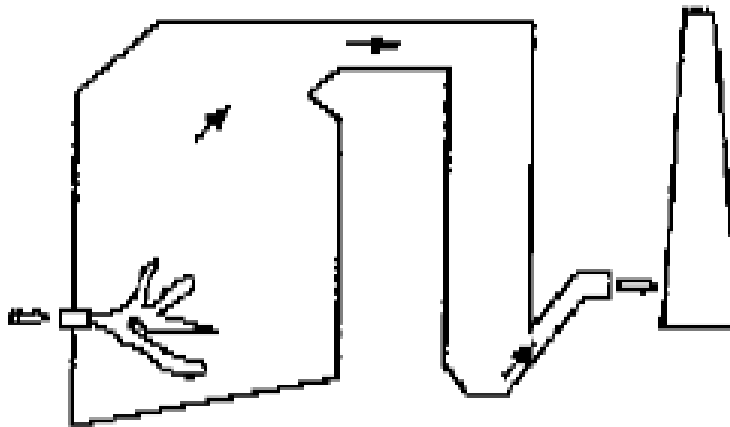
# CALDEIRAS

## ○ *Tiragem - Natural*

- **Tiragem natural:** criada por efeito exclusivo da chaminé, suficiente para garantir suprimento de ar e remoção dos gases de exaustão. É típica de caldeiras antigas de pequena capacidade e com pouca superfície convectiva.
- Têm a desvantagem de sofrer influência das condições climáticas e da pressão atmosférica

# CALDEIRAS

## ○ *Tiragem - Natural*



a) Tiragem natural



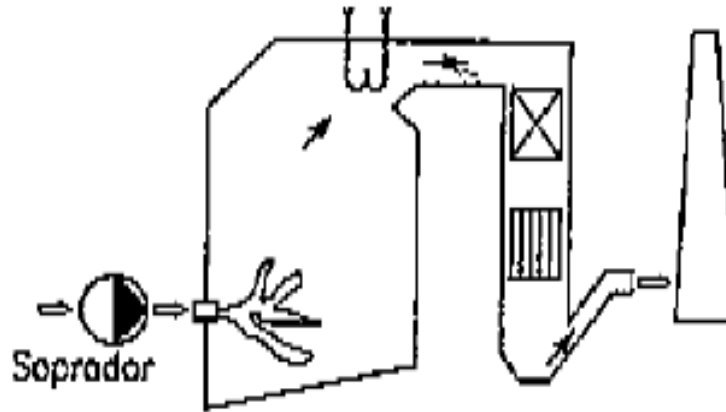
# CALDEIRAS

## ○ *Tiragem - Forçada*

- **tiragem forçada** – exercida por sopradores na entrada da fornalha, fornece ar sob pressão para combustão e facilita a remoção do gases pela chaminé.
- A potência necessária para operar os sopradores é de 4 a 6% da capacidade da caldeira

# CALDEIRAS

## o *Tiragem - Natural*

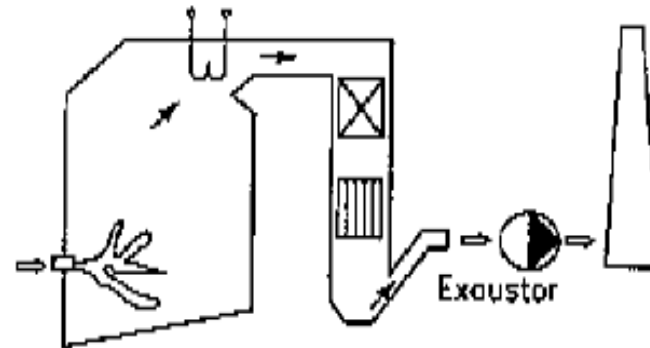


a) Tiragem forçada

# CALDEIRAS

## ○ *Tiragem - Induzida*

- **tiragem induzida:** garantida por ventiladores de exaustão que geram uma pressão ligeiramente negativa na fornalha.



a) Tiragem induzida





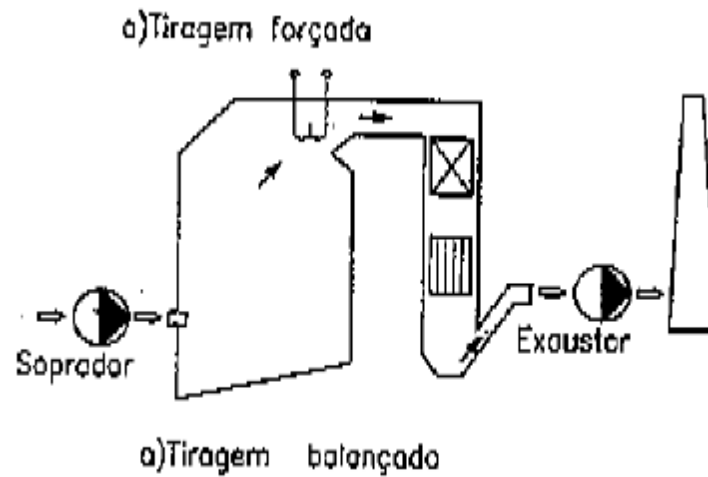
# CALDEIRAS

## ○ *Tiragem - Balanceada*

- **tiragem balanceada:** combinação entre a tiragem forçada e a induzida.
- O ventilador de tiragem induzida tem maior capacidade que o de tiragem forçada.
- A pressão na fornalha é menor que a atmosférica

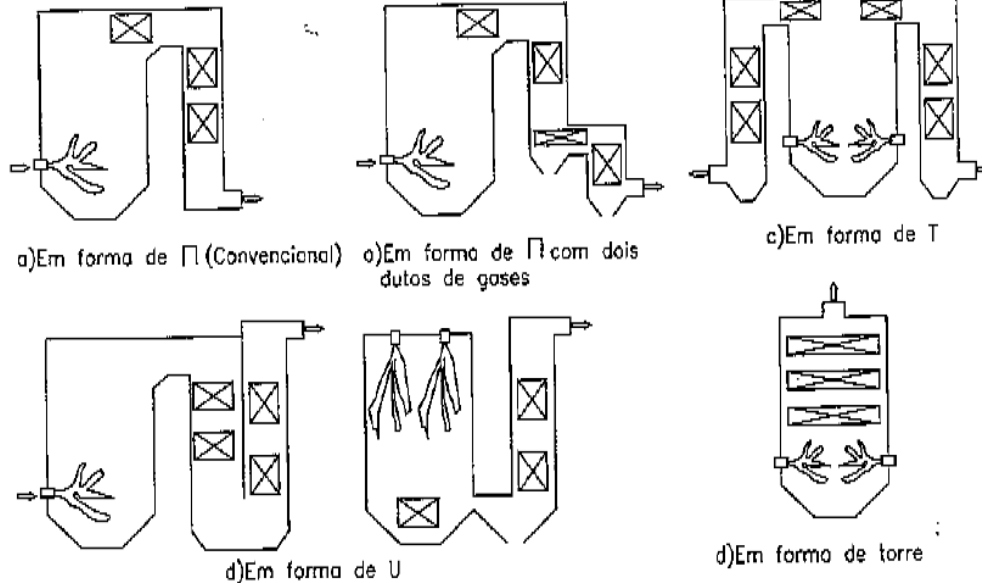
# CALDEIRAS

## ○ *Tiragem - Balanceada*



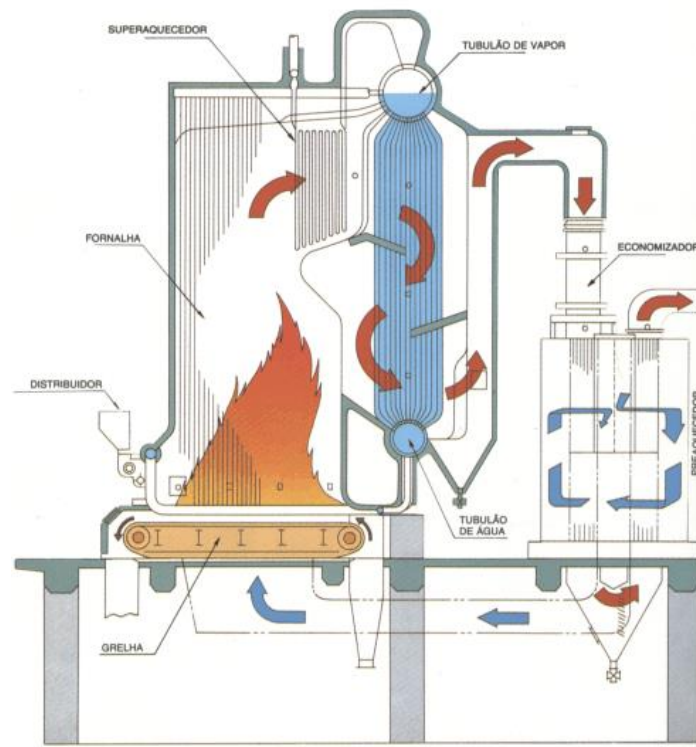
# CALDEIRAS

## ○ *Disposição da Fornalha e Superfície de Aquecimento*



# CALDEIRAS

## ○ *Componentes Principais*

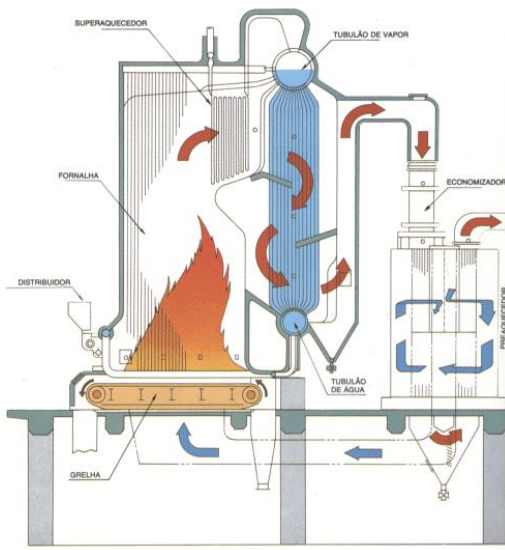


# CALDEIRAS

## ○ *Componentes Principais - Tubulão*

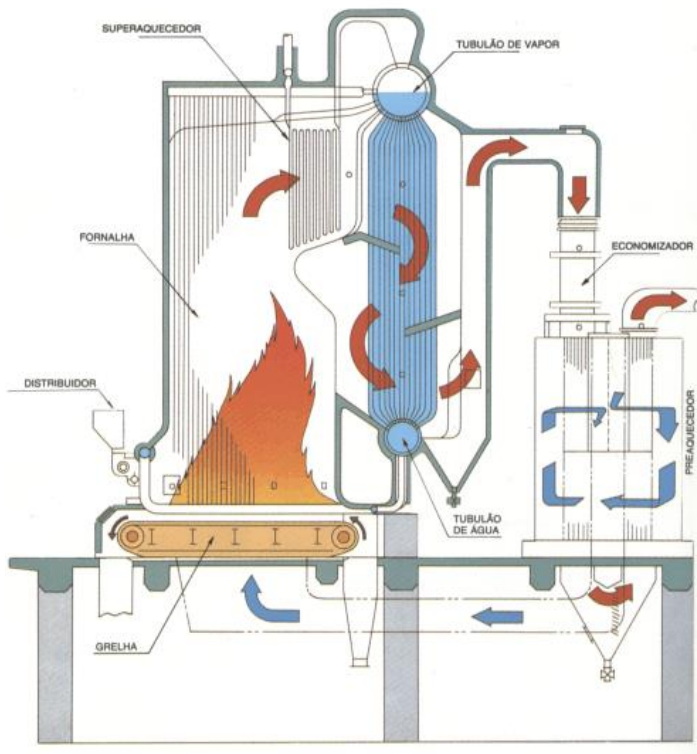
**Tambor separador ou tubulão de vapor** – corpo cilíndrico de aço que recebe a água de alimentação.

O tambor tem a função a acumulação de um certo volume de água como reserva, garantir a pureza do vapor mediante extrações e tratamento químico interno e separar o vapor do líquido permitindo que apenas o vapor saturado saia para os superaquecedores.



# CALDEIRAS

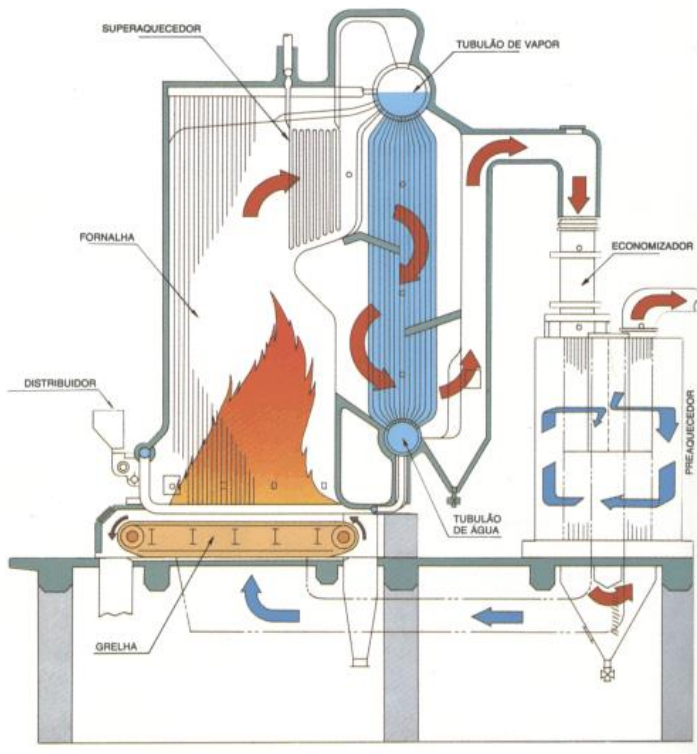
## ○ Componentes Principais - Tubulão



A água é distribuída para as paredes e feixe tubular convectivo. Durante o seu retorno para o tambor ocorre a mudança de fase de parte da água para vapor. As caldeiras aquotubulares de pequena e média capacidade podem possuir um ou dois tambores a mais, conectados por feixes tubulares;

# CALDEIRAS

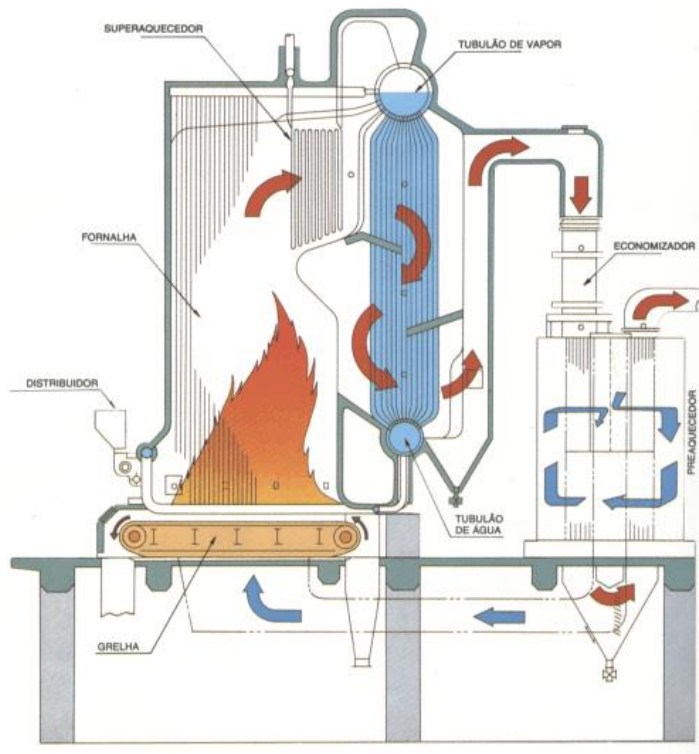
## ○ *Componentes Principais – Coletor Inferior*



**coletor inferior** ou **tubulão de vapor** – corpo cilíndrico de aço de menor diâmetro que o tambor separador com a função de distribuir a água pela caldeira

# CALDEIRAS

## ○ *Componentes Principais – Fornalha*

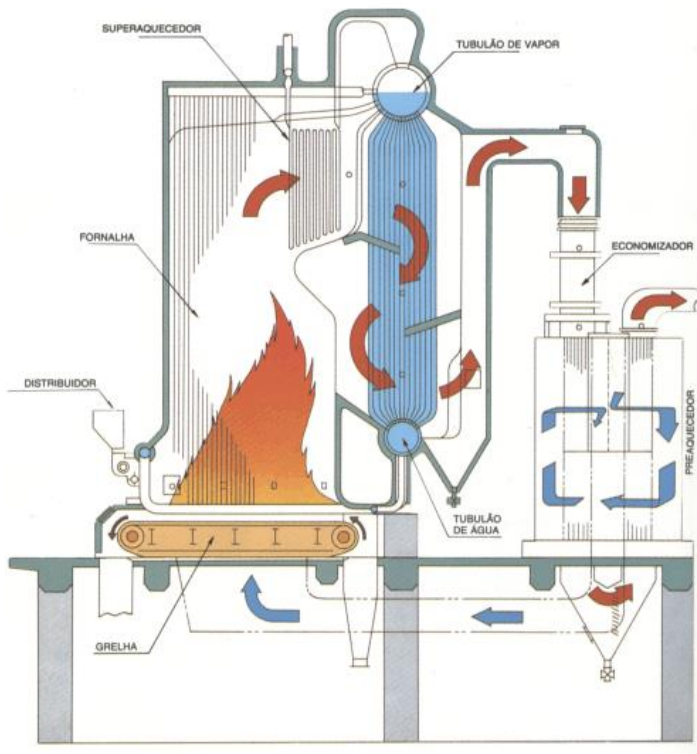


**fornalha** – local da caldeira onde ocorre a queima de combustível;



# CALDEIRAS

## ○ *Componentes Principais – Parede d'água*

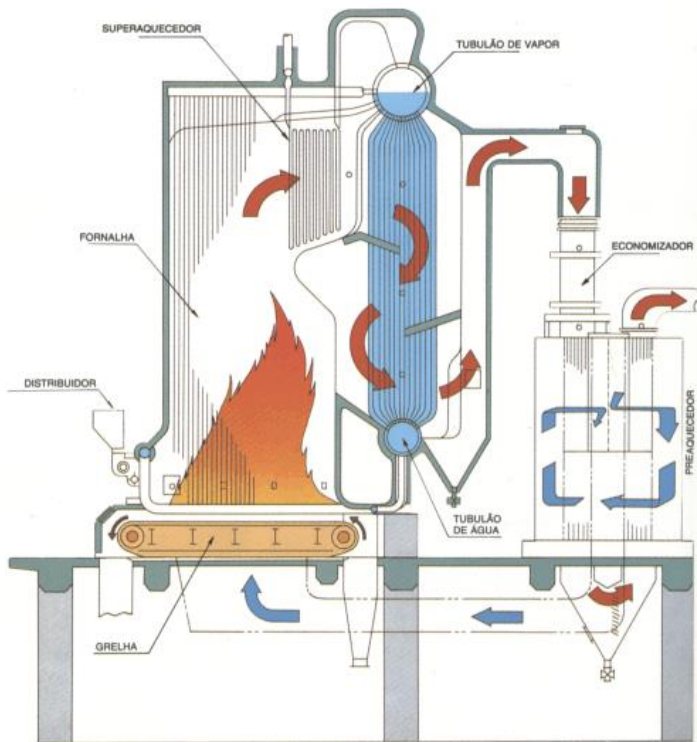


**paredes d'água ou superfície evaporadora**

tubos que interligam o tambor superior aos coletores inferiores, revestindo a parte interior das paredes da fornalha. É onde ocorre a mudança de fase da água para vapor. A troca de calor ocorre por radiação e por convecção dos gases de combustão;

# CALDEIRAS

## ○ Componentes Principais – Superaquecedor



### superaquecedor

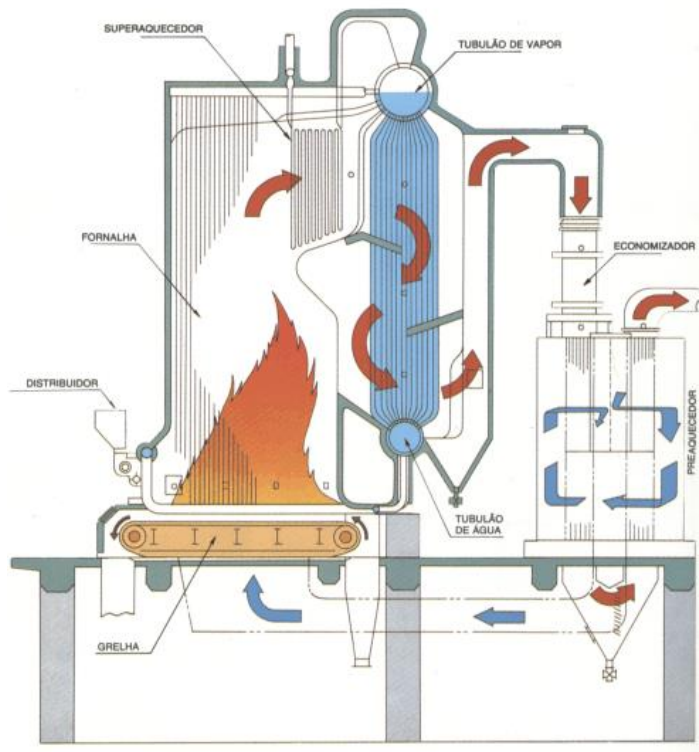
trocador de calor localizado após a câmara de combustão com a função de superaquecer o vapor proveniente do vapor.

Os tubos do superaquecedor trabalham em condições térmicas mais severas que os demais tubos da caldeira, uma vez que a capacidade de resfriamento do vapor é menor que a da água.

É no superaquecedor que o fluido de trabalho apresenta maior temperatura;

# CALDEIRAS

## ○ Componentes Principais – Economizador



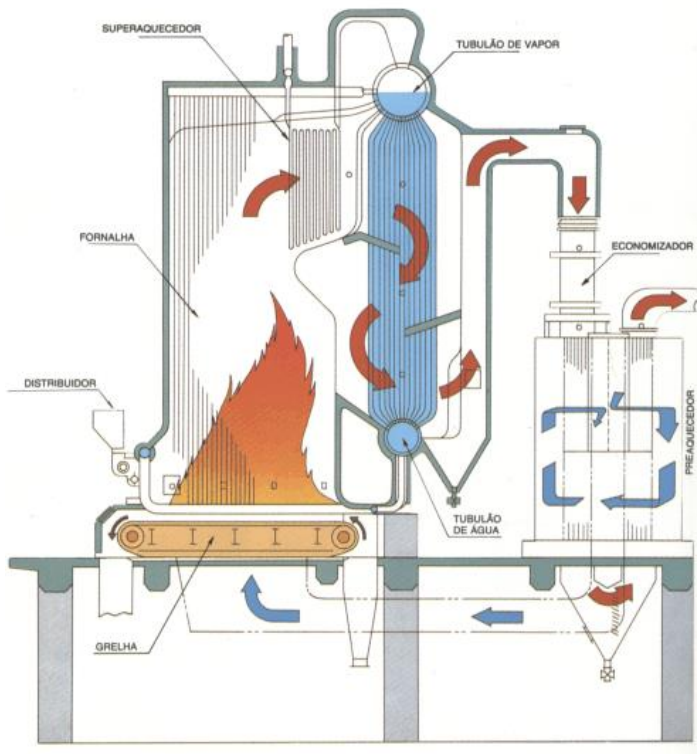
**economizador** ou aquecedor da água de alimentação

é um trocador de calor com a função de aquecer a água de alimentação antes de sua entrada no tambor.

Os economizadores utilizam a energia residual dos gases de combustão resultando no aumento da eficiência da caldeira;

# CALDEIRAS

## ○ *Componentes Principais – Pré aquecedor*



### pré-aquecedor de ar

trocador de calor cujo objetivo elevar a temperatura do ar recuperando a energia uma parte da energia residual dos gases de combustão.



## BIBLIOGRAFIA

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