

MODELAGEM DA ILUMINÂNCIA PARA TRÊS LOCALIDADES NO ESTADO DE ALAGOAS

Sérgio da Silva Leal – sergio-lealifpe@hotmail.com

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco

Chigueru Tiba – tiba@ufpe.br

Universidade Federal de Pernambuco

José Leonardo de Souza – jls@ccen.ufal.br

Universidade Federal de Alagoas

Manoel Henriques Campos – Henriques.campos@hotmail.com

Universidade Federal de Pernambuco

Resumo. Três estações solarimétricas foram instaladas, em 2007, no estado de Alagoas para realização de medições simultâneas da radiação solar global, iluminância, temperatura ambiente e umidade relativa. Uma das estações foi instalada na cidade de Maceió, capital do estado de Alagoas e outras duas nas cidades de Arapiraca, e Santana do Ipanema. Os dados coletados foram medidos, analisados e comparados possibilitando a geração de três modelos estatísticos diferentes, para estimativa da iluminância solar horária a partir da radiação global horária, temperatura e umidade relativa do ar. Além disso, foram modeladas três redes neurais artificiais (RNA) para estimativa da iluminância, considerando as mesmas variáveis físicas dos modelos estatísticos. Os modelos estatísticos e as redes neurais artificiais apresentaram um bom desempenho estatístico com RMSE inferiores a 5% e MBE entre -0,28% a 0,49%, podendo desta forma, serem utilizados para estimativa da iluminância solar em localidades circunvizinhas e com condições fitogeográficas similares.

Palavras-chave: Modelo estatístico, Redes Neurais Artificiais, Iluminância, Eficiência luminosa, Alagoas.

1. INTRODUÇÃO

A maior parte do consumo elétrico em prédios comerciais está relacionado diretamente aos condicionadores de ar e iluminação artificial. Por ser considerada uma alternativa eficiente, a iluminação natural pode ser usada para iluminação interna de prédios comerciais, reduzindo a carga elétrica e térmica relacionada à iluminação artificial, e por sua vez, a carga elétrica dos condicionadores de ar.

A iluminação de um determinado recinto, está intimamente ligada ao nível de iluminância ou iluminamento. A iluminância é definida 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 <lux > ou <lm/m² >.

Normalmente o projeto de iluminação natural inicia-se com uma estimativa da iluminação interna natural (ABNT-CB02, 1999). A contribuição da iluminação natural considera basicamente três componentes através dos quais a luz natural pode alcançar um ponto no interior de uma edificação levando em conta os fatores redutores, como pode ser visto na expressão a seguir:

$$CIN = (CC + CRE + CRI) \cdot K_T \cdot K_M \cdot K_C \quad (2)$$

CIN - Contribuição da iluminação natural

CC - Componente do céu

CRE - Componente refletida externa

CRI - Componente refletida interna

KT - Fator da transmissividade do vidro
KM - Fator manutenção
KC - Fator Caixilho

A iluminância natural interna será então calculada em função da iluminância externa, conforme expressão abaixo:

$$E_p = CIN.E_{ext} \quad (3)$$

E_{ext} é a iluminância produzida por toda a abóbada celeste num plano horizontal externo livre de obstruções, excluída a iluminação direta do sol, em lux e E_p é iluminância num plano horizontal no ponto P do ambiente interno, em lux

O conhecimento da iluminância solar 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, os dados referentes a iluminância solar são muito raros e não fazem parte da rotina observacional das estações meteorológicas. Uma forma alternativa é fazer uso da irradiação solar, 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. Entre as mais eficientes está a lâmpada de descarga multivapores metálicos, alcançando uma eficiência de 143 lm/W (OSRAM, 2013). Uma lâmpada tubular fluorescente normalmente utilizada em escritórios comerciais apresenta uma eficiência máxima de 125 lm/W.

Tratando-se de iluminação natural, a eficiência luminosa é definida como sendo a relação entre a iluminância solar (lm/m^2) pela irradiação solar (W/m^2).

$$\eta_L = \frac{683 \int_{380}^{780} V_\lambda \cdot I_\lambda \, d\lambda}{\int_0^\infty I_\lambda \cdot d\lambda} = \frac{E}{I} \quad (4)$$

E e I são a iluminância e irradiação solar global medidos em escala horária.

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

$$E = \eta_L I \quad (5)$$

A utilização da eficiência luminosa para estimar a iluminância se restringe ao local de origem das medidas ou a regiões com características climáticas muito semelhantes, não podendo desta forma ser estendida a outros locais com características climáticas bastante significativas (ESCOBEDO et. al., 2007). Uma forma de tornar os modelos estatísticos menos dependente do local é fazer uso de outras variáveis como ângulo zenital, temperatura, umidade e o índice de transmitância atmosférico (k_T)

$$k_T = \frac{I}{I_0} \quad (6)$$

onde,

I é a radiação horária global sobre a superfície terrestre;

I_0 é a radiação horária global extraterrestre.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Estação de medidas e parâmetros

As estações foram instaladas, em 2007, uma em Maceió, capital do estado de Alagoas, e outras duas nas cidades de Arapiraca e Santana do Ipanema, representando respectivamente o Agreste e Sertão alagoano. As estações tiveram como objetivo, realizar medições simultâneas da radiação solar global, iluminância, temperatura ambiente e

umidade relativa em escala de minutos. A Tab. 1 mostra suas coordenadas geográficas, caracterização climática e período de medidas.

Tabela 1 – Estações de medidas e coordenadas geográficas

Estação	Mesoregião	Coordenadas geográficas			Clima	Período
		Lat.	Long.	Alt.(m)		
Maceió	Leste alagoano	9° 28'	35° 49'	127	Tropical com estação seca de verão	Jun07/Jun08
Arapiraca	Agreste	9° 48'	36° 39'	239	Tropical com estação seca de verão	Jun07/Jun08
Santana do Ipanema	Sertão	9° 22'	37° 13'	279	Tropical com estação seca de verão	Jun07/Jun08

As medidas foram realizadas no plano horizontal, em escala de minuto. A medição da iluminância foi realizada a partir de um fotômetro 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) e para a medição da radiação solar global foi utilizado um piranômetro preto e branco do fabricante Eppley, precisão gira em torno de 5 % e é considerado pela OMM (Organização Meteorológica Mundial, 2010) como um instrumento de classe 2. Os sensores foram acoplados a um sistema de aquisição de dados da Campbell, modelo CR-1000X.

2.2 Modelos aplicados

Modelo 1

Trata-se de um modelo desenvolvido por Perez et al. (1990) construído e testado com valores locais dos Estados Unidos para determinar a iluminância solar.

$$\frac{E}{I} = a + bW + c \cos(Z) + d \ln(\Delta) \quad (7)$$

Onde, E é a iluminância solar global horária, I é a irradiação solar global horária e a, b, c e d são constantes a serem determinadas por uma regressão múltipla. A caracterização do céu foi feita conforme Perez et al. (1990) onde se define ε (índice de transparência atmosférica de Perez) e Δ (índice de brilho do céu) como:

$$\varepsilon = \left[(I_d + I_b) / I_d + kZ^2 \right] / (1 + kZ^2) \quad (8)$$

$$\Delta = I_d m / I_0 \quad (9)$$

I_d , I_b e I_0 são respectivamente irradiação solar difusa, direta e extraterrestre, Z o ângulo zenital em radianos, k constante igual a 1,041 e m a massa de ar. Oito índices de transparência atmosférico resultaram em oito equações para o cálculo da eficiência luminosa. A quantidade de água precipitável W(cm) foi estimada mediante:

$$W = \exp(0,07T_d - 0,075) \quad (10)$$

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. A relação entre a irradiação solar difusa e global foi calculada mediante a correlação de Erbs et al. (1982). Com o objetivo de adaptar o modelo de Perez original e torná-lo local para todas as condições de céu, neste trabalho, foi realizada uma nova regressão múltipla com dados locais, resultando em uma única equação para determinar a eficiência luminosa.

Modelo 2

O modelo empírico proposto por Alados et al. (1995) para estimativa da radiação PAR (Radiação Fotossinteticamente Ativa), foi testado e validado para Valência-Espanha, um local situado no Hemisfério Norte em clima temperado (36,83° N, 2,41° L). Este modelo foi adaptado para este trabalho resultando na expressão a seguir:

$$\frac{E}{I} = a + b \ln \varepsilon + c \ln \Delta + d T_d + e \sin^2 \alpha \quad (11)$$

onde E é a iluminância solar global horária, I é a irradiação solar global horária, T_d é a temperatura de orvalho e α é o ângulo de elevação solar.

Modelo 3

Barbero et. al. (2006) desenvolveram um modelo para estimativa da radiação solar UV diária para a cidade de Almeria (Espanha). O modelo gerado a partir de regressões múltiplas relacionava o índice de transmitância atmosférico UV, relação entre a radiação UV no plano horizontal na superfície terrestre pela radiação UV extraterrestre, com a massa de ar e K_T . Este modelo foi adaptado para estimativa da eficiência luminosa horária em função das mesmas variáveis.

$$\frac{E}{I} = A k_T^B m_r^C \quad (12)$$

onde,

m_r é a massa de ar

k_T é índice de transmitância atmosférico global

2.3 Rede Neural Artificial (RNA)

Foi utilizada neste trabalho uma rede artificial do tipo PMC (Perceptron de Múltiplas Camadas). A camada de entrada possui um número de neurônios definidos pela quantidade de variáveis de entrada utilizadas, a camada oculta possui um número de neurônios definidos empiricamente em função do tamanho do grupo de treinamento e a camada de saída é composta de um único neurônio, que é responsável pela estimativa da iluminância. Uma rede PMC tem seus neurônios (unidades de processamento de informações) organizados em camadas sem conexões laterais e os sinais de entrada propagam de trás para frente pela rede que é treinada por um algoritmo de retro-propagação. Nas redes neurais do tipo PMC, Fig. 1, a ativação dos neurônios nas camadas ocultas e de saída são alcançadas com o uso da função de ativação tipo sigmoid (φ_i).

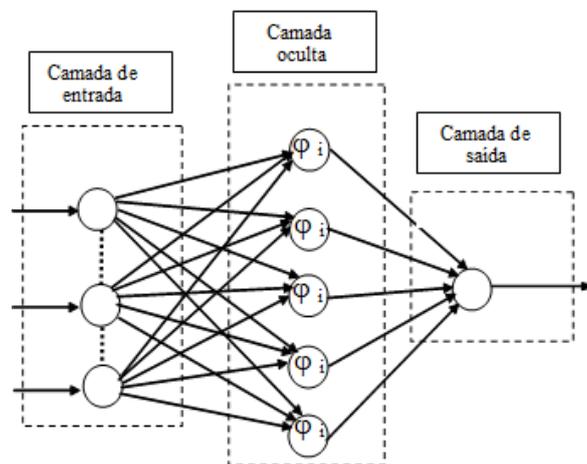


Figura 1 – Rede artificial neural Perceptron de Múltiplas Camadas (PMC).

2.4 Comparações estatísticas

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

$$\text{MBE}\% = 100 \frac{\sum_n (\eta_{L,\text{calculado}} - \eta_{L,\text{medido}})}{\sum_n \eta_{L,\text{medido}}} \quad (13)$$

$$\text{RMSE}\% = 100 \frac{\sqrt{\frac{\sum_n (\eta_{L,\text{calculado}} - \eta_{L,\text{medido}})^2}{n}}}{\sum_n \frac{\eta_{L,\text{medido}}}{n}} \quad (14)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 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 236 a 239 e 263 a 280 (estação Maceió), 51, 274, 263, 274, 280, 348 (estação Arapiraca) e 152, 153 279, 280, 281, 282 e 348 (estação Santana do Ipanema). As medidas representam um intervalo de horas diárias compreendidas entre 9:00 e 17:00 horas. O comportamento da radiação solar global horária em função do ângulo de elevação para ambas as localidades pode ser visto na Fig. 2 (a), 2 (b) e 2 (c). Para um mesmo ângulo de elevação existe uma dispersão muito grande de pontos, indicando a grande diversidade da condição horária do céu.

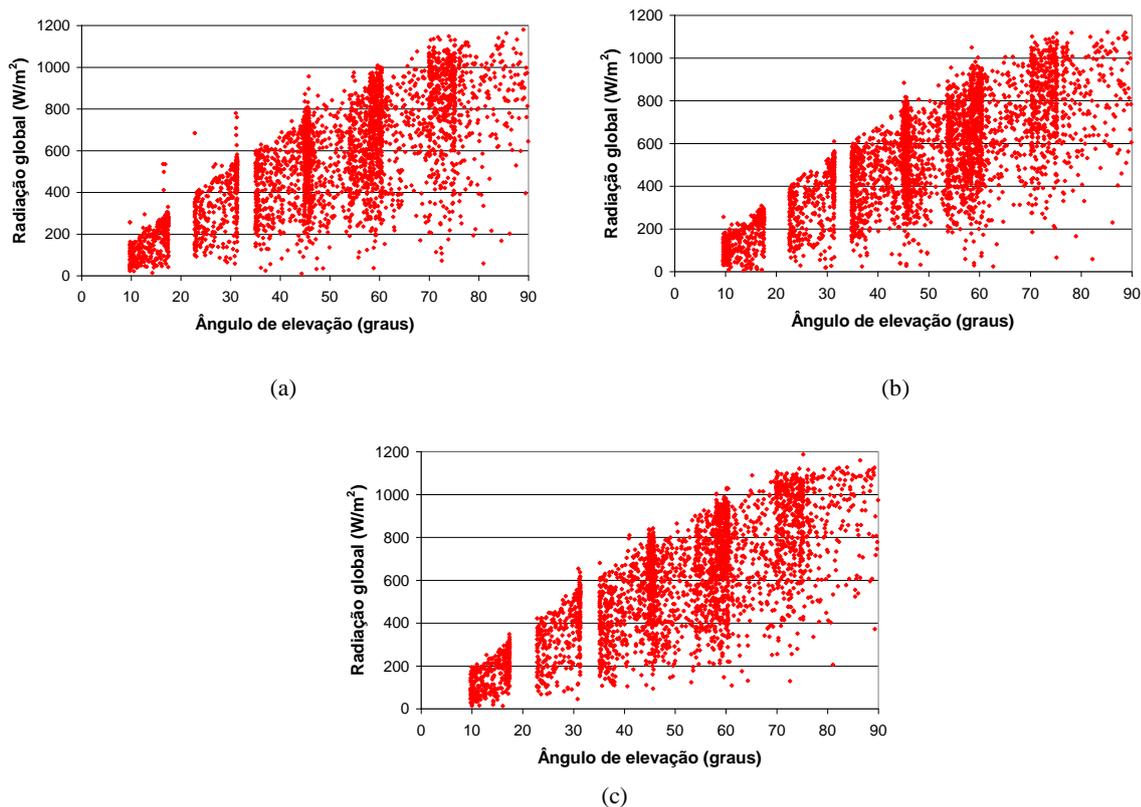


Figura 2 – Comportamento da radiação global horária para capital Maceió (a), Arapiraca (b) e Santana do Ipanema (c).

A iluminância horária global atinge valores máximos acima dos 120 klm/m² para ambas as localidades, Fig. 3. A iluminância média horária para Maceió, Arapiraca e Santana do Ipanema foi de 56,3 klm/m², 58,6 klm/m² e 61,9 klm/m², respectivamente. Um maior nível de iluminância para a cidade de Santana do Ipanema se deve principalmente aos grandes períodos de estiagem na região.

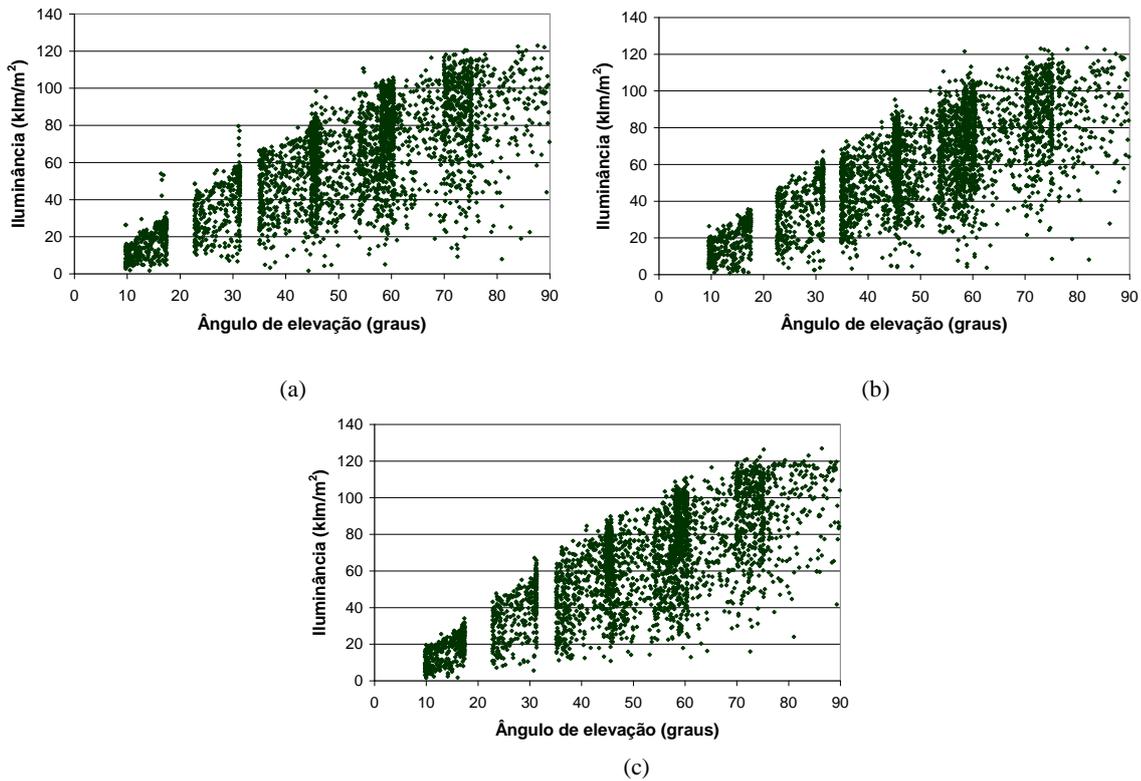


Figura 3 – Comportamento da iluminância global horária para capital Maceió (a), Arapiraca (b) e Santana do Ipanema (c).

Na Fig. 4 observa-se que valor médio da eficiência luminosa para as três localidades fica em torno de 108 lm/W, confirmando a boa eficiência da iluminação natural quando comparada com a iluminação artificial comumente utilizada em pontos comerciais e empresariais (70 a 125 lm/W).

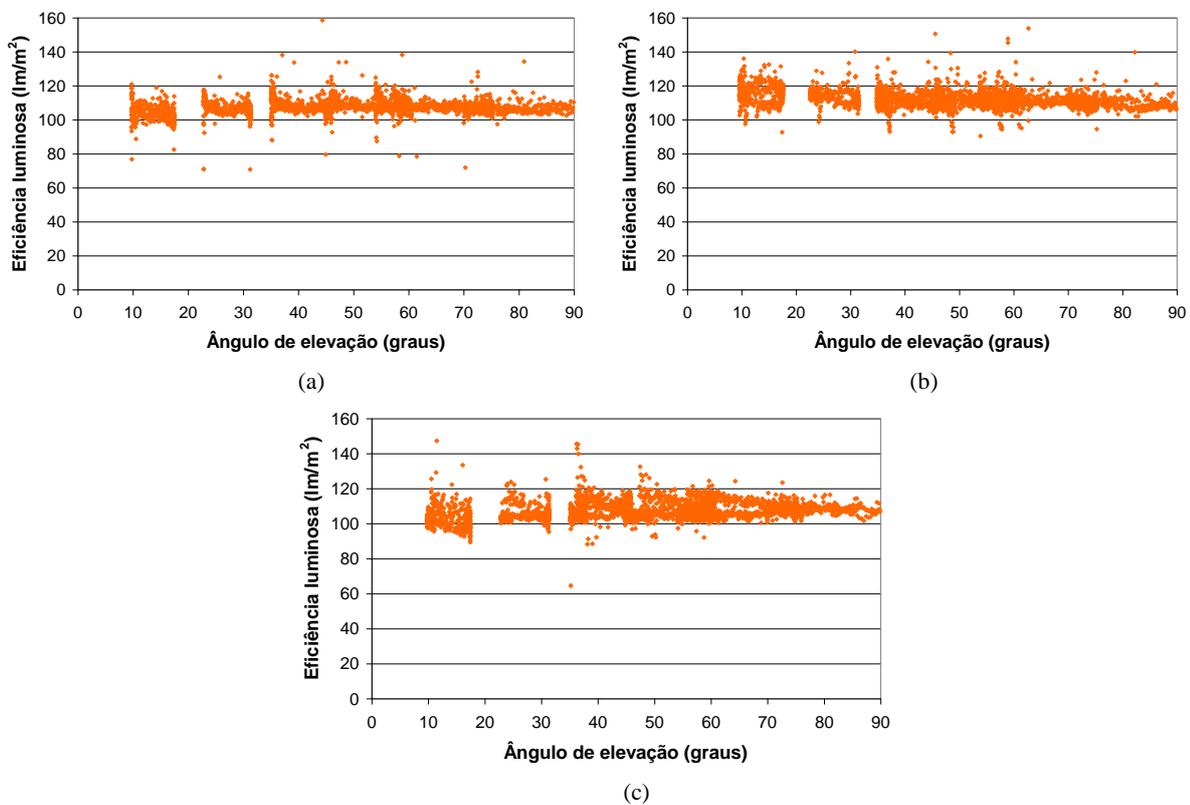


Figura 4 – Eficiência luminosa horária para as cidades de Maceió (a), Arapiraca (b) e Santana do Ipanema (c)

3.2 Modelos gerados

As equações abaixo representam respectivamente os modelos 1, 2 e 3 para acidade de Maceió, Arapiraca e Santana do Ipanema considerando todas as condições de céu.

Maceió:

$$\frac{E}{I} = 101,337 + 1,390W - 0,886\cos(Z) - 2,201\ln(\Delta) \quad \text{Modelo 1} \quad (15)$$

$$\frac{E}{I} = 103,618 - 4,311\ln\varepsilon - 5,159\ln\Delta + 0,249Td - 4,583\text{sen}^2\alpha \quad \text{Modelo 2} \quad (16)$$

$$\frac{E}{I} = 105,320k_t^{-0,046}m^{-0,024} \quad \text{Modelo 3} \quad (17)$$

Arapiraca:

$$\frac{E}{I} = 104,814 + 3,276W - 7,977\cos(Z) - 0,860\ln(\Delta) \quad \text{Modelo 1} \quad (18)$$

$$\frac{E}{I} = 103,172 - 1,594\ln\varepsilon - 1,913\ln\Delta + 0,625Td - 7,387\text{sen}^2\alpha \quad \text{Modelo 2} \quad (19)$$

$$\frac{E}{I} = 108,419k_t^{-0,030}m^{-0,025} \quad \text{Modelo 3} \quad (20)$$

Santana do Ipanema:

$$\frac{E}{I} = 97,94 + 1,363W + 5,723\cos(Z) - 0,677\ln(\Delta) \quad \text{Modelo 1} \quad (21)$$

$$\frac{E}{I} = 101,640 - 3,819\ln\varepsilon - 5,805\ln\Delta + 0,216Td - 1,944\text{sen}^2\alpha \quad \text{Modelo 2} \quad (22)$$

$$\frac{E}{I} = 107,244k_t^{-0,033}m^{-0,044} \quad \text{Modelo 3} \quad (23)$$

A Fig. 5 mostra a curva gerada pelos três modelos da eficiência luminosa para a capital Maceió.

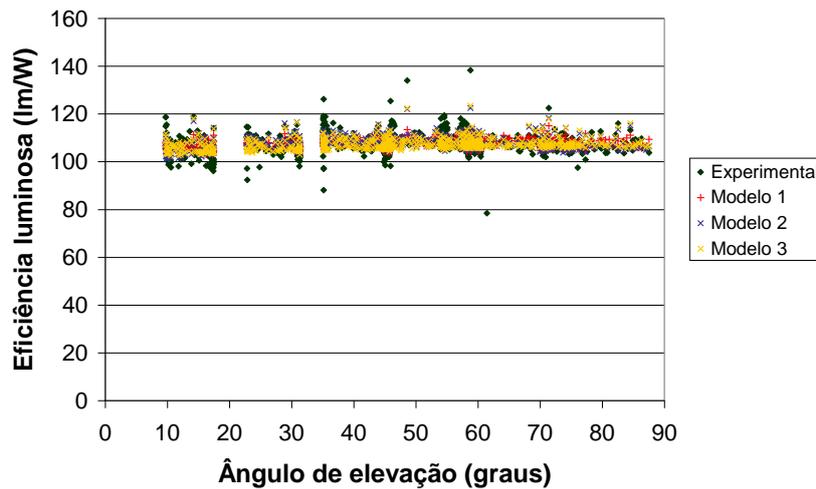


Figura 5 – Eficiência luminosa prevista pelos modelos 1, 2, 3 para a cidade de Maceió

3.3 Redes (RNA)

Fazendo uso das mesmas variáveis utilizadas nos modelos 1, 2 e 3, foram geradas respectivamente as redes 1, 2 e 3 para ambas as localidades. As Fig. 6 mostra os pontos experimentais para validação bem como os pontos estimados pelas redes para a capital Maceió.

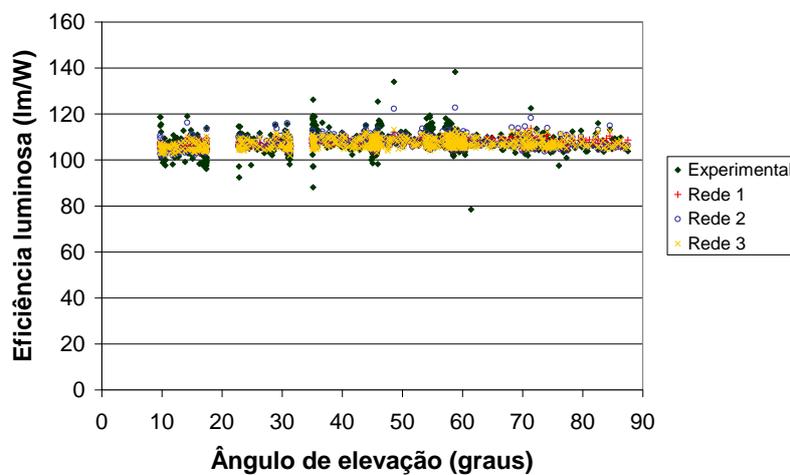


Figura 6 – Eficiência luminosa previstas pelas redes 1, 2 e 3 para a cidade de Maceió.

Os dados distribuídos aleatoriamente no período de julho de 2007 a junho de 2008, sendo 50% deste período para treinamento da rede e geração dos outros modelos, 25% para validação da rede e 25% restantes para testar e comparar o desempenho estatístico da rede com os outros modelos. É válido salientar que os 25% dos dados utilizados no teste da rede e dos modelos são totalmente distintos, não exercendo nenhuma influência nos modelos e redes geradas.

A Tab. 2 resume o desempenho estatístico dos modelos estatísticos e redes neurais que foram validados com 25% dos dados experimentais, não utilizados no processo de geração dos mesmos. Em resumo ambos os modelos apresentaram um RMSE inferior a 5%, sendo assim bastante satisfatório para a estimativa da iluminância solar para as cidades em estudo e localidades circunvizinhas.

Tabela 2 - Validação dos modelos e das redes

		Modelo1	Modelo2	Modelo3	Rede1	Rede2	Rede3
Maceió	MBE%	-0,07	-0,14	0,23	0,26	0,18	0,41
	RMSE%	3,82	3,50	3,56	3,84	3,49	3,72
Arapiraca	MBE%	0,02	0,04	0,16	-0,18	-0,28	-0,19
	RMSE%	4,04	3,98	3,88	4,09	3,61	3,67
Santana do Ipanema	MBE%	0,01	0,10	0,15	0,49	0,36	0,45
	RMSE%	4,52	4,32	4,37	4,40	4,14	4,32

A Fig. 7 mostra as curvas de estimativa da iluminância solar para os dias Julianos 224 e 225 do ano de 2008, geradas pelos modelos e redes neurais estudados.

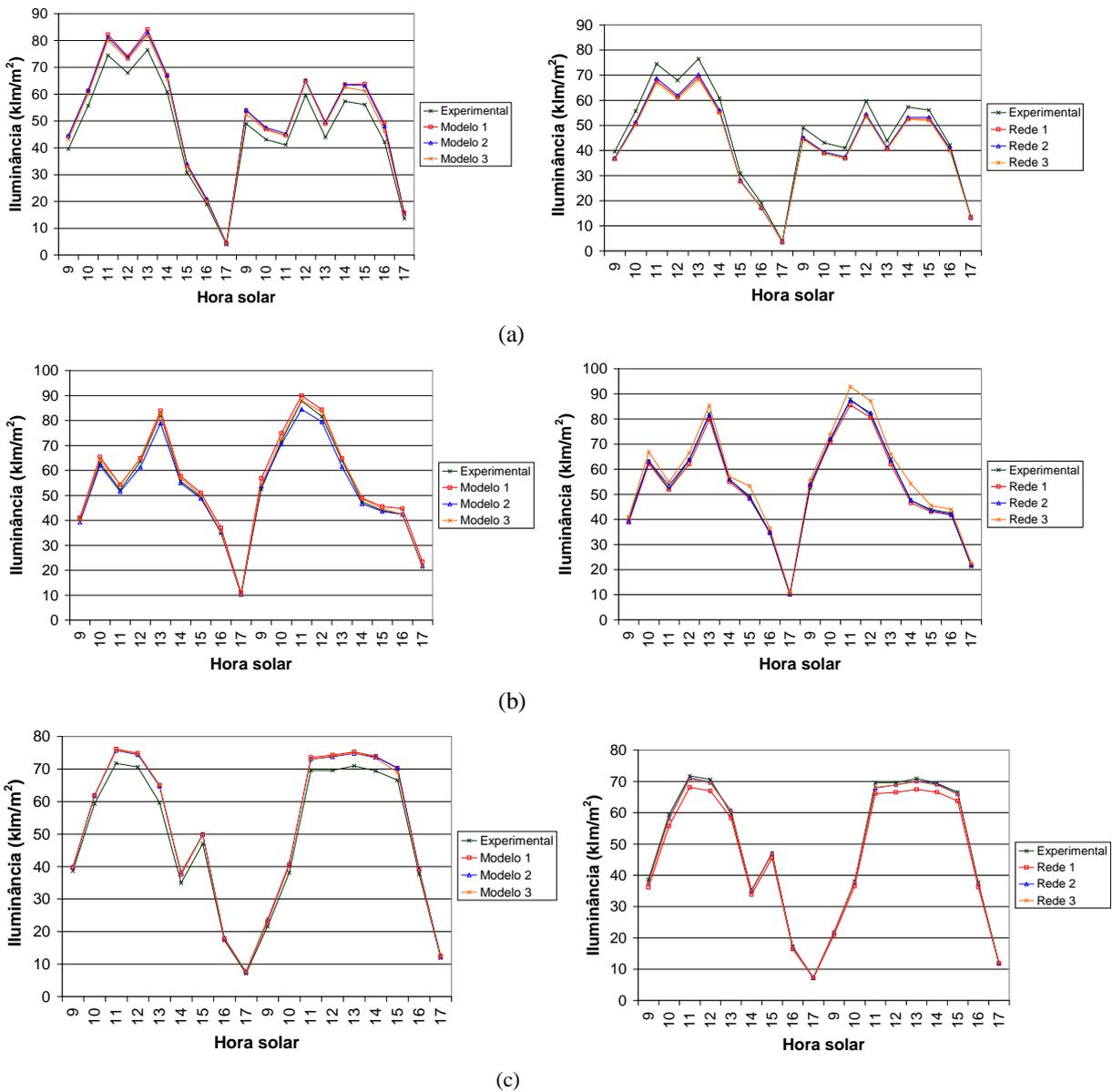


Figura 7 - Iluminância estimada pelos modelos e redes nas cidades de Maceió (a), Arapiraca (b) e Santana do Ipanema (c), considerando os dias julianos 224 e 225 escolhidos aleatoriamente.

4. CONCLUSÕES

Os modelos propostos e adaptados neste trabalho possibilitaram a estimativa da iluminância solar em três localidades de características climáticas distintas no estado de Alagoas. Mediante a disponibilidade de dados de radiação global solar e outras variáveis como temperatura e umidade, os modelos e redes neurais artificiais PMC foram gerados e testados. Os desempenhos estatísticos dos modelos e redes foram satisfatórios (RMSE% inferior a 5%), sendo desta forma ferramentas úteis na elaboração de projetos luminotécnicos que levam em consideração a iluminação natural. É válido salientar que os modelos podem ser estendidos para estimar a iluminância solar em localidades circunvizinhas com similaridades climáticas e fitogeográficas semelhantes no estado de Alagoas.

REFERÊNCIAS

- Alados I., Foyo-Moreno I. y Alados-Arboledas, L. (1996). Photosynthetically active radiation: measurements and modelling. *Agricultural and Forest Meteorology* 78, 1-2, 121-131.
- Barbero, F. J.; Lopez, G.; Batlles, F.J. Determination of daily solar ultraviolet radiation using statistical models and artificial neural networks. *Annales Geophysicae*, v. 24, p.2105-2114, 2006.
- CB-02- Comitê Brasileiro de Construção Civil. Procedimento de Cálculo para a Determinação da Iluminação Natural em Ambientes Internos, 02:135.02-003, 1999.
- Erbs D. G., Klein, S. A. and Duffie, J. A. (1982). Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly – average global radiation, *Solar Energy* 28, 4, 293-302.
- Escobedo, J.F.;Gomes E. N.; Oliveira A.P.; Soares J. Fração solar K_{uv} , K_{par} e K_{IV} : Análise variacional e equações de estimativa em função de K_T . I CBENS, 2007
- 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.
- Paroscientific, Inc. (2004). Met3A calculation of dew point, www.paroscientific.com/dewpoint.htm.
- 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.
- 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.

MODELING THE ILLUMINANCE FOR THREE LOCATIONS IN THE STATE OF ALAGOAS

Abstract. *Three stations were setup, in 2007, in the state of the Alagoas, for simultaneous measurements of global solar radiation, illuminance, temperature and relative humidity. One of the stations was setup in city of Maceió, capital of Alagoas and other two stations were setup in the city of Arapiraca and Santana do Ipanema. The data collected data were measurements, analysed and compared enable the generation of three different statistical models for estimating the hourly illuminance solar from the hourly global radiation, temperature and relative humidity. Besides, they were modeled by three artificial neural networks for estimating the illuminance, considering the same physical variables of the statistical models. The statistical models and the artificial neural networks displayed a good statistical performance with RMSE% inferior to 5% and MBE% between -0.28 and 0.49%. All models can be used for estimating the solar illuminance in the surrounding regions with climatic and phytogeographic similarities.*

Key words: Statistical models, Artificial neural networks, Illuminance, luminous efficacy, Alagoas.