

# Fator de visão da radiação: aplicação na determinação da irradiância de lâmpada ultravioleta de bronzamento artificial

*Victor Carvalho dos Santos,\* Ricardo César Carvalho da Fonseca\* e Domingos D'Oliveira Cardoso\*\**

## Resumo

O aspecto central do modelo matemático para cálculo da irradiância de lâmpada UV está baseado na figura analítica do “fator de visão da radiação”. O fator de visão é função de uma relação geométrica entre as superfícies emissora e receptora de radiação. Se a superfície emissora possui irradiância constante e a superfície receptora é um elemento diferencial, então o fator de visão é usado para determinar a energia na localização do elemento diferencial, superfície receptora. Resultados de irradiância utilizando o fator de visão são calculados para várias distâncias para o ponto médio da lâmpada. O modelo do “fator de visão da radiação” é mais geral e se aplica a todas às distâncias.

## Palavras-chave

Fator de visão da radiação; transferência radiativa de calor; radiação; radiação UV.

## Introdução

A irradiância de lâmpada UV de bronzamento artificial é determinada a partir de contribuição da teoria de transferência de calor por radiação e de recursos de Engenharia de Iluminação<sup>[1]</sup>.

O modelo matemático aplicado ao cálculo da irradiância da lâmpada baseia-se na figura analítica do “fator de visão da radiação”, também utilizado na modelagem de sistema germicida de

desinfecção do ar, UVGI – *ultraviolet germicidal irradiation*,<sup>[2]</sup> para determinação da dose de radiação recebida por qualquer microorganismo aéreo passando pelo sistema construído em tubulação de ar condicionado.

## Fundamentos de radiação<sup>[1,3]</sup>

Os mecanismos de transferência de calor basicamente são três: a energia é transferida via colisões entre moléculas ou ocorre pura condução

\* Instituto Militar de Engenharia, Praça Gen. Tibúrcio, 80, 22290-270, Rio de Janeiro, Brasil.

\*\* Comissão Nacional de Energia Nuclear, Rua Gen. Severiano, 90, 22290-010, Rio de Janeiro, Brasil.

de energia ou condução combinada com convecção e um terceiro mecanismo extremamente importante que é a transferência radiante de calor. Qualquer superfície que tenha uma temperatura acima do zero absoluto irradia energia na forma de ondas eletromagnéticas. A intensidade e o comprimento de onda da radiação emanando de uma superfície são funções tanto da temperatura como das propriedades da superfície.

### Transferência radiativa de calor

O desenvolvimento teórico da transferência radiante de calor implica contribuições de todos os comprimentos de onda e avaliação da energia total transferida como função da temperatura. Na avaliação da transferência de calor por radiação considera-se a radiação emitida de uma superfície e o que ocorre quando a radiação alcança uma superfície sólida.

A radiação incidindo em uma superfície sólida pode ocorrer de três modos diferentes, de acordo com as propriedades da superfície:

- absorção (absorbilidade, coeficiente de absorção:  $\alpha$ );
- transmissão (transmissividade, coeficiente de transmissão:  $\tau$ ); e
- reflexão (reflexividade, coeficiente de reflexão:  $\zeta$ ).

As propriedades se relacionam pela equação

$$\alpha + \tau + \zeta = 1 \quad (1)$$

Dois casos particulares são definidos:

- Se toda energia é ou refletida ou absorvida, define-se “corpo opaco”:

$$\alpha + \zeta = 1 \quad (2)$$

- Se toda energia incidente na superfície é absorvida, define-se “corpo negro”:

$$\alpha = 1 \quad (3)$$

Em geral as propriedades físicas variam com o comprimento de onda da radiação incidente. Para cálculos de transferência de calor, supõe-se  $\alpha$ ,  $\tau$  e  $\zeta$  independentes do comprimento de onda. Esta suposição define “corpo cinzento”.

Considerando a radiação emitida por uma superfície, a potência total emitida é definida como a quantidade total de energia deixando a superfície por unidade de tempo por unidade de área:

$$W = \text{energia/área-tempo} \quad (4)$$

[Btu/hr-ft<sup>2</sup> ou W/m<sup>2</sup>]

A potência emissiva é função do comprimento de onda.

Emissividade  $\epsilon$ : é a razão da potência emissiva de uma superfície comparada a máxima emissividade de potência.

$$\epsilon = W / W_{\text{Corpo negro}} \quad (5)$$

No equilíbrio térmico, a emissividade se relaciona com a absorbilidade por

$$\epsilon = \alpha \quad (6)$$

Embora esta relação se aplique estritamente ao equilíbrio térmico, na prática é utilizada normalmente para todas as temperaturas<sup>[9]</sup>.

A lei de Stefan-Boltzman da transferência radiativa de calor estabelece como se relaciona a potência emissiva de um corpo negro e a temperatura:

$$W = \sigma T^4 \quad (7)$$

Onde  $\sigma = 0.1714 \times 10^{-8} \text{ Btu/hr-ft}^2\text{-R}^4 = 5.676 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{-K}^4$  é a constante de Stefan-Boltzman.

Para um objeto que não é corpo negro (um radiador não perfeito), utiliza-se a seguinte expressão:

$$W = \epsilon \sigma T^4 \quad (8)$$

Onde T é a temperatura absoluta.

Para calcular a taxa de transferência de calor por radiação é necessário incluir os termos da energia de saída e da energia recebida da vizinhança.

$$\text{Energia de saída: } \varepsilon\sigma T_s^4$$

$$\text{Energia recebida: } \varepsilon\sigma T_\infty^4$$

### Fator de visão da radiação <sup>[2,3,4,5]</sup>

Utilizando-se a suposição usual  $\varepsilon = \alpha$ , equilíbrio térmico, equação (6), e multiplicando-se pela área, resulta:

$$q = \varepsilon\sigma A(T_s^4 - T_\infty^4) \quad (9)$$

expressão para um objeto envolvido totalmente pela vizinhança em  $T_\infty$ .

Verifica-se que para um corpo totalmente envolvido por sua vizinhança, a taxa resultante de transferência de calor por radiação térmica é dada pela equação (9), um dos mais importantes resultados usados, mas não atende a todas as situações.

O caso oposto é o de duas superfícies com temperaturas  $T_1$  e  $T_2$ , ambas com áreas finitas e nenhuma superfície envolvida completamente pela outra, figura 1. Um exemplo desta situação é o piso e o teto de uma sala. Somente uma fração de energia deixando o teto incide no piso e vice-versa.

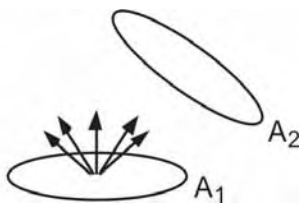


Figura 1 – Esquema geométrico para interpretação do “fator de visão da radiação”

Para levar em conta a completa troca de energia, define-se o fator de visão da radiação  $F_{12}$ :

$F_{12}$  = Fração de energia deixando  $A_1$  alcançando  $A_2$

O “fator de visão da radiação” permite determinar a fração da energia radiativa difusa emitida por uma superfície que é absorvida por outra superfície. O cálculo de fatores de visão da radiação é um exercício completo em Cálculo. O fator de visão define a relação geométrica entre as superfícies emissora e receptora. Se a superfície emissora possui uma irradiância constante e a superfície receptora é um elemento diferencial, então o fator de visão pode ser usado para determinar a irradiância na localização do elemento diferencial, na superfície receptora<sup>[2,4,5]</sup>.

Se a superfície receptora é uma área finita ou a superfície emissora é não uniforme, então a relação pode ser integrada sobre as respectivas superfícies para obter a radiação absorvida total.

Para cada ponto da superfície  $A_1$ , consideram-se raios de energia térmica emanando para fora, igualmente em todas as direções. A fração desses raios (na prática, o ângulo sólido total) que incidem em  $A_2$  dá a fração de energia alcançando esta superfície. Integrando sobre todos os pontos da superfície de  $A_1$  e calculando a média resulta o fator de visão  $F_{12}$ . Fatores de configuração de transferência radiativa de calor estão catalogados<sup>[6]</sup> para várias geometrias particulares, nas abordagens de área diferencial para área diferencial, de área diferencial para área finita e de área finita para área finita. Exemplos numéricos simples são apresentados *on line*<sup>[7]</sup> para várias configurações geométricas.

A lei do inverso do quadrado é freqüentemente usada para calcular a irradiância de luz a qualquer distância de uma lâmpada. Isto é adequado para fins de iluminação, mas impróprio para a regição de campo próximo, em que não é válida a solução da equação de onda plana, na qual a maioria dos efeitos microscópicos (germicidas, de bronzeamento etc.) ocorre.<sup>[2,4,8]</sup>

## Fator de visão da radiação de um cilindro finito (lâmpada)

Uma aproximação mais acurada em que se leva em conta inteiramente a geometria da fonte (lâmpada) é obtida com o uso do *fator de visão da radiação*.

A irradiância em um ponto arbitrário fora da lâmpada pode ser calculada usando o “*fator de visão da radiação*” a partir de um elemento plano para um cilindro finito quando o elemento é perpendicular ao eixo do cilindro e localizado na extremidade do cilindro.<sup>[1]</sup>

$$F_{d1-2}(x, l, r) = (L/\pi H) [L^{-1} \cdot \text{atan}(L \cdot (H^2 - 1)^{-1/2}) - \text{atan}((H - 1)^{1/2} \cdot (H + 1)^{-1/2}) + (X - 2H) \cdot (XY)^{-1/2} \text{atan}(X \cdot (H - 1)^{1/2} \cdot Y \cdot (H + 1)^{-1/2})] \quad (10)$$

Os parâmetros na equação (10) são definidos como:

$$H = x / r \quad (11a)$$

$$L = l / r \quad (11b)$$

$$X = (1 + H)^2 + L^2 \quad (11c)$$

$$Y = (1 - H)^2 + L^2 \quad (11d)$$

Onde  $x$  é a distância da lâmpada em cm,  $l$  é o comprimento do segmento da lâmpada em cm e  $r$ , o raio da lâmpada em cm.

Para calcular o *fator de visão da radiação* ao longo do eixo de uma lâmpada cilíndrica em uma distância radial a partir do eixo, a lâmpada é dividida em dois segmentos de comprimentos  $l_1$  e  $l_g - l_1$ , a soma dos quais é o comprimento  $l_g$  da lâmpada, como mostra a figura 2.

O *fator de visão da radiação* em qualquer ponto é dado por

$$F_{\text{tot}}(x, l_1, l_g, r) = F_{d1-2}(x, l_1, r) + F_{d1-2}(x, l_g - l_1, r) \quad (12)$$

Para calcular o fator de visão para um ponto além das extremidades da lâmpada cilíndrica, uma lâmpada imaginária é construída a partir da posição real de comprimento  $l_g$  e uma extensão “fantasma” de comprimento equivalente à distância além, ou aquém, da extremidade da lâmpada  $l_{g0}$ . O fator de visão da extensão “fantasma” é então subtraído do total como se segue:

$$F_{\text{tot}}(x, l_{g0} + l_g, l_g, r) = F_{d1-2}(x, l_{g0} + l_g, r) + F_{d1-2}(x, l_{g0}, r) \quad (13)$$

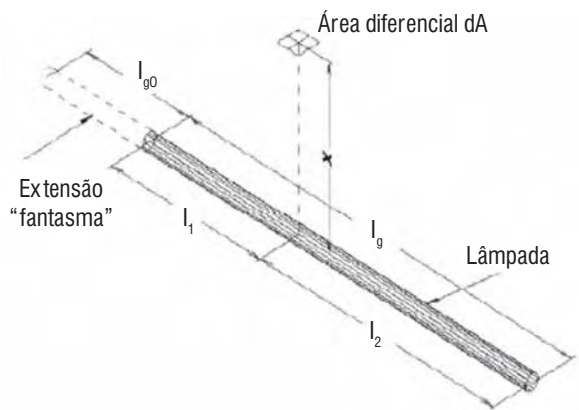


Figura 2 – Configuração geométrica para cálculo do “*fator de visão da radiação*”.

O sucesso do modelo do fator de visão em prever intensidades de campos de lâmpada foi demonstrado em comparações com dados de fotossensores.<sup>[2,4]</sup>

## Aplicação do Fator de Visão da Radiação na Determinação da Irradiância de Lâmpada Ultravioleta de Bronzeamento Artificial a Distância $x$ , sobre a Pele<sup>[5]</sup>

O aspecto central do modelo matemático para cálculo da irradiância da lâmpada está baseado na figura analítica do “*fator de visão da radiação*”, utilizado na modelagem de um sistema germicida de desinfecção do ar, UVGI – *ultraviolet*

*germicidal irradiation*<sup>[3]</sup>, construído em tubulação de ar condicionado, para determinação da dose de radiação recebida por qualquer microorganismo aéreo passando pelo sistema.

A expressão analítica do “*fator de visão da radiação*” para um segmento *l* da lâmpada é dada pela equação (10) reescrita de modo compacto, equação (14):

$$F(x,l,r) = (L/\pi) \cdot [T(X,H) - T(H) + T(X,Y,H)] \quad (14)$$

onde os termos são dados por:

$$T(X,H) = L^{-1} \cdot \text{atan}(L/(H^2 - 1)^{1/2}) \quad (15a)$$

$$T(H) = \text{atan}((H - 1)/(H + 1))^{1/2} \quad (15b)$$

$$T(X,Y,H) = (X - 2H)/(X \cdot Y)^{1/2} \cdot \text{atan}(X \cdot (H - 1)/Y \cdot (H + 1))^{1/2} \quad (15c)$$

Os parâmetros nas equações 14 e 15 estão definidos nas equações (2).

### Irradiância de lâmpada UV, incidente em pele exposta a uma distância *x*

Para calcular o “*fator de visão da radiação*”, ao longo do eixo da lâmpada a qualquer distância radial *x*, o comprimento da lâmpada, *l<sub>g</sub>*, é dividido em dois segmentos *l<sub>1</sub>* e *l<sub>2</sub> = l<sub>g</sub> - l<sub>1</sub>*, figura 2.

O fator de visão total em qualquer ponto é dado pela equação (14). A extensão “*fantasma*” não é utilizada nesta aplicação.

A irradiância *I<sub>x</sub>* em qualquer elemento de área *dA*, representado pelo ponto *x*, é resultante do produto da irradiância *I<sub>0</sub>* na superfície da lâmpada pelo fator de visão total *F<sub>tot</sub>* calculado para o ponto *x*. A irradiância *I<sub>0</sub>* na superfície da lâmpada é igual à potência UV irradiada dividida pela área da superfície da lâmpada:

$$I_0 = P_{UV} / 2\pi \cdot r \cdot l_g \quad (16)$$

$$I_x = (P_{UV} / 2\pi \cdot r \cdot l_g) \cdot F_{tot} \quad (17)$$

### Cálculo da irradiância de uma lâmpada UV de bronzeamento artificial

A lâmpada típica considerada é de 100W total, sendo de 25W a potência de UVA; o comprimento é de 176cm, o bulbo T12 significa 12x(1/8 polegada), resulta um raio de 1,905cm.

Por simplicidade, a distância *x* é considerada relativa ao ponto médio da lâmpada, resultando *I<sub>1</sub> = I<sub>2</sub>* e *F<sub>tot</sub> = 2F(x, l, r)*. Na superfície da lâmpada *F(x, l, r) = 0,5* e *F<sub>tot</sub> = 1*.

A tabela 1 apresenta o resultado da irradiância para vários valores da distância *x* até 100cm, para o ponto médio da lâmpada. Os valores da tabela resultam das equações (14) a (17).

Os valores de irradiância da lâmpada UV para as diversas distâncias, calculados na tabela 1, estão representados graficamente na figura 3. O polinômio resultante do ajuste é apresentado no corpo da figura.

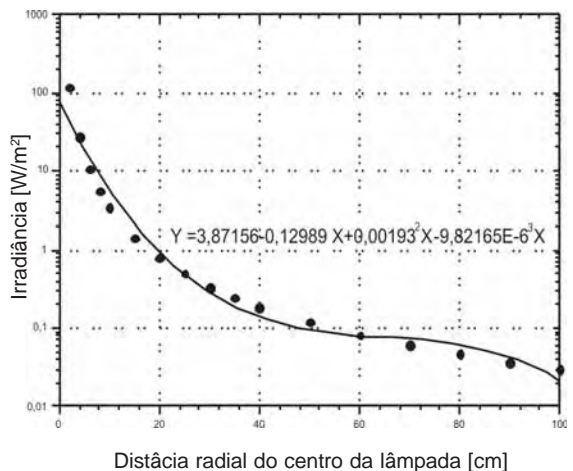


Figura 3 – Gráfico de irradiância de uma lâmpada UV de bronzeamento artificial, obtido a partir do modelo do “*fator de visão da radiação*”

**Tabela 1 – Cálculo da irradiância no elemento de área afastado x cm do ponto médio de uma lâmpada UV de bronzamento artificial.**

$P_{UVA} = 25 \text{ W}; l_g = 176\text{cm}; r = 1,905\text{cm}$								
x [cm]	H	X	Y	T(L,H)	T(H)	T(X,Y,H)	F <sub>tot</sub>	I <sub>x</sub> [W/m <sup>2</sup> ]
1,9050	1	4,2757	0,2756	90,0000	0	0	0,5000	118,6732
4	2,0997	9,8837	1,4849	30,2354	30,7793	84,4968	0,1166	27,6826
6	3,1496	17,4948	4,8964	18,9901	35,7441	64,9347	0,0447	10,5975
8	4,1995	27,3104	10,5124	13,9708	38,1121	57,6568	0,0233	5,5302
10	5,2493	39,3294	18,3322	11,0803	39,5157	54,0896	0,0142	3,3703
15	7,8740	79,0235	47,5275	7,3250	41,3519	50,1951	0,0060	1,4241
20	10,4987	132,4957	90,5009	5,4777	42,2671	48,5870	0,0033	0,7832
25	13,1234	199,7460	147,2524	4,3763	42,8149	47,261	0,0021	0,4984
30	15,7480	280,7745	217,7791	3,6443	43,1796	47,1955	0,0014	0,3323
35	18,3727	375,5771	302,0863	3,1223	43,4400	46,8322	0,0010	0,2454
40	20,9974	484,1612	400,1716	2,7283	43,6351	46,5718	0,0008	0,1868
50	26,2467	774,6583	637,6715	2,1843	43,9083	46,2245	0,0005	0,1187
60	31,4961	1056,2721	930,2877	1,8199	44,0903	46,0010	0,0003	0,0820
70	36,7454	1424,9908	1278,0092	1,5597	44,2203	45,8481	0,0003	0,0600
80	41,9948	1848,8284	1680,8492	1,3647	44,3178	45,7323	0,0002	0,0460
90	47,2441	2327,7688	2138,7924	1,2130	44,3936	45,6473	0,0002	0,0361
100	52,4934	2861,8194	2651,8458	1,0916	44,4542	45,5761	0,0001	0,0293

## Discussão e comentários

O modelo do “*fator de visão da radiação*” utilizado em bronzamento artificial está validado por KOWALSKI,<sup>[3]</sup> na aplicação do sistema UVGI em avaliar a irradiância de lâmpada UV. Esta validação é demonstrada<sup>[3]</sup> em comparação com fotossensores e comprovada:

– a sua concordância, próximo à superfície da fonte UV, com o modelo da lei do inverso do

quadrado baseado em irradiância de superfície; e,  
– a sua concordância, para distâncias afastadas da superfície da fonte UV, com o modelo da lei do inverso do quadrado baseado em taxa de irradiância.

## Conclusão

O modelo do “*fator de visão da radiação*” é mais geral, por se aplicar a todas as distâncias.



## Referências

- [1] MODEST, M.F., Radiative Heat Transfer. McGraw-Hill, New York, 1993.
- [2] KOWALSKI, W.J., *Design and optimization of UVGI air disinfection systems*. Doctoral thesis, The Pennsylvania State University, August 2001.
- [3] The University of Texas, *Radiation*. <<http://www.utwired.engr.utexas.edu/che354/htrans/rad.ppt>>. Acesso: 27/07/2008.
- [4] KOWALSKI, W.J. and BAHNFLETH, W.P. Effective UVGI System Design through Improved Modelling. <[http://www.engr.psu.edu/ae/iec/abe/publications/uvgi\\_system\\_design.pdf](http://www.engr.psu.edu/ae/iec/abe/publications/uvgi_system_design.pdf)>. Acesso: 27/07/2008.
- [5] FONSECA, R.C.C., *Contribuição para dosimetria UV em bronzamento artificial*. Dissertação de mestrado, IME, 2005.
- [6] HOWELL, J.R., *A Catalog of Radiation View Factors*. McGraw-Hill, New York, 1982.
- [7] Excel/VBA, Spreadsheet for Viewfactors. <<http://www.faculty.virginia.edu/ribando/modules/xls/viewfactors>>. Acesso: 27/07/2008.
- [8] EHC-160, *Environmental Health Criteria 160 - Ultraviolet Radiation*. International Program on Chemical Safety, World Health Organization, Geneva, Switzerland, 1994.