

MODELAGEM DA ILUMINÂNCIA DIFUSA PARA A CIDADE DE RECIFE - PE

S. Leal¹, C. Tiba,² M. Campos³, R. Melo⁴

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco (IFPE)

Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

Tel. +5581 34536019 – Fax +55 81 32718250 e-mail: sergio-lealifpe@hotmail.com

Recibido 27/07/17, aceptado 23/09/17

RESUMO: Os dados da iluminância solar difusa são extremamente importantes para elaboração de projetos que aproveitam a iluminação natural em ambientes comerciais e residenciais, contudo estas informações são muito escassas. Baseado neste fato, uma estação solarimétrica foi instalada em 2015 na cidade de Recife com o objetivo de medir a iluminância difusa, irradiação difusa, temperatura ambiente e umidade relativa do ar. Os dados coletados foram medidos, analisados e comparados possibilitando a geração de três diferentes modelos estatísticos para estimativa da iluminância difusa horária no plano horizontal a partir da irradiação solar difusa horária e as demais variáveis como a temperatura e umidade relativa do ar. Os modelos apresentaram desempenhos estatísticos satisfatórios, obtendo-se um RMSE% e MBE% inferiores a 10% e 1%, respectivamente.

Palavras-chave: modelo estatístico, iluminância, eficiência e Pernambuco.

INTRODUÇÃO

Iluminância solar

A iluminação natural vem sendo gradativamente inserida em prédios comerciais e escritórios, uma vez que, a maior parte do consumo elétrico nesses prédios está relacionado diretamente aos condicionadores de ar e iluminação artificial. Sendo uma alternativa eficiente e de baixo custo, a iluminação natural pode reduzir a carga elétrica e térmica relacionada à iluminação artificial, e por sua vez, a carga elétrica dos condicionadores de ar. Uma fonte de luz natural proporciona um grande conforto psicológico, tornando os ambientes agradáveis, produtivos e saudáveis para os seres humanos, devido sua influência no ciclo biológico das pessoas (Figueiró, 2010). Mediante tais fatos, a iluminação natural continua sendo difundida, mesmo com o surgimento de novas fontes luminosas cada vez mais eficientes como, por exemplo, os diodos emissores de luz (LED).

A Figura 1 mostra o uso da iluminação natural em um grande centro comercial na capital do estado de Pernambuco. Segundo a ABNT, geralmente o projeto de iluminação natural inicia-se com uma estimativa da iluminação interna natural (ABNT-CB02, 2003), que por sua vez, depende da iluminação externa difusa em um plano horizontal. Ferramentas de simulação computacional são também utilizadas para análise, cálculo e desempenho energético de edificações eficientes ainda em nível de projeto, contudo essas ferramentas necessitam também de dados de entradas para um cálculo correto (Vartiainen, 2000), como a irradiância global e difusa, para então, determinar a iluminância.



Figura 1: Utilização da iluminação natural em um centro comercial na capital Recife.

A iluminação de um determinado recinto está intimamente ligada ao nível de iluminância ou iluminamento, que é definido como a relação entre o fluxo luminoso, que é a potência luminosa total irradiada por uma fonte de luz no espectro compreendido entre 380 a 780 nm, e a superfície sobre a qual este fluxo incide.

$$E = 683 \int_{380}^{780} V_{\lambda} I_{\lambda} d_{\lambda} \quad (1)$$

V_{λ} e I_{λ} são respectivamente: a sensibilidade espectral do olho humano no intervalo de comprimento de onda compreendido entre 380 a 780 nm e a irradiação solar global. O fator 683 é um fator de normalização cujo valor é resultante de um fluxo radiante de 1W para o comprimento de onda 555 nm. A unidade de iluminância pode ser representada por $\langle \text{lux} \rangle$ ou $\langle \text{lm}/\text{m}^2 \rangle$.

O conhecimento da iluminância solar difusa em uma determinada região é de fundamental importância para elaboração de projetos que utilizem a iluminação natural, uma vez que, permite determinar o nível de contribuição de iluminação natural ótimo, no interior do recinto, possibilitando uma verdadeira redução no consumo de energia elétrica. Contudo, estes dados são muito raros e não fazem parte da rotina observacional das estações meteorológicas. Uma forma alternativa é utilizar a irradiação solar difusa, que é uma informação menos escassa, como uma fonte geradora de informações sobre a iluminação natural por meio do conhecimento da eficiência luminosa. A eficiência luminosa é um indicador de eficiência utilizado para avaliar o rendimento da conversão de energia em luz por uma determinada fonte luminosa. Tratando-se de iluminação natural difusa, a eficiência luminosa difusa é definida como sendo a relação entre a iluminância solar difusa (lm/m^2) pela irradiação solar difusa (W/m^2).

$$\eta_d = \frac{683 \int_{380}^{780} V_{\lambda} \cdot I_{\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} I_{\lambda} \cdot d\lambda} = \frac{E_d}{I_d} \quad (2)$$

E_d e I_d são, respectivamente, a iluminância e irradiação solar difusa medidas em escala horária.

A eficiência luminosa difusa permite estimar a iluminância difusa em lugares onde não existam dados sobre a mesma, porém existam dados sobre irradiação solar difusa. Nestes casos, a Iluminância difusa poderá ser facilmente calculada através da seguinte expressão:

$$E_d = \eta_L I_d \quad (3)$$

Vários autores sugeriram modelos estatísticos para estimativa da iluminância solar para diferentes condições de céu e diferentes localidades, a partir da eficiência luminosa (PEREZ, 1990, LAM 1995; CHANDRA, 1996; ROBLEDO e SOLER, 2000; SOUZA e ROBLEDO, 2004; SOKOL, at. al. 2013; PATIL, at. al. 2013).

MATERIAL E MÉTODOS

Estação de medidas e parâmetros

A estação foi instalada, em 2015, em Recife, capital do estado de Pernambuco. A estação teve como objetivo, realizar medições simultâneas da radiação solar difusa, iluminância solar difusa, além de outras variáveis como temperatura ambiente e umidade relativa. A Tab. 1 mostra suas coordenadas geográficas, caracterização climática e período de medidas.

Estação	Mesorregião	Coordenadas geográficas			Clima	Período
		Lat.	Long.	Alt.(m)		
Recife	Metropolitana	-8 ^o 03'	-34 ^o 55'	7	Tropical úmido	Set15 / Ago.16

Tabela 1: Estação e coordenadas geográficas

As medidas foram realizadas no plano horizontal, em escala de minuto. A medição da iluminância difusa foi realizada a partir de fotômetros do fabricante LI-COR, modelo LI-210SA com um erro de calibração de $\pm 5\%$ e uma deriva máxima anual de $\pm 2\%$ (LI-COR, 2013). O fotômetro responsável pela medição da iluminância difusa foi acoplado a um rastreador modelo Solys 2, conforme Figura 2.



Figura 2: Rastreador Solys 2 utilizado para realizar as medidas difusa.

Para a medição da radiação solar difusa foi utilizado um piranômetro modelo CMP21 do fabricante Kipp & Zonen (Fig. 2). Segundo a WMO, este modelo de sensor é classificado como um sensor padrão de alta qualidade. Os sensores foram acoplados a um sistema de aquisição de dados da Campbell, modelo CR- 3000X.

Modelos propostos

Modelo 1

Trata-se de um modelo baseado na eficiência luminosa difusa, ou seja, a correlação direta entre a iluminância solar difusa pela irradiação solar difusa.

$$\frac{E_d}{I_d} = \eta_d \quad (4)$$

Modelo 2

Com o objetivo de se obter um melhor desempenho estatístico, neste trabalho foi proposto um modelo que permite estimar a iluminância solar difusa a partir de duas outras variáveis, além da irradiação solar difusa: a temperatura de orvalho e o ângulo de elevação solar.

$$\frac{E_d}{I_d} = a + bT_d + c\text{sen}2\alpha \quad (5)$$

Onde,

T_d é a temperatura de orvalho e foi estimada conforme ParoScientific (2004) mediante o conhecimento da temperatura ambiente e umidade em escala de minuto. Os constantes a , b , e c são coeficientes resultantes da regressão múltipla e α é o ângulo de elevação.

Modelo 3

Por fim, um terceiro modelo foi também proposto baseado no ângulo zenital, água precipitável e o índice de brilho de céu, proposto por Perez et al. (1990), resultando na seguinte expressão:

$$\frac{E_d}{I_d} = a + b\text{cos}z + cW + d\Delta \quad (6)$$

Onde, E_d é a iluminância solar difusa horária, I_d é a irradiação solar difusa horária e a , b , c e d são constantes a serem determinadas por uma regressão múltipla. O índice de brilho de céu Δ é representado pela expressão a seguir:

$$\Delta = I_{dm} / I_0 \quad (7)$$

I_d e I_0 são respectivamente irradiação solar horária difusa e extraterrestre.

A quantidade de água precipitável W (cm) foi estimada mediante:

$$W = \exp(0,07T_d - 0,075) \quad (8)$$

Onde, T_d é a temperatura de orvalho, já descrita anteriormente.

Comparações estatísticas

A validação da equação foi feita a partir dos seguintes indicadores estatísticos MBE% (mean bias error) e RMSE% (root mean square error):

$$\text{MBE\%} = 100 \frac{\sum_n (\eta_{L,\text{calculado}} - \eta_{L,\text{medido}})}{\sum_n \eta_{L,\text{medido}}} \quad (9)$$

$$\text{RMSE\%} = 100 \frac{\sqrt{\frac{\sum_n (\eta_{L,\text{calculado}} - \eta_{L,\text{medido}})^2}{n}}}{\sum_n \frac{\eta_{L,\text{medido}}}{n}} \quad (10)$$

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Comportamento da iluminância horária

Os dados medidos em escala de minuto foram agrupados em torno de uma dada hora solar considerando à meia hora anterior e posterior a mesma. Devido a problemas operacionais foram desconsiderados os dias julianos 32 a 63. As medidas representam um intervalo de horas diárias compreendidas entre 6:00 e 18:00 horas. O comportamento da iluminância e irradiação solar difusa horária, em função do ângulo de elevação, podem ser vistos nas Figuras 3 (a) e 3 (b). As dispersões observadas para um mesmo ângulo de elevação ocorre devido a diversidade da condição horária do céu.

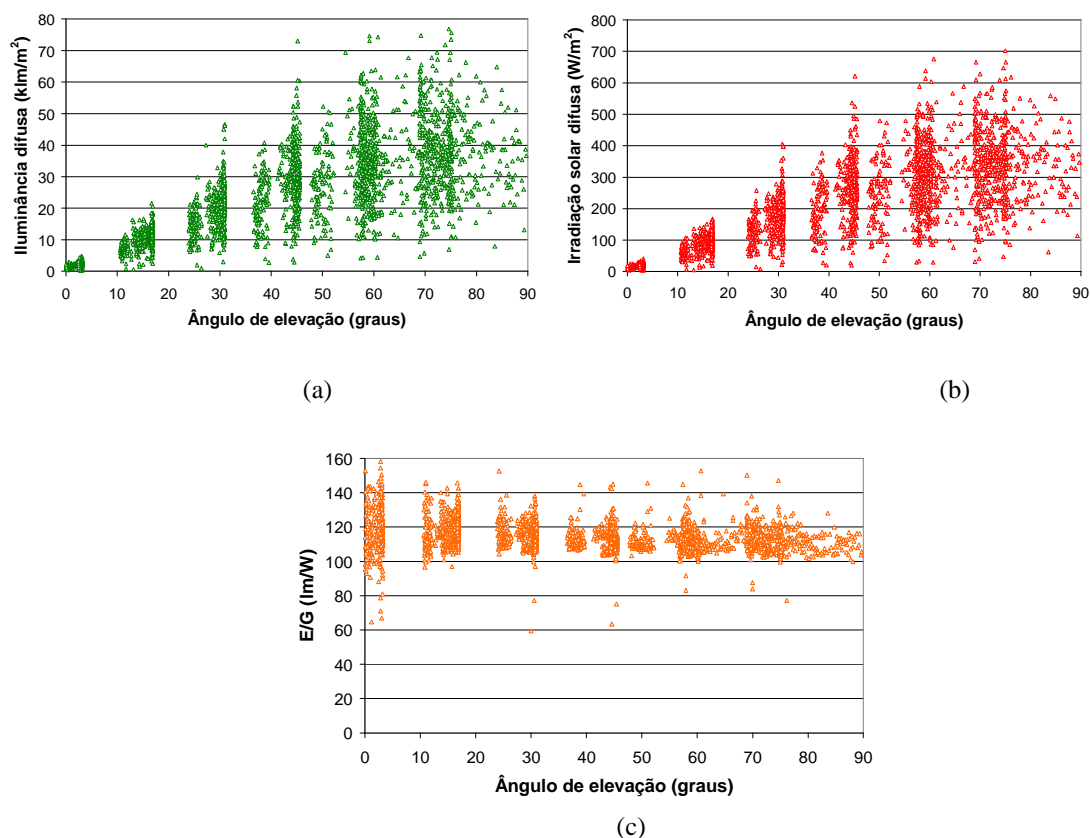


Figura 3: Comportamento da iluminância difusa (a), irradiação difusa (b) e a eficiência luminosa difusa (c) em função do ângulo de elevação.

Os valores máximos da iluminância horária difusa superam, em algumas situações, os 70 klm/m². No caso da irradiação difusa os valores máximos alcançam os 700 W/m². Em média a eficiência luminosa difusa apresentou um valor em torno dos 115 lm/W, Figura 3 (c), confirmando a boa eficiência da iluminação natural quando comparada com a iluminação artificial comumente utilizada em pontos comerciais e empresariais que variam de 70 a 125 lm/W, (OSRAM, 2013).

A umidade relativa em escala horária apresenta um comportamento inverso ao da temperatura ambiente no decorrer do dia. À medida que a temperatura aumenta, devido a um maior ângulo de elevação, a umidade relativa é atenuada, Figuras 4 (a) e 4 (b).

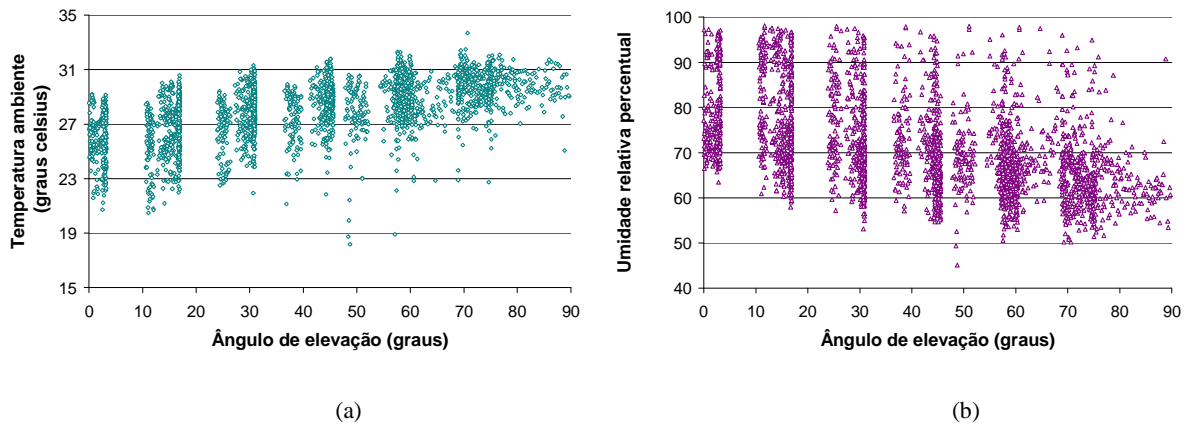


Figura 4: Temperatura ambiente (a) e umidade relativa percentual do ar (b) em função do ângulo de elevação.

É válido salientar que quantidade de vapor de água precipitável na atmosfera exerce significativa atenuação em relação à faixa infravermelho do espectro total. Uma atenuação na faixa infravermelho do espectro total implica em uma elevação na eficiência luminosa.

Modelos gerados

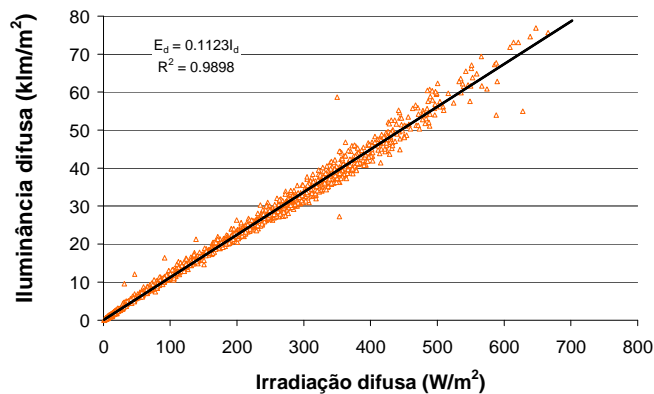
As equações abaixo representam respectivamente os modelos 1, 2 e 3 para estimativa da eficiência luminosa para a cidade de Recife. Para geração dos modelos foi considerado o intervalo de hora diária compreendido entre 07:00 e 18:00hs.

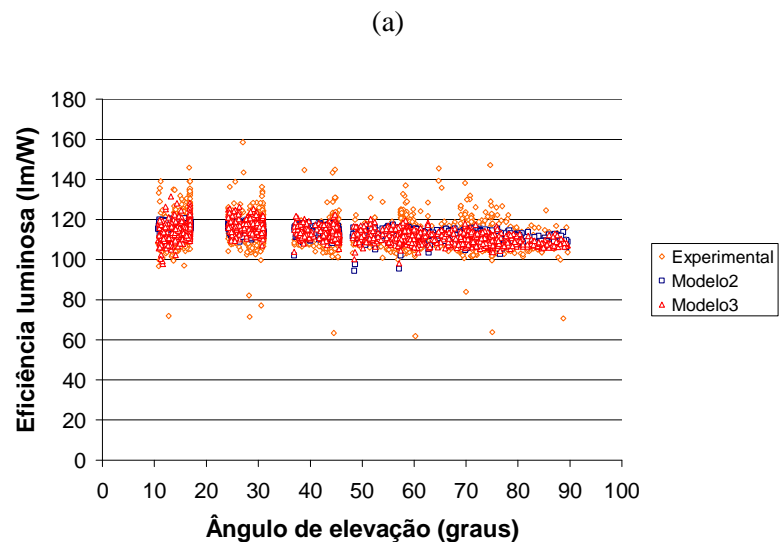
$$\frac{E_d}{I_d} = 112,3 \quad \text{Modelo 1} \quad (11)$$

$$\frac{E_d}{I_d} = 85,240 + 1,429T_d - 6,560\text{sen}^2\alpha \quad \text{Modelo 2} \quad (12)$$

$$\frac{E_d}{I_d} = 104,814 - 21,131\text{cos}z + 5,376W - 13,408\Delta \quad \text{Modelo 3} \quad (13)$$

A Figura 5 (a) mostra a curva gerada pelo modelo 1, que correlaciona a iluminância difusa com a irradiação difusa horária e a Figura 5 (b) as curvas geradas pelos modelos 2 e 3, confirmando a boa capacidade para estimativa da eficiência luminosa.





(b)

Figura 5: Eficiência luminosa prevista pelos modelos 1, 2, 3 para a cidade de Recife.

A Tabela 2 resume o desempenho estatístico dos modelos estatísticos que foram validados com 25% dos dados experimentais, não utilizados no processo de geração dos mesmos. Os modelos gerados a partir de regressões múltiplas e aplicados para estimativa da iluminância difusa apresentaram um RMSE inferior a 10%, sendo desta forma, bastante satisfatório.

	Modelo1	Modelo2	Modelo3
MBE%	-0,56	-0,27	0,17
RMSE%	8,90	6,40	5,80

Tabela 2: Validação dos modelos e das redes

CONCLUSÕES

Os modelos propostos neste trabalho possibilitaram a estimativa da iluminância solar difusa para a cidade de Recife e regiões circunvizinhas pertencentes ao litoral pernambucano. Mediante a disponibilidade de dados de radiação difusa solar e outras variáveis como temperatura e umidade, os modelos foram gerados e testados. Os desempenhos estatísticos alcançados foram satisfatórios (RMSE% inferior a 10%), porém o melhor resultado foi obtido no modelo3, que tem como dados de entrada o ângulo zenital, água precipitável e o índice de brilho de céu. A latitude privilegiada do estado de Pernambuco confirma o grande potencial de aproveitamento da iluminação natural difusa em centros comerciais visando uma significativa redução no consumo de energia elétrica. Os modelos aqui propostos podem servir como ferramentas complementares, fornecendo informações mais precisas em relação à iluminância difusa na capital Recife, auxiliando assim, arquitetos e engenheiros que façam uso da iluminação natural.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos o apoio recebido pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico, CNPq.

REFERÊNCIAS

CB-02- Comitê Brasileiro de Construção Civil. Procedimento de Cálculo para a Determinação da Iluminação Natural em Ambientes Internos, 02:135.02-003, 2003.

LI-COR Biosciences (2013).

http://www.licor.com/env/products/light/photometric_sensors/index.html. Acesso: ago. 2013.

OSRAM (2013).http://www.osram.com.br/osram_br/Ferramentas_%26_Catlogos/_pdf/Arquivos/Iluminacao_Geral/Manual_do_Curso_Iluminacao%2c_Conceitos_e_Projetos/Manual_Luminotecnico_-_parte_01.pdf. Acesso: ago 2013.

PAROCIENTIFIC, INC. (2004). Met3A calculation of dew point, www.paroscientific.com/dewpoint.htm.

PATIL K. N., GARG, S. N. AND KAUSHIK S. C. (2013) Luminous efficacy model validation and computation of solar illuminance for different climates of India, Journal of Renewable and Sustainable Energy 5, doi: 10.1063/1.4841195.

PEREZ R., INEICHEN P., SEALS R., MICHALSKY J. AND STEWART R. (1990). Modeling daylight availability and irradiance components from direct, and global irradiance, Solar Energy 44, 5, 271-289.

ROBLEDO, L. and SOLER, A. (2000) Luminous efficacy of direct solar radiation for all sky types, Energy Vol.25, pp.689 – 701.

SOKOL, D.; MAHDAVI, A. (2013). *A simple model for the derivation of illuminance values from global solar radiation data*, Build Simul Vol 6, pp.379 - 383

SOUZA, R; ROBLEDO, L; SOLER, A; PEREIRA, F.(2004) Clear sky and all sky direct luminous efficacies for Florianópolis, Brasil, Energy Vol 46, N° 3, pp.361 – 371

VARTAINEN E.(2000). Daylight modelling with the simulation tool DeLight, Department of Engineering Physics and Mathematics Advanced Energy Systems. Filand. ISBN 951-22-5071-3

WMO (2010). WMO guide to meteorological instruments and methods of observation. (2008 edition, updated in 2010) <http://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/CIMO-guide.html>. Acesso: fev. 2014.

ABSTRACT: Diffuse solar lighting data are extremely important for designing projects that use natural lighting in commercial and residential environments, but this information is very scarce. Based on this fact, a solarimetric station was installed in 2015 in the city of Recife to measure diffuse illumination, diffuse irradiation, ambient temperature and relative humidity. The collected data were measured, analyzed and compared, allowing the generation of three different statistical models to estimate the diffuse hourly luminance in the horizontal plane from the diffuse hourly solar irradiation and the other variables, such as temperature and relative humidity. The models presented satisfactory statistical performance, obtaining RMSE% and MBE% lower than 10% and 1%, respectively.

Keywords: statistical model, illuminance, efficiency and Pernambuco