



Geradores de vapor de água

Prof. Marcelo Pustelnik

Universidade Federal do Paraná - UFPR
Departamento de Engenharia Mecânica

03 de maio de 2019

Caldeiras de vapor

Histórico (1)

- 1700 : Caldeira mais antiga que se tem registro
- 1740 : Caldeiras de tubos de fogo
- 1788 : Caldeira com tubos de águas inclinados
- 1846 : Stephen Wilcox cria a caldeira de tubos verticais

Tipos I

Quanto a aplicação (1)

- Termelétrico - vapor superaquecido entre 400°C - 500°C e pressões típicas de 6 a 18 MPa
- Industrial - pressão de vapor inferior a 2MPa, temperaturas entre 340°C - 440°C e geração de vapor entre 40 a 140 t/h
- Naval

Tipos II

Quanto a circulação dos gases (1)

- Aquotubulares - Uso mais abrangente. A água circula dentro dos tubos.
- Flamotubulares - Instalações de menor porte (pressão menor que 15 bar e geração de vapor inferior a 15 t/h. Os gases de combustão circulam dentro de tubos.
- Elétricas - Aplicação restrita.

Tipos III

Quanto a circulação ao fluido de trabalho (1)

- Natural
- Forçada
- Passe único

Tipos IV

Quanto ao nível de pressão de operação (1)

- De baixa e média pressão ($<10\text{MPa}$) - tipo industrial, com feixe de convecção e sem reaquecedor
- De alta pressão (10 a 16 MPa) - centrais termelétricas, circulação natural e reaquecedor
- De alta pressão ($>17\text{MPa}$) - centrais termelétricas, circulação forçada e reaquecedor
- De pressão supercrítica ($>22.1\text{MPa}$) - centrais termelétricas, de passe único e reaquecedor
- Com pressão deslizante - opera cargas parciais em uma pressão de vapor menor que a nominal

Tipos V

Quanto ao tipo de combustível (1)

- Sólidos (carvão mineral, biomassa e resíduos sólidos)
- Líquidos (óleo combustível e óleo diesel)
- Gasosos (gás natural, gás de processo e calor residual)

Tipos VI

Quanto a tiragem (1)

- Natural - efeito chaminé
- Forçada - Existência de sopradores
- Induzida - Ventiladores de exaustão
- Balanceada - Combinação de tiragem forçada e tiragem reduzida

Componentes principais

Componentes principais (2)

- Fornalha - Local onde se desenvolve a queima do combustível
- Caldeira - Partes onde ocorrem mudanças de fase da água do líquido para o vapor
- Atemperador - Controla a temperatura do vapor
- Superaquecedor - Feixes tubulares destinados a aumentar a temperatura do vapor gerado na caldeira
- Economizador - Aumenta a temperatura de entrada da água de alimentação
- Aquecedor de ar - Aumenta a temperatura do ar utilizado na queima do combustível

Calor associado ao vapor e gases de combustão I

Equações (2)

$$\dot{q}_d = \dot{m}_{cb} [PCI + \Delta h_{cb} + m_{ar} \cdot \Delta h_{ar} + w_{ar} \cdot m_{ar} \cdot \Delta h_{ar}] \quad (1)$$

\dot{q}_d : Calor liquido disponível na câmara de combustão [kW]

\dot{m}_{cb} : Consumo de combustível [kg/s]

PCI : Poder calorífico inferior do combustível [kJ/kg]

m_{ar} : Massa real de ar de combustão [kg/kgcomb]

w_{ar} : Umidade do ar [kg/kg ar seco]

Calor associado ao vapor e gases de combustão II

Equações (2)

$$\Delta h_{cb} = cp_{cb}(T_{cb} - T^*) \quad (2)$$

$$\Delta h_{ar} = cp_{ar}(T_{ar} - T^*) \quad (3)$$

$$\Delta h_v = cp_v(T_v - T^*) \quad (4)$$

$T_{cb,ar,v}$: Temperatura [$^{\circ}\text{C}$]

T^* : Temperatura de referência [$^{\circ}\text{C}$]

$cp_{cb,ar,v}$: Calor específico [$\text{kg}/\text{kg } ^{\circ}\text{C}$]

Calor associado ao vapor e gases de combustão III

A energia absorvida pela água (2)

$$\dot{q} = \dot{m} (h_s - h_e) \quad (5)$$

Para o vapor saturado

$$h_s = (1 - x)h_l + x.h_v \quad (6)$$

\dot{q} : Energia absorvida pela caldeira [kW]

\dot{m} : Fluxo de água no tambor [kg/s]

h_e : Entalpia de entrada no tambor [kJ/kg]

h_s : Entalpia de saída no tambor [kJ/kg]

h_l : Entalpia do liquido saturado [kJ/kg]

h_v : Entalpia do liquido vapor [kJ/kg]

Calor associado ao vapor e gases de combustão IV

Energia associada ao fluxo de gases e cinzas leves (2)

$$\dot{q}_g = \dot{m}_g \bar{c}p_g (T_g - T^*) + \dot{m}_{cz} \bar{c}p_{cz} (T_{cz} - T^*) \quad (7)$$

$$\bar{c}p_g = \sum x m_i c p_i \quad (8)$$

\dot{q}_g : Energia do fluxo de gases [kW]

\dot{m}_g : Massa dos gases de combustão [kg/s]

\dot{m}_{cz} : Massa de cinzas arrastados pela de combustão [kg/s]

T_g : Temperatura dos gases [°C]

$c p_i$: Calor específico do i -ésimo componente [kg/kg °C]

$\bar{c}p_{cz}$: Calor específico médio das cinzas [kg/kg °C]

Fornalha (2)

É o componente da unidade geradora de vapor destinado a converter a energia química do combustível em energia térmica.

As fornalhas podem fazer a:

- Queima em suspensão - Permitem queima de óleo, carvão pulverizado, gás natural e resíduos
- Queima em grelha - Atende caldeiras de pequeno e médio porte. Podem utilizar resíduos industriais, lenha e bagaça de cana
- Queima em leito fluidizado - Injeção de ar (alternativa para queima em suspensão).

Fornalhas II

Outros dispositivos auxiliares (2) são:

- Ventiladores de ar
- Bombas de alimentação
- Sistemas de ignição
- Dispositivos de controle - regulam pressão, vazão do combustível e do ar de combustão. Possui sistemas de:
 - Funcionamento sob carga constante
 - Funcionamento em carga máxima, carga mínima ou sem carga
 - Funcionamento sob carga variável e contínua entre dois níveis
- Dispositivos de segurança

Fornalhas III

O projeto da câmara de combustão (2) deve considerar:

- Volume adequado ao combustível que se deseja utilizar
- Altura compatível com a circulação de água
- Disposição adequada dos queimadores e tubos de água
- Dimensões apropriadas das grelhas
- Forma apropriada da câmara
- Temperaturas compatíveis

Carga térmica volumétrica I

Carga térmica volumétrica (2)

$$\bar{q} = \frac{\dot{q}}{V_{cc}} \quad (9)$$

\dot{q} : Energia liberada [kW]

V_{cc} : Volume [m^3]

Carga térmica volumétrica II

Faixas de cargas térmicas (2):

- Queima de óleo ou gás: Caldeiras aquotubulares 200 - 800 $[kW/m^3]$
- Queima de óleo ou gás: Caldeiras flamotubulares 500 - 1200 $[kW/m^3]$
- Queima de carvão: Pulverizado 100 - 300 $[kW/m^3]$
- Queima de carvão: Grelhas móveis 250 - 450 $[kW/m^3]$
- Queima de lenha: Grelhas inclinadas 100 - 400 $[kW/m^3]$
- Queima de lenha: Grelhas móveis 100 - 600 $[kW/m^3]$

Disposição

A disposição dos queimadores (2) podem ser:

- Frontal
- Vertical
- Tangencial

Taxa de carregamento I

Para o dimensionamento das grelhas usa-se a taxa de carregamento (2):

$$\bar{m}_{cb} = \frac{\dot{m}_{cb}}{A_g} \quad (10)$$

\dot{m}_{cb} : Consumo de combustível [kg/h]

A_g : Área da grelha [m^2]

Taxa de carregamento II

Faixas de taxas de carregamento (2):

- Queima de carvão: Grelhas estacionárias 50 - 100 [kg/m^2h]
- Queima de carvão: Grelhas móveis 100 - 300 [kg/m^2h]
- Queima de lenha: Grelhas inclinadas 100 - 250 [kg/m^2h]
- Queima de lenha: Grelhas móveis 150 - 550 [kg/m^2h]

Queimadores à óleo I

De modo geral, na queima do óleo deve haver aquecimento (para obter a viscosidade de projeto e isso pode ser feito com vapor, fluido térmico ou através de resistências elétricas), mistura com ar e nebulização (o tamanho das gotas varia de 10 a 200 μm e quanto menor o tamanho das gotas melhor) (2).

Queimadores à óleo II

Tipos de queimadores de óleo (2):

- Queimadores de pressão direta - pressão entre 5 a 30 [bar] e carga constante
- Queimadores de pressão com retorno de óleo - pressão entre 6 a 22 [bar] e podem operar até 15% da carga máxima
- Queimadores com fluido auxiliar - operam com vapor ou ar comprimido e podem operar até 20% da carga máxima. Pressão (com vapor) inferior a 7 [bar] e pressão (com ar) inferior a 1.5 [bar]
- Queimadores de copo rotativo - óleo é bombeado para um copo cônico rotativo (aproximadamente 3000 [rpm]) e ao sair formam-se partículas de óleo.

Queimadores de carvão pulverizado I

É uma alternativa vantajosa na geração termelétrica e os projetos possuem critérios semelhantes aos dos queimadores de óleo.

Necessita de componentes adicionais como esteiras transportadoras, silos, moinhos, dosadores e ventiladores. Uma pulverização adequada ocorre quando de 70% a 90% do carvão possui granulometria inferior a 200 [mesh] ($75 \mu m$) (2).

Algumas vantagens:

- Caldeiras de grande porte (1000 t/h)
- Alta eficiência térmica
- Possibilidade de operar em combinação com queimadores de óleo ou gás
- Flexibilidade de operação em termos de variação de carga

Queimadores de carvão pulverizado II

Remoção das cinzas (2):

- Fundo seco - Temperatura de trabalho não deve ser superior ao de fusão das cinzas. A remoção das cinzas na fornalha ocorre por meio mecânico e na saída dos gases pode ser feito por meio mecânico ou eletrostático.
- Fundo úmido - Temperatura de trabalho superior ao de fusão das cinzas com remoção no estado líquido.

Queimadores de carvão pulverizado III

Fornalhas do tipo ciclone (2)

Inicialmente projetadas para operar com carvão triturado (12 mm), podem utilizar carvão pulverizado e outros tipos de combustível com gás, óleo ou outros resíduos.

O ar secundário forma o ciclone no qual é injetado o combustível com ar primário para realizar a queima.

Como a temperatura de operação é da ordem de 1600 °C, as cinzas são retiradas no estado líquido.

Fornalhas do tipo ciclone

Tabela: Comparação de queimadores em termos de porcentagem de cinzas (2)

	Carvão Pulverizado (Fundo seco)	Carvão Granulado (Ciclone)
Fornalha	20	70
Precipitadores	76	29
Chaminé	4	1

Queima em grelha I

Queima em grelha (2)

- Capacidade inferior a 200 t/h
- Leito de combustível entre 7 a 12 cm de espessura
- As cinzas devem ser retiradas continuamente
- A queima de combustível é parcial (combustão incompleta)
- Pode reaproveitar a fuligem para a queima
- Na maioria dos projetos é necessário implementar um queimador a óleo para auxiliar na sustentação da chama ou iniciar a fornalha

Queima em grelha II

A taxa de carregamento mostrada na Equação 10, depende (2):

- Tipo de grelha
- Automação
- Forma de alimentação
- Extração e quantidade das cinzas
- Tipo de combustível
- Fluxo de ar
- Tiragem

Queima em grelha III

Quanto a construção (2), pode ser classificada em:

- Fixa ou estacionária - Atendem pequenos geradores. São feitas de aço ou ferro fundido. O ar primário e circulação da água realizam o resfriamento das grelhas. Uso de combustível com baixo teor de cinzas.
- Móvel - Empregadas em caldeiras de maior porte. São dotadas de paredes d'água verticais. Possuem esteiras de ferro fundido e são movidas por engrenagens. Também podem ser construídas por placas móveis.

Queima em leito fluidizado I

Vantagens da queima em leito fluidizado (1):

- Flexibilidade quanto ao uso do combustível
- Em combustíveis sólidos, a granulometria pode ser maior
- Possibilidade de se empregar biomassa e resíduos sólidos urbanos em conjunto com o carvão mineral
- Alto coeficiente de transferência de calor
- Alta eficiência de queima do combustível
- Possibilidade de remoção de enxofre com adição de calcário e dolomita produzindo CaSO_4 e MgSO_4
- Temperatura de combustão do leito fluidizado de 850 a 950°C , o qual reduz as emissões de NO_x .

Queima em leito fluidizado II

A velocidade de fluidização é um parâmetro de projeto (2) e está relacionada a eficiência da caldeira com valores de 1 a 6 m/s.

Velocidades menores diminuem a mistura e geram gradientes de temperaturas.

Em velocidades maiores os leitos são denominados circulantes e em velocidades menores, estacionários.

O ar deve garantir velocidade de fluidização e combustão total. Assim o excesso de ar está entre 20 a 30% (mas também dependem da temperatura de combustão).

O acendimento do leito requer outros queimadores a óleo ou a gás e é realizado de forma gradual a partir dos 500° C.

Sopradores de fuligem I

Sopradores de fuligem (1) são dispositivos de remoção que empregam vapor, água ou ar comprimido como agente de limpeza. Essa limpeza ocorre devido aos fatores dinâmicos e térmicos que ocasionam o surgimento de tensões e destruição dos sedimentos. O fluido de trabalho ficará a uma menor temperatura em relação a área de limpeza.

Sopradores de fuligem II

O vapor (1) possui as seguintes vantagens:

- Obtenção da própria caldeira
- Facilidade operacional
- Baixo custo

O ar possui as seguintes vantagens:

- Não há perda de calor e vapor
- Processo mais seguro devido a ausência de água

E a água pode ser empregada em sedimentos mais resistentes porém, isso pode causar danos estruturais aos tubos.

Corrosão I

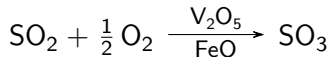
A corrosão (1) pode ocorrer em diversas superfícies.

Corrosão externa a alta temperatura - Ocorre nas paredes de água e nos superaquecedores (ou reauecedores).

- Nas paredes de água, o agente corrosivo é o H_2S , formado a partir da composição do combustível que contém enxofre e favorecido pela ausência de oxigênio na queima (excesso de ar insuficiente). O ácido atca a superfície de Fe dos tubos de água e o faz desprender, continuando o processo de corrosão.
- Nos superaquecedores, o agente corrosivo é o V_2O_5 e começa a ocorrer a partir de $610\text{ }^{\circ}C$ e perto dos $800\text{ }^{\circ}C$ alcança o ponto máximo de corrosão. Para evitar esse problema, pode-se empregar MnO ou trabalhar em temperaturas menores que $600\text{ }^{\circ}C$.

Corrosão II

Corrosão a baixa temperatura - Ocorre nos preaquecedores de ar, devido ao excesso de ar e tempo limitado de permanência a 1200 °C.



Quando os gases ficam abaixo de 500 °C, começa a formação de H₂SO₄ e ocorre a condensação no ponto de orvalho. Isso pode ser evitado com recobrimento cerâmico ou através de um aquecimento dos gases antes dos preaquecedores.

Corrosão III

Corrosão interna - Ocorre nos tubos e contribuem para formações de incrustações. Causas:

- Presença de O_2 e CO_2
- Alta pressão e temperatura do fluido de trabalho (maiores que $500\text{ }^\circ\text{C}$)
- Alta carga térmica na superfície
- Impurezas na água
- Formação de incrustações

Tratamentos

Para evitar a corrosão interna, alguns tratamentos (1) químicos da água de alimentação são indicados:

- Hidrazina - Adição de 15% de Hidrazina (N_2H_4) - elimina gases diluídos na água como O_2 e CO_2 e ainda evita a formação de FeO e CuO .
- Fosfatos - Evita a formação de sais de cálcio e magnésio. Garante uma faixa de pH. Podem ser empregados o fosfato de sódio (Na_3PO_4) ou de amônia ($(NH_4)_3PO_4$).

Superaquecedores I

Superaquecedores (2) (ou reauecedores) são feixes tubulares projetados para elevar a temperatura do vapor proveniente da caldeira.

Os superauecedores podem ser:

- Convectivos - A troca de calor ocorre por convecção e radiação gasosa.
- Radiantes - A troca de calor ocorre por radiação da câmara de combustão. Ocorrem em unidades de grande porte com queima a carvão pulverizado.
- Mistos - São menos afetados pela carga térmica.

Superaquecedores II

Aspectos construtivos:

- Os diâmetros dos tubos estão entre 25 a 65 mm.
- Os espaçamentos transversais estão entre 100 a 400 mm.
- Os espaçamentos longitudinais entre 100 a 200 mm.
- Superaquecedores radiantes podem ter problemas com cinzas.
- Os convectivos devem estar protegidos da radiação direta.

Superaquecedores III

Fatores que influenciam os projetos:

- Temperatura e velocidade dos gases de combustão
- Temperatura e velocidade do vapor
- Arranjo e posicionamento dos tubos
- Material empregado nos tubos e suportes
- Previsão de movimento relativo entre suportes e tubos
- Controle de temperatura de superaquecimento (atemperador)

Economizadores

Economizadores (2) são trocadores de calor determinados a elevar a temperatura da água de alimentação da caldeira, a partir dos gases residuais de combustão.

Normalmente estão depois dos superaquecedores e antes dos aquecedores de ar.

Geralmente são construídos em aço carbono com tubos de 40 a 80 mm de diâmetro. Ainda podem ser empregados tubos de ferro fundido a pressões inferiores a 30 bar.

Existe vantagem econômica, mas a aplicação ocorre em unidades de grande porte.

Necessidade de avaliar a presença de SO_3 .

Aquecedores de ar I

Aquecedores de ar (2) são trocadores de calor determinados a elevar a temperatura do ar primário da combustão, a partir dos gases residuais.

Normalmente estão depois dos economizadores.

Vantagens:

- Reduz temperatura dos gases de exaustão
- Reduz consumo de combustível
- Aumenta a velocidade de combustão
- Queima ocorre de forma estável e uniforme

Aquecedores de ar II

Os aquecedores funcionam em contra-corrente e podem ser:

- Recuperativos - Podem ser construídos com placas ou tubos. A transferência de calor é direta.
- Regenerativos - São formados por placas de metal corrugadas, ligadas a um rotor que se aquecem e resfriam, transferindo calor indiretamente.

No caso de fornalhas a carvão pulverizado ar de combustão deve ser pré-aquecido.

Aquecedores de ar III

Em termos de projeto deve-se levar em conta:

- Temperatura e velocidade dos gases de combustão
- Temperatura e velocidade do vapor
- Arranjo e posicionamento dos tubos
- Material empregado e arranjo das superfícies de aquecimento
- Presença de vapores condensáveis (presença de SO_3)
- Presença de cinzas (cria um isolamento térmico)

Dispositivos de controle e segurança I

O projeto e fabricação de caldeiras deve obedecer as recomendações feitas por normas técnicas. Ainda devem ser levados em conta alterações nos materiais e componentes devido ao uso ao longo do tempo (2). A possibilidade de acidentes não devem ser excluídas do projeto, pois além de eventuais explosões, podem ocorrer incêndios, choques elétricos e intoxicações.

Dispositivos de controle e segurança II

Aos acidentes, podem ser relacionados:

- A elevação da pressão de trabalho
- Superaquecimento excessivo
- Modificação estrutural do material
- Corrosão ou erosão dos materiais
- Ignição espontânea
- Deficiência na circulação
- Material defeituoso
- Posicionamento inadequado dos queimadores
- Dimensionamento incorreto

Dispositivos de controle e segurança III

Controle do nível da água. O sistema de controle funciona em conjunto com bombas de alimentação. Os reguladores podem ser pneumáticos, elétricos ou termohidráulicos.

Há ainda indicadores de nível e injetores de vapor, dispositivos responsáveis pelo funcionamento alternativo das bombas de alimentação em caso de falha.

Dispositivos de controle e segurança IV

Controle da pressão de trabalho. Pressostato de pressão máxima tem a finalidade de controlar a pressão interna da caldeira dando partida ou interrompendo o funcionamento dos queimadores. O pressostato modulador de acordo com a variação de pressão do vapor controla os fluxos de ar e combustível.

Dispositivos de controle e segurança V

Válvulas de segurança. Elas devem ser dimensionadas de modo a permitir a descarga total do vapor gerado. Devem ser testadas periodicamente.

Separadores de vapor. Reduz impurezas (sílica ou umidade) no vapor. É feito em três etapas a separação primária, lavagem e a secagem.

Caldeiras aquotubulares I

As **caldeira aquotubulares** (2) são construídas de forma que a água circule através de tubos.

Em conjuntos com paredes d'água, tambores e feixes tubulares:

- As trocas de calor que ocorrem nas paredes d'água são predominantemente feitas por radiação
- Os feixes tubulares são suportados por tambores
- As paredes d'água têm circulação independente
- O número de passagens dos gases de combustão pelos tubos depende do projeto
- A produção de vapor depende da configuração e do tipo de combustível

Caldeiras aquotubulares II

- Os tambores são instalados protegidos da radiação ou fora do alcance dos gases de combustão
- Número de tambores pode variar, mas em unidades que operam grande pressão, há apenas um tambor
- Devem levar em conta a dilatação da unidade
- Tubos curvados permitem trocadores mais compactos
- Unidades de tubo reto (inclinação entre 4 e 15°) permitem uma menor manutenção
- Deve-se evitar a formação de incrustações através de tratamento químico da água
- Controle da temperatura dos gases de combustão serve como parâmetro de ocorrência de incrustações

Caldeiras aquotubulares III

- A água de alimentação é fornecida a uma vazão maior que o consumo de vapor
- Observar e controlar o nível de água
- A separação do vapor ocorre no tambor principal
- Caldeiras aquotubulares com circulação natural estão limitadas a 160 bar (devido a pressão crítica)
- Caldeiras aquotubulares com circulação assistida tem geralmente paredes d'água e um único tambor. Possui bombas de recirculação.
- Caldeiras aquotubulares com circulação forçada não têm recirculação de água, ou seja, passam uma única vez na tubulação. Foram desenvolvidas para atender usinas de alta potência.

Caldeiras flamotubulares I

As **caldeira flamotubulares** (2) são construídas de forma que a água circule ao redor de tubos, montados entre espelhos. Os gases circulam internamente aos tubos.

- Os gases de combustão têm duas ou mais passagens (fornalha e tubos)
- Os tubos são unidos por solda ou expansão das extremidades
- Nível d'água deve estar acima da tubulação
- Uso de paredes corrugadas
- As fornalhas podem ser internas ou externas.
- As caldeiras flamotubulares podem ser de fundo seco, fundo úmido e com retorno de chama

Balanço energético I

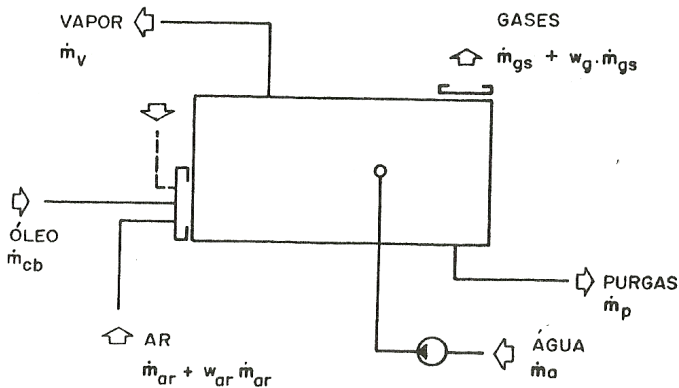


Figura: Balanço energético. Fonte: (2, p.162)

Balanço energético II

A energia fornecida (2) à câmara de combustão:

- Energia devido a combustão
- Energia devido aos fluxos de massa do combustível e do ar de combustão
- Energia devido a umidade de vapor, nebulização e outros

Balanço energético III

As equações, de acordo com (2):

$$\dot{q}_f = \dot{m}_{cb} (PCS + \Delta h_{cb}) + \dot{m}_{ar} (\Delta h_{ar} + w_{ar} \Delta h_{ar}) + \dots \quad (11)$$

$$\dot{q}_d = \dot{m}_{cb} (PCI + \Delta h_{cb}) + \dot{m}_{ar} (\Delta h_{ar} + w_{ar} \Delta h_{ar}) + \dots \quad (12)$$

\dot{q}_f : Energia total [kW]

\dot{q}_d : Energia disponível [kW]

\dot{m}_{cb} : Consumo de combustível [kg/s]

\dot{m}_{ar} : Fluxo de ar [kg/s]

Δh_{cb} : Entalpia do combustível [kJ/kg]

Δh_{ar} : Entalpia do ar de combustão [kJ/kg]

Δh_{vp} : Entalpia da umidade do ar [kJ/kg]

w_{ar} : Umidade do ar [kg/kg ar seco]

PCS : Poder Calorífico Superior [kJ/kg cb]

PCI : Poder Calorífico Inferior [kJ/kg cb]

Balanço energético IV

Pode ser conveniente adotar as energias em termos de $[kg/kg\ cb]$:

$$q_f = (PCS + \Delta h_{cb}) + m_{ar} (\Delta h_{ar} + w_{ar} \Delta h_{ar}) \quad (13)$$

q_f : Energia total $[kJ/kg\ cb]$

m_{ar} : Fluxo de ar $[kg/kg\ cb]$

Balanço energético V

A energia útil (2) é a parcela realmente absorvida pela água com base na energia absorvida pelo economizador, por evaporação, pelos superaquecedores e pelos reaquecedores.

A energia residual do pré-aquecedor de ar é considerada como energia já ganha associada ao fluxo de ar de combustão.

Assim, a energia útil fica:

$$\dot{q}_u = \dot{m}_v (h_v - h_a) \quad (14)$$

\dot{q}_u : Energia absorvida pelo vapor [kW]

\dot{m}_v : Fluxo de vapor [kg/s]

h_v : Entalpia do vapor [kJ/kg]

h_a : Entalpia da água de alimentação [kJ/kg]

Balanço energético VI

E no balanço do vapor:

$$\dot{m}_v = \dot{m}_a - \dot{m}_{pg} - \dot{m}_n \quad (15)$$

\dot{m}_a : Fluxo de água de alimentação [kg/s]

\dot{m}_{pg} : Purgas [kg/s]

\dot{m}_n : Vapor para nebulização [kg/s]

Balanço energético VII

Caso a caldeira entregue apenas vapor saturado:

$$h_v = (1 - x) h_{l_s} + x h_{v_s} \quad (16)$$

h_{v_s} : Entalpia do vapor saturado [kJ/kg]

h_{l_s} : Entalpia da liquido saturado [kJ/kg]

x : Título [-]

Balanço energético VIII

Muitas vezes não é simples medir a quantidade de vapor gerado, então torna-se mais útil calcular a energia útil através de:

$$\dot{q}_u = \dot{q}_f - \dot{q}_p \quad (17)$$

\dot{q}_p : Energia perdida [kW]

A energia perdida é a soma das perdas parciais com calor sensível de gases de combustão (CO_2 , SO_2 , N_2 , O_2 , ...), cinzas, umidade no combustível, purgas, nebulização e perdas através dos equipamentos.

Balço energético IX

Perdas de calor através dos gases:

$$q_{gs} = m_{cb} (q_{CO_2} + q_{SO_2} + q_{N_2} + q_{O_2}) \quad (18)$$

q_{gs} : Calor perdido com os gases secos [kJ/kg cb]

A Equação 18 pode ser rescrita como:

$$q_{gs} = \frac{44}{12} c \Delta h_{CO_2} + 2s \Delta h_{SO_2} + (0.7685 m_{ar}^* + n) \Delta h_{N_2} + (\lambda - 1) m_{ar}^* \Delta h_{N_2} \quad (19)$$

Balanço energético X

c Teor de carbono [$kg/kg\ cb$]

s Teor de enxofre [$kg/kg\ cb$]

n Teor de nitrogênio [$kg/kg\ cb$]

λ Coeficiente de excesso de ar [—]

m_{ar}^* Massa estequiométrica de ar [$kg/kg\ cb$]

Δh_{CO_2} : Entalpia do CO_2 [kJ/kg]

Δh_{SO_2} : Entalpia do SO_2 [kJ/kg]

Δh_{N_2} : Entalpia do N_2 [kJ/kg]

Δh_{ar} : Entalpia do ar [kJ/kg]

Balço energético XI

Ainda a Equação 18 pode ser simplificada por:

$$q_{gs} \cong m_{gs} c_{p_{ar}} (T_g - T^*) \quad (20)$$

m_{gs} : Massa dos gases de combustão [kg/s]

T_g : Temperatura dos gases [$^{\circ}$ C]

T^* : Temperatura de referência [$^{\circ}$ C]

$c_{p_{ar}}$: Calor específico do i -ésimo componente [kg/kg $^{\circ}$ C]

Obrigado

Referências

- 1 LORA, E. E. S.; NASCIMENTO, M. A. R. do. *Geração termelétrica: planejamento, projeto e operação*. Rio de Janeiro: [s.n.], 2004. v. 1.
- 2 BAZO, E. *Geração de vapor*. 2. ed. Florianópolis: [s.n.], 1995. 216 p.