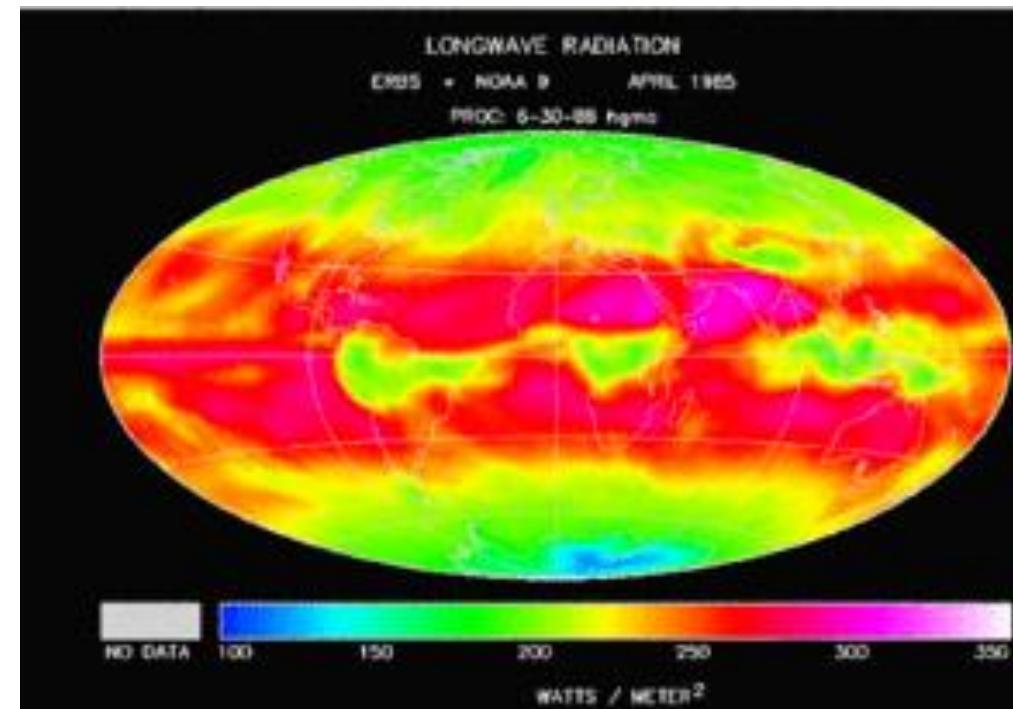


Radiação Térmica

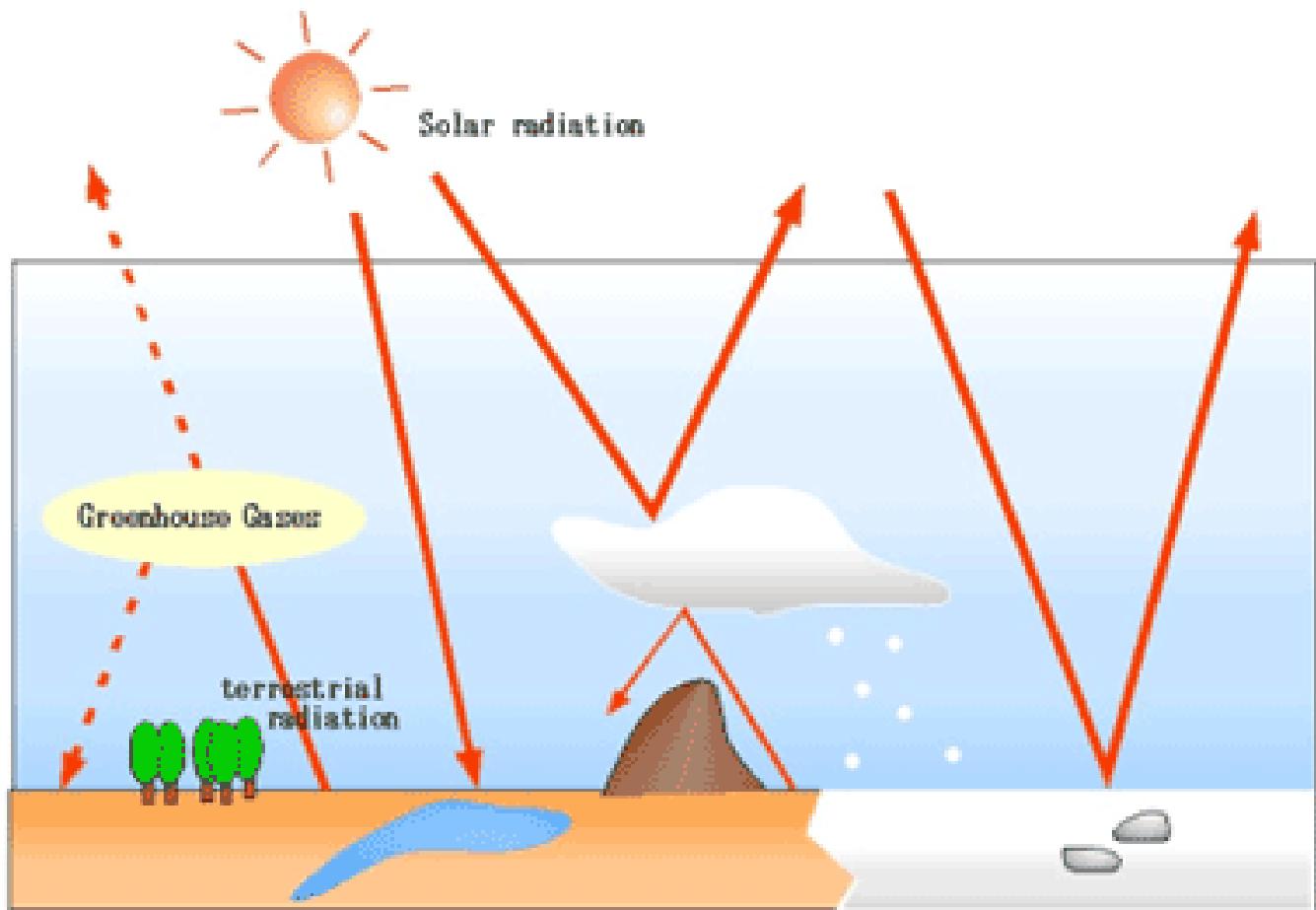


Conteúdos:

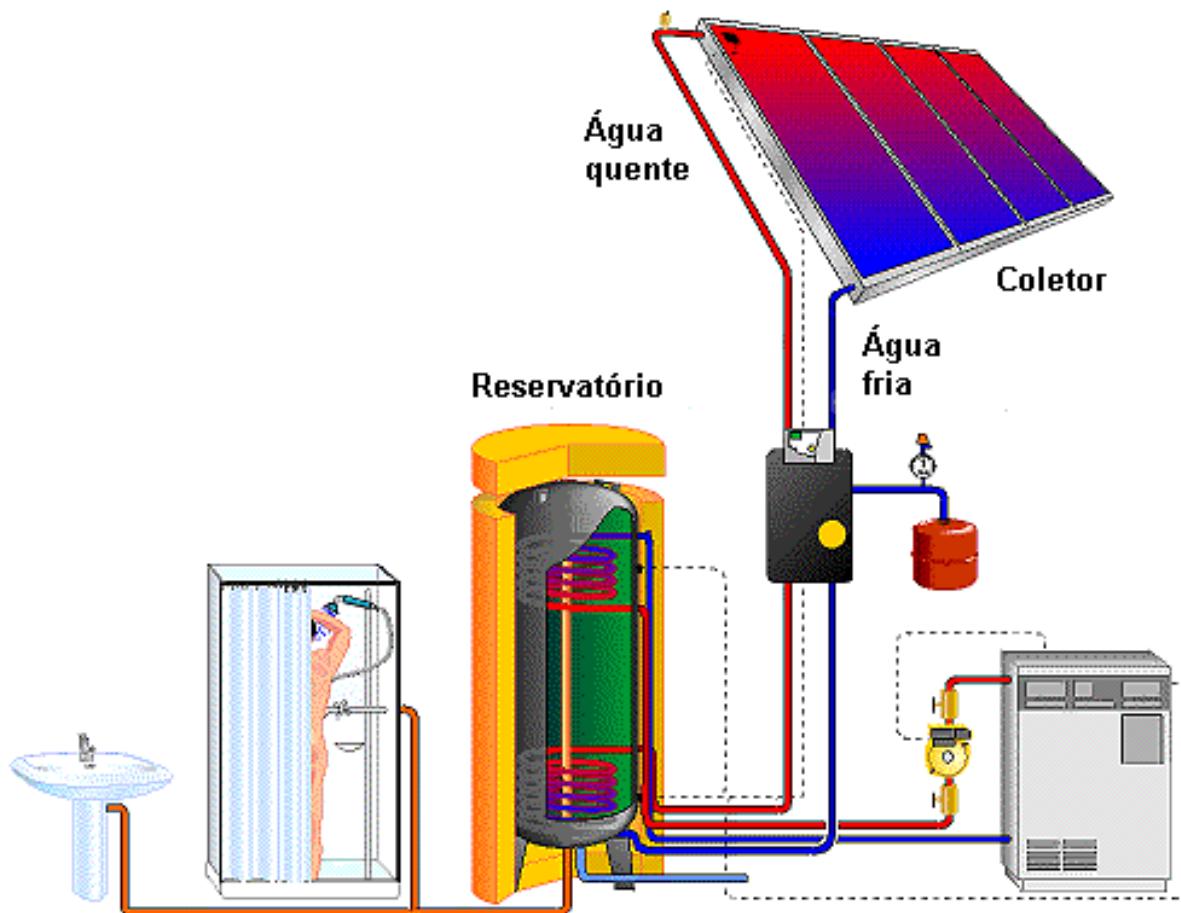
- Introdução a Radiação.
- Propriedades Radiativas.
- Troca de Calor entre Superfícies.

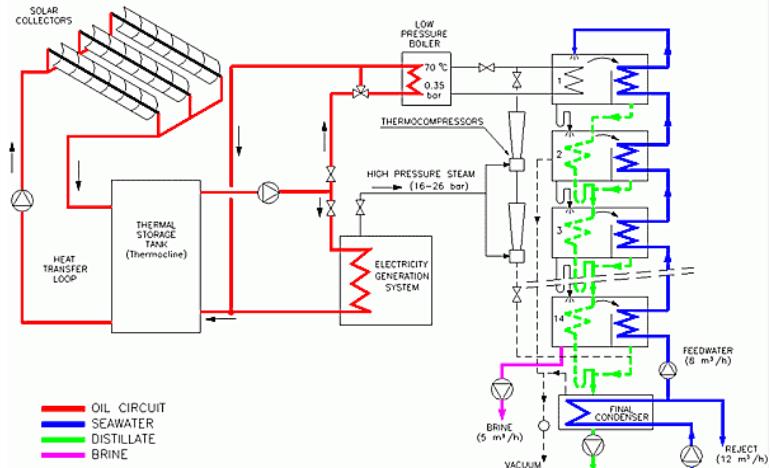


Efeito Estufa



Aquecimento Solar

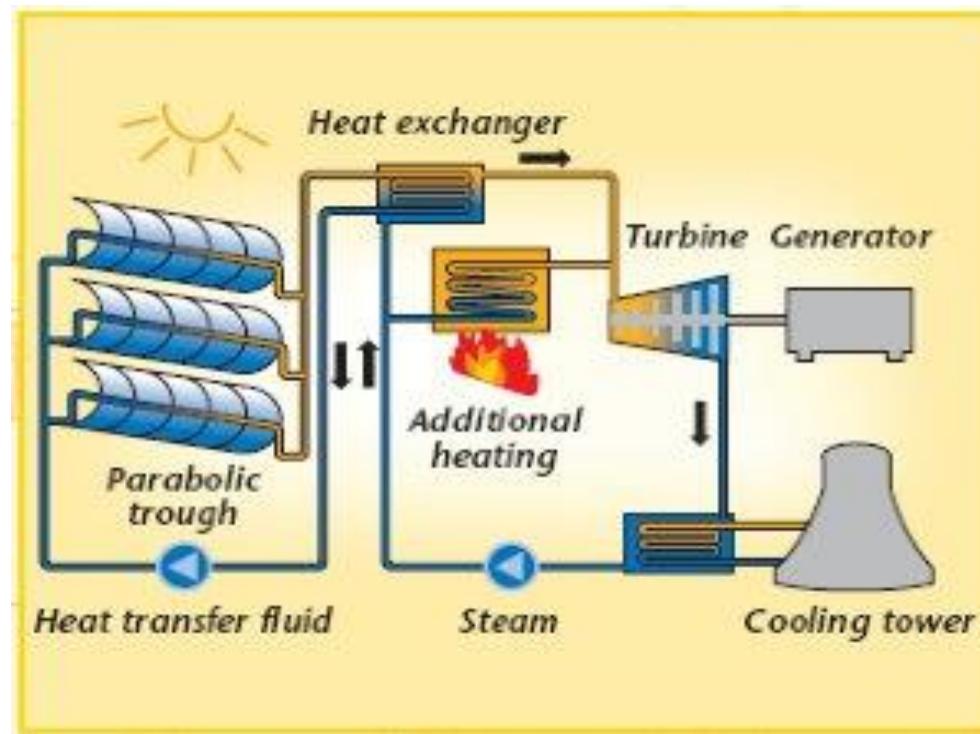




<http://www.psa.es/>

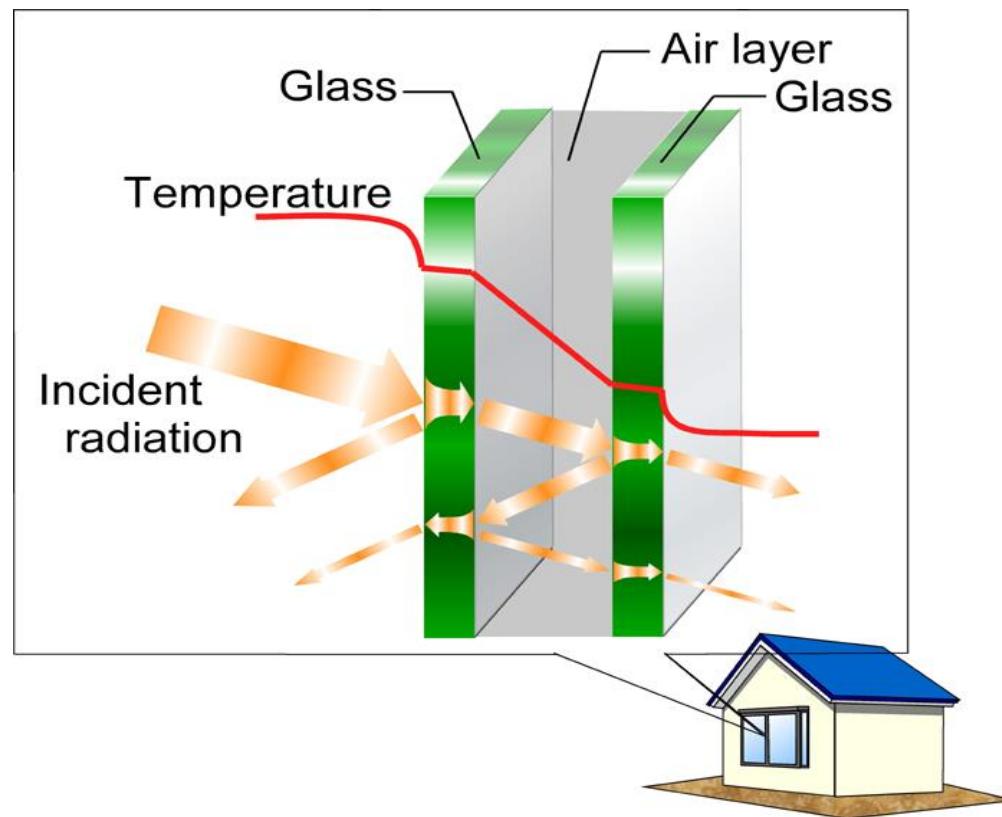
Nevada Solar Thermal Plant Breaks New Ground

350-acre solar power

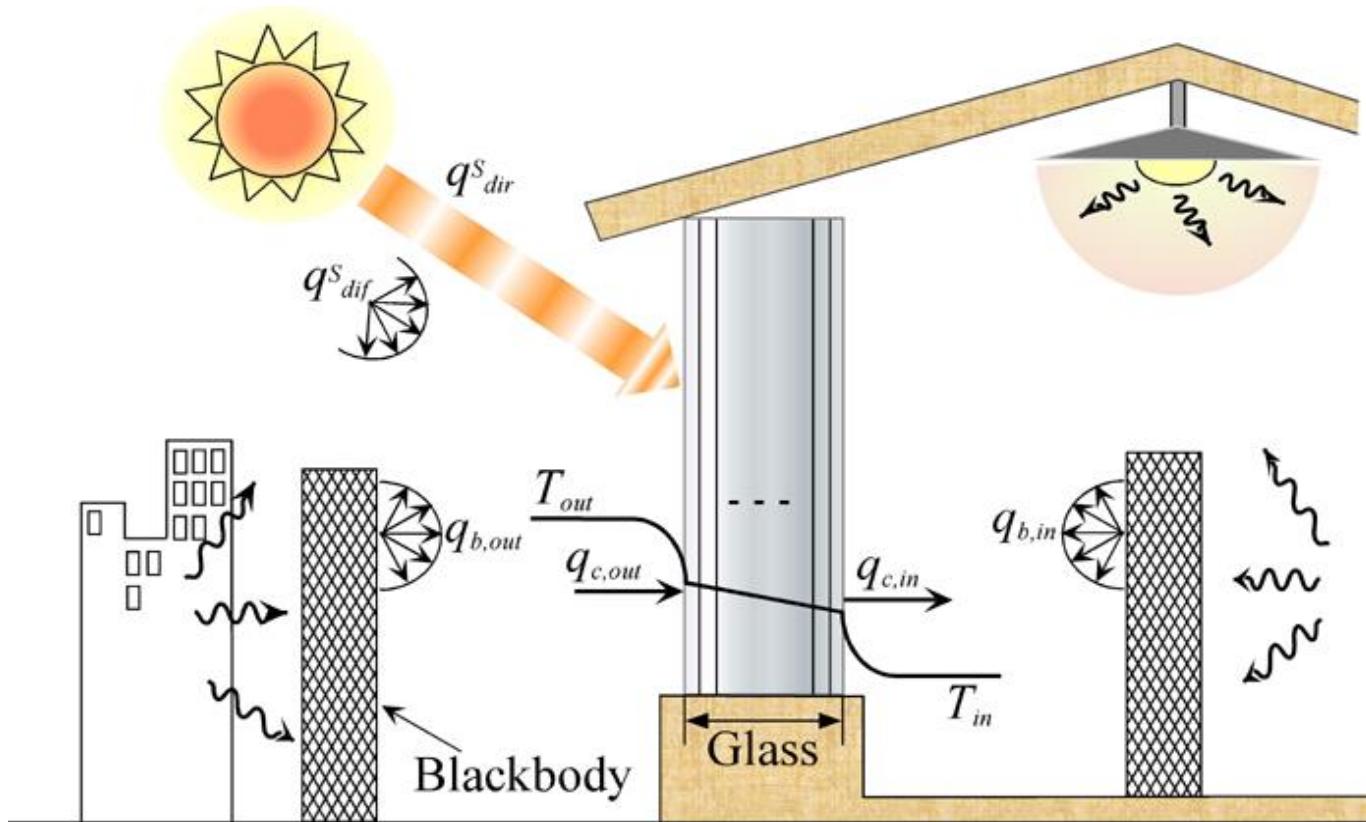


http://pesn.com/2006/02/12/9600234_Schott_solar_thermal_plant

Térmica de Edificações



Térmica de Edificações



Aquecimento Solar



Odeillo, nos Pirineus franceses

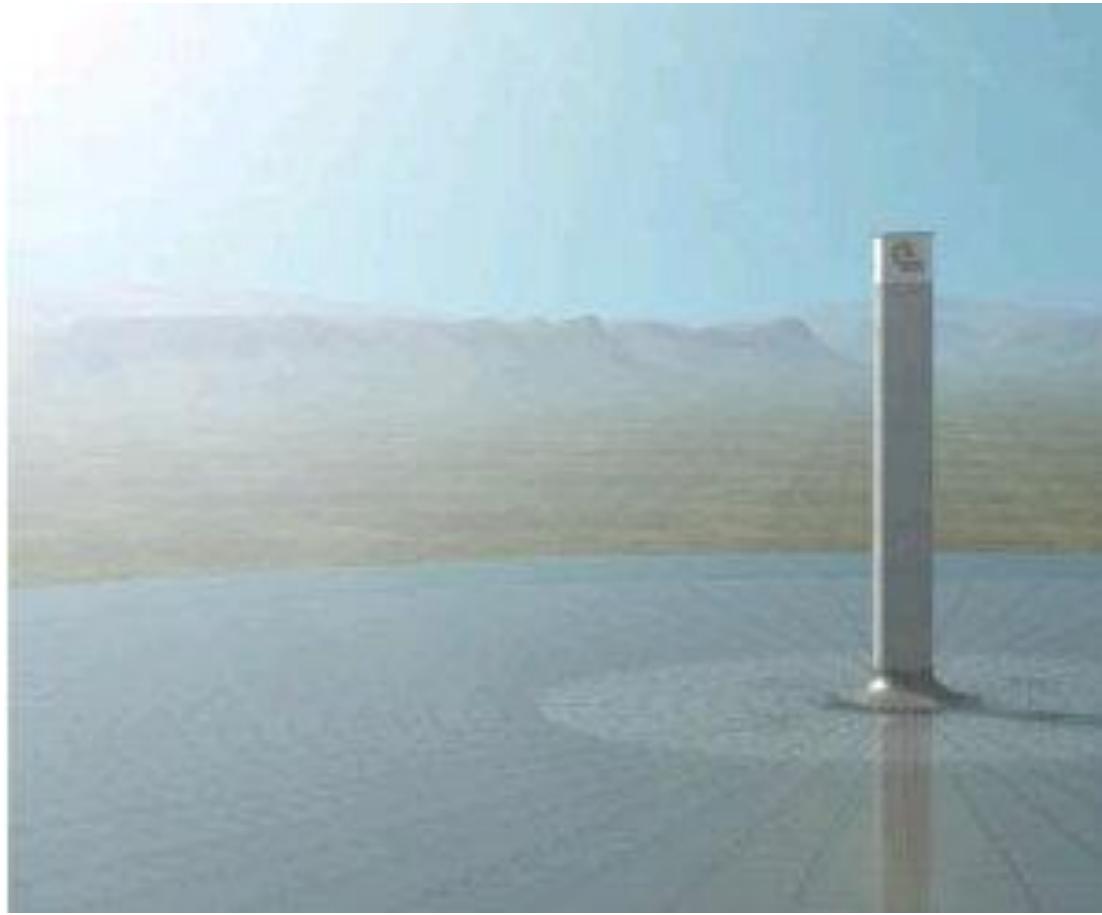


<http://www.solucar.es/>

Vista Aérea da Plataforma Solar de Almería

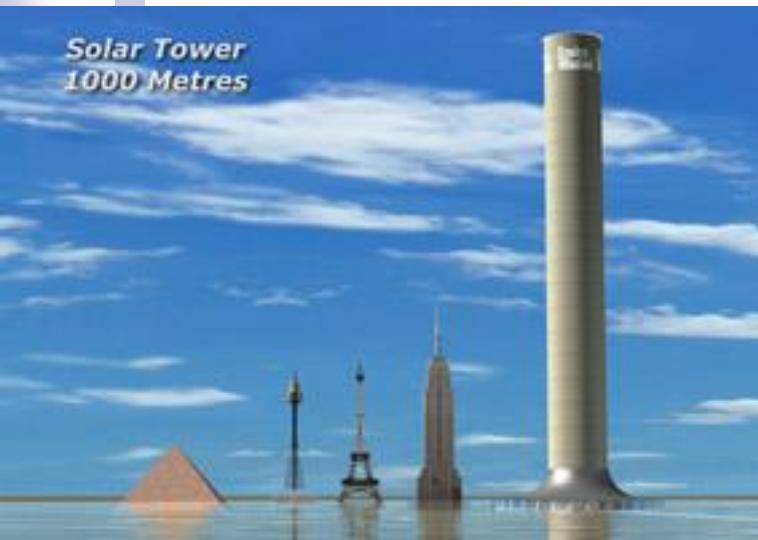


http://peswiki.com/index.php/Directory:Solar_Tower

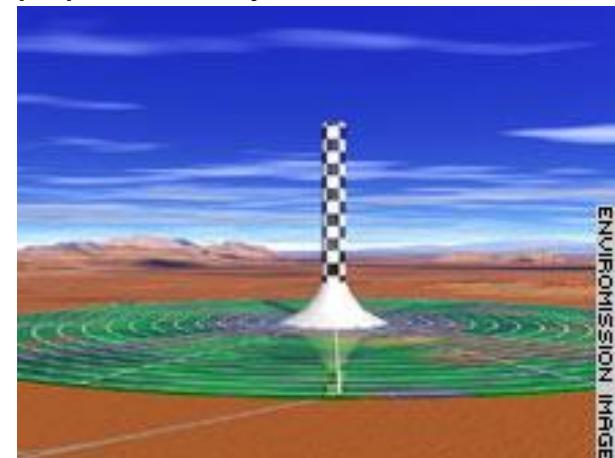


200 MW é a potência planejada de uma torre solar que tem sua construção prevista para 2006 na Austrália. at Burraga Station, in the Riverland area of New South Wales

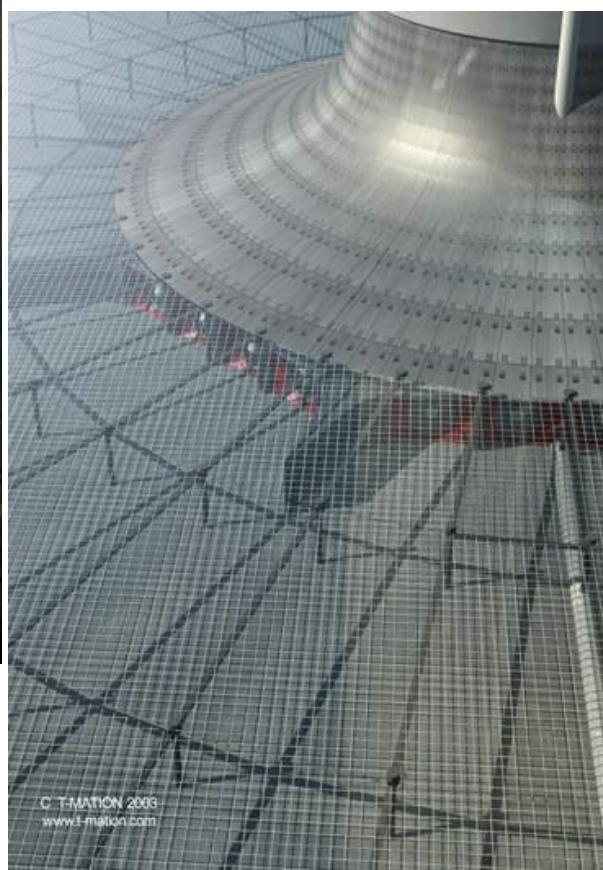
*Solar Tower
1000 Metres*



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



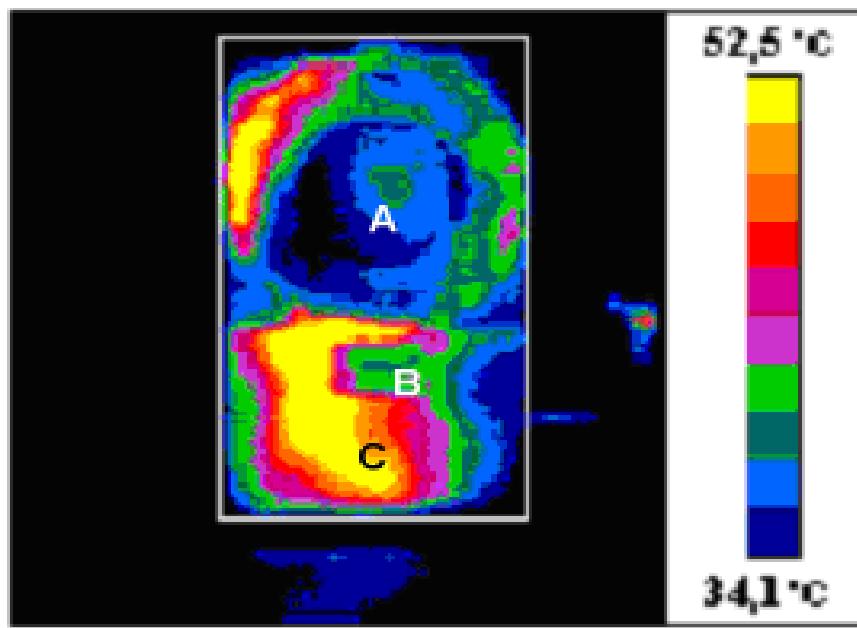
50kW prototype Solar Tower plant



C.T-MATION 2003
www.t-motion.com



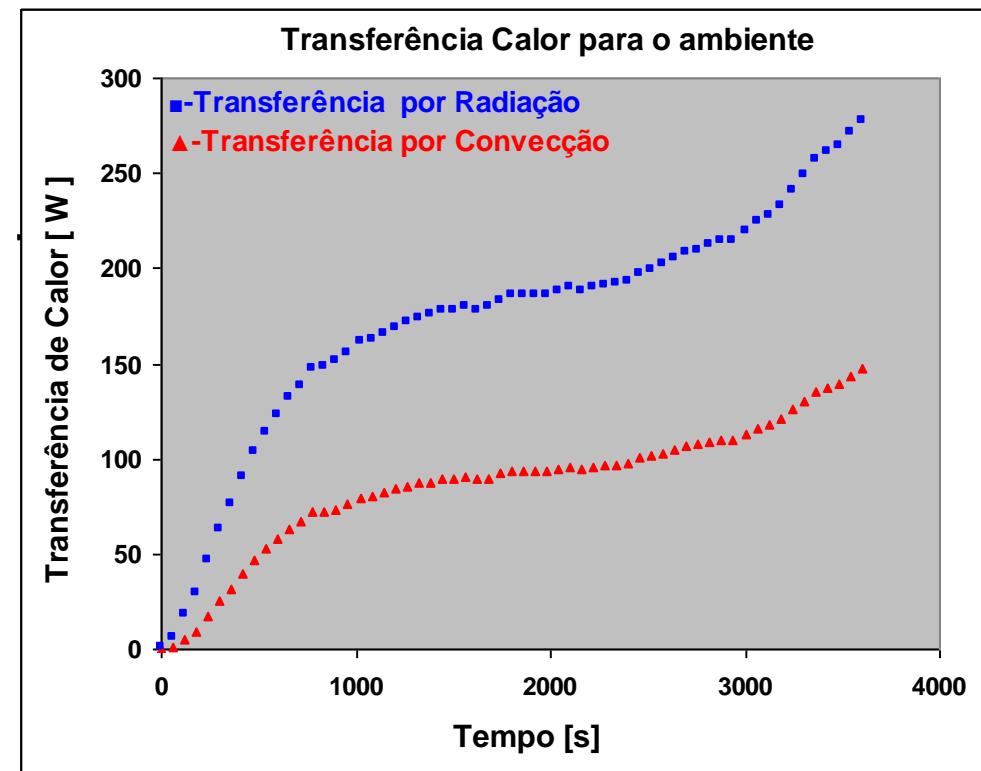
15-MW plant project



A= Tambor de secagem

B= Caixa Coletora de Fiapos

C= Saída do ar proveniente do tambor de secagem



Crookes Radiometer and Otheoscope

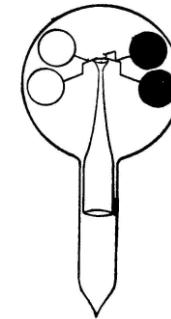
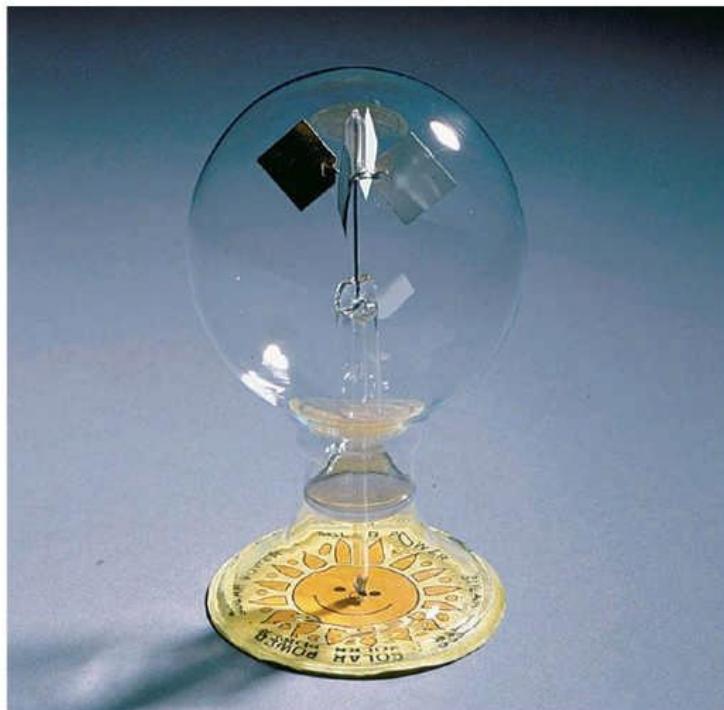


Figure 13

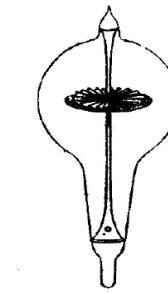
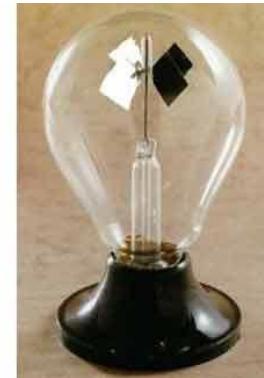
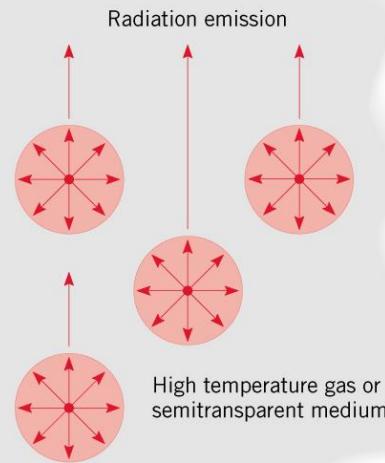
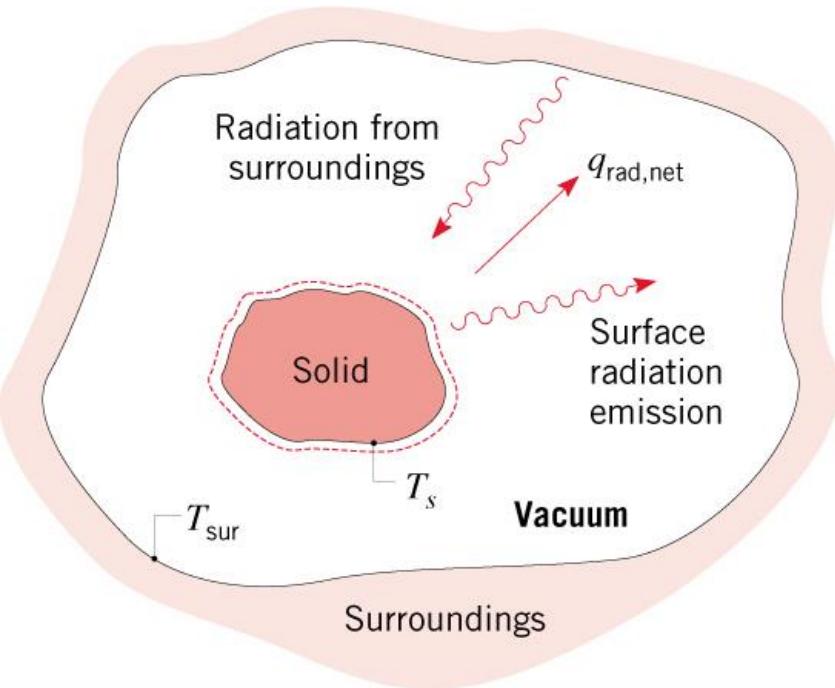


Figure 14

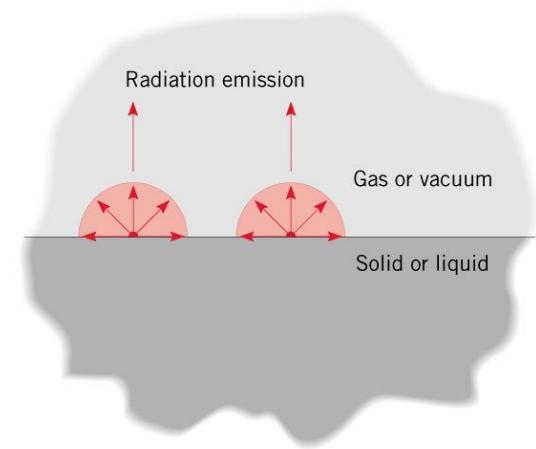


Considerações gerais

Fenômeno volumétrico



(a)



(b)

Fenômeno de superfície

A radiação emitida em sólidos e líquidos é originada nas moléculas localizadas em uma distância inferior a 1 μm da superfície exposta.

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

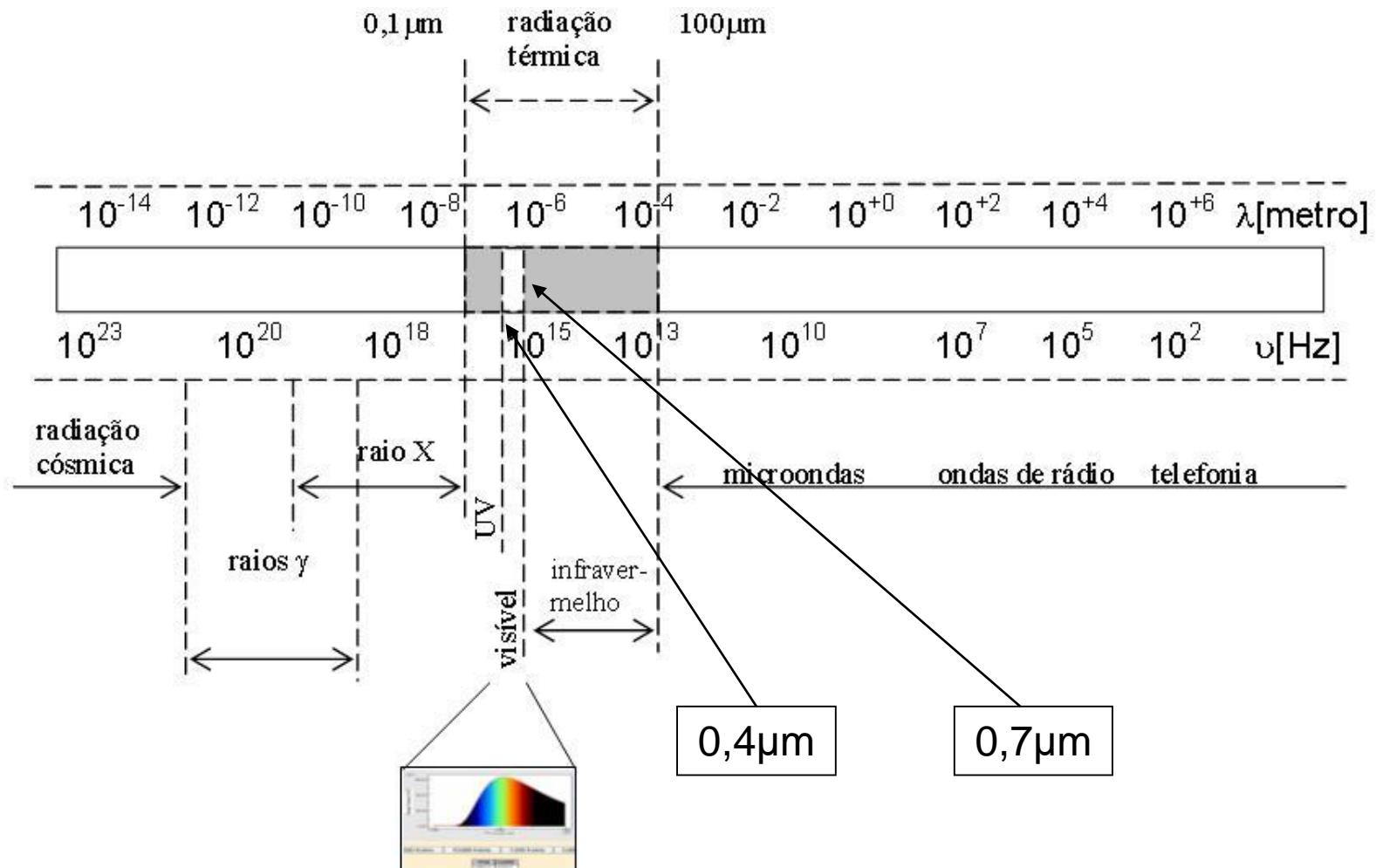
λ - Comprimento de onda ($\mu\text{m} \rightarrow 10^{-6}\text{m}$);

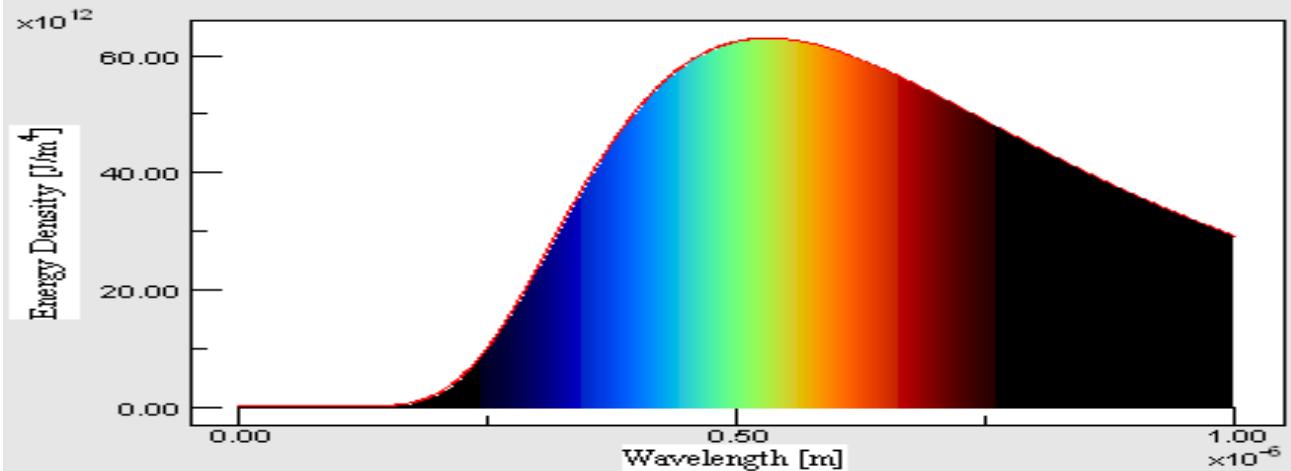
ν - Frequência da onda;

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

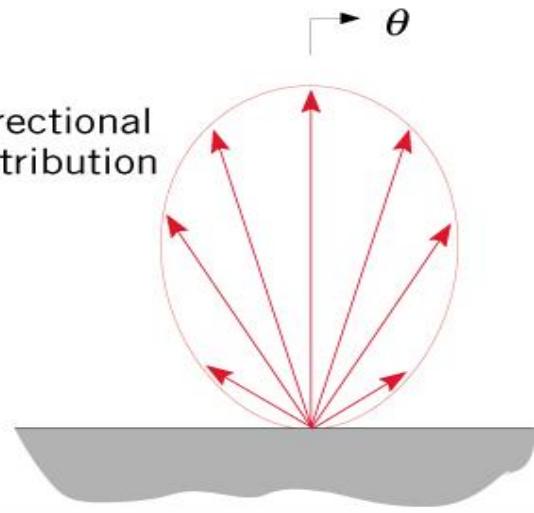
10,000 Kelvin

7,500 Kelvin

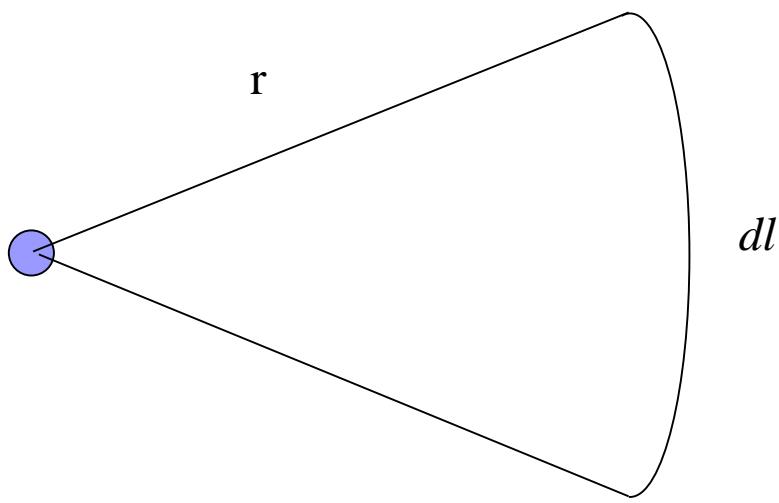
5,000 Kelvin

Temp	Lambda
+5463.77	+530.77

Directional
distribution

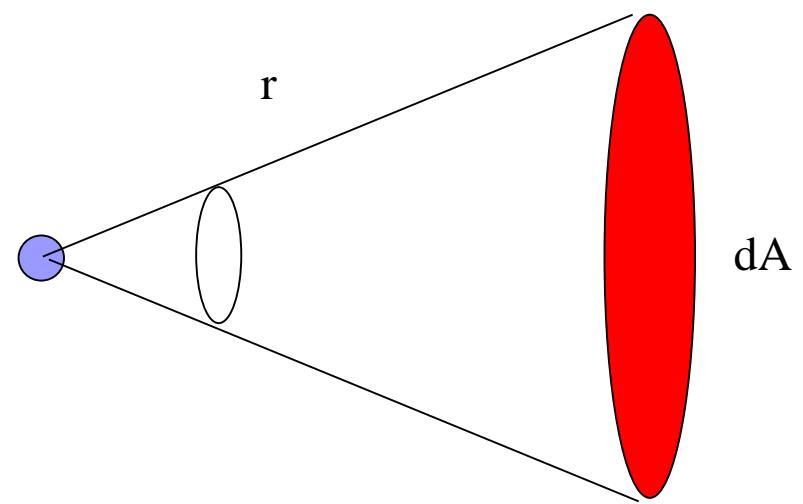


Ângulo Plano



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

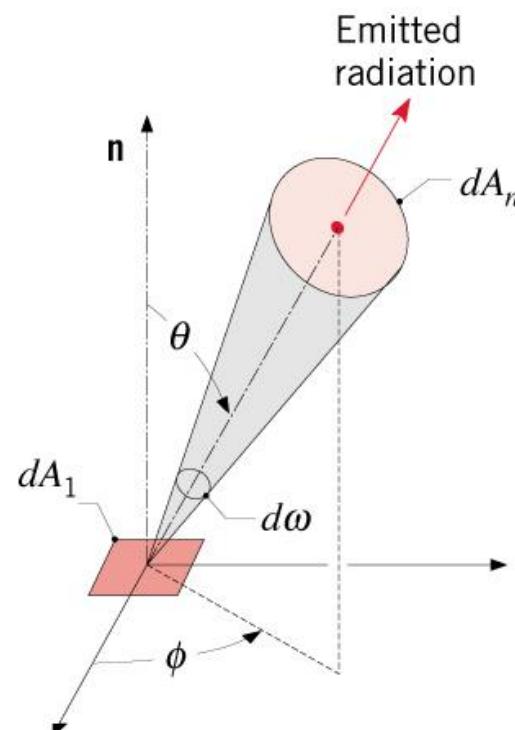
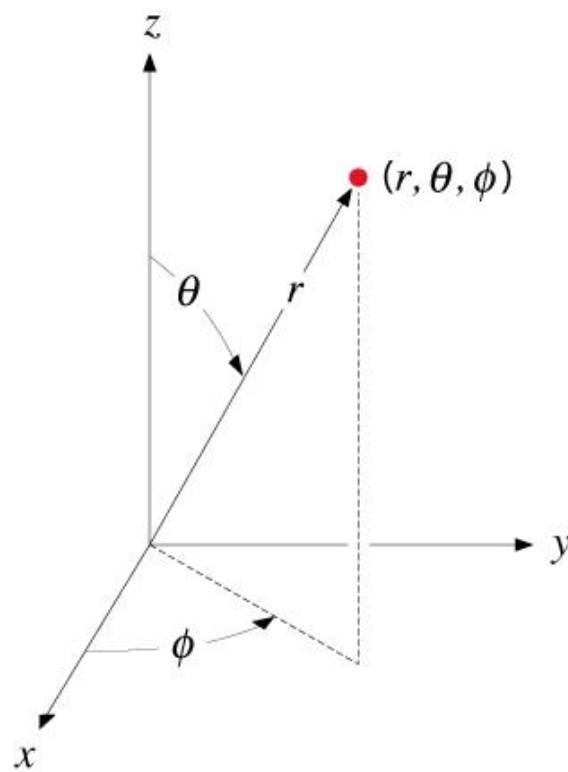
Ângulo Sólido



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

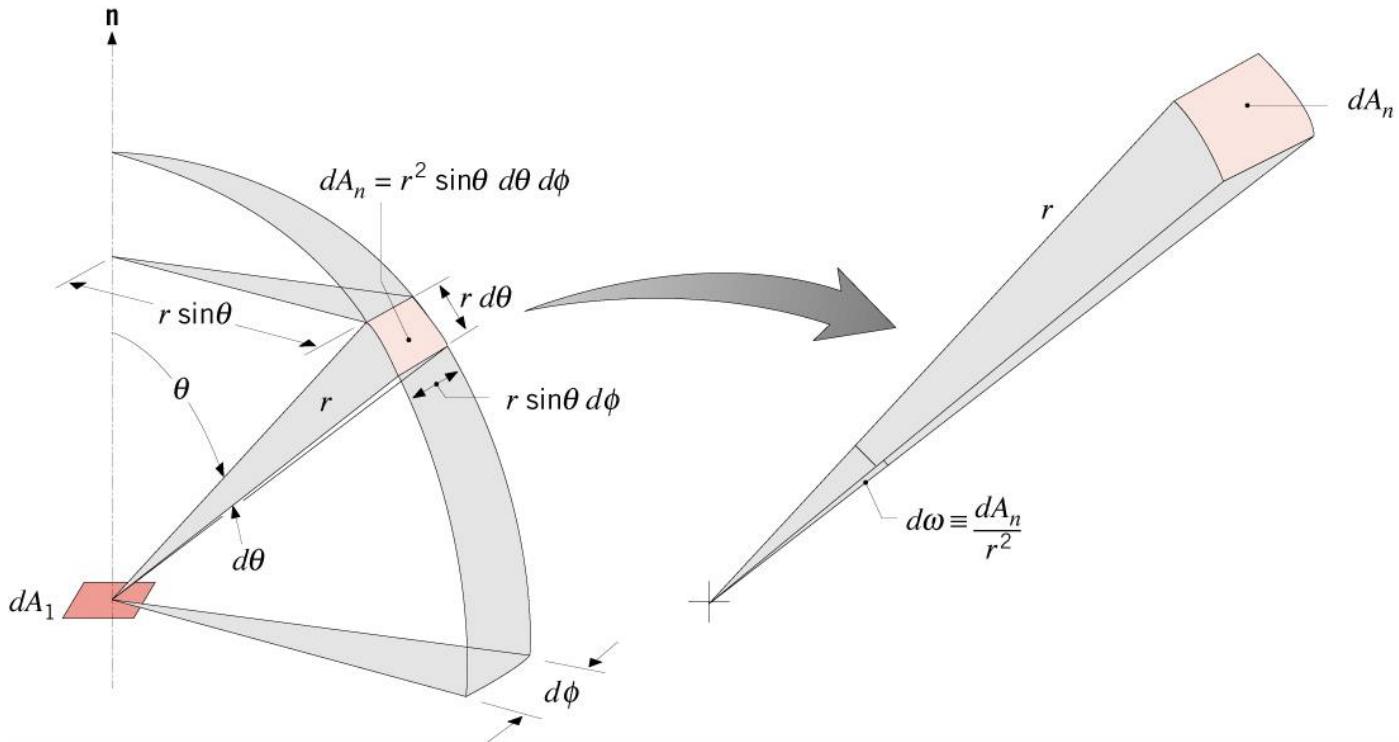
–O ângulo sólido tem unidade esteradianos (sr).

Considerações direcionais



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

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



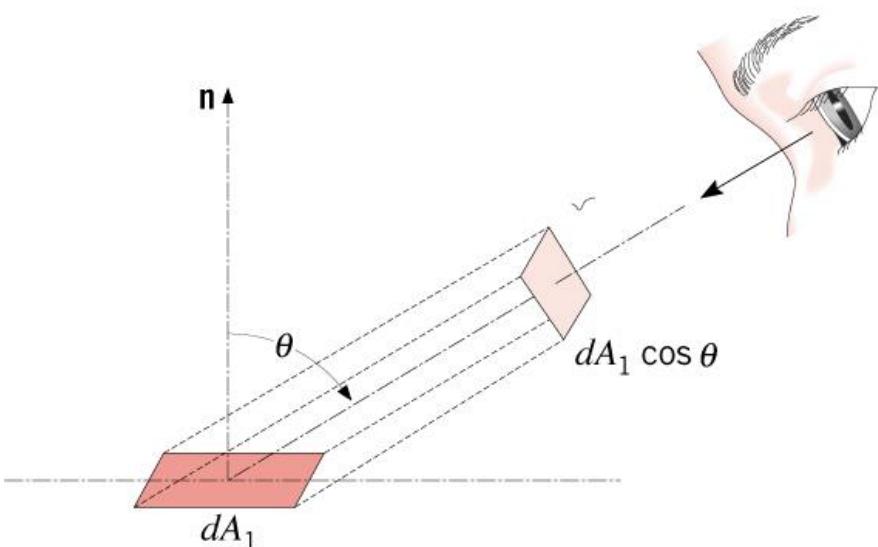
– O ângulo sólido de um hemisfério completo é:

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

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

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:



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

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

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

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

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.

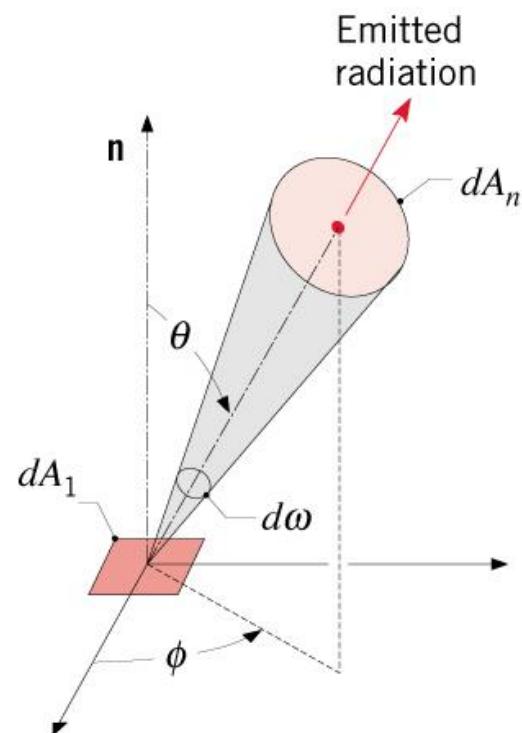
$$E_\lambda(\lambda) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi) \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi$$

- 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 ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}$) 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 .

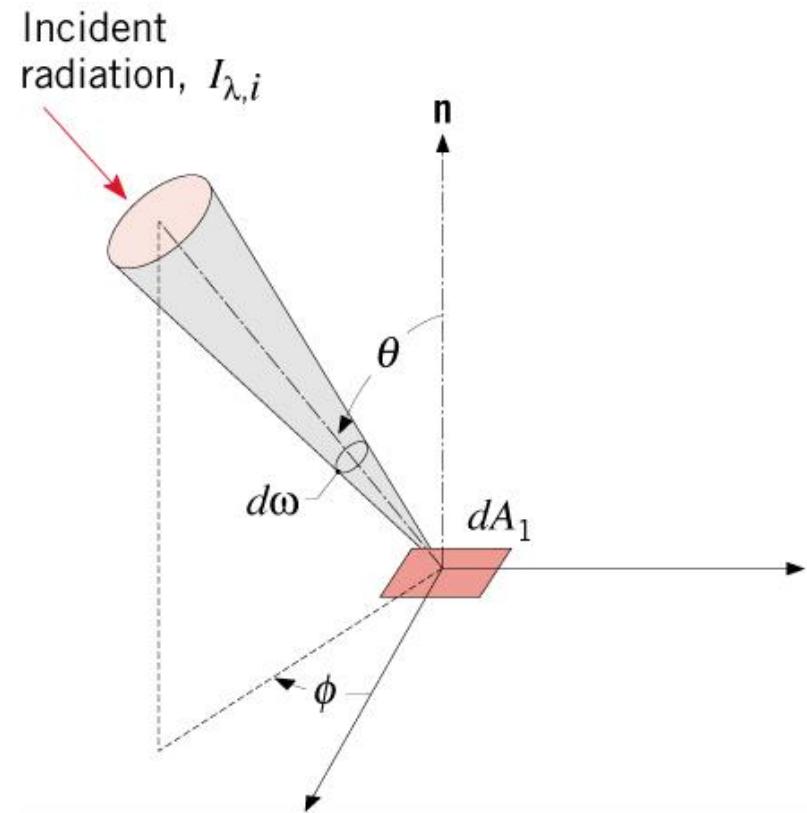
$$G_\lambda(\lambda) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda,i}(\lambda, \theta, \phi) \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi$$

- 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 expectral, 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 .

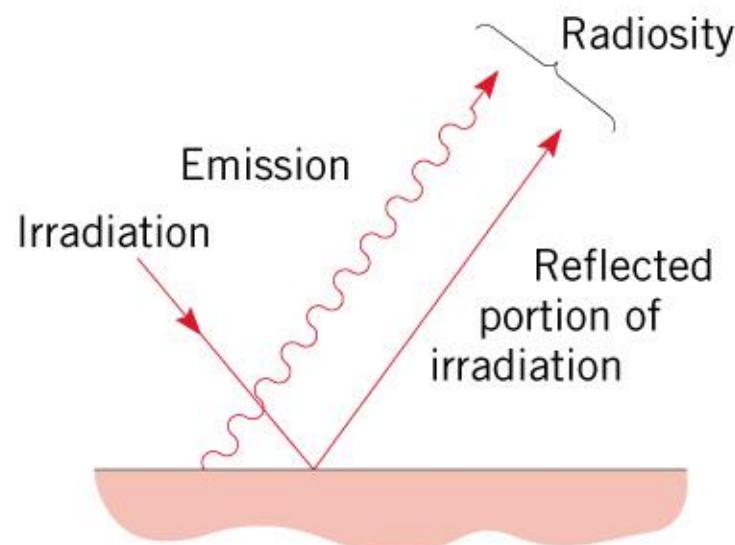
$$J_\lambda(\lambda) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda,e+r}(\lambda, \theta, \phi) \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi$$

- Radiosidade total

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

- Para superfície refletora difusa e emissora difusa

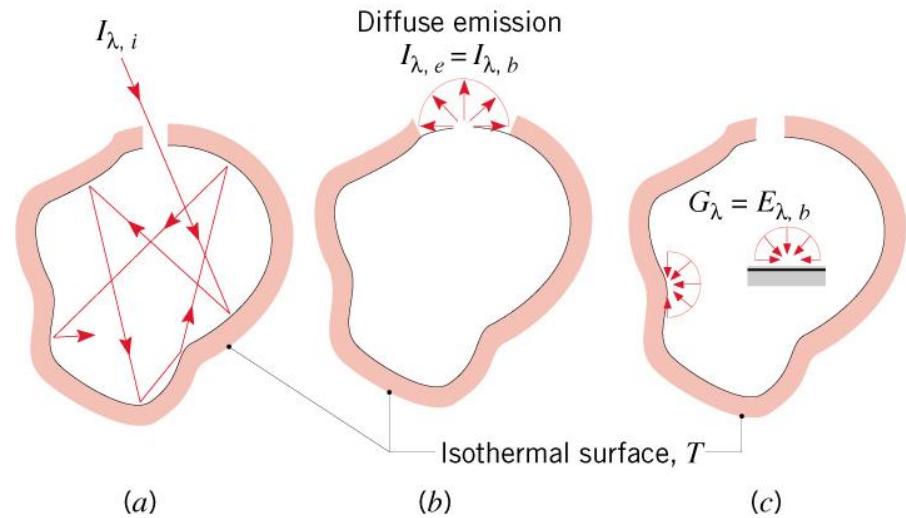
$$J_\lambda(\lambda) = \pi I_{\lambda,e+r}(\lambda) \quad J = \pi I_{e+r}$$



Radiação do corpo negro

- O corpo negro é um superfície ideal que apresenta as seguinte propriedade:

- (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:

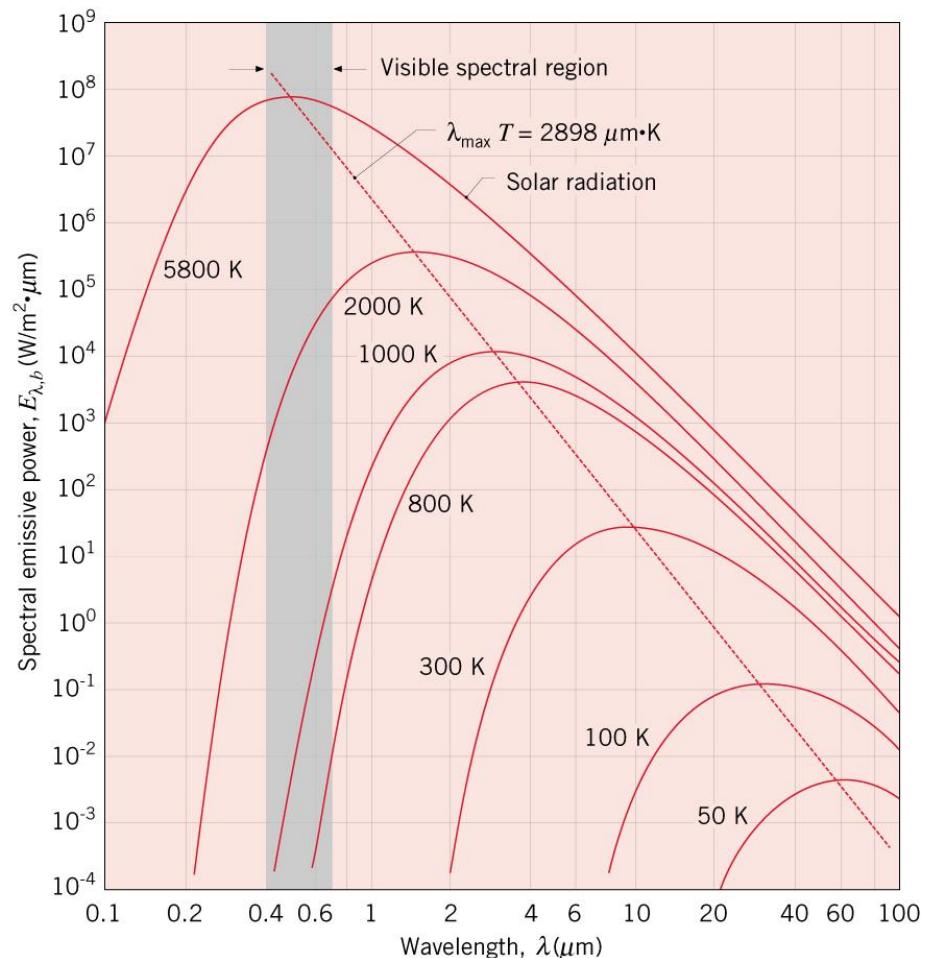
$$E_{\lambda,b}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(C_2/\lambda T) - 1]}$$

$C_1 \rightarrow$ Primeira constante de radiação

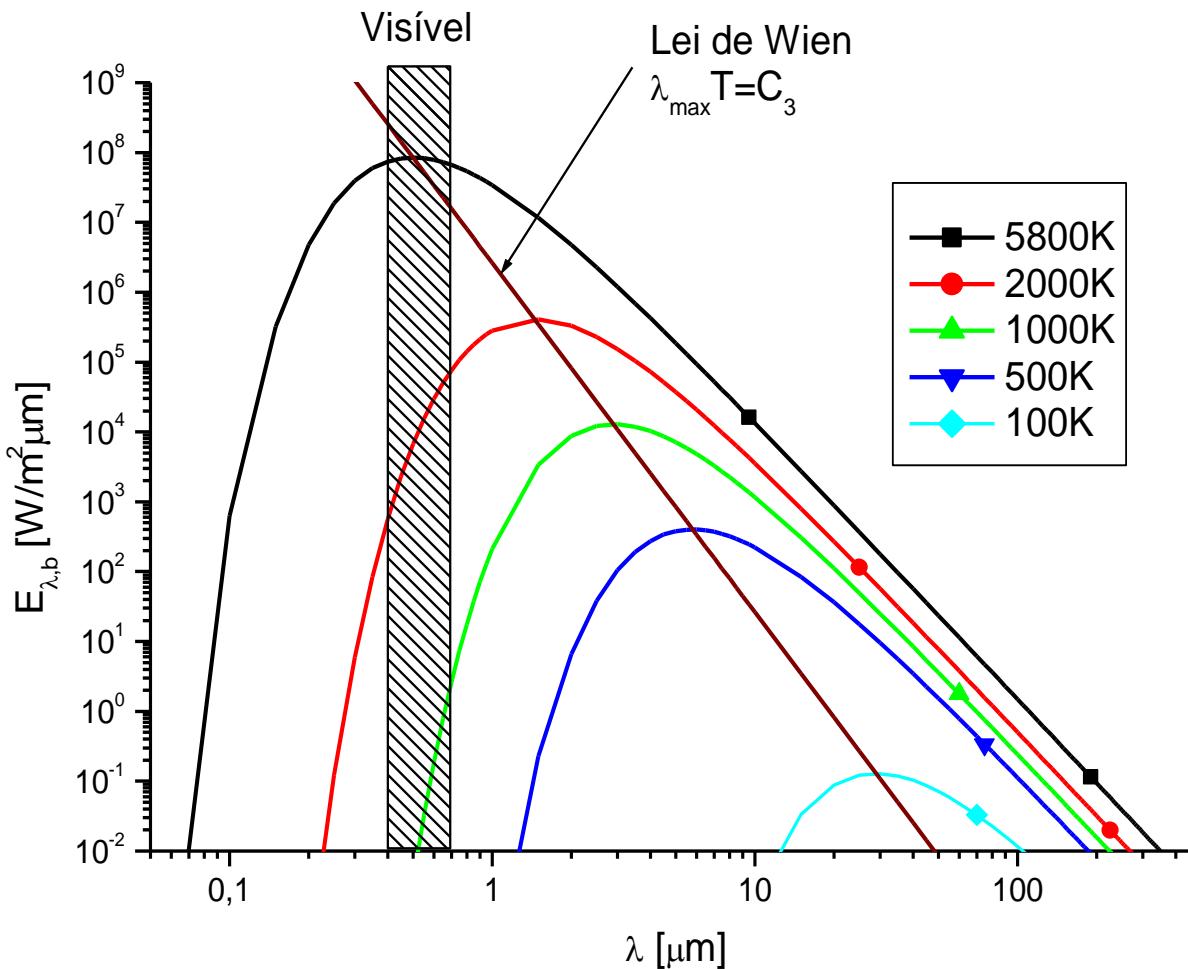
$(3,742 \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4/\text{m}^2)$

$C_2 \rightarrow$ Segunda constante de radiação

$(1,439 \times 10^4 \text{ } \mu\text{m} \cdot \text{K})$



Lei do deslocamento de Wien



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

$C_3 \rightarrow$ terceira constante de radiação
(2897,8 μm.K)

Lei de Stefan-Boltzmann e Banda de emissão

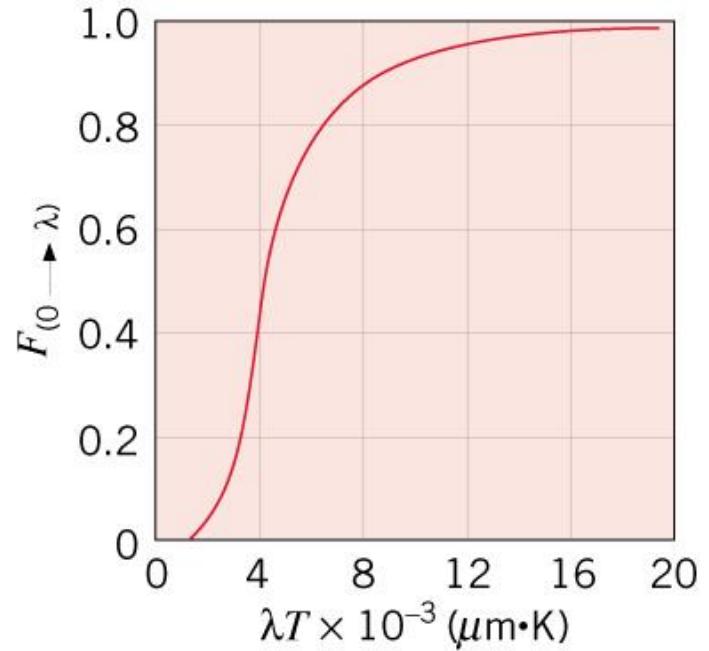
$$E_b(T) = \int_0^{\infty} \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(C_2/\lambda T) - 1]} d\lambda$$

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

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

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

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



- Table 12.1

TABLE 12.1 Blackbody Radiation Functions

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

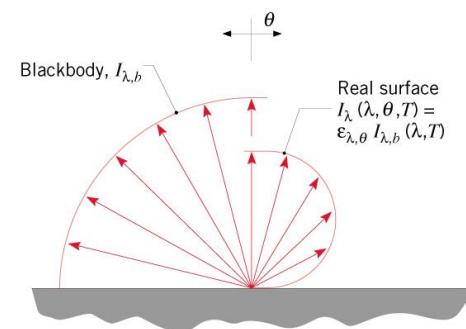
^aAs constantes de radiação usadas para gerar estas funções do corpo negro foram
 $C_1 = 3,7420 \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4 \cdot \text{m}^2$
 $C_2 = 1,4388 \times 10^4 \text{ } \mu\text{m} \cdot \text{K}$
 $\sigma = 5,670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$

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.

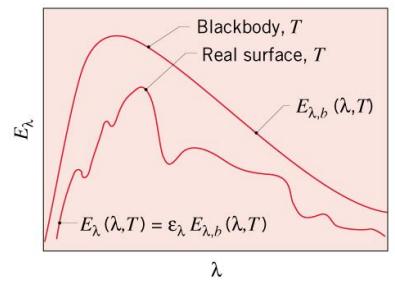
- A emissividade direcional espectral

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



- A emissividade espectral hemisférica (uma média direcional):

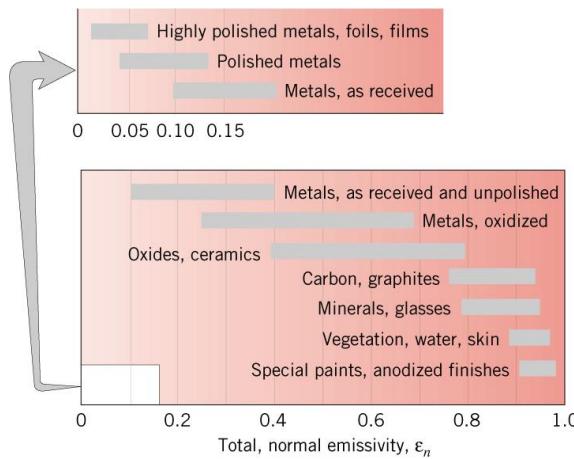
$$\varepsilon_\lambda(\lambda, T) \equiv \frac{E_\lambda(\lambda, T)}{E_{\lambda,b}(\lambda, T)} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi, T) \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda,b}(\lambda, T) \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi}$$



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

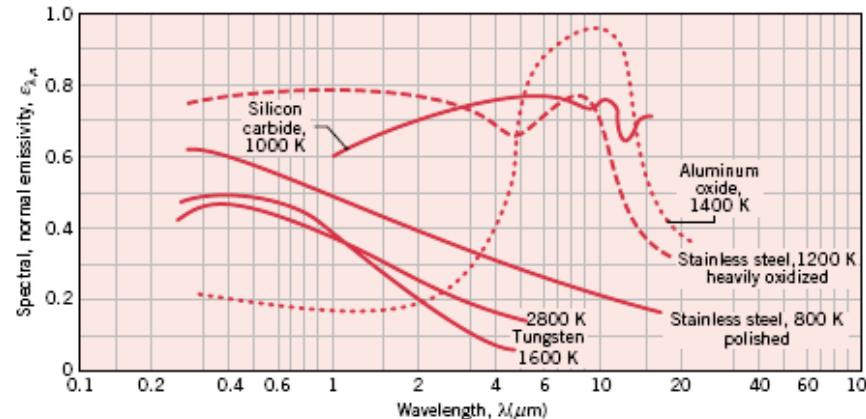
$$\varepsilon(T) \equiv \frac{E(T)}{E_b(T)} = \frac{\int_0^{\infty} \varepsilon_{\lambda}(T) E_{\lambda,b}(T) d\lambda}{E_b(T)}$$

- Valores representativos da emissividade total normal:



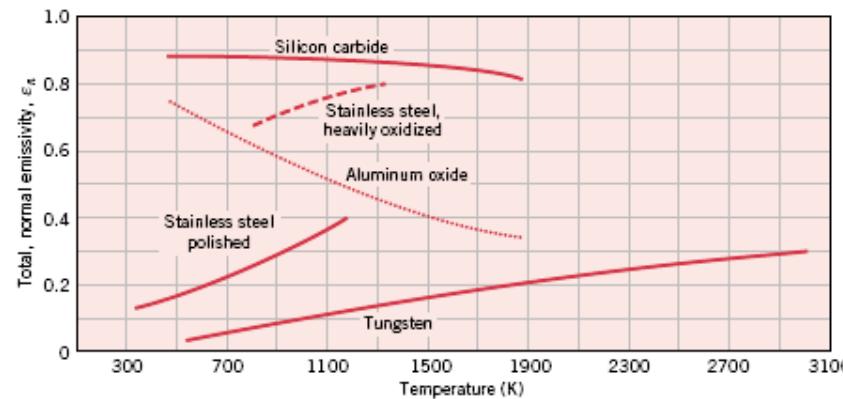
- Baixa emissividade para superfície polidas e aumentam para superfície não polidas e superfície oxidadas.
- A emissividade dos não condutores é comparativamente alta.

- Dependência espectral na emissividade normal espectral de materiais selecionados.



Note que $\varepsilon_{\lambda,n}$ 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.



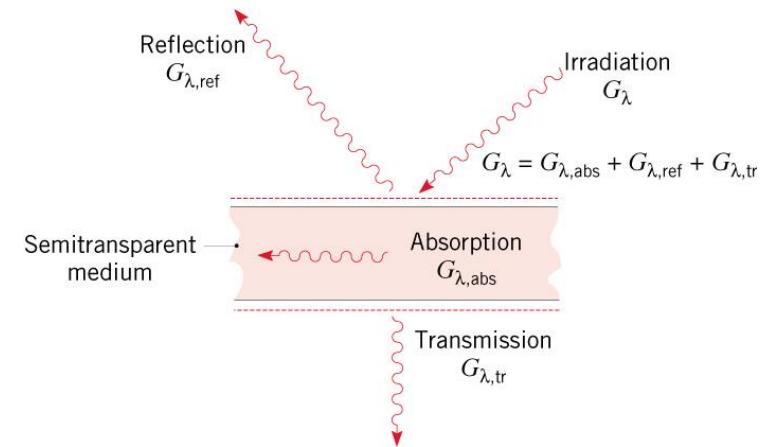
Superfície de Absorção, Reflexão e Transmissão

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

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

Balanço 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 $G_{\lambda,tr} = 0$.

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

- 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:

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

Reflectância

- A reflectância direcional espectral: Negligenciando a dependência da temperatura:

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

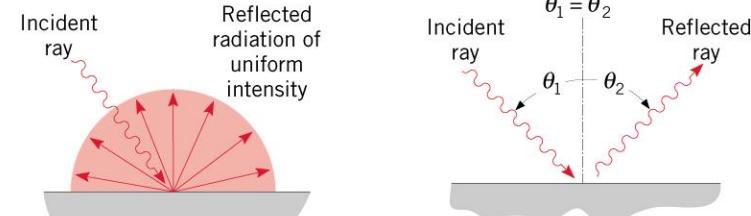
- A reflectância hemisférica espectral:

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

- A reflectância 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 Kirchoff

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

$$\varepsilon = \alpha$$

Entretanto, condições associadas a esta equação são muito restritivas:

Irradiação de um 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