

DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO EMPÍRICO DE CÉU CLARO PARA PETROLINA (BRASIL). RESULTADOS PRELIMINARES.

Janis Galdino¹, Pedro Concilio¹, Germán Salazar^{1,2}, Olga de Castro Vilela¹, Naum Fraidenraich¹

¹Universidade Federal de Pernambuco – Departamento de Energia Nuclear – Centro de Energias Renováveis (CER) Av. Prof. Luiz Freire 1000 – 50740.540 – Recife – Pernambuco – Brasil

²Departamento de Física - Facultad de Ciencias Exactas – Universidad Nacional de Salta
Avda. Bolivia 5150 – A4408FVY – Salta Capital Salta - Argentina

email: germansalazar.ar@gmail.com

Recibido 11/09/15, aceptado 14/10/15

RESUMO: En este artículo se desarrolló un modelo empírico de cielo claro para la ciudad de Petrolina (Brasil). Este estudio contribuirá al análisis de la disponibilidad del recurso solar siendo relevante para el proyecto “Central Fotovoltaica da Plataforma Solar de Petrolina”. Los datos solarimétricos usados provienen de una estación de la red SONDA. Se identificaron días de cielo claro o con momentos significativos de cielo claro para 2012 y 2013. Se generó un modelo de cielo claro ajustando la curva de irradiancia solar extraterrestre I_0 , a través de los coeficientes C1 y C2, con la curva de radiación solar global medida hasta conseguir un valor mínimo de RMSE para los momentos de cielo claro. El modelo se validó calculando el RMSE y RMSE% con los valores de irradiancia medidos en 2014. Los valores calculados de RMSE y RMSE% de la validación resultan ser pequeños, mostrando que el modelo propuesto es muy satisfactorio. El coeficiente C1 obtenido tiene un error de dispersión bajo, mientras que la constante C2 presenta una tendencia a descender..

Palavras-chave: céu claro, irradiância solar, Petrolina.

INTRODUÇÃO

A determinação das características de um “dia de céu claro” é importante porque representa o padrão de referência da evolução diária da radiação solar (principalmente a global e a direta normal) quando o dia encontra-se sem nuvens. A principal característica de um modelo de dia de céu claro é a estimação do valor esperado da radiação solar em momento, dia e lugar específicos, sem a atenuação produzida por nuvens. Isto é essencial na determinação dos desvios dos valores medidos com relação aos esperados, sendo a principal causa destes desvios o bloqueio da radiação por nuvens, ainda que a presença de aerossóis atmosféricos e a quantidade de água precipitável também possam ser fatores influentes.

Os modelos de dia de céu claro podem ser empíricos ou físicos (Reno *et al*, 2012), sendo estes últimos muito mais precisos em suas estimações que os primeiros; porém, necessitam de mais variáveis de entrada que os empíricos, que geralmente usam como entrada somente o cosseno do ângulo zenital θ_z , calculado a partir da latitude, longitude, GMT, data e hora locais.

A obtenção de um modelo empírico de dia de céu claro para um local particular a partir de uma amostra representativa de valores de radiação solar medidos é interessante, pois auxilia a separação dos dias claros dos dias nublados/parcialmente nublados, melhorando a análise estatística da radiação solar do lugar em questão. Apesar de o tema parecer trivial, recentemente tem-se publicado trabalhos importantes a respeito (Chauvinet *al*, 2015; Engerer e Mills, 2015; Nou *et al*, 2015; Salazar e Raichijk, 2014; Badescu *et al*, 2013; Dai e Fang, 2014). Ademais, o conhecimento das características da evolução temporal da radiação solar em tempos de integração curtos (1 minuto) é bastante relevante

para a previsão das variações na eficiência de centrais solares térmicas (Rolim *et al.*, 2009) e fotovoltaicas (Engerer e Mills, 2014). A cidade de Petrolina (Estado de Pernambuco, Brasil) foi escolhida para a instalação de uma central solar térmica de 1 MWp para fins de pesquisa e de uma central solar fotovoltaica de 3 MWp - Projeto “Central Fotovoltaica da Plataforma Solar de Petrolina”, este último financiado pela CHESF (Companhia hidroelétrica do Vale do São Francisco) e ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). Levando em consideração que neste local se encontra localizada uma das estações da rede SONDA (Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais) que realiza medições de parâmetros meteorológicos segundo as normas BSRN (www.bsrn.awi.de). A escolha da instalação das usinas solares se deve ao fato deste local possuir boa infraestrutura, grande incidência de raios solares, baixa precipitação e boa disponibilidade de água por conta da proximidade com Rio São Francisco. Portanto, é importante realizar um estudo adequado das características da radiação solar na região, podendo prever a produção de energia e possíveis conflitos de produção e entrega de energia elétrica à rede. O primeiro passo desse estudo é a determinação de um modelo empírico de dia de céu claro que sirva de base para futuras análises de disponibilidade do recurso solar e, principalmente, controle de qualidade dos dados medidos.

DADOS. CARACTERÍSTICAS

Petrolina encontra-se no estado brasileiro de Pernambuco, localizado na região nordeste do país (Fig.1). Suas coordenadas geográficas são Lat -9.39° , Long. -40.5° , altura s.n.m. 387 metros. Os dados são provenientes da estação da rede SONDA localizada em Petrolina (<http://sonda.ccst.inpe.br/basedados/petrolina.html>). Essa estação mede, entre outras variáveis meteorológicas, a irradiância solar direta normal I_{bn} , a irradiância solar global I_{gh} e a irradiância solar difusa I_d . A frequência de registro dos dados é de 1 minuto. A qualidade dos dados utilizados é considerada boa, visto que está filtrada de acordo com o protocolo da BSRN.



Figura 1. Posição de Petrolina no mapa do Brasil.

Como se pode observar a seguir (Tabela 1), o clima em Petrolina é tropical semi-árido, tipo BshW segundo a Classificação de Köppen (Kottek *et al.*, 2006), caracterizado pela escassez e irregularidade das precipitações com chuvas no verão e forte evaporação, como consequência das altas temperaturas. Estas características climáticas fazem com que a disponibilidade solar seja maior que a disponível, em média, para outras localidades no estado, como por exemplo, a cidade de Recife.

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
Temperatura máxima média (°C)	33.7	31.5	33.6	32.1	30.9	30.4	30.5	31.5	32.5	33.8	34	33.8	32.5
Temperatura média (°C)	27.2	26.8	27.1	26.2	25.5	24.5	24.1	24.7	26.2	27.7	28.2	27.6	26.3
Temperatura mínima média (°C)	22.3	22.3	22.2	22	21.1	20.2	19.5	19.7	20.7	22.1	22.7	22.5	21.4
Precipitação (mm)	81.9	105.9	136.3	93.6	21.7	5.1	8.7	2.4	5.6	11.9	53.5	50.8	577.4
Dias com precipitação (= 1 mm)	5	8	7	6	2	2	1	1	1	1	4	5	43
Umidade relativa (%)	58	63	67	70	64	61	60	53	48	48	50	54	58
Horas de sol	238.5	217.4	224.4	217.7	232	221.4	233.5	263.5	263.1	257.5	253.7	237.9	2860.6

Tabela 1. Valores médios das variáveis meteorológicas para Petrolina (INMET).

METODOLOGIA DE ANÁLISE

Como foi mencionado anteriormente, busca-se um modelo empírico de dia de céu claro para Petrolina através de aproximações matemáticas com o uso de variáveis astronômicas, sendo essas, definidas pela posição do sol em relação ao local abordado. A equação escolhida como base é descrita pelo modelo de Meinel e Meinel (1976) em função do índice de claridade K_t e a massa de ar am (Eq. 1). Esta equação foi utilizada também por Forero *et al* (2007) e por Salazar *et al* (2010) para *realização* de estudos das características da transmitância atmosférica como função da altura em relação ao nível do mar.

$$\frac{I_g}{I_0} = C_1^{am} C_2 \quad (1)$$

em que I_g é a irradiância solar global (W/m^2), I_0 é a irradiância solar global extraterrestre (W/m^2), am é a massa de ar corrigida (Kasten e Young, 1989). C_1 e C_2 são as constantes a serem determinadas. Nota-se que o lado esquerdo da Equação 1 representa o índice de claridade K_t .

Para a determinação dos valores de C_1 e C_2 foram utilizados os dados medidos na estação SONDA Petrolina nos anos 2012 e 2013. A única informação analisada nesta etapa foi a irradiância solar global I_g . O procedimento para encontrar os valores dos dois coeficientes foi o seguinte:

- 1) Visualmente, buscam-se os dias de céu claro ou com momentos significativos de céu claro nos anos de 2012 e 2013, que foram separados para análise.
- 2) Calculam-se os valores da irradiância solar extraterrestre I_0 , da massa de ar corrigida am e do ângulo zenital θ_z (e do cosseno θ_z) para cada dado medido e analisado.
- 3) A irradiância solar extraterrestre é ajustada modificando os valores de C_1 e C_2 , da Equação 1, para obter a irradiância solar estimada de modo que, ao aproximar as curvas da irradiância solar medida $I_{g,m}$ e da irradiância solar estimada $I_{g,e}$, obtenha-se o valor mínimo de RMSE somente para os momentos de céu claro. O RMSE é definido pela Equação 2 mostrada abaixo.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_1^N (I_{g,m_i} - I_{g,e_i})^2}{N}} \quad (2)$$

Também é utilizado o RMSE%, que é calculado como demonstrado pela Equação 3.

$$RMSE\% = \frac{RMSE}{\frac{\sum_1^N I_{g,m_i}}{N}} \quad (3)$$

- 4) Para os dias que não são de céu claro completo, o ajuste é feito calculando-se o mínimo valor de RMSE somente para os momentos de céu claro.

Este procedimento para encontrar os valores dos coeficientes C_1 e C_2 já foi utilizado em outros trabalhos (Salazar *et al*, 2010; Salazar *et al*, 2008), obtendo-se valores satisfatórios.

Após serem determinadas, as constantes C_1 e C_2 devem ser validadas. Os dados de irradiância solar global medidos no ano de 2014 foram utilizados como referência para validação. Primeiramente, utilizando os valores das constantes, foi estimado a irradiância solar global, através da Equação 1, para dias de céu claro ou com momentos significativos de céu claro de 2014. Posteriormente, calculou-se os valores de RMSE e RMSE% nos momentos de céu claro entre as irradiâncias solares globais medidas e estimadas para 2014. A determinação desses erros é utilizada como parâmetro para validação do modelo obtido.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2, mostram-se os valores de C_1 e C_2 obtidos de forma a encontrar a melhor correlação entre os valores das irradiâncias solares globais medidas $I_{g,m}$ e estimadas $I_{g,e}$. As partes destacadas em azul

mostram os dias que se caracterizam como dias de céu claro completo, enquanto as outras possuem apenas momentos de céu claro.

Ano	Dia Juliano	C1	C2	Ano	Dia Juliano	C1	C2	
2012	6	0.71	0.29	2013	31	0.71	0.43	
	63	0.732	0.4		32	0.71	0.45	
	64	0.73	0.41		36	0.72	0.42	
	69	0.735	0.43		42	0.72	0.41	
	77	0.72	0.5		54	0.71	0.35	
	118	0.73	0.38		58	0.7	0.38	
	119	0.74	0.45		65	0.71	0.3	
	128	0.742	0.43		91	0.73	0.43	
	133	0.738	0.47		100	0.715	0.34	
	135	0.738	0.45		103	0.72	0.32	
	136	0.738	0.43		149	0.73	0.28	
	148	0.738	0.43		154	0.73	0.39	
	151	0.738	0.41		174	0.74	0.4	
	158	0.74	0.41		178	0.74	0.4	
	160	0.745	0.46		180	0.74	0.39	
	170	0.74	0.48		197	0.74	0.36	
	171	0.738	0.49		202	0.72	0.3	
	172	0.738	0.44		217	0.75	0.42	
	173	0.738	0.42		228	0.74	0.45	
	190	0.74	0.42		246	0.72	0.46	
	194	0.74	0.46		260	0.73	0.33	
	218	0.74	0.37		267	0.725	0.31	
	219	0.733	0.4		268	0.705	0.48	
	221	0.735	0.45		272	0.73	0.31	
	242	0.73	0.49		276	0.72	0.31	
	243	0.73	0.48		277	0.715	0.23	
	256	0.72	0.51		279	0.7	0.28	
	257	0.72	0.48		304	0.71	0.34	
	258	0.725	0.51		313	0.73	0.44	
	266	0.7	0.47		344	0.72	0.27	
	298	0.7	0.34		Média	0.723	0.366	
	299	0.718	0.41		Média C-S	0.725	0.374	
	304	0.73	0.49		2012+2013	Média T	0.726	0.409
	305	0.7	0.5			Média C-S T	0.725	0.421
	325	0.72	0.47			Desvio Padrão	0.013	0.068
349	0.72	0.47						
354	0.72	0.46						
357	0.72	0.46						
Média	0.729	0.443						
Média C-S	0.725	0.4667						

Tabela 2. Valores estimados de C_1 e C_2 para dias de céu claro e dias com momentos importantes de céu claro para os anos de 2012 e 2013 em Petrolina. Estão destacados em azul os dias que são completamente de céu claro.

A decisão de considerar dias com momentos de céu claro foi tomada porque de 730 dias possíveis (365 dias para 2012 e 365 para 2013) apenas 18 dias (2,5 % do espaço amostral) são dias completamente claros. Ao considerar os dias com momentos de céu claro, há um notório aumento na quantidade de dias, 9,2% do espaço amostral, com isso alcançando valores mais concretos e melhores estatísticas no que se refere à obtenção dos valores dos coeficientes.

Considerando os dois anos como apenas um conjunto de dados, o resultado de C_1 é 0.726 ± 0.013 enquanto que para C_2 é 0.409 ± 0.068 . Os valores estão descritos com erros relativos, correspondentes aos desvios padrões dos valores de cada coeficiente. A média C-S (clear-sky ou céu claro) é aquela realizada somente com os dias de céu claro completos.

Na determinação de uma curva de irradiância solar estimada para um dado local, as constantes C_1 e C_2 têm influencia na forma do gráfico. Ao alterar os valores dos coeficientes, notou-se que C_1 interfere no valor máximo da curva de irradiância e é muito mais sensível à mudança de valores que C_2 , que interfere na “largura” da curva estimada.

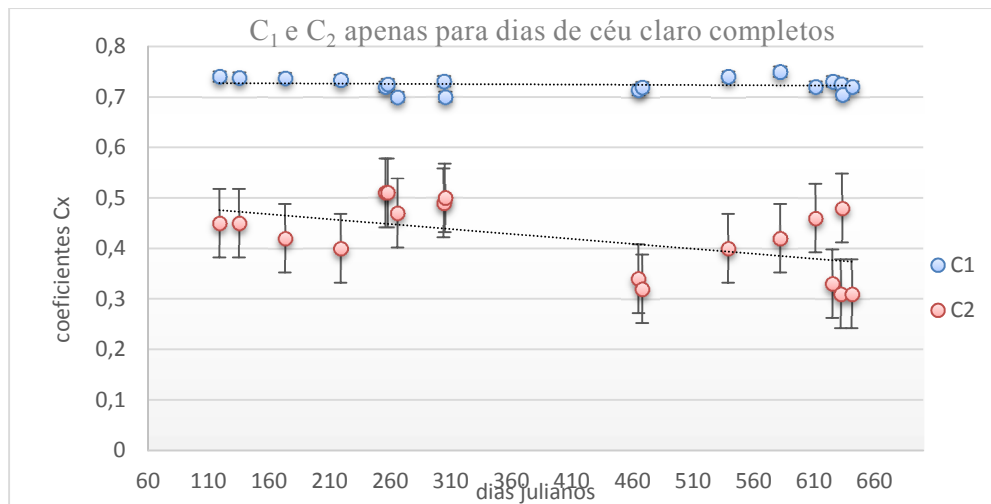


Figura 2. Valores dos coeficientes C_1 e C_2 obtidos para dias de céu claro nos anos de 2012 e 2013.

A Figura 2 mostra o gráfico que contém os valores encontrados para os coeficientes C_1 e C_2 para os dias de céu claro completos. Observa-se que, para os dois anos estudados, os valores obtidos para o coeficiente C_1 apresentam uma linearidade e similaridade, podendo ser bem descritos por uma reta ajustada. Já os valores obtidos para C_2 se apresentam de forma bastante dispersa, numericamente mostrados pelo alto valor de desvio padrão, e demonstram uma tendência a diminuição. Tal fato ainda é incerto, gerando discussões para trabalhos futuros.

Ano	Dia juliano	RMSE	RMSE%	K_c
2014	2	14.38	6.08	0.93
	8	13.74	8.4	0.98
	9	16.22	6.33	0.98
	25	30.89	14.7	0.92
	82	13.36	5.55	0.95
	85	10.83	4.82	0.96
	130	9.7	4.75	0.99
	146	20.93	10.8	1.01
	147	26.89	16.37	1.03
	148	7.47	3.72	1.01
	154	10.46	5.82	1
	155	7.24	3.69	1.01
	182	17.61	9.11	1
	191	15.73	8.29	1.01
	217	11.73	6.69	0.99
	223	22.71	13.87	1.02
	236	13.48	6.61	1
	240	15.99	7.42	0.96
	245	19.73	8.11	1.02
	258	22.79	10.07	1.03
	264	14.24	5.55	1
	270	6.45	2.44	1
	288	10.89	4.51	0.95
300	10.39	3.78	0.99	
312	18.17	8.16	0.96	
331	13.75	5.05	1	
334	20.73	9.34	1.04	
363	6.89	3.32	0.99	
	Média	15.12	7.26	0.99
	Média C-S	15.64	7.34	1.01

Tabela 3. Valores de RMSE e RMSE% obtidos na validação, e o índice de claridade referente a céu claro (k_c) para os dias de céu claro ou com momentos importantes de céu claro em Petrolina em 2014. Estão destacados em azul os dias que são completamente de céu claro.

De posse dos valores de C_1 e C_2 , são estimados os valores de irradiância global para dias de céu claro ou com momentos significativos de céu claro observados no ano 2014 para Petrolina, ou seja, são validados os valores obtidos dos coeficientes C_1 e C_2 . Os resultados são mostrados na Tabela 3.

O índice de claridade (k_c) mostrado na tabela refere-se à relação entre a irradiância global e ao valor correspondente no modelo de céu claro. Pode-se observar que o valor do erro RMSE médio entre os valores medidos e os estimados de irradiância solar global é de 15 W/m^2 para um dia de céu claro. Isto representa um valor de RMSE percentual de 7,26%, que é um valor satisfatório visto que é menor que 10%, sendo inferior ao erro da maioria dos solarímetros.

Na Figura 3 são mostrados os gráficos das irradiâncias solares globais I_g medidas e estimadas para seis dias do ano de 2014. As figuras 3 (a), 3 (b) e 3 (e) correspondem a dias com apenas momentos de céu claro, enquanto os outros dispostos correspondem a dias de céu claro completo. Como se pode observar, o modelo utilizado descreve muito bem irradiância solar para o dado local, como se mostra no exemplo do dia de céu claro de 26 de maio de 2014 (Fig. 3 (c)) em que as curvas das irradiâncias solares estimadas e medidas são praticamente idênticas. Tal semelhança também pode ser observada nos momentos de céu claro dos dias demonstrados.

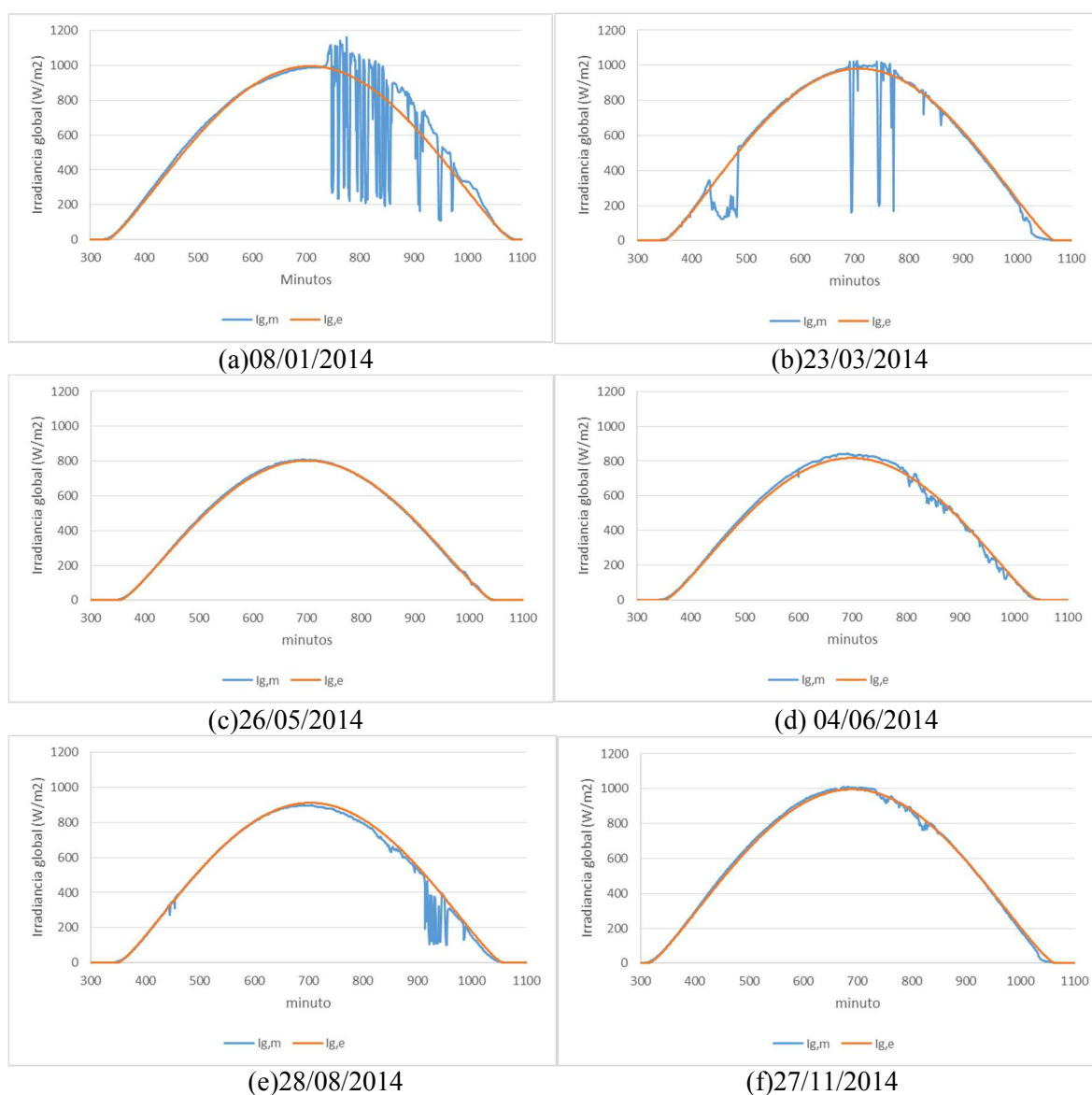


Figura 3. Comparação dos valores medidos e estimados da irradiância solar global para a cidade de Petrolina. Para as datas (a) 08/01/2014; (b) 23/03/2014; (c) 26/05/2014; (d) 04/06/2014; (e) 28/08/2014 e (f) 27/11/2014.

CONCLUSÃO

A obtenção do modelo de céu claro se mostra um tópico importante, podendo ser aplicado em diversas áreas, como o controle de qualidade de dados solarimétricos, e propiciar um estudo mais profundo da radiação de um determinado local.

Para desenvolver o modelo de céu claro, foram determinados dois coeficientes, C_1 e C_2 , que ajustam a curva da irradiância solar extraterrestre para se obter a irradiância solar global estimada.

Nos resultados, pode-se observar que o coeficiente C_1 possui um valor baixo de desvio padrão associado, mostrando valores similares ao longo dos dois anos e com uma linearidade que pode ser observada na Figura 2. O valor médio encontrado para este coeficiente está em torno do que era esperado. Já o coeficiente C_2 apresentou um alto valor de desvio padrão associado, o que o torna disperso, e, além disso, mostrou uma tendência a diminuir. A razão de tal acontecimento ainda é incerta, o que a torna uma interessante discussão para futuros estudos.

Neste trabalho, o método de verificação da validade do modelo de céu claro está ligada ao erro RMSE calculado em relação a o ano 2014. Foi obtido o valor de RMSE percentual de 7,26%, o que é um valor aceitável, tornando o modelo desenvolvido satisfatório. Pode-se observar na Figura 3 que o modelo de céu claro desenvolvido representou bem os dias de céu claro do ano de 2014, reafirmando a sua validade.

AGRADECIMIENTOS:

Los autores quieren agradecer a la CAPES por la bolsa BJT 88881.067984/2014-01 que financia el proyecto “Análise da influência da radiação solar direta normal e das propriedades óticas e geométricas de coletores na produção de energia elétrica de uma usina solar termoeletrica com concentradores de foco linear”

REFERÊNCIAS

- Badescu V, Gueymard C, Cheval S, Oprea C, Baciu M, Dumitrescu A, Iacobescu F, Milos I, Rada C (2013) “Accuracy analysis for fifty-four clear-sky solar radiation models using routine hourly global irradiance measurements in Romania”. *Renewable Energy* 55. pp 85-103.
- Chauvin R, Nou J, Thil S, Grieu S (2015) “Modelling the clear-sky intensity distribution using a sky imager”. *Solar Energy* 119. pp 1-17.
- Dai Q e Fang X (2014) “A new model for atmospheric radiation under clear sky condition at various altitudes”. *Advances in Space Research* 54(6). pp 1044-1048
- Engerer Ny Mills F (2014) “KPV: A clear-sky index for photovoltaics”. *Solar Energy* 105. Pp 679-693
- Engerer N e Mills F (2015) “Validating nine clear sky radiation models in Australia”. *Solar Energy* 120. pp 9-24.
- Forero N, Caicedo L, Gordillo G (2007) “Correlation of global solar radiation values estimated and measured on an inclined surface for clear days in Bogotá”. *Renewable Energy* 32(15). Pp 2590-2602.
- Kasten F e Young T (1989) “Revised optical air mass tables and approximation formula”. *Applied optics* 28. Pp 4735-4538.
- Kottek, M., J. Grieser, C. Beck, B. Rudolf, and F. Rubel (2006). *World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated*. *Meteorol. Z.*, 15, pp. 259-263.
- Meinel A. e Meinel M. (1976) “Applied solar energy”. Reading, MA: Addison-Wesley Publishing Co.
- Nou J, Chauvin R, Thil S, Eynard J, Grieu S (2015) “Clear-sky Irradiance Model for Real-time Sky Imager Application”. *Energy Procedia* 69. pp 1999-2008.
- Reno M, Hansen C, J. Stein (2012) “Global Horizontal Irradiance Clear Sky Models: Implementation and Analysis”. SANDIA Report SAND2012-2389. Disponível em: http://energy.sandia.gov/wp-content/gallery/uploads/SAND2012-2389_ClearSky_final.pdf
- Rolim M, Fraidenraich N, Tiba C (2009) “Analytic modeling of a solar power plant with parabolic linear collectors”. *Solar Energy* 83(1). pp. 126–133.
- Salazar G e Raichijk C (2014) “Evaluation of clear-sky conditions in high altitude sites”. *Renewable Energy* 64. pp 197-202.

Salazar G, Cadena C, Hernández A, Saravia L, Romero G (2008) “Modelo para estimar irradiancia e irradiación solar para día claro utilizando como parámetro variable la altura sobre el nivel del mar. Planteo y primeros resultados”. *Averma* 12. Pp 11.49-11.55. Disponible en <http://www.cricyt.edu.ar/asades/averma.php>

Salazar G, Hernández A, Saravia L (2010) “Practical models to estimate horizontal irradiance in clear sky conditions: Preliminary results”. *Renewable Energy* 35(11).pp 2452-2460.

ABSTRACT

In this paper, an empirical clear sky model for the city of Petrolina was developed, contributing in the solar resource availability analysis, which is relevant to the projects of a thermal solar power plant and a photovoltaic power plant projected to be installed in Petrolina. SONDA station provided the solarimetric data. Days of clear sky or with significant clear sky moments for 2012 and 2013 were identified. The clear sky model were created by adjusting the extraterrestrial solar irradiance curve, using C_1 and C_2 coefficients, to the global solar irradiance data curve until minimum RMSE values for clear sky moments were reached. The validation was made by calculating the RMSE and RMSE% with solar irradiance data for 2014.

The errors values in the validation were small, making the model satisfactory. The C_1 coefficient obtained an expected value and low standard deviation. The constant C_2 had a higher dispersion, shown a decreasing tendency, which can be addressed in future studies.

Keywords: clear sky, solar irradiance, Petrolina.