

Sistemas Energéticos

3º ano 6º semestre

Aula 12



Aula 12- Balanço Térmico de Geradores de Vapor Aquatubulares

Tópicos

- Balanço de energia
- Perdas de Calor
- Método do Balanço Directo
- Método do Balanço Indirecto
- Perdas de Calor com Gases Efluentes
- Perdas de Calor devido a Combustão Incompleta
- Perdas devido ao Combustível não queimado
- Perdas de Calor pelo Costado
- Perdas por Calor Sensível\Rendimento e consumo de combustível





12.1 Balanço de Energia

O calor absorvido pelo vapor provém do calor libertado pela combustão do combustível. Por uma variedade de razões, o combustível não queima completamente, e também o calor libertado não pode ser totalmente utilizado. A perda de calor é inevitável. Um equilíbrio térmico mostra o quanto de calor é efectivamente utilizado e quanto é desperdiçado. O propósito de um balanço de calor é identificar as fontes de perda de calor e encontrar meios para reduzi-las e, assim, melhorar a eficiência da caldeira.

12.1 Balanço de Energia



O balanço térmico estabelece a igualdade entre o calor disponível (Q_{disp}) e as perdas, e é composto para 1kg ou 1 m³ de combustíveis sólidos e líquidos ou gasosos.

$$Q_{disp} = Q_i + Q_{fis,ar} + Q_{fis,comb} \quad [\text{kJ/kg}] \quad (12.1)$$

Onde:

Q_i – é o poder calorífico do combustível;

$Q_{fis,ar}$ - calores físico do ar;

$Q_{fis,comb}$ - calor físico do combustível.

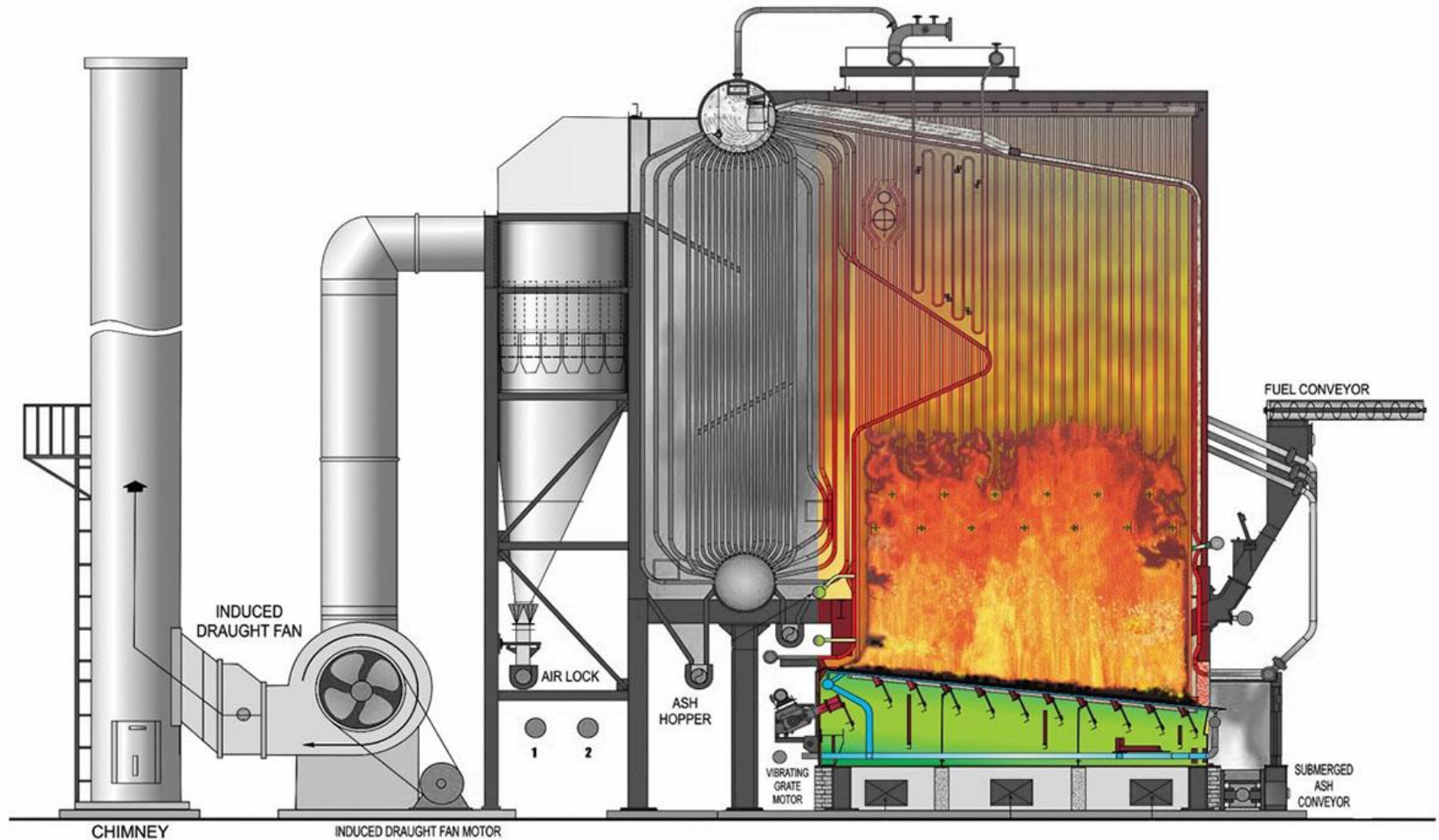


12.1.1 Tipo de Fornalhas

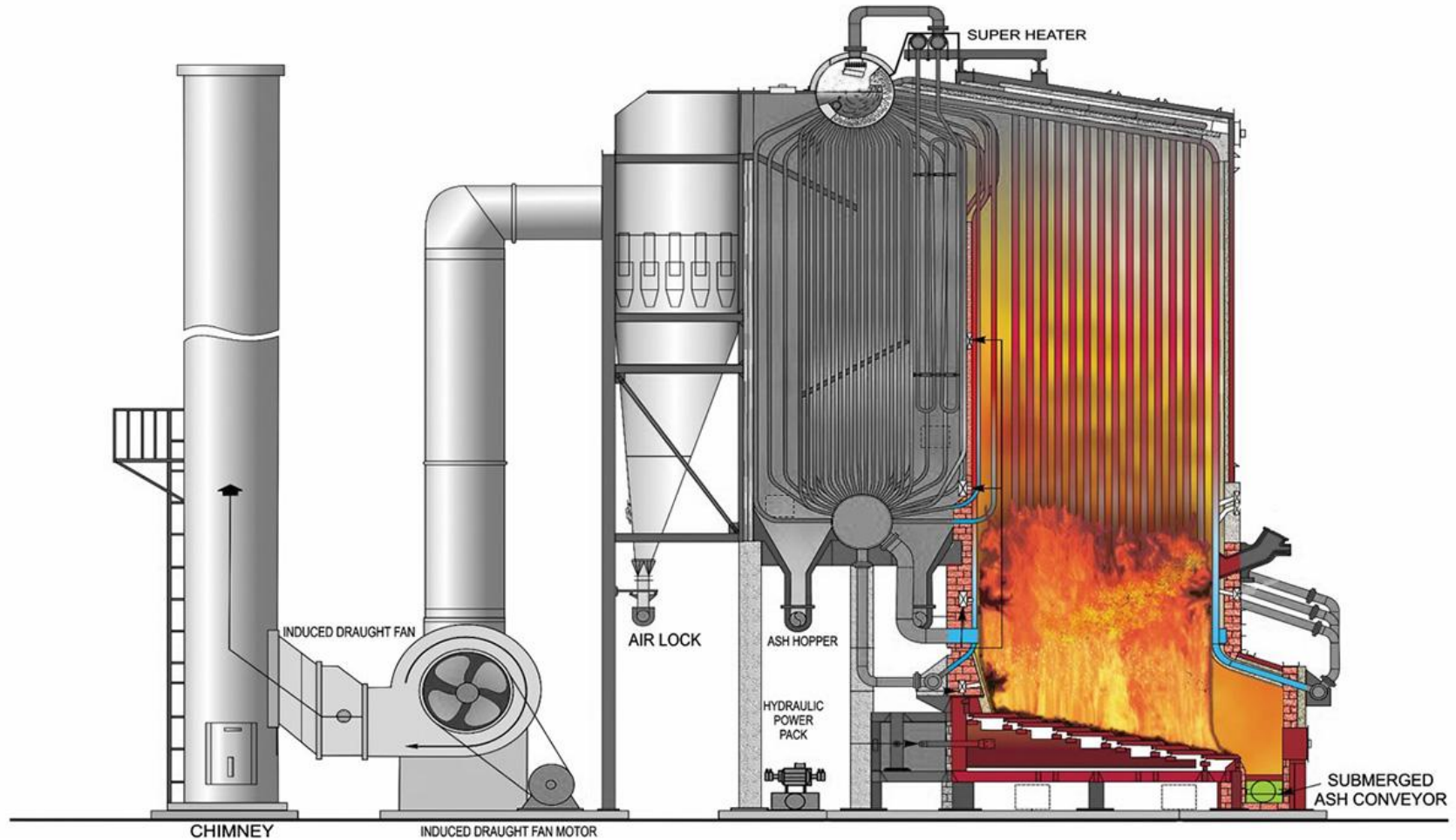
O Calor disponível numa caldeira é obtido na fornalha, conhecida também como câmara de combustão que é o local onde se processa a queima do combustível, sólido líquido ou gasoso. Pode ser do tipo:

- Fornalha para queima de combustível sólido: que são as que possuem suportes e grelhas e segundo a posição da grelha e a sua fixação ainda se podem classificar em de grelha vibratória, grelha rotativa e grelha fixa; e
- Fornalha de Leito Fluidizado: usadas quando se queimam combustíveis líquidos, gasosos ou combustíveis sólidos pulverizados.

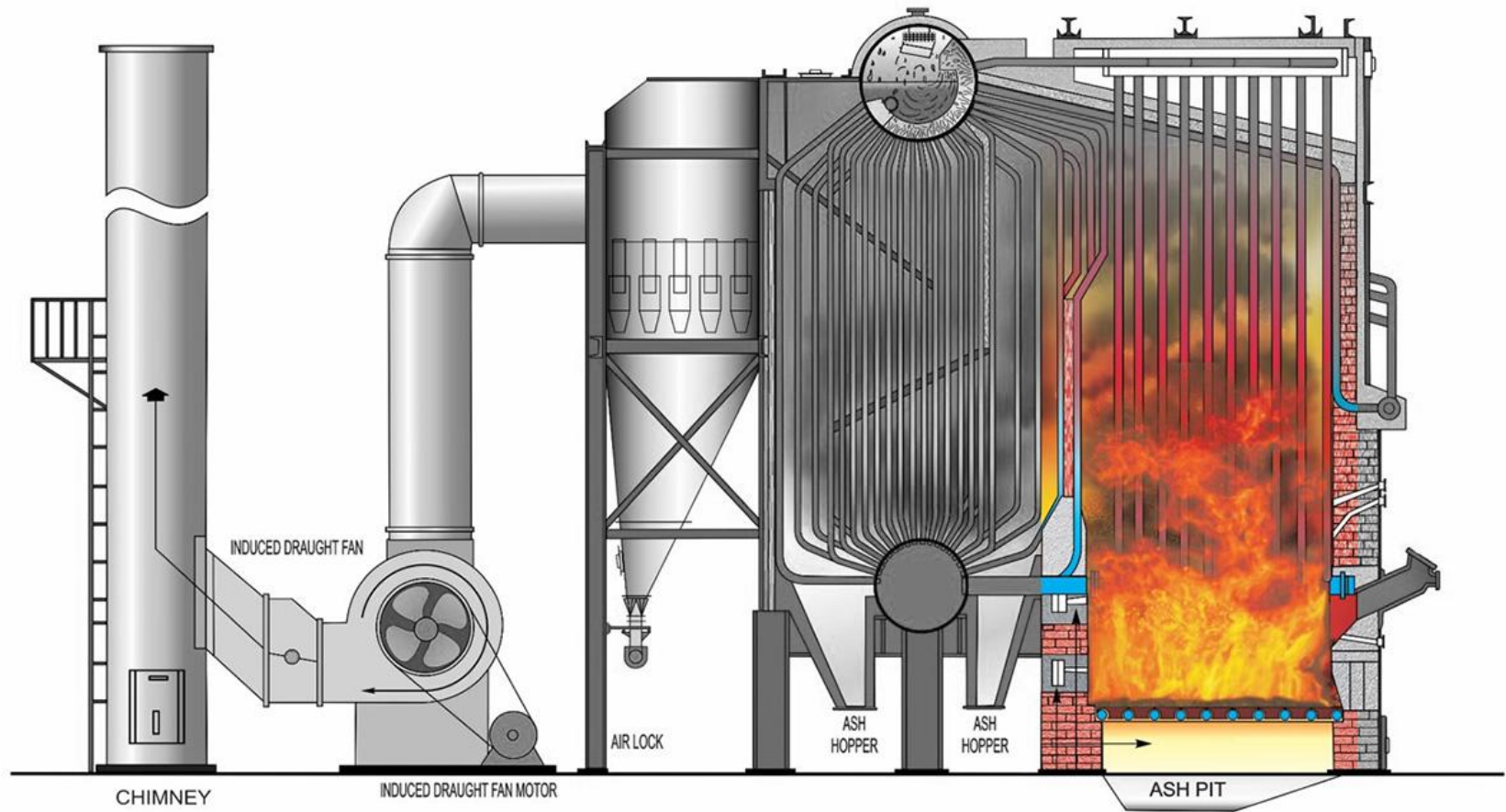
12.1.1 a) Fornoalha de Grelha Vibratória



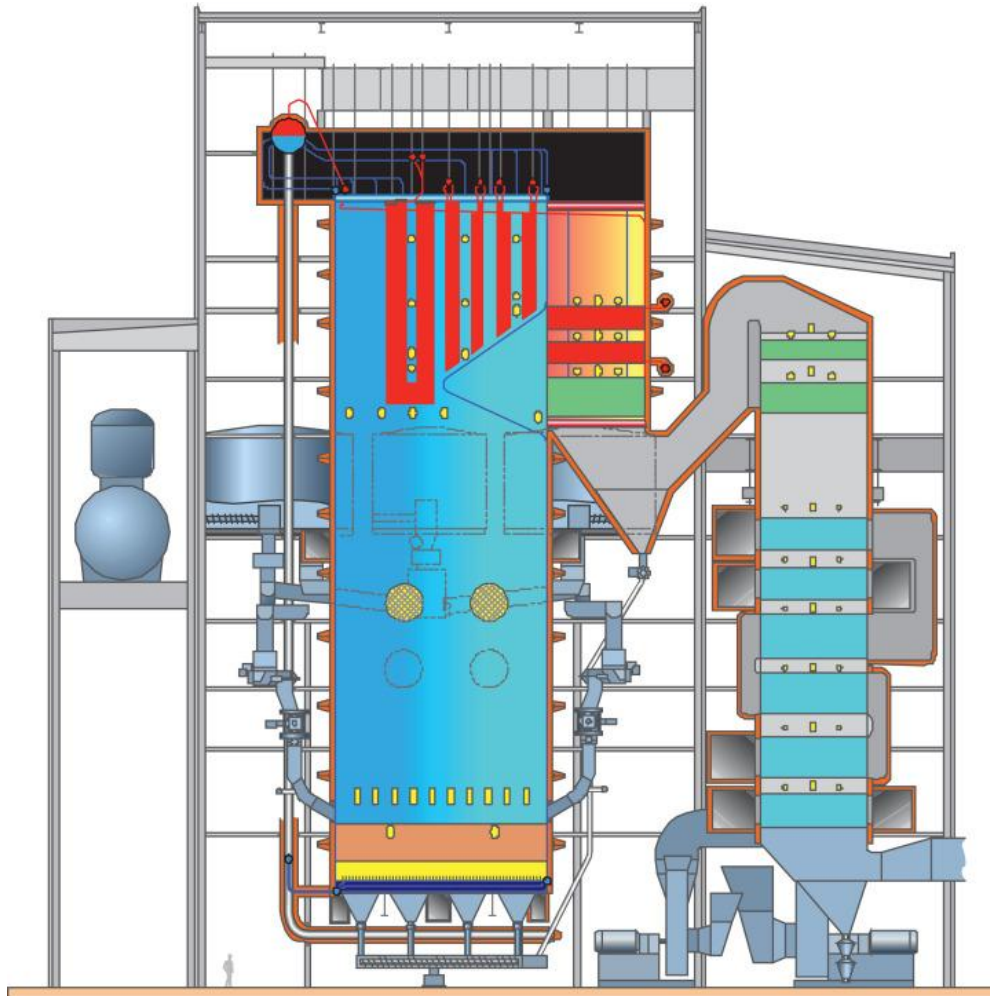
12.1.1 b) Forno de Grelha Inclinada



12.1.1 c) Fornoalha de Grelha Fixa



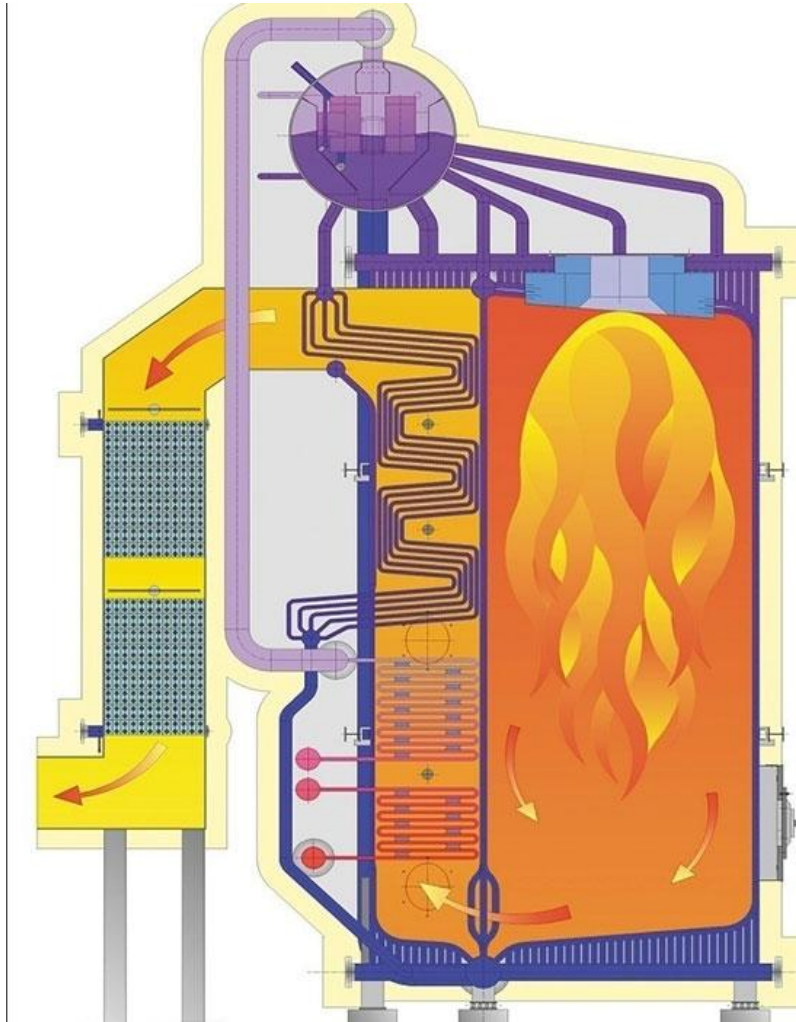
12.1.1 d) Fornalha de Queima em Leito Fluidizado



Nestas fornalhas a velocidade do gás é maior que a velocidade média de uma partícula de tamanho médio; em simultâneo, partículas suficientes retornam e ajudam a manter a distribuição uniforme da temperatura na fornalha.



12.1.1 e) Forno a Gás





Temperaturas recomendadas do pré-aquecimento do ar (Tabela 12.2)

Tipo de fornalha e de combustível	Capacidade de Geração de vapor G, [t/h]		
	<10	10-20	>20
Fornalha em camada			
Antracite	14-30	100-150	150-200
Carvão mineral	25-30	150-200	150-200
Lenhite	100-150	150-200	150-250
Turfa	200-210	200-250	200-250
Fornalha de câmara com extração sólida			
Antracite			350-400
Carvão mineral e lenhite			
Com $4 \leq W_{red} \leq 12$			350-400
Com $W_{red} > 12$			350-400
Turfa fresada	200-210		380-420
Fornalha de câmara com extracção líquida			380-420
Fornalhas a mazute e a gás			
Mazute gás natural	25-30	100-150	200-300
Gás do alto forno	25-30	100-150	200-300

Características das Fornalhas de queima em camada (Tabela 12.1)

Tipo de fornalha	Tipo de combustível	Coeficiente de excesso de ar	Perdas de calor		Tensões térmicas admissíveis		Fracção de cinzas arrastadas
		α_f	q_3 %	q_4 %	q_f (kW/m ²)	q_v (kW/m ³)	a_{arr}
Com grelha fixa e alimentação manual	Lenhite	1,6	2,0	6,0-8,0	800-930	230-400	0,20
	Carvão mineral	1,5-1,6	2,0	5,0-7,0	930-1050	230-400	0,15
	Antracite	1,6-1,7	1,0	8,0-10,0	1050	230-400	0,15
Com grelha fixa e alimentador pneumático	Lenhite	1,4-1,5	0,5-1,0	5,0-8,0	930-1200	230-350	0,12
	Carvão mineral	1,4-1,5	0,5-1,0	4,0-7,0	930-1200	230-350	0,10
	Antracite	1,6-1,7	0,5-1,0	10,0-13,0	930-1200	230-350	0,10
Com grelha de cadeia de percurso directo	Lenhite	1,3-1,4	3,0	4,0-5,5	1600	300-450	0,1-0,2
	Carvão mineral	1,3-1,4	1,5	3,0-6,0	1200	300-450	0,1-0,2
Com grelha de cadeia de percurso inverso	Lenhite	1,3-1,4	0,5-1,0	3,0-7,0	1400-1700	300-450	0,1-0,2
	Carvão mineral	1,3-1,4	0,5-1,0	3,0-8,0	1400-1700	300-450	0,08-0,2
De cuba com cadeia	Turfa	1,3	1	2,0	1700-2200	300-400	





12.1.1 Perdas de Calor

As perdas podem ter duas origens:

- Perdas ocasionais: decorrentes da má operação ou deficiência do projecto ou e do equipamento. Estas perdas devem ser sistematicamente atenuadas ou eliminadas;
- Perdas normais: constantes de cada gerador, pré fixadas pelo projecto, fazendo parte da operação do equipamento.

Na maioria dos casos, as perdas ocasionais procedem da fornalha, seja por má combustão ou por queda de combustível no cinzeiro e outras.



12.1.2 Método do Balanço Directo

Este método é somente empregue em instalações de caldeira em operação, não sendo aplicável ao projecto de novas instalações, uma vez a equação conter duas variáveis interrelacionadas o rendimento térmico do gerador η_v e o consumo do combustível **B**. Além disto como as medições das vazões de vapor, ar e combustível estarem sujeitas a erros significativos, ele não permite o cálculo do rendimento térmico com precisão suficiente nas caldeiras de grande porte.

Este método só é recomendável no cálculo do balanço térmico de pequenas caldeiras, e particularmente nas que são operadas intermitentemente.

12.1.3 O Método do Balanço Indirecto

Consiste em determinar o rendimento bruto da caldeira pela soma das perdas de energia; produz um resultado mais preciso que o balanço directo, uma vez que a soma das perdas de energia constitui aproximadamente 10% do Calor Disponível Q_{disp} e todos estes itens poderem ser medidos de maneira fiável. Este é o único método disponível para estimar o rendimento térmico de uma caldeira nova, durante ainda o estágio de projecto.



12.1.3 O Método do Balanço Indirecto

Uma grande vantagem deste método é a de os erros de medição não produzirem uma alteração significativa no valor da eficiência. Assim, se a eficiência da caldeira for de 90%, um erro de 1% no método directo, resultará numa significativa alteração do valor da eficiência, ou seja, $90 \pm 0.9 = 89,1-90,9$. No método indirecto um erro de 1% na medição das perdas resultará em variação da eficiência da caldeira em $\pm 0,1\%$ ou seja; $100 - (10 \pm 0,1) = 90 \pm 0,1 = 89,9-90,1$.



12.2 - Perdas de calor

A energia térmica libertada pela reacção de combustão na fornalha é aproveitada para a vaporização da água na caldeira, porém, não na sua totalidade, Uma parte da energia produzida é perdida pelas paredes para o ambiente, outra é transportada com os gases de escape e nem todo o combustível que teoricamente devia entrar em combustão queima, daí haver também perdas resultantes da combustão química e mecânica incompletas, razão pela qual não é possível encontrar uma instalação com o rendimento de 100%.



12.3 - Método do Balanço Directo

O cálculo do rendimento da caldeira baseado na medida directa da energia útil, é chamado cálculo do rendimento pelo **Método do Balanço Directo**. Este método é somente empregue em instalações de caldeira em operação, não sendo aplicável ao projecto de novas instalações uma vez que a equação contem duas variáveis inter-relacionadas η_b e **B**. Além disto como as medições de vazões de vapor, ar e combustível são sujeitas a erros significativos, ele não permite o cálculo do rendimento térmico com precisão suficiente nas grandes caldeiras.



12.3 - Método do Balanço Directo

Ele só é recomendável no cálculo do balanço térmico de pequenas caldeiras, e particularmente nas que são operadas intermitentemente.

$$\eta_b = \frac{\text{Calor retirado}}{\text{Calor admitido}} \times 100 \quad (12.2)$$

$$Q_{\text{retirado}} = Q_1 = \dot{G} \cdot [h_g - h_f] \quad [\text{kJ/h}] \quad (12.3)$$

Onde:

G - é a quantidade de vapor gerado em kg/h

h_g - é a entalpia do vapor saturado em kJ/kg

h_f - é a entalpia da água saturada em kJ/kg



12.3 - Método do Balanço Directo

Ou de outra forma:

$$\eta_b = \frac{\dot{G} \cdot [h_g - h_f]}{\dot{B} \cdot Q_{disp}} \quad (12.4)$$

Onde:

G - é a quantidade de vapor gerado em kg/h

h_g - é a entalpia do vapor saturado em kJ/kg

h_f - é a entalpia da água saturada em kJ/kg

B - é o consumo de combustível em kg/h

Q_{disp} - é o calor disponível



12.1.3 O Método do Balanço Indirecto

Uma parte do calor disponível é **utilizado** para gerar vapor (Q_1) e o restante transforma-se em perdas

$$Q_{disp} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 \quad (12.5)$$

O somatório do calor utilizado e das perdas resulta em 100%, daí:

$$100 = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 \quad (12.6)$$

$$\eta_v = 100 \frac{Q_1}{Q_{disp}} = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 + q_7) \quad (12.7)$$

Onde:

Q_{disp} – é a soma do Poder Calorífico inferior do combustível, do calor que entra na fornalha com o ar pré-aquecido e do calor do combustível pré-aquecido;

q_1 - é o calor utilizado para a vaporização da água;

q_2 - São as perdas com gases efluentes (de escape);

q_3 - São as perdas por combustão química incompleta;

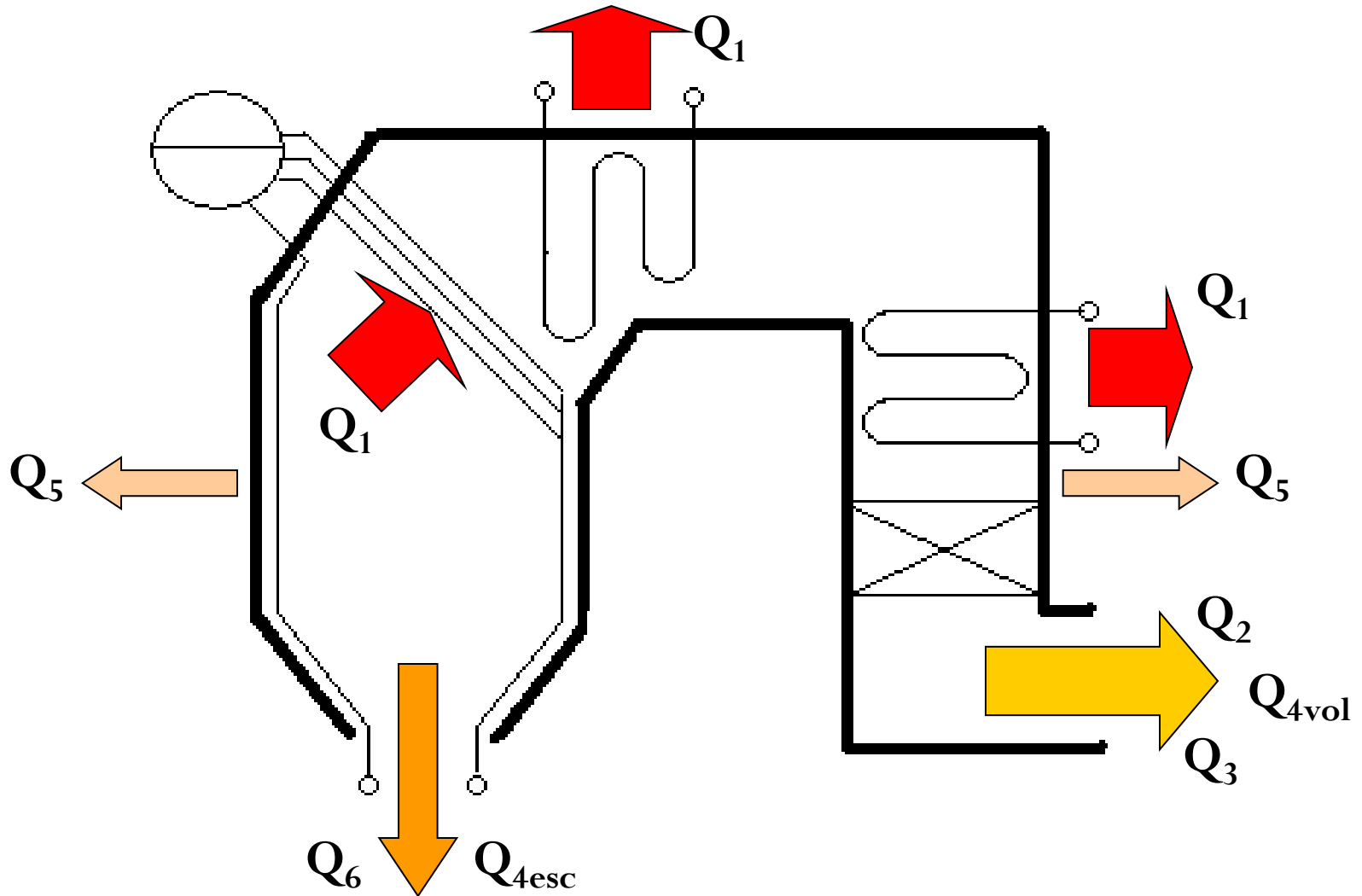
q_4 - São as perdas por combustão mecânica incompleta;

q_5 - São as perdas pelo costado para o meio ambiente;

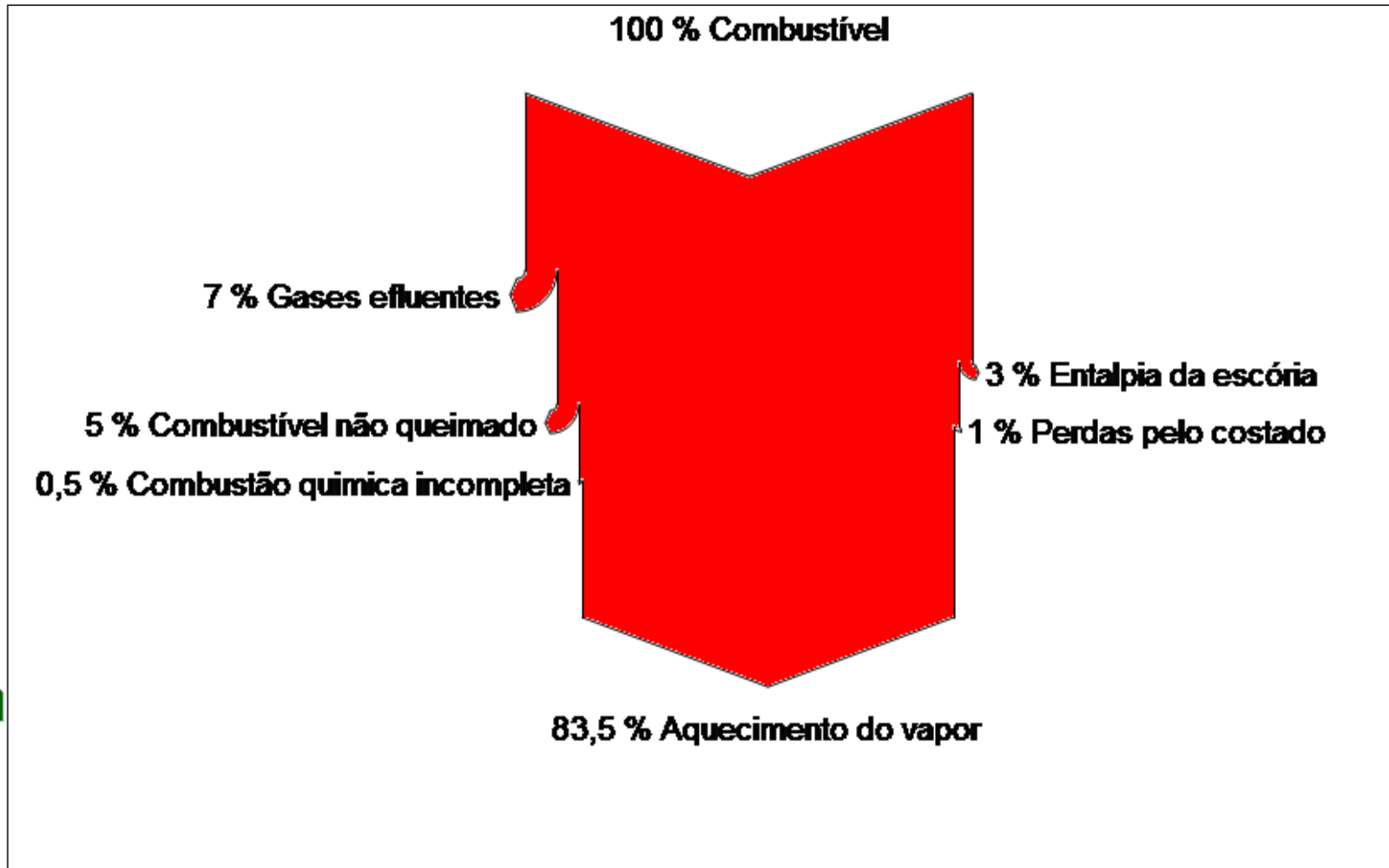
q_6 - São as perdas de calor com a escória.



12.1.3 O Método do Balanço Indirecto



12.1.3 O Método do Balanço Indirecto



Exemplificação das perdas de calor



Características das Fornalhas com extracção de cinzas sólidas (Tabela 12.3)

Combustível	Coeficiente de excesso de ar α_f	Tensão térmica admissível q_v kW/m ³ para capacidade de vapor G em t/h				Perdas de calor %				
						q_3	q_4 para capacidade			
		25	35	50	75		25	35	50	75
Lenhite	1,2	250	210	190	10	0	5	3	2-3	1-5
Carvão mineral	1,2	280	250	210	190	0,5	3	1,5-2	1-2	0,5
Antracite	1,2	180	170	150	140	0	7	7	6	6
Turfa fresada	1,2	260	210	190	190	0,5	3	1,5-2	1-2	0,5



Características das Fornalhas com extracção de cinzas líquidas (Tabela 12.4)

Combustível	Coeficiente de excesso de ar	Tensão térmica q_v kW/m ³	Perdas de calor %		Fracção de cinzas arrastada
	α_f	G	q_3	q_4	a_{arr}
Lenhite	1,2	210	0,5	0,5	0,7-0,8
Carvão mineral	1,2	185	0,5	0,5	0,8
Antracite	1,2-1,25	185	0	1,5	0,8
Turfa fresada	1,2-1,25	145	0	4,0	0,85



Características das Fornalhas para a queima de gases e mazute (Tabela 12.5)

Combustível	Coeficiente De excesso de ar α_f	Tensão térmica admissível Q_v , kW/m ³	Perdas de calor A custa de combustão química incompleta % q_3
Mazute	1,1-1,15	290	0,5
Gás natural e gás de coque	1,1-1,15	350-460	0,5
Gás do alto forno	1,1-1,15	230	1,4

12.2 Perdas de Calor com os Gases Efluentes (Q_2)

A perda (q_2) aumenta com o aumento da temperatura de saída do gás de escape.

Geralmente q_2 aumenta em 1% quando a temperatura de saída do gás de combustão aumenta em 10 ° C. Por isso é sempre desejável reduzir tanto quanto possível a temperatura de saída do gás de escape. No entanto, quando a temperatura de saída do gás de escape é inferior ao ponto de orvalho, o dióxido de enxofre existente no gás transforma-se em ácido sulfúrico corroendo os metais no interior do aquecedor de ar.

O gás de combustão resultante da combustão de um combustível com alto teor de enxofre deve ter um elevado ponto de orvalho. Portanto, uma caldeira concebida para combustível desse tipo deve ter uma temperatura mais elevada de saída do gás de escape. Para caldeiras de grande porte, a temperatura do gás de escape a saída da chamine é escolhida na gama de 110 - 180 ° C.



12.2 Perdas de Calor com os Gases Efluentes (Q_2)

A entalpia do gás de escape da combustão da caldeira é maior que a da entrada de ar de combustão na caldeira. Assim, há sempre uma perda líquida de calor na caldeira. Esta perda é dada por:

$$Q_2 = V_g c_{pg} (T_{wg} - T_{amb}) \quad [\text{kJ/kg}_{\text{comb}}] \quad (12.8)$$

Onde:

V_g é o volume dos produtos da combustão ($\text{m}^3/\text{kg}_{\text{comb}}$), c_{pg} o calor específico médio destes produtos, T_{wg} a temperatura de saída da caldeira dos produtos $^{\circ}\text{C}$ e T_{amb} a temperatura externa (a temperatura a que se avaliou o poder calorífico)



12.2 Perdas de Calor com os Gases Efluentes (Q_2)

Fazendo o balanço térmico em referência a 0°C , leva-se em consideração a variação da entalpia dos produtos de combustão em relação ao ar introduzido na caldeira (tanto o controlado como o infiltrado).

$$Q_2 = \left(I_{wg} - \alpha_{wg} I_{amb} \right) \frac{(100 - q_4)}{100} \quad [\text{kJ/kg}_{\text{comb}}] \quad (12.9)$$

$$\text{logo} \quad q_2 = 100 \frac{Q_2}{Q_{\text{disp}}} \quad [\%] \quad (12.10)$$

Onde I_{wg} é a entalpia dos gases efluentes (kJ/kg), e I_{amb} é a entalpia do ar de combustão a temperatura atmosférica (kJ/kg). Assim a perda de energia Q_2 é função da temperatura T_{wg} e do excesso de ar na saída da caldeira $a_{wg} = a + \Delta a$ (sendo α o excesso de ar na fornalha e Δa o factor de infiltração através dos diversos elementos da fornalha).



12.2 Perdas de Calor com os Gases Efluentes (Q_2)

Tabela 12.6 Temperaturas recomendadas do gás de escape

Tipo de Combustível	Capacidade de Geração de vapor G, [t/h]		
	<10	10-20	>20
Sólido como valor $W^{\text{red}} < 4$	140-160	130-150	120-140
Sólido como valor $4 \leq W^{\text{red}} \leq 12$	150-170	140-160	130-150
Sólido como valor $W^{\text{red}} \geq 12$	160-180	150-170	140-160
Mazute	160-180	140-160	130-150
Gás natural	150-170	130-150	120-140



12.3 Perdas Devido à Combustão Incompleta (Q_3)

Os produtos da combustão podem conter certos elementos gasosos combustíveis tais como o CO , H_2 ou CH_4 . A queima destes componentes após a saída da fornalha é praticamente impossível, uma vez que a temperatura dos gases e a concentração destes elementos combustíveis é muito baixa. A energia que pode ser produzida pela pós-queima destes componentes constitui a perda de energia pela combustão incompleta Q_3 ($\text{kJ/kg}_{\text{comb}}$) calculada pela seguinte expressão:

$$Q_3 = (126,4 \cdot \text{CO} + 108 \cdot \text{H}_2 + 358,2 \cdot \text{CH}_4) V_{\text{gs}} (1 - 0,01q_4) [\text{kJ/kg}_{\text{comb}}] \quad (12.11)$$

Onde CO , H_2 e CH_4 , são as concentrações volumétricas dos produtos da combustão incompleta nos gases secos (%), V_{dg} é o volume dos gases secos em ($\text{m}^3/\text{kg}_{\text{comb}}$). $(100-q_4)/100$ factor de correção devido à diferença entre o consumo de combustível calculado e o real.



12.3 Perdas Devido à Combustão Incompleta (Q_3)

Uma boa mistura entre o combustível eo ar na fornalha e uma aerodinâmica adequada podem reduzir as perda de combustível. Para a redução da perda de CO, a temperatura da fornalha não deve ser demasiado baixa. A perda de combustão incompleta (q_3) geralmente é pequena.

Tabela 12.7 Valores típicos de perdas devido à combustão incompleta

Combustível	Perdas de calor % q_3
Lenhite	0,5
Carvão betuminoso	0,5-1,0
Carvão pulverizado	0
Antracite	0
Turfa fresada	0
Mazute	0,5
Gás natural e gás de coque	0,5
Gás do alto forno	1,4



12.4 Perdas devido ao Combustível não queimado (Q_4)

A perda de energia com o combustível não queimado ($\text{kJ}/\text{kg}_{\text{comb}}$) é determinada pela presença de matéria combustível não queimada nas escórias ou cinzas retiradas das fornalhas e as cinzas volantes arrastadas pelos gases. Na queima de combustíveis sólidos esta perda ocorre essencialmente devido à partículas de coque retiradas da zona de combustão com as, escória cinzas ou cinzas volantes.



12.4 Perdas devido ao Combustível não queimado (Q_4)

Na queima de combustíveis líquidos ou gasosos, esta perda de energia apresenta-se na forma de partículas sólidas ou de partículas de fuligem, que podem ser formadas nas zonas de combustão de alta temperatura, com deficiência de oxigénio ($a < 0,6$).

A perda de calor, devido a átomos de carbono não queimado depende dos tipos, de fornalha, do combustível, do equipamento de construção do queimador, da carga da caldeira, das condições de operação, da temperatura da fornalha e da mistura ar-combustível.



12.4 Perdas devido ao Combustível não queimado (Q_4)

As perdas de calor devido ao combustível não queimado determinam-se de:

$$Q_4 = 3,21A \left(a_{esc+cin} \frac{C_{esc+cin}}{100C_{esc+cin}} + a_{vol} \frac{C_{vol}}{100C_{vol}} \right) \quad [\text{kJ/kg}] \quad (12.12)$$

Onde: $a_{esc+cin}$ e a_{vol} são respectivamente as fracções de cinza do combustível presente nas escórias+cinzas e cinzas volantes (%) e $C_{esc+cin}$ e C_{vol} são o teor de matéria combustível presente na escória + cinzas e nas cinzas volantes em (%), A o teor de cinzas no combustível (%).



Perdas devido ao Combustível não queimado (Q_4)

Tabela 12.8 Valores típicos de perdas com combustível não queimado

Tipo de fornalha	Tipo de combustível	Perdas de calor $q_4\%$
Com grelha fixa e alimentação manual	Lenhite	6,0-8,0
	Carvão mineral	5,0-7,0
	Antracite	8,0-10,0
Com grelha fixa e alimentador pneumático	Lenhite	5,0-8,0
	Carvão mineral	4,0-7,0
	Antracite	10,0-13,0
Com grelha de cadeia de percurso directo	Lenhite	4,0-5,5
	Carvão mineral	3,0-6,0
Com grelha de cadeia de percurso inverso	Lenhite	3,0-7,0
	Carvão mineral	3,0-8,0
De cuba com cadeia	Turfa	2,0



Perdas devido ao Combustível não queimado (Q_4)

Tabela 12.9 Valores típicos de perdas com combustível não queimado

Tipo de fornalha	Tipo de combustível	Perdas de calor $q_4\%$
Queima de Combustível pulverizado com remoção de escória pelo fundo da fornalha	Carvão betuminoso	$\leq 2\%$
Queima de combustível pulverizado em fornalha de fundo seco	Carvão betuminoso	$\leq 3\%$
Queima de combustível pulverizado	Antracite	$\leq 4\%$
Fornalhas a combustível líquido e gasoso		≈ 0



12.5 Perdas de Calor pelo Costado (Q_5)

Quando a caldeira está em funcionamento, a temperatura, da superfície externa da fornalha, das condutas de gases de combustão, dos tubos de vapor, e do teto do forno é maior do que a do ambiente. A perda de calor é causada pela transferência de calor entre as superfícies e o ambiente tanto por convecção como por radiação. A perda de calor depende primariamente da área da superfície da parede da fornalha, da camada de isolamento dos tubos e da temperatura do meio ambiente. A perda de calor é calculada de:

$$Q_5 = \frac{A_{bw}}{B_r} (h_c + h_r) (T_{bw} - T_{esc}) \quad [\text{kJ/kg}_{\text{comb}}] \quad (12.13)$$



12.5 Perdas de Calor pelo Costado (Q_5)

Onde A_{bw} é a área da superfície do costado e demais elementos da caldeira (m^2), h_c e h_r são os coeficientes de transmissão de calor por convecção e radiação (kW/m^2K) e T_{bw} e T_{exc} , são respectivamente as temperaturas médias do costado e meio ambiente da sala de caldeiras $^{\circ}C$.



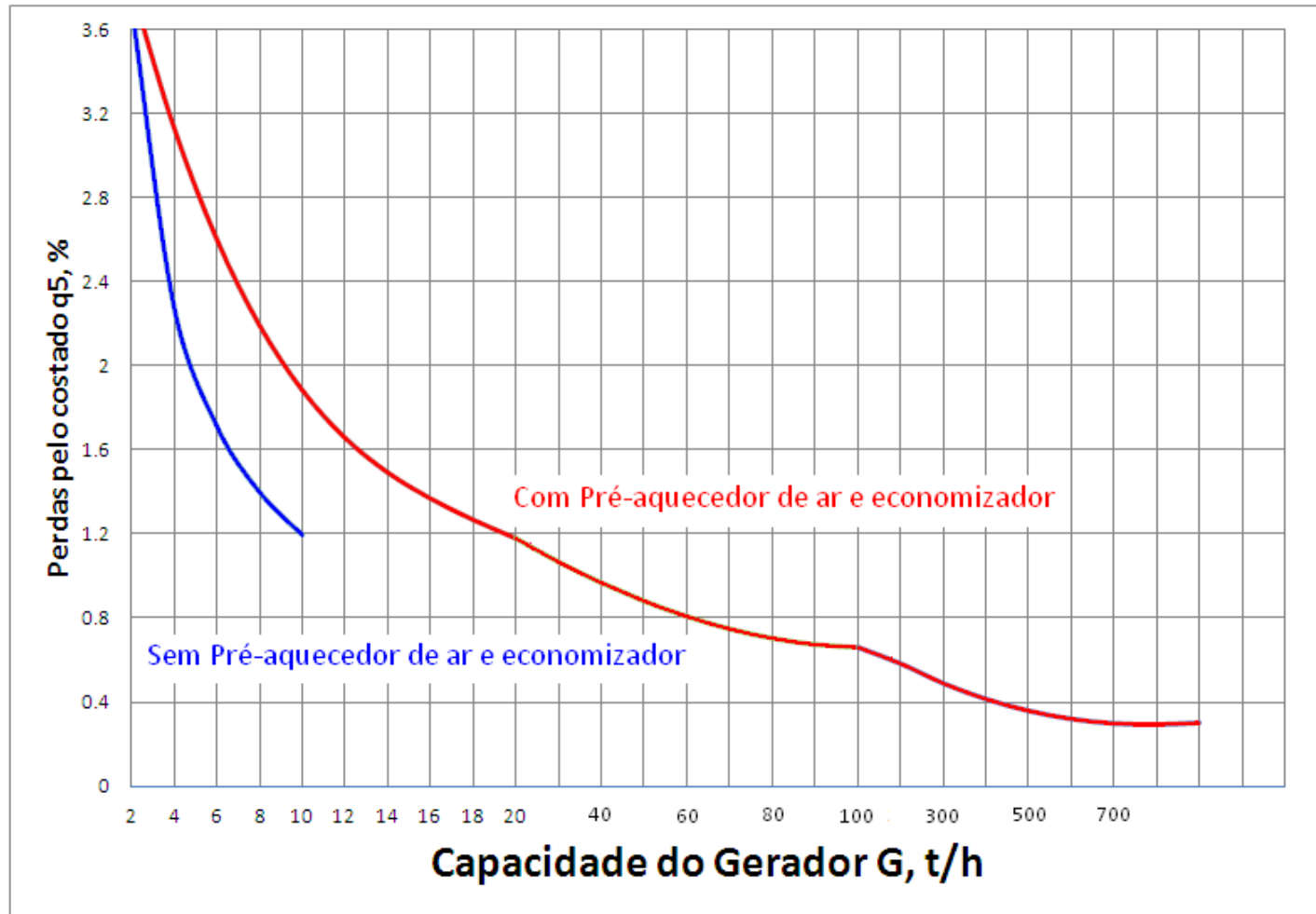
12.5 Perdas de Calor pelo Costado (Q_5)

O consumo de combustível é directamente proporcional à capacidade da caldeira, mas a superfície exterior da caldeira não aumenta na mesma proporção. Assim as perdas da caldeira por convecção e radiação (q_5) como percentagem do calor total disponível diminuem com o aumento da capacidade da caldeira. Uma vez que as perdas de calor são muito difíceis de quantificar, elas são obtidas a partir de dados experimentais. Figura 12 mostra valores típicos de perdas pelo costado de Geradores de Vapor Industriais.





Gráfico 12.1 Perdas pelo Costado (q_5)



12.5 Perdas de Calor pelo Costado (Q_5)

Quando uma dada caldeira funciona a baixa carga, a temperatura da sua superfície exterior não se altera muito. Assim, enquanto a perda de calor Q_5 não varia muito, o calor Q de entrada diminui. Portanto, parte da perda de calor q_5' aumenta com a diminuição da carga da caldeira.

$$q_5' = q_5 \frac{D}{D'} \quad (12.14)$$

Onde:

q_5, q_5' - são as perdas de calor nominal e em carga, respectivamente

D, D' - são as capacidades nominal e operacional da caldeira, respectivamente, kg/s



12.5 Perdas de Calor pelo Costado (Q_5)

Nos cálculos de caldeiras, as perdas de calor devido à convecção e radiação das superfícies devem ser considerados para cada superfície de cada secção de aquecimento. Para simplificar o cálculo, a diferença entre as temperaturas de projecto e ambiente das diferentes secções dos dutos dos gases de escape é ignorada, e as perdas de calor são atribuídas proporcionalmente à quantidade de calor transferido a partir de cada secção. Sob estas condições, um coeficiente φ , conhecido como **COEFICIENTE DE CONSERVAÇÃO DE CALOR**, é utilizado para calcular estas perdas de calor.



$$\varphi = \frac{\text{Calor transferido da superfície de aquecimento para o vapor ou água}}{\text{Transferência de calor da superfície para a água ou vapor} + \text{Transferência de calor da superfície para o ambiente}}$$

12.5 Perdas de Calor pelo Costado (Q_5)

O coeficiente de conservação de calor também é igual à razão entre o calor libertado pelo gás de combustão e o calor absorvido pelo vapor ou água. Se assumir-se ser constante para todas as secções de vapor/água da passagem de gás de combustão, φ é dado por:

$$\varphi = \frac{Q_1 + Q_{aqa}}{Q_1 + Q_{aqa} + Q_5} \quad (12.15)$$

Onde:

Q_{aqa} – é o calor absorvido pelo aquecedor de ar

Q_1 – é o calor absorvido pela água e vapor

Quando a caldeira não tem aquecedor de ar, ou a proporção de calor absorvido pelo aquecedor de ar é muito pequena em comparação com a absorvida pelo vapor e a água, φ pode ser representado como:

$$1 - \varphi = \frac{q_5}{\eta_v + q_5} \quad (12.16)$$

onde η_v é o rendimento do gerador de vapor



12.6 *Perdas por Calor Sensível* (Q_6)

Quando um combustível sólido é queimado, as cinzas e as escórias, são retiradas da fornalha a uma temperatura bastante elevada (cerca de 600-800 °C). Isto resulta em perdas de calor sensível pelas cinzas e escórias. A perda de calor depende do teor de cinzas no combustível, do Poder Calorífico do combustível e do método de deposição da escória. Para um combustível com elevado teor de cinzas e baixo Poder Calorífico, a perda, q_6 é grande.



12.6 *Perdas por Calor Sensível* (Q_6)

A perda de calor sensível de uma fornalha com remoção de cinzas pela base é maior do que a de uma fornalha com a base seca. Uma caldeira de leito fluidizado utilizando carvão com alto teor de cinzas ou absorventes também perde calor através das cinzas de fundo ou pelo dreno do leito. Assim, para estas caldeiras, esta perda de calor deve ser considerada. Para uma fornalha de queima de carvão pulverizado, esta perda deve ser considerada apenas para carvão com alto teor de cinzas.

$$A > \frac{Q}{419} \quad (12.17)$$



12.6 *Perdas por Calor Sensível* (Q_6)

Para uma fornalha com dreno de escória, a perda de calor sensível pode ser calculada por:

$$Q_6 = x_{rm} \frac{100}{100 - C_{cf}} C_{p_c} \cdot \frac{A}{100} \cdot T_{esc} \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad (12.18)$$

Onde

C_{p_c} - Calor específico de cinzas e escórias, kJ/kg°C

x_{rm} - Fracção de cinzas removidas

C_{cf} - Teor de carbono nas cinzas

A - Percentagem de cinzas no combustível

T_{esc} - Temperatura da escória



12.6 *Perdas por Calor Sensível* (Q_6)

Se a temperatura da escória não for conhecida, pode-se usar as seguintes aproximações:

Tipo de Gerador de Vapor	Temperatura da Escória
Fornalha com fundo seco	600 °C
Fornalha com remoção de escória de fundo	$T_m + 100$ °C
Fornalha de leito fluidizado com recuperação de calor e com cinzas refrigeradas	300 °C
Fornalha de leito fluidizado sem refrigerador de cinzas	800 °C

Onde T_m é a temperatura média



12.6 Perdas por Calor Sensível (Q_6)

Tabela 12.10 Valores típicos da fracção de cinzas arrastadas x_{cf}

Tipo de fornalha	Com grelha fixa e alimentação manual			Com grelha fixa e alimentador pneumático			Com grelha de cadeia de percurso directo		Com grelha de cadeia de percurso inverso		Fornalhas com extracção de cinzas líquidas			
	Lenhite	Carvão mineral	Antracite	Lenhite	Carvão mineral	Antracite	Lenhite	Carvão mineral	Lenhite	Carvão mineral	Lenhite	Carvão mineral	Antracite	Turfa fresada
Fracção de cinzas arrastadas a_{rr}	0,2	0,15	0,15	0,12	0,1	0,1	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,08-0,2	0,2-0,3	0,2	0,2	0,15



12.6 Perdas por Calor Sensível (Q_6)

Tabela 12.11 Valores típicos composição das cinzas x_{cf}

Componente	Bituminoso (%)	Subbituminoso (%)	Lenhite (%)
SiO ₂	20-60	40-60	15-45
Al ₂ O ₃	5-35	20-30	10-25
Fe ₂ O ₃	10-40	4-10	4-15
CaO	1-12	5-30	15-40
MgO	0-5	1-6	3-10
SO ₃	0-4	0-2	0-10
Na ₂ O	0-4	0-2	0-6
K ₂ O	0-3	0-4	0-4
Carbono	0-15	0-3	0-5

T ^o C	C _p kJ/kg ^o C
0	0,7955
100	0,8374
200	0,8667
300	0,8918
400	0,9211
500	0,9240
600	0,9504
700	0,9630
800	0,9797
900	1,0048
1000	1,0258
1100	1,0509
1200	1,0960
1300	1,1304
1400	1,1849
1500	1,2228



12.7 Rendimento e consumo de combustível

O calor de combustão do combustível é, em parte, absorvido pela água e vapor. O calor utilizado, Q_1 , é calculado a partir de

$$Q_1 = \frac{G_{vs} (I''_{vs} - I_{aa}) + G_{vr} (I''_{vr} - I'_{vr}) + G_p (I' - I_{aa})}{B} \quad (12.19)$$

Onde:

B - Consumo de combustível, kg/s

G_{vs} - Fluxo do vapor superaquecido, kg/s

I_{vs} - Entalpia do vapor superaquecido, kJ/kg

I_{aa} - Entalpia da água de alimentação, kJ/kg

G_{vr} - Fluxo do vapor reaquecido, kg/s

I'_{vr}, I''_{vr} - Entalpia do vapor na entrada e saída do reaquecedor, kJ/kg

G_p - Caudal das purgas de água, kg/s

I' - Entalpia da água saturada à pressão do vapor do tambor, kJ/kg



12.7 Rendimento e consumo de combustível

O vapor de purga pode, por vezes, ser de até 5-10% do fluxo de principal vapor numa pequena caldeira. Assim, o calor retirado pelas purgas deve ser considerado. Contudo, numa unidade com condensador de água a purga da caldeira não ultrapassa 1-2% do do fluxo de vapor principal. Assim, a perda de calor pelas purgas pode ser desprezada.

Se o calor fornecido ao vapor (Q_1), o calor de entrada (Q_{disp}), e o consumo de combustível da caldeira (B) forem conhecidos, a eficiência da caldeira pode ser calculada. Alternativamente, se o calor de entrada (Q_{disp}) o calor fornecido ao vapor (Q_1) e o rendimento da η_v) forem conhecidos, o consumo de combustível da caldeira B pode ser calculado.



12.7 Rendimento e consumo de combustível

$$\eta_v = \frac{100}{BQ_{disp}} \left[G_{vs} (I''_{vs} - I_{aa}) + G_{vr} (I''_{vr} - I'_{vr}) + G_p (I' - I_{aa}) \right] \quad (12.20)$$

$$B = \frac{100}{\eta_v Q_{disp}} \left[G_{vs} (I''_{vs} - I_{aa}) + G_{vr} (I''_{vr} - I'_{vr}) + G_p (I' - I_{aa}) \right] \quad (12.21)$$

Nos cálculos de combustão, considera-se que o combustível queima completamente. Mas, devido a átomos de carbono não queimado, apenas $(1 - q_4/100)$ kg de 1 kg de combustível alimentado, na verdade, gera calor de combustão. Portanto, o volume total de ar necessário para a combustão propriamente dita e o volume total dos gases de combustão são reduzidas na mesma proporção. Assim, nesses cálculos de volume, a quantidade de combustível deve ser corrigida. Isto é, o consumo real de combustível B deve ser calculado a partir do combustível queimado, B_j .

$$B_j = B \left(1 - \frac{q_4}{100} \right) \quad (12.22)$$

O cálculo do consumo de combustível deve se fazer na base no consumo real de combustível e não na do combustível queimado.





Marcha do cálculo

1. Escolhe-se o tipo de fornalha.
2. Escolhe-se o tipo de combustível.
3. Escolhe-se o coeficiente de excesso de ar Tabelas 12.1, 12.3, 12.4 e 12.5.
4. Calcula-se o volume dos gases de combustão.
5. Faz-se o balanço de entalpias para determinara a temperatura dos gases de combustão.
6. Escolhe-se a temperatura dos gases de escape (Tabela 12.6).
7. Calcula-se o calor disponível (Fórmula 12.1).
8. Calcula-se o calor utilizado para a vaporização do vapor Q_1 (Fórmula 12.3).

Marcha do cálculo



9. Calcula-se as perdas com os gases de escape Q_2 (Fórmula 12.9).
10. Calcula-se o calor perdido Q_3 e Q_4 pelas Tabelas 12.7, 12.8, e 12.9.
11. Calcula-se o calor perdido Q_5 (Gráfico 12.1).
12. Testa-se a condição 12.17, se verificar-se, calcula-se Q_6 pela Equação 12.18.
13. Calcula-se o rendimento térmico pela Expressão 12.7.
14. Calcula-se o consumo de combustível pela Expressão 12.4.

Tabela 12.12 Cp dos gases de escape e do ar (kJ/kg°C)

t°C	Ar	N ₂	H ₂ O	CO ₂	O ₂
0	1.285	1.261	1.467	1.678	1.304
100	1.295	1.280	1.496	1.747	1.323
200	1.304	1.300	1.526	1.814	1.342
300	1.313	1.319	1.556	1.879	1.360
400	1.322	1.337	1.585	1.942	1.377
500	1.330	1.356	1.614	2.003	1.394
600	1.338	1.373	1.643	2.062	1.409
700	1.345	1.391	1.672	2.119	1.424
800	1.352	1.408	1.700	2.174	1.438
900	1.359	1.424	1.728	2.227	1.451
1000	1.365	1.441	1.757	2.278	1.464
1100	1.371	1.456	1.784	2.327	1.475
1200	1.376	1.472	1.812	2.374	1.486
1300	1.381	1.487	1.840	2.419	1.496
1400	1.386	1.501	1.867	2.462	1.505
1500	1.390	1.516	1.894	2.503	1.514
1600	1.394	1.529	1.921	2.542	1.521
1700	1.397	1.543	1.948	2.579	1.528
1800	1.400	1.556	1.974	2.614	1.534
1900	1.403	1.568	2.000	2.647	1.539
2000	1.405	1.581	2.027	2.678	1.544
2100	1.407	1.592	2.052	2.707	1.547
2200	1.408	1.604	2.078	2.734	1.550
2300	1.409	1.615	2.104	2.759	1.552
2400	1.410	1.625	2.129	2.782	1.553
2500	1.410	1.636	2.154	2.803	1.554

