

✓ **Como ocorre a emissão e absorção: fenômeno de superfície × fenômeno volumétrico**

Todos os tipos de matéria emitem radiação. “Uma descrição do mecanismo atômico e molecular pela qual a radiação é produzida por mecanismos quânticos está fora do escopo desta discussão. Uma descrição **qualitativa**, entretanto, é possível. Quando energia é fornecida a um corpo sólido, algumas de suas moléculas e átomos são elevadas a estados excitados. Existe a tendência para que estes átomos ou moléculas retornem para estados com energia mais baixa. Quando isso ocorre, energia é emitida na forma de onda eletromagnética. **Devido ao fato da radiação resultar de alterações nos estados eletrônicos**<sup>(região de visível e UV)</sup>, **vibracionais e rotacionais**<sup>(região do infravermelho)</sup> **de átomos e moléculas, a radiação se distribuirá por uma faixa de comprimentos de onda.**” (Bird et al.)

A emissão da radiação pode se dar como um **fenômeno volumétrico** ou de **superfície**. O primeiro é característico de gases e sólidos semitransparentes, tais como vidro e cristais de sais a temperaturas elevadas. O tratamento matemático destes processos é complexo e uma introdução a este pode ser encontrada em Kreith & Bohn (2003, p. 536 – item 9.8) ou Bird et al. (2004, p. 480-item 16.6). Nos cursos de graduação, normalmente o enfoque é para **a radiação enquanto fenômeno de superfície, característico da radiação de líquidos e sólidos em contato com gases ou vácuo.** “**Na maioria dos sólidos e dos líquidos, a radiação emitida das moléculas internas é fortemente absorvida pelas moléculas adjacentes.** Assim a radiação que é emitida de um sólido ou um líquido se origina das moléculas que se encontram a uma distância não superior a 1µm da superfície. É por essa razão que a emissão de um sólido ou um líquido no interior de um gás adjacente ou vácuo é vista como um **fenômeno de superfície**”<sup>(Incropera & De Witt, p.494, 5a edição)</sup>. Cabe salientar que a atmosfera terrestre é gasosa, porém pode ser modelada de uma forma simplificada, usando-se a teoria para radiação enquanto fenômeno de superfície como veremos adiante.

Associamos à *emissão* de energia radiante a passagem de um sistema molecular ou atômico de um estado de alta energia para um de baixa energia. “**O processo inverso**, conhecido como **absorção**, ocorre quando a adição de energia radiante a um sistema atômico ou molecular causa a **passagem do sistema de um estado de baixa energia para um estado de alta energia**. Isso é o que ocorre quando a energia radiante atinge uma superfície sólida e provoca o aumento de sua temperatura”<sup>(Bird et al.)</sup>.

✓ **Tratamento matemático – entendendo o caráter espectral e modelando os fenômenos radiantes de superfície**

No vácuo todas as formas de energia radiante<sup>(ou seja não apenas a radiação térmica)</sup> se propagam com a velocidade da luz. O comprimento de onda, que caracteriza a onda eletromagnética, é relacionado a sua frequência pela equação:

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

(I)

em que  $c = 2.998 \times 10^8$  m/s.

Uma forma de se entender a radiação eletromagnética é concebê-la sob o ponto de vista corpuscular. Para isso, associamos à energia de uma onda eletromagnética de frequência  $\nu$ , uma partícula denominada *fóton*, o qual é definido como sendo uma partícula de carga e massa nulas e com uma energia dada por:

$$E = h\nu \quad (\text{II})$$

em que  $h$  é a constante de *Planck* e tem o valor  $6.626 \times 10^{-34}$  J.s.

Analisando as equações (I) e (II), percebe-se que diminuir o comprimento de onda da radiação eletromagnética corresponde a aumentar a energia dos fótons correspondentes. “Esse fato ajusta-se aos diversos mecanismos que produzem radiação. Energias relativamente baixas são liberadas quando uma molécula tem sua velocidade de rotação diminuída, e a radiação emitida situa-se no *infravermelho*. Por outro lado energias relativamente altas são liberadas quando um núcleo atômico passa de um estado de alta energia para um de energia mais baixa, e a radiação associada é a *radiação gama ou radiação X*. (...) A energia radiante emitida por um objeto aquecido tende a comprimento de ondas mais curtos (fótons de mais altas energias) na medida que a sua temperatura é elevada” (Bird et al. pág. 466).

“Quando uma onda eletromagnética atinge a superfície de um meio (seja ele sólido, líquido, partícula ou bolha), a onda pode ser refletida (parcial ou totalmente) e qualquer parte não refletida irá penetrar no meio. Enquanto ela estiver atravessando o meio, a onda poderá ser atenuada continuamente. **Se a atenuação for completa**, de forma que nenhuma radiação apareça no outro lado, **o corpo** é dito ser *opaco*. **Se a onda atravessa o meio sem atenuação**, o meio é dito ser *transparente*, enquanto que se houver **uma atenuação parcial**, teremos **um meio semitransparente**. Estas características dependem não só da natureza do material, mas também da sua espessura. Metais são quase sempre opacos.” (Braga em <http://www.users.rdc.puc-rio.br/wbraga/Cmec>)

Ou seja, a radiação que atinge a superfície de um sólido opaco é ou absorvida ou refletida. **A fração de energia incidente, numa dada frequência, que é absorvida é denominada de absortividade ( $\alpha$ )**. Para todo corpo, **a absortividade** é menor do que 1 e **varia consideravelmente com a frequência**.

Assim, se a radiação incidente sobre um corpo é  $G_I$ , apenas uma parte ( $G_A$ ) será absorvida e incorporada na energia interna, sendo a relação entre estas energias dada por:

$$G_A = \alpha G_I \quad (\text{R-I})$$

A questão agora passa a ser como modelar  $G_I$ . Vimos que a radiação se origina pela emissão de um corpo. Assim,  $G_I$  deve necessariamente ser proveniente da emissão radiante de algum corpo. Analisando-se o gráfico da p.104 vemos que a taxa emitida  $G_I$  de um corpo a uma temperatura  $T$  poderia ser obtida pelo cálculo da integral da energia em função do comprimento de onda. Felizmente, no final século XIX, determinou-se experimentalmente que existe uma relação direta entre a taxa emitida e a temperatura do corpo, sendo que a máxima emissão possível de um corpo a uma temperatura  $T$  é dado por:

$$G_E^{\max} = \sigma T^4 \quad (\text{R-2})$$

sendo,  $G_E^{\max}$  a máxima taxa de radiação que um corpo pode emitir,  $T$  é a temperatura absoluta do corpo e  $\sigma$  é uma constante numérica, denominada de **constante de Stefan-Boltzmann** e tem o valor no SI de  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ .

A equação (R-2) é conhecida como **lei de Stefan-Boltzmann** em homenagem a Josef Stefan (1835-1893) e Ludwig Eduard Boltzmann (1844-1906) que a postularam.

**Corpos** que **emitem à máxima radiação** possível são chamados de **corpos negros** e também têm a propriedade de **absorverem toda a radiação** incidente.

Corpos reais não conseguem emitir toda a radiação possível<sup>(devido à sua estrutura atômica e molecular)</sup> e assim o cálculo da radiação emitida é feita a partir da capacidade de emissão de um corpo caracterizada pela **emissividade** do corpo ( $\epsilon$ ), definida como **a fração da radiação máxima que um corpo real pode emitir**. Como a absorvidade, a emissividade de corpos reais também é função do comprimento de onda da radiação<sup>(que mede a natureza da radiação)</sup> e da temperatura<sup>(lembre-se que a temperatura é uma medida da energia interna e portanto do estado organizacional da matéria)</sup>. A emissividade também é dependente da natureza da superfície.

Por exemplo, quanto maior a rugosidade da superfície maior será a emissividade. A seguir sintetizamos algumas informações a respeito da emissividade de alguns materiais (Incropera & De Witt, p. 508-5ª edição):

- a emissividade de superfícies metálicas é geralmente pequena. Um exemplo é o caso do alumínio quando altamente polido tem emissividade a 300K de 0.04 e a 600K de 0.06. O alumínio anodizado tem emissividade a 300K de 0.82 e a 400K de 0.76. O alumínio 24-ST exposto a intempéries tem emissividade a 310K de 0.4 e a 800K de 0.6. Para uma análise mais pormenorizada observe os dados da tabela A.11 de Incropera & De Witt ou da tabela 9.2 de Kreith & Bohn.
- a presença de uma camada de óxido sobre a superfície pode aumentar a sua emissividade.
- a emissividade de materiais não condutores de eletricidade não é baixa, excedendo usualmente o valor de 0.6.
- a maioria dos não metais e óxidos metálicos possuem emissividades acima de 0.8 à temperatura ambiente ou acima<sup>(a emissividade cresce com a temperatura para qualquer superfície?)</sup>.

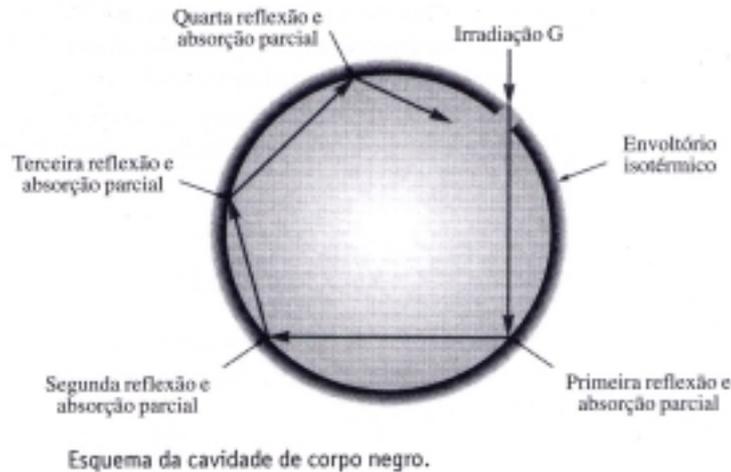
Em função do que foi exposto, chegamos à seguinte fórmula para o cálculo da radiação emitida de um corpo ( $G_E$ ) à temperatura  $T$ <sup>(na equação (R-3) estamos admitindo emissividade constante, para simplicidade de apresentação)</sup>:

$$G_E = \epsilon G_E^{\max} = \epsilon \sigma T^4 \quad (\text{R-3})$$

Assim, a radiação incidente sobre um corpo pode ser relacionada com a radiação emitida por outro corpo e será a ela igual se entre os dois corpos não ocorrer absorção da radiação emitida.

A utilidade da lei de Stefan-Boltzmann está na possibilidade do cálculo da radiação total emitida em todas as direções e sobre todos os comprimentos de onda a partir do conhecimento da temperatura do corpo negro.

“Mencionamos que a constante de Stefan-Boltzmann foi determinada experimentalmente. Isto quer dizer que temos à nossa disposição um corpo realmente negro. *Sólidos com superfícies perfeitamente negras não existem.* Entretanto podemos obter uma aproximação para uma superfície negra fazendo um furo muito pequeno na parede de uma cavidade isotérmica<sup>(veja figura a seguir – analisando a figura explique porque o dispositivo pode ser considerado como sendo um corpo negro)</sup>



Esquema da cavidade de corpo negro. Figura extraída de Kreith & Bohn (p. 483)

O próprio furo comporta-se como uma superfície muito aproximadamente negra. A medida de quanto o furo é uma boa aproximação pode ser avaliada com auxílio da seguinte relação, que dá a emissividade do furo ( $\epsilon_{\text{furo}}$ ), em uma cavidade com paredes rugosas em termos da emissividade das paredes da cavidade ( $\epsilon$ ) e da fração da área total interna da cavidade cortada pelo furo ( $f$ ):

$$\epsilon_{\text{furo}} \cong \frac{\epsilon}{\epsilon + f(1 - \epsilon)}$$

se  $\epsilon=0,8$  e  $f=0,001$  então  $\epsilon_{\text{furo}}=0,99975$ . Portanto, 99,975% da radiação que incide no furo será absorvida. A radiação que emerge do furo será muito aproximadamente a radiação de um corpo negro.” (Bird et al., p.469)

De acordo com Bird et al., a lei de Stefan-Boltzmann pode ser deduzida a partir da termodinâmica, desde que a teoria de campos eletromagnéticos seja considerada. Ou ainda, como salientamos a dedução da lei de Stefan-Boltzmann pode ser obtida por integração da lei de distribuição de Planck, deduzida a partir da definição dada na equação (II) (p. 107).

A famosa equação da distribuição de Planck fornece o fluxo de energia radiante de um corpo negro na faixa de comprimento de onda entre  $\lambda$  e  $\lambda+d\lambda$ , qual seja:

$$q'' = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5 \left( e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)} \quad \text{(III)}$$

em que  $k=1.3805 \times 10^{-23}$  J/K e é chamada de constante de Boltzmann.

Assim, para se obter a lei de Stefan-Boltzmann deve-se efetuar a seguinte integral:

$$q_{E}^{\text{max}} = \int_0^{\infty} q_{eq,III} d\lambda = \sigma T^4$$

Do cálculo da integral acima resulta:

$$\sigma = \frac{2 \pi^5 k^4}{15 c^2 h^3}$$

Além de se deduzir a lei de Stefan-Boltzmann a partir da distribuição de Planck, podemos obter uma expressão que caracteriza o ponto de máximo (comprimento de onda associado à máxima radiação) no gráfico de radiação emitida em função do comprimento de onda (veja p.104). Procedendo-se à derivada da distribuição de Planck em função do comprimento de onda e igualando-a a zero temos:

$$\lambda_{\text{max}} \cdot T = 2897.8 \text{ (}\mu\text{m.K)} \quad (\text{IV})$$

A expressão (IV), originalmente determinada experimentalmente, é conhecida por *Lei do deslocamento de Wien*. De acordo com esse resultado, o poder emissivo espectral máximo é deslocado para menores comprimentos de onda com o aumento da temperatura. Ele é útil primariamente para a estimativa da temperatura de corpos remotos (veja exemplo a seguir). A lei prevê, em concordância com a experiência, que a cor aparente da radiação desloca-se do **vermelho** (comprimento de onda longo) na direção do **azul** (comprimento de onda curto) quando a temperatura cresce (Bird et al., p.471; Incropera; DeWitt, p.502).

---

**Exemplo de aplicação da lei de Wien:** estimativa da temperatura do sol (extraído do exemplo 16.3-1 de Bird et al., p. 472) e cálculo da máxima taxa de radiação emitida pelo sol.

Para **cálculos aproximados**, o **SOL** pode ser considerado como sendo **um corpo negro**, emitindo radiação com intensidade máxima a  $\lambda_{\text{máx}} = 0,5\mu\text{m}$  (5000 Å). Com esta informação, estima-se a temperatura da superfície do sol e o fluxo térmico emitido pela superfície solar, como segue:

**da lei de deslocamento de Wien:**  $\lambda_{\text{max}} T = 2897,8 \mu\text{m.K} \Rightarrow T_{\text{sup,sol}} = 5796 \text{ K}$

**da lei Stefan-Boltzmann:**  $q_{E}^{\text{max}} = \sigma T^4 \Rightarrow q_{E,\text{sol}}^{\text{max}} = 63.987 \times 10^6 \text{ W/m}^2$

---

Vimos que todas as superfícies sólidas emitem energia radiante e que a razão entre a radiação emitida por uma superfície e a radiação emitida por um *corpo negro* à mesma temperatura é definida como **emissividade** ( $\epsilon$ ). Esta é uma quantidade menor que 1 para superfícies reais, e não fluorescentes.

Assim a distribuição de energia radiante de corpos reais comparativamente ao corpo negro pode ser vista na figura a seguir:

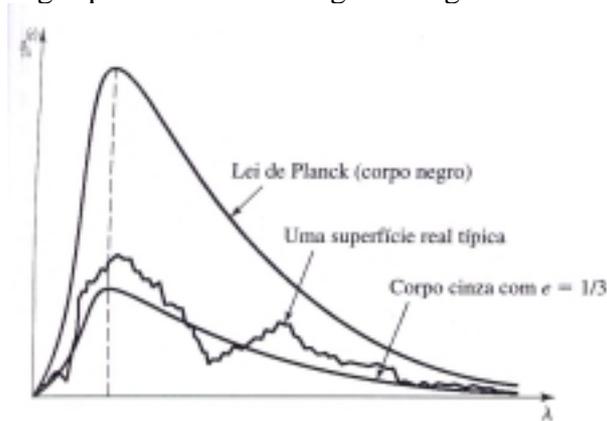


Figura extraída de Bird et al. (p. 471)

Nesta figura, aparece uma outra classificação de corpos, a saber, surge a denominação de um **corpo cinza** *(o termo superfície cinza é mais comum que corpo cinza)*. Uma superfície cinza é definida como sendo um corpo hipotético para o qual a absorptividade e a emissividade são constantes sobre toda a faixa de frequência e para qualquer temperatura, ou seja, **superfícies cinzas são superfícies para as quais os valores de  $\alpha$  e  $\epsilon$  são independentes do comprimento de onda ao longo das regiões espectrais de irradiação e de emissão na superfície**. Pode-se mostrar que um corpo cinza sempre absorve a mesma fração da radiação incidente de qualquer frequência, e que para corpos cinzas:

$$\alpha = \epsilon$$

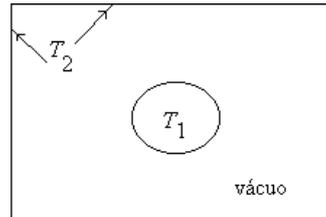
A figura acima traz indícios de que **superfícies reais podem ser aproximadas por superfícies cinzas**, simplificando o tratamento matemático, já que a sua emissão poderá ser modelada segundo a equação R-3 (p. 101) para qualquer comprimento de onda. Para cálculos simplificados ou preliminares esta hipótese é bastante razoável para inúmeros corpos.

## **Procedimento de modelagem da radiação enquanto fenômeno de superfície – caso de superfícies que se enxergam totalmente**

1. **Escolha um VC**, i.e., selecione **o corpo** em relação ao qual a taxa de transferência de calor por radiação deseja ser calculada: esta etapa corresponde a escolher a superfície que emitirá radiação e sobre a qual poderá incidir radiação.
2. **Identifique** todas as **radiações incidentes**.  
**Observação:** atentar para a existência de **corpos transparentes ou semi-transparentes** através dos quais **radiação é transmitida** e que poderá **incidir sobre a superfície do VC**.
3. Escreva **a equação** para a **radiação emitida** pela superfície do VC.
4. Escreva **uma equação** para **cada** taxa de **radiação incidente** sobre a superfície do VC.

5. Para **cada taxa de radiação incidente**, escreva **a equação da quantidade de energia absorvida**.

**Exemplo 01:** **equacionamento simplificado** (segundo hipóteses listadas) **da taxa de calor trocada** em regime permanente na ausência de geração de calor entre uma superfície 1 à temperatura  $T_1$  no interior de um ambiente confinado com vácuo de paredes a uma temperatura  $T_2 > T_1$ . A superfície 1 é cinza e a superfície 2 é negra. A superfície externa do corpo 2 é adiabática.



**para um VC sobre a superfície 1:**  $q_{\text{trocado}} = A_1 (\alpha_1 \varepsilon_2 \sigma T_2^4 - \varepsilon_1 \sigma T_1^4) > 0$

Aplicando as hipóteses simplificadoras ( $\alpha_1 = \varepsilon_1, \varepsilon_2 = 1$ ):

$$q_{\text{trocado}} = A_1 (\varepsilon_1 \sigma T_2^4 - \varepsilon_1 \sigma T_1^4) = A_1 \varepsilon_1 \sigma (T_2^4 - T_1^4)$$

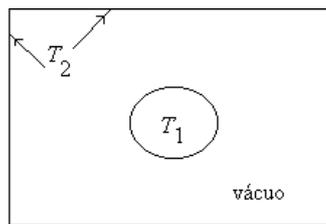
**para um VC sobre a superfície 2:**  $q_{\text{trocado}} = -A_2 (\alpha_2 \varepsilon_1 \sigma T_1^4 - \varepsilon_2 \sigma T_2^4) > 0$

Aplicando as hipóteses simplificadoras ( $\alpha_2 = \varepsilon_2 = 1$ ):

$$q_{\text{trocado}} = A_2 (\sigma T_2^4 - \varepsilon_1 \sigma T_1^4) = A_2 \sigma (T_2^4 - \varepsilon_1 T_1^4)$$

Donde  $A_1 \varepsilon_1 (T_2^4 - T_1^4) = A_2 (T_2^4 - \varepsilon_1 T_1^4)$  deve se verificar para as hipóteses assumidas.

**Exemplo 02:** **equacionamento simplificado** (segundo hipóteses listadas) **da taxa de calor trocada** em regime permanente na ausência de geração de calor entre uma superfície 1 à temperatura  $T_1$  no interior de um ambiente confinado com vácuo de paredes a uma temperatura  $T_2 > T_1$ . A superfície 1 e 2 são cinzas. A superfície externa do corpo 2 é adiabática.



para um VC sobre a superf\u00edcie 1:  $q_{\text{trocado}} = A_1 (\alpha_1 \varepsilon_2 \sigma T_2^4 - \varepsilon_1 \sigma T_1^4) > 0$

Aplicando as hip\u00f3teses simplificadoras ( $\alpha_1 = \varepsilon_1$ ):

$$q_{\text{trocado}} = A_1 (\varepsilon_1 \varepsilon_2 \sigma T_2^4 - \varepsilon_1 \sigma T_1^4) = A_1 \varepsilon_1 \sigma (\varepsilon_2 T_2^4 - T_1^4)$$

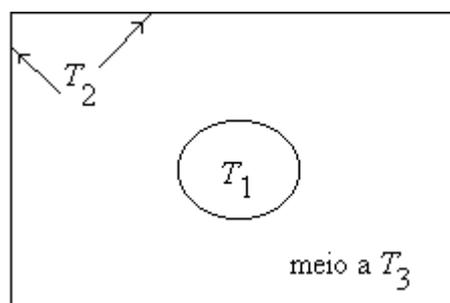
para um VC sobre a superf\u00edcie 2:  $q_{\text{trocado}} = -A_2 (\alpha_2 \varepsilon_1 \sigma T_1^4 - \varepsilon_2 \sigma T_2^4) > 0$

Aplicando as hip\u00f3teses simplificadoras ( $\alpha_2 = \varepsilon_2$ ):

$$q_{\text{trocado}} = A_2 (\varepsilon_2 \sigma T_2^4 - \varepsilon_2 \varepsilon_1 \sigma T_1^4) = A_2 \varepsilon_2 \sigma (T_2^4 - \varepsilon_1 T_1^4)$$

Donde  $A_1 \varepsilon_1 (\varepsilon_2 T_2^4 - T_1^4) = A_2 \varepsilon_2 (T_2^4 - \varepsilon_1 T_1^4)$  deve se verificar para as hip\u00f3teses assumidas.

**Exemplo 03:** equacionamento simplificado (segundo hip\u00f3teses listadas) da taxa de calor trocada em regime permanente na aus\u00eancia de gera\u00e7\u00e3o de calor entre uma superf\u00edcie 1 \u00e0 temperatura  $T_1$  rodeada por um fluido semi-transparente a  $T_3 < T_1$  no interior de uma c\u00e2mara com paredes a uma temperatura  $T_2 > T_1$ . A superf\u00edcie 1 \u00e9 cinza e a superf\u00edcie 2 \u00e9 negra. A superf\u00edcie externa do corpo 2 \u00e9 adiab\u00e1tica.



para um VC sobre a superfície 1:

$$q_{\text{trocado}} = A_1 (\alpha_1 \tau_3 \varepsilon_2 \sigma T_2^4 + \alpha_1 \varepsilon_3 \sigma T_3^4 - \varepsilon_1 \sigma T_1^4)$$

Aplicando as hipóteses simplificadoras ( $\alpha_1 = \varepsilon_1, \varepsilon_2 = 1$ ):

$$q_{\text{trocado}} = A_1 (\varepsilon_1 \tau_3 \sigma T_2^4 + \varepsilon_1 \varepsilon_3 \sigma T_3^4 - \varepsilon_1 \sigma T_1^4) = A_1 \varepsilon_1 \sigma (\tau_3 T_2^4 + \varepsilon_3 T_3^4 - T_1^4)$$

Observação: se o meio 3 fosse negro  $\varepsilon_3 = 1$  e  $\alpha_3 = 1$  (donde  $\tau_3 = 0$ , ou seja o meio 3 seria opaco) e assim:

$$q_{\text{trocado}} = A_1 \varepsilon_1 \sigma (T_3^4 - T_1^4)$$

Observação: neste exemplo, o objetivo foi ilustrar o equacionamento da radiação e não nos preocupamos em analisar a coerência física das hipóteses do enunciado. A hipótese de que  $T_1 \neq T_2; T_2 \neq T_3$  e  $T_1 \neq T_3$  não deve ser fisicamente realizável, mantidas as demais hipóteses do enunciado.

## Resistência e coeficiente de troca térmica para o mecanismo da radiação:

Das definições de resistência e de coeficiente de troca térmica temos:

$$q_{\text{rad}} = \frac{T_2 - T_1}{R_{\text{rad}}} \quad \text{e} \quad q_{\text{rad}} = h_{r,1} A_1 (T_2 - T_1)$$

A partir dos exemplos apresentados, percebe-se que nem sempre é possível estabelecer apenas duas temperaturas características da troca térmica por radiação. Adicionalmente, a dependência da taxa de calor trocada com as temperaturas não é linear. Contudo, em algumas situações é possível deduzir uma expressão para a resistência de radiação e coeficiente de troca térmica por radiação. É o caso por exemplo da situação do exemplo 1 da p.112, como mostrado a seguir.

Para o exemplo 1 da p. 112 vimos que  $q_{\text{rad}} = A_1 \varepsilon_1 \sigma (T_2^4 - T_1^4)$ . Donde temos que:

$$q_{\text{rad}} = A_1 \varepsilon_1 \sigma (T_2^2 - T_1^2)(T_2^2 + T_1^2) = A_1 \varepsilon_1 \sigma (T_2 - T_1)(T_2 + T_1)(T_2^2 + T_1^2)$$

Ou seja,

$$q_{\text{rad}} = A_1 \left[ \varepsilon_1 \sigma (T_2 + T_1)(T_2^2 + T_1^2) \right] (T_2 - T_1)$$

Definindo  $h_{r,1} = \varepsilon_1 \sigma (T_2 + T_1) (T_2^2 + T_1^2)$  temos:

$$q_{rad} = h_{r,1} A_1 (T_2 - T_1)$$

E assim:

$$R_{rad} = \frac{1}{A_1 \varepsilon_1 \sigma (T_2 + T_1) (T_2^2 + T_1^2)}$$

Ou seja, percebemos que a resistência e o coeficiente de troca térmica por radiação são função das temperaturas dos meios entre os quais há troca térmica por radiação.

O conceito de resistência de radiação é importante para a visualização de como se dá a troca térmica por radiação em situações envolvendo diversas superfícies (veja itens 9.5 e 9.6 de Kreith & Bohn) ou em cálculos simplificados em que o coeficiente de película é arbitrariamente corrigido para incorporar um efeito de radiação.

### **Procedimento de modelagem da radiação enquanto fenômeno de superfície – caso de superfícies que não se enxergam totalmente**

Quando as superfícies não se enxergam totalmente<sup>(veja figura a seguir)</sup>, apenas uma parte da radiação emitida por uma superfície incidirá sobre a outra. Assim, deve-se calcular a fração da radiação emitida pela superfície A incidente sobre a superfície B, a que se chama de fator de forma, simbolizado por  $\mathfrak{S}_{AB}$  ou  $F_{AB}$ .

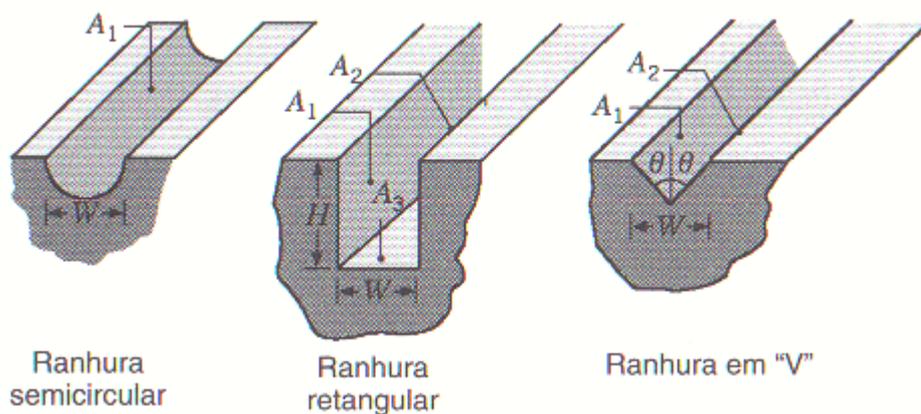


figura extraída do exercício 13.2 de Incropera & De Witt em que se quer saber a troca da calor por radiação entre a cavidade e o meio que envolve a superfície.

**Exemplo de aplicação do fator de forma:** cálculo da taxa de radiação trocada entre duas superfícies negras 1 e 2 no vácuo:

$$q_{rad,1-2} = \mathfrak{S}_{21} A_2 \sigma T_2^4 - \mathfrak{S}_{12} A_1 \sigma T_1^4 = \mathfrak{S}_{21} A_2 \sigma (T_2^4 - T_1^4) = \mathfrak{S}_{12} A_1 \sigma (T_2^4 - T_1^4)$$

**Exemplo adicional** de superfícies que não se enxergam totalmente: troca térmica entre o sol e cada um dos planetas (veja esquema da p. 99).

O cálculo do fator de forma é extensivamente coberto por Incropera & De Witt no capítulo 13 ou por Kreith & Bohn no capítulo 9.

---

**Exemplo de aplicação: (exemplo adaptado de exercício à p. 318 de W. Braga e do exemplo 16.4-1 de Bird et al., p. 476).** A temperatura aparente do Sol é 5796 K (lembre-se do exemplo resolvido à p. 110, no qual obteve-se que o fluxo de radiação emitido pelo sol é de  $63.987 \times 10^6$  (SI) e tenha em mente a figura da p. 99). Se a transmissividade da atmosfera é de 0.82, a distância da Terra ao Sol é de 150 milhões de quilômetros e o raio do Sol é de 695000 quilômetros, pede-se obter a irradiação incidente na superfície terrestre, denominada de constante solar.

Dados do enunciado e do exemplo da p.110:

$$T_{Sol} = 5796 \text{ K}$$

$$r_{Sol} = 6,95 \times 10^8 \text{ m}$$

$$\text{dist. Sol-Terra} = 1,50 \times 10^{11} \text{ m}$$

$$\tau = 0,82$$

$$\text{fluxo calor emitido pelo Sol: } q_E'' = 63.987 \times 10^6 \text{ W/m}^2$$

Donde temos que taxa de calor emitida pelo Sol é dada por:  $q_e = 4\pi r_{Sol}^2 q_E''$

Analisando a figura à p., podemos para um cálculo aproximado considerar que a terra é uma esfera virtual centrada no sol, i.e. que descreve uma trajetória esférica em torno do sol (sabe-se desde a Idade Média que isto não é verdade) de raio igual à distância entre o sol e a terra. Adicionalmente, consideraremos que a energia emitida pelo sol incidirá sobre a superfície esférica sobre a qual a terra é admitida orbitar, i.e., consideraremos que nada existe para absorver energia (desprezaremos as parcelas de energia absorvidas pelos planetas Mercúrio e Vênus e demais astros que existirem entre o sol e a terra). Nestas hipóteses, podemos calcular a *irradiação solar que incide sobre a atmosfera terrestre* como:

$$q_I = \frac{q_E'' 4\pi r_{Sol}^2}{4\pi \text{dist}_{Sol-Terra}^2}$$

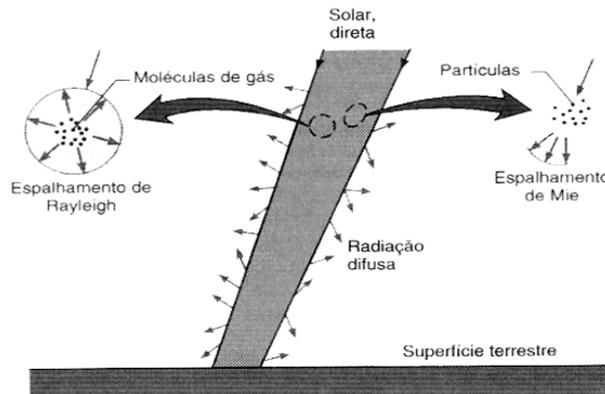
Assim, a irradiação sobre a superfície terrestre é obtida multiplicando-se a expressão acima pela transmissividade da atmosfera  $\tau$ , a saber:

$$q_{I,\text{sup}} = \tau \frac{q_E'' r_{Sol}^2}{\text{dist}_{Sol-Terra}^2} = 1374 \left( \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right) \text{ - constante solar}$$

---

## Modelagem da radiação atmosférica – numa abordagem de fenômeno de superfície

Discutimos anteriormente que a radiação emitida pelo sol pode ser modelada como sendo uma radiação proveniente de um **corpo negro à temperatura de 5800K**. Esta **radiação emitida pelo sol ao entrar na atmosfera se altera quanto à distribuição espectral e direção**. Isto é devido à absorção e reflexão dos componentes do ar atmosférico (por exemplo sabe-se que o O<sub>3</sub> absorve radiação na região do UV e visível, O<sub>2</sub> absorve na região do visível, H<sub>2</sub>O e CO<sub>2</sub> absorvem na região do IR, além dos demais componentes do ar atmosférico). A dispersão atmosférica fornece o re-direcionamento dos raios de sol conforme modelos de dispersão, chamados de dispersão de Rayleigh e Mie (veja figura a seguir). A dispersão Rayleigh ocasionada pelas moléculas gasosas fornece uma dispersão aproximadamente uniforme da radiação em todas as direções. A dispersão de Mie, oriunda das partículas de poeira e aerossol da atmosfera é concentrada nas direções que se encontram próximas àquelas dos raios solares.



Espalhamento da radiação solar na atmosfera terrestre.

(figura de Incropera & De Witt, p.369)

Levar em conta todos os aspectos mencionados no parágrafo precedente não é trivial. Felizmente, de evidências experimentais percebeu-se que a emissão atmosférica é em grande parte devida às moléculas de CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O e está concentrada nas regiões espectrais de 5 a 8 μm e acima de 13 μm. Desta forma, o fluxo de irradiação da Terra devida à emissão atmosférica ( $G_{ceu}$ ) pode ser representado como se fosse oriundo de um corpo negro a uma temperatura média  $T_{ceu}$ , denominada de temperatura efetiva do céu e que é obtida experimentalmente. Ou seja, o fluxo de irradiação da atmosfera terrestre sobre a superfície terrestre é dado como:

$$G_{ceu} = \sigma T_{ceu}^4 \quad (R-4)$$

**Exemplos de valores para  $T_{ceu}$**  (segundo Incropera & De Witt):

céu claro e frio:  $T_{ceu} = 230K$   
céu encoberto e quente:  $T_{ceu} = 285K$

## Resumo do glossário de radiação (extraídas de Incropera & De Witt, p. 371-372, 4ª edição):

- emissão: o processo de produção de radiação pela matéria a uma temperatura não nula.
- absorção: o processo de converter a radiação interceptada pela matéria em energia térmica interna.
- corpo negro: o emissor e absorvedor ideal.
- emissividade: razão entre a radiação emitida por uma superfície e a radiação emitida por um corpo negro à mesma temperatura.
- absortividade: fração da radiação incidente absorvida pela matéria.
- irradiação ( $G$ ): taxa de incidência de radiação sobre uma superfície oriunda de todas as direções, por unidade de área da superfície.
- semitransparente: se refere a um meio no qual a absorção de radiação é um processo volumétrico.
- superfície cinza: uma superfície na qual a absortividade e a emissividade espectrais são independentes do comprimento de onda nas regiões espectrais da irradiação e da emissão na superfície.
- transmissão: o processo de passagem de radiação através da matéria.

## Resumindo os principais aspectos a serem usados na modelagem simplificada da radiação enquanto fenômeno de superfície:

### ➤ radiação térmica:

- propriedade que matéria tem de emitir energia
- faixa de comprimento de onda: 0.1 a 100  $\mu\text{m}$  correspondendo às regiões do ultravioleta (UV), do visível e do infravermelho (IR ou IV) – fenômenos que correspondem a alterações energéticas na eletrosfera atômica.
- tem caráter espectral: intensidade da radiação varia com o comprimento de onda.
- fenômeno pode em geral ser considerado de superfície (maioria de sólidos e líquidos – no interior dos sólidos ou líquidos há absorção por moléculas/átomos adjacentes). Quando o processo não é de superfície é chamado de volumétrico (gases e sólidos semitransparentes).

### ➤ radiação incidente (irradiação) pode ser refletida ( $\rho$ ), absorvida ( $\alpha$ ) e transmitida ( $\tau$ ).

➤ **Corpo negro:**  $\alpha = \varepsilon = 1$

➤ **Corpo cinza:**  $\alpha = \varepsilon < 1$

➤ **Emissividade e absortividade de corpos reais não são constantes** e dependem da radiação emitida/incidente.

➤ **Modelagem** – enquanto fenômeno de superfície e na hipótese de absortividades e emissividades constantes:

para o **corpo negro** o máximo fluxo de energia emitido é:

$$\sigma T^4$$

para um **corpo real** o fluxo de energia emitido é:

$$\varepsilon \sigma T^4$$

fluxo de energia absorvido por um **corpo real** é:

$$\alpha q_I''$$

(fluxo incidente)

( $q_I''$  é o

fluxo de energia emitido pela **atmosfera terrestre** é:

$$\sigma T_{ceu}^4$$

**procedimento de modelagem:**

- O fluxo de calor trocado entre um corpo 1 e as vizinhanças é dado por:  
 $q'' = \alpha_1 q_1^{tot} - \varepsilon_1 \sigma T_1^4$   
sendo que  $q_1^{tot}$  corresponde a todas as radiações incidentes que podem ser absorvidas pelo corpo 1.
  - Calcular  $q_1^{tot}$  levando em conta todas as possíveis fontes de emissão de radiação que incidem sobre o corpo 1.
- Modelagem de **superfícies que não se enxergam totalmente** requer o uso do **fator de forma**.

**Leitura recomendada:**

**Incropera & De Witt:** p. 5-7 (1.2.3), p. 18-19 - 5ª edição;  
p.347-348/494/495 (item 12.1) -4ª edição/5ª edição  
p.352-353/501 (item 12.3 – Introdução até antes do item 12.3.1) -4ª edição/5ª edição  
p.368-370/521-524 (item 12.8) -4ª edição/5ª edição  
p.524-527(item 12.9)-5ª edição

**Kreith & Bohn:** p. 18-20 (item 1.4)  
p. 481-482 (introdução)  
p. 483-495 (introdução e 9.3.1)  
p. 499-507 (item 9.3.4)

**Bird et al.:** p. 464-472

**Exemplos recomendados para leitura:**

**Incropera & De Witt:** exemplo 1.2 (p.7), exemplo 1.3 (p.10), exemplo 1.5 (p. 12), exemplo 1.6 (p. 15) – 5ª edição, exemplo 12.11 (p.370/523) - 4ª edição/5ª edição

**Kreith & Bohn:** exemplo 1.4 (p.20), exemplo 1.12 (p. 41), exemplo 9.18 (p.546)

**Bird et al.:** exemplo 16.5-2 (p. 479), exemplo 16.5-3 (p. 480)

**Exemplos de aplicação.**

**exercício 12.113** (Incropera & DeWitt, p. 551): Em regiões desertas é comum que a temperatura do céu à noite caia para  $-40^\circ\text{C}$ . Se a temperatura do ar ambiente é  $20^\circ\text{C}$  e o coeficiente convectivo para condições do ar sem vento for de aproximadamente de  $5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ , pode uma poça de água congelar?

*Hipóteses:* regime permanente; água contida em uma bandeja rasa bem isolada do chão; superfície da água tratada como corpo cinza.

Efetando um balanço de energia para um VC sobre a água na bandeja, para o qual não há entrada nem saída de fluxos materiais e tão pouco geração de calor. Ou seja, o BE resulta em:  $\frac{dU}{dt} = \sum q = 0$

Ou seja,  $0 = q''_{\text{irradiação céu}} - q''_{\text{rad. superf.}} + q''_{\text{conv}}$

Logo,  $0 = \alpha G_{\text{céu}} - \epsilon \sigma T_{\text{sup. água}}^4 + h (T_{\infty, ar} - T_{\text{sup. água}})$

Da tabela A-11 (de Incropera & De Witt): água a 300 K :  $\epsilon = 0.96$

Como do enunciado  $T_{\text{ceu}} = 233\text{K}$  e  $T_{\infty, ar} = 293\text{K}$  e como a água é assumida cinza:

$$0 = 0.96 \times 5.67 \times 10^{-8} (233)^4 - 0.96 \times 5.67 \times 10^{-8} T_{\text{sup}}^4 + 5(293 - T_{\text{sup}})$$

Resolvendo a equação acima, obtemos:

**$T_{\text{sup}} = 268.5 \text{ K } (-4.7^\circ\text{C}) < 0^\circ\text{C}$  e logo a superfície da água congelará.**

**Discussão:** Substituindo esse resultado no BE pode-se verificar como é a contribuição de cada fluxo térmico, a saber:

$$0 = q''_{\text{irradiação céu}} - q''_{\text{rad. superf.}} + q''_{\text{conv}}$$

$$0 = 160.42 - 282.9 + 122.5$$

Ou seja, na presença de vento o termo de convecção aumentará, podendo inclusive não ocorrer o congelamento.

**Exercício extraído de W. Braga, p. 324:** Um satélite artificial feito de alumínio de 5m de diâmetro, gira em torno da Terra, embora permanentemente voltado para o Sol. A absorvidade e a emissividade resultantes do tratamento térmico superficial externo do alumínio estão na tabela abaixo. Considerando que a radiação refletida da Terra e emitida por ela possa ser desprezada, que a temperatura aparente do Sol é de 5800K e que fontes internas ao satélite dissipam 10 kW, indique o balanço de energia associado ao satélite, levando em conta o período inicial de seu aquecimento e sua temperatura final (de equilíbrio). Dados adicionais: distância do satélite ao Sol:  $1.5 \times 10^8 \text{ km}$ ; raio solar =  $7 \times 10^5 \text{ km}$ .

absortividade	T (K)
0.4	até 500
0.6	de 501 a 3000
0.8	acima de 3000

Efetando um BE (na ausência de correntes materiais):

$$\frac{dU}{dt} = \sum q + \dot{E}_g$$

Mas (lembre-se do exemplo à p. 116),

$$G_{\text{Sol}} = \frac{E_b \cdot 4\pi r_{\text{Sol}}^2}{4\pi \text{dist}_{\text{Sol-sat}}^2} = \frac{\sigma T_{\text{Sol}}^4 \cdot 4\pi r_{\text{Sol}}^2}{4\pi \text{dist}_{\text{Sol-sat}}^2} = \frac{\sigma T_{\text{Sol}}^4 \cdot r_{\text{Sol}}^2}{\text{dist}_{\text{Sol-sat}}^2}$$

$$m_{sat} c_{p,sat} \frac{dT_{sat}}{dt} = \alpha G_{Sol} A_{sat} - \epsilon \sigma T_{sat}^4 A_{sat} + \dot{E}_g$$

$$m_{sat} c_{p,sat} \frac{dT_{sat}}{dt} = \alpha G_{Sol} (\pi r_{sat}^2) - \epsilon \sigma T_{sat}^4 (4\pi r_{sat}^2) + \dot{E}_g$$

A temperatura de equilíbrio é alcançada em regime permanente. Nesta situação:

$$0 = \alpha \frac{\sigma T_{Sol}^4 r_{Sol}^2}{dist_{Sol-sat}^2} (\pi r_{sat}^2) - \epsilon \sigma T_{sat}^4 (4\pi r_{sat}^2) + \dot{E}_g \quad \text{isolando } T_{sat}:$$

$$T_{sat}^4 = \frac{\alpha}{\epsilon} \frac{T_{Sol}^4 r_{Sol}^2}{4 dist_{Sol-sat}^2} + \frac{\dot{E}_g}{\epsilon 4 dist_{Sol-sat}^2} \quad (*)$$

Sendo:

$$\dot{E}_g = 10000 \text{ W}$$

$\alpha = 0.8$  (determinada para a temperatura do Sol de 5800K – diz respeito às características de absorção do satélite no tocante à radiação solar, que está a uma temperatura elevada)

$\epsilon = 0.6$  (assumindo que o satélite seja um corpo cinza e sendo a emissividade determinada à temperatura estimada do satélite, da ordem de 500K – emissividade é feita a partir da temperatura do satélite, certamente mais fria que o Sol).

Resolvendo (\*) obtemos  $T_{sat} = 300 \text{ K}$ . Assim precisamos reestimar o valor da emissividade do satélite, uma vez que a 300K a emissividade do satélite é menor. Com novo cálculo (usando  $\epsilon = 0.4$ ) chegamos a:

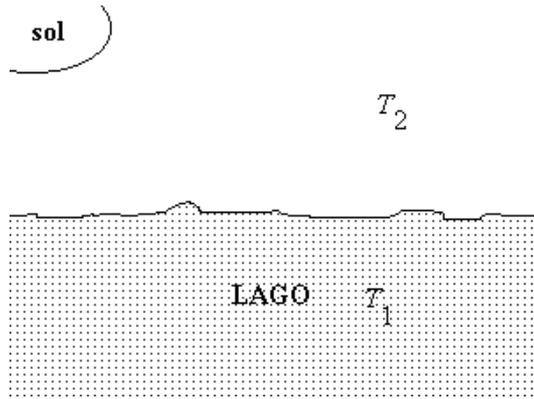
$$T_{sat} = 333 \text{ K} = 66^\circ \text{C}.$$

---

## Exercícios:

1. Explique o mecanismo de troca térmica por radiação.

2. Considere o problema de transferência de calor na superfície de um lago exposto ao ar atmosférico e iluminado pelo sol, como esquematizado na figura ao lado. Quais são os mecanismos de transferência de calor envolvidos no sistema? Todo o calor emitido pelo sol é absorvido pelo lago? Ao meio dia qual temperatura é maior  $T_1$  ou  $T_2$ ? E à meia noite?



3. Explique quando a equação  $q'' = \epsilon\sigma(T_1^4 - T_2^4)$  pode ser usada para descrever a taxa de transferência de calor por radiação entre dois corpos 1 e 2.
4. No interior do estado de Paraná é comum as donas de casa terem uma pequena horta no quintal. Também não são incomuns as geadas. Para proteger as hortaliças das geadas, a experiência ensinou as donas de casa a cobrirem as hortaliças com jornal. Explique porque ocorre a geada e porque basta cobrir as hortaliças com jornal para que não se forme o gelo sobre as mesmas.

**Exercícios recomendados:**

Exercícios complementares:

3, 4, 14 e 24

Exercícios de Incropera & De Witt:

1.49-4ª edição (1.70 – 5ª edição); 3.46-4ª edição (3.49-5ª edição)

### Questões para a reflexão:

- **Sobre a atmosfera terrestre:**

À noite a emissão do céu é a única taxa de irradiação que chega à superfície, assim em noites bastante frias, pode ocorrer formação de gelo mesmo quando a temperatura do ar ambiente for 273.15K (ilustrado pelo exercício 12.113 do Incropera, resolvido na p. 119). A presença de vapor de água e gás carbônico faz com que a atmosfera retenha grande parte das ondas emitidas pelos objetos da superfície terrestre, impedindo que sejam enviadas para o espaço. Esse efeito é importante para que a Terra tenha uma temperatura média, que nos últimos 5000 anos, se manteve entre 19 e 27°C. Se isso não acontecesse, a energia radiante recebida do Sol durante o dia seria perdida para o espaço durante a noite, reduzindo a temperatura terrestre a níveis insuportáveis.

- **Sobre a diferença entre as temperaturas da Terra e da Lua:** (do livro Asimov Explica)

“A rotação da Lua em relação ao Sol faz com que cada uma das partes de sua superfície fique exposta à luz solar durante duas semanas seguidas. Sujeitas a este período limitado de radiação, a temperatura superficial da Lua alcança em determinadas regiões no máximo apenas a temperatura do ponto de ebulição da água. Durante toda a noite lunar, a temperatura permanece não inferior a 120° acima do zero absoluto!, porque antes que ela desça a níveis mais baixos surge novamente o Sol.

O caso da Terra é completamente diferente devido à existência da atmosfera e do oceano. O oceano absorve calor de maneira mais eficiente do que as rochas (pense a respeito!) e o emite mais lentamente. Ele atua como um amortecedor térmico, sua temperatura não se eleva muito sob a ação dos raios solares, nem cai excessivamente durante a noite, como acontece em terra (qual propriedade física está relacionada?). Além disso, devido ao rápido movimento de rotação da Terra, a maioria dos pontos de sua superfície experimenta dia ou noite por apenas algumas horas de cada vez. E mais ainda, os ventos na atmosfera da Terra transportam calor da face em que é dia para a face em que é noite, e dos trópicos para os pólos. Conseqüentemente, a Terra sofre oscilações térmicas menos intensas do que a Lua, embora ambas encontrem-se à mesma distância do Sol.”

- **Sobre as cores:**

Os processos de *absorção* e de *reflexão* da superfície são responsáveis pela nossa percepção de cor. “A menos que a temperatura da superfície esteja a uma alta temperatura ( $T > 1000\text{K}$ ), tal que seja incandescente, a cor não é devida à emissão, que é concentrada na região do infravermelho e, portanto, imperceptível ao olho. A cor é devida à reflexão e à absorção relativas à parte visível da *irradiação* que é incidente do sol ou de outra fonte artificial de luz. A absorção da parte visível pode ser explicada por transições eletrônicas que ocorrem nos orbitais moleculares *d* e assim estão normalmente associadas à existência de algum metal de transição, embora outros elementos químicos também apresentem cores (tais como enxofre e iodo). Uma folha é “**verde**” porque suas células contêm clorofila, um pigmento que mostra forte absorção de azul e vermelho e reflexão preferencial ao verde. Uma superfície é “**negra**” se ela absorve toda a radiação incidente visível, e é “branca” se

refletir essa radiação. Mas cuidado ao interpretar tais efeitos visuais. Para uma dada irradiação, a “cor” de uma superfície pode não indicar sua capacidade global como um absorvedor ou um refletor, uma vez que parte da irradiação pode estar na região do infravermelho. Por exemplo, a neve, é altamente refletora à radiação visível mas absorve fortemente a radiação infravermelha, aproximando-se, dessa forma, do comportamento de um corpo negro em comprimentos de ondas elevados” (Incropera & De Witt, p. 512). “O nome “corpo negro” aparece pelo fato de todas as substâncias boas absorvedoras de luz visível aparecerem pretas aos olhos. Porém não é um bom indicador em toda a faixa do espectro.” (W. Braga, p. 306)

- *Quantificando o efeito da radiação:*

Em um processo de descarga para a atmosfera de gás a 1100°C contendo 5% de água passando por uma chaminé de seção reta de 0.36m<sup>2</sup> de tijolos refratários a uma temperatura de 1000°C, a parcela de troca térmica por radiação é cerca de 50% da taxa de calor transferida para a chaminé.

- *Dos fornos de microondas:*

Sobre a radiação na faixa das Microondas e o uso do forno de microondas (frequência de aproximadamente 2,5 GHz) (Ferraro et al., 2002)

“A radiação das microondas é classificada como radiação não ionizante, pois seus efeitos são estritamente térmicos e, portanto, **não alteram a estrutura molecular do material que está irradiado.**

As microondas são geradas em válvulas eletrônicas especiais e usadas em uma série de aplicações, como em comunicações nos sistemas de telefonia e televisão. Sua vantagem sobre as ondas de rádio é que, devido às altas frequências, podem carregar mais informações. A grande desvantagem é que o sinal não sofre reflexão na atmosfera e, por esse motivo, não podem ser captadas além da linha do horizonte. A transmissão de microondas a grande distância requer o uso de redes de antenas receptoras posicionadas em pontos altos e separadas por no máximo, 40 km, ou o uso de satélites que operem como estações repetidoras.

Em um forno de microondas, a radiação produzida por um magnetron, é direcionada por um guia de ondas que as remete para a câmara do forno. Essa câmara possui paredes metálicas que refletem as microondas continuamente até serem absorvidas pelo alimento em preparação. A porta de vidro é permeada por uma grade metálica que age também como um refletor para as ondas.

Para entender como um alimento é cozido ou descongelado em um forno desse tipo, **devemos lembrar que a molécula de água é polarizada**, ou seja, possui uma região eletrizada negativamente e outra positivamente, devido à disposição dos átomos que constituem sua molécula (oxigênio com maior eletronegatividade em relação ao hidrogênio). Se a água for colocada na presença de um campo elétrico intenso, suas moléculas tendem a girar e se alinhar com o campo. Isto ocorre, porque na condição em que o arranjo molecular é aleatório, as moléculas da água possuem uma certa energia potencial eletrostática, e na presença de um campo elétrico, a tendência é buscar uma situação de energia potencial mínima. **E quando as moléculas giram devido à presença do campo elétrico, há atrito entre as moléculas, convertendo parte da energia potencial em energia térmica (a temperatura da água aumenta).**

Este tipo de forno utiliza microondas com frequência de 2.45GHz para alterar a orientação das moléculas da água bilhões de vezes por segundo. Essa foi a frequência escolhida porque não é usada em comunicações e porque permite que a molécula complete a rotação antes de inverter novamente a posição. Isso explica porque apenas os alimentos contendo água, açúcar e gorduras (ou outras moléculas polares) se aqueçam no forno.”

- *Do efeito estufa:*

“O efeito estufa é causado por gases presentes na atmosfera terrestre e que absorvem determinados comprimentos de onda da radiação infravermelha emitida pelo planeta que de outra forma iriam ser irradiados para o espaço exterior... Este processo mantém a temperatura da superfície terrestre aproximadamente a 30°C mais quente caso não existisse atmosfera. O aumento nas concentrações de CO<sub>2</sub> faz com que mais calor fique retido na atmosfera do planeta. (...)

A determinação dos impactos do aquecimento global do séc. XXI é muito difícil e repleta de incertezas. Isto se deve muito ao fato de que os enormes modelos computacionais utilizados para fazer simulações e prever climas futuros são pouco adequados para simular casos em áreas locais. Os modelos climáticos são representações numéricas dos complexos sistemas físicos que dependem das trocas de calor e água entre a atmosfera e os oceanos, das composições atmosféricas, da radiação solar, da cobertura de nuvens e de outras condições ambientais. As potenciais implicações desta tendência de aquecimento são numerosas e assustadoras. (...)

Ainda que a grande maioria dos cientistas (mas não todos) concorde que as crescentes concentrações de CO<sub>2</sub> irão afetar a atmosfera do planeta, a questão é quanto e com que velocidade as temperaturas irão aumentar. Um elemento chave na previsão deste aumento é um entendimento do ciclo de carbono. Sem a influência humana, os fluxos de carbono entre o ar, as plantas e os oceanos seria praticamente equilibrado. A queima de combustíveis fósseis adiciona algo em torno de 5 bilhões de toneladas de carbono à atmosfera (para converter em emissões de CO<sub>2</sub>, multiplique por 44/12=3,67). Aproximadamente metade dessa quantidade é absorvida pelos oceanos e pelas plantas enquanto a outra metade permanece na atmosfera.” (Hinrichs & Kleinbach, capítulo 8)

### **Bibliografia citada**

ASIMOV, I. Asimov explica.

BIRD, R.B.; STEWART, W.E.; LIGHTFOOT, E.N. **Fenômenos de Transporte**. Ed. LTC, 2004. (capítulo 16).

INCROPERA, F.P; DEWITT, D.P. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. Ed. LTC, 5ª edição, 2003. (capítulos 12 e 13).

KREITH, F.; BOHN, M.S. **Princípios de Transferência de Calor**. Ed. Thomson, 2003. (capítulo 9).

BRAGA FILHO, W. **Transmissão de Calor**. Ed. Thomson, 2004. (capítulos 12 e 13).

HINRICHES, R.A.; KLEINBACH, M. **Energia e Meio Ambiente**. Ed. Thomson, 2004 (capítulos 5 e 8).

FERRARO, N.G; PENTEADO, P.C.; SOARES, P.T; TORRES, C.M. **Física.Ciência e Tecnologia**. Ed. Moderna, 2002.