

PROGRAMA PARA O CÁLCULO DE RADIAÇÃO SOLAR: SIMULAÇÕES E ANÁLISE CONJUNTA COM DADOS MEDIDOS

Licinius Dimitri Sá de Alcantara – licinius@ufra.edu.br
Universidade Federal Rural da Amazônia, Instituto Ciberespacial
Mayara Soares Campos – msc.campos@outlook.com
Universidade Federal do Pará, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais

Resumo. *Este trabalho apresenta um programa computacional desenvolvido pelos autores para o cálculo da variação de radiação solar durante o ano em localidade terrestre arbitrária. São apresentados resultados simulados para Belém/PA. Foram feitas comparações com dados medidos de radiação, disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), os quais levam em conta efeitos momentâneos de céu encoberto. A análise conjunta dos resultados simulados e medidos permitem estimar a perda local de energia solar incidente durante o ano devido à nebulosidade. Os resultados medidos de radiação são referentes ao ano de 2014. A partir da análise conjunta de dados simulados e medidos, foi avaliada a capacidade de incidência de energia solar no local durante o ano, onde foi possível perceber uma correlação do período de menor nebulosidade com a elevação no índice de radiação medido, permitindo identificar períodos que favorecem um maior provimento de energia elétrica através de painéis fotovoltaicos.*

Palavras-chave: *Radiação Solar, Elaboração de Algoritmos, Simulações e Medidas*

1. INTRODUÇÃO

A importância do aproveitamento e exploração racional da radiação solar deve-se, ao fato de ela ser limpa, inesgotável e gratuita, ao ponto de tornar o Sol o futuro da energia, uma vez que há uma preocupação com a escassez das fontes de energia convencionais como do potencial hídrico e petróleo. Pensando nisso, as maiores potências econômicas mundiais (Estados Unidos, Alemanha, Itália, Japão, China, etc.) já investem para aproveitar o sol como fonte de energia (CRESESB, 2014). A energia solar torna-se assim, uma alternativa ao abastecimento energético no futuro. E, essa alternativa se torna viável através da disseminação e viabilização econômica do uso de painéis de células fotovoltaicas, que convertem a luz solar em eletricidade.

Porém, a forma geométrica e a inclinação da terra fazem com que a radiação solar incida em cada local de forma distinta, por conta disso a melhor captação do nível de insolação incidente em uma localidade será melhor quanto mais próximo à linha do equador for, pois não haverá grande variação da duração de horas de brilho solar, essa incidência de luz também dependerá da latitude local e do instante de tempo (dia do ano e horário do dia) (GREENPRO, 2004). Mas, estima-se que mesmo assim, que a energia solar incidente sobre a superfície terrestre seja da ordem de 10 mil vezes o consumo energético mundial (CRESESB, 2014). Por isso, torna-se vantajoso utilizá-la de forma complementar, para atender a demanda de energia elétrica. Adicionalmente, a posição angular do Sol em relação ao plano dos painéis fotovoltaicos (a qual afeta a densidade de radiação solar incidente neste plano), também influencia na eficiência de geração de eletricidade dos mesmos, de modo que é preciso aproveitar melhor a radiação solar, colocando os painéis orientados de forma mais conveniente para captação dos raios solares.

Outro fator que aumenta a variabilidade e introduz um grau de aleatoriedade sobre a radiação esperada em um local é a nebulosidade, pois naturalmente em períodos nublados haverá um bloqueio da radiação solar direta e, conseqüentemente, a saída ou produção de energia dos geradores fotovoltaicos será menor. Portanto em geral, antes de atingir o solo, as características da radiação solar (intensidade, distribuição espectral e angular) são afetadas. Estas modificações são dependentes da espessura da camada atmosférica, também identificada por um coeficiente denominado Massa de Ar (AM, do inglês Air Mass), do ângulo zenital do sol, da distância Terra-Sol e das condições atmosféricas e meteorológicas, influenciando a quantidade de energia elétrica produzida a partir dos painéis solares (Silva, 2011).

Portanto este trabalho tem como objetivo principal, através de ferramenta de simulação desenvolvida pelos autores e do uso de dados meteorológicos disponibilizados Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), obter meios de estimar ou prever o impacto das condições atmosféricas sobre a captação energética solar por geradores fotovoltaicos, as quais afetam a produção fotovoltaica de energia elétrica. Dessa forma, procura-se identificar os padrões sazonais, satisfatórios ou não, para o aproveitamento local da energia solar. Além de estimativas de radiação solar, o programa desenvolvido calcula a variação dos ângulos de incidência dos raios solares em qualquer localidade terrestre e dia do ano. A cidade de Belém/PA é adotada como referência neste trabalho.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A Terra realiza dois movimentos principais: rotação (em torno do seu eixo) e o de translação (movimento da Terra segundo sua órbita elíptica em torno do Sol). Portanto, o ângulo de incidência do Sol dependerá do horário do dia. Define-se então, o ângulo horário (ω), o qual seria um desvio angular cujo valor é nulo quando o horário solar local é meio dia. Considerando que a cada hora a Terra gira 15° (equivalente a $360^\circ/24$), então o ângulo horário é dado por

$$\omega = (12 - T) \times 15^\circ, \quad (1)$$

onde T é o horário solar no local considerado (T varia entre 0 e 24hs). O ângulo de declinação solar, percebido no equador terrestre, varia ao longo do ano por

$$\delta = 23,45^\circ \cdot \text{sen} [360 \times (J - 80)/365]. \quad (2)$$

Na Eq. (2), J é o dia juliano (J é número inteiro de 1 a 365). Após o cálculo da declinação, é obtido o ângulo de altitude solar, extraído a partir da Eq. (3) (Messenger, 2010).

$$\text{sen} \alpha = \text{sen} \delta \cdot \text{sen} \Phi + \cos \delta \cdot \cos \Phi \cdot \cos \omega, \quad (3)$$

onde α é o valor do ângulo da altitude solar, e Φ é o ângulo de latitude terrestre do local considerado, todos fornecidos em graus.

O ângulo α influencia o caminho da radiação solar na atmosfera. Se α decresce, o percurso dos raios solares através da atmosfera aumenta e a radiação solar sofre maior absorção, reflexão ou espalhamento, o que reduz sua intensidade na superfície. O outro ângulo necessário para definir a direção de incidência dos raios solares é o ângulo de azimute (Ψ), dado por

$$\cos \Psi = \frac{-\text{sen} \alpha \cdot \text{sen} \Phi + \text{sen} \delta}{\cos \alpha \cdot \cos \Phi}. \quad (4)$$

Os ângulos de altitude α e azimute Ψ são mostrados na Fig. 1, juntamente com o ângulo de zênite θ_z , o qual é o complemento de α .

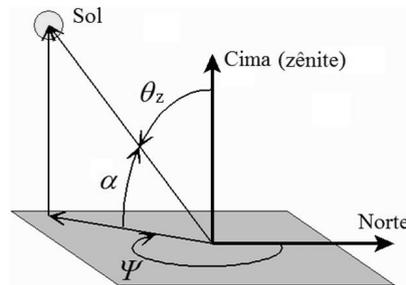


Figura 1- Ângulos que descrevem a direção de incidência dos raios solares.

A intensidade da radiação solar recebida no topo da atmosfera depende da distância entre o Sol e a Terra, que pode variar no decorrer do ano. No entanto, apenas uma parte dessa quantidade total atinge a superfície terrestre, considerando a espessura da camada atmosférica (Massa de Ar - AM), que está relacionada com a posição do Sol (α) e com as condições atmosféricas e meteorológicas. O valor de $AM = 1$ é empregado se a radiação incide perpendicularmente ($\alpha = 90^\circ$) a uma superfície horizontal ao nível do mar (Vilaça, 2009). No entanto, a massa de ar varia com a altitude solar α conforme a Eq. (5).

$$AM = 1/\text{sen} \alpha \quad (5)$$

Caso a atmosfera esteja em boas condições climáticas, em função da transmissividade atmosférica da radiação solar, com condições de máxima incidência da radiação direta o nível de irradiância na Terra atinge um total aproximado de 1.000 W/m^2 ao meio-dia (Vilaça, 2009). O valor designado por constante Solar da irradiação é $E_0 = 1367 \text{ W/m}^2$, representando o valor médio de radiação que atinge o topo da atmosfera, variando com a distância entre o Sol e a Terra, conforme demonstrado na equação 7. A radiação solar que chega à superfície da Terra depende, da hora e dia do ano (J), considerado. A Eq. (6) (Messenger, 2010 e Vilaça, 2009) é usada para determinar I , que é a irradiância recebida em um plano perpendicular à direção dos raios solares incidentes:

$$I = E_0 [1 + 0,034 \cos(360J / 365)] 0,7^{AM^{0,678}} \quad (6)$$

A intensidade I pode ser considerada o módulo de uma grandeza vetorial, cuja direção é a de incidência dos raios solares, mostrada na Fig. 1. A partir disso, pode-se determinar I_y , referente a irradiância incidente perpendicular a um plano fixo paralelo ao solo através da Eq. (7) segundo Vilaça (2009), levando em consideração que o painel também esteja paralelo ao solo.

$$I_y = I \operatorname{sen} \alpha \quad (7)$$

Esta componente de radiação incidente perpendicular ao painel fotovoltaico (I_y) será a componente aproveitada na conversão de energia solar em elétrica. As equações citadas foram inseridas no programa MATLAB para gerar os valores da radiação recebida em plano fixo paralelo ao solo, Eq. (7), e em plano móvel sempre perpendicular à incidência de radiação, Eq. (6).

A Fig. 2 mostra o algoritmo que descreve o fluxo lógico do programa elaborado. Sua implementação foi feita utilizando o software MATLAB 7.0. A função *alt_azm* calcula os ângulos de altitude e azimute solar. Assim, são gerados gráficos que demonstram qual a variação do ângulo da altitude solar versus ângulo azimutal ao longo do dia, para as cidades consideradas. No programa principal também é calculada a radiação em W/m^2 em função do horário do dia e gerado o gráfico correspondente. Caso seja necessário obter a energia solar recebida (em Joules ou quilowatt-hora) ao longo de um dia, um programa à parte realiza a integral numérica da curva de radiação instantânea em relação ao tempo, permitindo gerar um gráfico de energia solar recebida ao longo de todos os dias do ano. Os gráficos descritos são mostrados na seção de resultados.

Os dados medidos de radiação foram obtidos através de estação automática do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e disponibilizados em seu *site* (www.inmet.gov.br). Estes são apresentados juntamente aos resultados das simulações para uma análise conjunta.

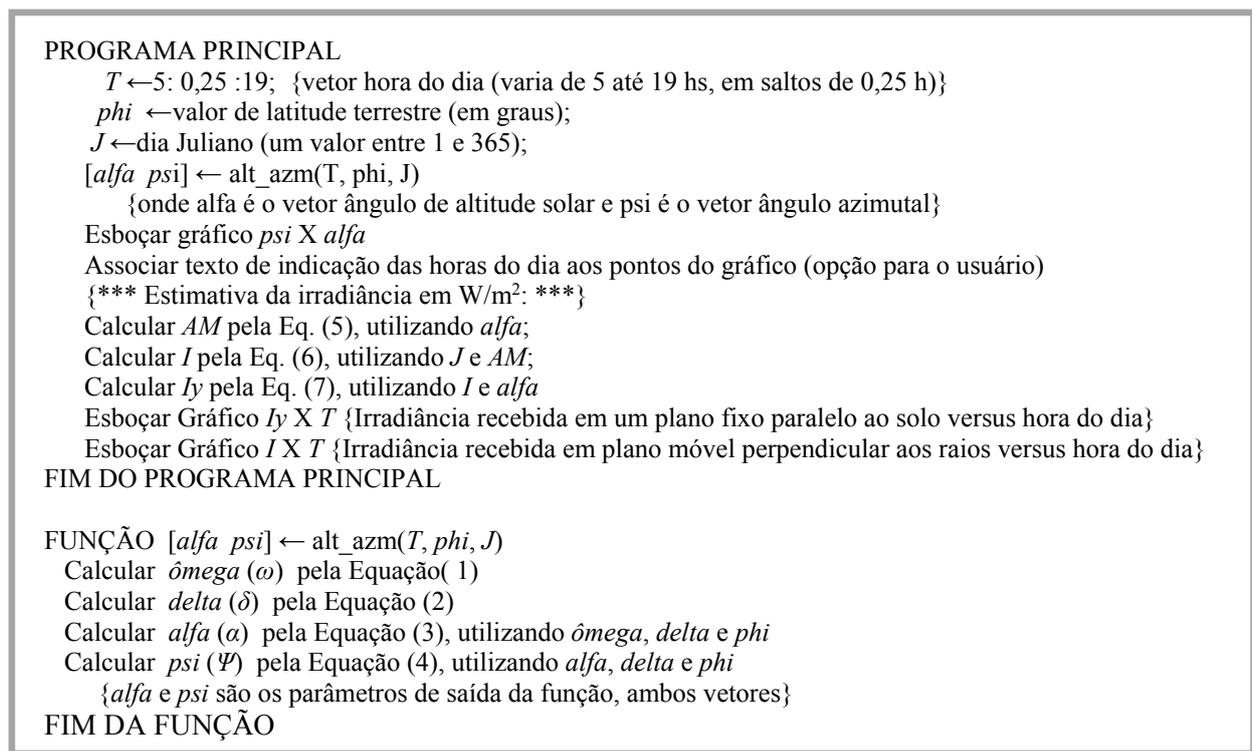


Figura 2 – Algoritmo que descreve o fluxo lógico de execução do programa.

3. RESULTADOS

É conhecido que, quando os raios solares atingem uma superfície de uma forma não perpendicular, a sua intensidade luminosa se distribui em área maior, e assim a potência da incidência solar por metro quadrado diminui nesta superfície. Por isso a importância de posicionar os painéis com o objetivo de se otimizar a incidência média normal dos raios solares nas suas superfícies. Outros fatores que afetam a radiação solar recebida é a extensão da trajetória dos raios na massa de ar (AM) e as condições atmosféricas.

3.1 Gráficos da variação dos ângulos solares

Os gráficos da Fig. 3 apresentam a posição do Sol, calculada em termos do ângulo de altitude (α) versus ângulo de azimute (Ψ) em alguns dias, referentes aos solstícios e equinócios do ano, na cidade de Belém. O ângulo azimutal indica qual a melhor disposição do painel no plano do solo, e seria o desvio angular horizontal do eixo do painel em relação à direção do pólo norte terrestre, enquanto que o ângulo de altitude solar indica o quanto devemos elevar o painel segundo a direção deste ângulo azimutal. Por exemplo, se para um dado ponto do gráfico, o ângulo azimutal for de $\Psi = 0^\circ$ e a altitude solar for de $\alpha = 60^\circ$, então isso quer dizer que devemos inclinar o painel solar de 30° (complemento de α) na direção do pólo norte ($\Psi = 0^\circ$). No gráfico correspondente à data de 21 de dezembro, observamos que o azimute ao meio dia é $\Psi = 180^\circ$ e a altitude é $\alpha = 68^\circ$. Então isso significa que, para uma maior captação de radiação neste instante, um painel móvel deve estar inclinado de um ângulo de 22° ($90^\circ - 68^\circ$), a partir do plano horizontal, na direção do pólo sul. Esta mudança de inclinação da face dos painéis segundo o outro pólo pode ser visto no gráfico correspondente à data de 21 de dezembro, em Belém. A dinâmica da variação dos ângulos solares no ano inteiro deve ser levada em conta na instalação dos painéis solares.

A fim de obter-se uma validação deste estágio do programa desenvolvido em termos quantitativos, foi realizada uma simulação de um caso exibido em (Messenger, 2010) para a latitude 30° Norte. Os resultados do programa sobrepostos ao da referência são exibidos na Fig. 4. Devido ao local estar situado no hemisfério norte, o centro de referência dos gráficos (azimute zero) da Fig.4 é o polo sul, ao contrário dos gráficos da Fig. 3, onde o azimute zero representa o polo norte

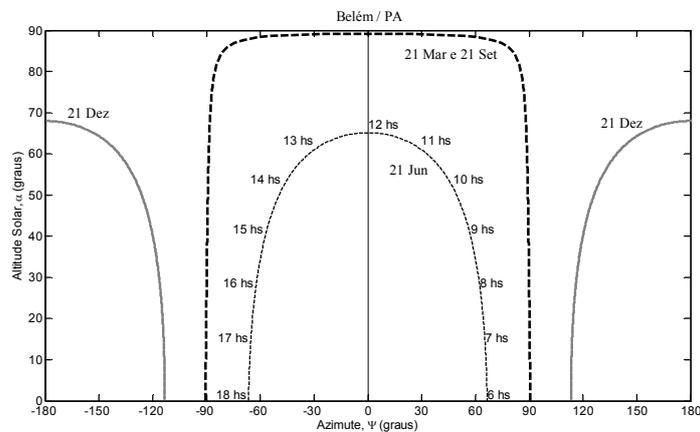


Figura 3 – Altitude versus azimute solar para a cidade de Belém.

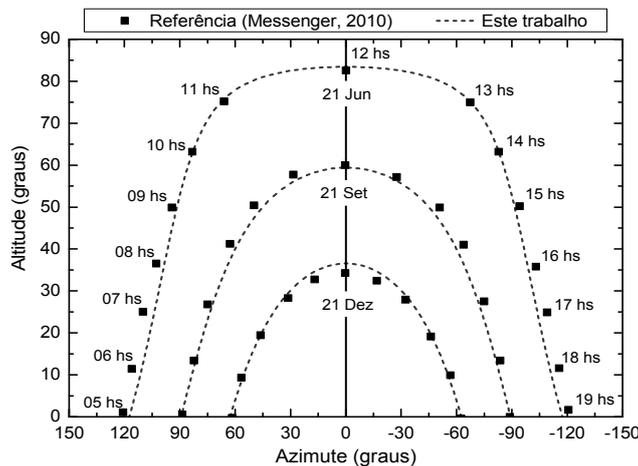


Figura 4 – Altitude versus azimute solar para a latitude 30° N.

3.2 Gráficos de radiação solar incidente

Os componentes de radiação direta, difusa e refletida somadas geram a radiação global (Messenger, 2010), sendo que o INMET mede a irradiância solar global, ou seja, a radiação solar resultante de todas suas interações (reflexão, absorção, difusão) com as moléculas de gases presentes na atmosfera. A radiação solar é uma variável meteorológica afetada pela presença de nuvens sobre o céu, pois elas são as atenuadoras da radiação solar ao absorver quase toda a radiação no comprimento de onda do infravermelho, e de atenuar a radiação direta. Assim, diferentes condições de

cobertura do céu por nuvens resultam em diferentes padrões da radiação solar que chega a superfície (Silva, 2011). Como exemplo, o céu sem nuvens, resulta em valores altos de radiação solar, enquanto no outro extremo, em condições de céu totalmente coberto por nuvens, há maior espalhamento e conseqüentemente uma radiação menor atinge o solo. A Fig. 5 expõe as curvas de radiação simulada pelo programa proposto implementado no Matlab, que considera o céu sem nuvens, e as medidas pela estação do INMET, que naturalmente levam em conta efeitos de céu nublado a afetar a radiação recebida na superfície. Comparando-se as curvas simuladas e medidas, observa-se durante o ano inteiro o impacto de céu encoberto, tanto na quantidade de irradiância recebida, quanto na perda de simetria das curvas em relação ao meio dia.

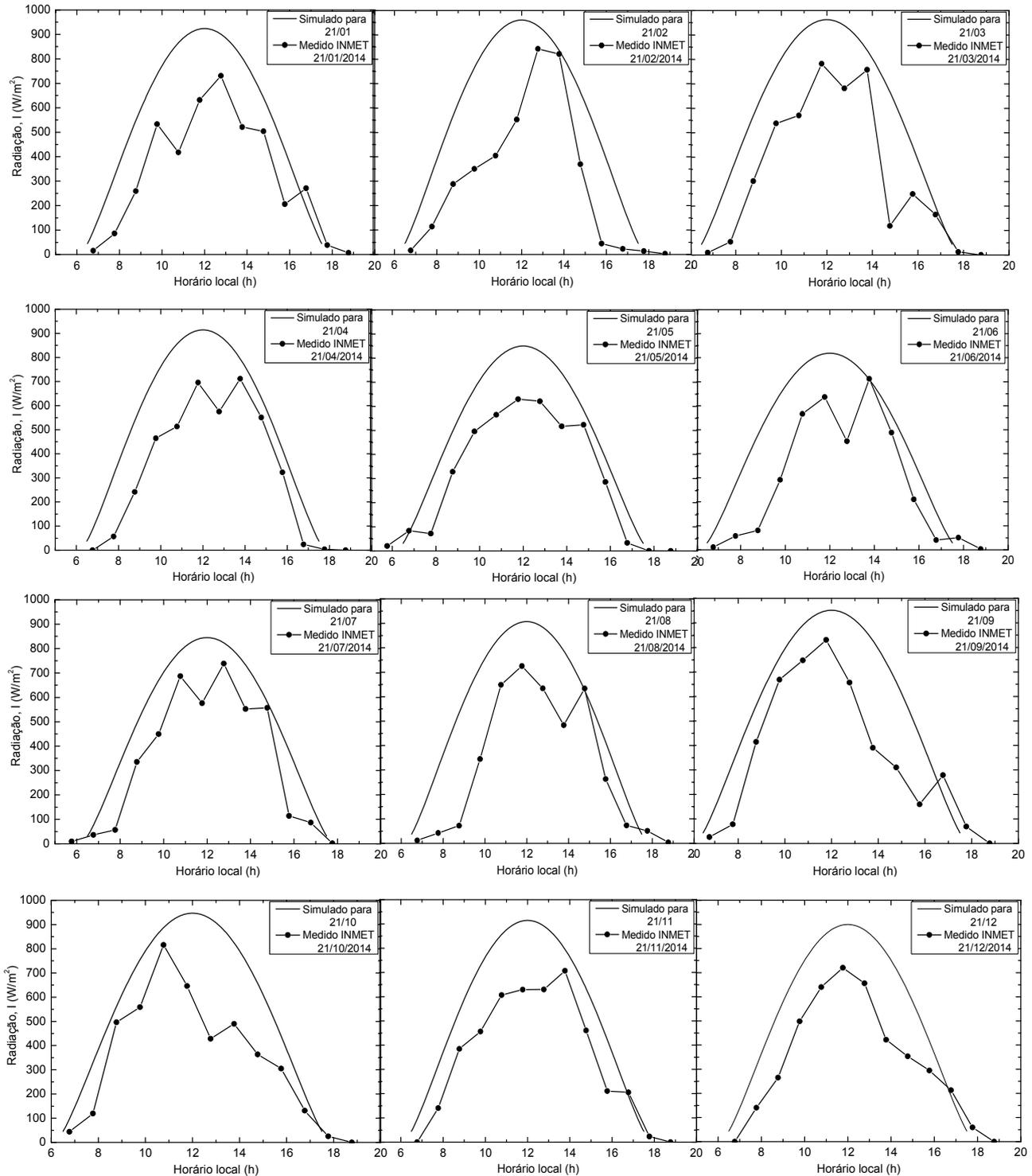


Figura 5 – Irradiância simulada pelo programa desenvolvido e irradiância medida pela estação do INMET em 2014.

Através da integração numérica em relação ao tempo (no intervalo do dia) das irradiâncias medidas pelo INMET e expostas na Fig. 5, é possível obter e analisar a irradiação diária incidente em Belém para o ano de 2014, representadas pelo gráfico de pontos na Fig. 6, observadas nos dias 21 dos meses de janeiro a dezembro, e fazer uma comparação com a incidência da irradiação simulada via MATLAB também expostas na Fig. 6. Observa-se tanto a diferença da irradiação coletada entre um painel horizontal fixo e um painel móvel (onde os raios solares sempre incidem normalmente em sua superfície), assim como o efeito provocado pelo céu encoberto nas irradiações diárias medidas ao longo do ano. Portanto, para uma maior compreensão da energia perdida devido ao céu nublado durante o ano, foi gerada a Fig. 7, que representa o desvio relativo em porcentagem entre a radiação simulada no plano do solo e a radiação medida, para uma visualização da quantidade de energia dissipada devido às condições atmosféricas. A estimativa é que nos meses de inverno ocorra maiores perdas de energia solar pelo estado de transparência da atmosfera sobre o lugar, ocorrendo maiores desvios relativos quanto maior for a absorção atmosférica, atingindo o seu máximo próximo ao dia 50, que corresponde ao mês de fevereiro, no entanto, esses valores tendem a reduzir em percentual, e sofrem queda no decorrer do ano. Observa-se que nas datas amostradas e durante o período em que foi feito o levantamento, a redução na energia solar recebida suposta por esse método, variou dentro da faixa de 28% a 44%.

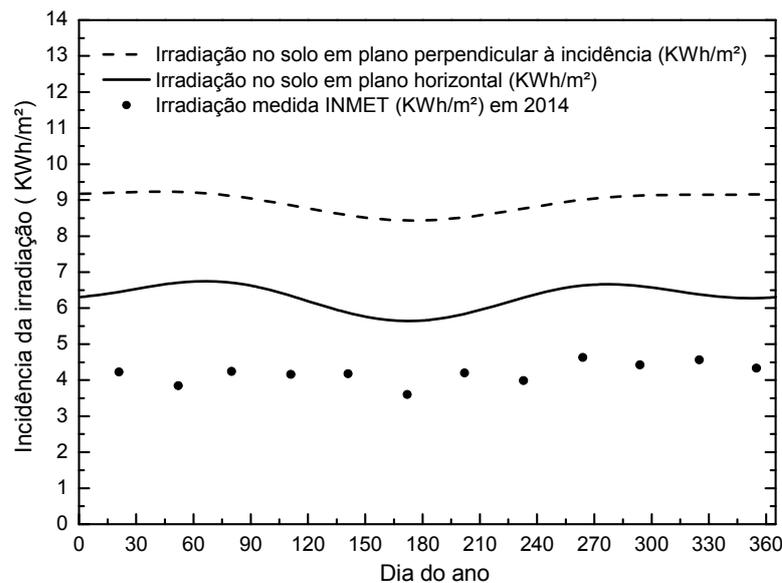


Figura 6 – Curvas de irradiação diária simuladas para Belém/PA e curva obtida a partir de medidas da estação local do INMET em 2014.

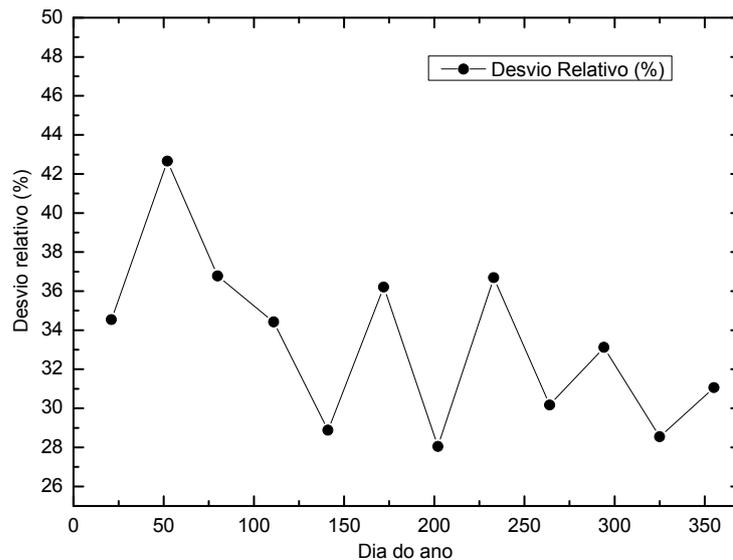


Figura 7 – Desvio relativo entre a radiação simulada incidente em plano paralelo ao solo e a radiação medida em Belém.

A Fig. 8 ilustra curvas de nebulosidade em Belém, disponibilizadas pelo INMET para os anos de 2010 a 2014, assim como a curva de valor médio considerando os referidos anos. A nebulosidade mede o nível de área de céu encoberto pelas nuvens em uma escala de zero (céu limpo) a dez (céu totalmente nublado). Observa-se que em Belém o céu está mais encoberto por nuvens entre os meses de dezembro a maio, justificando o maior desvio relativo mostrado na Fig. 7 para este intervalo.

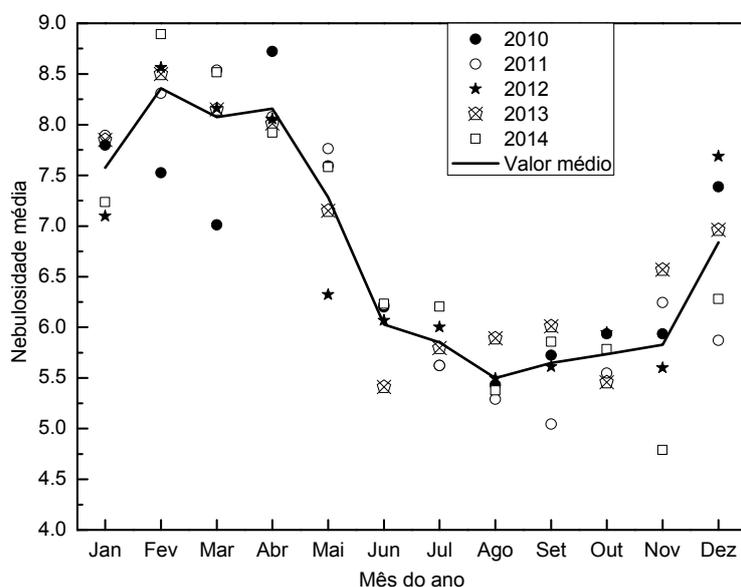


Figura 8 – Medidas de nebulosidade em Belém para os anos de 2010 a 2014 (Fonte: INMET).

4. CONCLUSÕES

Este trabalho expôs os resultados de ângulos solares e de radiação solar para a cidade de Belém. O algoritmo e o programa em MATLAB para a obtenção dos dados simulados foram desenvolvidos pelos autores. Os resultados simulados de radiação solar foram comparados com os dados medidos pelo INMET em 2014, onde foi possível estimar a redução da radiação que atinge a superfície devido ao céu encoberto e identificar o período mais satisfatório para a captação da mesma, que no caso de Belém, se faz no segundo semestre, exceto em dezembro. A análise conjunta de resultados simulados e dados meteorológicos é útil na compreensão do grau de impacto de céu encoberto na região e no planejamento do sistema fotovoltaico considerando os piores períodos de incidência de radiação solar.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao INMET pela disponibilização pública de seus dados meteorológicos e ao MEC/SESu/DIFES pelo financiamento no período de realização deste estudo.

REFERÊNCIAS

- Camus, C.; Eusébio, E., 2006. Gestão de Energia: energia solar. Lisboa: ISEL, p.28.
- CRESESB - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, 2014. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. Coordenador Pinho, J. T; Galdino, M. A. Rio de Janeiro.
- GREENPRO. Energia fotovoltaica: manual sobre tecnologias, projectos e instalação. Lisboa, 2004, v. 2. Disponível em: < <http://www.greenpro.de/po/fotovoltaico.pdf>>. Acesso em: 16 nov. 2015.
- INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). Disponível em: <http://www.inmet.gov.br>. Acesso em: 19 nov. 2015.
- Messenger, R. A.; VENTRE, J., 2010. Photovoltaic systems engineering, 3. ed., Flórida, CRC Press LLC, cap. 2, pp. 21-46.
- Rüther, R., 2004. Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial de geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública. Florianópolis: UFSC; LABSOLAR.
- Shayani, R. A., 2006. Medição do rendimento global de um sistema fotovoltaico isolado utilizando módulos de 32 células. 184 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, UNB, Brasília.
- Silva, V. A. M., 2011. Influência da cobertura do céu na estimativa da Radiação Solar utilizando modelo digital de elevação, Dissertação de Mestrado em Física Ambiental, UFMG, Cuiabá.

- Varejão-Silva, M. A., 2006. Meteorologia e climatologia. Versão Digital 2, Recife, 463p. Disponível em: <http://www.icat.ufal.br/laboratorio/clima/data/uploads/pdf/METEOROLOGIA_E_CLIMATOLOGIA_VD2_Mar_2006.pdf>. Acesso em: 19 nov. 2015.
- Vilaça, I. N. C., 2009 Projecto de uma instalação fotovoltaica de 1,5 MW. Dissertação de Mestrado em Engenharia Eletrônica Industrial e Computadores, Universidade do Minho, Guimarães

PROGRAM FOR CALCULATION OF SOLAR RADIATION: SIMULATION AND JOINT ANALYSIS WITH MEASURED DATA

Abstract. *This paper presents a computer program developed by the authors to calculate the solar radiation variation during the year in an arbitrary location on Earth. Simulated results are presented for Belém, Brazil. Comparisons with measured data of solar radiation were made available by the National Institute of Meteorology (INMET), which takes into account momentary effects of cloudy sky. The analysis of the simulated and measured results allows us to estimate the local reduction on the incident solar energy during the year due to cloudiness. The measured radiation database is for the year 2014. From the joint analysis of simulated and measured data, the solar energy potential of the site was evaluated during the year, where it revealed a correlation of lower nebulosity periods with the rise in measured radiation index, which allows identifying seasons that favors a better electric power output from photovoltaic panels.*

Key words: *Solar Radiation, Algorithm Development, Simulation and Measurement.*