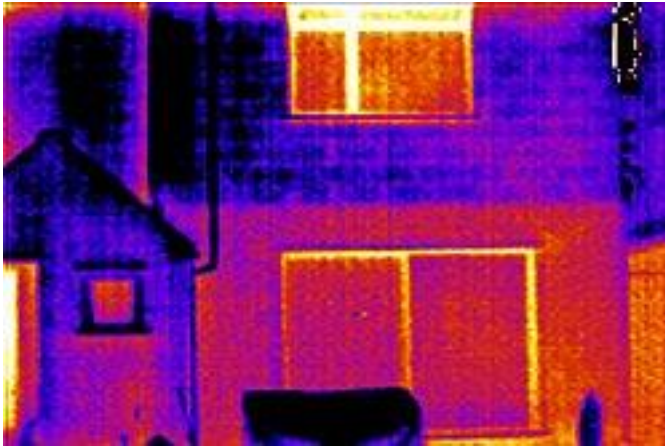
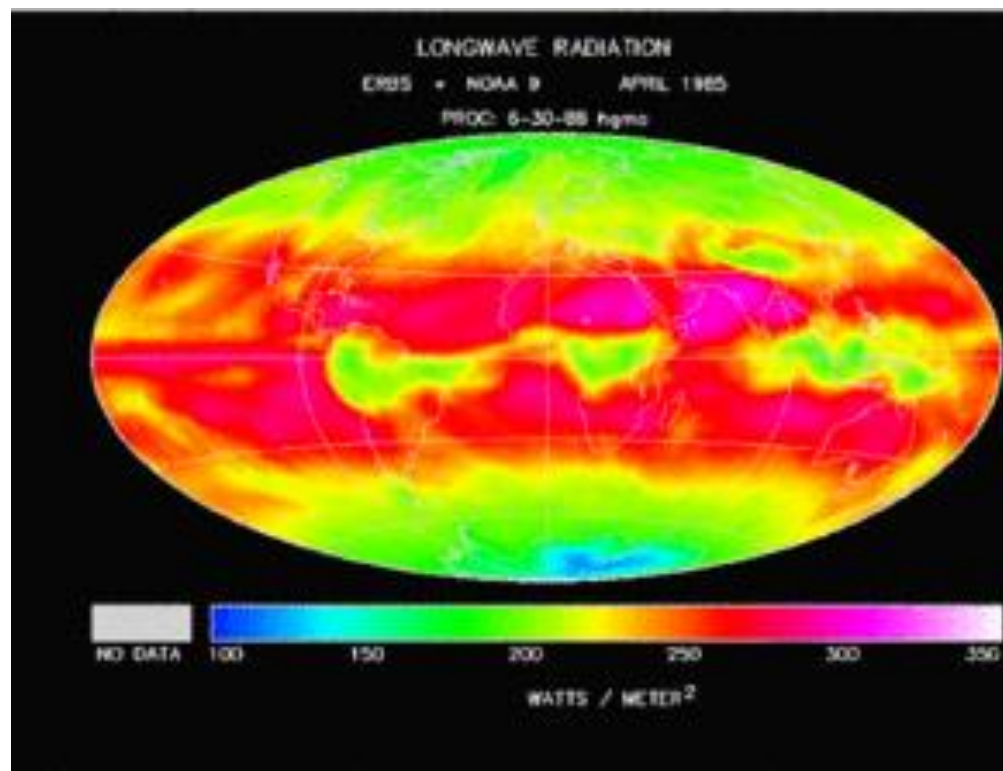


Radiação Térmica

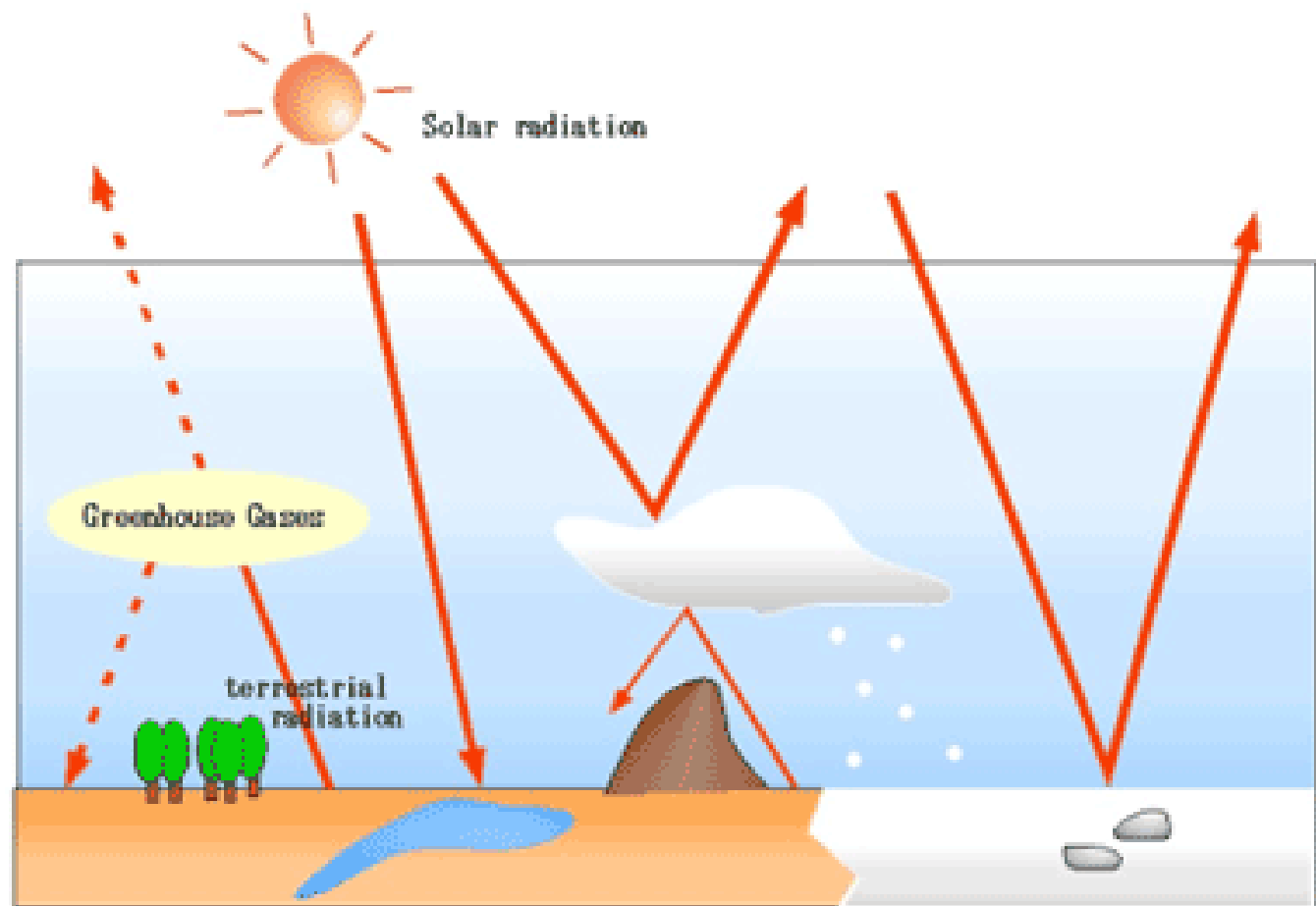


Conteúdos:

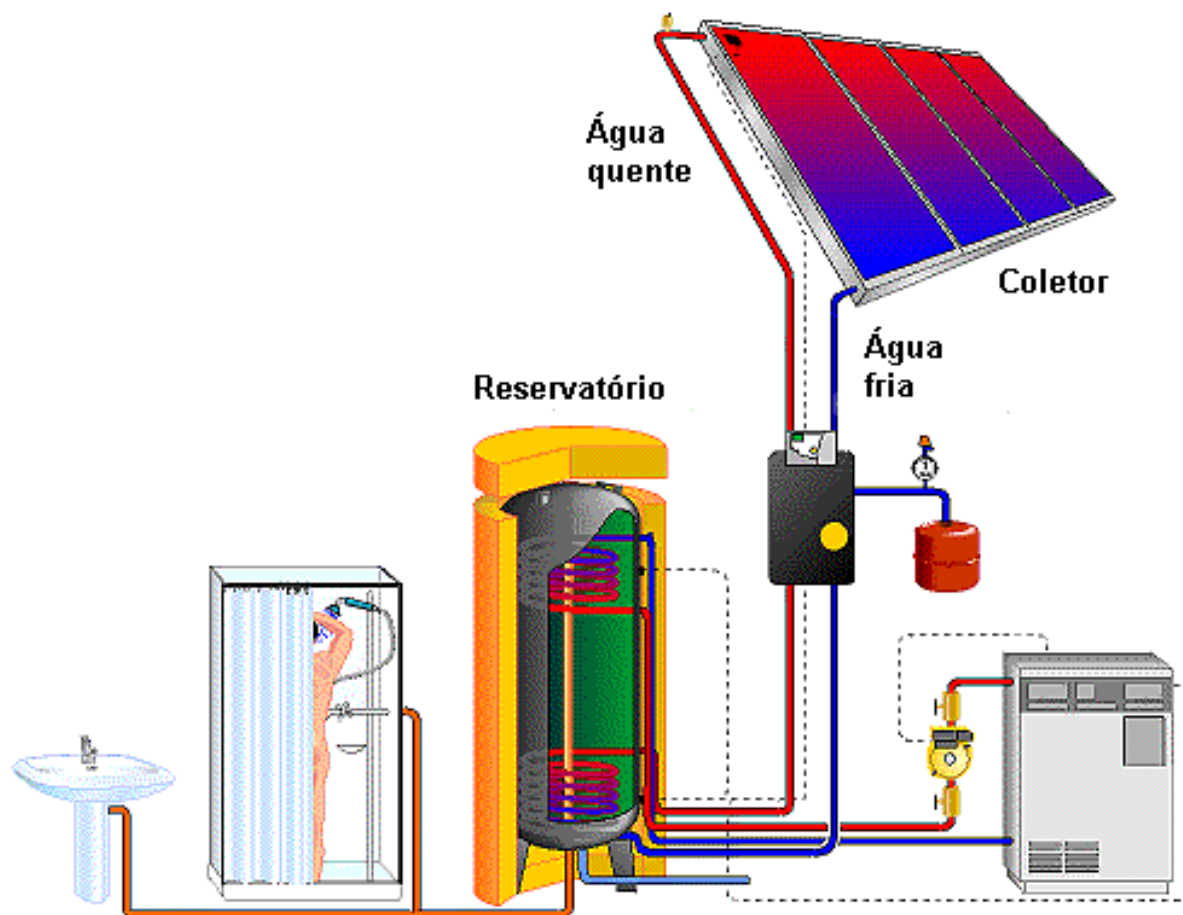
- Introdução a Radiação.
- Propriedades Radiativas.
- Troca de Calor entre Superfícies.

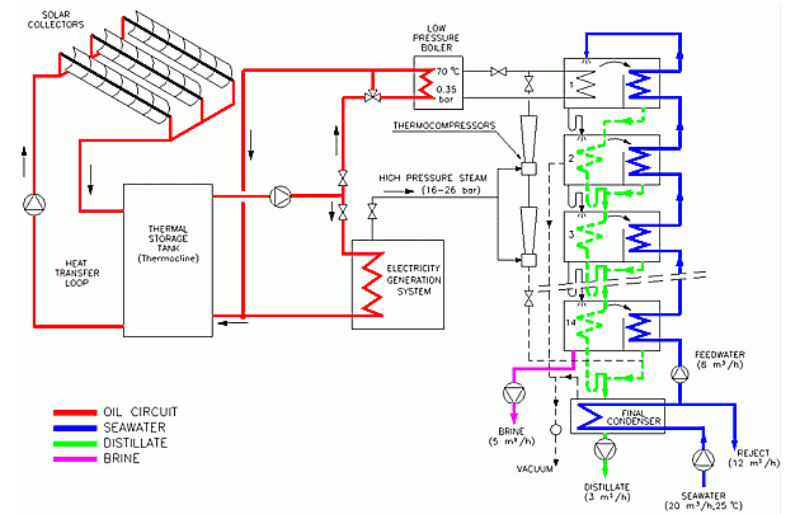


Efeito Estufa



Aquecimento Solar

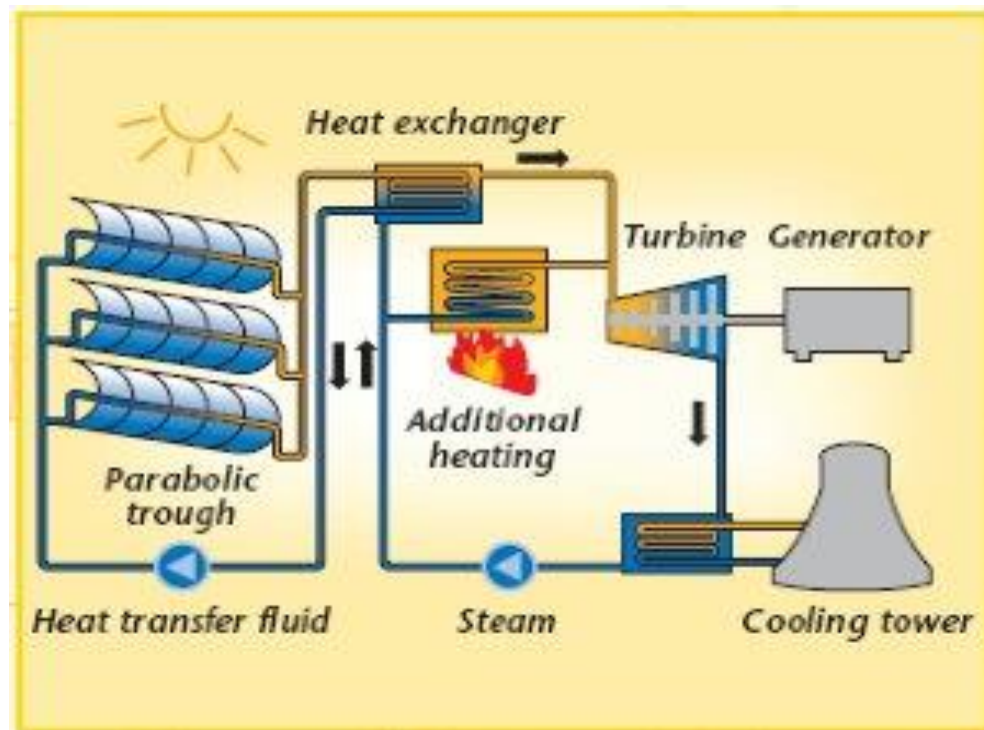




<http://www.psa.es/>

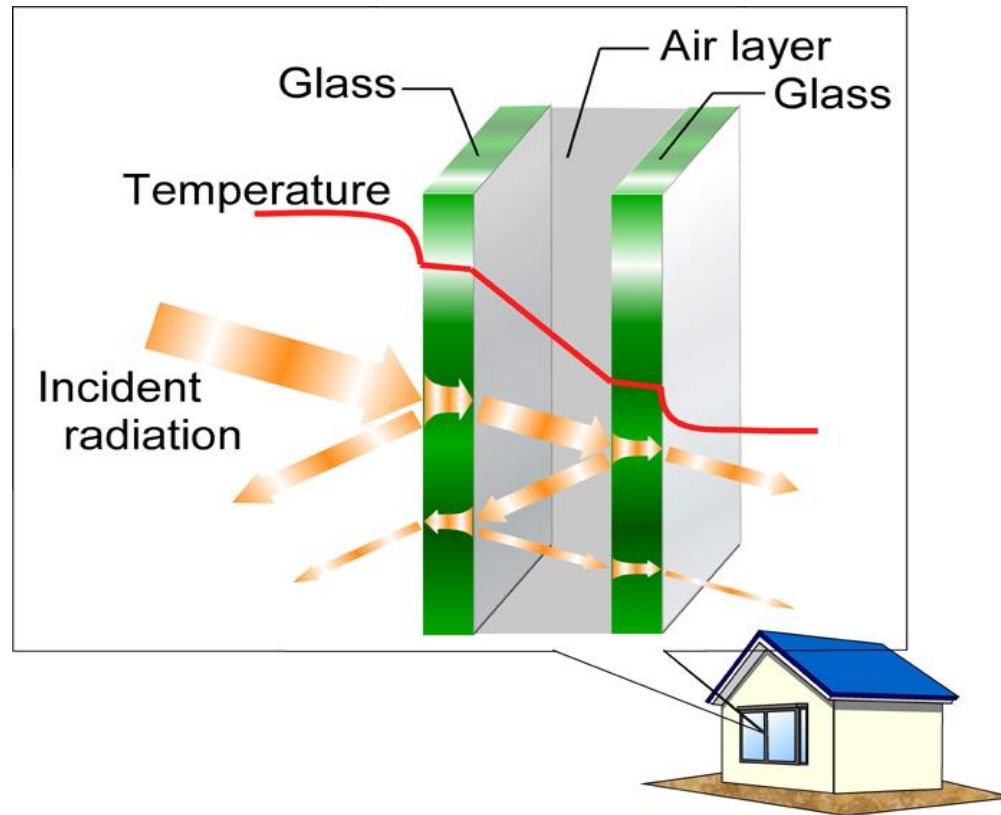
Nevada Solar Thermal Plant Breaks New Ground

350-acre solar power

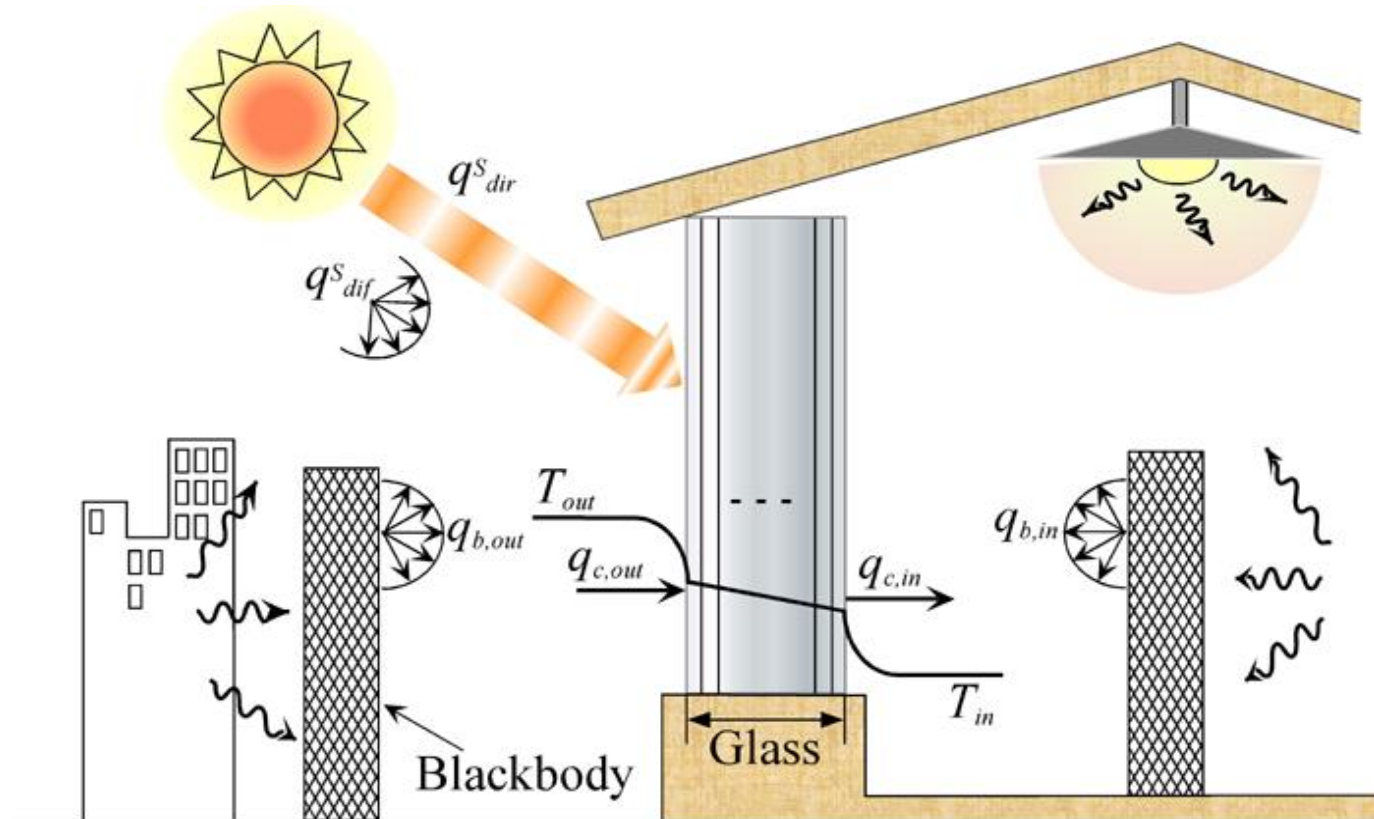


http://pesn.com/2006/02/12/9600234_Schott_solar_thermal_plant

Térmica de Edificações



Térmica de Edificações



Aquecimento Solar



Odeillo, nos Pirineus franceses

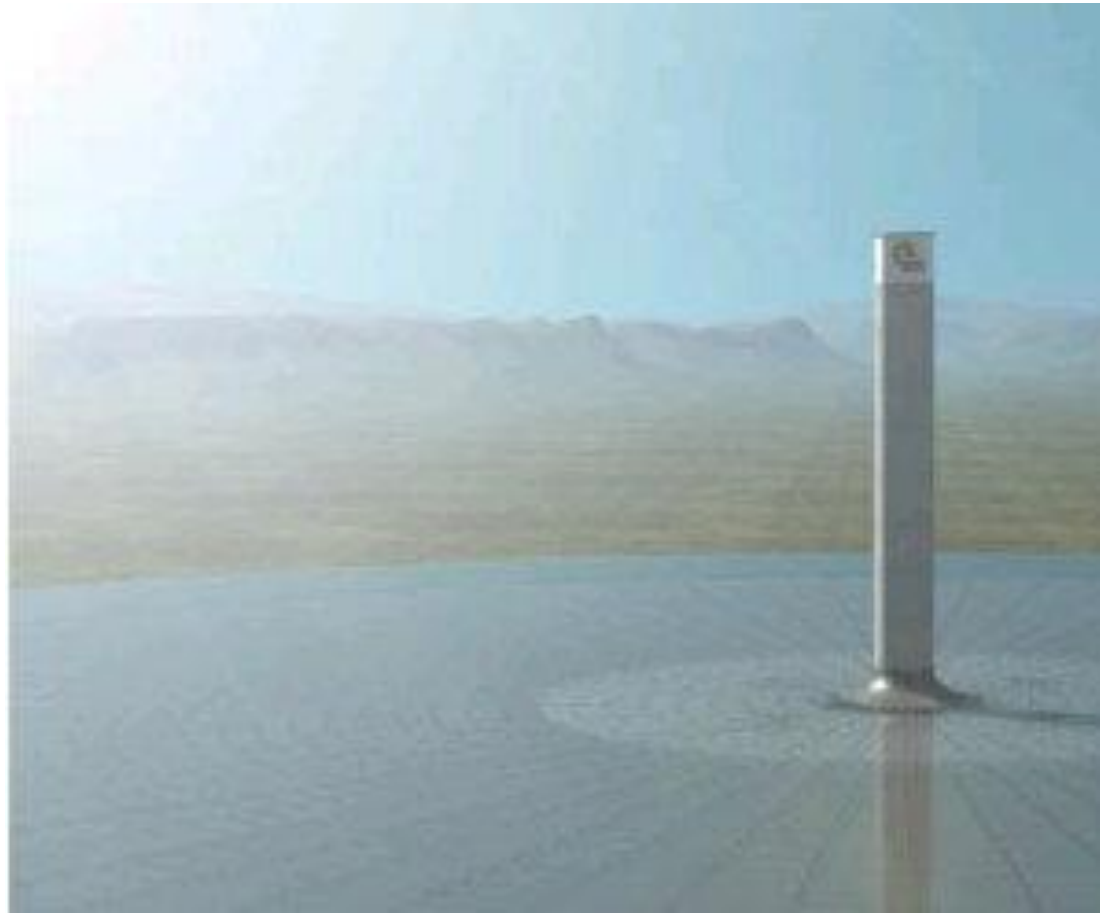


<http://www.solucar.es/>

Vista Aérea da Plataforma Solar de Almería

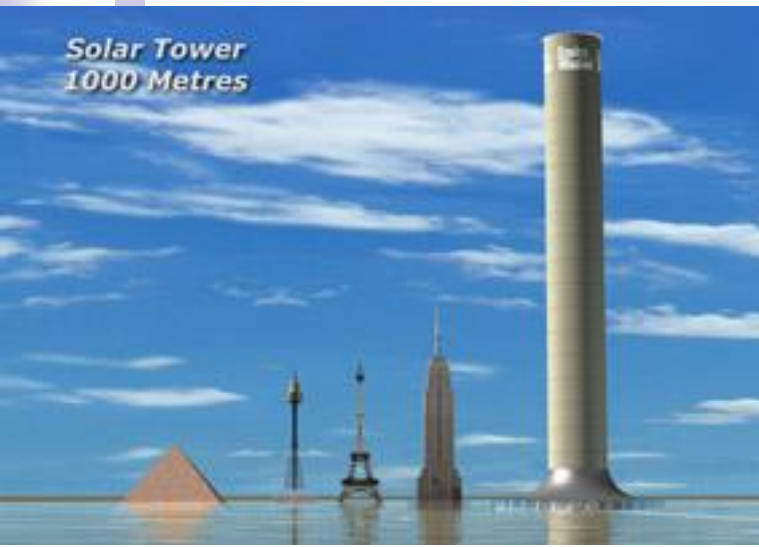


http://peswiki.com/index.php/Directory:Solar_Tower

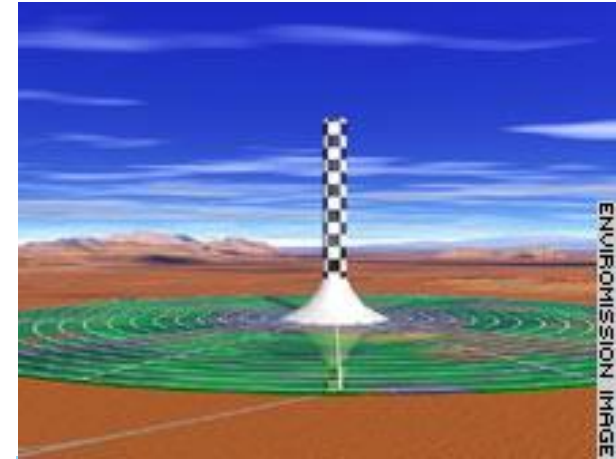


200 MW é a potência planejada de uma uma Torre Solar que tem sua construção prevista para 2006 na Austrália. at Burronga Station, in the Riverland area of New South Wales

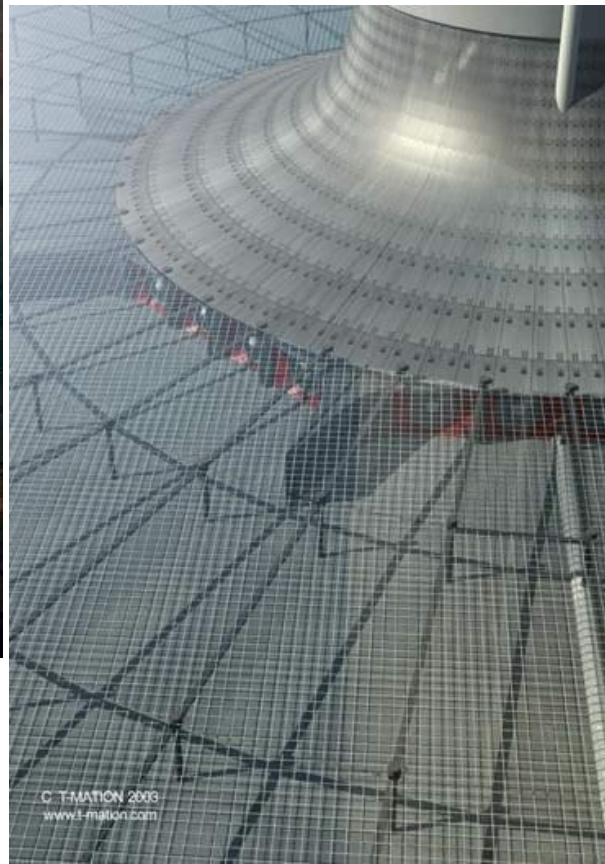
Solar Tower
1000 Metres



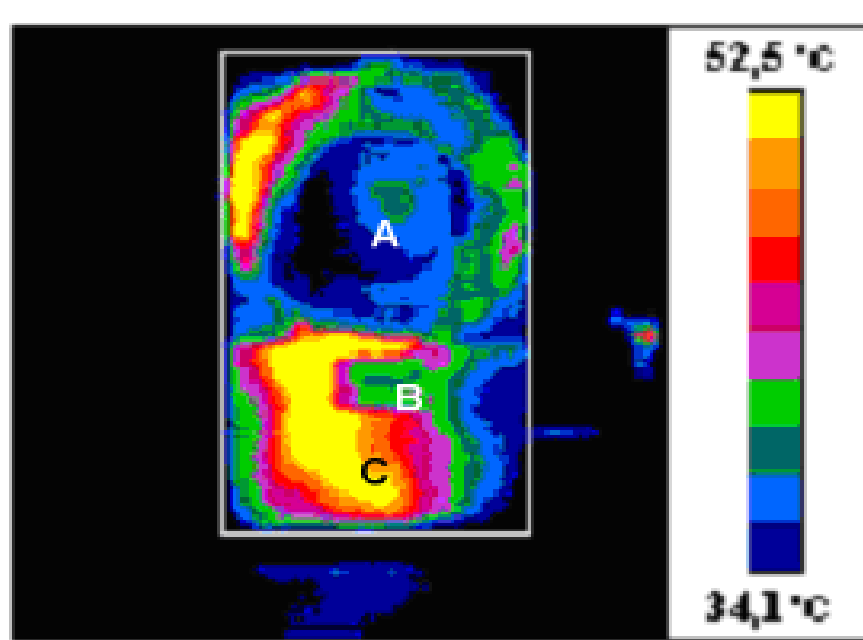
http://peswiki.com/index.php/Directory:Solar_Tower



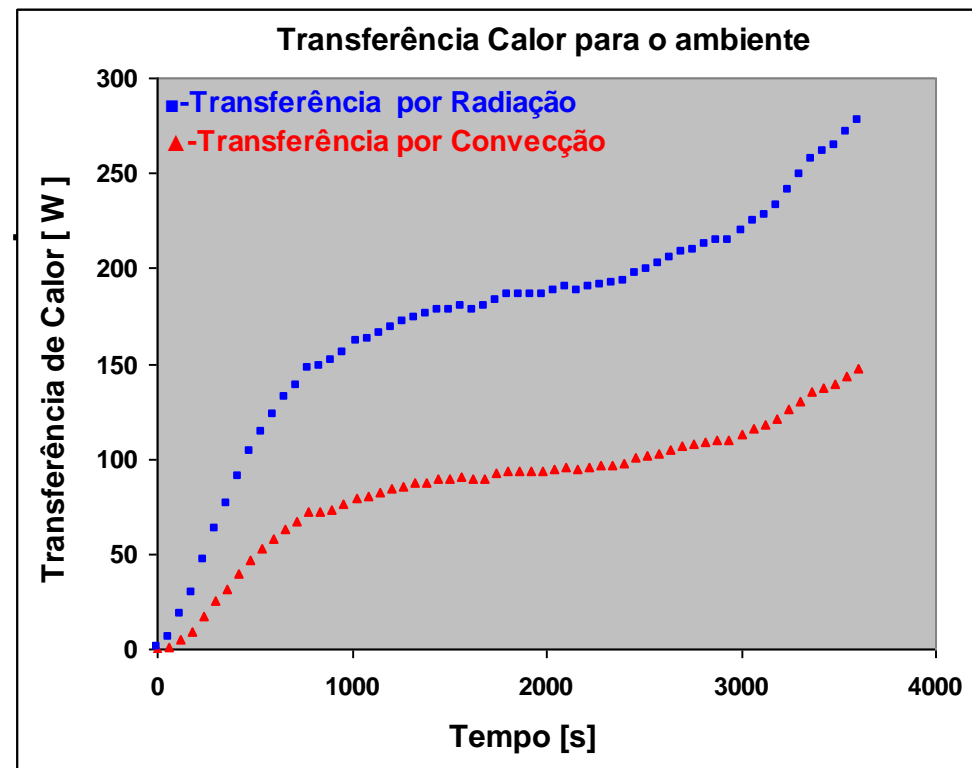
50kW prototype Solar Tower plant



15-MW plant project



A= Tambor de secagem
 B= Caixa Coletora de Fiapos
 C= Saída do ar proveniente do tambor de secagem



Crookes Radiometer and Otheoscope

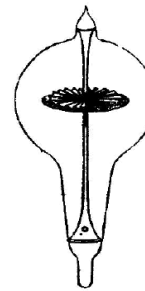
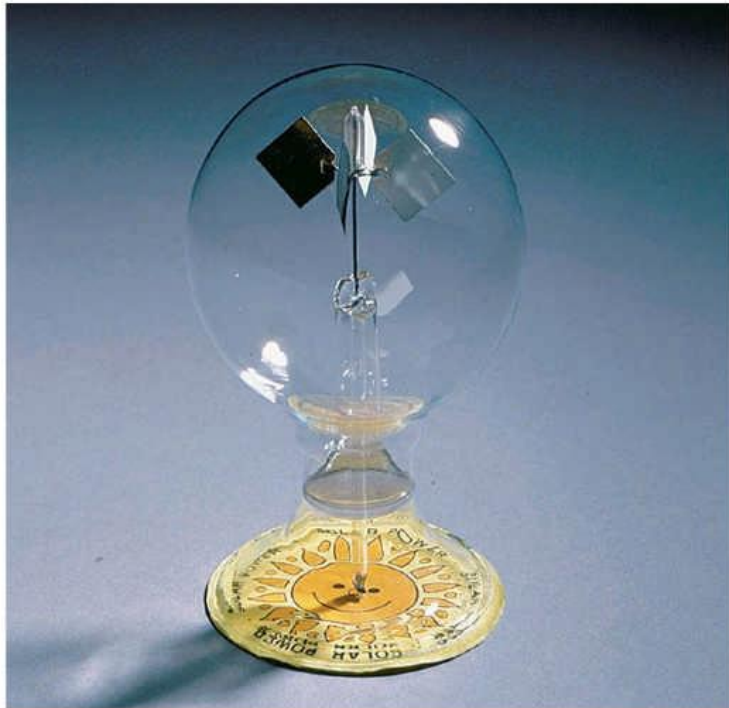


Figure 14

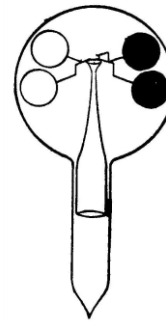
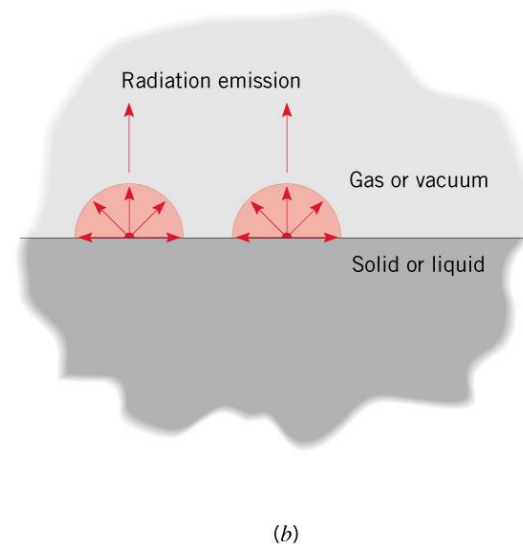
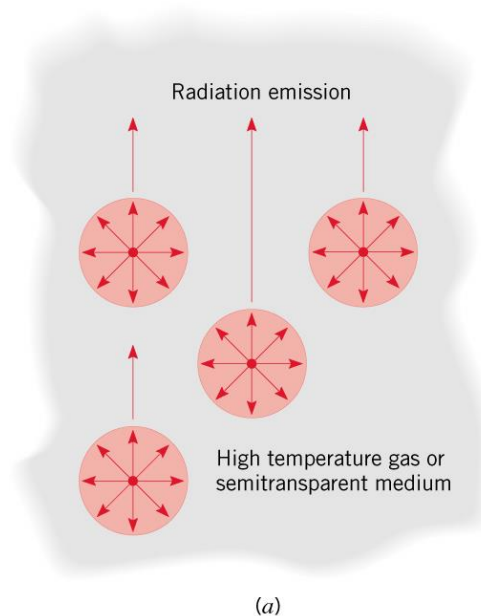
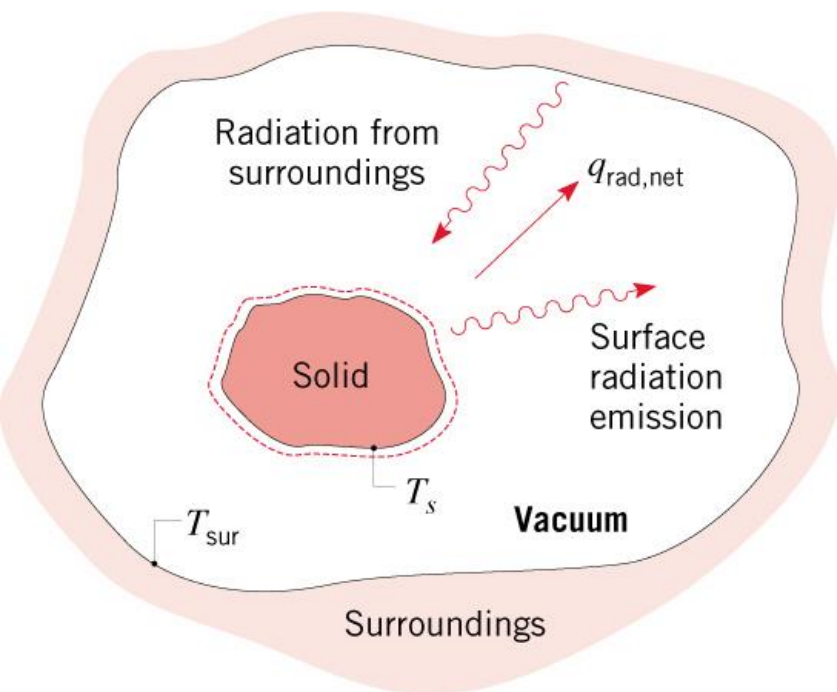


Figure 13



Considerações gerais

Fenômeno volumétrico



Fenômeno de superfície

A radiação emitida em sólidos e líquidos é originada nas moléculas localizadas em uma distancia inferior a $1\ \mu\text{m}$ da superfície exposta.

- Radiação → emissão de matéria;
- Teoria mais aceita → propagação de conjunto de partículas chamadas de fótons ou quanta.

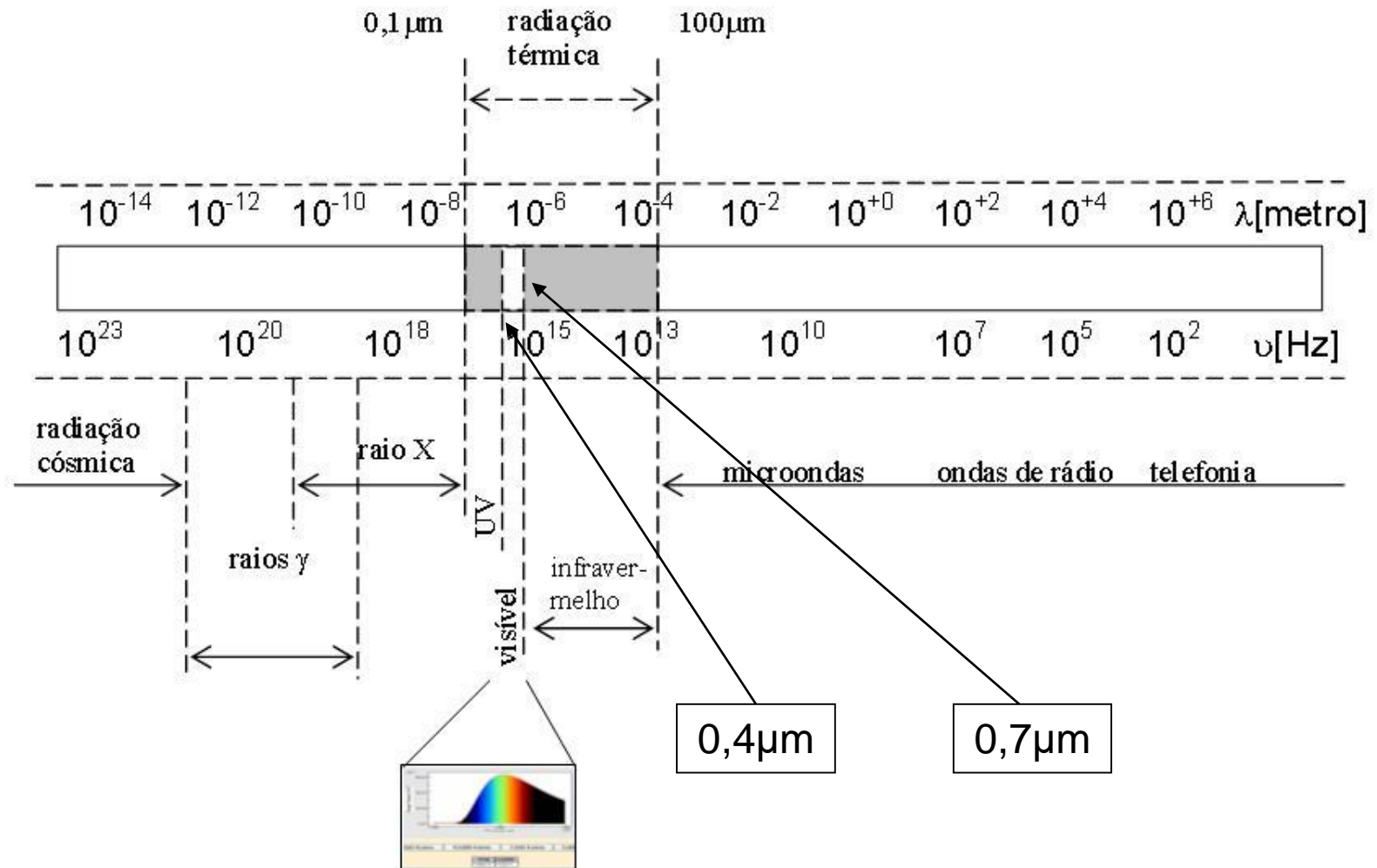
λ - Comprimento de onda ($\mu\text{m} \rightarrow 10^{-6}\text{m}$);

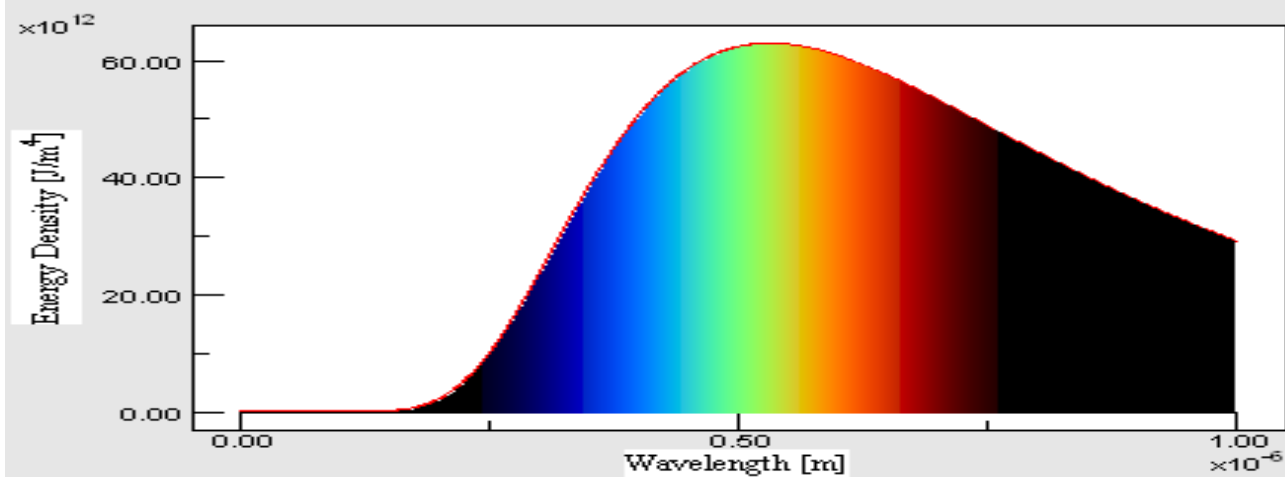
ν - Frequência da onda;

c - velocidade da luz (para o vácuo $2,998 \times 10^8 \text{ m/s}$).

$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

Transferência de Calor por Radiação





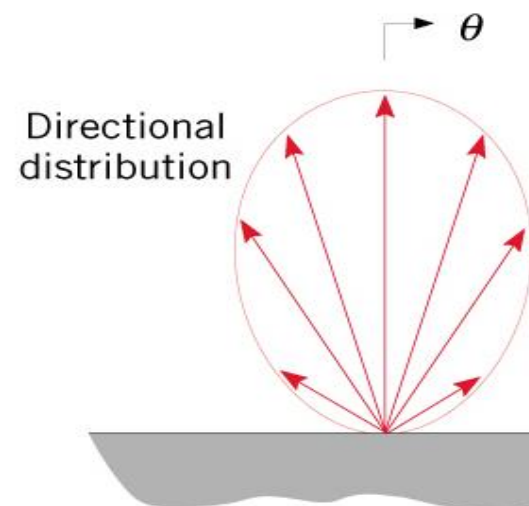
500 Kelvin

10,000 Kelvin

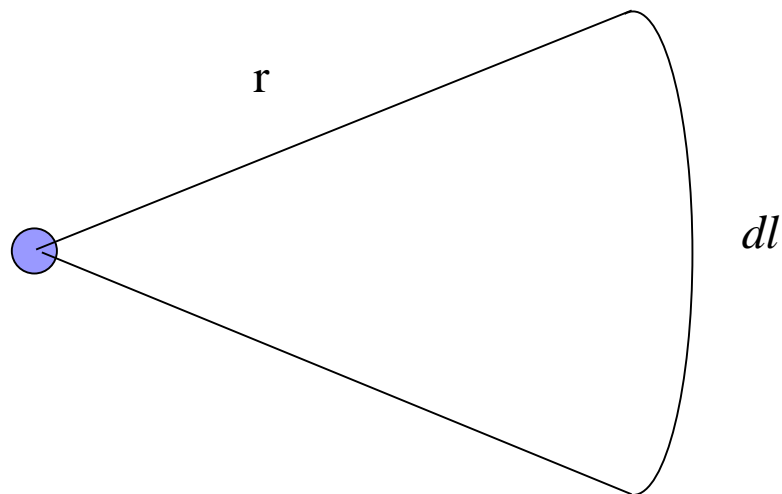
7,500 Kelvin

5,00

Temp	Lambda
+5463.77	+530.77

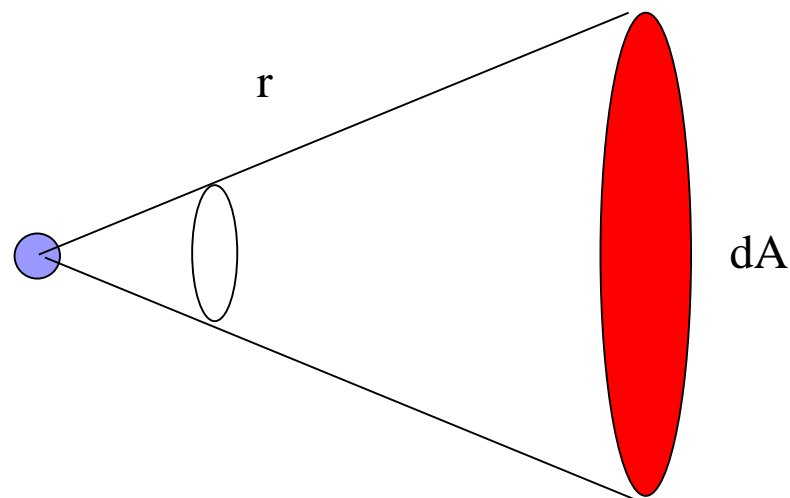


Ângulo Plano



$$d\alpha = \frac{dl}{r}$$

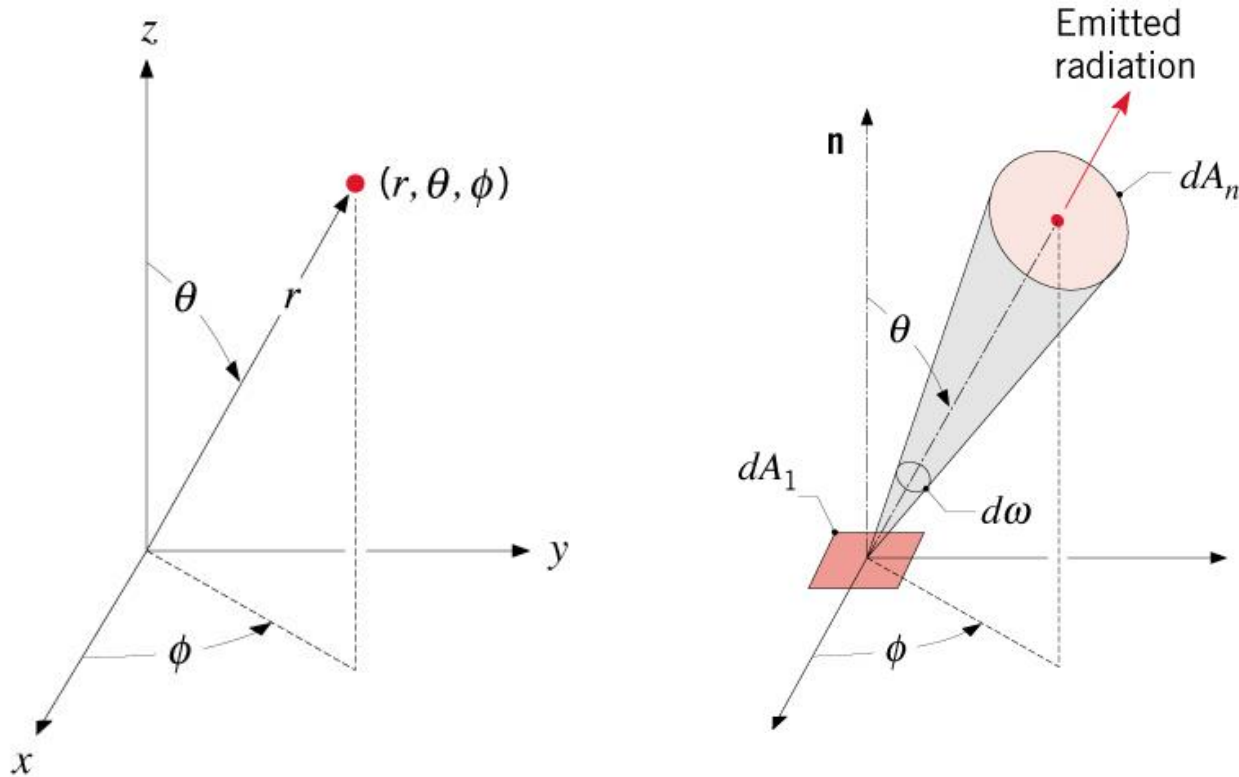
Ângulo Sólido



$$d\omega = \frac{dA}{r^2}$$

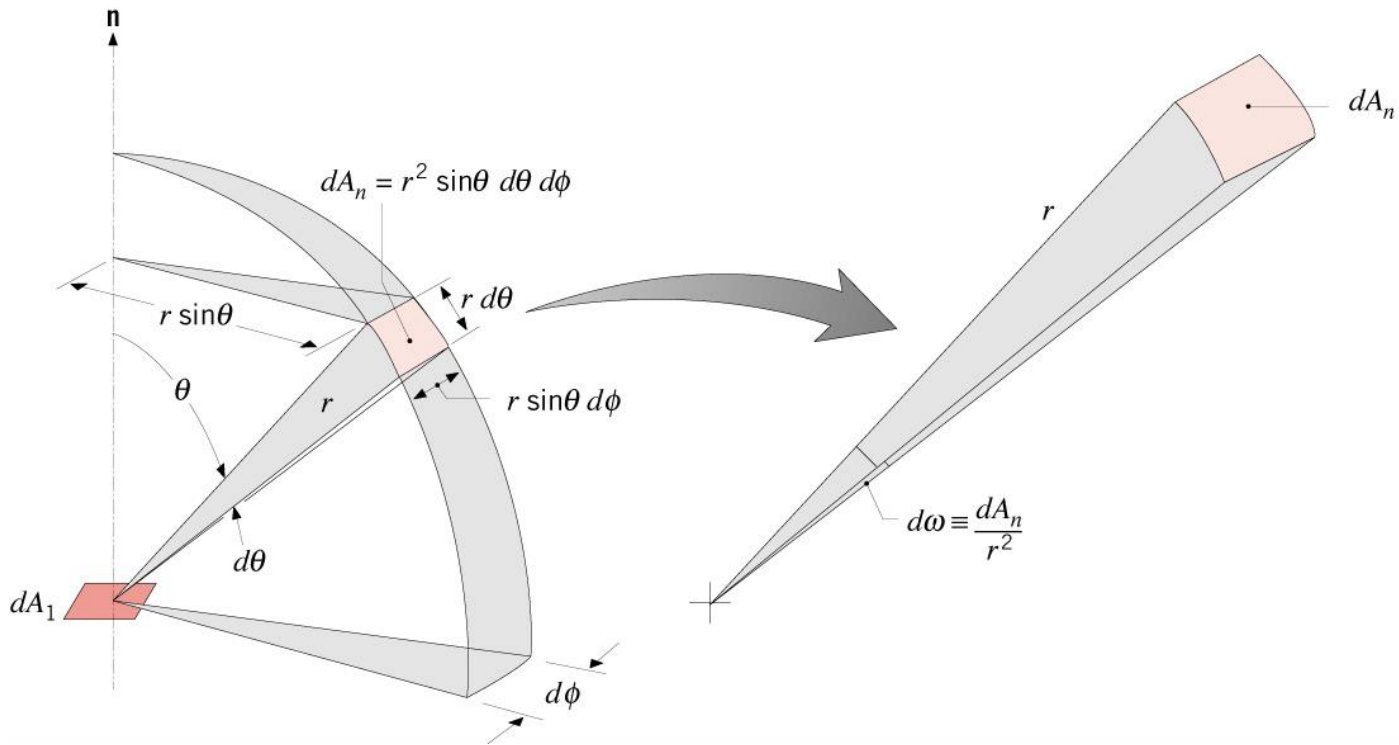
–O ângulo sólido tem unidade esteradianos (sr).

Considerações direcionais



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

- Coordenadas esféricas: r , ângulo polar (zenite) θ e ângulo de azimute, ϕ .



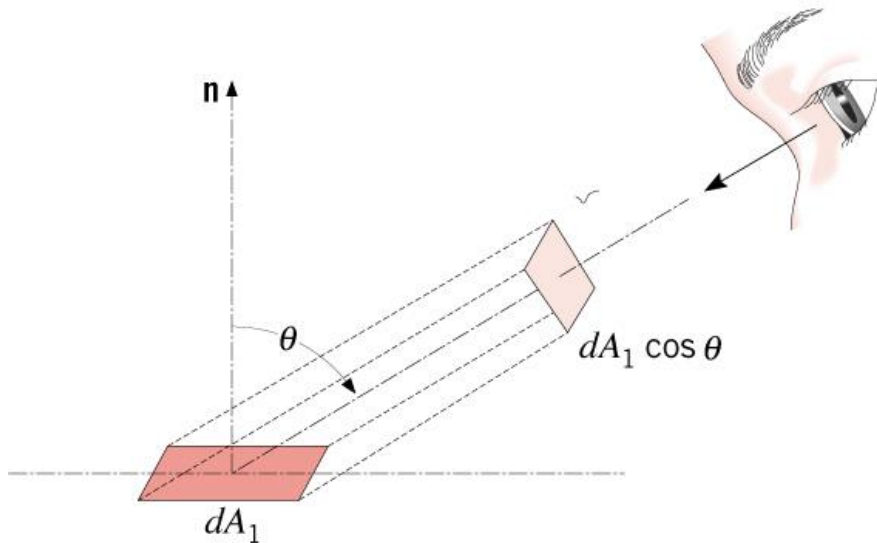
– O ângulo sólido de um hemisfério completo é:

$$d\omega = \sin\theta d\theta d\phi$$

$$\omega_{hem} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \sin\theta d\theta d\phi = 2\pi sr$$

Intensidade Espectral, $I_{\lambda,e}$

- A Intensidade espectral é a unidade utilizada para especificar fluxo radiativo (taxa transferida de energia radiativa por unidade de área normal) por unidade de ângulo sólido em um intervalo de comprimento de onda:



$$I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi) \equiv \frac{dq}{dA_1 \cos \theta d\omega d\lambda}$$

$$\frac{W}{(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)}$$

$$dq = I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi) dA_1 \cos \theta d\omega d\lambda$$

$$dq'' = I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi) \cos \theta \sin \theta d\omega d\lambda$$

Emissão

- O poder emissivo espectral é definido como a taxa na qual a radiação de comprimento de onda λ é emitido em todas as direções por unidade de comprimento de onda $d\lambda$ em torno de λ e por unidade de área superficial.

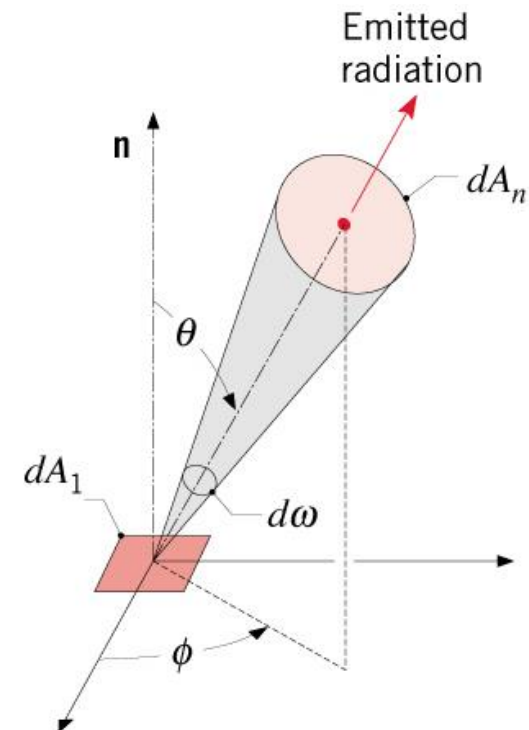
$$E_{\lambda}(\lambda) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi) \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi$$

- poder emissivo total

$$E = \int_0^{\infty} E_{\lambda}(\lambda) d\lambda$$

- Para uma superfície difusa – emissão isotrópica

$$E_{\lambda}(\lambda) = \pi I_{\lambda,e}(\lambda) \quad E = \pi I_e$$



Irradiação

- A irradiação espectral, G_λ ($W/m^2.\mu m$) é definida como a taxa na qual a radiação de comprimento de onda λ é incidente em uma superfície, por unidade de área de superfície e por unidade do intervalo de comprimento de onda $d\lambda$ em torno de λ .

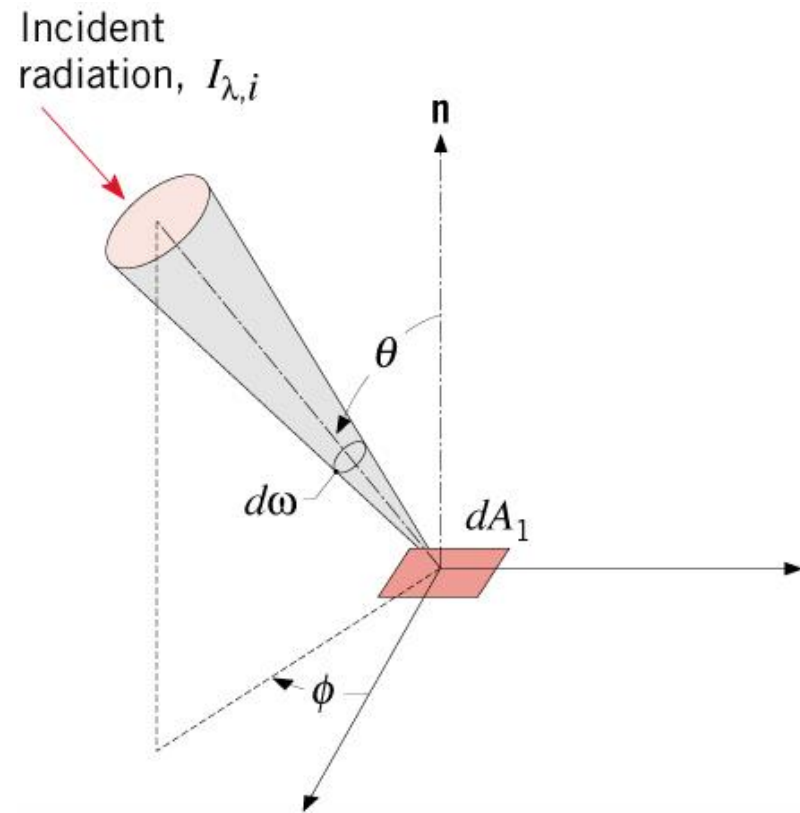
$$G_\lambda(\lambda) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda,i}(\lambda, \theta, \phi) \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi$$

- Irradiação total

$$G = \int_0^\infty G_\lambda(\lambda) d\lambda$$

- Para radiação incidente difusa

$$G_\lambda(\lambda) = \pi I_{\lambda,i}(\lambda) \quad G = \pi I_i$$



Radiosidade

- A radiosidade espectral, J_λ ($W/m^2.\mu m$) representa a taxa na qual a radiação de comprimento de onda λ deixa a área unitária da superfície, por unidade do intervalo de comprimento de onda $d\lambda$ em torno de λ .

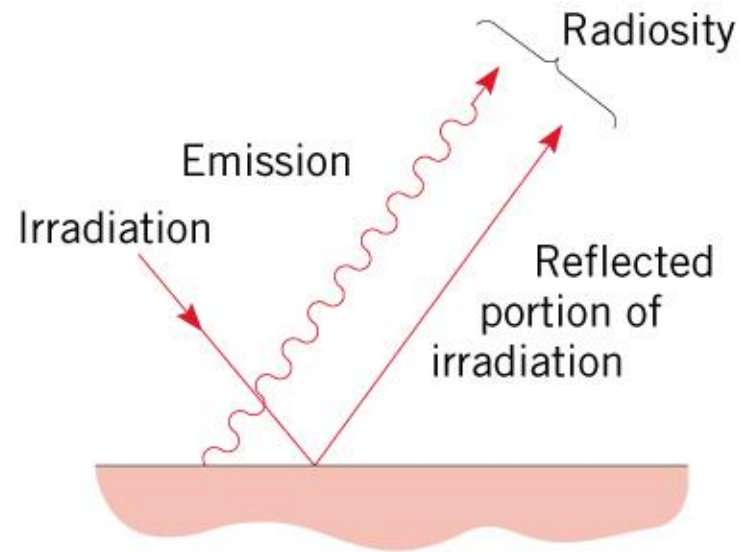
$$J_\lambda(\lambda) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda,e+r}(\lambda, \theta, \phi) \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi$$

- Radiosidade total

$$J = \int_0^\infty J_\lambda(\lambda) d\lambda$$

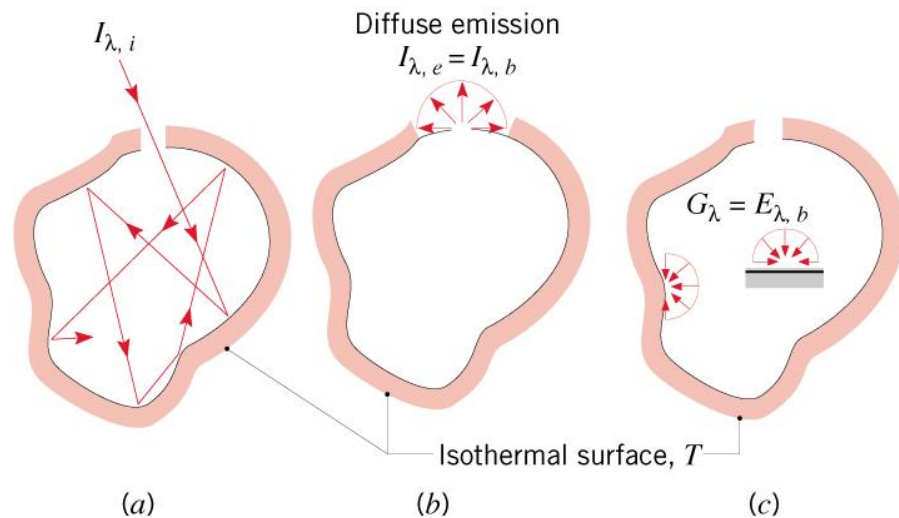
- Para superfície refletora difusa e emissora difusa

$$J_\lambda(\lambda) = \pi I_{\lambda,e+r}(\lambda) \quad J = \pi I_{e+r}$$



Radiação do corpo negro

- O corpo negro é uma superfície ideal que apresenta as seguintes propriedades:
 - (a) Um corpo negro absorve toda a radiação incidente, independente do comprimento de onda e da direção;
 - (b) Para uma temperatura e comprimento de onda dados, nenhuma superfície pode emitir mais energia do que um corpo negro.
 - (c) Embora a radiação emitida por um corpo negro seja função do comprimento de onda e da temperatura, ela é independente da direção. Isto é, o corpo negro é um emissor difuso.



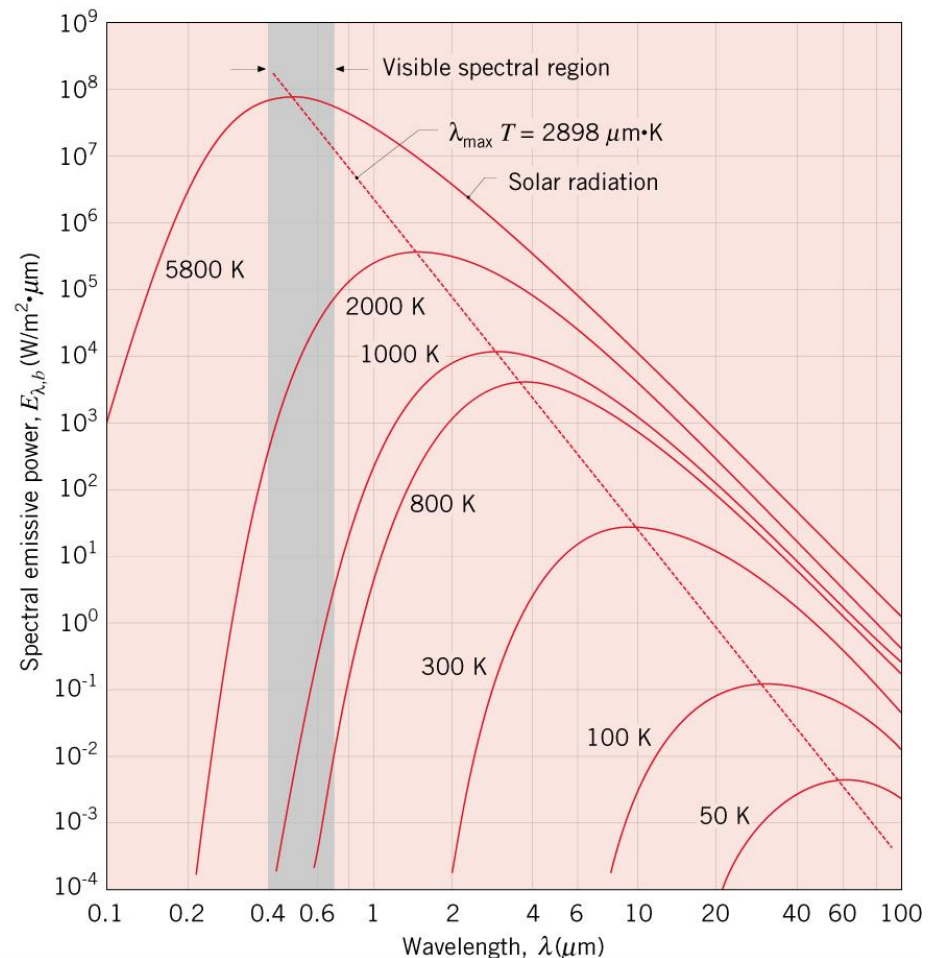
Distribuição espectral de Planck - Radiação do corpo negro

- A distribuição espectral do poder emissivo de um corpo negro (determinado teoricamente e confirmado experimentalmente) é:

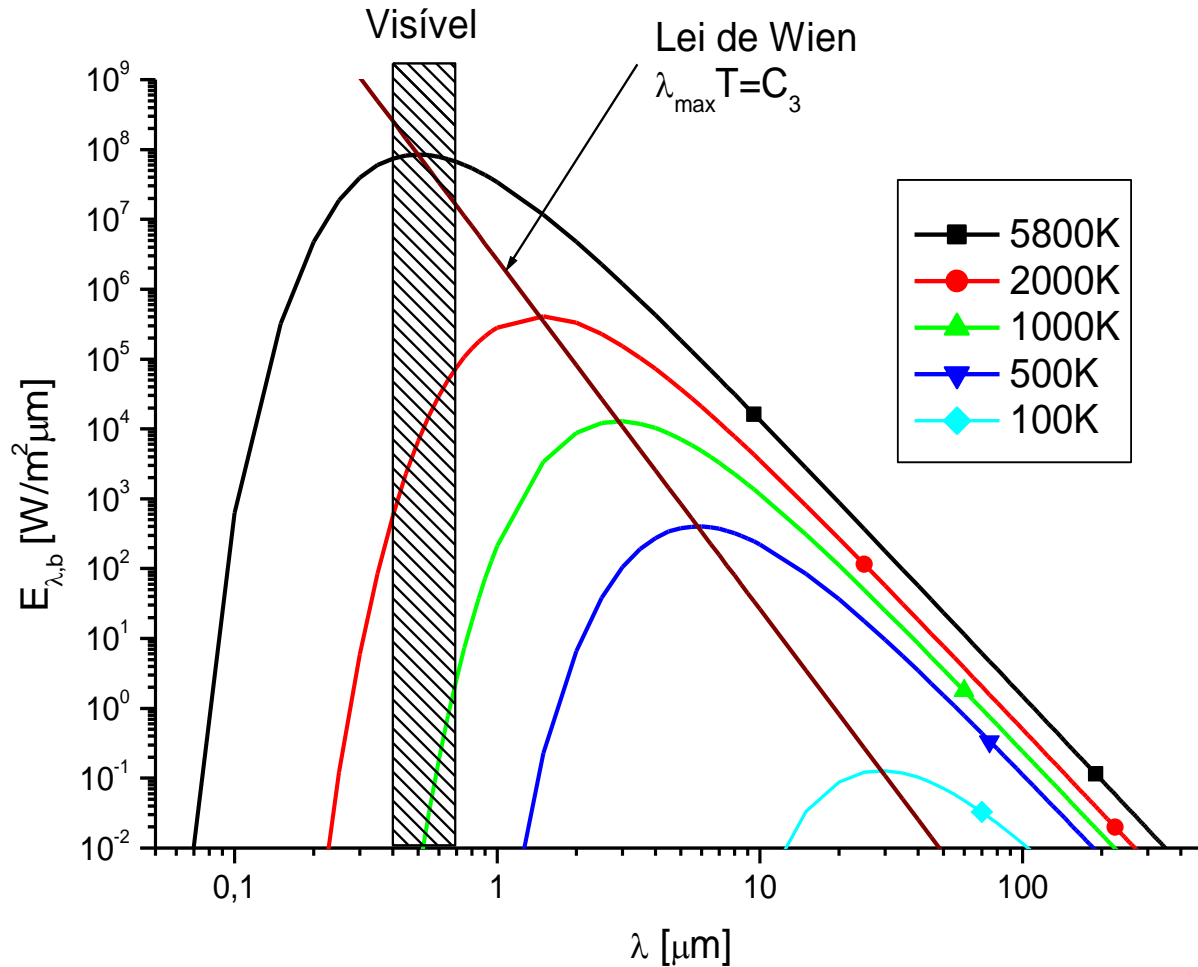
$$E_{\lambda,b}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(C_2/\lambda T) - 1]}$$

$C_1 \rightarrow$ Primeira constante de radiação
($3,742 \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4/\text{m}^2$)

$C_2 \rightarrow$ Segunda constante de radiação
($1,439 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$)



Lei do deslocamento de Wien



$$\lambda_{\text{max}} T = C_3$$

$C_3 \rightarrow$ terceira constante
de radiação

(2897,8 $\mu\text{m.K}$)

Lei de Stefan-Boltzmann e Banda de emissão

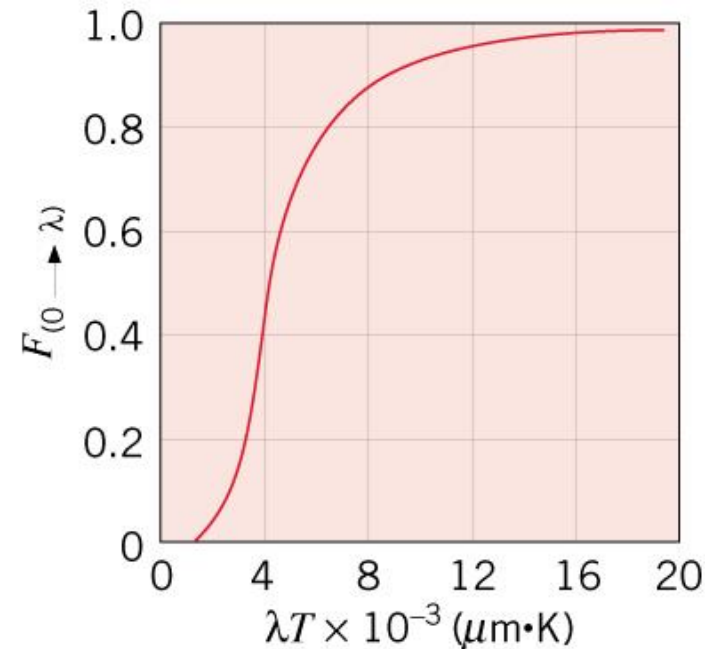
$$E_b(T) = \int_0^{\infty} \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(C_2/\lambda T) - 1]} d\lambda$$

$$\sigma = 5,670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$$

$$E_b(T) = \sigma T^4$$

$$F_{(0 \rightarrow \lambda)} = \frac{\int_0^{\lambda} E_{\lambda,b} d\lambda}{\int_0^{\infty} E_{\lambda,b} d\lambda} = \frac{\int_0^{\lambda} E_{\lambda,b} d\lambda}{\sigma T^4} = f(\lambda, T)$$

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



• Table 12.1

TABLE 12.1 Blackbody Radiation Functions

λT ($\mu\text{m} \cdot \text{K}$)	$F_{(0 \rightarrow \lambda)}$	$I_{\lambda,b}(\lambda, T)/\sigma T^5$ ($\mu\text{m} \cdot \text{K} \cdot \text{sr}$) ⁻¹	$\frac{I_{\lambda,b}(\lambda, T)}{I_{\lambda,b}(\lambda_{\text{max}}, T)}$
200	0.000000	0.375034×10^{-27}	0.000000
400	0.000000	0.490335×10^{-13}	0.000000
600	0.000000	0.104046×10^{-8}	0.000014
800	0.000016	0.991126×10^{-7}	0.001372
1,000	0.000321	0.118505×10^{-5}	0.016406
1,200	0.002134	0.523927×10^{-5}	0.072534
1,400	0.007790	0.134411×10^{-4}	0.186082
1,600	0.019718	0.249130	0.344904
1,800	0.039341	0.375568	0.519949
2,000	0.066728	0.493432	0.683123
2,200	0.100888	0.589649×10^{-4}	0.816329
2,400	0.140256	0.658866	0.912155
2,600	0.183120	0.701292	0.970891
2,800	0.227897	0.720239	0.997123
2,898	0.250108	0.722318×10^{-4}	1.000000
3,000	0.273232	0.720254×10^{-4}	0.997143
3,200	0.318102	0.705974	0.977373
3,400	0.361735	0.681544	0.943551
3,600	0.403607	0.650396	0.900429
3,800	0.443382	0.615225×10^{-4}	0.851737
4,000	0.480877	0.578064	0.800291

Tabela 12.1 Funções da radiação do corpo negro^a

λT ($\mu\text{m} \cdot \text{K}$)	$F_{(0 \rightarrow \lambda)}$	$I_{\lambda, b}(\lambda, T)/\sigma T^5$ ($\mu\text{m} \cdot \text{K} \cdot \text{sr}^{-1}$)	$I_{\lambda, b}(\lambda, T)$ $I_{\lambda, b}(\lambda_{\text{máx}}, T)$
200	0,000000	$0,375034 \times 10^{-27}$	0,000000
400	0,000000	$0,490335 \times 10^{-13}$	0,000000
600	0,000000	$0,104046 \times 10^{-8}$	0,000014
800	0,000016	$0,991126 \times 10^{-7}$	0,001372
1.000	0,000321	$0,118505 \times 10^{-5}$	0,016406
1.200	0,002134	$0,523927 \times 10^{-5}$	0,072534
1.400	0,007790	$0,134411 \times 10^{-4}$	0,186082
1.600	0,019718	0,249130	0,344904
1.800	0,039341	0,375568	0,519949
2.000	0,066728	0,493432	0,683123
2.200	0,100888	$0,589649 \times 10^{-4}$	0,816329
2.400	0,140256	0,658866	0,912155
2.600	0,183120	0,701292	0,970891
2.800	0,227897	0,720239	0,997123
2.898	0,250108	$0,722318 \times 10^{-4}$	1,000000
3.000	0,273232	$0,720254 \times 10^{-4}$	0,997143
3.200	0,318102	0,705974	0,977373
3.400	0,361735	0,681544	0,943551
3.600	0,403607	0,650396	0,900429
3.800	0,443382	0,615225	0,851737
4.000	0,480877	0,578064	0,800291
4.200	0,516014	$0,540394 \times 10^{-4}$	0,748139
4.400	0,548796	0,503253	0,696720
4.600	0,579280	0,467343	0,647004
4.800	0,607559	0,433109	0,599610
5.000	0,633747	0,400813	0,554898
5.200	0,658970	$0,370580 \times 10^{-4}$	0,513043
5.400	0,680360	0,342445	0,474092
5.600	0,701046	0,316376	0,438002
5.800	0,720158	0,292301	0,404671
6.000	0,737818	0,270121	0,373965
6.200	0,754140	$0,249723 \times 10^{-4}$	0,345724
6.400	0,769234	0,230985	0,319783
6.600	0,783199	0,213786	0,295973
6.800	0,796129	0,198008	0,274128
7.000	0,808109	0,183534	0,254090
7.200	0,819217	$0,170256 \times 10^{-4}$	0,235708
7.400	0,829527	0,158073	0,218842
7.600	0,839102	0,146891	0,203360
7.800	0,848005	0,136621	0,189143
8.000	0,856288	0,127185	0,176079
8.500	0,874608	$0,106772 \times 10^{-4}$	0,147819
9.000	0,890029	$0,901463 \times 10^{-5}$	0,124801
9.500	0,903085	0,765338	0,105956

Tabela 12.1 Funções da radiação do corpo negro^a (cont.)

λT ($\mu\text{m} \cdot \text{K}$)	$F_{(0 \rightarrow \lambda)}$	$I_{\lambda, b}(\lambda, T)/\sigma T^5$ ($\mu\text{m} \cdot \text{K} \cdot \text{sr}^{-1}$)	$I_{\lambda, b}(\lambda, T)$ $I_{\lambda, b}(\lambda_{\text{máx}}, T)$
10.000	0,914199	0,653279	0,090442
10.500	0,923710	0,560522	0,077600
11.000	0,931890	$0,483321 \times 10^{-5}$	0,066913
11.500	0,939959	0,418725	0,057970
12.000	0,945098	0,364394	0,050448
13.000	0,955139	0,279457	0,038689
14.000	0,962898	0,217641	0,030131
15.000	0,969981	$0,171866 \times 10^{-5}$	0,023794
16.000	0,973814	0,137429	0,019026
18.000	0,980860	$0,908240 \times 10^{-6}$	0,012574
20.000	0,985602	0,623310	0,008629
25.000	0,992215	0,276474	0,003828
30.000	0,995340	$0,140469 \times 10^{-6}$	0,001945
40.000	0,997967	$0,473891 \times 10^{-7}$	0,000656
50.000	0,998953	0,201605	0,000279
75.000	0,999713	$0,418597 \times 10^{-8}$	0,000058
100.000	0,999905	0,135752	0,000019

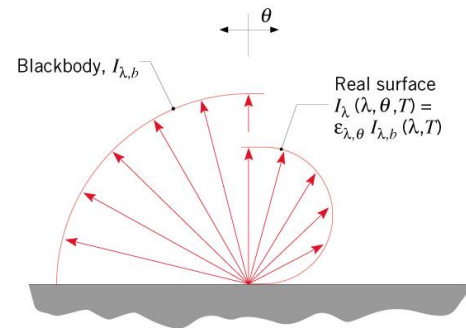
^aAs constantes de radiação usadas para gerar estas funções do corpo negro foram
 $C_1 = 3,7420 \times 10^8 \text{ W} \mu\text{m}^2/\text{m}^2$
 $C_2 = 1,4388 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$
 $\sigma = 5,670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$

Superfície de emissão

• A radiação emitida por uma superfície pode ser determinada introduzindo uma propriedade (a emissividade) que compara a emissão com a emissão ideal de um corpo negro na mesma temperatura.

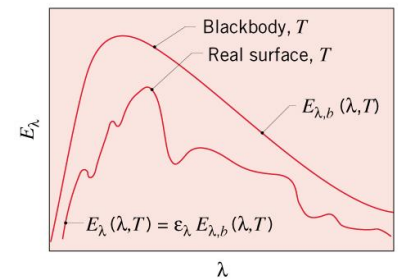
- A **emissividade direcional espectral**

$$\varepsilon_{\lambda,\theta}(\lambda,\theta,\phi,T) \equiv \frac{I_{\lambda,e}(\lambda,\theta,\phi,T)}{I_{\lambda,b}(\lambda,T)}$$



- A emissividade espectral hemisférica (uma média direcional):

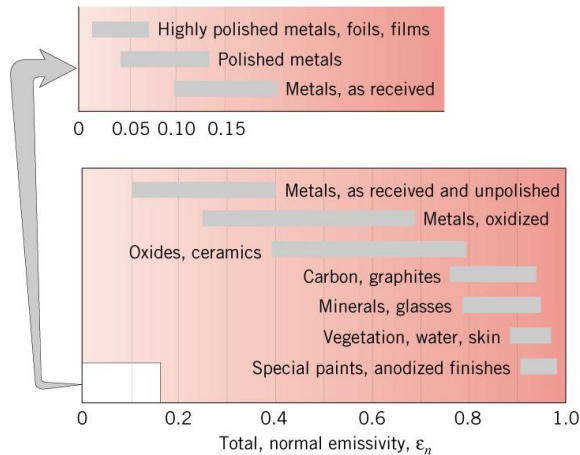
$$\varepsilon_{\lambda}(\lambda,T) \equiv \frac{E_{\lambda}(\lambda,T)}{E_{\lambda,b}(\lambda,T)} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda,e}(\lambda,\theta,\phi,T) \cos\theta \sin\theta d\theta d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda,b}(\lambda,T) \cos\theta \sin\theta d\theta d\phi}$$



- A emissividade hemisférica total (uma média direcional e espectral):

$$\varepsilon(T) \equiv \frac{E(T)}{E_b(T)} = \frac{\int_0^\infty \varepsilon_\lambda(\lambda, T) E_{\lambda, b}(\lambda, T) d\lambda}{E_b(T)}$$

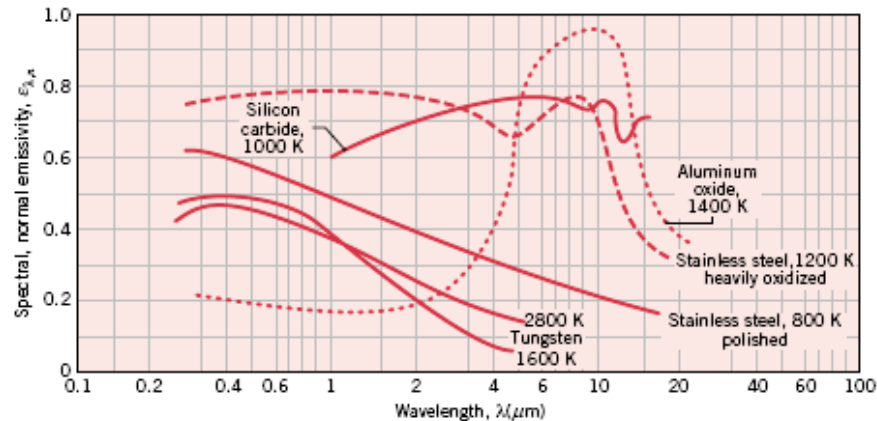
- Valores representativos da emissividade total normal:



➤ Baixa emissividade para superfície polidas e aumentam para superfície não polidas e superfície oxidadas.

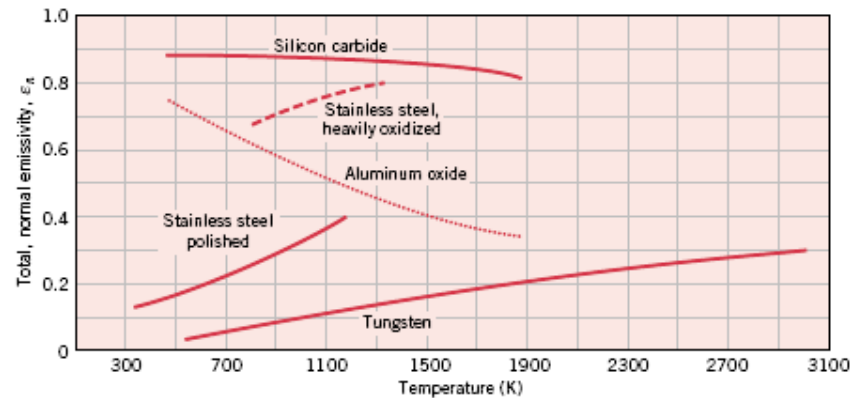
➤ A emissividade dos não condutores é comparativamente alta.

- Dependência espectral na emissividade normal espectral de materiais selecionados.



Note que $\epsilon_{\lambda,n}$ diminui ao longo que λ aumenta para metais e no sentido inverso para não metais.

- Dependência da temperatura na emissividade total normal ϵ_n de materiais selecionados.



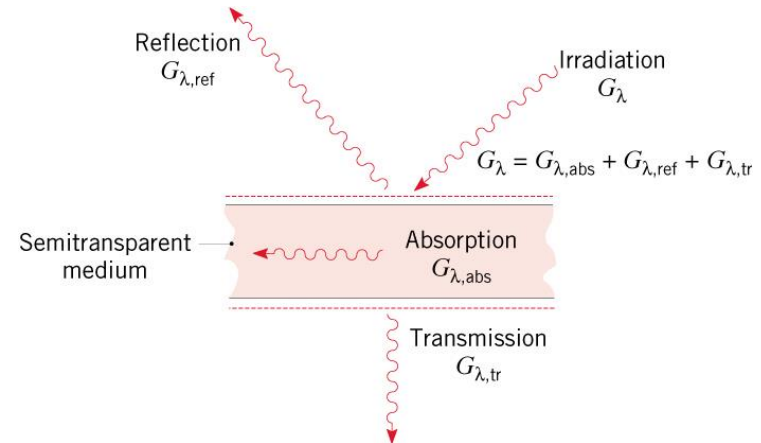
Superfície de Absorção, Reflexão e Transmissão

- Existem três respostas de um meio semi-transparente a radiação:

- **Reflexão** do meio
- **Absorção** pelo meio
- **Transmissão** através do meio

Balanco de radiação no meio →

$$G_{\lambda} = G_{\lambda,ref} + G_{\lambda,abs} + G_{\lambda,tr}$$



- Em contraste com o que precede aos efeitos volumétrico efeitos, a resposta do **material opaco** a radiação é governada pelo **fenômeno de superfície** e $G_{\lambda,tr} = 0$.

$$G_{\lambda} = G_{\lambda,ref} + G_{\lambda,abs}$$

- A irradiação sendo absorvida ou refletida depende do comprimento de onda e da natureza da superfície do material.

Absortância

- A **absortância direcional espectral** Negligenciando a dependência da temperatura,

$$\alpha_{\lambda,\theta}(\lambda,\theta,\phi) \equiv \frac{I_{\lambda,i,abs}(\lambda,\theta,\phi)}{I_{\lambda,i}(\lambda,\theta,\phi)}$$

- A **absortância hemisférica espectral**:

$$\alpha_{\lambda}(\lambda) \equiv \frac{G_{\lambda,abs}(\lambda)}{G_{\lambda}(\lambda)} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \alpha_{\lambda,\theta}(\lambda,\theta,\phi) I_{\lambda,i}(\lambda,\theta,\phi) \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda,i}(\lambda,\theta,\phi) \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi}$$

- A **absortância hemisférica total**:

$$\alpha \equiv \frac{G_{abs}}{G} = \frac{\int_0^{\infty} \alpha_{\lambda}(\lambda) G_{\lambda}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} G_{\lambda}(\lambda) d\lambda}$$

Refletância

- A **refletância direcional espectral**: Negligenciando a dependência da temperatura:

$$\rho_{\lambda,\theta}(\lambda,\theta,\phi) \equiv \frac{I_{\lambda,i,ref}(\lambda,\theta,\phi)}{I_{\lambda,i}(\lambda,\theta,\phi)}$$

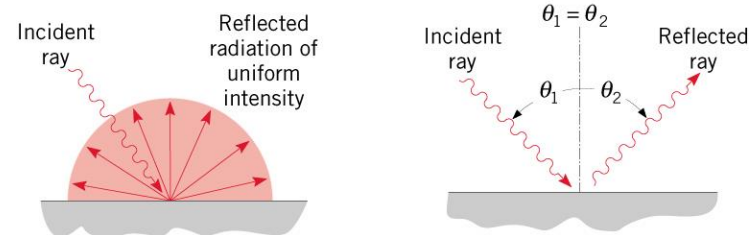
- A **refletância hemisférica espectral**:

$$\rho_{\lambda} \equiv \frac{G_{\lambda,ref}(\lambda)}{G_{\lambda}(\lambda)} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \rho_{\lambda,\theta}(\lambda,\theta,\phi) I_{\lambda,i}(\lambda,\theta,\phi) \cos\theta \sin\theta d\theta d\phi}{I_{\lambda,i}(\lambda,\theta,\phi)}$$

- A **refletância hemisférica total**:

$$\rho \equiv \frac{G_{ref}}{G} = \frac{\int_0^{\infty} \rho_{\lambda}(\lambda) G_{\lambda}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} G_{\lambda}(\lambda) d\lambda}$$

- As superfícies podem ser idealizadas como *difusas* ou *especulares*.



Superfície polida e rugosa.

Transmitância

- A **transmitância hemisférica espectral** (Negligenciando a dependência da temperatura):

$$\tau_{\lambda} \equiv \frac{G_{\lambda, tr} \lambda}{G_{\lambda}(\lambda)}$$

- A **transmitância hemisférica total**:

$$\tau \equiv \frac{G_{tr}}{G} = \frac{\int_0^{\infty} G_{\lambda, tr}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} G_{\lambda}(\lambda) d\lambda}$$

- Para um meio semi-transparente,

$$\frac{\rho_{\lambda} + \alpha_{\lambda} + \tau_{\lambda}}{\rho + \alpha + \tau + 1} = 1$$

- Para um meio opaco,

$$\alpha_{\lambda} + \rho_{\lambda} = 1$$

$$\alpha + \rho = 1$$

Lei de Kirchhoff

- A lei de Kirchhoff faz equivalência da emissividade hemisférica total com a absorptância hemisférica total:

$$\varepsilon = \alpha$$

Entretanto, condições associadas a esta equação são muito restritivas:

Irradiação de uma superfície corresponde a emissão de um corpo negro com a mesma temperatura da superfície.

$$\varepsilon_{\lambda} = \alpha_{\lambda}$$

- Entretanto, a lei de Kirchhoff pode ser aplicada nas propriedades direcionais espectrais sem restrições:

$$\varepsilon_{\lambda,\theta} = \alpha_{\lambda,\theta}$$

Superfície Cinzenta

• Com

$$\varepsilon_{\lambda} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \varepsilon_{\lambda,\theta} \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi}$$

e

$$\alpha_{\lambda} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \alpha_{\lambda,\theta} I_{\lambda,i} \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda,i} \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi}$$

Sob essas condições pode-se igualar ε_{λ} com α_{λ} ?

Irradiação for difusa
Superfície for difusa

• Com

$$\varepsilon = \frac{\int_0^{\infty} \varepsilon_{\lambda} E_{\lambda,b}(\lambda) d\lambda}{E_b(T)}$$

e

$$\alpha = \frac{\int_0^{\infty} \alpha_{\lambda} G_{\lambda}(\lambda) d\lambda}{G}$$

Sob essa condição pode-se igualar ε com α ?

• Condições associada assumindo uma **superfície cinzenta**:

Irradiação correspondente a emissão de um corpo negro a temperatura de superfície T e Superfície for cinzenta $\alpha_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda}$ forem independentes de λ ,



Fim