



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

MÁQUINAS TÉRMICAS I

GERADORES DE VAPOR (CALDEIRAS)

Prof. FERNANDO BÓÇON, Dr.Eng.

Curitiba, junho de 2018

3 - GERADORES DE VAPOR D'ÁGUA

3.1 - Definição

Os geradores de vapor d'água (de agora em diante abreviados por GV), também chamados de caldeiras, destinam-se à produção de vapor de água (saturado ou superaquecido) a partir da energia liberada por um combustível. Podemos ter:

- queima de combustível com oxigênio do ar (caldeiras convencionais)
- reação nuclear (caldeiras de usinas nucleares)
- energia elétrica (caldeiras elétricas)

3.2 - Componentes principais e funcionamento

Unidades modernas e de porte maior são normalmente equipados com:

- fornalha
- vaporizador (trocador de calor)
- superaquecedor (trocador de calor)
- economizador (trocador de calor)
- aquecedor de ar (trocador de calor)

A fornalha é o componente onde se desenvolve a queima do combustível e a liberação dos gases quentes da combustão. As cinzas pesadas caem por gravidade no cinzeiro, ao fundo da fornalha. As cinzas leves são levadas pelos gases. A temperatura média da fornalha situa-se entre 800°C a 1300°C.

O vaporizador (ou superfície de vaporização) são os trocadores de calor onde ocorre o aquecimento e a vaporização da água. Parte ou totalidade da superfície de vaporização pode estar dentro da própria fornalha, que neste caso é constituída por tubos paredes d'água. Essa parte do vaporizador chamaremos de parte "radiante", uma vez que a principal forma de transferência de calor é por radiação

Em unidades bem dimensionadas as paredes d'água são menos de 10% da superfície total de vaporização e são capazes de absorver até 50% da energia liberada na combustão. A circulação de água e vapor no vaporizador dá-se por convecção natural ou por bombas, no caso de altas pressões de operação.

O superaquecedor é um trocador de calor que recebe o vapor saturado produzido no vaporizador e, mediante troca de calor com os gases da combustão eleva a temperatura de vapor transformando-o em vapor superaquecido. Em caldeiras de grande porte, os superaquecedores absorvem calor por radiação diretamente da fornalha (quando estão situados em seu topo) e também por convecção.

O economizador é um trocador de calor que pré-aquece a água de alimentação da caldeira mediante calor cedido pelos gases da combustão. Normalmente está posicionado após o supe-

aquecedor (com relação ao trajeto dos gases). Tem a finalidade de aumentar o rendimento da caldeira e minimizar o choque térmico na entrada do vaporizador.

O aquecedor de ar é um trocador de calor que aproveita o calor residual dos gases que passaram pelo economizador para pré-aquecer o ar de combustão. A temperatura dos gases na chaminé situa-se entre 120° e 300°C, dependendo da pressão de operação e da existência de economizador e/ou aquecedor de ar.

O posicionamento relativo dos componentes principais na caldeira (trocadores de calor) é feito de modo que o fluido quente (gases da combustão) e os fluidos frios (água, vapor e ar) circulem em contracorrente.

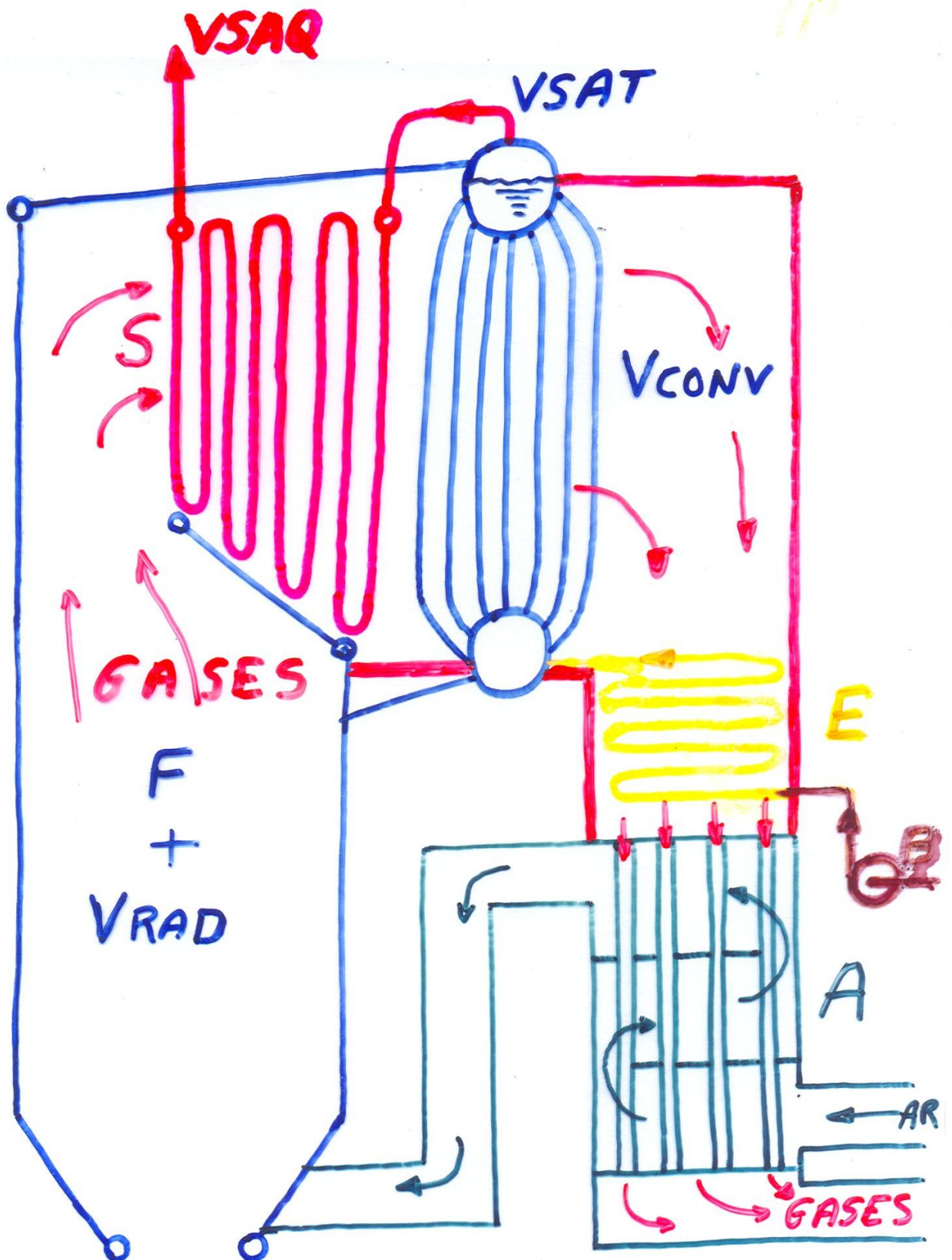
A pressão de operação é controlada por pressostatos ligados ao sistema de alimentação de combustível para a fornalha. Quando a demanda de vapor aumenta, a pressão começa a cair e o sistema de alimentação deve fornecer mais combustível e ar para a fornalha. Assim, com maior geração de gases (e calor) na fornalha, a produção de vapor aumenta restabelecendo a pressão de trabalho ao seu valor de “set-point”.

3.3 - Tipos

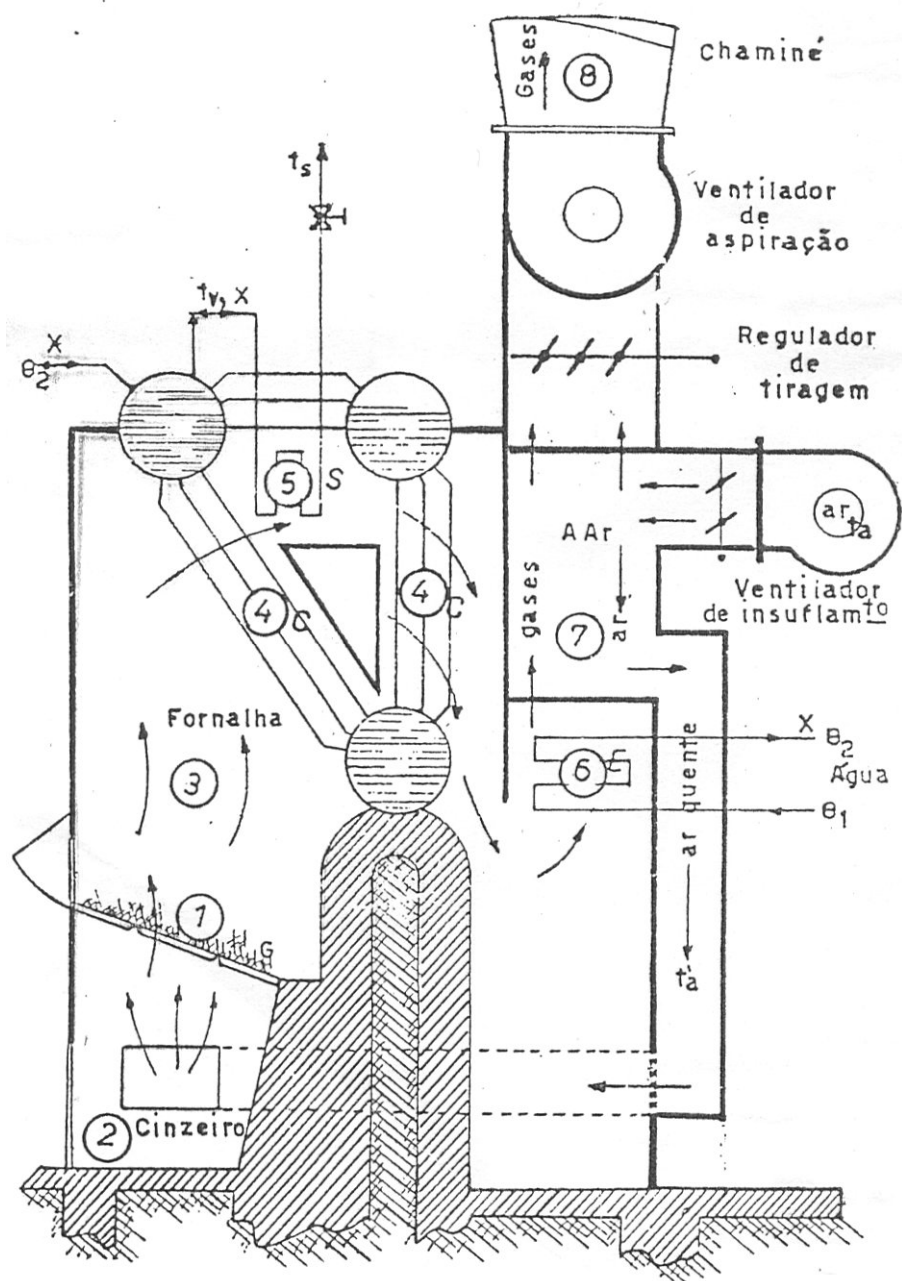
As caldeiras são classificadas em:

- a) Aquotubulares – nas quais a água e o vapor circulam por dentro dos tubos.
- b) Flamotubulares - nas quais os gases de combustão circulam por dentro dos tubos.
- c) Elétricas – utilizam o efeito Joule para gerar calor a partir da energia elétrica.

As Aquotubulares são de uso abrangente, de pequeno a grande porte. Podem ser utilizadas para qualquer faixa de pressão do vapor. Normalmente têm economizador e superaquecedor. As flamotubulares são de pequeno porte, para produções de até 15 t/h vapor saturado, no máximo a 15 ata. As elétricas são convenientes quando há disponibilidade de energia elétrica a baixo custo. São utilizadas apenas para a produção de vapor saturado. Funcionam com resistências elétricas ou eletrodos submersos.



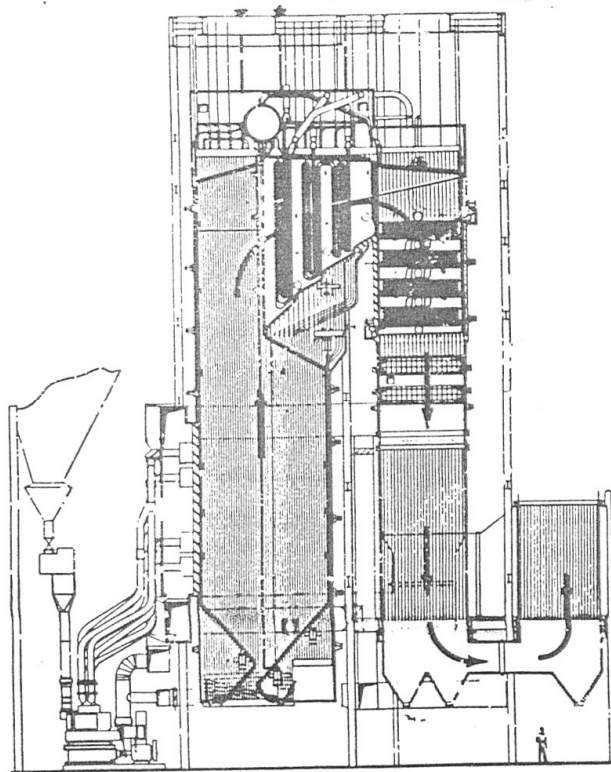
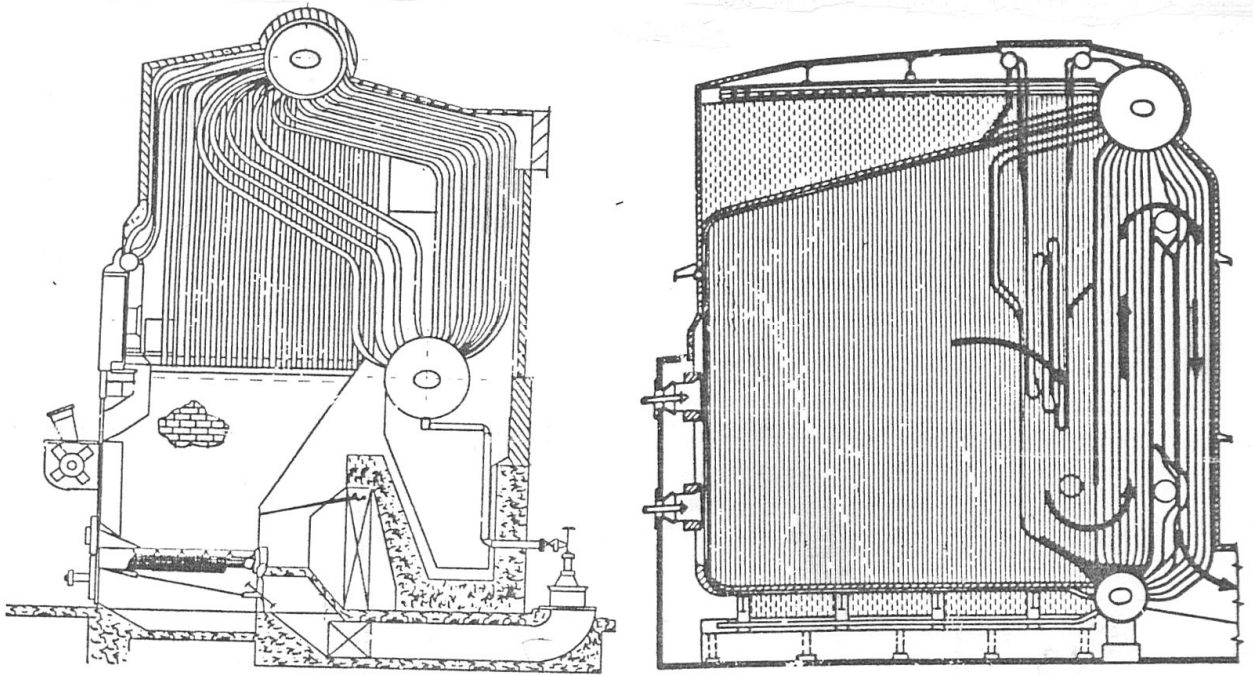
Caldeira Aquotubular tipo vertical



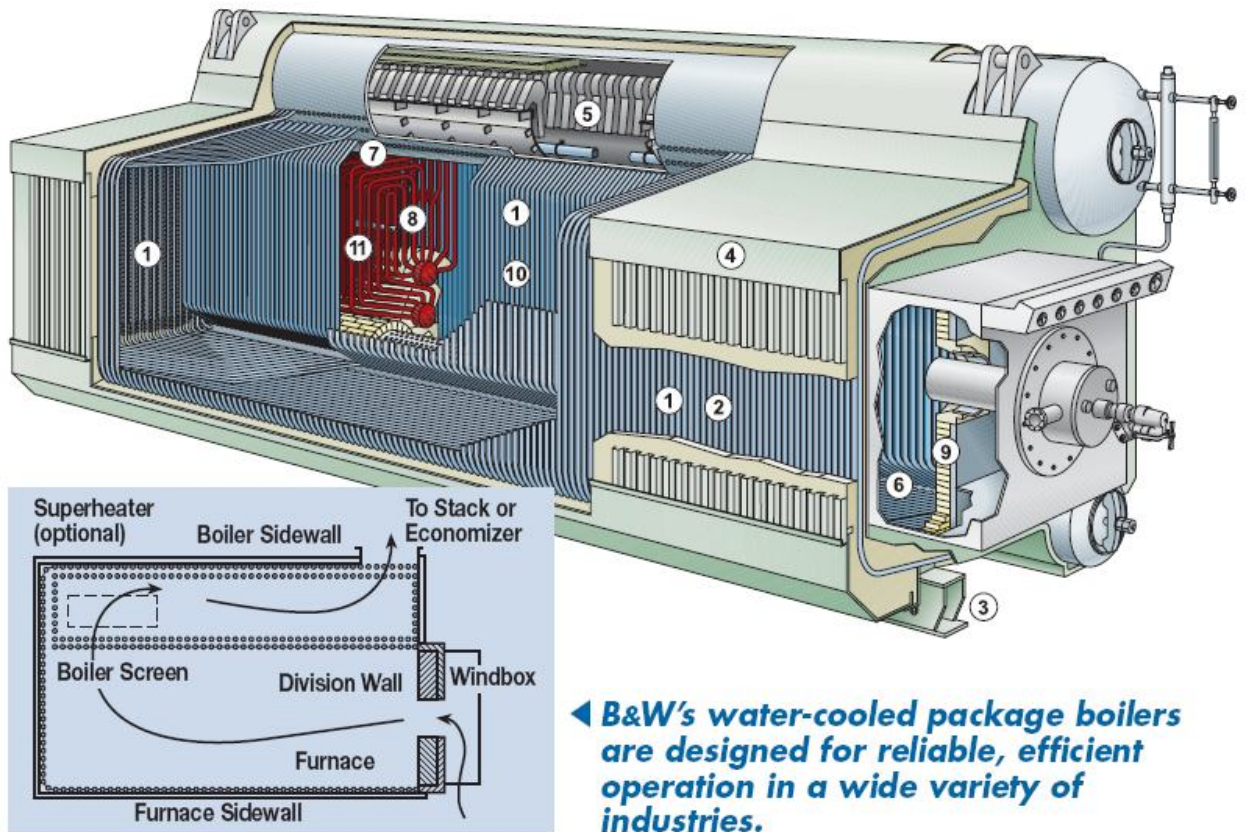
Caldeira Aquotubular tipo vertical

CALDEIRAS AQUOTUBULARES

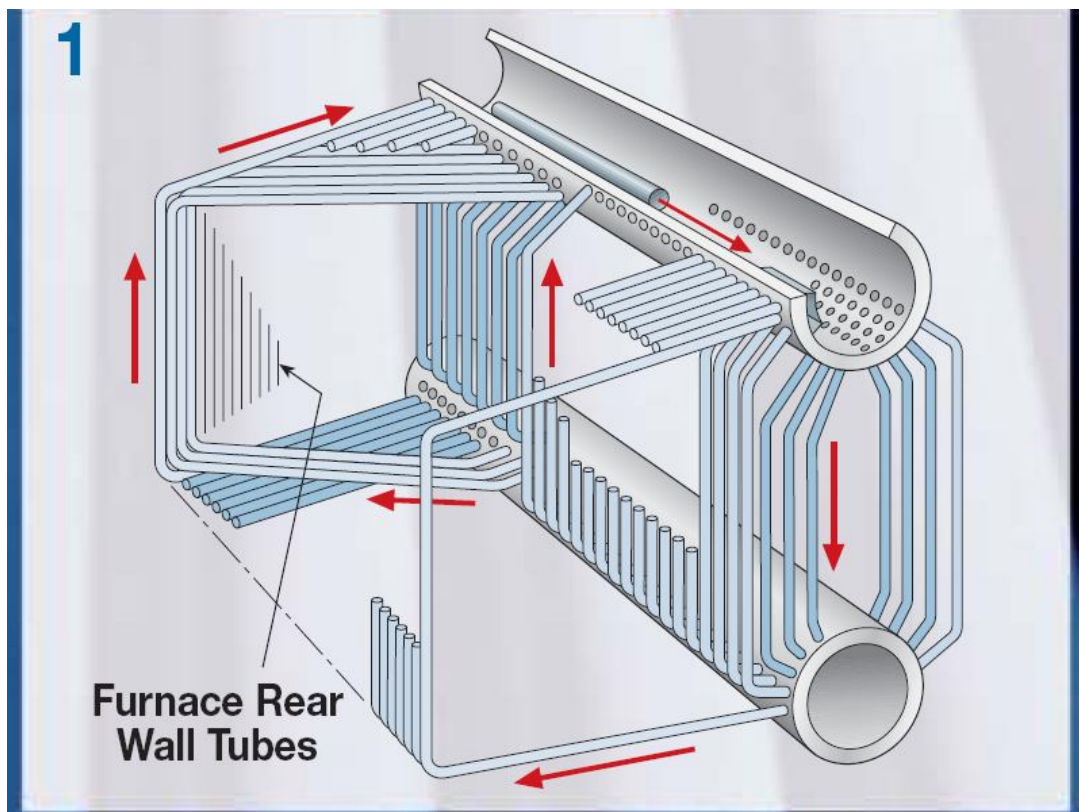
4

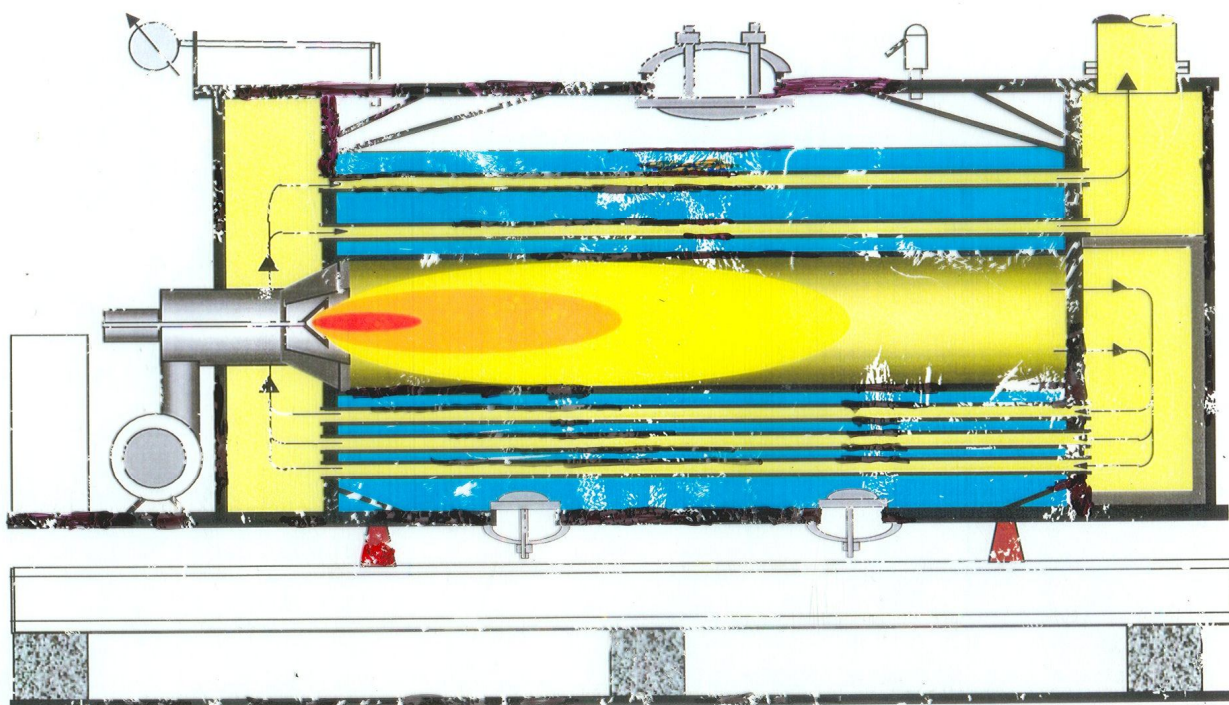


Caldeiras Aquotubulares
Tipo horizontal acima e tipo vertical abaixo



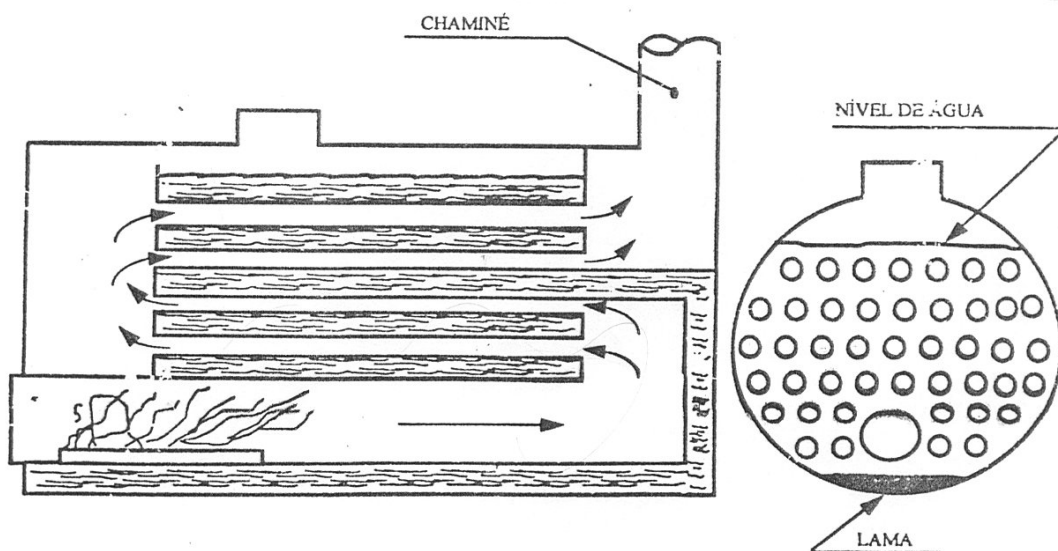
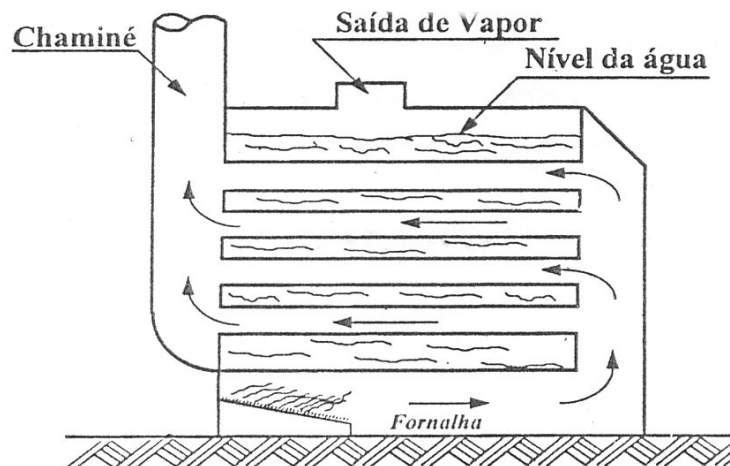
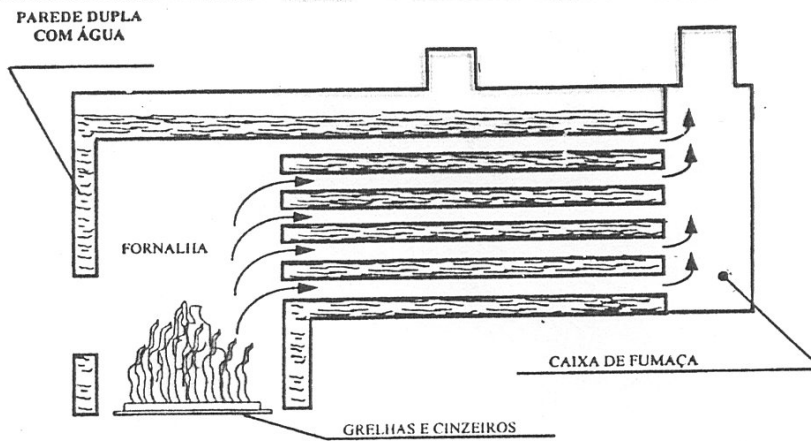
Caldeira Aquotubular horizontal





Caldeira Flamotubular

CALDEIRAS FLAMOTUBULARES



3.3.1 – Escolha do tipo

É baseada nas características de pressão e produção da caldeira, bem como das exigências da aplicação do vapor. Por exemplo, para vapor exclusivamente para processo podem ser usadas caldeiras flamotubulares. Já para acionamento de turbinas utilizam-se caldeiras aquotubulares, devido à necessidade de vapor superaquecido. A partir das características de cada tipo faz-se a opção entre aquo e flamotubulares, conforme a tabela a seguir.

Aquotubulares	Flamotubulares
- permitem altas pressões e grandes produções - ocupam pouca área - têm partida rápida - permitem fácil instalação de superaquecedor, economizador e pré-aquecedor de ar - exigem bom tratamento da água - são mais sensíveis às variações de demanda de vapor - são de construção mais complexa	- atendem bem a demandas variáveis na produção de vapor - são de construção fácil - não exigem rigoroso tratamento da água - utilizam pouca alvenaria - ocupam bastante área - têm partida lenta - são pesadas - permitem apenas baixas pressões (até 15 ata)

Via de regra, instalações de pequeno porte (até 15 t/h e 15 ata) para vapor saturado usam caldeiras flamotubulares, por serem mais baratas. Unidades de médio e grande porte são geralmente aquotubulares.

3.4 – Trajeto dos fluidos em um GV

Ar: atmosfera → VENTILADOR → AQUECEDOR DE AR → FORNALHA

Combustível: estocagem → SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO → FORNALHA (queima) → gases quentes da combustão

Gases da combustão: FORNALHA → SUPERAQUECEDOR → VAPORIZADOR → ECONOMIZADOR → AQUECEDOR DE AR → EXAUSTOR → CHAMINÉ → atmosfera

Água: TANQUE DE CONDENSADO → BOMBA → ECONOMIZADOR → VAPORIZADOR → vapor saturado

Vapor: TUBULÃO DE VAPOR → SUPERAQUECEDOR → aplicação

3.4.1 - Fluxograma simplificado

Componentes:

F = fornalha (inclui a parte radiante do vaporizador - paredes d'água)

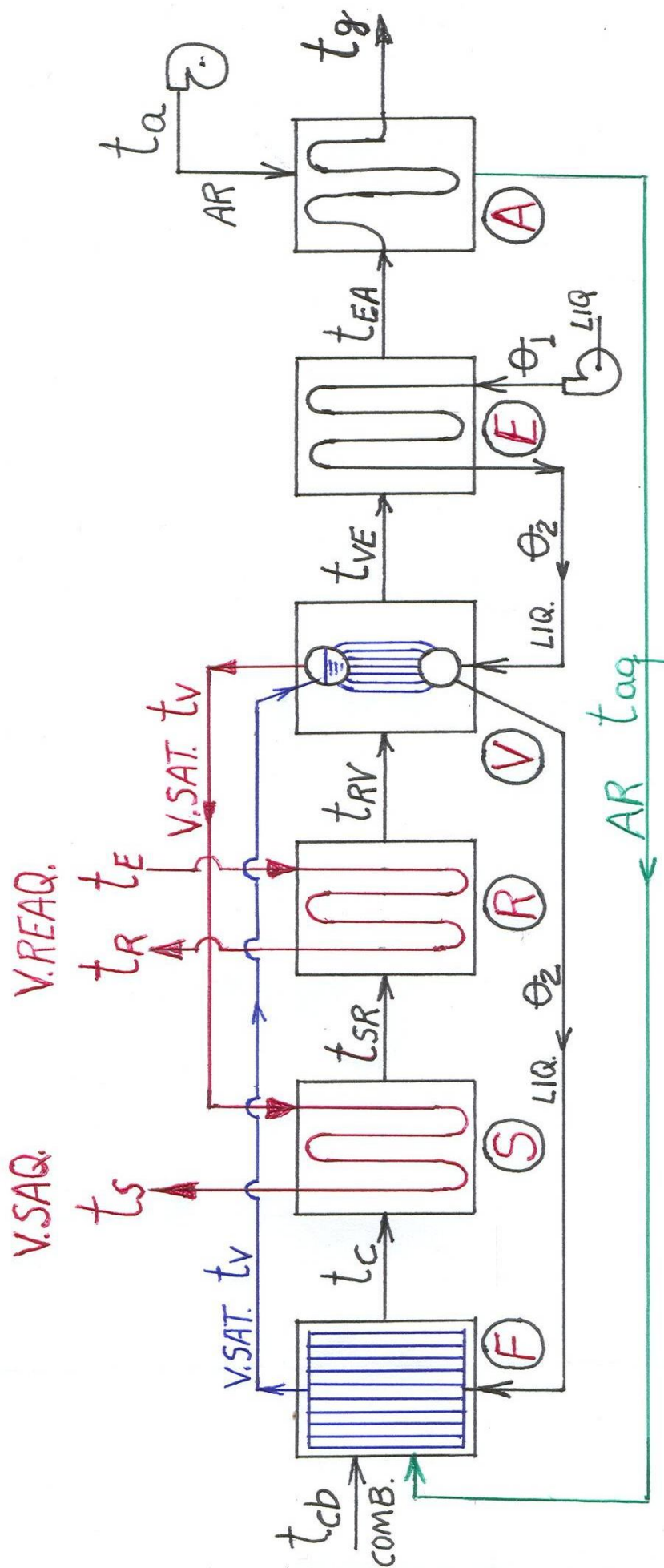
S = superaquecedor

R = reaquecedor

V = vaporizador (parte convectiva ou "banco convectivo")

E = economizador

A = aquecedor de ar (também chamado de "pré-ar")



3.5 - Características principais de um GV

- Capacidade ou produção (kg/h , t/h)
- Pressão do vapor (kgf/cm², ata, bar, kPa)
- Temperatura do vapor (se superaquecido) (°C)
- Superfície de vaporização (m²)
- Superfície de superaquecimento (m²)
- Rendimento
- Consumo de combustível (kg/h , referido a uma temperatura de alimentação de água)
- Pressão de projeto (kgf/cm², ata, bar, kPa)

3.6 – Fornalhas

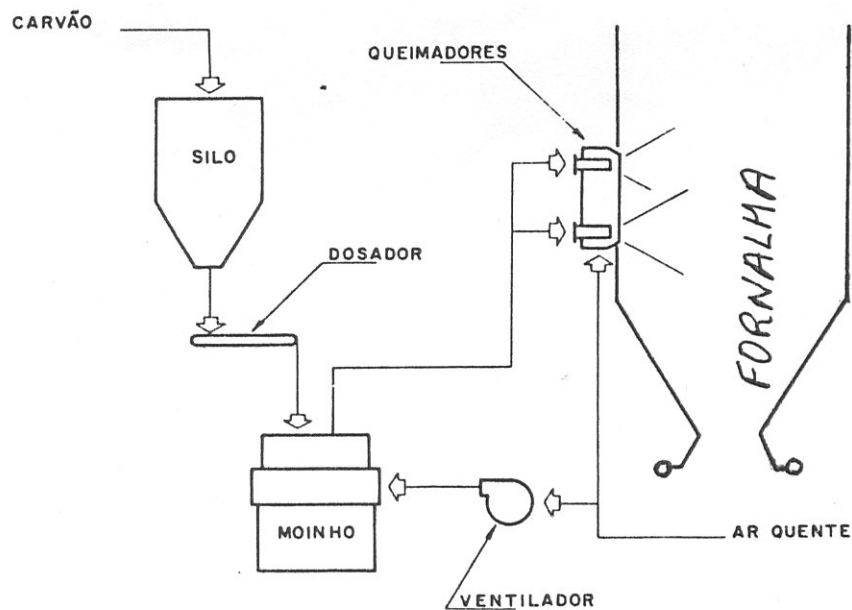
3.6.1 – Definição

É o componente do GV destinado a converter a energia química do combustível em energia térmica, ou seja, processar a queima do combustível.

3.6.2 – Classificação

As fornalhas são classificadas quanto à forma de queima do combustível em 3 tipos.

a) **Fornalhas de queima em suspensão:** têm aplicação bastante abrangente. Destinam-se à queima de combustíveis líquidos, gasosos e sólidos pulverizados, como por exemplo óleo, carvão pulverizado e gás natural. Também vêm sendo empregadas para serragem, casca de arroz e outros resíduos industriais que possam ser moídos. Possuem um ou mais queimadores. Dependendo da instalação o ar pode ser admitido como o ar primário somente ou primário secundário. O primário é utilizado para nebulização do óleo combustível ou o transporte de combustível sólido pulverizado. O ar secundário é lançado na nuvem de combustível em queima para assegurar uma combustão total e estável.



Esquema simplificado de um sistema para queima de carvão pulverizado em suspensão

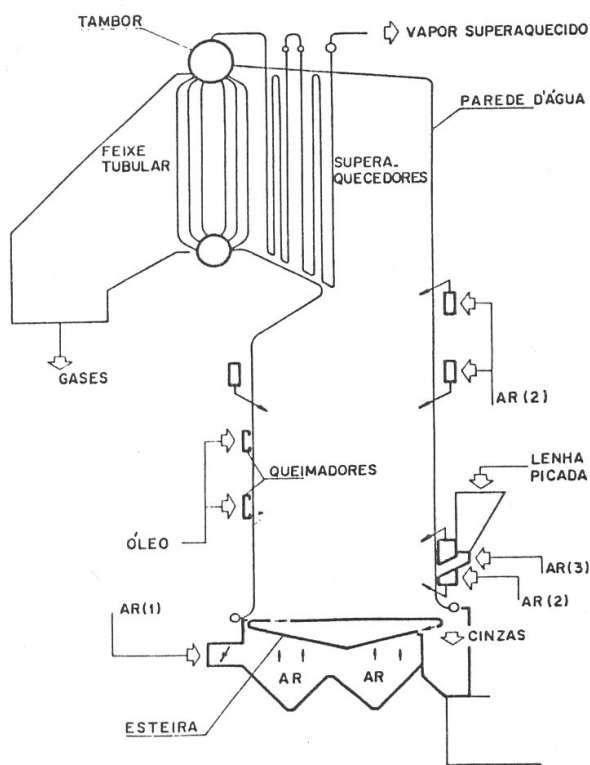


Fig 3.18- Fornalha de grelha rotativa para queima de lenha e adaptada com queimadores a óleo.

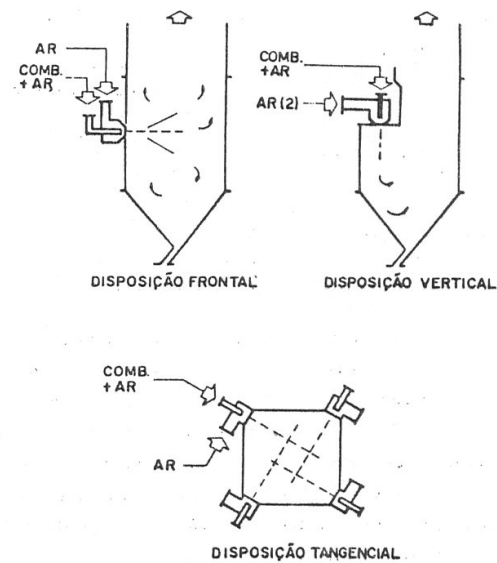


Fig 3.2- Alternativas usualmente adotadas na concepção de fornalhas de queima em suspensão

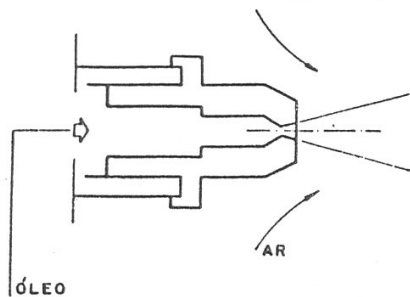


Fig 3.4- Nebulização mecânica (pressão direta).

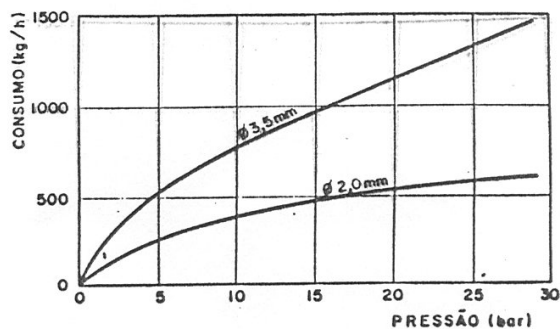


Fig 3.5- Correlação entre pressão e consumo de óleo em queimadores de pressão direta [01].

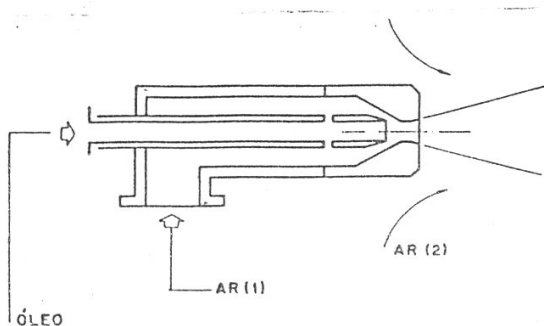


Fig 3.7- Nebulização a ar

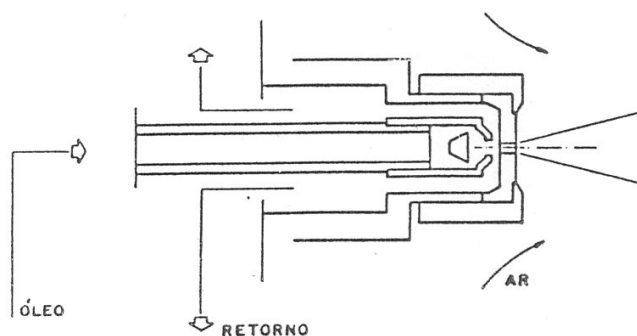


Fig 3.6- Nebulização mecânica (retorno de óleo).

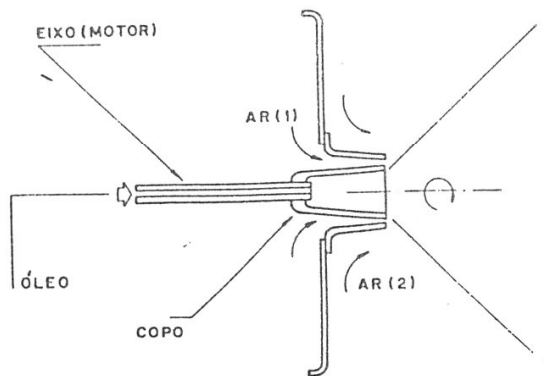


Fig 3.8- Nebulização com auxílio de copo rotativo.

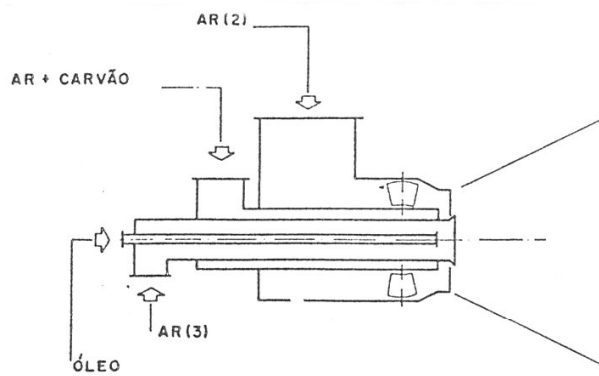


Fig 3.10- Queimador de carvão pulverizado

TIPOS DE QUEIMADORES

b) **Fornalhas de queima em grelha** – aplicação restrita a unidades de pequeno ou médio porte (até 200 t/h vapor), para combustíveis sólidos como carvão fóssil, lenha, bagaço de cana e outros resíduos. Não exige uma preparação rigorosa do combustível. A alimentação pode ser:

- manual
- mecanizada – controlada pelo operador
- automatizada – função da pressão

c) **Fornalha de queima em leito fluidizado**: Permite um melhor aproveitamento na queima de combustível de má qualidade, o combustível permanece em suspensão no leito, sob ação de uma corrente ascendente de ar (1 a 6 m/s), o tempo suficiente para que a combustão se complete. A vazão de ar é maior comparada com queima em grelha e isto permite operar a temperaturas relativamente baixas (800 a 950°C). Por isso é possível instalar trocadores dentro da fornalha, absorvendo até mais de 50% do calor liberado. A presença de carbono no cinzeiro é mínima, inferior a de sistemas convencionais.

3.6.3 - Tipos de paredes das fornalhas

- **Refratária**- o tijolo refratário resiste bem ao calor mas não dá bom isolamento sendo necessária uma camada de isolante após o refratário.
- **De água** – tubos com água (do vaporizador) servem de parede. Propiciam maior produção por área de troca (temperatura alta + radiação) e economizam refratários. Porém, diminui a temperatura na fornalha e alguns combustíveis não queimam. Existem câmaras totalmente irradiadas (só paredes d'água) para combustível de alto Pc.

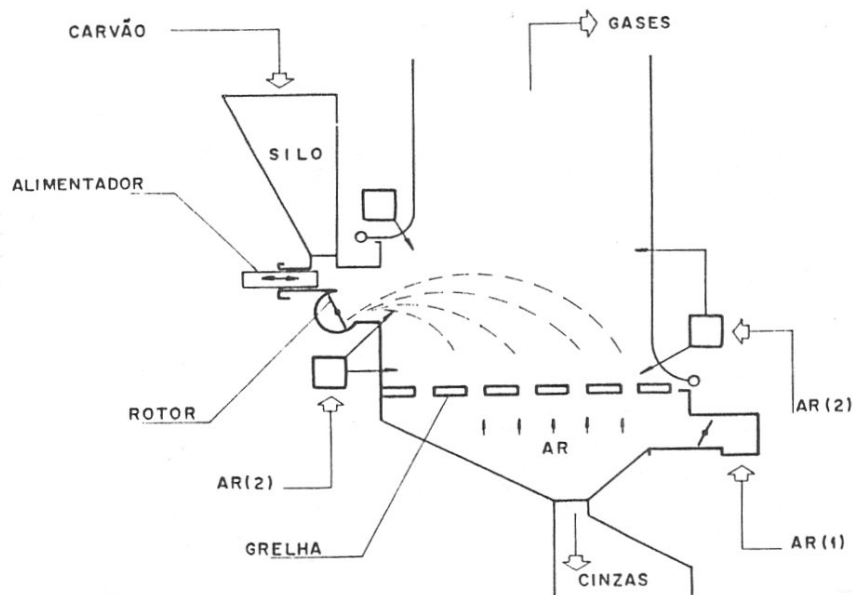
3.6.4 – Pressão interna

Negativa – para exaustor na chaminé (ou chaminé natural). É utilizada para combustíveis sólidos com fornalha aberta para não haver escape de gases pela porta de alimentação de combustível.(3 a 10 mm CA)

Positiva – para queima em suspensão. Pode ter apenas ventilador ou também exaustor.

Super pressão positiva – para caldeiras compactas com alta velocidade de passagem do ar e grande perda de carga.

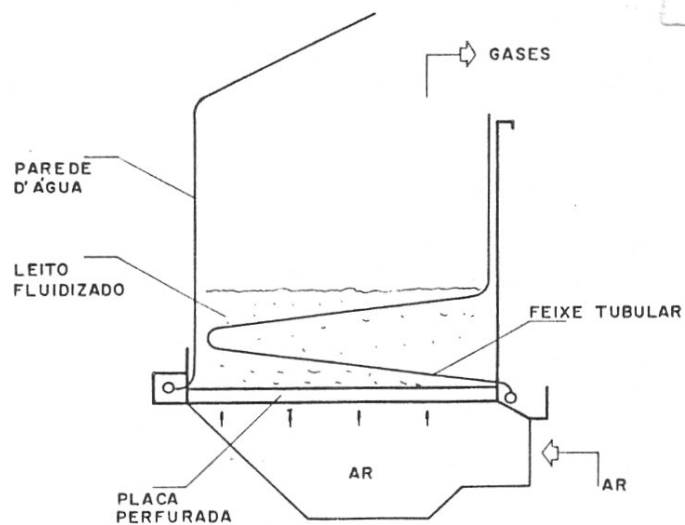
QUEIMA EM GRELHA



Dispositivo de alimentação de combustível utilizado em fornalhas de queima em grelha.

QUEIMA EM LEITO

FLUIDIZADO



Fornalha de leito estacionário

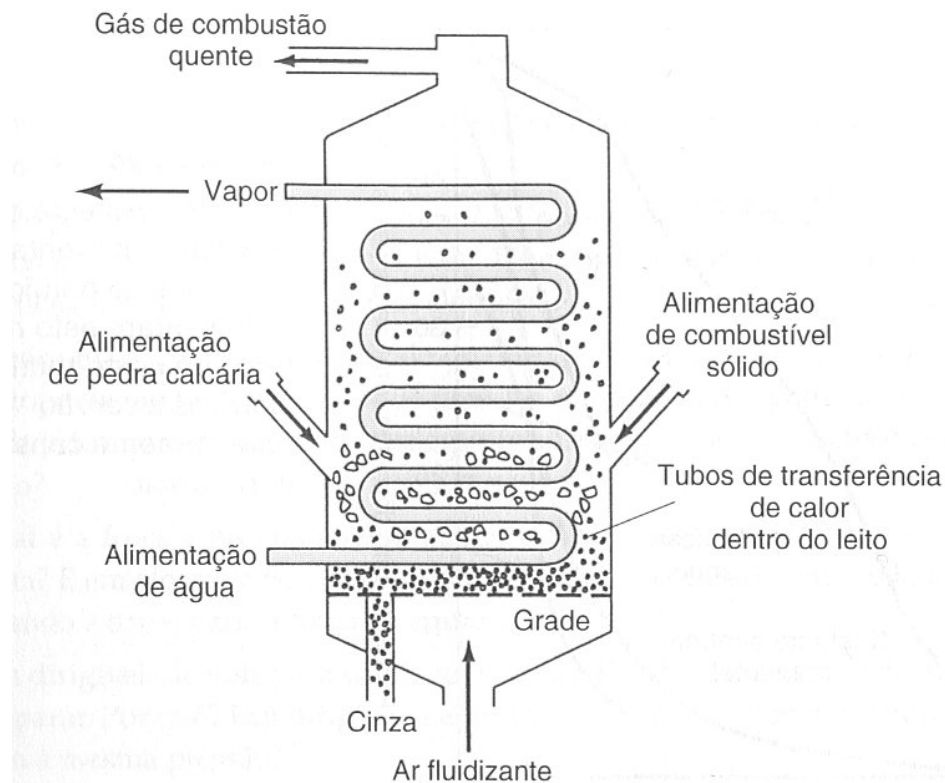


FIGURA 7.20

Uma unidade de combustão em leito fluidizado (FBC).

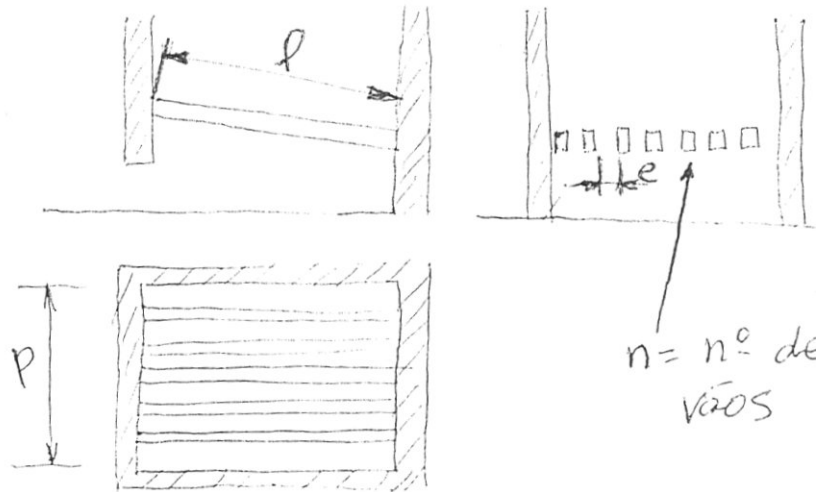
3.6.5 – Dimensionamento das fornalhas

Deve-se considerar:

- Forma e volume adequados ao tipo e quantidade de combustível.
- Altura compatível com a circulação de água e tempo gasto na queima.
- Disposição dos queimadores para evitar contato direto da chama com os tubos.
- Dimensões adequadas da grelha.
- Temperatura adequada ao equipamento e ao combustível.

Grandezas principais:

- área da grelha: $S_g = p \cdot l$
- volume da câmara: V
- Área de passagem: $S_0 = n \cdot e \cdot l$



ESQUEMA EM CORTE
MOSTRANDO A GRELHA

$$\dot{m}_{cb} AC v_{ar} = S_0 C_{ar}$$

$\dot{m}_{cb}$ - consumo de combustível

AC – $\text{kg}_{ar} / \text{kg}_{comb}$

v_{ar} = volume específico do ar

C_{ar} – velocidade de passagem na grelha

C_{ar} recomendado:

0,75 – 1,5 m/s – para tiragem natural

2 – 5 m/s - para tiragem forçada

Carga na grelha:

Combustível	Tiragem	Carga ($\text{kg} / \text{m}^2 / \text{h}$)
Lenha	Natural	80-130
Lenha	Forçada	150-300
Carvão	Natural	70-150
Carvão	Forçada	200-300
Bagaço de cana, serragem, resíduos de cereais	Natural	60-120
Idem	Forçada	150-200
Idem	Forçada com esteira rotativa	400-500

Volume da fornalha:

Carga térmica na fornalha: ($1\text{kw} = 860 \text{ kcal/h}$)

$$K = \dot{m}_{cb} PCI / V (\text{kcal} / \text{m}^3\text{h})$$

Recomendação para fornalhas com paredes d'água:

Combustível	Tipo	K (kcal / m ³ h)
Óleo ou gás	Aquotubular	170000 – 680000
	Flamotubulares	430000 – 1000000
Carvão	Pulverizado	80000 – 250000
	Em grelha móvel	200000 – 370000
Lenha	Em grelha inclinada	120000 – 320000
	Em grelha móvel	120000 – 400000

3.7 - Perdas de energia no GV, rendimento e consumo de combustível

3.7.1 – Perdas de energia

Parte da energia do combustível não aproveitada para a geração de vapor.

a) Perda por combustível caído nas cinzas

$$P_1 = z \, t_{cz} \, PCI \quad [\text{kcal} / \text{kg}_{cb}]$$

$z = \text{kg cinzas} / \text{kg comb.}$

$t_{cz} = \text{kg comb} / \text{kg cinzas} - \text{teor de combustível contido nas cinzas do cinzeiro}$

$$\text{Adimensionalizando: } P_1 = z \, t_{cz} \, PCI / PCI \quad \Rightarrow \quad \mathbf{P_1 = z \, t_{cz} \, 100 \quad [\%]}$$

PCI = poder calorífico inferior do combustível.

b) Perda pelo calor sensível contido nas cinzas

$$P_2 = z \, C_z \, (t_z - t_a) \quad [\text{kcal} / \text{kg}_{cb}]$$

$$p_2 = \frac{z \, C_z \, (t_z - t_a)}{PCI} * 100 \quad [\%]$$

$t_z = \text{temperatura de retirada das cinzas do cinzeiro}$

($p_1 + p_2 = 0$ a 10% dependendo do teor de cinzas do combustível)

c) Perda por formação de fuligem (carbono não queimado)

$$P_3 = m_c \, (AC + 1 - z) \, P_{cc} \quad [\text{kcal} / \text{kg}_{cb}]$$

$$p_3 = \frac{m_c \, (AC + 1 - z) \, P_{cc}}{PCI} * 100 \quad [\%]$$

$m_c = \text{conteúdo de carbono (fuligem) nos gases} \quad [\text{kg}_c / \text{kg}_g]$

$P_{cc} = \text{poder calorífico do Carbono}$

d) Perda por presença de gases combustíveis na chaminé

$$p_4 = \frac{(m_{CO} P_{ci_{CO}} + m_{H_2} P_{ci_{H_2}})(AC + 1 - z)}{PCI} 100 \quad [\%] \quad [kcal / kg_{cb}]$$

m_{CO} = conteúdo de CO nos gases (kg_{CO} / kg_g)

$m_{H_2} = idem para o H_2$

$P_{ci_{CO}}$ = poder calorífico do CO

$P_{ci_{H_2}}$ = poder calorífico inf. do H_2

$(P_3 + P_4 = 1 a 10 \% , \text{ dependendo do combustível})$

e) Perda por condução e convecção para o ambiente

Complexo para ser calculado. Depende do tamanho do GV, do isolamento, dos cuidados na construção. Obtido de gráficos da literatura de caldeiras, como mostrado a seguir.

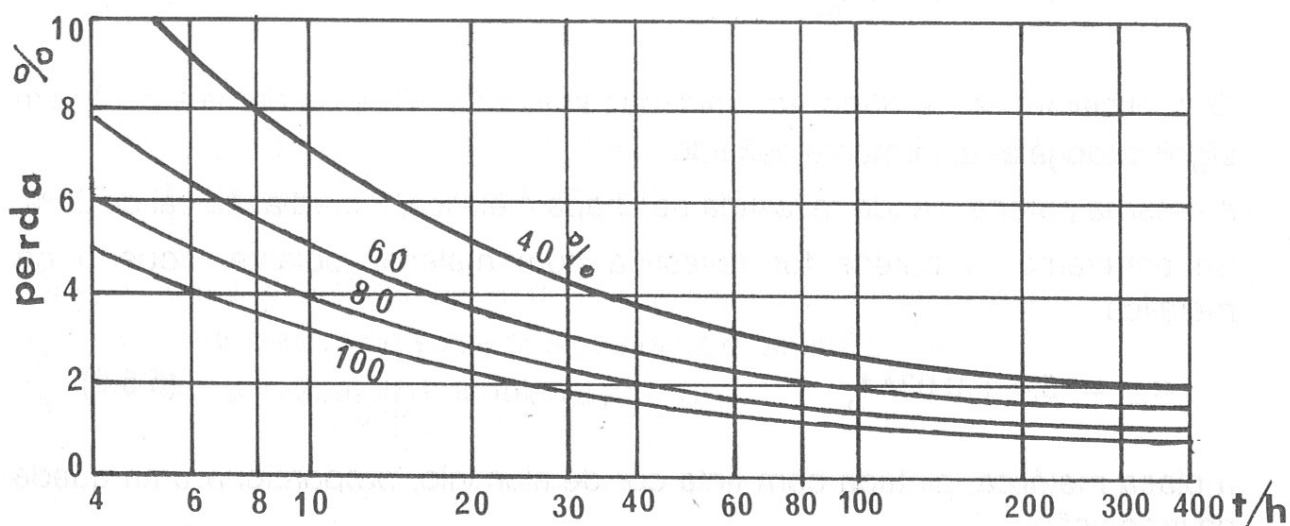
f) Perda pelo calor contido nos gases da chaminé

É o calor sensível dos gases que são descartados da caldeira.

$$P_6 = (AC + 1 - z) C_{Pg} (t_g - t_a) \quad [kcal / kg_{cb}]$$

$$p_6 = \frac{(\lambda AC_0 + 1 - z) C_{pg} (t_g - t_a)}{PCI} * 100 \quad [\%]$$

$(P_6 = 5 a 20\% \text{ geralmente})$



3.7.2 Rendimento do GV

Perdas na fornalha: $P_1 + P_2 + P_3 + P_4$

Perdas no restante da caldeira: $P_5 + P_6$

a) Rendimento da fornalha:

$$\eta_F = \frac{\text{calor liberado na fornalha}}{\text{calor introduzido pelo comb.}}$$

$$\eta_F = 100 - (P_1 + P_2 + P_3 + P_4) \quad [\%]$$

b) Rendimento da caldeira:

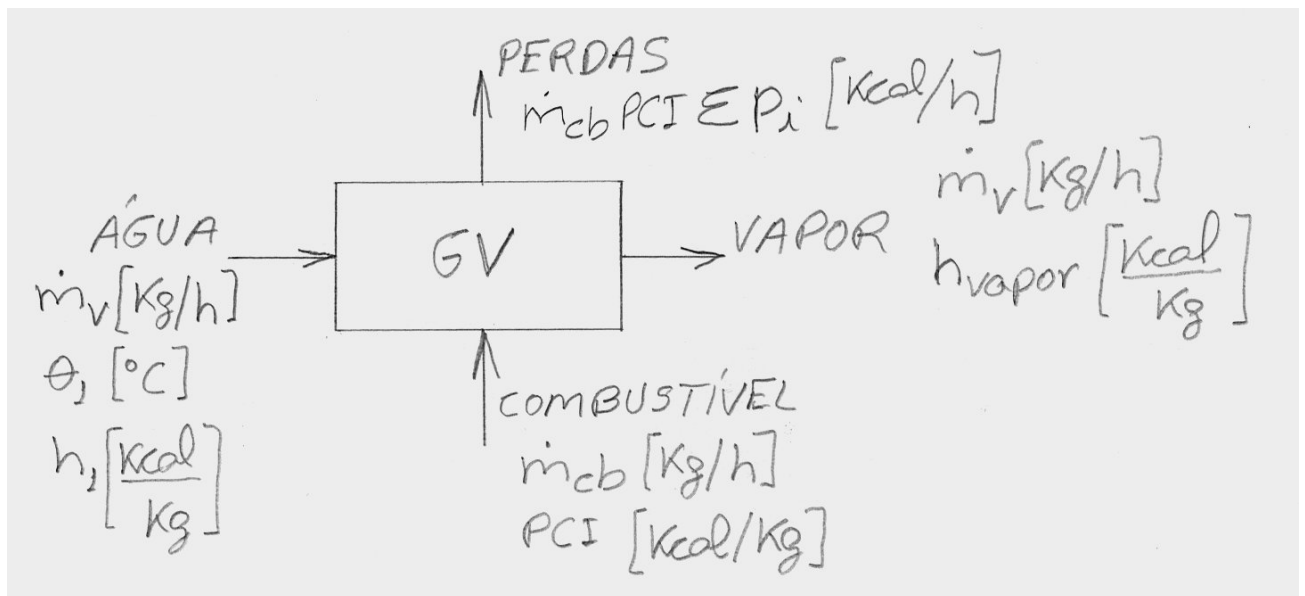
$$\eta = \frac{\text{calor aproveitado para produção de vapor.}}{\text{energia do combustível}}$$

$$\eta = 100 - \sum_1^6 p_i = 1 - \sum_1^4 p_i - (p_5 + p_6) = \eta_F - (p_5 + p_6) = 1 - (p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5 + p_6) \quad [\%]$$

3.7.3 Consumo de combustível da caldeira

Através do balanço de energia em regime permanente (primeira lei da termodinâmica):

$$E_{\text{entra}} = E_{\text{sai}}$$



chega-se à expressão para o consumo de combustível

$$\dot{m}_{cb} = \frac{\dot{m}_v (h_{\text{vapor}} - h_1)}{\eta \text{ PCI}} \quad [\text{kg/h}]$$

Se $\dot{m}_v$, h_{vapor} e PCI são fixos, então $\dot{m}_{cb}$ varia com η e θ_1

OBS: $h_{\text{vapor}} = h_{\text{sat}}$ se a caldeira produz vapor saturado

$h_{\text{vapor}} = h_s$ se a caldeira produz vapor superaquecido

3.7.4 Redução de consumo de combustível

a) Aumentar rendimento (diminuir perdas)

- Reduzir P_6 :

$$P_6 = \frac{(\lambda AC_0 + 1 - z) C_{pg} (t_g - t_a)}{PCI}$$

- Reduzir λ controlando o teor de CO_2 na chaminé $\lambda = \frac{CO_{2max}}{CO_2}$
- Manter t_g (na base da chaminé) mais baixa. O aumento de t_g pode ser por incrustações nos tubos (lado da água), depósito de fuligem (lado dos gases), quebra de paredes com passagem direta de gases da fornalha para chaminé.
- Instalar aquecedor de ar e/ou economizador

b) Reduzir $P_5 \rightarrow$ conservando ou melhorando o isolamento térmico

c) Aumentar a temperatura da água de alimentação (θ_1): através da melhoria do sistema de retorno de condensado.

3.8 - Transferência de calor na fornalha

3.8.1 - Coeficiente de irradiação na fornalha: σ

Calor gerado na fornalha: $q_F = \eta_F PCI$ (kcal / kg_{cb})

Calor transferido por radiação para as paredes de água: q_i (kcal / kg_{cb})

Calor de aquecimento da massa de gases da combustão: q_c (kcal / kg_{cb})

Definição do coeficiente de irradiação: $\sigma = q_i / q_F$

Elementos que irradiam calor:

- partículas de combustível queimando
- combustível incandescente em suspensão
- partículas de cinzas em suspensão
- gases H_2O , CO_2
- paredes refratárias

3.8.2 - Temperatura média teórica na câmara de combustão (fornalha): t_c

Balço de energia na fornalha em regime permanente (em relação à temperatura ambiente t_a , supondo adiabática e desprezando possível aquecimento do combustível):

calor recebido = calor cedido

$$q_F + q_{ar} = q_i + q_g \quad (*)$$

q_F = gerado na fornalha: $q_F = \eta_F PCI$ (kcal / kg_{cb})

q_{ar} = trazido pelo ar (quando aquecido): $q_{ar} = AC c_{par} (t_{aq} - t_a)$ (kcal / kg_{cb})

q_i = transferido por radiação para as paredes de água da fornalha $q_i = \sigma \eta_F PCI$ (kcal / kg_{cb})

q_c : cedido à massa de gases da combustão (kcal / kg_{cb}) $q_g = (AC + 1 - z) C_{pg} (t_c - t_a)$

Substituindo em (*):

$$\eta_F PCI + AC c_{par} (t_{aq} - t_a) = \sigma \eta_F PCI + (AC + 1 - z) C_{pg} (t_c - t_a) \text{ [kcal / kg}_{cb}]$$

$$t_c = \frac{(1 - \sigma) \eta_F PCI + AC c_{par} (t_{aq} - t_a)}{(AC + 1 - z) c_{pg}} + t_a$$

$C_{pg} \rightarrow$ médio entre t_c e t_a

Se $t_{aq} = t_a$ (caldeira sem aquecedor de ar) então a expressão da temperatura reduz-se a

$$t_c = \frac{(1 - \sigma) \eta_F PCI}{(AC + 1 - z) c_{pg}} + t_a$$

Considerações:

- maior $\sigma \rightarrow$ menor t_c : pode-se não atingir a temperatura de queima ou ter-se combustão irregular.
- menor PCI $\rightarrow$ menor t_c : baseado neste item e no anterior analisar a queima de combustível de baixo PCI em fornalhas com alto coeficiente de irradiação.
Ex: carvão, óleo: $\sigma = 0,3$ a $0,6$
Lenha, resíduos: $\sigma = 0,2$ a $0,4$
- Alto $c_{pg} \rightarrow$ baixo t_c : evitar gases com alto c_{pg} , por ex.: combustíveis úmidos dão c_{pg} maior devido alto c_p do vapor d'água em relação aos outros gases da combustão
- Maior $\lambda \rightarrow$ menor t_c : grande excesso de ar prejudica a combustão.
- t_c praticamente não depende do consumo de combustível (em regime permanente).

3.8.3 - Calor transferido por radiação na fornalha

Calor irradiado:

$$Q_i = \beta \varepsilon S_i (T_c^4 - T_p^4) \text{ [kcal/h]}$$

β = constante de Stefan-Boltzmann ($4,875 \times 10^{-8}$ kcal / hm²K⁴ = $5,67 \times 10^{-8}$ W / m²K⁴)

ε = emissividade combinada. Depende do combustível, conteúdo de CO₂, H₂O nos gases, da temperatura, e do material das superfícies irradiadas.

Para óleo: $\varepsilon = 0,75 - 0,95$

Para carvão linhito, madeira: $\varepsilon = 0,55 - 0,8$

Para gás natural: $\varepsilon = 0,2$

Para GLP: $\varepsilon = 0,3$

S_i = Superfície irradiada, normal à chama (m²)

$S_i = f_p S_p$

f_p = fator de correção (depende do arranjo dos tubos). Ver tabela Hildo Pera ou aproximadamente:

$$f_p = 1 \text{ (p/ s = } d_e\text{)}$$

$$f_p = 0,9 \text{ (p/ s = } 2 \text{ } d_e\text{)}$$

s = espaçamento dos tubos

S_p = área normal dos tubos expostos à chama

T_c = temperatura da fornalha (K) $T_K = T_c + 273$

T_p = temperatura da parede externa dos tubos (K)

$T_p = t_v + 273 + (20^\circ \text{ a } 40^\circ) \rightarrow$ na superfície de vaporização

$T_p = t_v + 273 + 50^\circ \rightarrow$ no superaquecedor

3.8.4 - Cálculo do coeficiente de irradiação

$$\sigma = \frac{q_i}{q_F} = \frac{Q_i}{Q_F} \qquad Q_F = \eta_F \dot{m}_{cb} \text{ PCI} \quad [\text{kcal/h}]$$

a) No caso em que a superfície irradiada da fornalha é conhecida (S_i), o cálculo de σ é iterativo, pois $t_c = t_c(\sigma)$ e $\sigma = \sigma(t_c)$, não linear. Procedimento:

1. Adota-se um valor para σ (entre 0 e 0,5)
2. Calc. T_c
3. Calc. Q_i
4. Calc. $\sigma = Q_i / Q_F$
5. Corrige σ e volta a 2 até convergir

Outra forma é substituir σ por sua definição na equação de t_c e resolver a equação não linear resultante em um “solver” numérico.

b) No caso em que a superfície irradiada da fornalha (S_i) ainda não foi calculada, σ pode ser calculado pela equação da temperatura média da fornalha (t_c). Esta por sua vez deve ser fixada no intervalo entre 800°C e 1300°C , conforme o PCI do combustível, os quais variam entre 2000 e 11000 kcal/kg.

3.9 – Vaporizador (parte convectiva)

3.9.1 - Superfície de vaporização do GV:

Área dos tubos onde ocorre mudança de fase (vaporização). É composta de duas partes: a radiante (ou paredes de água da fornalha) e a convectiva (não exposta à fornalha). Esta segunda parte está sendo abordada nesta seção.

O volume de água da superfície de vaporização normalmente é maior para flamotubulares.

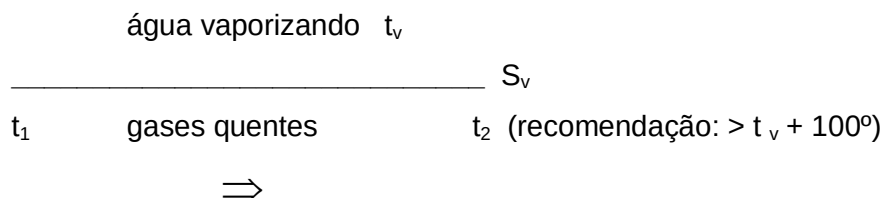
$\phi_{\text{tubos}} \approx 50 \text{ a } 100\text{mm}$, espessura $\approx 4 \text{ mm}$ (pequeno e médio porte, circulação natural)

3.9.2 - Circulação da água

Pode ser natural (até 160 bar) ou forçada por bombas, neste caso para aumentar taxa de transferência e reduzir a tendência a incrustações. Utilizam ϕ menores (25 a 35 mm). Quanto maior a pressão mais difícil a circulação natural, por que a diferença de pesos específicos água / vapor diminui.

3.9.3 – Cálculo da superfície de vaporização (parte convectiva): S_v [m^2]

Representando esquematicamente a parte convectiva do vaporizador:



Velocidade dos gases: $v = 5$ a 30 m/s ($\uparrow z \downarrow v$)

a) Calor necessário para aquecer e vaporizar a água

$$Q_v = Q_T - Q_i = \dot{m}_v (h_{\text{sat}} - h_1) - \sigma \eta_F \dot{m}_{\text{cb}} \text{PCI} \quad [\text{kcal/h}] \quad (1)$$

b) Calor cedido pelos gases (calor sensível)

$$Q_v = \dot{m}_{\text{cb}} (AC + 1 - z) c_{\text{pg}} (t_2 - t_1) (1 - \Psi_v) \quad [\text{kcal/h}] \quad (2)$$

Ψ_v = coeficiente de perdas no vaporizador (3 a 6%)

c) Calor trocado por convecção

$$Q_v = U S_v \Delta t_1 \quad [\text{kcal/h}] \quad (3)$$

U = coef. global de transferência de calor [$\text{kcal} / \text{m}^2 \text{h } ^\circ\text{C}$]

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_g} + \frac{e}{k} + \frac{1}{h_a}$$

h_g = coef. do filme de convecção (lado dos gases)

e = espessura do tubo

k = condutividade térmica do tubo ($k_{\text{aço}} = 50 \text{ kcal} / \text{m}^2 \text{h } ^\circ\text{C} = 60 \text{ W} / \text{m } ^\circ\text{C}$)

h_a = coef. do filme de convecção (lado da água)

$$\Delta t_1 = \frac{(t_1 - t_v) - (t_2 - t_v)}{\ln \frac{t_1 - t_v}{t_2 - t_v}} \quad (\text{média logarítmica de temperaturas})$$

Para cálculo de h_g e h_a consultar:

Incropera - Transferência de Calor

Remi B.Silva (cap. 7) – Geradores de Vapor d'Água

Edson Bazzo (cap 12) – Geração de Vapor (p. 142 –159)

Sequência de cálculo:

- 1) Calcular Q_v p/ (1)
- 2) Calcular t_2 p/ (2)
- 3) Calcular S_v p/ (3)

Valores da taxa de vaporização:

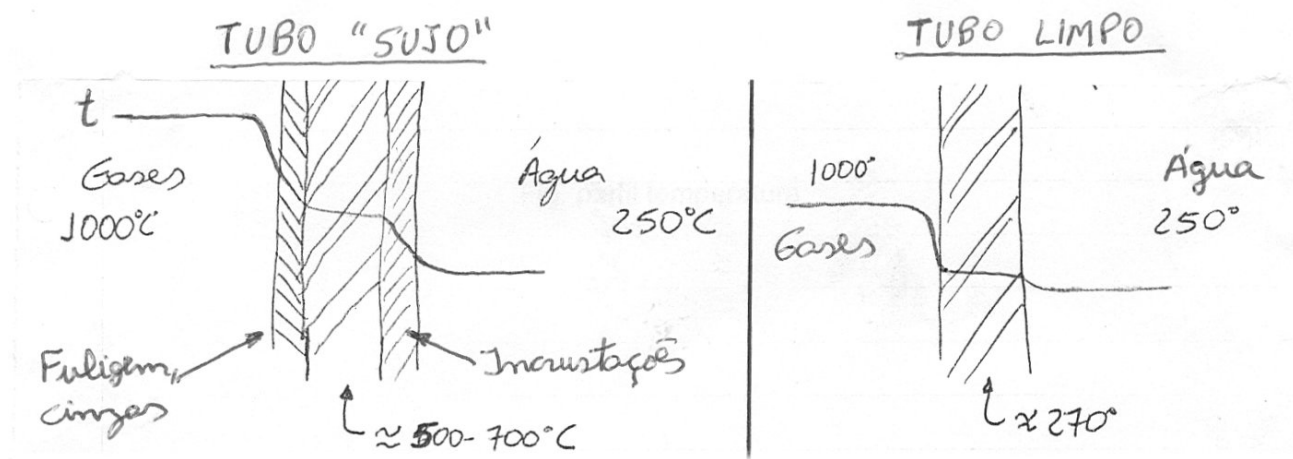
- Aquotubulares: até 200 [kg vapor / m²h]
- flamotubulares: 30 – 40 [kg vapor / m²h]

No cálculo mais preciso do U considerar também a radiação gasosa.

Valores típicos dos coeficientes de convecção (em kcal / m²h °C):

	FLAMOTUBULARES	AQUOTUBULARES
h_a	5000 – 20000	5000 – 6000
h_g	30 -70	50 -100

3.9.4 – Influência das incrustações



Incrustações são sais depositadas nas paredes dos tubos do vaporizador na lado da água. Carbonatos e silicatos de Ca e Mg. Quanto maior a pressão, cai a solubilidade dos sais e há deposição nas paredes dos tubos. No lado dos gases há deposição de fuligem e cinzas.

Fig 35

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_g} + \frac{e_f}{K_f} + \frac{e}{K} + \frac{e_i}{K_i} + \frac{1}{h_a} \Rightarrow \text{coef. global p/ tubo sujo}$$

Conseqüências:

- redução na produção de vapor: $m_v = Q / (h_v - h_1)$

$$Q = U S \Delta T$$

- Diminui o rendimento do GV: devido aumento da temperatura na chaminé e consequentemente aumento da perda P_6

$$p_6 = \frac{(AC + 1 - z)C_{pg}(t_g - t_a)}{PCI} \quad \eta = 1 - \sum_{i=1}^6 p_i$$

- Aumenta consumo de combustível para manter produção

$$\dot{m}_{cb} = \frac{\dot{m}_v(h_{\text{vapor}} - h_1)}{\eta PCI}$$

- Possibilidades de explosão – aço e incrustações tem coeficientes de dilatação diferentes e sob variações de temperatura surgem trincas por onde a água pode entrar, vaporizar e superaquecer, causando superaquecimento da parede e rompimento (“golpe de fogo”). Ocorre em aquotubulares (pressão interna).

3.10 - Superaquecedores de Vapor:

3.10.1 - Finalidade

É um trocador de calor de feixes tubulares destinado a superaquecer o vapor proveniente do vaporizador.

Vapor superaquecido:

- para turbinas e máquinas a vapor
- processos a altas temperaturas.

Para temperaturas moderadas em processo prefere-se vapor saturado, para manter temperatura constante.

Desvantagens: maior custo, complexibilidade de operação, perdas de carga.

3.10.2 - Temperatura de superaquecimento

Pressão (atm)	TS (°C)	TSAQ (°C)
10 – 20	180 – 212	325 – 375
30 – 50	234 – 264	400 – 500
50 – 100	264 – 311	450 – 550
100 – 200	311 – 366	500 – 600

Grau de superaquecimento: $\Delta t_{\text{saq}} \cong 150$ a 250 °C

3.10.3 - Classificação

- Radiantes – troca de calor por irradiação (expostos à chama da fornalha)
- Convectivos – troca de calor por convecção (e radiação gasosa)

Os radiantes (para temperaturas de superaquecimento mais altas) são colocadas no topo da fornalha.

3.10.4 - Materiais

Até 420 °C – aço carbono ($p < 50 \text{ atm}$)

420 – 520 °C - aço carbono-molibdênio ou aço liga Cr-Mo

> 520 °C – aço inox Cr-Ni

suportes e espaçadores estão sujeitos a temperaturas mais altas $\Rightarrow$ aço inox

diâmetros: 25 – 65 mm, velocidade: 12 – 20 m/s (vapor)

3.10.5 - Controle da temperatura do vapor

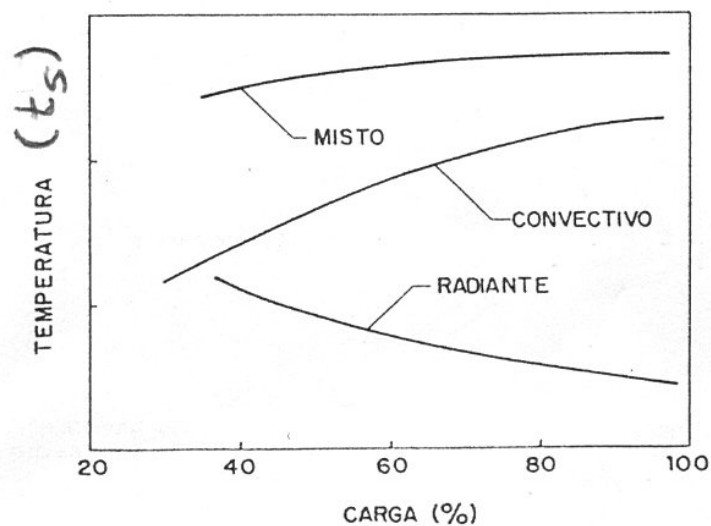
Por desviadores de gases (" dampers "): pouco precisos

Por atemperadores (mais usado) : ver figura na página seguinte

Resfriam do VSAQ no balão de água (flamatubulares)

Uso de um queimador prox ao superaquec.

Superaquecedor misto (parte convectiva mais parte radiante)



Comportamento dos superaquecedores, em função da variação de carga nas caldeiras.

Com o aumento da produção, o fluxo de calor por convecção aumenta em proporção maior que a descarga de vapor (superaq. convectivo); mas a temperatura da fornalha praticamente não varia: fluxo por irradiação quase constante (superaq. radiante) $\rightarrow$ Com a combinação dos dois tipos a temperatura de superaquecimento será quase constante.

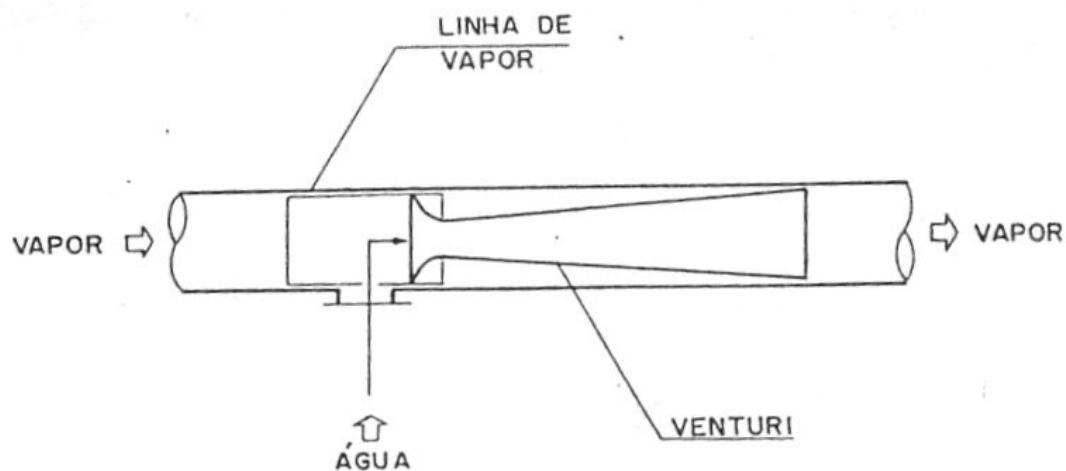
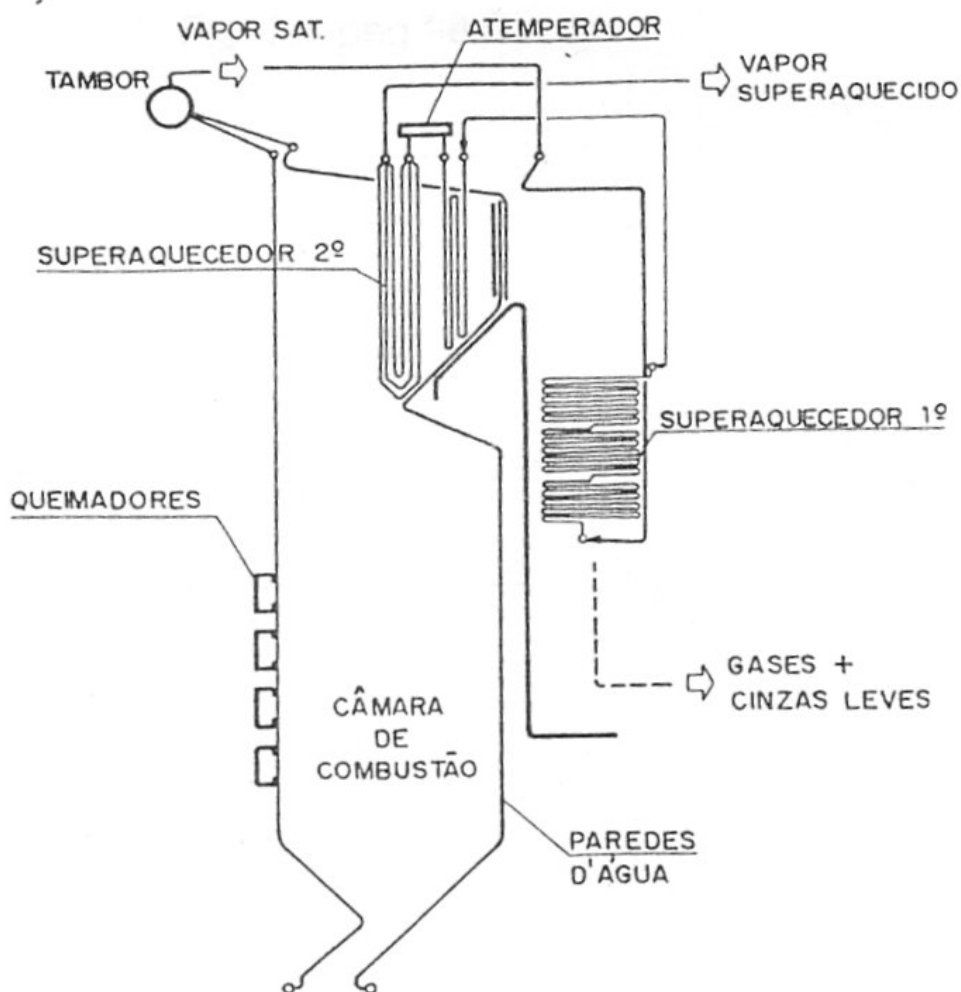


Fig 7.4- Esquema de um atemperador



Unidade geradora de vapor adaptada com superaquecedores e atemperador.

3.11 - Economizador

São trocadores de calor convectivos destinados a elevar a temperatura da água de alimentação do GV, aproveitando o calor dos gases de combustão.

3.11.1 - Finalidades

- aumentar rendimento do GV
- vaporização mais rápida (no vaporizador)
- parte mais dissolvidos (incrustações) são retidos no economizador.

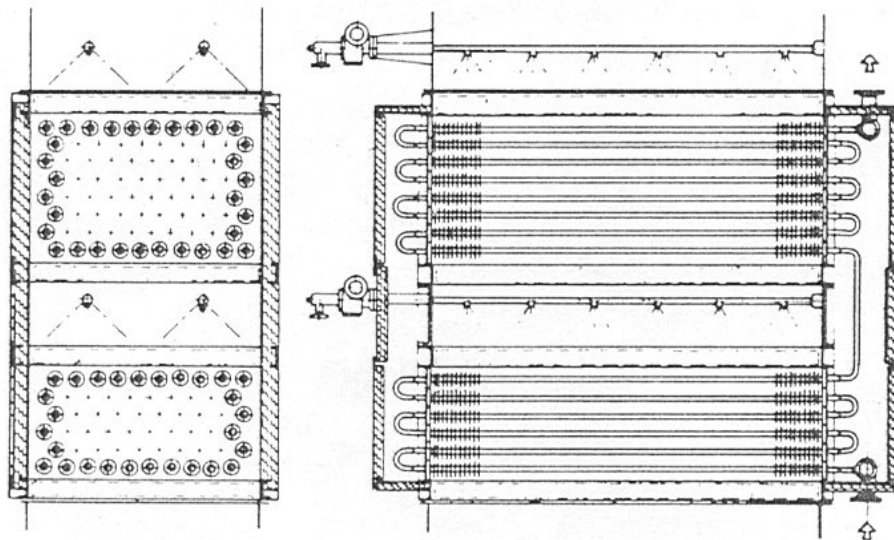
Desvantagens: custo adicional, espaço ocupado, perdas de carga.

Normalmente são instalados depois dos superaquecedor ou do vaporizador e antes do aquecedor de ar. Em geral são tubos de aço carbono com $d = 40 - 80 \text{ mm}$. $F^o F^o$ pode ser usado para pressões até 30 bar e resistem melhor à corrosão.

3.11.2 - Tipos

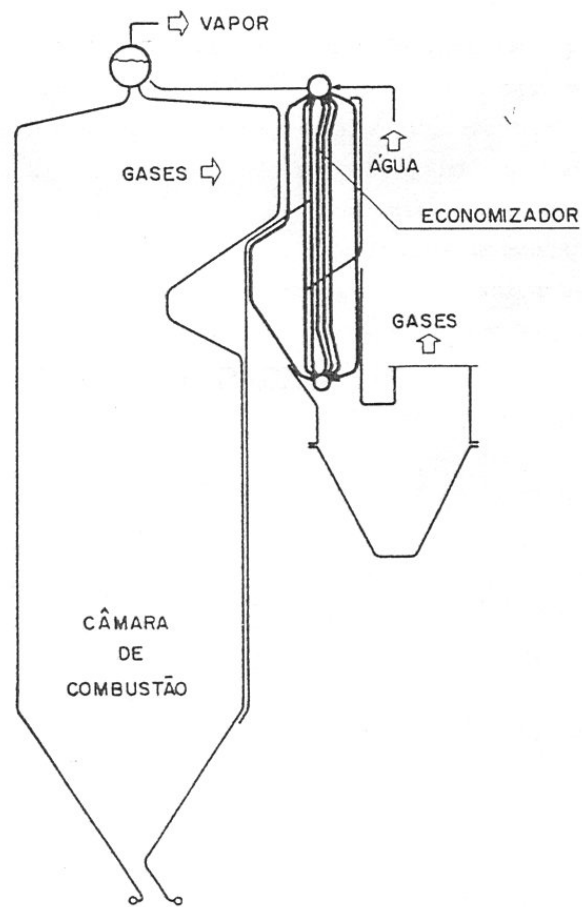
- Transversal

(Tubos com ou sem aletas)



Economizador Integral de Tubos de Aço Aletados. No Exemplo se Identificam os Tubos Sopradores de Fuligem

- Longitudinal



Economizador de duplo tambor

Cuidado: presença eventual de SO_2 nas partes frias do economizador.

Em geral para $p < 15$ bar tanto aquo como flamotubulares dispensam economizador, pois é possível obter-se temperatura de saída na chaminé entre $240 - 280$ °C. ($t_v = 198^\circ\text{C}$, $p = 15$ bar).

3.12 - Aquecedor de ar

Trocador de calor convectivo para pré-aquecer o ar de combustão aproveitando energia residual dos gases de combustão antes de saírem do GV.

3.12.1 - Vantagens / desvantagens

- Aumento do rendimento do GV, diminui consumo (5 – 10%)
- Melhor combustão (maior t_c)
- Possibilita maior carga de combustível na grelha e carga térmica na fornalha
- Possibilita uso de combustíveis com alta umidade e/ou baixo PCI
- São instalados no final do trajeto dos gases, antes da chaminé

Desvantagens:

- Custo adicional
- Espaço ocupado grande
- Manutenção / limpeza
- Perdas de carga (requer ventilador de insuflamento)

3.12.2 - Tipos

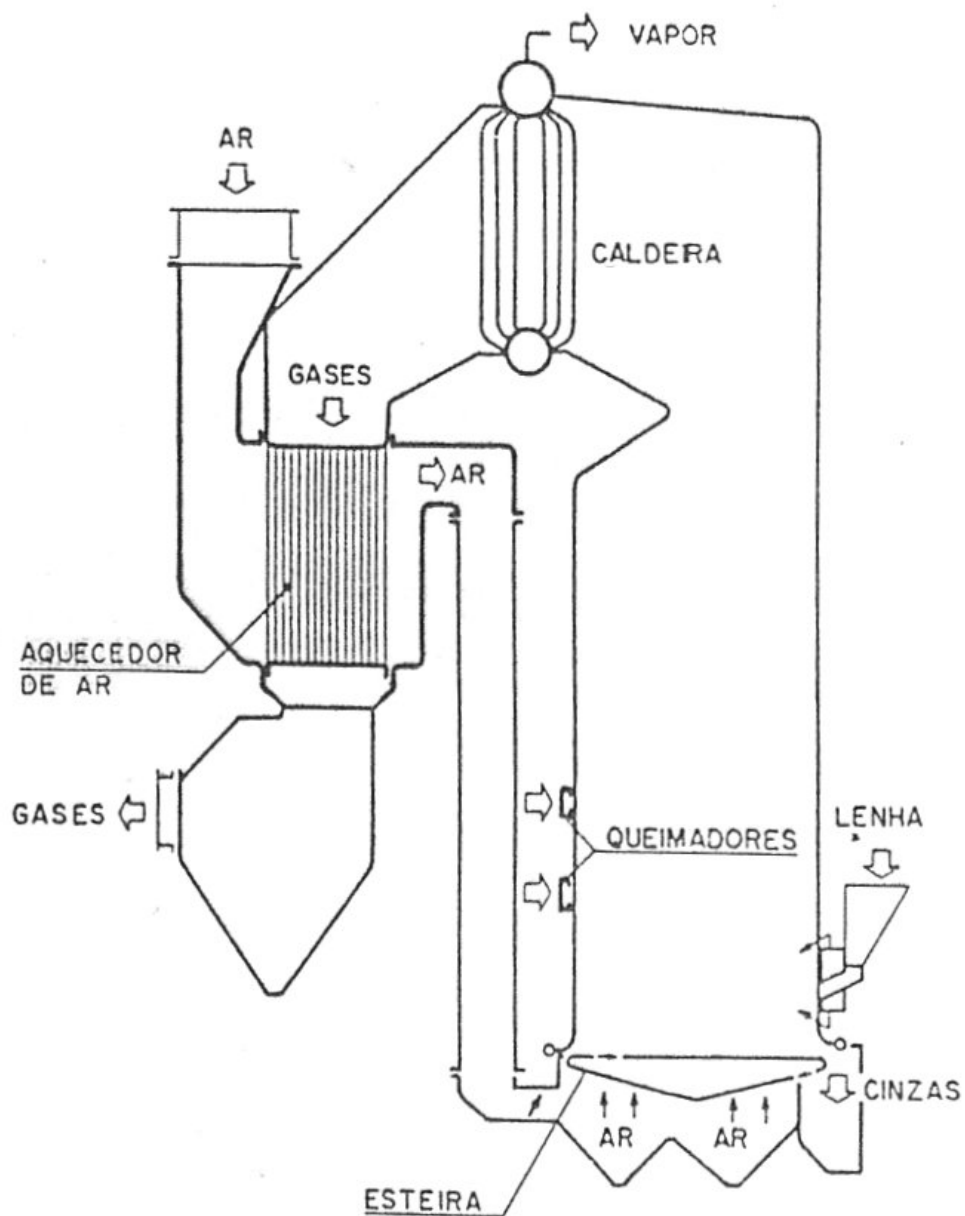
Recuperativos: Transferencia de calor direta como em um trocador convectivo comum (ar por dentro dos tubos). Tubos em aço C ou F^oF^o .

diâmetro = 40 – 100 mm

capacidade: 40.000 – 70.000 kcal / h m³

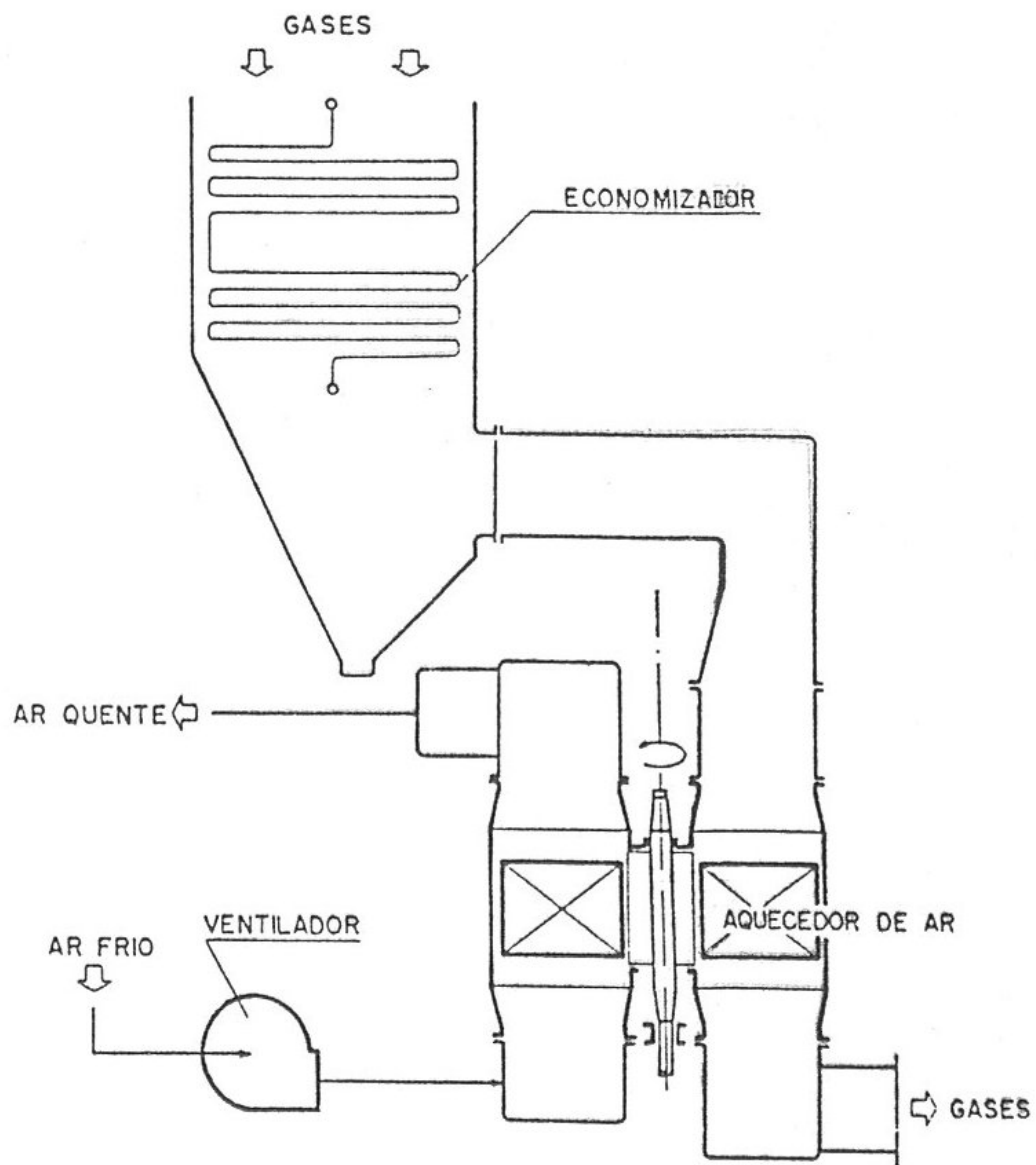
Regenerativos: Transferencia indireta, através de um rotor metálico de placas corrugadas (2 – 4 RPM). As placas são montadas em módulos no rotor para facilitar a manutenção. Usa selos para minimizar fugas.

Capacidade: até 150.000 kcal /h m³ (mais compactos que os recuperativos convencionais)



Aquecedor de ar tubular (recuperativo)

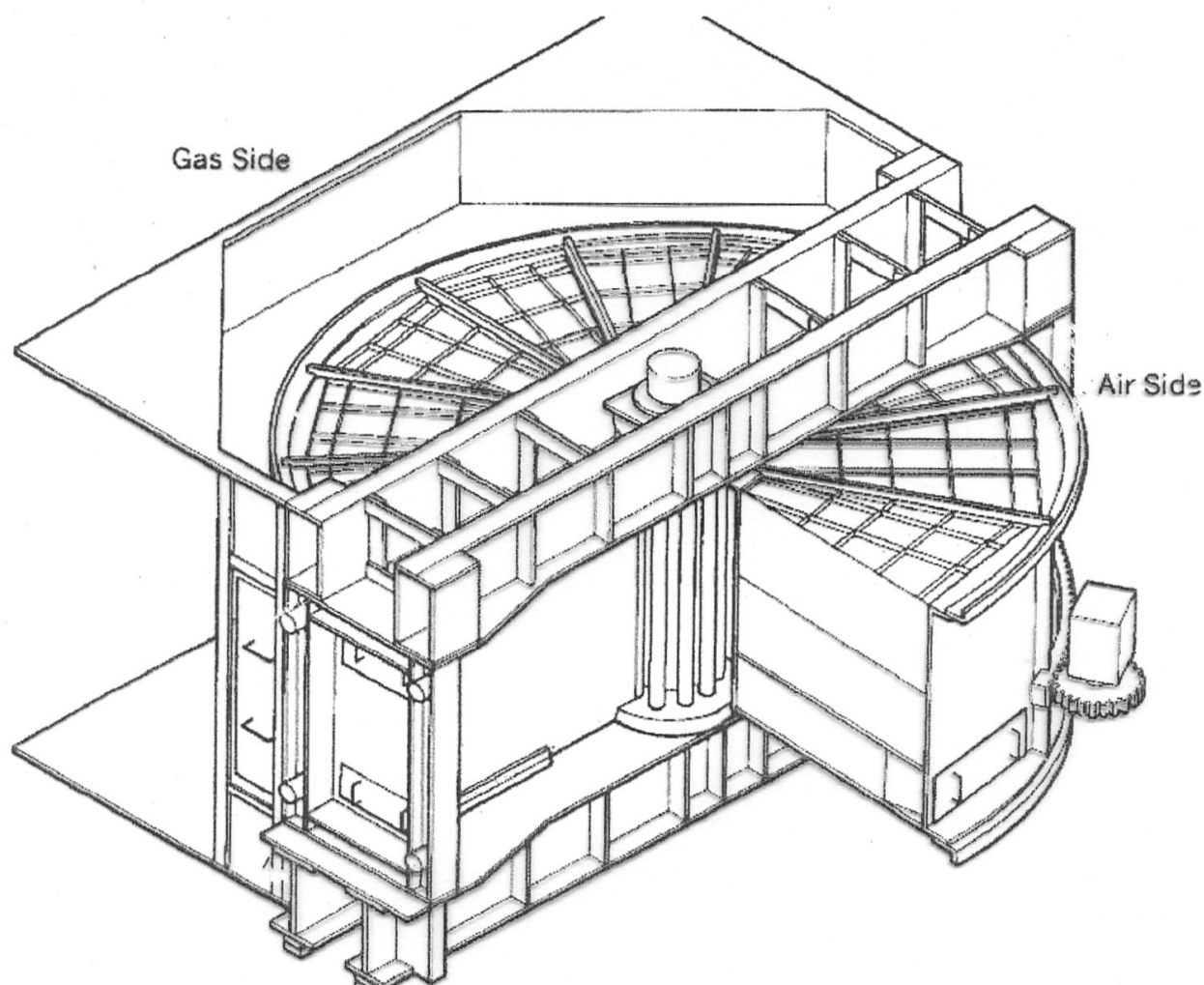
Aquecedor de ar tipo recuperativo (feixe tubular convencional)



Aquecedor de ar rotativo (regenerativo)

Aquecedor de ar tipo regenerativo (rotativo)

AQUECEDOR DE AR TIPO REGENERATIVO



Aquecedor de ar tipo regenerativo (rotativo)

3.12.3 - Temperatura de aquecimento

Em função do combustível, instalação e fornalha.

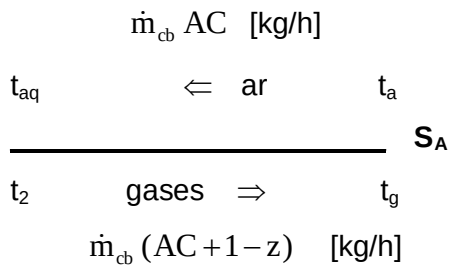
Ex: carvão pulverizado e óleo: 150 – 320 °C

O pré aquecimento só não é essencial em unidades de pequeno porte.

3.12.4 – Cuidados

Corrosão pode ocorrer quando a temperatura do metal é inferior a 120 °C, no caso do óleo combustível, ou 80 °C, para carvão pulverizado. Há combinação química da umidade com SO_3 formando H_2SO_4 que provoca rápida corrosão do metal. A acumulação de cinzas tende a agravar o problema, criando isolamento térmico e acelerando a corrosão.

3.12.5 – Dimensionamento



a) Calor necessário para aquecer ar (calor sensível)

$$Q_A = \dot{m}_{cb} (AC + 1 - z) c_{par} (t_{aq} - t_a) \quad [\text{kcal/h}] \quad (1)$$

b) Calor cedido pelos gases (calor sensível)

$$Q_A = \dot{m}_{cb} (AC + 1 - z) c_{pg} (t_2 - t_g) (1 - \Psi_A) \quad [\text{kcal/h}] \quad (2)$$

Ψ_A = perdas de calor no aquecedor de ar ($\cong 5\%$)

c) Calor trocado por convecção

$$Q_A = U S_A \Delta t_l \quad [\text{kcal/h}] \quad (3)$$

$$\Delta t_l = \frac{(t_2 - t_{aq}) - (t_g - t_a)}{\ln \frac{t_2 - t_{aq}}{t_g - t_a}}$$

Temperatura de saída dos gases: $t_g = 150$ a 180°C

Aumento de rendimento do GV: ≈ 5 a 8% rendimento a cada 100°C de queda na temperatura dos gases.

Temperatura de aquecimento do ar:

Carvão, lenha alimentação manual: $120 - 130^\circ\text{C}$

Carvão, lenha alimentação mecânica: $150 - 170^\circ\text{C}$

Óleo, carvão, pulverizado: $180 - 260^\circ\text{C}$

Sequências possíveis de cálculo: explicado no quadro

Valores para referência:

$U_A = 10 - 14 \text{ kcal/m}^2\text{h } ^\circ\text{C}$ para $C_g = C_{ar} \cong 5 - 7 \text{ m/s}$

$U_A = 25 - 30 \text{ kcal/m}^2\text{h } ^\circ\text{C}$ para $C_g = C_{ar} \cong 8 - 12 \text{ m/s}$

Seqüência de cálculo de temperaturas, calores trocados e superfície dos trocadores de calor do GV:

Remi B. Silva – cap. 14 (final). Seqüência completa – caps. 3, 5, 14, 17 (final dos caps.)

3.13 - Causas de explosões em GV

CAUSA DA EXPLOSÃO	DESCRIÇÃO	PROVIDENCIAS PARA EVITAR EXPLOSÕES
1. Falta ou baixo nível de água	Aumento da temperatura dos tubos na superfície de vaporização com rompimento.	• controle automático do nível da água • atenção do operador • alarme de nível mínimo (pouco abaixo do nível do tubulão)
2. Falha na válvula de segurança	Excesso de pressão provocando ruptura dos tubos (ou do corpo, no caso de flamotubular)	• 2 válvulas de segurança • manutenção das válvulas • teste de funcionamento periódico (acionar manualmente a descarga)
3. Incrustações (sais dissolvidos na água que aderem aos tubos)	Superaquecimento localizado dos tubos, diminuição de resistência e ruptura	• Tratamento da água
4. Circulação insuficiente de água nos tubos devido a incrustações e/ou lodo	Superaquecimento localizado dos tubos, diminuição de resistência e ruptura	• Descarga (drenagem) de fundo da caldeira para expulsar o lodo acumulado • Filtragem da água
5. Explosão por queima de gases combustíveis acumulados na fornalha	Com a caldeira desligada, um vazamento de combustível enche a fornalha de gases combustíveis. Quando a fornalha é ligada ocorre a explosão	• Ventilação automática da caldeira para expulsar possíveis gases acumulados antes de dar a partida na fornalha

3.14 - Tratamento da água de alimentação

3.14.1 - Generalidades

Fontes de água: rede de distribuição municipal, rio lago, poço artesiano.

Classificação das impurezas:

- a) **Sólidos dissolvidos** – sais (carbonatos ,sulfatos, silicatos) que provocam incrustações.
- b) **Sólidos em suspensão** – lodo, areia argila, matéria orgânica (colóides) que provocam entupimento.
- c) **Líquidos insolúveis** – óleos, gorduras, graxas, sabões que formam espuma e conseqüente arraste de água.
- d) **Gases dissolvidos** – inertes (N_2) ou agressivos (O_2 , CO_2 , SO_2) que provocam corrosão em juntos tensionados e a alta pressão.

3.14.2 - Tratamento

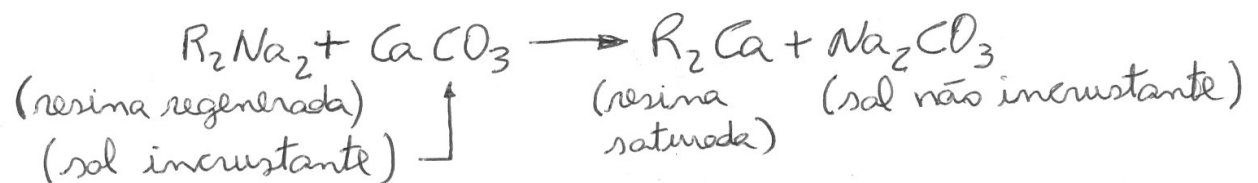
Antes do tratamento propriamente dito é necessário fazer-se a análise da água para se determinar entre outras coisas:

- a) dureza (concentração de carbonatos ,sulfatos, silicatos e cloretos de cálcio) mg/l ou grau de dureza.
- b) pH
- c) Alcalinidade – presença de ions de sais (bicarbonatos carbonatos ,sulfatos, silicatos, didroxidos, fosfatos, etc.)
- d) Cloretos, fosfatos, sólidos totais, matéria orgânica (causa corrosão no superaquecedor)
- e) Concentração de O_2 livre e gases dissolvidos
- f) Sílica (provoca incrustações difíceis de remover)

Após a análise pode-se determinar a forma de tratamento, que pode ser do tipo externo, interno ou combinado, bem como os processos e teores de produtos químicos necessários.

3.14.3 - Tratamentos Externos

- a) **Clarificação** – para remoção dos sólidos em suspensão. Compostos de alumínio promovem a coagulação e conseqüente decantação.
- b) **Filtração** – após a clarificação, para remover partículas menores que não decantam.
- c) **Redução de sais** – diminuir a dureza, que é a concentração de sais incrustantes.
 - **Abrandamento**: para reduzir os sais de Ca e Mg, que são substituídos para Na da resina zeolita (que é natural) ou resinas sintéticas. Normalmente são duas colunas (uma em funcionamento e outra em regeneração por NaCl). Não retem silicatos. A determinação da freqüência de regeneração é feita através da análise da água da resina ou por estatística.



- **Desmineralização:** retem todos os tipos de íons e também é feita através de resinas sintéticas. São duas colunas, a primeira para os cátions e a segunda para os ânions. Para caldeiras de alta pressão (> 30 bar). Regeneradores: H_2SO_4 e $NaCl$.

A destilação também elimina todos os sais das águas naturais mas é muito dispendioso.

d) **Filtragem com carvão ativo:** para reter líquidos insolúveis.

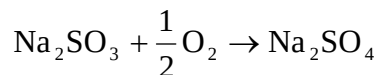
e) **Desgaseificação (desaeração)** – eliminação dos gases dissolvidos. Por aquecimento a pressão atmosférica ou levemente pressurizado. Devido à diminuição da solubilidade, ocorre o desprendimento de O_2 , CO_2 e outros gases. O desaerador (tanque de desgaseificação) deve ficar bem acima da bomba de alimentação da caldeira para evitar cavitação, já que a água está próxima do ponto de ebulição.

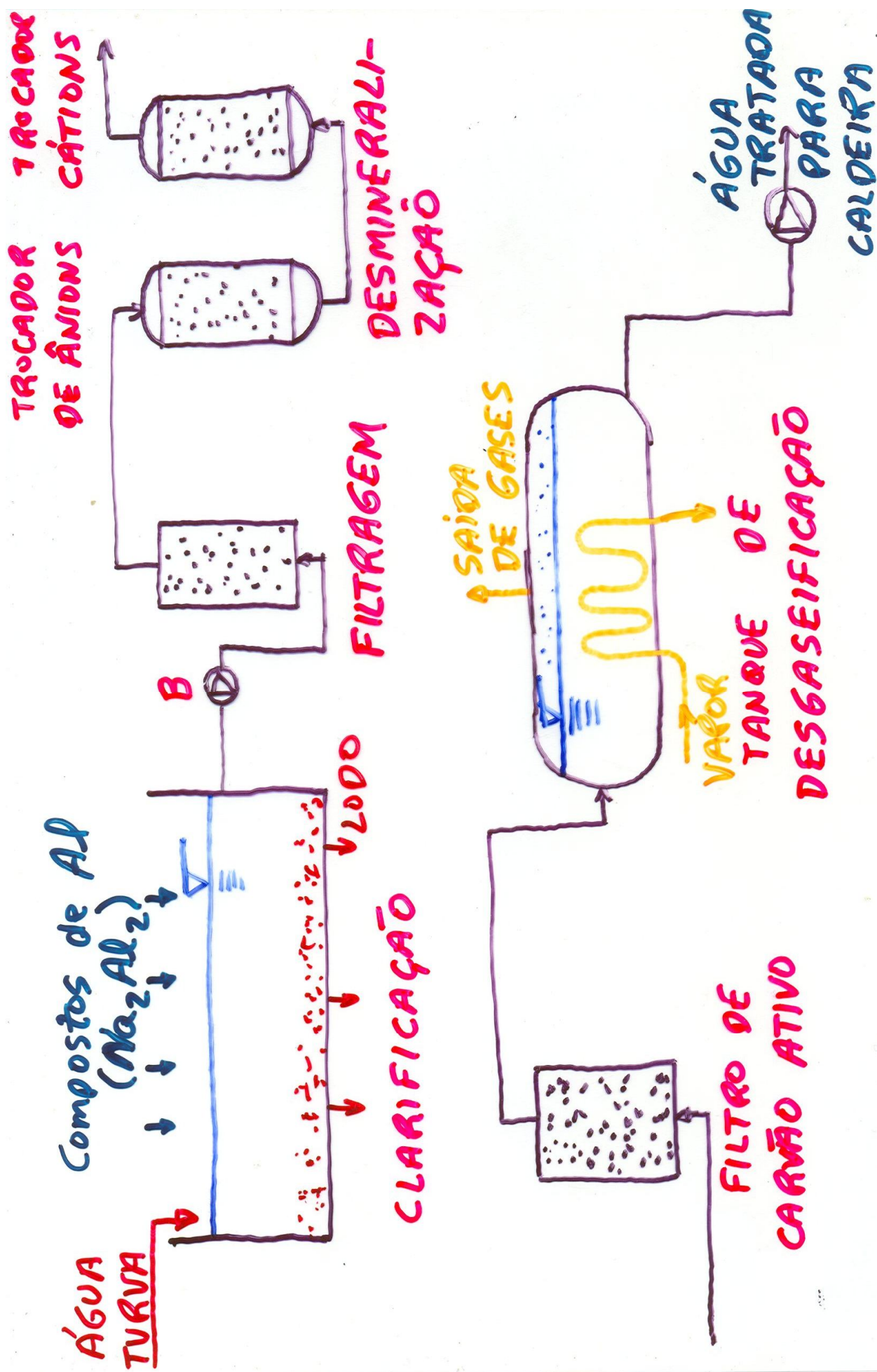
3.14.4 - Tratamento Interno

Para águas de baixa dureza e não turvas (sem sólidos em suspensão). São adicionados produtos químicos que reagem no interior da caldeira. Baseados geralmente no trifosfato de sódio. A adição dos químicos pode ser feita no tanque de água ou na tubulação de sucção da bomba de alimentação por um dosador contínuo.

As reações que ocorrem dentro da caldeira precipitam os sais de Cálcio em forma não aderente, formando um lodo que se acumula na partes inferiores do vaporizador e podem ser removido pela drenagem de fundo periodicamente (descarga de fundo da caldeira).

No caso de haver bastante oxigênio dissolvido, usa-se o sulfito de sódio.





3.17 - Acessórios dos geradores de vapor

(Fig 47)

Válvula principal de saída de vapor- globo ou gaveta, usada na partida e na parada.

Válvulas de segurança – de mola ou contrapeso, com dimensões adequadas com o tamanho da GV, 2 ao menos, checados periodicamente. Abrem a 110% da pressão de trabalho.

Válvula de retenção – impede o fluxo de retorno para a bomba.

Válvula de descarga (drenagem) – para eliminar lodo das partes baixas. Normalmente é de abertura rápida para não descarregar muita água. A frequência de abertura depende da qualidade da água.

Válvula de controle do nível de água – comandada por sensor no balão de vapor para regular a vazão da bomba.

Corpo de nível com indicador – com vidro para observação e um sistema de controle de nível (para eletrodos ou bóia).

Manômetro e pressostato – para verificação e controle da pressão de operação.

Sopradores de fuligem – para aquotubulares. Podem ser fixos ou retrateis (para regiões próximos a fornalha).

Válvula para vapor de serviço – tipo, $\cong 10\%$ da área da válvula principal. Para bombas de alimentação, injetores, aquecimento de óleo.

Válvula de escape de ar – tipo globo, para entrada/sida de ar em paradas/partidas, $\phi \frac{3}{4}'' 1''$.

Instrumentação de controle: medidores, indicadores, controles e registradores de vazão e temperaturas de água, vapor, combustível e ar.

Idem para pressão da água, do vapor e do óleo.

Registrador do nível de água.

3.18 - Operação, manutenção e inspeção dos GV's

Na operação e manutenção regular deve-se seguir as orientações do manual do fabricante. Quanto à inspeção, esta é obrigatória por lei, devendo ser no mínimo anual ou toda vez que o GV sofrer modificação ou manutenção no sistema pressurizado. Deve ser feita por engenheiro ou empresa credenciada pelo Ministério do Trabalho. Envolve as seguintes etapas:

- exame de registros (livro de ocorrências)
- exame externo (em funcionamento)
- exame interno
- fixação da pressão máxima de trabalho
- teste hidrostático de pressão (a frio, 50% acima da pressão de trabalho)
- prova das válvulas de segurança (em operação)
- prova do sistema de alimentação de água

3.15 - Tiragem de gases

3.15.1 Conceitos, classificação

A movimentação do ar e gases é garantida pela ação de ventiladores centrífugos, associada ao efeito de sucção da chaminé.

Tiragem natural: fornalha em depressão. Restrito a caldeiras pequenas com pequenas perdas de carga.

Tiragem artificial ou mecânica: ação combinada de ventiladores e chaminé.

Pode ser:

- **Forçada:** um ou mais ventiladores. Pressão positiva na fornalha.

Induzida: exaustor imediatamente antes da chaminé. Fornalha em depressão. Não garante um controle adequado da pressão interna e uma distribuição regular do ar na fornalha.

Balanceada: um ou mais ventiladores e exaustores. Permite um controle da distribuição do ar de combustão.

3.15.2 Perdas de carga:

Resumo das perdas:

Δp_1 = perda de carga nos dutos de ar (retas, curvas, registros)

Δp_2 = perda de carga no aquecedor de ar (lado do ar)

Δp_3 = perda de carga na fornalha.

Δp_4 = perda de carga na superfície de vaporização.

Δp_5 = perda de carga no superaquecedor

Δp_6 = perda de carga no economizador.

Δp_7 = perda de carga no aquecedor de ar (lado dos gases)

Δp_8 = perda de carga nos dutos dos gases.

Δp_9 = perda de carga na chaminé.

Fig. : variação da pressão estática (pg Seg)

Tiragem mecânica forçada ou induzida:

$$H = \sum \Delta p$$

Tiragem mecânica balanceada:

Ventilador: $H_1 = \Delta p_1 + \Delta p_2 + \Delta p_3$

Exaustor: $H_2 = \Delta p_4 + \Delta p_5 + \dots + \Delta p_9$

Para o dimensionamento dos ventiladores:

Vazão: $V = (1,1 \text{ a } 1,2) \text{ Var}$

Pressão: $H = (1,2 \text{ a } 1,3) H_{\text{calculado}}$

Determinação das perdas:

Forma geral: $\Delta p = k \rho v^2/2$

Δp = perda de carga (mm CA, Pa)

ρ = massa específica (hg/ m³)

v = velocidade (m/s)

k = coef. De perda de carga (depende da geometria do componente)

ex: duto reto de secção constante

$$k = f L / d_h$$

f = fator de atrito experimental, depende da rugosidade relativa e do **Re** . $f = (0,01 - 0,03)$

L = comprimento (m)

Fig 43

Variação da pressão estática com tiragem balanceada

K para outras geometrias: {Edson Bazzo cap 11

Idel'cik , J. E. Memento des pertes da Charge, Ed, Paris, 1969

3.15.3 Chaminé

Depressão gerada pela chaminé:

$$\Delta p_c = H_u (\rho_{ar} - \rho_{gases}) g \quad [1 \text{ mm CA} = 10 \text{ Pa}]$$

H_u (altura útil da chaminé H_u medida a partir do nível dos queimadores ou da grelha) [m]

ρ_{ar} = massa específica do ar na temperatura ambiente [kg/m³]

ρ_{gases} = massa específica dos gases na temperatura média dos gases na chaminé [kg/m³]

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

Redução da temperatura dos gases na chaminé.

$$T_g = t_1 - 0,2 H_u \quad [^\circ\text{C}]$$

H_u [m]

Velocidades recomendadas na chaminé: C_g

Tiragem natural: 4 – 8 m/s

Tiragem mecânica: 6 – 12 m/s

Adotar tiragem mecânica quando a relação

$$H_u = \frac{\sum \Delta p}{g(\rho_{ar} - \rho_g)} \quad \frac{H_u}{d} > 30 \text{ (recomendado)}$$

d = diâmetro da chaminé

Calculo do diâmetro:

$$\frac{B(L+1)v_g}{3600} = \frac{\pi d^2}{4} C_g \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

v_g = volume específico dos gases na temperatura média da chaminé $[\text{m}^3/\text{kg}]$ ($p_g v_g = R_g T_g$)

3.15.4 Ventiladores/ exaustores:

potência requerida:

$$N = \frac{v_g H}{75\eta} \quad [\text{CV}]$$

V_g = vazão volumétrica de gases $[\text{m}^3/\text{s}]$

H = diferencial de pressão $[\text{mmCA}]$

η = rendimento (65 – 75 % p/ centrífugos)

Modificação da vazão:

Introdução de perdas de carga adicionais (válvulas de controle de vazão, “dampers”).

Variação da rotação (redutores, acoplamento magnético/ hidráulico, motor de CC, turbina a vapor com velocidade variável.)

3.16 - Aparelhos de alimentação de água

3.16.1 Generalidades:

Pressão de alimentação:

Pressão de operação do GV

Perdas de carga na tubulação

Perdas de carga no economizador

Margem de segurança – 20 a 30 %

Vazão: $V = (1,2 \text{ a } 1,3) D$ para funcionamento contínuo.

$V = (1,3 \text{ a } 1,5) D$ para funcionamento descontínuo.

3.16.2 Tipos de aparelhos

Injetores de vapor – p/ baixas pressões e vazões, caldeira flamotubulares pequenas.

Bombas alternativas de embolo. Acionadas para motor elétrico ou a vapor. Até 50 ton/h e 20 bar.

Bombas centrifugas. . Acionadas por motor diesel, elétrico ou turbina a vapor. Único estagio para pressão até 10 bar.

Importante: Ter ao menos 2 aparelhos de alimentação.