

ESTUDO DA RADIAÇÃO SOLAR DA CIDADE DE PETROLINA ATRAVÉS DE UM MODELO EMPÍRICO DE CÉU CLARO

Janis Joplim Bezerra Galdino – janisgaldino@gmail.com

Pedro Henrique Concílio Coimbra de Albuquerque – pedroconcilio@gmail.com

Germán Ariel Salazar – germansalazar.ar@gmail.com

Olga de Castro Vilela – ocv@ufpe.com.br

Naum Fraidenraich – naumfraiden2@gmail.com

Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Energia Nuclear; Centro de Energias Renováveis

Resumo. Neste artigo, foi realizado um estudo das características do recurso solar para cidade de Petrolina (PE) através da análise da quantidade de dias de céu claro, sendo relevante para projetos de instalação de usinas de energia solar térmica ou fotovoltaica. Os dados solarimétricos utilizados foram provenientes da estação SONDA. Determinou-se um modelo empírico de céu claro para região de modo a ajustar as curvas de irradiância global medida e estimada. Com os valores de irradiância global estimada, foi calculado, para todos os dias da base de dados, o valor de uma constante K_c que é dado pela razão entre as irradiâncias globais medida e estimada de céu claro. Foi definido que dias com o K_c maior que 0,94 podem ser considerados como dias de céu claro. Posteriormente, calculou-se as distribuições mensal e anual dos valores de K_c baseado na frequência dos valores desta constante. Procedimento semelhante também foi feito para Recife (PE). Dispondo dos gráficos da distribuição anual do K_c , foram comparados os valores obtidos para Recife e Petrolina, em que se observou que a cidade de Petrolina dispõe de uma quantidade maior de dias de céu claro, decorrente da característica climática da região.

Palavras-chave: Radiação Solar, Petrolina, Céu Claro.

1. INTRODUÇÃO

A cidade de Petrolina localizada no estado de Pernambuco, no Brasil, foi escolhida para a instalação de centrais solares dentro do Projeto “Central Fotovoltaica da Plataforma Solar de Petrolina” financiado pela CHESF (Companhia hidroelétrica do Vale do São Francisco) e ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). A instalação da usina solar neste local se deve ao fato da cidade possuir boa infraestrutura, grande disponibilidade de recurso solar, baixa precipitação e boa disponibilidade de água por conta da proximidade com Rio São Francisco. A cidade de Petrolina conta ainda com uma das estações da rede SONDA (Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais) que realiza medições de parâmetros meteorológicos segundo as normas da Baseline Solar Radiation Network ou BSRN (www.bsrn.awi.de). Portanto, ela se mostra um importante lugar para se realizar estudos solarimétricos, já que será relevante analisar as características da radiação solar nesta região para prever a produção de energia e possíveis conflitos de produção e entrega de energia elétrica a rede.

Um dia de céu claro representa o padrão de referência da evolução diária da radiação solar (principalmente a global e a direta normal) quando o dia se encontra sem nuvens. A partir de um modelo de céu claro, é possível estimar o valor esperado da radiação solar em momento, dia e lugar específicos, sem a atenuação produzida por nuvens. Com isso, pode-se também determinar os desvios dos valores medidos com relação aos esperados, causados principalmente pelo 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). A vantagem dos modelos físicos é a precisão em suas estimativas; porém, eles necessitam de mais variáveis de entrada que os modelos empíricos, que geralmente usam como entrada somente o cosseno do ângulo zenital θ_z , calculado a partir de parâmetros facilmente encontrados como a latitude, longitude, GMT, data e hora locais.

Um modelo empírico de céu claro é obtido através de uma amostra representativa de pelo menos dois anos de valores de radiação solar medidos. A partir dele, pode-se classificar os dias em céu claro, nublados e parcialmente nublados e, com isso, melhorar a estatística da radiação solar para o local estudado pela frequência de dias de céu claro. A análise da frequência da quantidade de dias de céu claro pode mostrar características interessantes da radiação solar do local. Portanto, a obtenção de um modelo de céu claro é importante para a caracterização da radiação solar na região.

Apesar de o tema parecer trivial, recentemente tem-se publicado trabalhos importantes a respeito (Chauvin et 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).

2. METODOLOGIA

2.1 Caracterização dos dados

Petrolina encontra-se no estado brasileiro de Pernambuco, localizado na região nordeste do país (Fig. 1). Suas coordenadas geográficas são Latitude 9.39° Sul, Longitude 40.5° Oeste, altitude s.n.m. de 387 metros.



Figura 1 - Posição de Petrolina no mapa do Brasil.

O clima em Petrolina é tropical semi-árido, tipo BSh segundo a Classificação de Köppen. A classificação climática de Köppen é uma classificação do clima de mundo que identifica cada tipo de clima, com uma série de letras que indicam o comportamento da temperatura e precipitação que caracterizam este tipo de clima. A primeira letra indica que o tipo de temperatura e o segundo indica o tipo de umidade. Assim, o clima em Petrolina é 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 nos valores médios para outras regiões, como, por exemplo, Recife.

Os dados são provenientes da estação da rede SONDA localizada em Petrolina (<http://sonda.ccst.inpe.br/basedados/petrolina.html>). Esta estação mede, entre outras variáveis meteorológicas, a irradiância solar direta normal I_{bn} , a irradiância solar global I_{gh} , irradiância solar difusa I_d , a temperatura e a umidade relativa do ar. A frequência de registro dos dados é de 1 minuto. A qualidade dos dados utilizados é muito boa, visto que está filtrada de acordo com o protocolo da BSRN.

A base de dados é formada por 10 anos de medidas (2004-2014), porém existem dias sem informações. Portanto, foi realizada uma análise da disponibilidade de dados. Para este trabalho, foram utilizados os valores medidos da irradiância solar global.

2.2 Obtenção do modelo empírico de dia de céu claro

Para se determinar o modelo empírico de dia de céu claro para Petrolina, utilizou-se como base a equação descrita pelo modelo de Meinel e Meinel (1976) que é dada em função do índice de claridade K_t e a massa de ar am na Eq.(1). Esta equação foi utilizada também por Forero et al. (2007) e por Salazar et al. (2010) para realização de estudos nas 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), dada pela Eq. (2), em que θ_z é o ângulo zenital. C_1 e C_2 são as constantes a serem determinadas de acordo com o local. Nota-se que o lado esquerdo da Eq. (1) representa o índice de claridade K_t .

$$AM_K = \frac{1}{(\cos \theta_z + 0.15 \times (93.885 - \theta_z)^{-1.253})} \quad (2)$$

Os valores de C_1 e C_2 foram obtidos através dos dados medidos de irradiância global I_g na estação SONDA Petrolina nos anos 2012 e 2013. O procedimento para encontrar os valores dos dois coeficientes foi o seguinte:

1) Visualmente, buscaram-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 analisado.

3) A irradiância solar extraterrestre é ajustada modificando os valores de C_1 e C_2 , da Eq. (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 Eq. (3).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_1^N (I_{g,m_i} - I_{g,e_i})^2}{N}} \quad (3)$$

Também é utilizado o RMSE%, que é calculado como demonstrado pela Eq. (4).

$$RMSE\% = \frac{RMSE}{\frac{\sum_1^N I_{g,m_i}}{N}} \quad (4)$$

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. Portanto, todos os dados em que havia grande discrepância entre os valores medidos e estimados não foram utilizados para este cálculo.

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 valores bastante 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 Eq. (1), para dias de céu claro ou com momentos significativos de céu claro de 2014. Posteriormente, calcularam-se os valores de RMSE e RMSE% nos momentos de céu claro entre as irradiações solares globais medidas e estimadas para 2014. A determinação desses erros é utilizada como parâmetro para validação do modelo obtido.

2.3 Cálculo da frequência da quantidade de dias de céu claro

De posse dos valores das constantes C_1 e C_2 , utilizou-se o modelo para calcular o valor da irradiância global estimada $I_{g,e}$ para toda base de dados e, então, calculou-se o valor da razão entre as irradiações globais diárias medida $H_{g,m}$ e estimada para céu claro $H_{g,cc}$ para todos os dias disponíveis. Denominou-se essa razão de índice de céu claro K_c .

Os valores de K_c foram divididos em vários intervalos entre 0 e 1,1 espaçados igualmente de 0,1 para calcular a frequência dos dias que atingiram o valor do K_c em cada intervalo. Após isto, analisou-se a distribuição do K_c para Petrolina.

Os dias foram, então, classificados em céu claro, parcialmente nublado e nublado de acordo com os valores de K_c obtidos. Dias com $K_c > 0,94$ foram considerados céu claro; K_c entre 0,3 e 0,94, dias parcialmente nublados; e $K_c < 0,3$, dias nublados. Esta forma de classificação para dias de céu claro foi escolhida pois a irradiação global estimada é calculada através de um modelo matemático empírico que possui erros associados.

2.4 Estudo da disponibilidade do recurso solar para Recife como método de comparação

Recife, capital do estado de Pernambuco, também foi utilizada como objeto de estudo para este trabalho. O clima da região de acordo com a classificação de Koppen é Ams, caracterizado por altas temperaturas e um alto regime de precipitações. Devido aos diferentes regimes pluviométricos, a cidade foi escolhida como base de comparação em relação à frequência de dias de céu claro em Petrolina.

Os dados de irradiância global de Recife foram provenientes da estação do Grupo de Pesquisa em Fontes Alternativas de Energia (FAE) do Centro de Energias Renováveis (CER) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). A partir desta base de dados, utilizou-se as medições de irradiância global para os anos de 2013 e 2014 para desenvolver um modelo empírico de céu claro e, posteriormente, calcular a distribuição do coeficiente K_c para Recife de modo semelhante ao que foi realizado em Petrolina para servir como comparativo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Disponibilidade de dados em Petrolina

A base de dados possui uma vasta quantidade de informações a serem estudadas. No gráfico mostrado na Fig. 2 pode-se observar a porcentagem de dados disponíveis para estudo para cada ano entre 2004 e 2014 em Petrolina. Como visto no gráfico, a base de dados entre 2009 e 2014 encontra-se praticamente completa, sendo isso um fator determinante para um bom estudo do recurso solar. Na Fig. 3 é exibido o gráfico da porcentagem de dados disponíveis para cada mês.

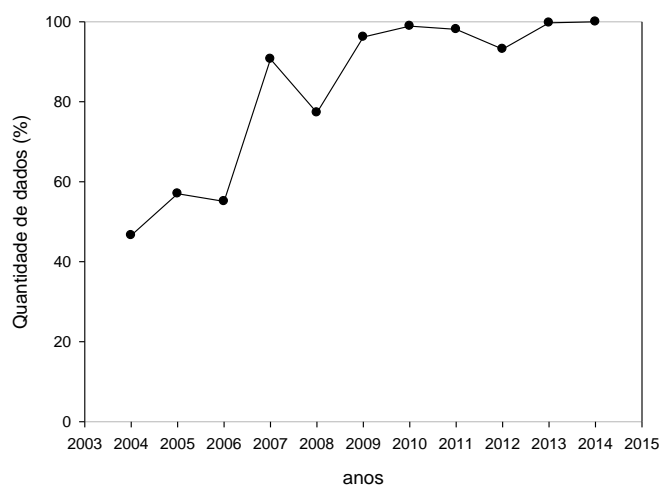


Figura 2 - Porcentagem de dados disponíveis para estudo para cada ano da base de dados.

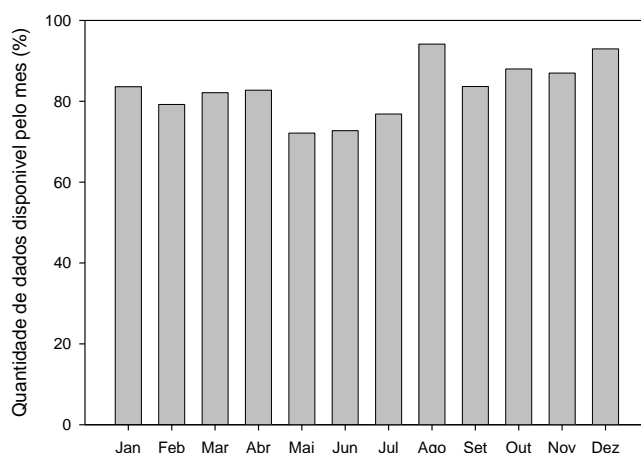


Figura 3 - Porcentagem de dados disponíveis para estudo por mês.

3.2 Modelo de céu claro para Petrolina

O resultado de C_1 é $0,726 \pm 0,013$ enquanto que para C_2 é $0,409 \pm 0,068$. Os valores estão descritos com erros relativos, correspondentes aos desvios padrões dos valores de cada coeficiente.

Dispondo dos valores dos coeficientes, a equação obtida para estimação do modelo de céu claro para Petrolina, através do modelo empírico, é a descrita na Eq. 5.

$$\frac{I_g}{I_0} = 0,726am^{0,409} \quad (5)$$

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.

O valor encontrado para o RMSE percentual foi de 7,26%, que é erro aceitável visto que é menor que 10% (Salazar et al, 2015), e mostra que o modelo obtido é satisfatório.

3.3 Distribuição do K_c

As Fig. 4, Fig. 5 e Fig.6 mostram as distribuições mensais do K_c para Petrolina.

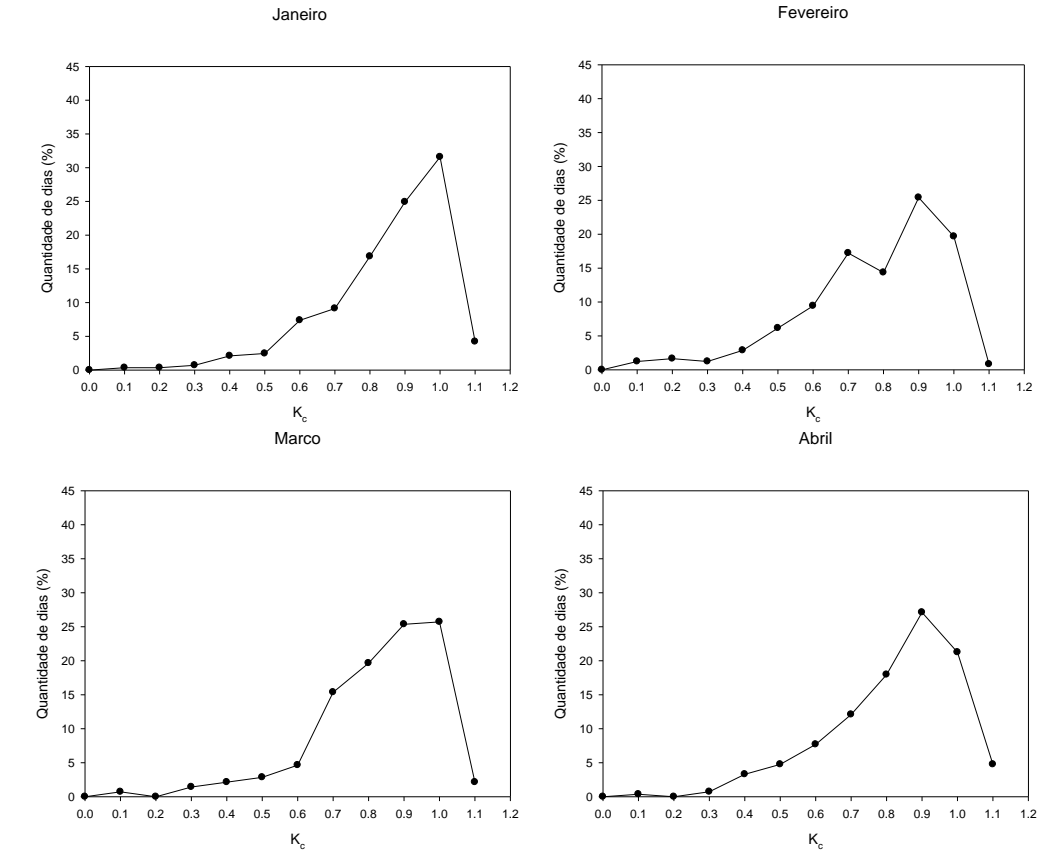


Figura 4 - Distribuição dos valores de K_c para cada mês. Primeiro quadrimestre.

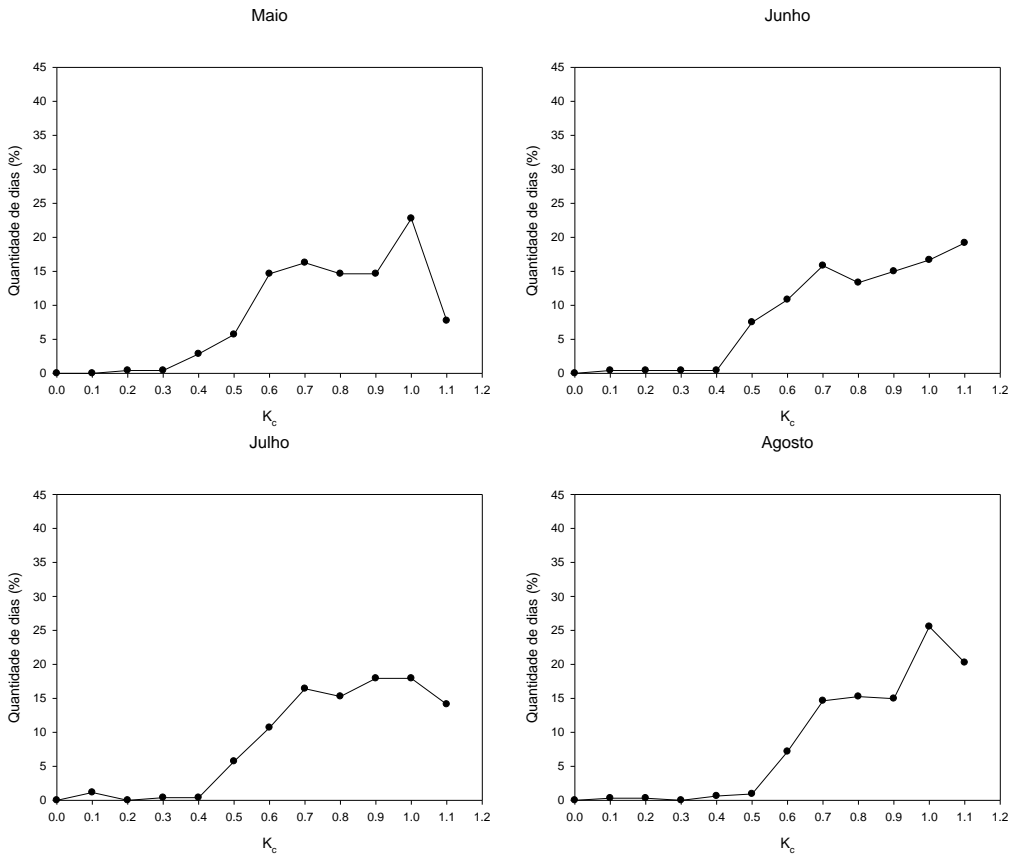


Figura 5 - Distribuição dos valores de K_c para cada mês. Segundo quadrimestre.

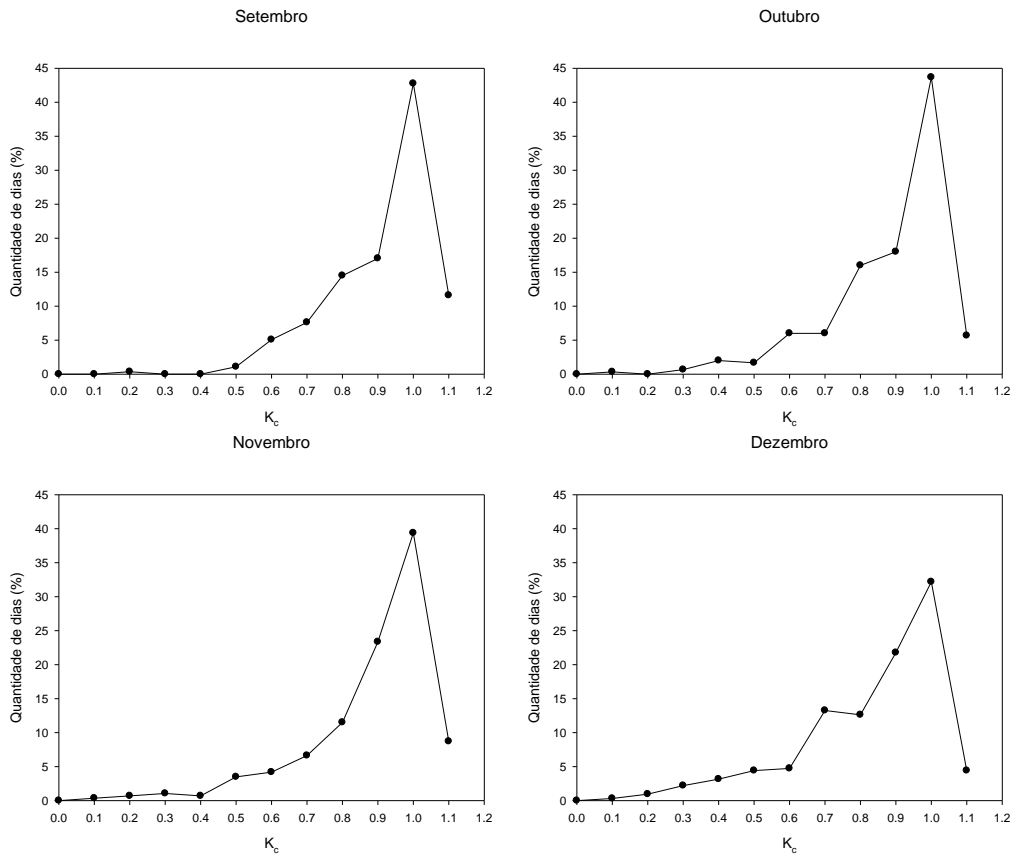


Figura 6 - Distribuição dos valores de K_c para cada mês. Terceiro quadrimestre.

Pode-se observar através das Fig. 4, Fig.5 e Fig.6 que, para a maioria dos meses, o valor mais recorrente do K_c está em torno de 1, indicando que há, de acordo com a classificação utilizada neste estudo, muitos dias de céu claro. Setembro, outubro e novembro são os meses com maior quantidade de dias de céu claro, apresentando por volta de 40% dos seus dias com K_c em torno de 1. Julho e junho foram os meses com menor quantidade de dias de céu claro com menos de 20% dos seus dias com K_c em torno de 1.

A Fig. 7 mostra a distribuição anual do K_c para a cidade de Petrolina.

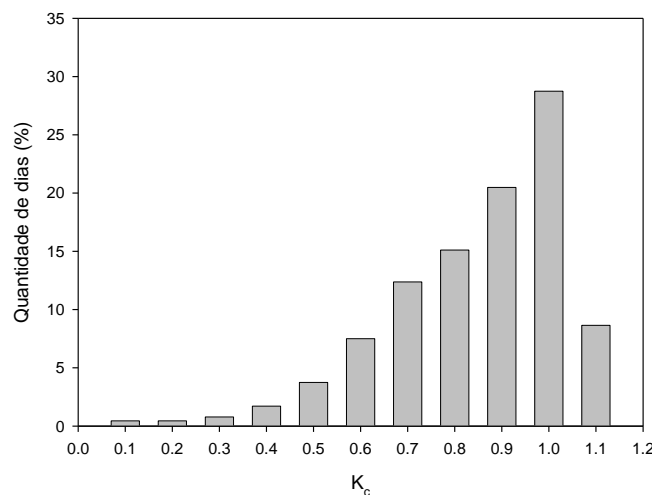


Figura 7 - Distribuição dos valores de K_c para Petrolina ao longo de um ano médio.

Como se pode observar no gráfico da distribuição anual dos valores de K_c para Petrolina (Fig. 7), há uma concentração de dias de céu claro, visto que os valores 1 e 1,1 de K_c se apresentam com grande frequência na base de dados estudada. Ademais, pode-se notar uma grande quantidade de dias adotados como parcialmente nublados (com valor de K_c entre 0,3 e 0,94) e uma baixíssima concentração de dias completamente nublados (valores de K_c menores que 0,3).

3.4 Estudo da distribuição de dias de céu claro para Recife

Utilizando o mesmo modelo empírico de céu claro obteve-se a equação que estima a irradiância solar global para Recife a partir dos coeficientes C1 e C2, descrita pela Eq. 6.

$$\frac{I_g}{I_0} = 0,76^{am^{0,5}} \quad (6)$$

A distribuição anual dos valores de K_c para Recife é mostrada na Fig. 8.

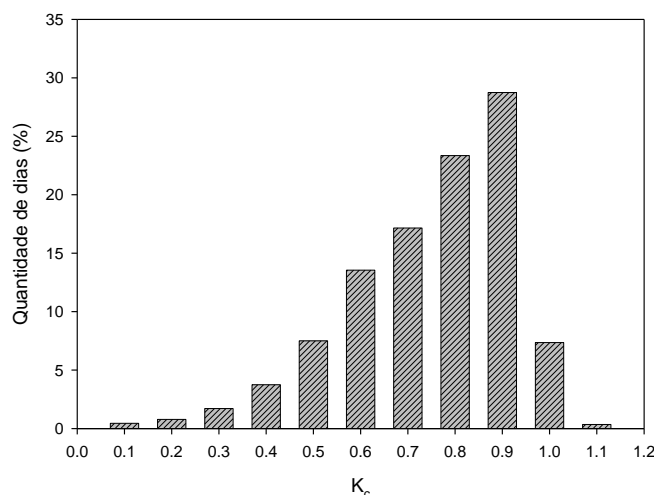


Figura 8 - Distribuição anual dos valores de K_c para Recife.

Como se pode observar, o gráfico da distribuição dos valores de K_c para Recife (Fig. 8) apresenta um percentual bem menor de dias com valor de K_c entre 1 e 1,1, dias definidos como de céu claro que quando comparado com Petrolina. A base de dados de Recife demonstra em sua maioria dias parcialmente nublados (K_c entre 0,3 e 0,94) e poucos dias totalmente nublados.

O aparecimento de mais dias de céu claro para Petrolina já era esperado, visto que a região na qual a cidade está localizada possui clima tropical semi-árido, tipo Bsh segundo a Classificação de Köppen, sendo caracterizado pela escassez e irregularidade das precipitações com chuvas no verão e forte evaporação, como consequência das altas temperaturas, se mostrando uma região bastante propícia a geração de energia solar. Já Recife possui um regime de chuvas mais rigoroso, com isso possuindo dias com nebulosidade maior e menores valores de K_c .

4. CONCLUSÃO

A classificação dos dias em céu claro, parcialmente nublado e nublado foi feita através da análise da razão entre as irradiâncias globais medida e estimada pelo modelo empírico de céu claro (coeficiente K_c).

Para ser classificado como céu claro, o dia deveria ter K_c igual a 1. Porém, em vez disso, foi utilizada uma faixa de valores ($K_c > 0,94$) pois a irradiância global estimada foi calculada através de um modelo matemático empírico que apresenta erros associados.

Através gráficos de distribuição mensal do K_c para Petrolina, pode-se ver que todos os meses apresentam uma boa quantidade de céu claro, sendo a maioria dos dias céu claro ou parcialmente nublado, e setembro e outubro os meses com a quantidade maior de dias de céu claro.

A distribuição anual do K_c para Petrolina confirma o que foi observado para a distribuição mensal. Há uma grande quantidade de dias de céu claro e parcialmente nublados e poucos dias completamente nublados na cidade, devido ao clima com escassez de chuvas. Comparando com a distribuição anual do K_c para Recife, pode-se observar que Recife possui menos dias de céu claro e mais parcialmente nublados por ter um regime de chuvas maior.

A obtenção do modelo de céu claro é importante pois pode ser aplicado em diversas áreas, como o controle de qualidade de dados solarimétricos. A análise da quantidade de dias de céu claro ajuda na caracterização da radiação solar de um determinado local propiciando um estudo solarimétrico mais profundo.

Agradecimentos

À Universidade Federal de Pernambuco e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoa de Nível Superior (CAPES), pelo auxílio financeiro por meio de Projeto BJT - Processo: 88881.067984/2014-01.

À Prof. Dra. Olga Vilela e ao Prof. Dr. Germán Salazar, pelo suporte, orientação e confiança durante toda a realização deste projeto.

REFERÊNCIAS

- Badescu, V., Gueymard, C., Cheval, S., Oprea, C., Baciú, 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*, vol. 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*, vol. 119, pp. 1-17.
- Dai, Q., Fang, X., 2014. A new model for atmospheric radiation under clear sky condition at various altitudes, *Advances in Space Research*, vol. 54(6), pp. 1044-1048.
- Engerer, N., Mills, F., 2014. KPV: A clear-sky index for photovoltaics, *Solar Energy*, vol. 105, pp. 679-693.
- Engerer, N., Mills, F., 2015. Validating nine clear sky radiation models in Australia, *Solar Energy*, vol. 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*, vol. 32(15), pp. 2590-2602.
- Kasten, F., Young, T., 1989. Revised optical air mass tables and approximation formula, *Applied Optics*, vol. 28, pp. 4735-4538.
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., Rubel, F., 2006. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated, *Meteorol. Z.*, vol. 15, pp. 259-263.
- Meinel, A., 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*, vol. 69, pp. 1999-2008.
- Reno, M., Hansen, C., Stein, J., 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*, vol. 83(1), pp. 126-133.
- Salazar, G., Raichijk, C., 2014. Evaluation of clear-sky conditions in high altitude sites. *Renewable Energy*, vol. 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 parâmetro variable la altura sobre el nivel del mar. Planteo y primeros resultados, *Averma*, vol. 12, pp. 11.49-11.55. Disponível em: <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*, vol. 35(11), pp. 2452-2460.
- Salazar, G., Checua Diaz, M., Denegri, M., Tiba, C., 2015. Identification of potential areas to achieve stable energy production using the SWERA database: A case study of northern Chile, *Renewable Energy*, vol. 77, pp. 208-216.

A STUDY OF THE SOLAR RADIATION IN THE CITY OF PETROLINA USING AN EMPIRICAL CLEAR SKY DAY MODEL

Abstract. *In this paper, a study of the solar resource characteristics in the city of Petrolina was made using an analysis of the quantity of clear sky days, which is relevant for projects of thermal or photovoltaic solar power plants. SONDA station provided the solarimetric data. An empirical clear sky model for the region was developed by adjusting the extraterrestrial solar irradiance curve to the global solar irradiance data curve. Using the values of the estimated global solar irradiance, for all days of the database, the value of a constant K_c , which represents the relation between the global solar irradiance data and the estimated solar irradiance for clear sky. It was assumed that days with K_c higher than 0.94 should be considered as clear sky days. Subsequently, the monthly and annual distribution of the values of K_c was determined based on the frequency of the values of this constant. A similar method was utilized for the city of Recife. With the annual distribution of K_c for Recife and Petrolina, comparisons was made between these cities and it can be seen that the city of Petrolina has a higher quantity of clear sky days due to its climate characteristics of low precipitation.*

Key words: *Solar Radiation, Petrolina, Clear Sky.*