



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

CÁLCULO TÉRMICO E FLUIDOMECÂNICO DE GERADORES DE VAPOR

Prof. Dr. Waldir A. Bizzo

**Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Mecânica**



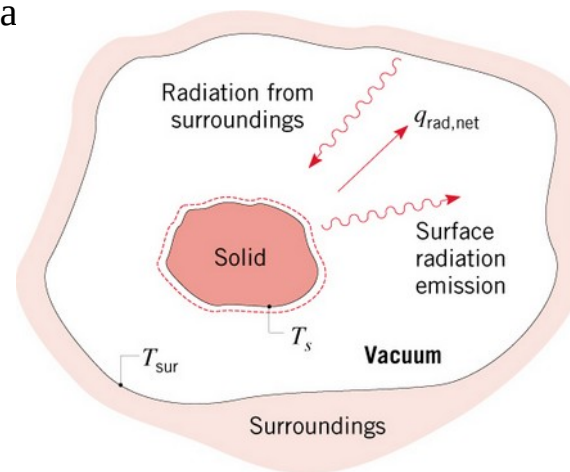
UNICAMP



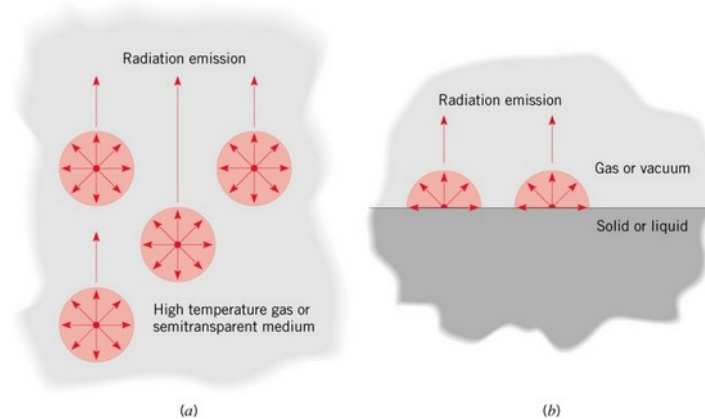
REDE NACIONAL DE
COMBUSTÃO

Considerações gerais sobre radiação térmica

- Radiação térmica é emitida por qualquer matéria à temperatura absoluta $T > 0$
 - Emissão é devida às oscilações e transições dos elétrons que formam a matéria, e que também são responsáveis pela energia térmica da mesma.
 - Emissão corresponde à calor transferido da matéria, e portanto à uma redução da energia térmica armazenada na mesma
 - Radiação pode ser também interceptada e absorvida pela matéria
 - **Absorção de radiação resulta em calor recebido pela matéria**



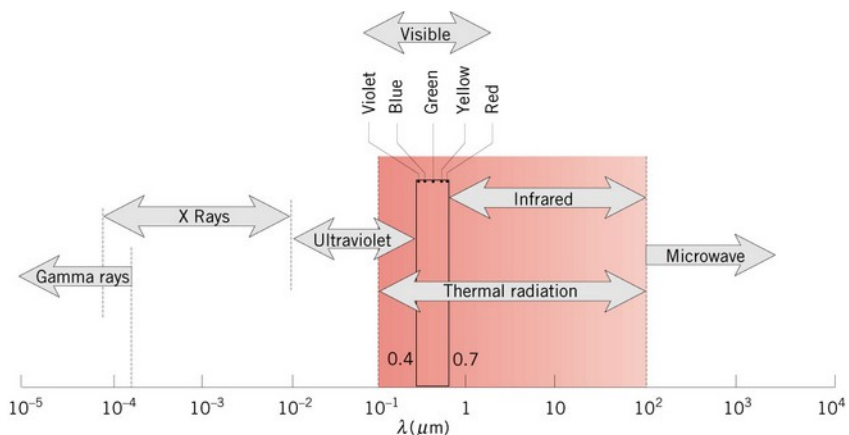
- A emissão de radiação de um gás ou um sólido (ou líquido) semi-transparente é um fenômeno volumétrico.
- Emissão de um sólido ou líquido opaco é um fenômeno de superfície.



Para um líquido ou sólido opaco, a emissão de radiação térmica tem origem de átomos ou moléculas dentro de 1 micrón da superfície.

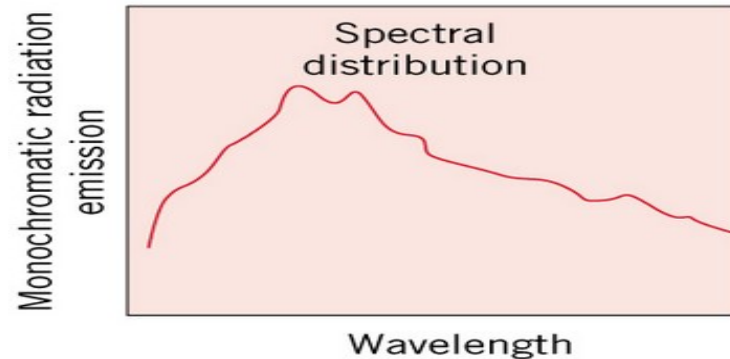
- Em alguns casos o fenômeno de radiação térmica pode ser explicado por considerar a radiação como partícula (**fótons**).
- Em outros casos a radiação comporta-se como onda eletromagnética

Espectro eletromagnético



- Radiação térmica é compreendida pelo infravermelho, visível e ultravioleta ($0.1 < \lambda < 100 \mu\text{m}$)

A intensidade de radiação emitida por uma superfície varia em relação ao comprimento de onda, produzindo uma distribuição espectral. Um componente monocromático de radiação é associado a um determinado comprimento de onda ou uma faixa restrita de comprimentos de onda.

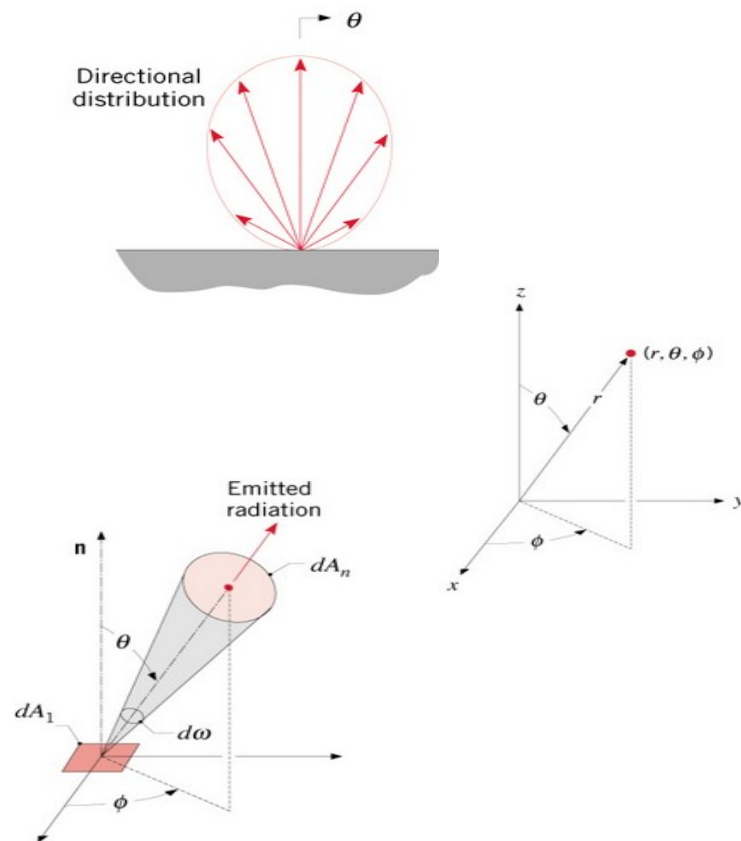


Intensidade de radiação e distribuição direcional

- Radiação é emitida em todas as direções e é associada a um hemisfério hipotético relacionado à superfície em questão, e é caracterizada por uma distribuição direcional.
- A direção da emissão pode ser representada por um sistema de coordenadas polares: o ângulo polar ou zênite Θ , e o âzimute Φ .
- A intensidade de radiação emitida por uma superfície dA_1 e sendo propagada em uma determinada direção (Θ, Φ) é quantificada em termos do ângulo sólido diferencial associado à direção.

$$d\omega \equiv \frac{dA_n}{r^2}$$

dA_n Elemento de superfície de uma esfera hipotética e normal à direção (Θ, Φ)



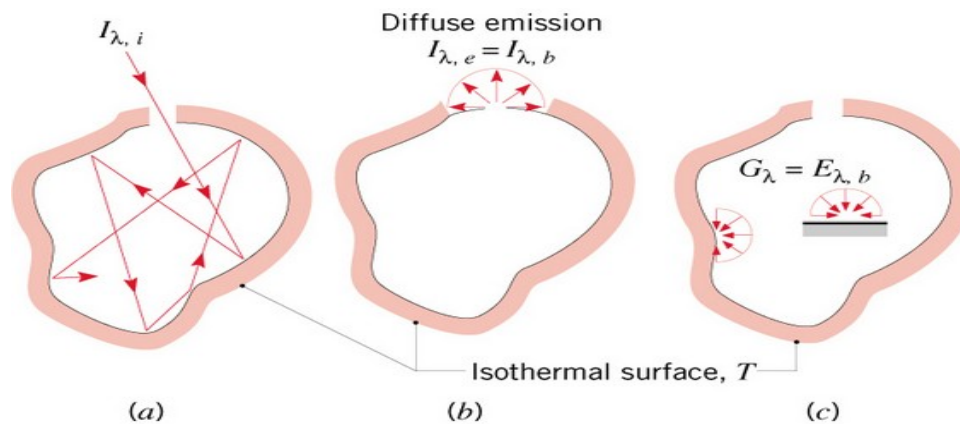
Radiação do corpo negro

- É uma idealização que fornece limites sobre a emissão ou absorção de radiação por uma matéria:
 - Para uma determinada temperatura e comprimento de onda, nenhuma superfície pode emitir mais radiação do que um corpo negro, que é o emissor ideal

Um corpo negro é um emissor difuso

Um corpo negro absorve toda a radiação incidente: é um absorvedor ideal

- A cavidade isotérmica:



- (a) Após múltiplas reflexões, toda a radiação que entra na cavidade é absorvida
- (b) A emissão da abertura é a máxima possível atingida para a temperatura associada à cavidade e é difusa

Distribuição espectral da radiação do corpo negro (distribuição de Planck)

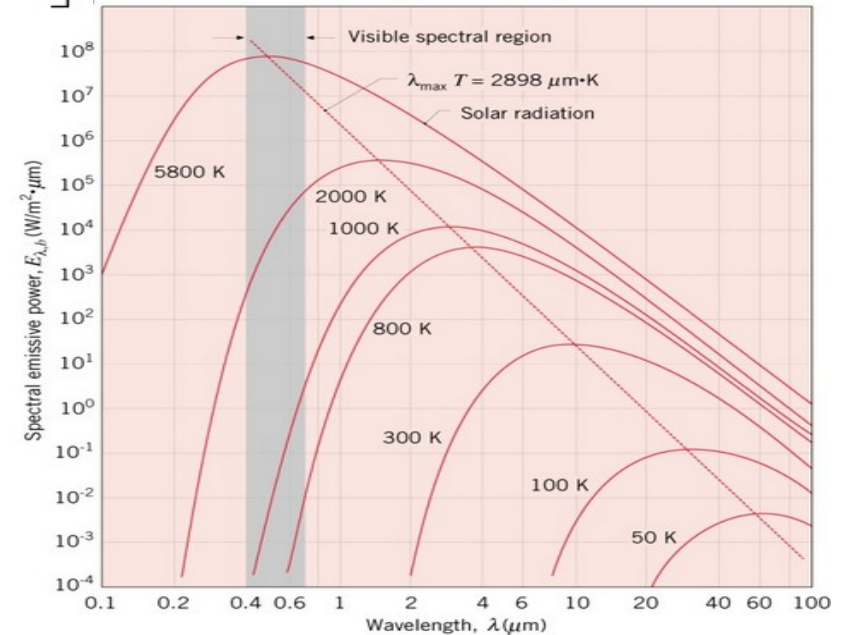
- A distribuição espectral da potencia emissiva do corpo negro é:

$$E_{\lambda,b}(\lambda, T) = \pi I_{\lambda,b}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 \left[\exp(C_2 / \lambda T) - 1 \right]}$$

$$C_1 = 3.742 \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4 / \text{m}^2$$

$$C_2 = 1.439 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$$

(constantes da equação)



$E_{\lambda,b}$ varia continuamente com λ e aumenta com T

A distribuição é caracterizada por um máximo no qual λ_{max} é dado pela lei de deslocamento de Wien:

$$\lambda_{max}T = C_3 = 2898 \mu\text{m} \cdot \text{K}$$

A fração da emissão total do corpo negro correspondente aos baixos comprimentos de onda aumenta com o aumento de T .

Lei de Stefan-Boltzmann e banda de emissão

- A potencia emissiva total de um corpo negro é obtida integrando-se a distribuição de Planck sobre todos os comprimentos de onda possíveis:

$$E_b = \pi I_b = \int_0^{\infty} E_{\lambda,b} d\lambda = \sigma T^4 \quad \longrightarrow \quad \text{A lei de Stefan-Boltzmann, onde}$$

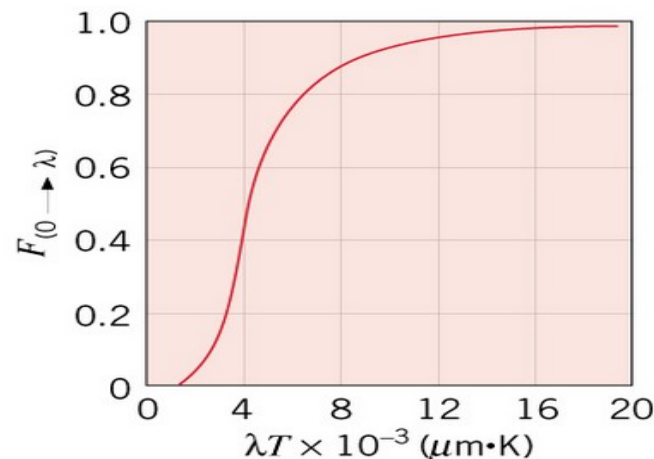
$$\sigma = 5.670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4 \rightarrow \text{constante de Stefan-Boltzmann}$$

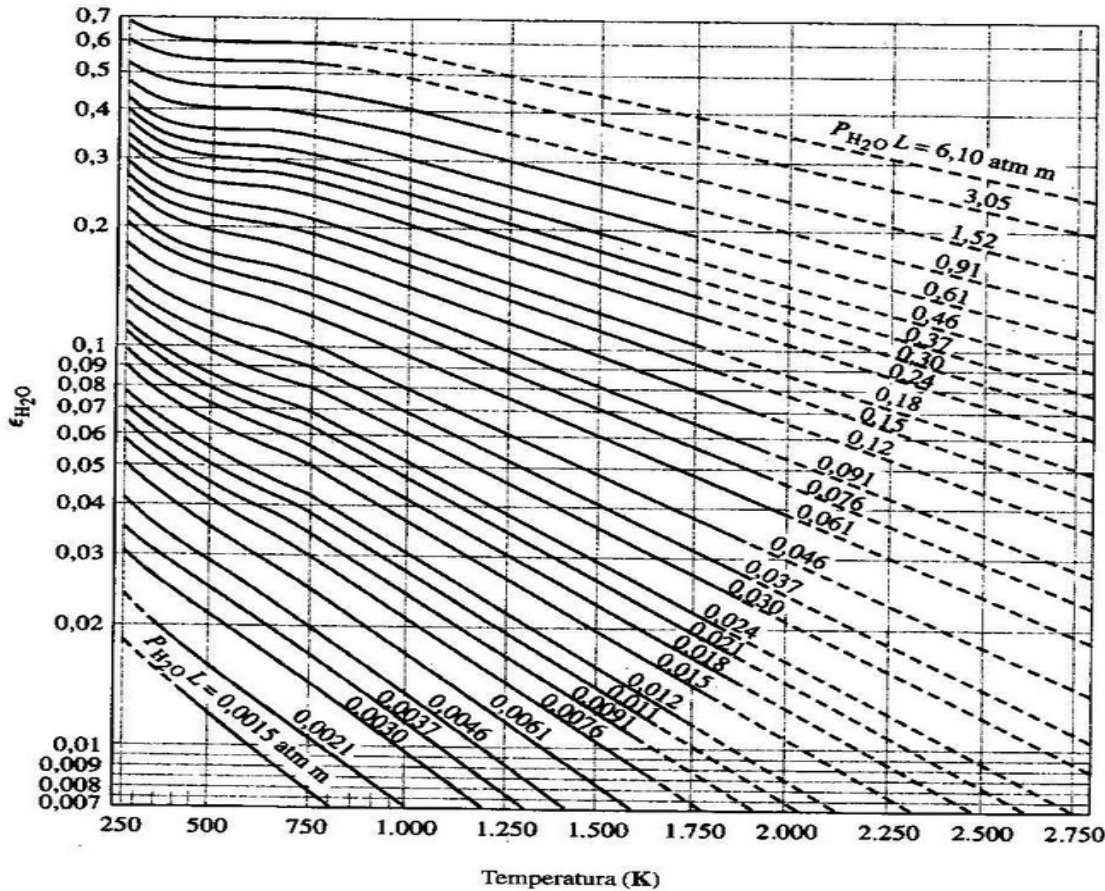
- A fração da emissão total do corpo negro que é relacionada a um intervalo de comprimento de onda ou banda ($\lambda_1 < \lambda < \lambda_2$) é:

$$F_{(\lambda_1-\lambda_2)} = F_{(0-\lambda_2)} - F_{(0-\lambda_1)} = \frac{\int_0^{\lambda_2} E_{\lambda,b} d\lambda - \int_0^{\lambda_1} E_{\lambda,b} d\lambda}{\sigma T^4}$$

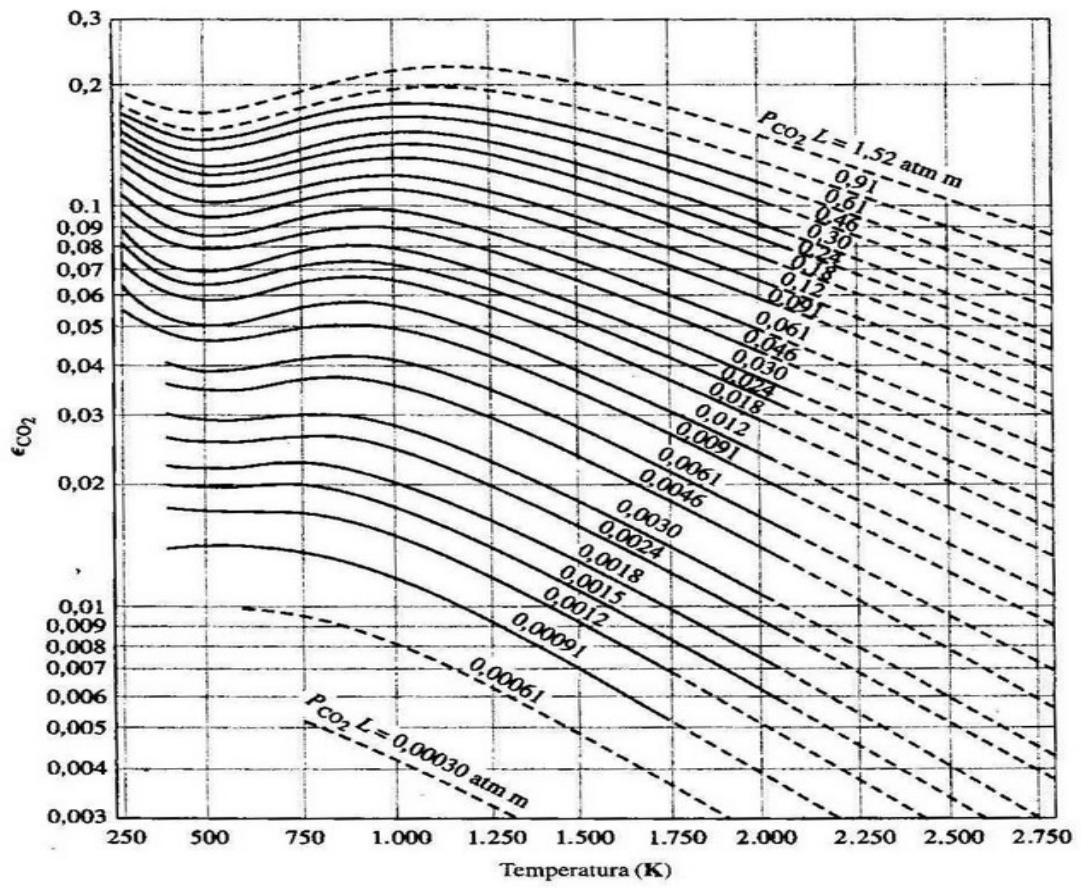
onde, em geral:

$$F_{(0-\lambda)} = \frac{\int_0^{\lambda} E_{\lambda,b} d\lambda}{\sigma T} = f(\lambda T)$$

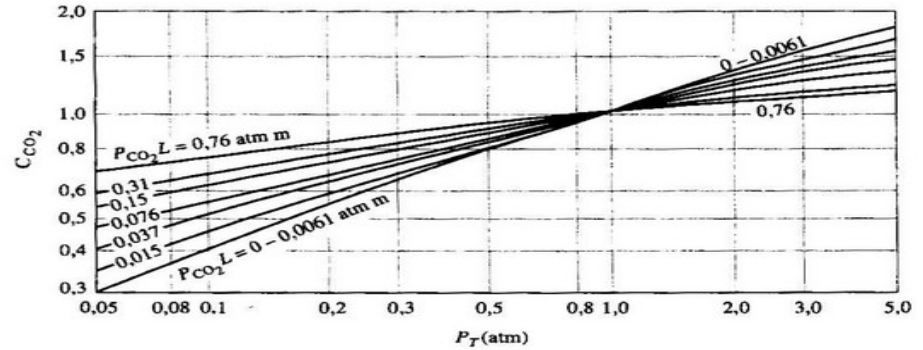




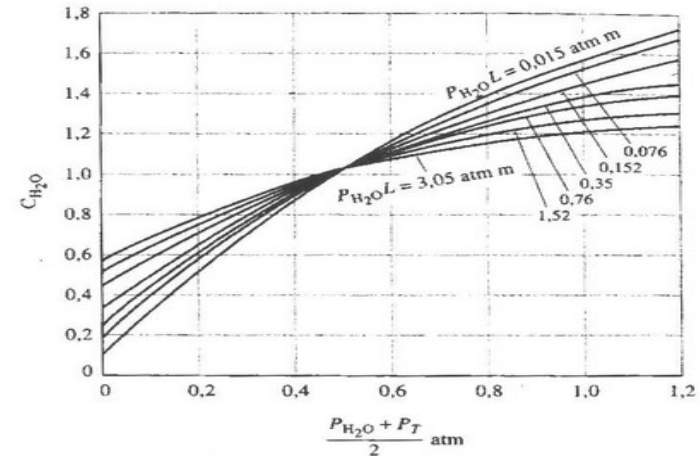
Emissividade
do vapor de
água



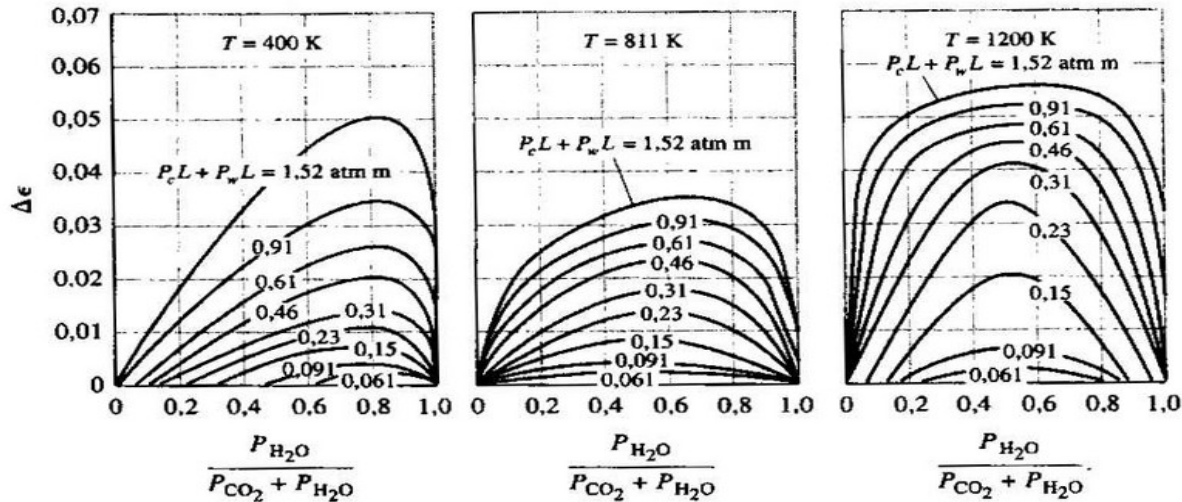
Emissividade do dióxido de carbono

CO_2


Fator de correção para
pressões diferentes de 1 atm

 H_2O


$$\varepsilon_g = \varepsilon_{CO_2} + \varepsilon_{H_2O} - \Delta\varepsilon$$



Correção para uma mistura de vapor de água e dióxido de carbono

Comprimento médio do feixe

$$L \approx 3,4 \frac{\text{volume}}{\text{área}}$$

Geometria	L
Esfera	$\frac{2}{3}$ (diâmetro)
Cilindro infinito	Diâmetro
Planos paralelos infinitos	2 (distância entre os planos)
Cilindro semi-infinito, irradiando para o centro da base	Diâmetro
Cilindro circular reto, altura igual ao diâmetro:	
irradiando para o centro da base	Diâmetro
irradiando para toda a superfície	$\frac{2}{3}$ (diâmetro)
Cilindro infinito de seção transversal semicircular, irradiando para um ponto no meio do lado plano	Raio
Paralelepípedos retangulares:	
cubo	$\frac{2}{3}$ (borda)
1:1:4 irradiando para face 1 x 4	0,9 (borda mais curta)
irradiando para face 1 x 1	0,86 (borda mais curta)
irradiando para todas as faces	0,891 (borda mais curta)
Espaço externo de um banco infinito de tubos com os centros em triângulos equiláteros:	
diâmetro do tubo = espaçamento	3,4 (espaçamento)
diâmetro do tubo = $\frac{1}{2}$ (espaçamento)	4,44 (espaçamento)

Absortividade para uma mistura de gases

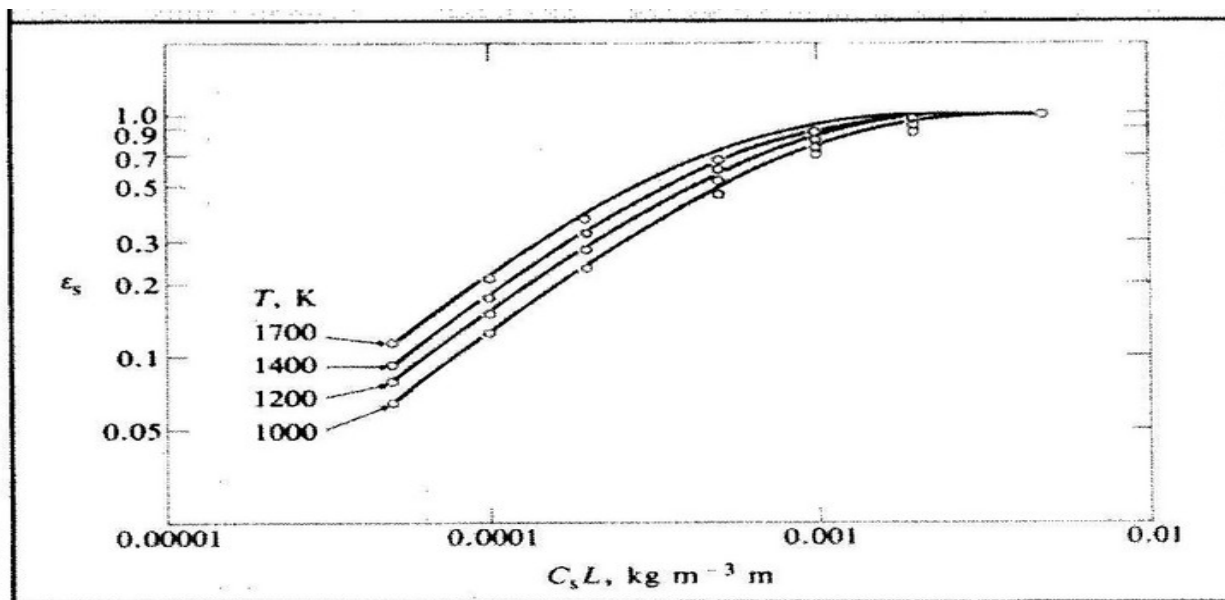
$$\alpha_g = \left(\frac{T_g}{T_s} \right)^n \varepsilon_g \left(T_s, pL \frac{T_s}{T_g} \right)$$

$n=0,65$ para CO_2

$n=0,45$ para H_2O

$$\alpha_m = \alpha_{\text{CO}_2} + \alpha_{\text{H}_2\text{O}} - \Delta\varepsilon$$

Emissividade para uma nuvem de fuligem



Emissividade para uma mistura de gases e fuligem:

$$\epsilon_m = \epsilon_g + \epsilon_s - \epsilon_g \epsilon_s$$

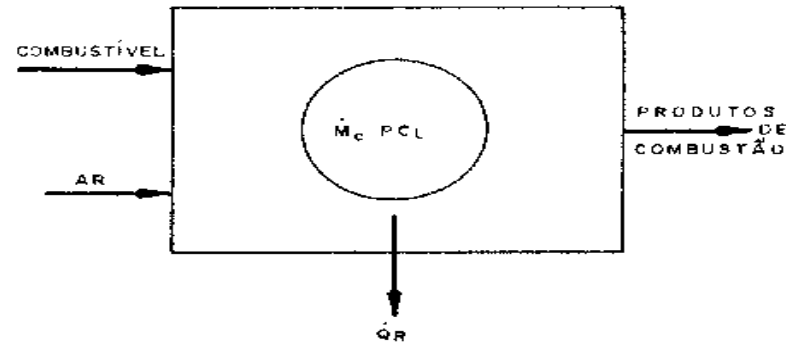
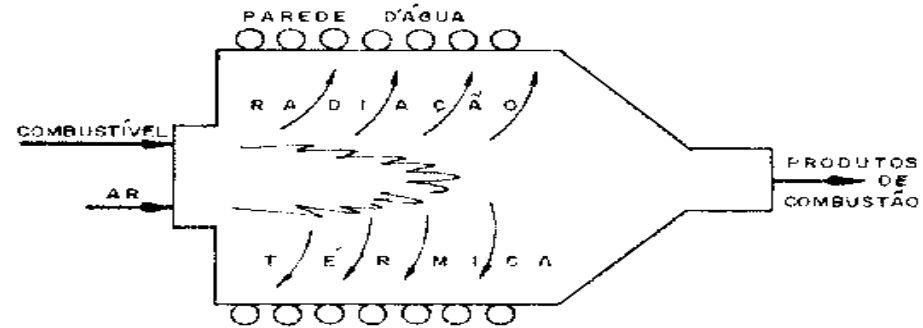
Balanço de massa e energia em uma fornalha

energia que entra = energia que sai

$$\dot{m}_c PC_i + \dot{m}_c \Delta h_c + \dot{m}_{ar} \Delta h_{ar} = \dot{Q}_r + \dot{m}_{prod} \Delta h_{prod}$$

sendo que:

$$\Delta h = \int_0^t C_p dT = \bar{C}_p (T_t - T_0)$$



$$\dot{Q}_R = \frac{\sigma (T_f^4 - T_s^4) A}{\sum R_T}$$

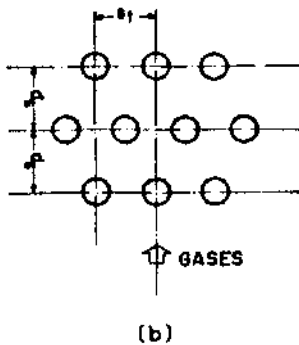
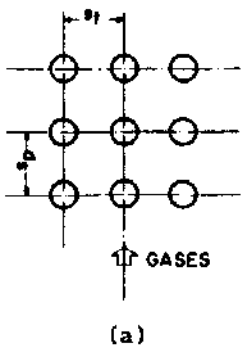
Calor transferido por radiação na fornalha

$$\sum R_T = \frac{1 - \epsilon_1}{\epsilon_1} + \frac{1}{F_{1g} \alpha_g}$$

ϵ_1 : emissividade da superfície

α_g : emissividade dos gases+fuligem

Feixe de convecção



$$Nu = C_1 Re^n Pr^m \left(\frac{Pr}{Pr_s} \right)^{0,25}$$

Arranjo	Faixa de Reynolds	C_1	n	m
alinhado	0 - 100	0,9	0,4	0,36
	100 - 1000	0,52	0,5	0,36
	1000 - 2×10^5	0,27	0,4	0,36
	2×10^5 x 2×10^6	0,033	0,8	0,4
Quicôncio	0 - 500	1,04	0,4	0,36
	500 - 1000	0,71	0,5	0,36
	1000 - 2×10^5	$0,35 (S_T/S_L)^{0,2}$	0,6	0,36
	2×10^5 - 2×10^6	$0,31 (S_T/S_L)^{0,2}$	0,8	0,36

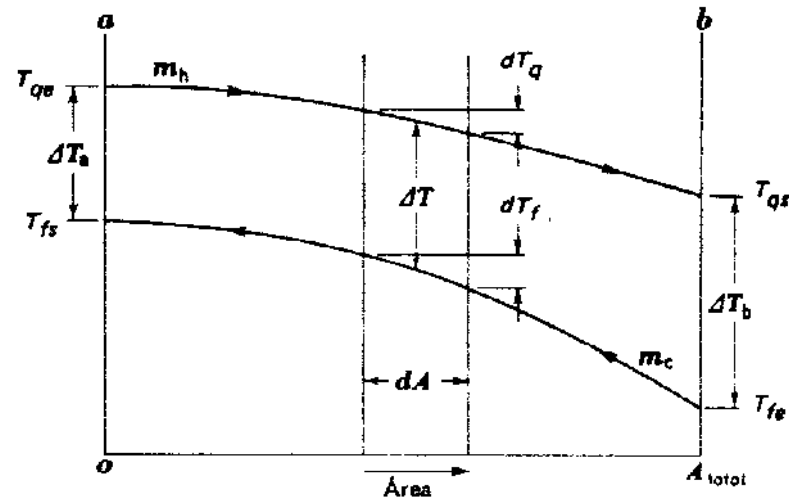
Correção para fileiras de tubos menor que 10

n° fileiras	1	2	3	4	5	6	7	8	9
f_b	0,7	0,82	0,87	0,91	0,93	0,95	0,97	0,98	0,99

$$\dot{Q}_c = U A \Delta t_m$$

onde:

$$\Delta t_m = dmlt = \frac{\Delta t_a - \Delta t_b}{\ln \frac{\Delta t_a}{\Delta t_b}}$$



Coeficiente global de troca de calor

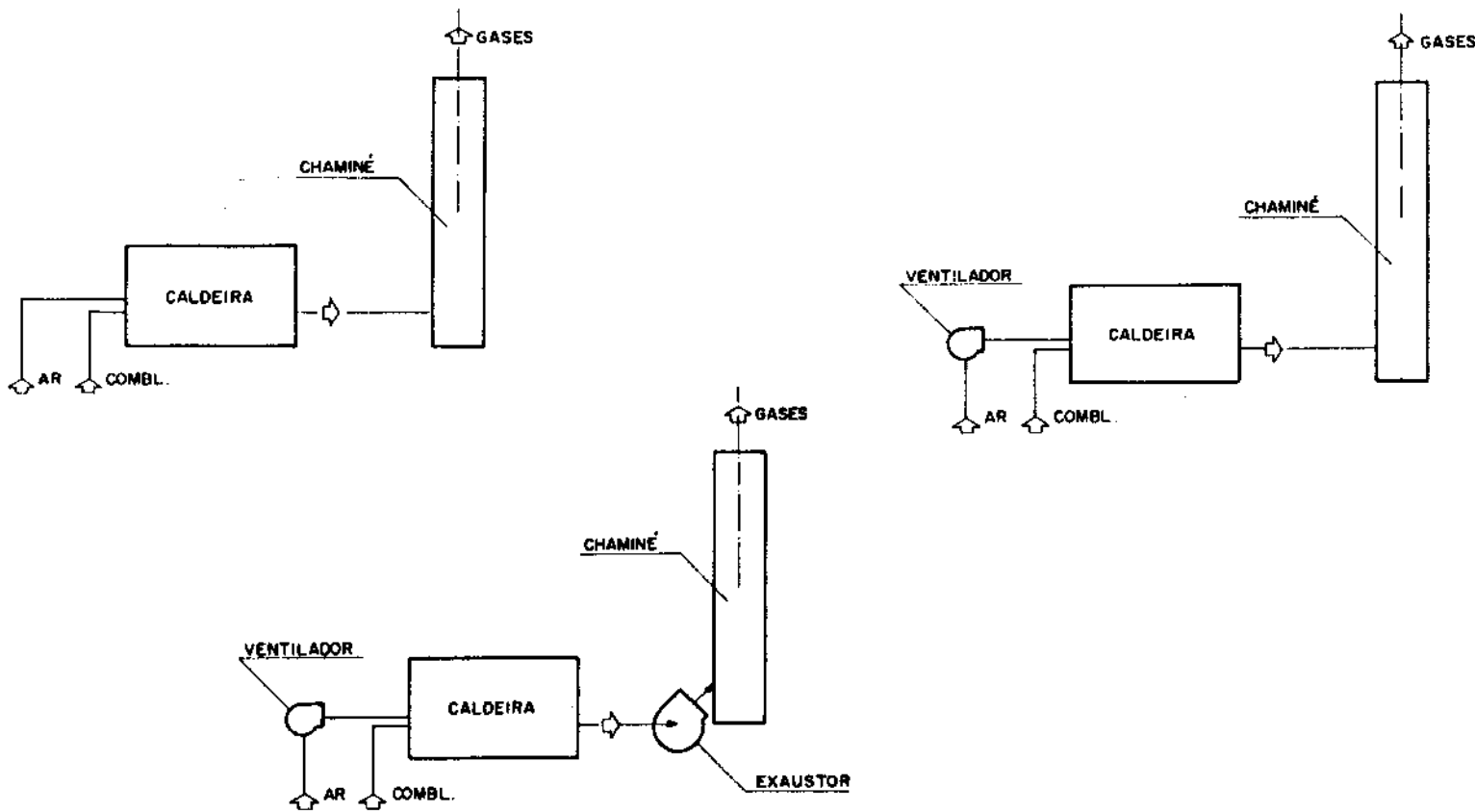
$$U = \frac{1}{R_i + R_e + R_{tubo}}$$

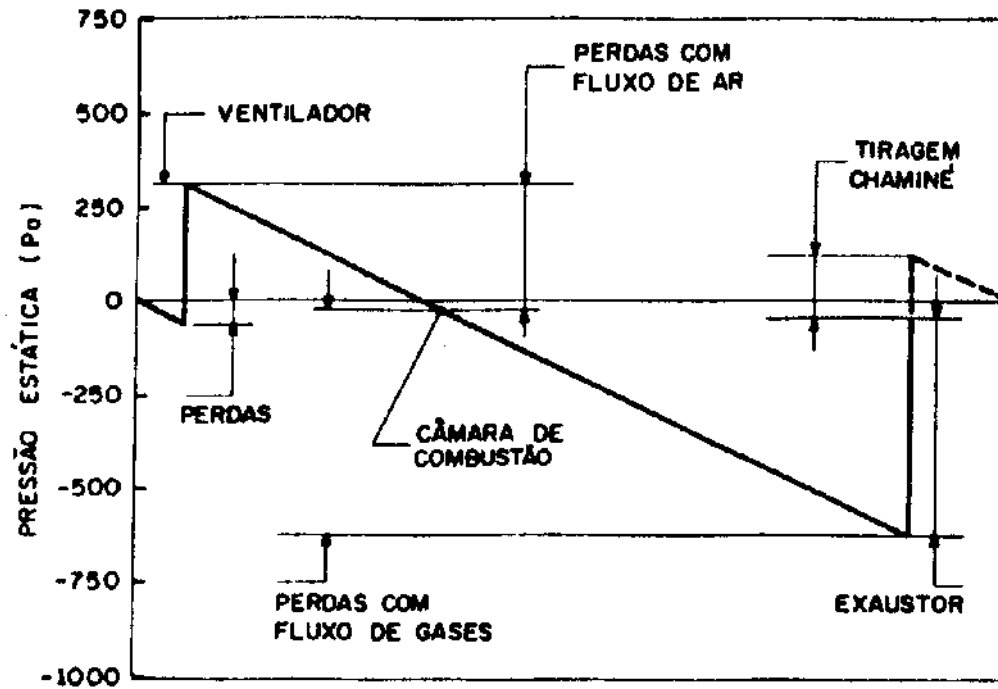
onde:

$$R_i = \frac{de}{hi di} \quad R_e = \frac{1}{he} \quad R_{tubo} = \frac{de \ln(de/di)}{2 k_t}$$

- Devem ser incluídas fator de incrustação ou (resistencia de depósito) devido à deposição de cinzas nas superfícies externas dos tubos

Circulação dos gases no gerador de vapor



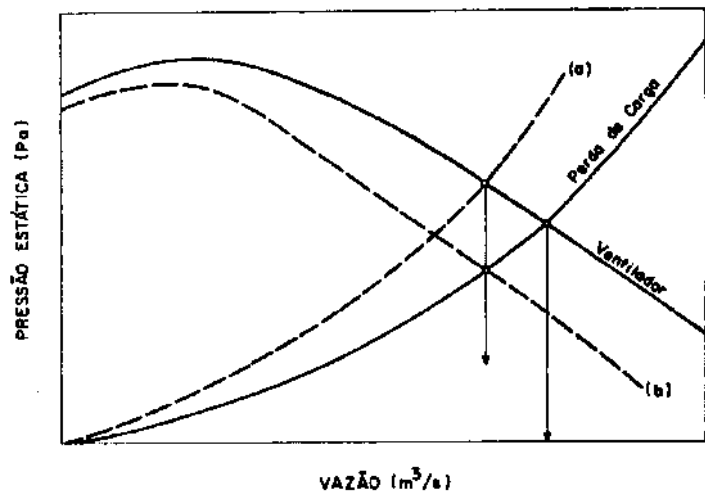


Curva de pressão no interior da caldeira com tiragem balanceada

Perda de carga no feixe de convecção

$$\Delta p = K \rho \frac{v^2}{2}$$

$$K = f N_f \left[\frac{\mu_p}{\mu_m} \right]^{0,14}$$



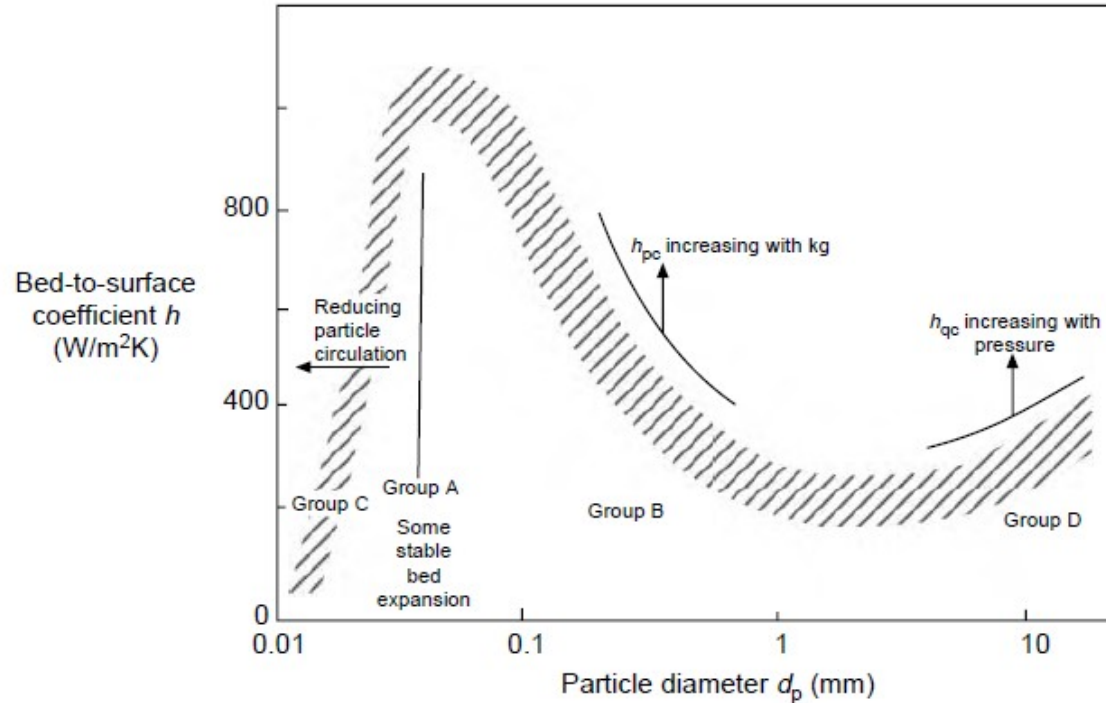
Tubos alinhados

$$f = \left[0,044 + \frac{0,08 \frac{S_p}{de}}{\left(\frac{S_t - de}{de} \right)^{0,43+1,13 \left(\frac{de}{S_p} \right)}} \right] \text{Re}_{\max}^{-0,15}$$

Tubos em quicôncio

$$f = \left[0,25 + \frac{0,118}{\left(\frac{S_t - de}{de} \right)^{1,08}} \right] \text{Re}_{\max}^{-0,16}$$

Transferência de calor em caldeiras de leito fluidizado borbulhante



correlação empírica de Andeen e Glicksman (1976)

$$h_o = 900(1 - \varepsilon) \frac{K_g}{d_t} \left[\frac{U d_t \rho_p}{\mu} \frac{\mu^2}{d_p^3 \rho_g^2 g} \right]^{0.326} Pr^{0.3} + \frac{\sigma(T_b^4 - T_w^4)}{\left[\frac{1}{e_b} + \frac{1}{e_w} - 1 \right] (T_b - T_w)} \quad (6.49)$$

α = Stefan–Boltzmann constant, 5.67×10^{-11} (kW/K⁴ m²)

T_b = temperature of the bed of EHE (K)

T_w = temperature of the tube wall (K)

e_w = emissivity of the tube wall

U = superficial gas velocity through the bubbling bed (m/sec)

ε = void fraction in the bed

Also, $(U d_p \rho_g / \mu_g) < 10$, and the emissivity of the bed e_b is found from the relation (Grace, 1982):

$$e_b = 0.5(1 + e_p)$$

where e_p is the emissivity of bed particles.

Transferencia de calor no leito fluidizado circulante

$$h = 5 \rho_{avg}^{0.391} T_b^{0.408}$$

densidade do leito kg/m^3
T do leito K

