

COMPARAÇÃO DE MODELOS DE RADIAÇÃO DIFUSA HORÁRIA A PARTIR DE DADOS MEDIDOS PELA REDE SONDA EM ALGUMAS CIDADES DO BRASIL

Glauber Kiss de Souza – glauberks@gmail.com

Mario Henrique Macagnan – mhmac@unisinis.br

Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, Departamento de Engenharia Mecânica

Resumo. A energia solar está em ascensão nos últimos anos, tanto em aceitação social como em capacidade instalada. Por isto é necessário que estudos sejam realizados para avaliar a viabilidade econômica e o impacto ambiental advindo da produção e implantação de plantas de potência, tornando-se necessária a avaliação da disponibilidade de cada parcela da radiação solar, seja por medição ou por estimativas. Algumas destas parcelas, como a irradiância difusa e direta, são difíceis de medir, seja pela necessidade constante de aferição do equipamento quanto pelo preço elevado dos mesmos. Em casos como este há a necessidade da utilização de modelos de radiação difusa horários para estimar tanto a irradiância difusa quanto a irradiância direta. A falta de medição de dados de irradiância difusa no Brasil era praticamente nula até a criação do Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (SONDA). Portanto, neste estudo, foi realizada a comparação de cinco modelos de radiação difusa horários, obtidos por autores estrangeiros datados de 1977 até 2010, em relação a dados medidos por estações da rede SONDA em seis cidades brasileiras cujos dados estavam na versão 3.3. Os resultados dos desvios MBEr e RMSEr demonstraram que na falta de medição desta parcela da radiação, o modelo mais confiável para generalização é o de Erbs et. al. (1982). No entanto, os melhores e piores resultados para cada cidade diferiram muito em relação a cada modelo testado, portanto, em caso de disponibilidade de dados medidos por um período de tempo considerável, haverá a necessidade de testes com estes dados locais. As análises de modelos que dependem de variáveis físicas mostraram que os mesmos não se comportaram adequadamente, indicando que próximos estudos podem tomar como base novos paradigmas para manter a simplicidade de seus modelos juntamente com a exatidão e precisão de seus resultados.

Palavras-chave: Energia Solar, Modelos de Radiação, Radiação Difusa.

1. INTRODUÇÃO

Os meios de energia renováveis se mostram cada vez mais uma realidade dentro de nossa sociedade. A utilização de meios sustentáveis para geração de energia cresceu muito nos últimos anos, conforme mostrado na Fig (1), a partir do jornal The Guardian Solar Power (VAUGHAN, 2017). A mesma matéria demonstra que a capacidade instalada para geração de energia solar em 2016 é de 305GW, valor muito superior aos 50GW instalados até 2010. Mesmo com uma representação total de 2% na capacidade global instalada, segundo o Global Energy Statistical Yearbook (ENERDATA, 2017), a energia solar demonstra maior aceitação e mais eficiência na sua utilização, que não deve ser ignorada.

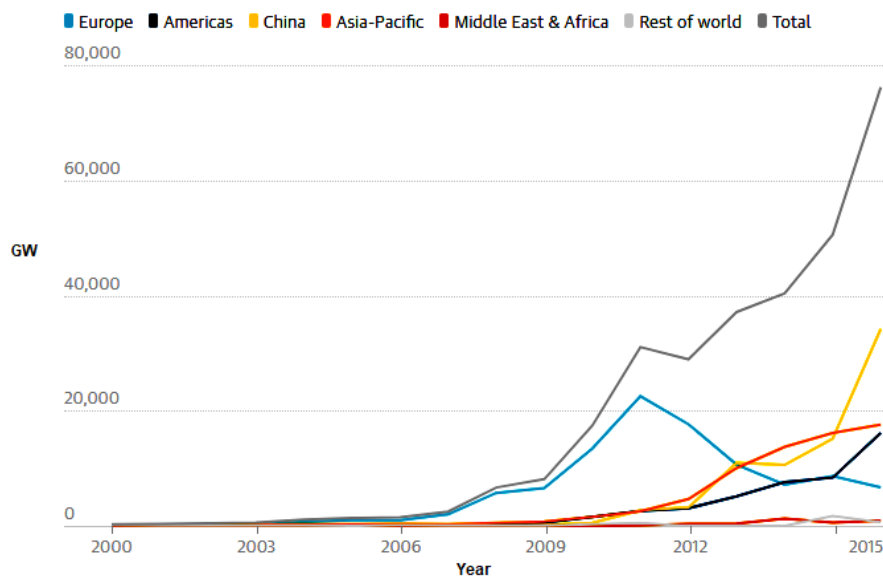


Figura 1 - Quantidade de energia fotovoltaica instalada no mundo (Fonte: Vaughan A., 2017)

Ao levar em conta o fator econômico e ambiental, um estudo adequado mostra-se necessário para avaliar as melhores localidades para os diferentes meios de obtenção de energia a partir do Sol: Sistemas térmicos e fotovoltaicos. Cada um possui uma maneira de funcionamento, o primeiro depende exclusivamente da irradiância solar direta e o segundo utiliza toda a irradiância disponível, seja ela em um plano inclinado fixo ou por meio de seguidores solares. Por isso, há a necessidade uma estimativa robusta das diferentes parcelas da radiação, portanto neste trabalho é apresentado um estudo de cinco diferentes modelos de estimativa da irradiância difusa horizontal obtidos nos estudos de Orgill e Hollands (1977), Erbs et. al. (1982), Reindl et. at. (1982) e Ridley et. at. (2010), em comparação com dados medidos em algumas cidades brasileiras pelas estações do Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (SONDA).

2. MODELOS DE RADIAÇÃO DIFUSA HORÁRIA

Instrumentos que medem a irradiância direta e difusa são muito caro ou necessitam de aferição e manutenção funcional constante. A dificuldade da medição destas componentes é recorrente em trabalhos que procuram obter a parcela difusa a partir de outras parcelas medidas com maior facilidade, como a irradiância global horizontal. Essas dificuldades estão presentes em justificavas desde trabalhos pioneiros, como de Liu e Jordan (1960), até trabalhos que se utilizam de metodologias e tecnologias diferenciadas, como o apresentado por Paulescu e Blaga (2016).

A necessidade de modelos cada vez mais precisos e em escalas de tempo menores levou ao estudo de Orgill e Hollands (1977), onde partiram de correlações anteriores, que utilizavam o índice “*f*” para estimativas a médio e longo prazo da probabilidade da parcela difusa da radiação, e correlacionaram os valores médios de dois índices horários: o coeficiente difuso (neste estudo chamado apenas de *K*) e o coeficiente de claridade (chamado pelos autores de *K_T*). Com esta correlação, os autores obtiveram um gráfico característico, conforme Fig. (2).

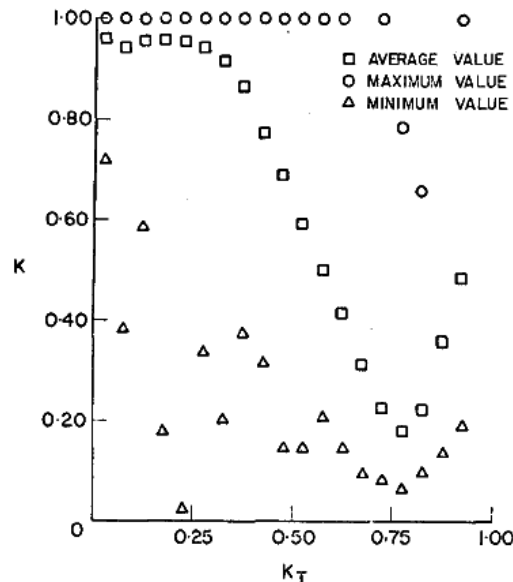


Figura 2 - Correlação entre índices horários difuso e de claridade (Fonte: Orgill e Hollands, 1977)

Os autores dividiram os dados em “bins” ou faixas de valores, de acordo com o comportamento de *K_T* para a obtenção de equações do modelo difuso. As equações da correlação obtida por Orgill e Hollands (O&H) são mostradas nas Eq. (1), (2) e (3) e, assim como todos os outros equacionamentos, utilizam a nomenclaturas de *k_t* e *k_d* para os coeficientes horários de claridade e difuso, respectivamente, conforme Duffie e Beckman (2016).

$$k_d = 1 - 0,249k_t \quad (1)$$

para $k_t < 0,35$;

$$k_d = 1,557 - 1,84k_t \quad (2)$$

para $0,35 \leq k_t \leq 0,75$;

$$k_d = 0,177 \quad (3)$$

para $k_t > 0,75$;

onde *k_t* representa o índice de claridade horário e *k_d* a fração difusa horária.

A partir deste trabalho, outros se originaram, com curvas mais elaboradas, como o modelo de Erbs et. al. (1982), proposto a partir de dados de quatro localidades norte-americanas situadas entre latitudes de 31°N até 42°N, demonstradas nas Fig. (3). Neste estudo, os coeficientes de claridade e difuso são chamados de k_T e I_d/I , respectivamente, e sua principal característica é a curva do segundo *bin*, contendo uma equação de quarto grau em relação ao índice k_T . De acordo com Ricieri R. P. et. al. (2002), esta característica detém uma condição universalizada do uso da equação para vários locais com condições climáticas diferentes. Este modelo é mostrado nas Eq. (4), (5) e (6).

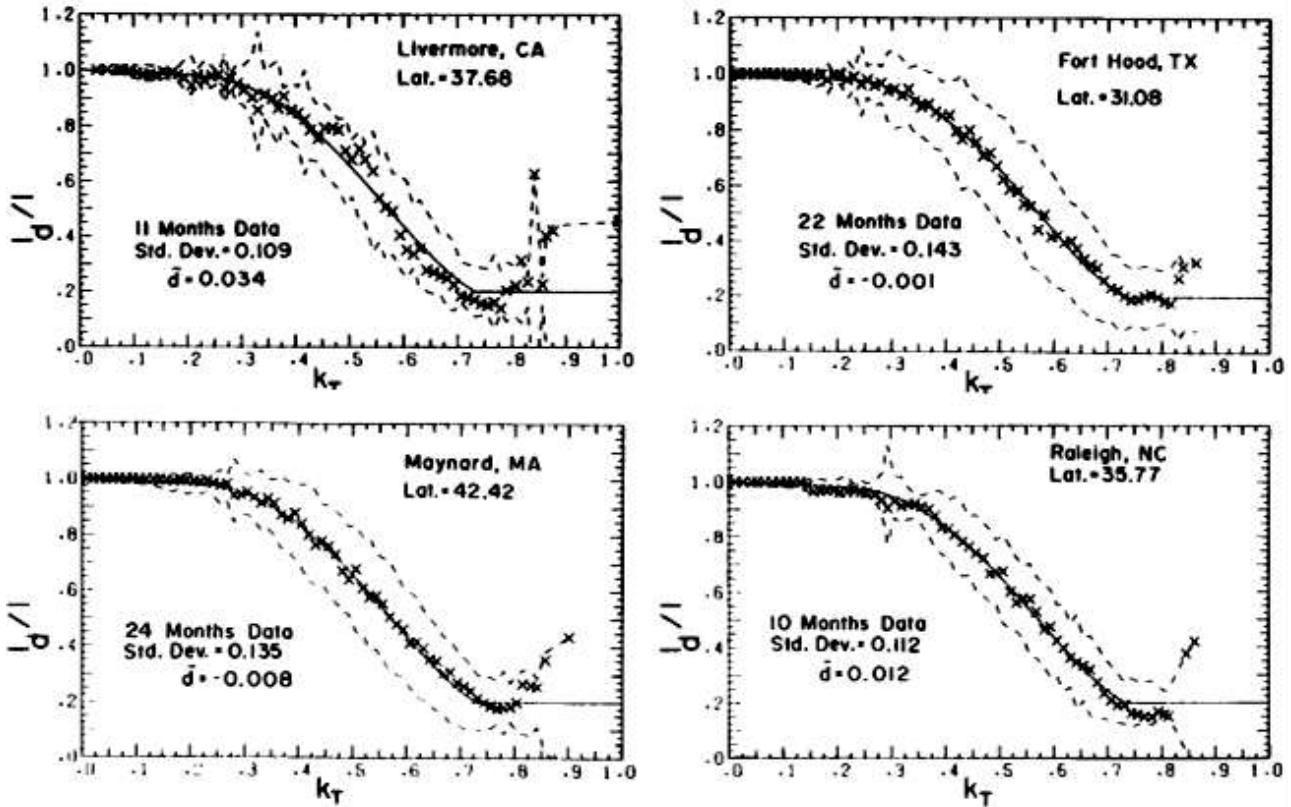


Figura 3 - Correlação entre índices horários difuso e de claridade (Fonte: Erbs et. at., 1982)

$$k_d = 1 - 0,09k_t \quad (4)$$

para $k_t \leq 0,22$;

$$k_d = 0,9511 - 0,1604k_t + 4,388k_t^2 - 16,638k_t^3 + 12,336k_t^4 \quad (5)$$

para $0,22 < k_t \leq 0,80$;

$$k_d = 0,165 \quad (6)$$

para $k_t > 0,80$;

onde k_t representa o índice de claridade horário e k_d a fração difusa horária.

Estudos mais recentes realizam variações desta metodologia, como na pesquisa de Reindl et al (1990), onde os autores utilizaram dados de cinco localidades, com latitudes entre 28°N e 60°N, mostrados na Fig (4), chamando os coeficientes de claridade e difuso de k_t e I_d/I , respectivamente. Além das correlações clássicas, os autores verificaram outras três variáveis climáticas que interferiam na estimativa dos coeficientes difusos, sendo elas: o seno da altitude solar, a temperatura ambiente e a umidade relativa. Os modelos utilizados nestes testes são, respectivamente, o segundo e terceiro citados pelo autor: RE2, demonstrado nas Eq. (7), (8) e (9), utilizando o seno da altitude solar, e RE3, demonstrado nas Eq. (10), (11) e (12), seguindo o padrão do modelo O&H.

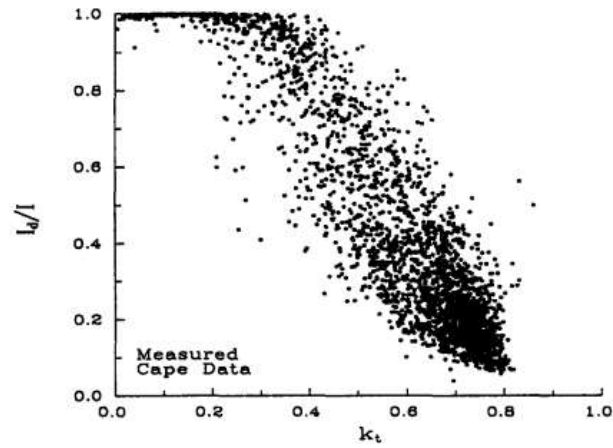


Figura 4 - Correlação entre índices horários difuso e de claridade (Fonte: Reindl et. at., 1990)

$$k_d = 1,02 - 0,254k_t + 0,0123\sin \alpha \quad (7)$$

para $k_t \leq 0,30$;
com a restrição de $k_d \leq 1$;

$$k_d = 1,4 - 1,749k_t + 0,177\sin \alpha \quad (8)$$

para $0,30 < k_t < 0,78$;
com a restrição de $k_d \leq 0,97$ e $k_d \geq 0,1$;

$$k_d = 0,486k_t - 0,182\sin \alpha \quad (9)$$

para $k_t \geq 0,78$;
com a restrição de $k_d \geq 0,1$;
onde k_t representa o índice de claridade horário e k_d a fração difusa horária.

$$k_d = 1,020 - 0,248k_t \quad (10)$$

para $k_t \leq 0,30$;

$$k_d = 1,45 - 1,67k_t \quad (11)$$

para $0,30 < k_t < 0,78$;

$$k_d = 0,147 \quad (12)$$

para $k_t \geq 0,78$;
onde k_t representa o índice de claridade horário e k_d a fração difusa horária.

Citando estudos ainda mais recentes, temos o realizado por Ridley et.al. (2010), onde os autores partem da pesquisa de Reindl et. al. (1990) para adaptar uma função logística com parâmetros físicos para melhor representar o espalhamento de dados reais em correlações de k_t e k_d , principalmente em cidades cujas estimativas tradicionais por meio de modelos criados com dados americanos não se mostraram adequadas. Os dados utilizados para encontrar os parâmetros da representatividade das variáveis físicas na sua equação foram de cinco cidades: Adelaide (AU), Darwin (AU), Bracknell (UK), Lisboa (PT), Macau (MO), Maputo (MZ) e Uccle (BE). Desta maneira, a equação final do modelo, chamado neste artigo de BRL2, é demonstrada na Eq. (13).

$$k_d = \frac{1}{1 + e^{-5.38 + 6.63k_t + 0.006AST - 0.007\alpha + 1.75K_t + 1.31\psi}} \quad (13)$$

onde AST é o tempo solar aparente, α é a altitude solar em graus, K_t é a média diária do coeficiente horário de claridade e ψ é a persistência, demonstrada na Eq. (14):

$$\Psi = \begin{cases} (k_{t-1} + k_{t+1})/2 & sr < t < ss \\ k_{t+1} & t = sr \\ k_{t-1} & t = ss \end{cases} \quad (14)$$

onde sr é o nascer do sol e ss é o pôr do sol.

Foram realizados vários testes com dados locais, e estes demonstraram que o modelo BRL2 não estava se comportando conforme o esperado. Devido à falta de uma abordagem mais clara na metodologia de obtenção de cada parâmetro físico e de suas constantes (para adaptar o modelos aos dados brasileiros), somente foi avaliada a primeira equação de Ridley et. al. (2010), denominada neste artigo como BRL1 e demonstrada na Eq. (15). Esta é a equação logística linear simples que utiliza somente o coeficiente de claridade horário como variável de entrada.

$$k_d = \frac{1}{1 + e^{-5.38 + 6.63k_t}} \quad (15)$$

onde k_t é o coeficiente de claridade horário.

3. BASE DE DADOS PARA TESTE

O Brasil conta com o SONDA para medição de dados de irradiância direta e difusa por meio de 17 estações, entre oficiais e parceiras, e 1345 meses de dados medidos entre 2002 e 2016. Para esse estudo, foi delimitado a utilização de 6 cidades que possuíam dados acima da versão 3.3, dados estes que possuem um dos sistemas de validação mais robustos dentro do sistema de medição. As cidades selecionadas para os testes, juntamente com o intervalo de tempo dos dados, foram: Petrolina (2013-2016), Palmas (2013-2016), Brasília (2011-2015), Cachoeira Paulista (2014-2016), Florianópolis (2013-2016) e São Martinho da Serra (2013-2016). Na Fig (5) pode-se ver a distribuição geográfica destas cidades, abrangendo uma boa parte do território e condições climáticas do país.

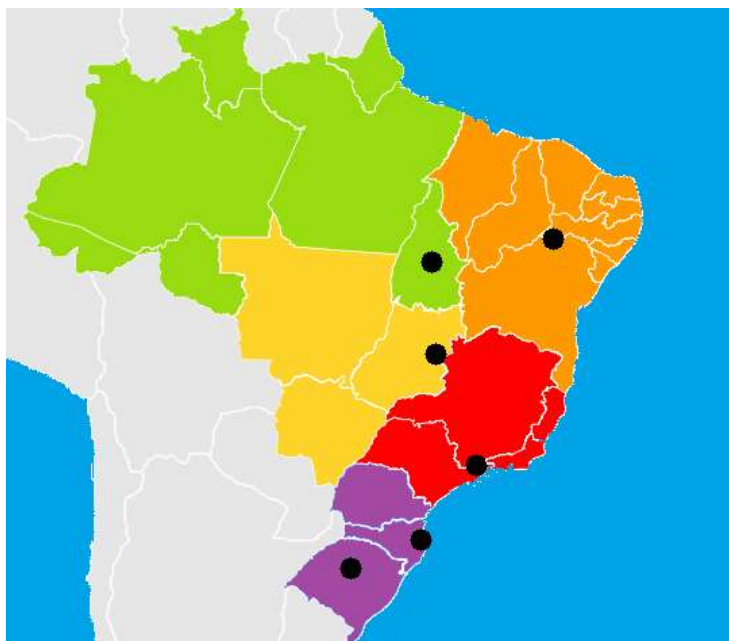


Figura 5 - Localidades cujos dados foram utilizados nos testes dos modelos difusos

Antes de sua utilização para testes, todos os dados, medidos minuto a minuto, passaram por um algoritmo de verificação que avaliou e corrigiu dados marcados com grande possibilidade de erro, de acordo com os arquivos DQC fornecidos para cada localidade. Os dados foram preenchidos com a média dos valores válidos do minuto anterior e posterior a sua contagem consecutiva e, passando de 4 horas de medição com incerteza consecutiva, as mesmas eram marcadas como dados faltantes. Os dados utilizados estavam em condições razoavelmente boas, alguns gaps, exclusões por falta de qualidade mínima, uma pequena quantidade que não passou no algoritmo de qualidade mais leve (o que não os qualifica como ruins). Em seguida, as médias horárias foram obtidas para serem utilizadas nas estimativas somando 46643 linhas de dados válidos. A qualidade/quantidade de dados válidos pode ser vista na Fig (6), demonstrando as correlações entre os índices de claridade e difusos das cidades utilizadas para testes. Os dados de Petrolina foram utilizados com coeficientes de claridade até 1,1 e Florianópolis até 1,01.

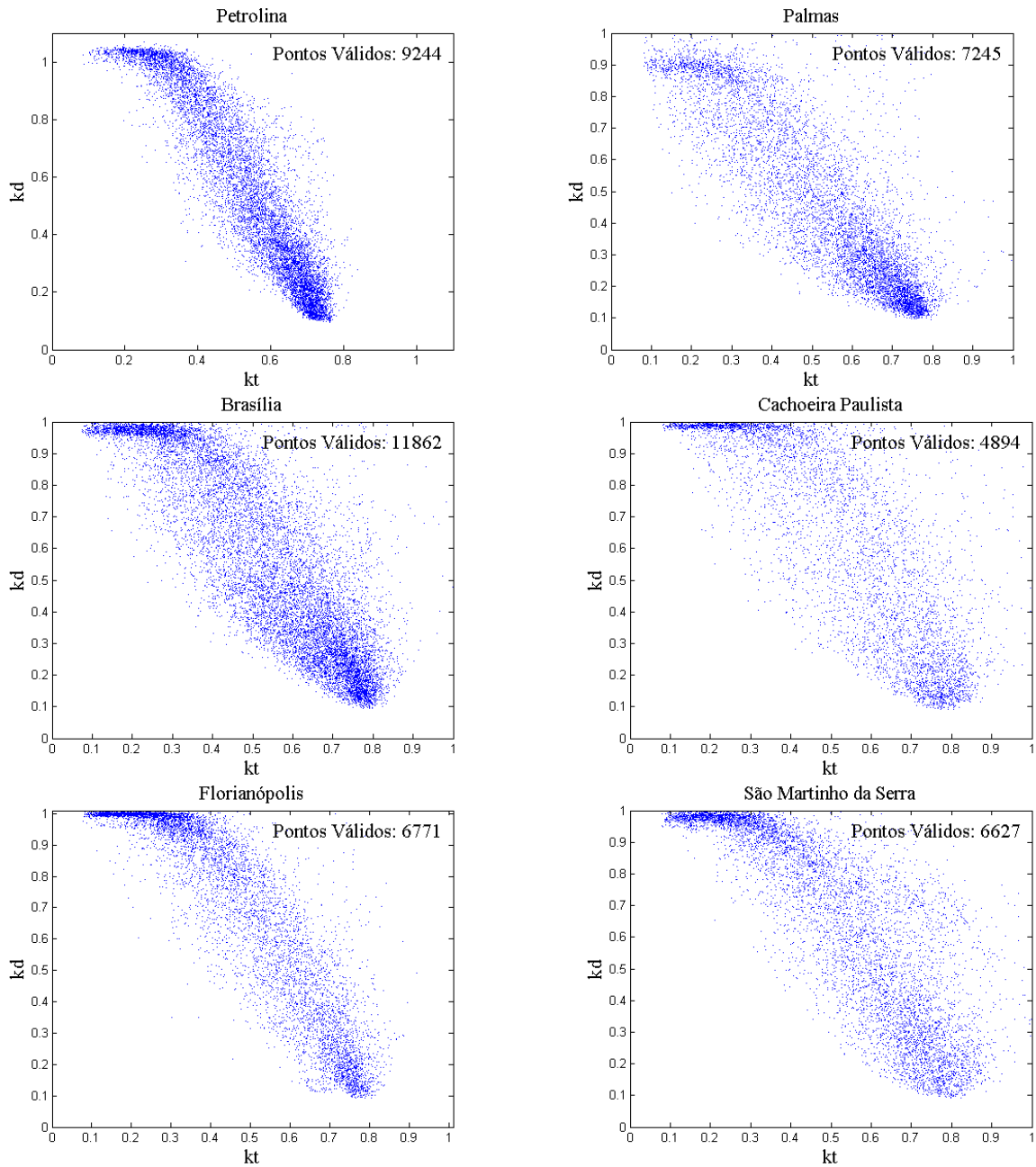


Figura 6 – Quantidade e qualidade dos dados horários para as cidades testadas

4. QUANTIFICAÇÃO DO DESVIO

Para quantificar o desvio entre valores calculados e medidos, foram utilizados o desvio médio relativo (MBEr), que demonstra se a estimativa está positiva ou negativa, e o desvio quadrático médio relativo (RMSEr), que demonstra a dispersão dos pontos em relação à variável de referência medida. Estes métodos de cálculo de desvio são definidos pelas Eq. (16) e (17).

$$MBEr = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^i \frac{g_{calc,i} - g_{med,i}}{g_{med,i}} \cdot 100 \quad (16)$$

$$MBEr = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^i \frac{g_{calc,i} - g_{med,i}}{g_{med,i}}} \cdot 100 \quad (17)$$

onde n é o número de dados considerados na análise, $g_{calc,i}$ é a valor calculado a partir de alguma estimativa e $g_{med,i}$ é a variável de referência medida.

5. RESULTADOS

Os resultados obtidos para cada localidade de testes são demonstrados nas tabelas abaixo. A Tab. (1) demonstra o erro RMSEr dos modelos tradicionais, enquanto a Tab. (2) demonstra os erros MBE dos mesmos modelos.

Tabela 1 - Erro RMSEr (%) dos modelos difusos comparados com os dados medidos em cada cidade teste

CIDADE	O&H	ERBS	RE2	RE3	BRL1
Petrolina	35,96	32,61	49,97	37,80	36,41
Palmas	51,87	50,64	65,14	51,37	53,48
Brasília	34,38	34,43	40,47	33,92	35,98
Cachoeira Paulista	33,92	37,57	45,86	38,28	40,45
Florianópolis	28,56	27,58	35,27	28,86	28,78
São Martinho da Serra	33,78	33,63	39,56	34,35	36,59

Tabela 1 - Erro MBEr (%) dos modelos difusos comparados com os dados medidos em cada cidade teste

CIDADE	O&H	ERBS	RE2	RE3	BRL1
Petrolina	11,44	8,92	22,13	11,81	12,46
Palmas	30,01	28,10	42,92	29,68	30,47
Brasília	3,41	2,14	13,03	2,04	2,69
Cachoeira Paulista	-2,60	-3,82	9,29	-4,61	-5,61
Florianópolis	-1,82	-2,22	4,92	-2,37	-1,91
São Martinho da Serra	-7,45	-8,49	2,69	-9,01	-10,07

6. CONCLUSÕES

Com resultados de MBEr e RMSEr de acordo com a tendência de desvio dos outros modelos testados e diferindo em 3,5% desta tendência em apenas uma cidade, o modelo de Erbs et. al (1982) demonstrou ser o mais generalizável dentre todos, corroborando assim a afirmação de Ricieri R. P. et al. (1995). No entanto, tanto o modelo com o melhor desvio, quanto o modelo com o pior e maior desvio em relação às tendências de erro, tanto MBEr como RMSEr, variou consideravelmente de cidade para cidade. Desta maneira, é possível concluir que na falta de medição da irradiância difusa para comparação de modelos em uma determinada localidade, o melhor a ser feito é utilizar o modelo de Erbs et. al. (1982) como base para estimativas desta parcela da radiação. Caso contrário, para a obtenção do melhor desvio possível, será necessário testar os modelos para a localidade em questão.

Outro fator bastante interessante é o comportamento dos modelos de Reindl et. al. (1990) Esta característica de erros mais altos do que modelos simplificados como o de Erbs e O&H já foi demonstrado em estudos como o de Ridley et. al. (2010). Neste artigo os erros RMSEr chegavam a diferir quase 10% a mais do que outros modelos para localidades como Maputo e Darwin e em quase 5% na cidade de Lisboa. A tese de doutorado de Macagnam (1993) também demonstra que os erros do modelo de Reindl et. al. (1990), para a cidade de Madrid, foram quase 7% mais altos do que os dados obtidos pelo modelo de Erbs et. al. (1982). Levando em conta as características climáticas e latitude, a relação de erro deste modelo entre o Brasil e Austrália é bastante relevante e o alto erro para a cidade de Lisboa é também corroborado pela proximidade com Madrid por meio dos resultados na tese de Macagnam (1993). Ao que os estudos indicam, o referido modelo não possui um bom grau de generalização e, em conjunto com o fato de não ser baseado em um polinômio de quarto grau, o “espalhamento” que aparentemente acabaria por ajudar este modelo, em relação à outros totalmente lineares, termina aumentando seu erro dependendo da localidade. Um fato bastante curioso, que pode ser observado nas Fig. (7) e Fig (8).

Com os dados brasileiros, o modelo BRL2 de Ridley et. al. (2010) demonstrou um comportamento não ideal e fora do padrão de sua representação no artigo publicado por seus autores. Na falta de uma demonstração mais clara dos detalhes da metodologia para obtenção de cada parâmetro físico e de suas constantes (para adaptarmos o modelo aos nossos dados), este comportamento foi suficiente para abandonar os testes desta equação até ser obtida a completa certeza da metodologia original dos autores para testes com maior precisão. Esta diferença pode ser percebida claramente nas Fig (7) e Fig (9). Na primeira, encontra-se a cidade de Brasília com quatro diferentes modelos sobrepostos aos seus dados medidos e, nas duas figuras seguintes, há as imagens originais de Ridley et. al. (2010) que demonstram o comportamento adequado dos modelos. Conforme dito anteriormente, RE2 se comportou adequadamente, mas BRL2 foi bastante errático e a variação, ou até exclusão, de seus parâmetros não foram suficientes para alterações significativas deste comportamento. Ao que tudo indica, o aumento da complexidade dos modelos especializa demais os mesmos e/ou os torna muito dependentes de suas constantes. Modelagens analíticas estão cada vez mais complexas para melhorar sua precisão/generalização, como no caso do estudo de Starkveit et. al. (1998).

Estudos futuros podem abordar paradigmas diferentes para tentar simplificar a modelagem da parcela difusa da radiação solar sem perder a precisão e exatidão de suas estimativas.

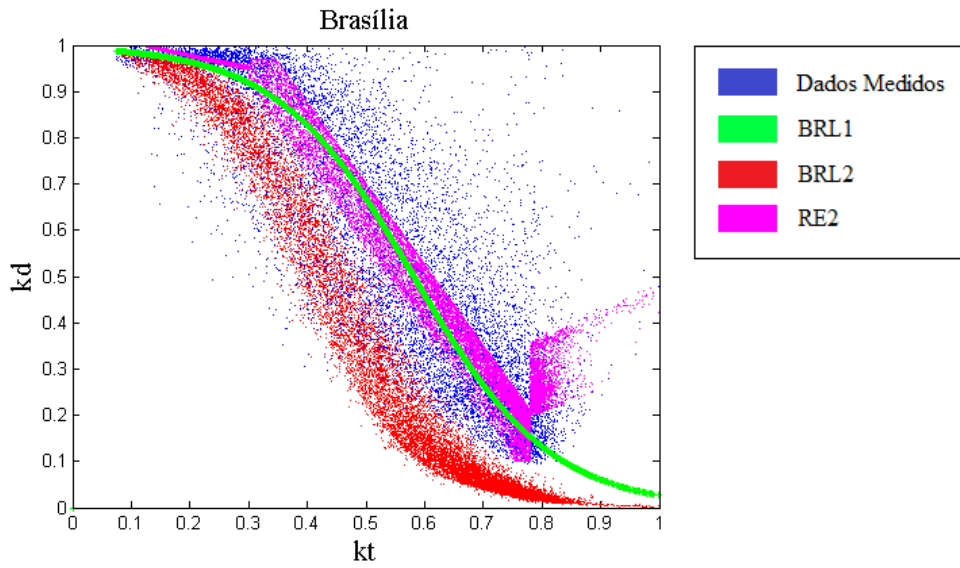


Figura 7 - Sobreposição de dados estimados pelos modelos BRL1, BRL2 e RE2

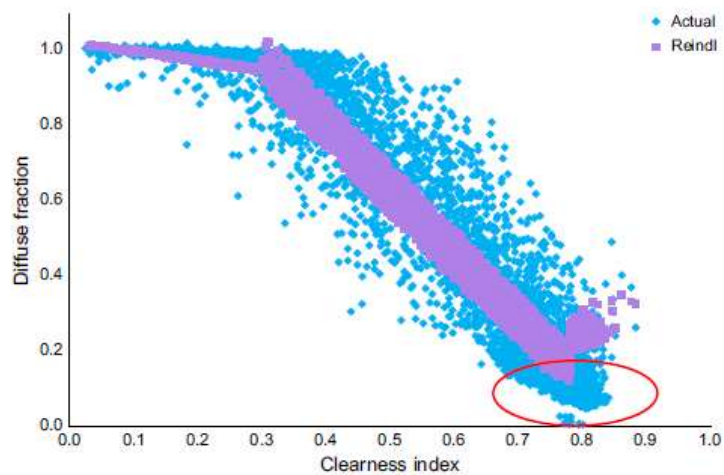


Figura 8 - Sobreposição de dados medidos e de dados estimados pelo modelo RE1 para a cidade de Adelaide (Fonte: Ridley et. at., 2010)

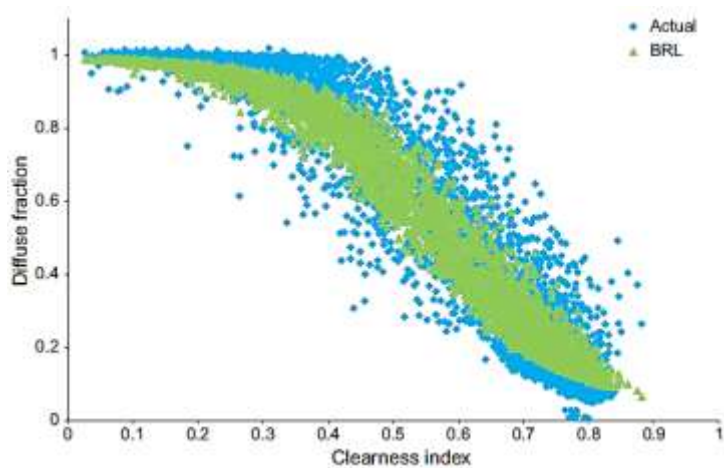


Figura 9 – Sobreposição de dados medidos e de dados estimados pelo modelo BRL2 para a cidade de Adelaide (Fonte: Ridley et. at., 2010)

Agradecimentos

Para a iniciativa da medição de dados de irradiância difusa horizontal e direta normal do projeto SONDA, para o CNPq, financiador deste estudo por meio da concessão de uma bolsa integral de nível mestrado para o primeiro autor deste trabalho e para a instituição UNISINOS, cuja formação dada foi de grande valia para este estudo.

REFERÊNCIAS

- Duffie, J. A.; Beckman, W. A., 2016. Solar Engineering of Thermal Processes, John Wiley & Sons.
- Enerdata. Global Energy Statistical Yearbook. 2017. Disponível em <https://yearbook.enerdata.net/>. Acessado em 22/08/2017.
- Erbs, D. G.; Klein S. A.; Duffie, J. A., 1982. Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation. *Solar Energy*, 28, 293-302.
- Liu, B. Y. H.; Jordan, R. C., 1960. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Solar Energy*, [S.l.], v. 4, p. 1-19.
- Macagnan, M. H., 1993. Caracterización de la radiación solar para aplicaciones fotovoltaicas en el caso de Madrid, Tese de Doutorado, Escola Superior de Engenharia de Telecomunicação, Universidade Politécnica de Madrid, Madrid.
- Orgill, J.F.; Hollands, K. G. T., 1977. Correlation equation for hourly diffuse radiation on a horizontal surface. *Solar Energy* 19, p. 357-359.
- Paulescu E.; Bлага R., 2016. Regression models for hourly diffuse solar radiation. *Solar Energy*, 125, 111-124.
- Reindl, D.T.; Beckman, W. A.; Duffie, J. A., 1990. Diffuse fraction correlations. *Solar Energy*, 45, 1-7.
- Ricieri R. P., Koehler K., Koehler A. C., Souza S. N. M. S., 2002. Modelos de estimativa da radiação difusa diária em Cascavel. *Enc. Energ. Meio Rural An.* 4.
- Ridley B., Boland J., Lauret P., 2010. Modelling of diffuse solar fraction with multiple predictors. *Renewable Energy*, 35, 478-483.
- Skartveit A., Olseth J. A., Tuft M. E., 1998. An hourly diffuse fraction model with correction for variability and surface albedo. *Solar Energy* 63, 173-183.
- Vaughan A. Solar power growth leaps by 50% worldwide thanks to US and China. *The Guardian Solar Power*, 2017. Disponível em: <https://www.theguardian.com/environment/2017/mar/07/solar-power-growth-worldwide-us-china-uk-europe>. Acessado em 22/08/2017.

COMPARISON OF DIFFERENT HOURLY DIFFUSE RADIATION MODELS FROM DATA MEASURED BY THE SONDA NETWORK IN SOME CITIES IN BRAZIL

Abstract. *Solar energy is rising in recent years, both in social acceptance and in installed capacity. Therefore, it's necessary that studies be carried out to evaluate the economic viability and the environmental impact resulting from the production and implantation of power plants, making it necessary to evaluate the availability of each portion of the available solar radiation, either by measurement or by estimates. Some of these portions, such as diffuse and direct irradiance, are difficult to measure, either by the constant need to measure the equipment or by the high price of the same. In cases such as this there is a need for the use of diffuse radiation models to estimate both diffuse irradiance and direct irradiance. The lack of diffuse irradiance data measurement in Brazil was practically null until the creation of the Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (SONDA). Therefore, in this study, a comparison of five time diffuse radiation models obtained by foreign authors from 1977 to 2010 was performed in relation to data measured by SONDA stations in six Brazilian cities whose data were in version 3.3.. The MBEr and RMSEr deviations results demonstrated that in the absence of this radiation portion measurement, the most reliable model for generalization is the one developed by Erbs et. al. (1982). However, the best and worst results for each city differed greatly for each model tested, so if there is availability of measured data over a considerable period of time, there will be a need for testing with this local data. The analysis of models that depend on physical variables showed that they didn't behave properly, indicating that upcoming studies may be based on new paradigms to maintain the simplicity of their models along with the accuracy and precision of their results.*

Key words: *Solar Energy, Radiation Models, Diffuse Radiation.*