

DISPONIBILIDADE DE LUZ NATURAL: AVALIAÇÃO DE MÉTODOS PARA CÁLCULO DAS ILUMINÂNCIAS EXTERNAS

Rafael Silva BRANDÃO

LABAUT, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo/ USP. Rua do Lago, 876 - CEP. 05508-900-Cx.
Postal: 615223 - CEP 05498-970, Fone: (11) 3091-4681 (r 208), Fax: (11) 3091-4539
e-mail: rafabrandao@hotmail.com

RESUMO

Este trabalho trata de uma avaliação de alguns métodos para o cálculo da disponibilidade de luz natural externa. Foram avaliados três modelos para cálculo da radiação global, direta e difusa e seis modelos para o tratamento da eficácia luminosa dessa radiação. O objetivo foi gerar uma base de dados com a frequência de ocorrência dos níveis de iluminância externa para a cidade em questão (São Paulo), permitindo uma avaliação mais precisa da eficiência dos projetos de iluminação natural no local. O resultado final foi um ábaco que relaciona a eficiência desejada com o Fator de Luz Diurna (FLD) mínimo necessário para que se atinjam os níveis de iluminância requeridos para o ambiente estudado.

ABSTRACT

This paper presents an evaluation of methods for the determination of external daylight availability. Global, beam and diffuse irradiation were calculated using three different methods and transformed into illuminance levels using six luminous efficacy models in a comparative study. The final goal was to generate a database containing the frequency of occurrence of the external illuminance levels in São Paulo, Brazil, thus allowing an evaluation of local daylight design efficiency. This resulted in a graphic that relates the desired efficiency with the minimum Daylight Factor (DF), given the required illuminance levels for an environment.

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho trata de uma avaliação de alguns métodos para o cálculo da disponibilidade de luz natural externa. Um dos grandes objetivos da arquitetura bioclimática é uma melhor utilização dos recursos naturais de forma passiva, para garantir o conforto térmico, luminoso e acústico do usuário dentro do edifício. ALUCCI (1992) estabelece procedimentos para o cálculo do desempenho térmico, luminoso e energético da edificação. O desempenho luminoso é tratado utilizando-se o conceito de Fator de Luz Diurna (FLD), baseado no Daylight Factor (DF) inglês, que considera constante a razão entre as iluminâncias interna e externa, em situação de céu encoberto, chamando essa relação percentual de DF. Para que esse procedimento seja aplicado de forma satisfatória e permita uma avaliação efetiva do desempenho da edificação, no entanto, é fundamental o conhecimento das condições luminosas externas locais (HOPKINSON, PETHERBRIDGE, LONGMORE, 1975; IES, 1998).

SCARAZZATO (1995) dá o primeiro passo para a avaliação da disponibilidade de luz natural nas principais cidades brasileiras, aplicando o modelo da IES através do software DLN, que fornece, dia a dia, as curvas de iluminância, tanto em plano horizontal quanto para oito principais orientações

verticais, para os tipos de céu claro, parcialmente encoberto (50% de cobertura de nuvens) e encoberto. SCARAZZATO ET AL (1996) utilizam o DLN para obter a frequência de ocorrência dos níveis de iluminação, tornando possível sua utilização conjunta com o método desenvolvido por ALUCCI (1992). No entanto, o programa não apresenta o tipo de céu típico para cada dia, ficando a escolha de qual curva tomar a cargo do usuário. Ou seja, só é possível calcular a frequência de ocorrência considerando-se todos os dias com mesmo tipo do céu, o que não corresponde à realidade.

Pretende-se aqui, a partir dos dados de radiação, nebulosidade e insolação, calcular a disponibilidade real de luz na cidade de São Paulo, verificar a correlação entre os diversos métodos de cálculo de radiação horária e de eficácia luminosa, escolhendo um a ser adotado. Objetiva-se também que novos dados possam ser incorporados ao modelo, permitindo sua aplicação em outras cidades onde os mesmos dados estiverem disponíveis.

2. FONTE DE DADOS

Para o cálculo de disponibilidade de luz natural foram utilizados os dados diários de irradiação solar global e os dados horários de duração do brilho solar (insolação) e nebulosidade junto à Estação Meteorológica do Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto Astronômico e Geofísico da Universidade de São Paulo, situada no Parque Estadual das Fontes do Ipiranga (antigo Parque do Estado), bairro da Água Funda, São Paulo, SP e registrada junto à Organização Meteorológica Mundial sob o número 83004.

3. CÁLCULOS DE RADIAÇÃO

3.1 Cálculo Utilizando Totais Diários de Radiação

Os estudos estatísticos da distribuição temporal da radiação global diária sobre plano horizontal levaram à construção generalizada de gráficos das curvas de r_t , que é a razão entre a radiação global horária e a radiação global diária. O modelo funciona bem para dias em que a radiação matutina e vespertina é simétrica, ou seja, dias de céu claro e de céu encoberto. Os autores afirmam também que, para períodos mais longos, ele não subestima exageradamente a quantidade de radiação disponível. Collares-Pereira e Rabl (1979, citados por DUFFIE & BECKMAN, 1980) desenvolveram a seguinte equação que representa a variação de r_t ao longo do dia:

$$r_t = (\pi/24) * (a + b * \cos \omega) * (\cos \omega - \cos \omega_s) / [\sin \omega_s - (2 * \pi * \omega_s / 360) * \cos \omega_s] \quad [\text{Eq. 01}]$$

Os coeficientes a e b são dados por:

$$a = 0,409 + 0,5016 * \sin (\omega_s - 60) \quad [\text{Eq. 02}]$$

$$b = 0,6609 - 0,4767 * \sin (\omega_s - 60) \quad [\text{Eq. 03}]$$

Nessas equações ω significa o ângulo horário do sol para o período em questão (no caso o ponto médio da hora para a qual o cálculo é feito). O ângulo solar é igual a 0° ao meio dia e aumenta 15° a cada hora, sendo negativo para a manhã e positivo para a tarde, neste modelo. A variável ω_s é o ângulo horário do por do sol determinado pela equação:

$$\cos \omega_s = - \text{tg } \phi * \text{tg } \delta \quad [\text{Eq. 04}]$$

Onde:

ϕ = latitude do local ($-23,45^\circ$ para a cidade de São Paulo);

δ = declinação solar, dada pela equação:

$$\delta = 23,45 * \sin [360 * (284 + n) / 365] \quad [\text{Eq. 05}]$$

n = dia gregoriano, sendo $01/01 = 1$ e $31/12 = 365$;

Nesse caso, a irradiação global horária em W/m^2 (I_g) é dada em função da irradiação solar global diária medida (H), pela equação:

$$I_g = r_t * H \quad [\text{Eq. 06}]$$

3.2 Cálculo Utilizando a Insolação

Estando disponíveis os dados horários de insolação, foi feita uma adaptação do modelo de Ångström, apresentado por AKUTSU, SATO & PEDROSO (1987), para a estimativa da radiação solar global diária a partir dos dados de insolação diária. A radiação horária (I_g) é dada pela equação:

$$I_g = I_o * (a' + b' * n/N) \quad [\text{Eq. 07}]$$

Onde a' e b' são coeficientes empíricos, n é a duração do brilho solar em uma hora, N é a duração máxima para aquela hora (usualmente 1, exceto para as horas próximas ao nascer e ao pôr-do-sol, quando $N = (\omega - \omega_s)/15$) e I_o é a radiação incidente em uma hora no topo da atmosfera sobre uma superfície horizontal em W/m^2 , calculado a partir da equação mostrada por DUFFIE & BECKMAN (1980):

$$I_o = (12/\pi) * G_{sc} * (1 + 0,033 * \cos 360 * n/365) * (\cos \phi * \cos \delta * (\sin \omega_2 - \sin \omega_1)/360 + 2 * \pi * (\omega_2 - \omega_1) * \sin \phi * \sin \delta) \quad [\text{Eq. 08}]$$

Onde:

G_{sc} = constante solar (1353 W/m^2);

ϕ = latitude do local ($-23,45^\circ$ para a cidade de São Paulo);

ω_2 e ω_1 = ângulos horários final e inicial do período estudado (no caso uma hora) e

δ = declinação solar, dada pela Eq. 05

As outras variáveis têm a mesma nomenclatura das Eq. 04 e 05.

3.3 Cálculo Utilizando a Nebulosidade

O cálculo da radiação horária a partir dos dados de nebulosidade foi feito com base no modelo de Kasten e Czeplak apresentado por MUNEER, GUL & KINGHORN (1998). Ele utiliza a nebulosidade (N) em oitavos de céu encoberto por nuvens (octas), sendo $N=0$ um céu totalmente claro e $N=8$ um céu totalmente encoberto. A equação foi adaptada para o uso do Índice de Nebulosidade (NI) que indica quantos décimos do céu estão ocupados por nuvens. A radiação global em um céu sem nuvens ($E_{eg,c}$) é dada em função do ângulo de altura solar (α_s) pela equação:

$$E_{eg,c} = (910 * \sin \alpha_s) - 30 \quad [\text{Eq. 09}]$$

$E_{eg,c}$ pode ser calculado pela relação dada por RORIZ (1996) e CIE (1990):

$$\alpha_s = \arcsen(\sin \phi * \sin \delta + \cos \phi * \cos \delta * \cos \omega) \quad [\text{Eq. 10}]$$

A radiação horária, considerada a atenuação pelas nuvens, é dada:

$$I_g = E_{eg,c} * [1 - 0,75 (NI/10)^{3,4}] \quad [\text{Eq. 11}]$$

3.4 Parcelas Difusa e Direta

DUFFIE & BECKMAN (1980) apresentam alguns modelos para o cálculo da parcela difusa e direta da radiação global incidente. Como no caso da determinação dos valores horários a partir dos diários, não é um processo exato, visto que as correlações foram obtidas experimentalmente em outros países e podem não se aplicar bem à situação brasileira. As parcelas difusa e direta normalmente são dadas em função de um índice de limpidez (clearness index), que mede a relação entre a radiação medida ou calculada e a radiação incidente no topo da atmosfera no mesmo período. Ele pode ser horário (k_t), diário (K_t) ou mensal ($\overline{K_t}$). Dos métodos pesquisados, normalmente os que trabalham com os índices horários são os que apresentam as menores divergências. Logo, para os fins deste trabalho:

$$k_t = I_g/I_o \quad [\text{Eq. 12}]$$

Onde I_0 é calculado a partir da Eq. 08 e I_g pode ser calculado a partir das Eq. 01, 07 ou 11. Uma vez calculado k_t , a parcela difusa pode ser obtida a partir das equações de Orgill e Hollands, apresentadas por DUFFIE & BECKMAN (1980):

$$I_d = I_g * (1,0 - 0,249 * k_t) \quad \text{para } k_t < 0,35 \quad [\text{Eq. 13}]$$

$$I_d = I_g * (1,557 - 1,84 * k_t) \quad \text{para } 0,35 < k_t < 0,75 \quad [\text{Eq. 14}]$$

$$I_d = 0,177 * I_g \quad \text{para } k_t > 0,75 \quad [\text{Eq. 15}]$$

A parcela direta I_D é dada pela diferença entre a radiação global e a difusa:

$$I_D = I_g - I_d \quad [\text{Eq. 16}]$$

3.5 Comparação entre os modelos de cálculos

Observa-se que os modelos de cálculo dos itens 3.1 e 3.2 estão relacionados a medidas de radiação incidente no plano horizontal, enquanto o modelo do item 3.3 baseia-se apenas na cobertura de nuvens do céu. Como as nuvens podem variar em tipo e distribuição, este último modelo tende a contar com uma imprecisão maior. No entanto, os modelos de insolação e de nebulosidade tendem a descrever melhor a variação da radiação durante o dia, enquanto o modelo do total diário utiliza uma distribuição horária segundo uma curva padrão.

Para verificar a eficiência dos cálculos de radiação, foi feita uma comparação entre o valor calculado e valor horário medido. A Figura 1 mostra essa correlação através de gráficos e das equações de correlação.

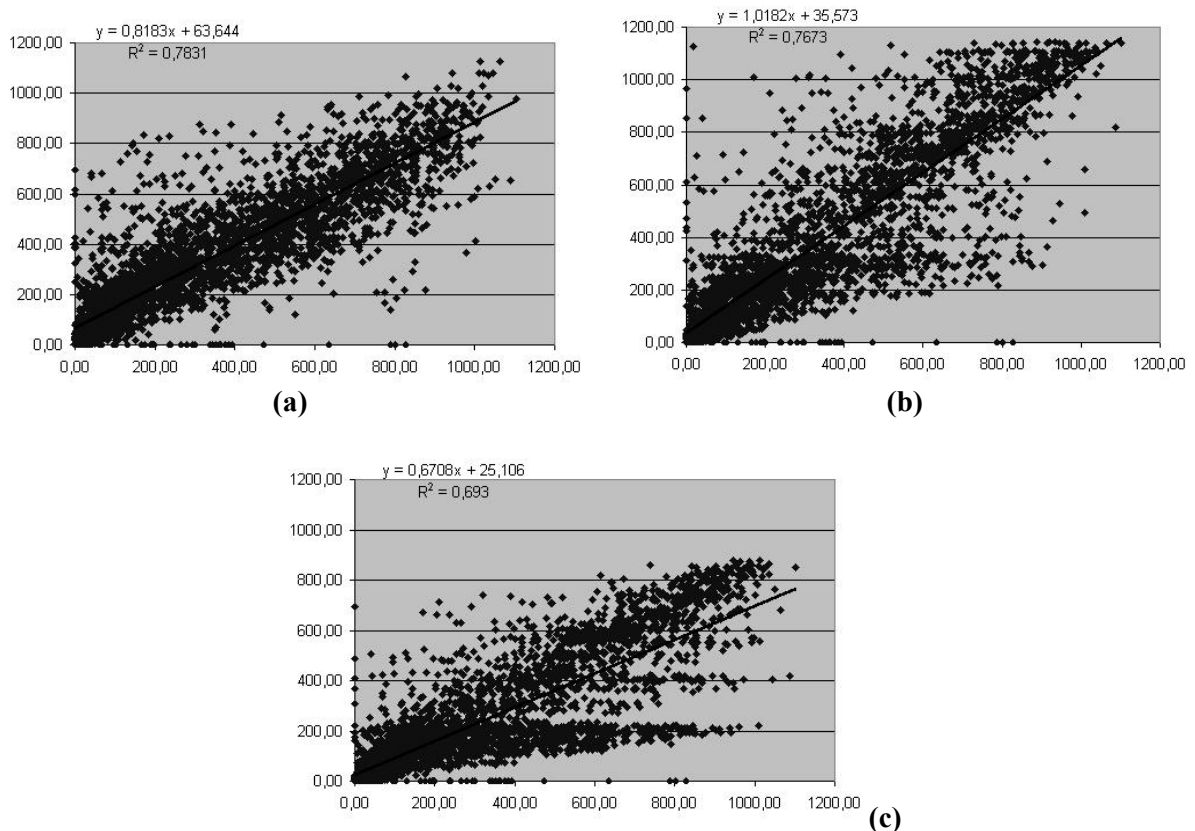


Figura 1 – Gráficos de correlação entre os cálculos de radiação: (a) Totais Diários, (b) Insolação, (c)Nebulosidade

Pelo valor de R^2 obtido pode-se perceber que o método de cálculo 1, que utiliza o total diário, apresenta-se como modelo mais adequado, embora o método 2 apresente resultados semelhantes. O

método de cálculo 3 (nebulosidade) tende a subestimar a radiação disponível. Optou-se pelo método 2 pela boa correlação e pela capacidade de descrever bem as variações horárias na radiação.

4. MODELOS DE EFICÁCIA LUMINOSA

Segundo VARTIANINEN (2000) a eficácia luminosa, chamada por ele de K, mas que para ser compatibilizada com a nomenclatura deste trabalho será denominada EL, é definida pela razão entre o fluxo luminoso e o fluxo radiante. O fluxo luminoso no caso é toda a radiação emitida na faixa visível ao olho humano, com (λ) entre 380 e 780 nm. O autor afirma que para uma luz monocromática na faixa dos 555 nm ter-se-ia uma eficácia luminosa da ordem de 683 lm/W e no caso da radiação solar que atinge a atmosfera terrestre ela estaria na faixa de 97,8 lm/W.

A eficácia luminosa da radiação global, no entanto, depende principalmente da maneira como a atmosfera absorve os raios solares. Essa absorção aumenta de acordo com a distância percorrida e é maior na faixa do infravermelho, o que significa: 1) que a eficácia luminosa tende a se alterar com a altura solar e 2) que a eficácia luminosa da radiação solar na terra é maior do que a da radiação incidente no topo da atmosfera.

VARTIANINEN (2000) apresenta diversos modelos para o cálculo da eficácia luminosa, tendo efetuado comparações com os resultados obtidos em medições em Helsinki, na Finlândia. Destes modelos, o que apresentou melhor correlação foi o desenvolvido por Perez, que usa como parâmetros a altura solar (α_s , Eq. 10), a probabilidade de insolação ($\sigma = n/N$, eq. 7), a irradiância direta e difusa (I_D e I_d , Eq. 13 a 16) e o total de água precipitável (W), que não pode ser obtido para este estudo. Além disso, a validação de um modelo de eficácia luminosa para a Finlândia não necessariamente o valida para as condições brasileiras. Ainda assim, o autor apresenta dois outros modelos que podem ser utilizados, propostos por Littlefair e Chung. A vantagem de se utilizar estes modelos, e não valores pré-estabelecidos, é que eles podem acomodar a variação de eficácia entre os diversos tipos de céu, pois é difícil acreditar que um céu claro azul tenha a mesma eficácia luminosa para a radiação difusa que um céu encoberto branco.

Além do trabalho de Vartiainen foram também encontradas sugestões de eficácia luminosa em ERICKSSON, GAY & MOREL (1986), MILNE & ZURICK (1998), ZAIN-AHMED *et al* (2002) e MUNNER, GUL & KIHGHORN (1998), apresentados na Tabela 1. Destes, apenas o último propõe uma equação para o cálculo da eficácia luminosa utilizando-se do índice de limpidez horário, k_t . Os demais fornecem valores pré-estabelecidos dentro de uma margem de erro aceitável, mas se aplicam melhor às condições onde foram gerados.

Tabela 1 – Eficácia luminosa (EL) em lm/W de acordo com as diversas bibliografias

	Global	Difusa	Direta
Ericksson, Gay, Morel, 1986	-	149,0 ± 1,0	107,5 ± 0,5
Milne & Zurick, 1998	107 ± 15%	117 ± 15%	103 ± 15%
Zain-Ahmed et al, 2002	112	120	104
Munner, Gul, Kinghorn, 1998	136,6 - 74,5 k_t + 57,3 k_t^2	130,2 - 39,8 k_t + 50,0 k_t^2	-
Littlefair (Vartiainen, 2000)	-	115 + 29 σ	51,8 + 1,65 α_s - 0,0153 α_s^2
Chung (Vartiainen, 2000)	-	135,3 - 25,7 k_t	48,5 + 1,67 α_s - 0,0098 α_s^2

Foi realizado um estudo comparativo, utilizando-se os dados de radiação medidos e os modelos de eficácia luminosa propostos por Ericksson, Gay & Morel, Zain-Ahmed et al e Munner, Gul & Kihghorn, Littlefair e Chung, para a verificação das equações propostas.

Os valores de EL_d e EL_D médios encontrados foram de 126 e 78 lm/W para Littlefair e 146 e 84lm/W para Chung. Munner não apresenta valores para EL_D , sendo considerados os valores de EL_d e EL_g

como sendo, respectivamente, 120 e 134 lm/W. No entanto, apesar da variação entre as eficiências propostas, as curvas de frequência de ocorrência foram bastante semelhantes de acordo com os diversos métodos, como pode se perceber na Figura 2 e na Figura 3.

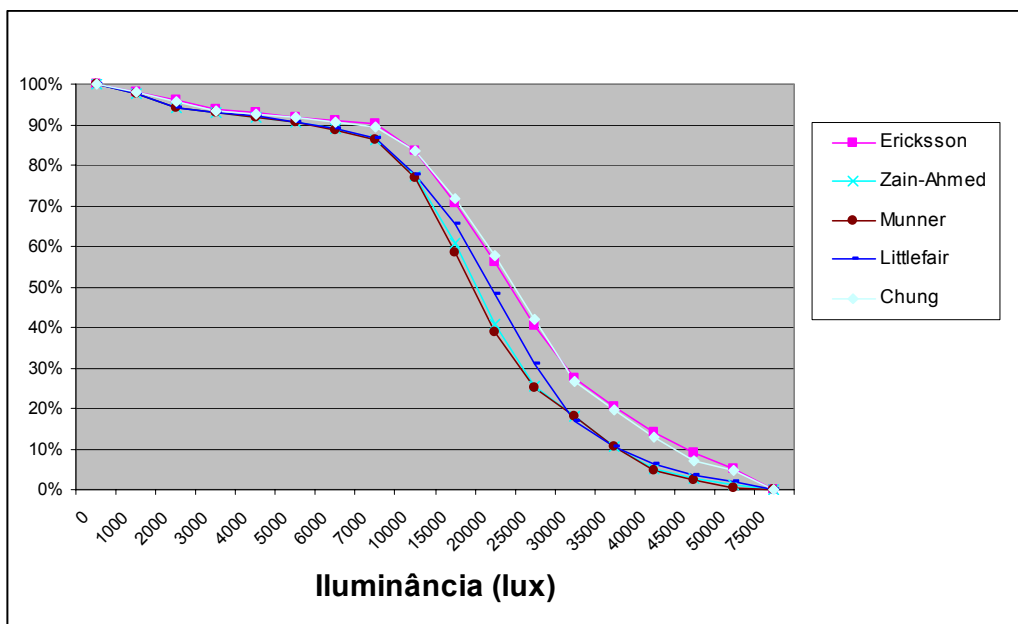


Figura 2 – Perc. de horas em que a iluminância difusa excede o valor do eixo das abscissas

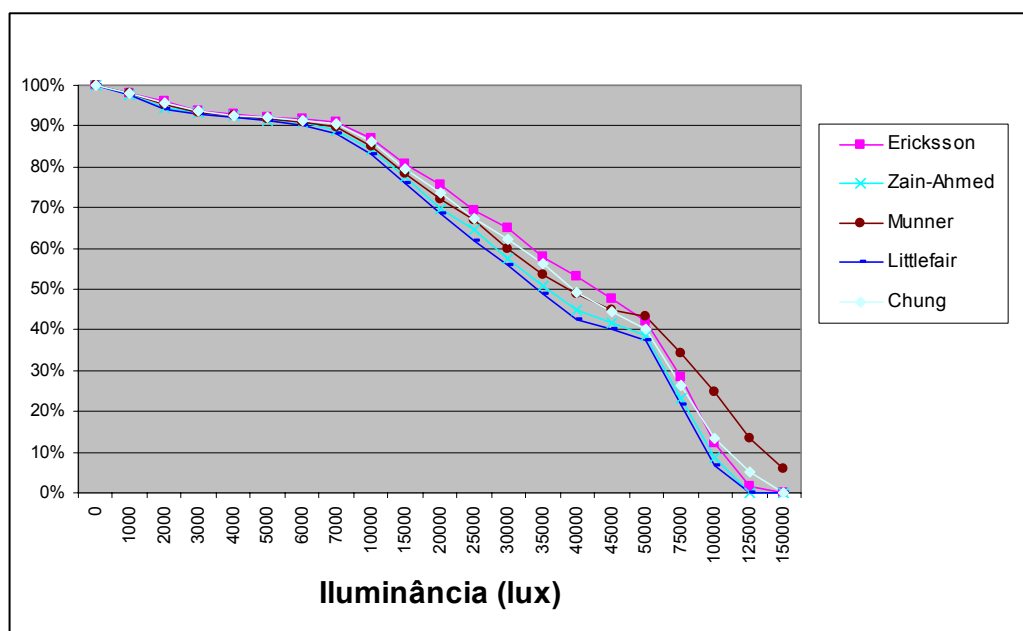


Figura 3 – Perc. de horas em que a iluminância global excede o valor do eixo das abscissas

Para fins deste trabalho, optou-se por trabalhar com o modelo de Littlefair, pela boa aproximação com os valores medidos no trabalho malaio e pela capacidade de incorporar as diferenças de eficácia luminosa dos diversos tipos de céu.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O primeiro resultado deste trabalho foi a escolha dos métodos de cálculo mais adequados para a avaliação da disponibilidade de luz natural. Optou-se pelo método da insolação horária para cálculo

da radiação horária e pelo modelo de eficácia luminosa de Littlefair in VARTIANIEN (2000). Foi também possível desenvolver uma planilha no *software* Microsoft Excel que permite a sistematização dos dados, podendo o mesmo procedimento ser repetido sem grandes esforços para outras localidades ou ser complementado com outros dados.

Como contribuição para os cálculos de iluminação natural, foi gerado um gráfico de eficiência segundo modelo proposto por ALUCCI (1992) para a cidade de São Paulo. Esse gráfico permite a determinação do Fator de Céu (FC) necessário para se obter determinada eficiência da iluminância desejada no ponto. No entanto, é possível utilizar o mesmo raciocínio para o FLD, que considera as reflexões externas e internas da luz. Por exemplo, na figura 4, quando se desejar uma iluminância de 500 lux no ponto durante 70% das horas do ano, o FLD deve ser de no mínimo 3,8%. Observa-se que o gráfico mostrado na figura 4 foi gerado apenas para a iluminação difusa, visto que a radiação solar direta não entra no cálculo de FLD.

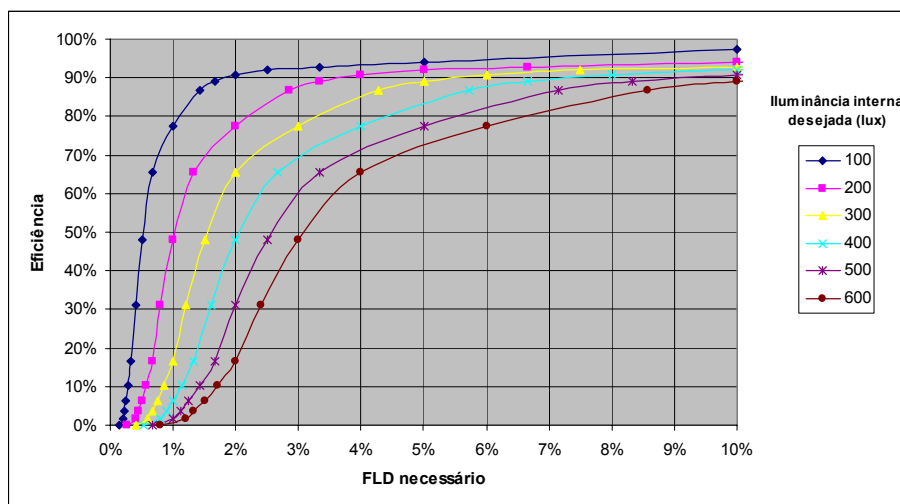


Figura 4 – Eficiência de sistemas de luz natural para São Paulo, SP

Considerou-se que os objetivos geral e específicos do trabalho foram atingidos, embora seja possível ainda comprovar melhor o estudo feito. Como perspectivas de desenvolvimento futuro podem-se citar:

- Efetuar medições de iluminação que permitam o teste dos modelos de eficácia luminosa;
- Complementar a base de dados para São Paulo, inserindo os anos 5 anos já obtidos. A partir daí será possível efetivamente avaliar tendências da frequência de ocorrência dos níveis de iluminância;
- Fazer análises mais profundas dos dados já obtidos, verificando, por exemplo, a eficiência no horário comercial.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKUTSU, M., SATO, N., PEDROSO, N. (1987) *Desempenho térmico de edificações habitacionais e escolares*; manual de procedimentos para avaliação. São Paulo: IPT. p 45-52.
- ALUCCI, M. (1992) *Conforto térmico, conforto luminoso e conservação de energia elétrica*; Procedimentos para desenvolvimento e avaliação de projetos de edificações. São Paulo. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - FAU-USP.
- COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE. (1990) *Guide on daylighting of building interiors*. Paris: CIE (draft, to be published)
- DUFFIE, J., BECKMAN, W. (1980) *Solar Engineering of Thermal Processes*. New York: Wiley-Interscience.

- ERICKSSON, C., GAY, J. , MOREL, N. (1986) *Étude de sensibilité*; influence de la fenêtre sur le bilan énergétique d'une construction. Lausanne: EPFL.
- HOPKINSON, R. G., PETHERBRIDGE, P., LONGMORE, J. (1975) *Iluminação Natural*. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian.
- ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY (1998) *Lighting Handbook*; Reference & Application. 8 ed. New York, IES of North America.
- LI, D., LAM, J. (2001) An analysis of climatic parameters and sky classification. *Building and Environment*: Pergamon. v. 36, n. 4. p. 435-445
- MARION, W., GEORGE, R. (2001) Calculation of solar radiation using a methodology with world wide potential. *Solar Energy*. London: Pergamon. v. 71, n. 4, p. 275-293
- MILNE, M., ZURICK, J. (1998) Daylight prediction techniques in energy design tools. In: DAYLIGHTING 98, 1998, Ottawa. *Conference Proceedings...* Ottawa, p. 89-95
- MUNNER, T., GUL, M., KINGHORN, D. (1998) Development of a meteorological illuminance model for daylight computations. *Applied Energy*. London: Elsevier. v. 59, n. 4, p. 235-260
- RORIZ, M. (1996) *Conforto térmico em edificações*; um modelo matemático e uma aplicação. São Paulo. Tese (Doutoramento em Arquitetura e Urbanismo) – FAU- USP.
- SCARAZZATO, P., ASSIS, E. , SOUZA, R., ROMERO, M. (1996) Dynamic of daylight in tropical humid climates and its influence on indoor environment. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL TECNOLOGIA, ARQUITETURA E URBANISMO. São Paulo, *Anais...* São Paulo: NUTAU, p. 57-62.
- SCARAZZATO, P. (1995) *Dia típico de projeto aplicado à iluminação natural*; dados referenciais para localidades brasileiras. São Paulo. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – FAU- USP.
- VARTIAINEN, E. (2000) A comparison of luminous efficacy model with illuminance and irradiance measurements. *Renewable Energy*: Pergamon. v. 20, p. 265-277
- ZAIN-AHMED, A. et al. (2002) The availability of daylight from tropical skies – a case study of Malaysia. *Renewable Energy*: Pergamon. v. 25, n.1, p. 21-30

7. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos aos integrantes do Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética da FAU/USP (LABAUT) e ao Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto Astronômico e Geofísico da Universidade de São Paulo que disponibilizou os dados climáticos necessários à execução do trabalho.