

Geração e distribuição de vapor

Equações de Balanço Aplicadas a
Geradores de Vapor

Introdução

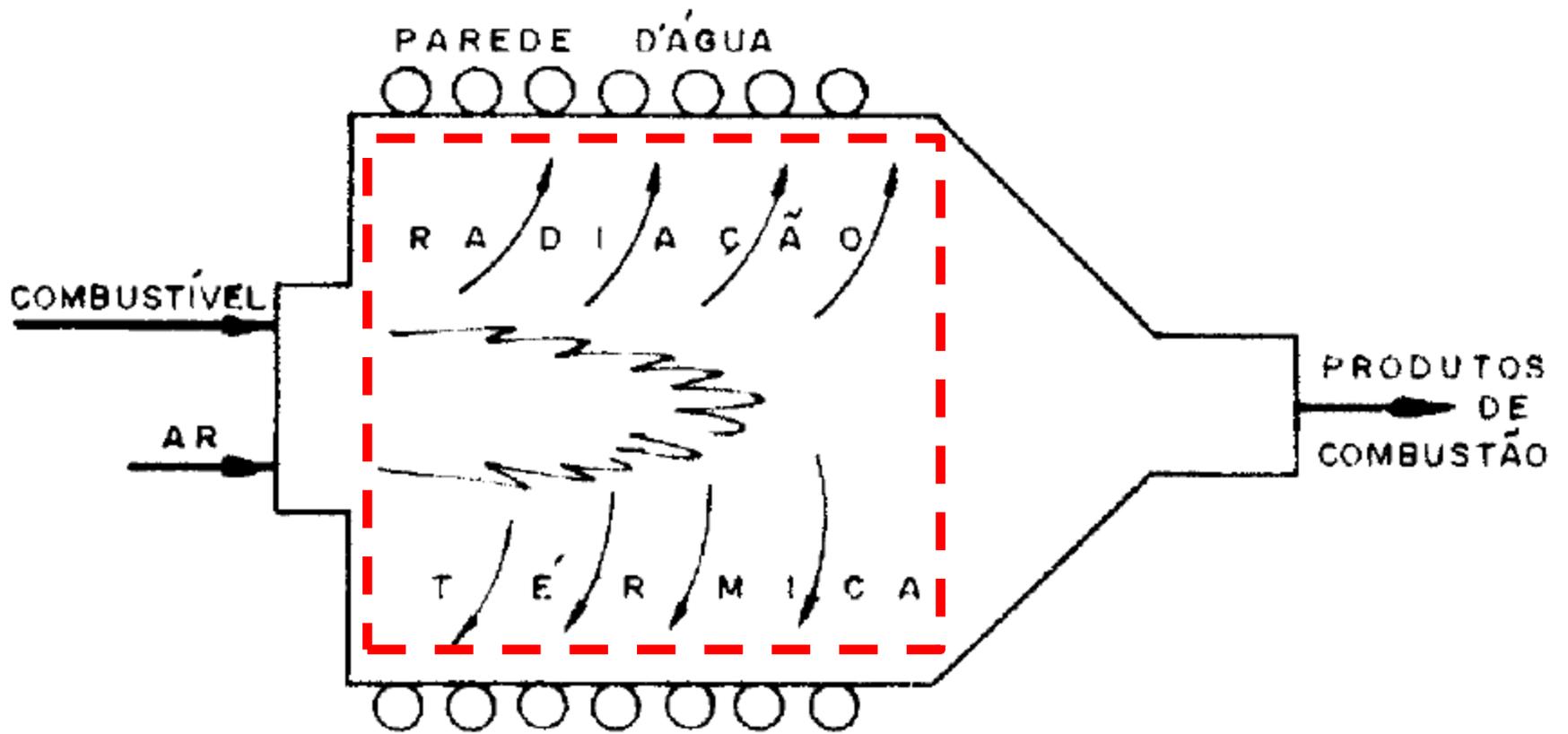
- Transformações de energia em um GV envolvem:
 - Combustão (ou então reação nuclear)
 - Transf. Calor por convecção, condução e radiação
- Problema: dependem de muitos parâmetros
 - Necessário conhecimento do escoamento dos fluidos
 - Dependem de detalhes construtivos
 - Geometria, materiais empregados, 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)

- ε = 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

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

$$- Re = \frac{\rho Ud}{\mu}$$

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

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 = Δh 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 η_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 η_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
 - Δt = 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
 - H₂ = 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:

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

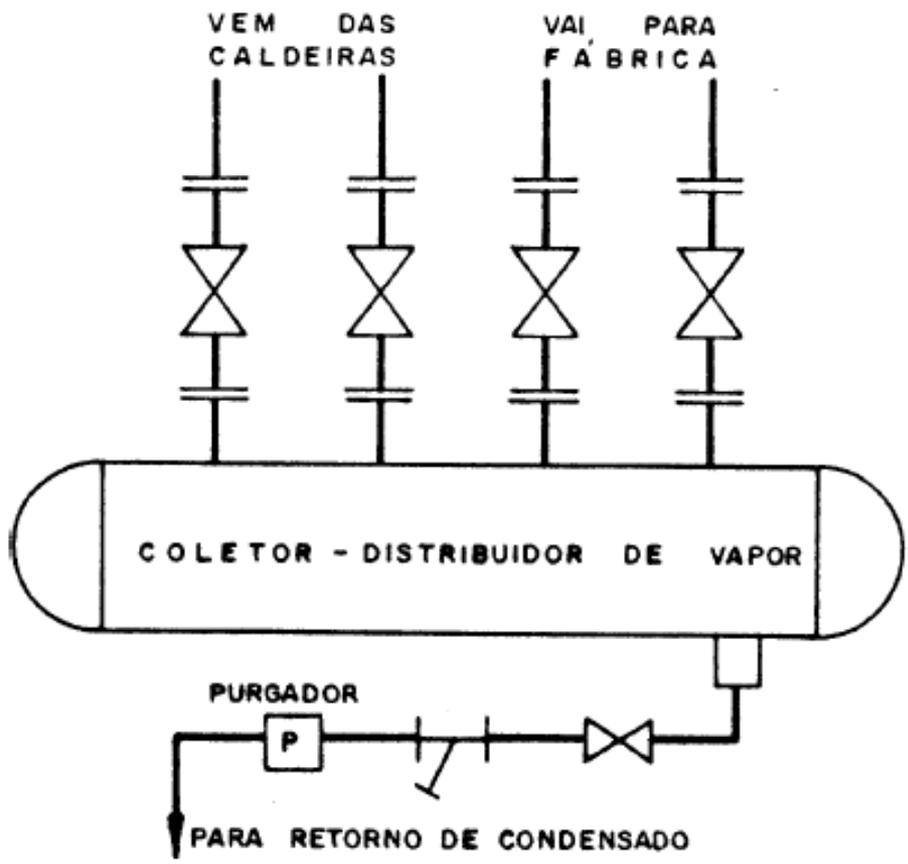
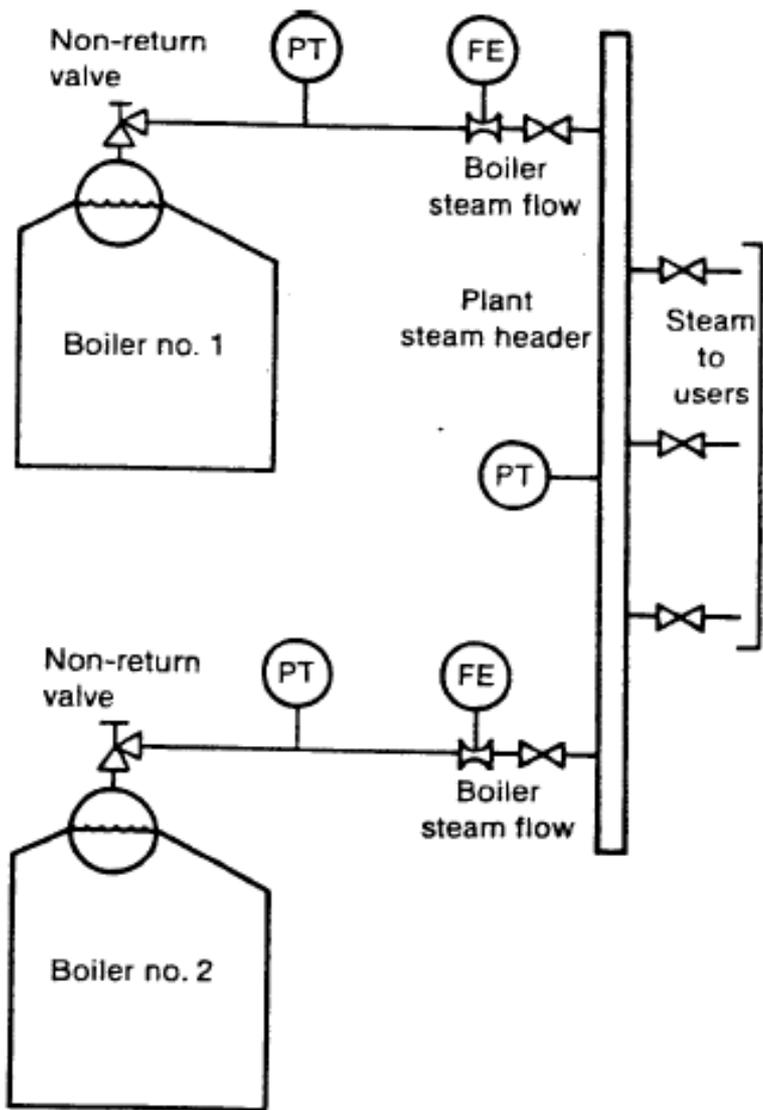
$$\dot{Q}_C = \bar{h} A (T_s - T_{amb})$$

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°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