

# Geração e distribuição de vapor

Equações de Balanço Aplicadas a  
Geradores de Vapor

# Introdução

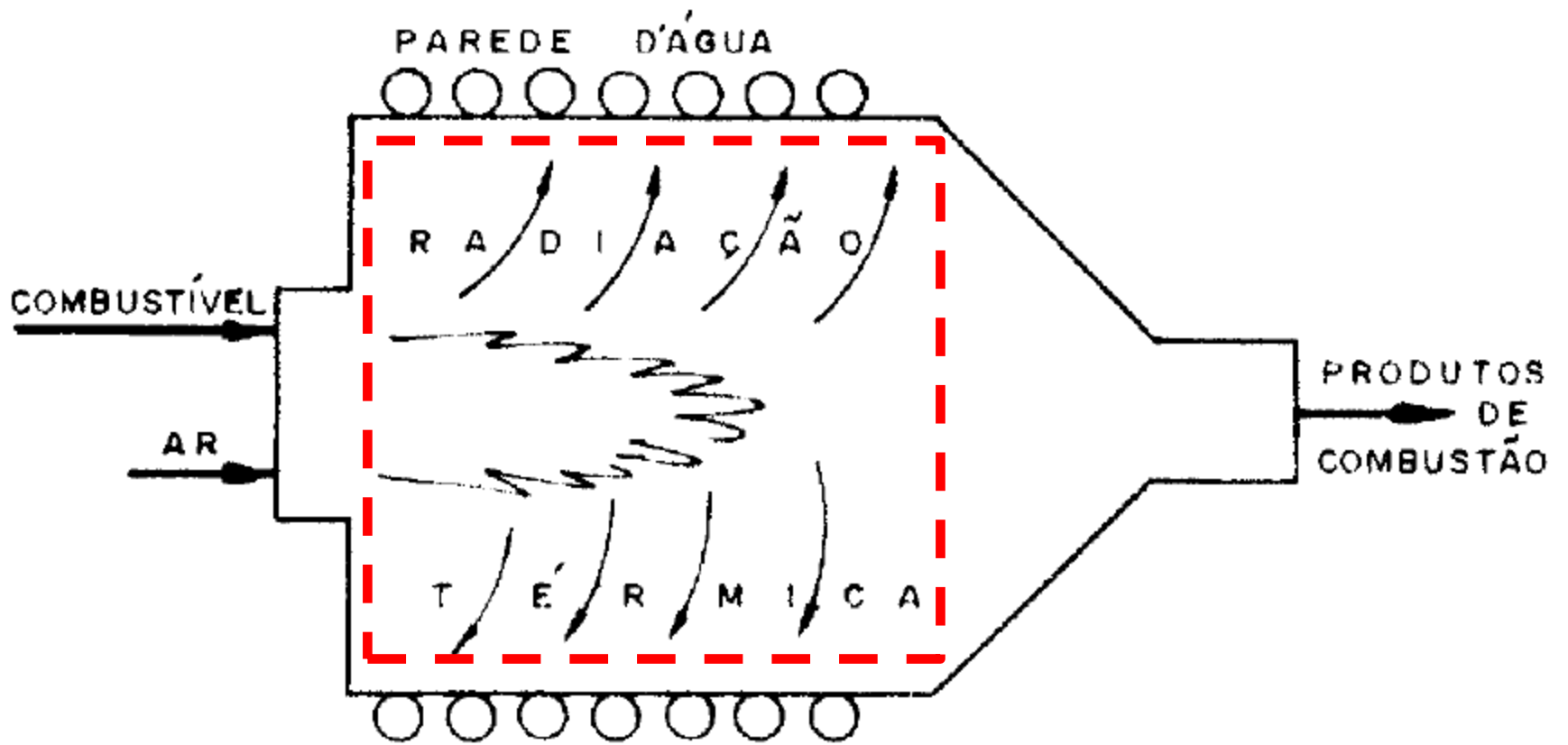
- Transformações de energia em um GV envolvem:
  - Combustão (ou então reação nuclear)
  - Transf. Calor por convecção, condução e radiação
- Problema: dependem de muitos parâmetros
  - Necessário conhecimento do escoamento dos fluidos
  - Dependem de detalhes construtivos
    - Geometria, materiais empregados, etc.
- Nem sempre todos estes parâmetros são conhecidos
  - Erro em cálculos termodinâmicos podem ser grandes

# Introdução

- Faremos aqui balanço de energia simplificado da caldeira
  - Um balanço para cada parte
    - Seção de radiação
    - Seção de convecção
  - Para estimativas iniciais

# Seção de radiação

- Região mais próxima da fornalha
- Transf. Calor principalmente por radiação
  - Da chama para os tubos
  - $\dot{Q}_{rad} \gg \dot{Q}_{conv}$
- Seja um VC englobando os gases nesta região
  - Hipóteses:
    - RP, PUF,  $\Delta KE = \Delta PE = 0$
    - Ar e gases exaustão são gases ideais
    - Isolado da vizinhança  $\dot{Q}_{viz} = 0$
    - $T_c = T_a = T_{amb}$  (na entrada)
    - $T_g = \text{Temp. média na seção}$



# Seção de radiação

- Aplicando a primeira lei para tal VC

$$\dot{m}_c PCI + \dot{m}_c h_c + \dot{m}_a h_a = \dot{Q}_R + \dot{m}_g h_g$$

- Onde, para gás ideal

$$h = h(t) = \int_{T_{ref}}^T c_p dT = c_{p,avg} (T - T_{ref})$$

- Conservação da massa

$$\dot{m}_c + \dot{m}_a = \dot{m}_g$$

## Seção de radiação

- Se  $T_c \approx T_{ref} \Rightarrow h_c \ll PCI$

- Se  $c_{p,a} \approx c_{p,g} \approx c_p$

$$\dot{m}_c PCI = \dot{Q}_R + \dot{m}_g c_p (T_g - T_a) + \dot{m}_c c_p (T_a - T_{ref})$$

- Se conhecermos  $T_g$ ,  $T_a$  e vazões, determina-se  $\dot{Q}_R$

- Se conhecermos  $\dot{Q}_R$ ,  $T_a$  e vazões, determina-se  $T_g$

- Se conhecermos  $\dot{Q}_R$ ,  $T_a$  e  $T_g$ , determina-se vazões

- Como estimar  $\dot{Q}_R$ ?

# Seção de radiação

- $\dot{Q}_R \Rightarrow$  Lei de Stefan-Boltzmann

$$\dot{Q}_R = \sigma \varepsilon A (T_{ch}^4 - T_s^4)$$

- Onde:

- $T_s$  = temp. superfície

- $T_{ch}$  = temp. fonte calor

- $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$  = cte de Stefan-Boltzmann

- $A$  = área de troca de calor por radiação (leva em conta o fator de forma)

- $\varepsilon$  = emissividade combinada chama-fornalha



# Seção de convecção

- Região mais afastada da fornalha
- Superfícies não têm “contato geométrico” com a chama da fornalha
- Transferência de calor principalmente por convecção
  - Dos gases para a água
  - $\dot{Q}_{rad} \ll \dot{Q}_{conv}$
- $\dot{Q}_{conv}$  depende
  - Da geometria
  - Do escoamento dos fluidos (gases e água)
- Correlações semi-empíricas devem ser utilizadas

# Seção de convecção

- Para caldeiras Flamotubulares com  $Re > 2300$ :

$$\overline{Nu} = 0,023Re^{0,8}Pr^{0,4}$$

- Onde

$$- \overline{Nu} = \frac{\bar{h}d}{k}$$

$$- Re = \frac{\rho U d}{\mu}$$

$$- Pr = \frac{\nu}{\alpha}$$

# Seção de convecção

- Para caldeiras Aquatubulares, com tubos alinhados e  $Re > 2300$ :

$$\overline{Nu} = 0,26Re^{0,61}Pr^{0,17}$$

- Onde

$$- \overline{Nu} = \frac{\bar{h}d}{k}$$

$$- Re = \frac{\rho U d}{\mu}$$

$$- Pr = \frac{\nu}{\alpha}$$

# Seção de convecção

- Estes são apenas alguns exemplos
  - Para cada caldeira haverá uma correlação mais adequada
- Estimando-se o coeficiente de transferência de calor  $\bar{h}$ ,  $\dot{Q}_C$  pode ser estimado

$$\dot{Q}_C = \bar{h}A\Delta T$$

# Eficiência de um GV

- Energia inicial é transformada em vapor
  - Em geral, energia inicial é a energia química contida no combustível
  - Este é o caso que será visto neste curso
- Eficiência Térmica (rendimento)
  - Medida de quão eficiente a transferência combustível -> energia térmica é
  - Pode ser definida como a razão entre energia útil e energia consumida

# Eficiência de um GV

- Para GV considera-se
  - Energia útil =  $\Delta h$  fluido (água)
  - Energia consumida => combustível + outras fontes de energia suplementares
- Considerando apenas a energia química contida no combustível:

$$\eta_g = \frac{\dot{m}_v(h_v - h_l)}{\dot{m}_c PCS}$$

- Onde:
  - v => vapor
  - l => líquido
  - c => combustível

# Eficiência de um GV

- OBS: para o cálculo do rendimento foi considerado o PCS pois é a energia máxima que poderia ser extraída do combustível
- Um sistema completo de geração de vapor pode incluir diversos acessórios:
  - Bombas de alimentação de água
  - Pulverizadores
  - Ventiladores
  - Exaustores
  - Etc.
- Isto significa um aporte adicional de energia
  - Deve ser considerado no rendimento

# Eficiência de um GV : Método Direto

- Considerando este aporte como  $\dot{W}_{outros}$

$$\eta_g = \frac{\dot{m}_v(h_v - h_l)}{\dot{m}_c PCS + \dot{W}_{outros}}$$

- Este é o método direto
  - Fornece  $\eta_g$  pela eq. anterior
  - Devemos medir vazões, temperaturas, pressões e conhecer o PCS do combustível



# Eficiência de um GV : Método Indireto

- Há outra forma de se obter  $\eta_g$ :
  - Estimando-se as perdas
- Este é o método indireto
  - Primeira lei aplicada ao GV
  - $E_{\text{útil}} = E_{\text{consumida}} - \sum \text{Perdas}$

- E assim:

$$\eta_g = \frac{E_{\text{consumida}} - \sum \text{Perdas}}{E_{\text{consumida}}}$$

- Algumas das principais perdas são avaliadas no que segue

# Perdas

- Perda por combustível não queimado nas cinzas e calor sensível das cinzas (para combustíveis sólidos)

$$\dot{P}_1 = \frac{m_z W PCI + m_z c_{p,z} (T_z - T_{ref})}{\Delta t}$$

- Onde
  - Z => cinzas
  - W = fração mássica de combustível nas cinzas
  - $c_{p,z}$  = calor específico a P=cte das cinzas
  - $\Delta t$  = intervalo de tempo das medidas

# Perdas

- Perdas devidas à combustão incompleta

$$\dot{P}_2 = \dot{m}_{CO} PCI_{CO} + \dot{m}_C PCI_C + \dot{m}_{H_2} PCI_{H_2}$$

- Onde
  - CO = monóxido de carbono
  - C = carbono
  - H<sub>2</sub> = hidrogênio

# Perdas

- Perda por calor sensível nos gases de exaustão

$$\dot{P}_3 = \dot{m}_g c_{p,g} (T_g - T_{ref})$$

- Perda por radiação e convecção (para a vizinhança)

$$\dot{P}_4 = \dot{Q}_R + \dot{Q}_C$$

- Onde:

$$\dot{Q}_R = \sigma \varepsilon A (T_s^4 - T_{amb}^4)$$

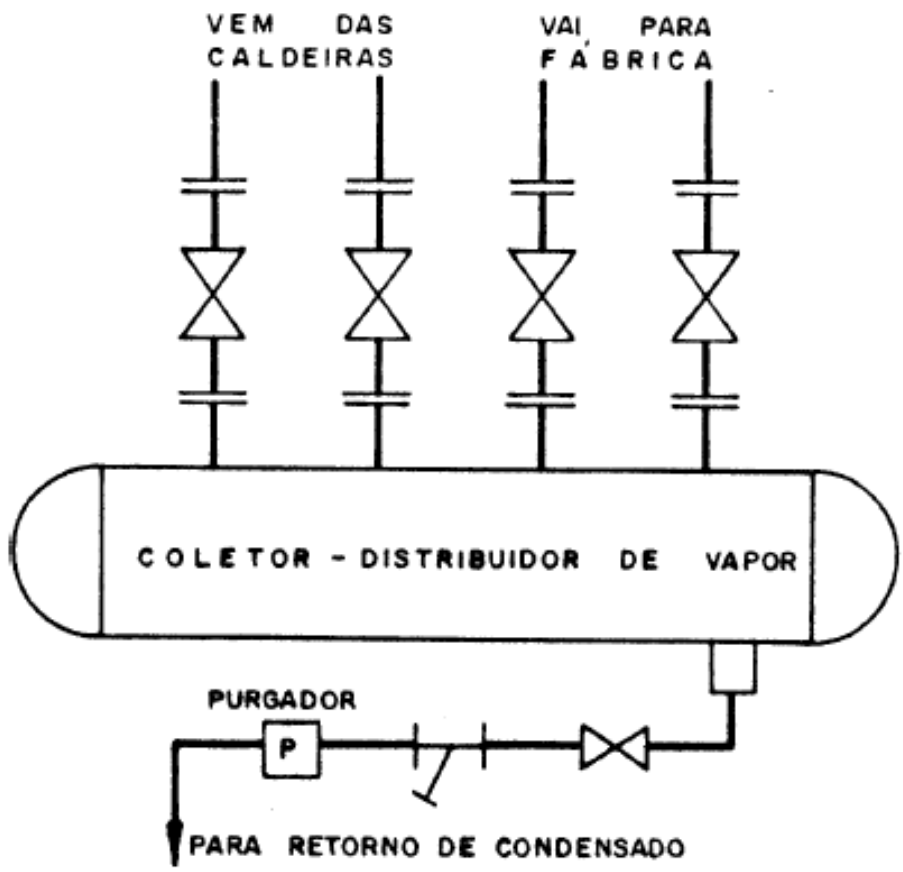
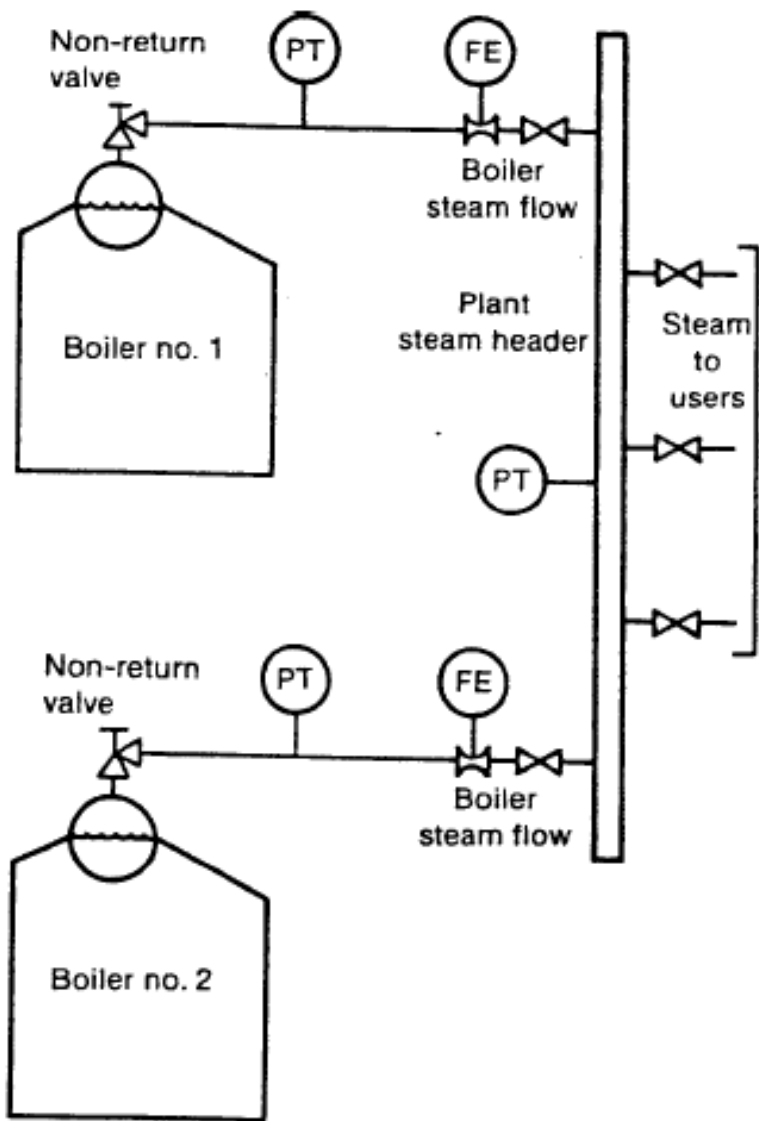
$$\dot{Q}_C = \bar{h} A (T_s - T_{amb})$$

# Distribuição de Vapor

- Vapor produzido é utilizado em diversos processos industriais
- Ele precisa ser distribuído aos pontos de utilização
  - Distribuição é feita por uma rede de tubulações e demais acessórios
  - Deve atender a certos requisitos operacionais
    - Segurança, eficiência térmica, condições de aplicação
    - Vazões, temperaturas, pressões adequadas
      - Válvulas, reservatórios, etc.

# Esquema de distribuição

- Centrais elétricas às vezes têm mais de um GV
- Vapor entregue deve ter certas características
  - Vapor não vai diretamente do GV para o processo
- Em geral, um projeto prevê:
  - Vapor dos GV vai para um coletor
  - Do coletor, ramificações partem para pontos de utilização
    - Válvulas controlam vazão para cada ponto
    - Válvulas redutoras de pressão controlam a pressão do vapor para cada ponto



# Dimensionamento da tubulação

- Compromisso entre:
  - Minimizar perdas de carga
  - Minimizar investimentos financeiros
- Na prática:
  - Escolhe-se maior perda de carga aceitável para operação e subtrai-se margens de segurança



# Materiais e isolamento térmico da tubulação

- Em geral as tubulações são de material metálico
- Aço carbono é a liga mais utilizada
  - Baixo custo
  - Atende ampla faixa de temperaturas e pressões
  - São fabricadas em diversos diâmetros e espessuras
  - São utilizadas até  $T$  aprox.  $400^{\circ}\text{C}$
- Aços-liga: são utilizados quando  $400^{\circ}\text{C} < T < 550^{\circ}\text{C}$ 
  - Contêm níquel, cromo e molibidênio
  - Maior resistência a  $T$  e  $P$
- Aços inoxidáveis: quando  $T > 550^{\circ}\text{C}$

# Materiais e isolamento térmico da tubulação

- $T_s > T_{amb} \Rightarrow$  rejeição de calor para o ambiente
  - Necessitam de isolamento térmico
    - Economia de energia (redução de perdas)
    - Segurança
- Tipo de isolamento e espessura:
  - Critérios técnicos
  - Fatores econômicos
- Quando não há isolamento:  $T_s \gg T_{amb}$ , e rejeição de calor por radiação pode ser considerável (em relação à perda por convecção natural)

# Materiais e isolamento térmico da tubulação

- Considera-se:
  - Rejeição por convecção natural:  $\dot{Q}_{conv}$
  - Rejeição por radiação:  $\dot{Q}_R$
- Tanto  $\dot{Q}_{conv}$  como  $\dot{Q}_R$  dependem da geometria e disposição da tubulação, assim como da instalação em geral.
- Em um cálculo do calor rejeitado, há ainda a condução térmica dos materiais do tubo e do isolante

# Materiais e isolamento térmico da tubulação

- Do ponto de vista técnico, a especificação do isolante deve levar em consideração as seguintes resistências térmicas:
  - $R_1 = 1/\bar{h}_1 A_1$ : conv. do vapor para sup. interna do tubo
  - $R_2 = \ln(d_{ext}/d_{int})/2k_2\pi L$ : cond. espessura do tubo
  - $R_3 = \ln(d_{ext}/d_{int})/2k_3\pi L$ : cond. espessura do isolante
  - $R_4 = 1/\bar{h}_4 A_4$ : conv. da sup. do isolante para o ambiente
  - $R_5$ : radiação da superfície do isolante para o ambiente
  - $R_T = R_1 + R_2 + R_3 + (R_4 R_5)/(R_4 + R_5)$ : resistência total
- OBS: quando o tubo possui isolante,  $\dot{Q}_{rad} \ll \dot{Q}_{conv}$ 
  - $R_T = R_1 + R_2 + R_3 + R_4$

# Materiais e isolamento térmico da tubulação

- Estimativa da perda de energia por rejeição de calor:

$$\dot{Q} = \frac{T_v - T_{amb}}{R_T}$$

- OBS: apenas estimativa inicial

# Materiais e isolamento térmico da tubulação

- Exemplos
  - Espuma de poliuretano
    - Até 80°C
  - Foamglass (espuma de vidro)
    - Até 450°C
  - Lã de rocha
    - Até 1000°C
  - Fibra-cerâmica
    - Alumina + sílica
    - Até 1450°C

# Válvulas e purgadores

- Válvulas controlam vazão, pressão e sentido do escoamento
  - Válvula unidirecional (ou de retenção): controle do sentido do escoamento
    - Só permitem escoamento em um sentido
  - Válvula de bloqueio: estabelecem ou interrompem fluxo
    - Trabalham completamente abertas ou completamente fechadas
  - Válvula de regulação de vazão: permitem estabelecer a vazão desejada
    - Trabalham com aberturas parciais
  - Válvulas de controle: recebem sinal de “feedback” (pressão, vazão, etc.) para regular automaticamente sua abertura

# Válvulas e purgadores

- Purgadores de vapor
  - Drenam condensados da linha de vapor
    - Para ambiente externo
    - Para linha de retorno do condensado
  - Aumenta a vida útil da tubulação e dos equipamentos
    - Condensado + altas velocidades do vapor => impacto de gotículas  
=> erosão