

Artigo

## Interpretação dos Efeitos de Tempo Nublado e Chuvoso Sobre a Radiação Solar em Belém/PA Para Uso em Sistemas Fotovoltaicos

Mayara Soares Campos<sup>1</sup>, Licinius D.S. Alcantara<sup>2</sup><sup>1</sup>*Curso de Engenharia Ambiental e Energias Renováveis,  
Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, PA, Brasil.*<sup>2</sup>*Instituto Ciberespacial, Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, PA, Brasil.*

Recebido: 24/5/2015 - Aceito: 14/2/2016

### Resumo

Neste trabalho foi desenvolvido um software que prediz a variação de direção de incidência dos raios solares ao longo do ano e dos horários do dia, o qual é utilizado para estimar a melhor orientação na instalação de painéis fotovoltaicos na cidade de Belém/PA. A utilização do potencial de radiação solar em Belém poderá ser transformada em energia útil. Todavia, a eficiência de conversão solar no local também depende das condições atmosféricas que interferem nesse aproveitamento. Portanto, também foram avaliados os efeitos de tempo nublado e chuvoso através da precipitação e da comparação entre a radiação simulada (para céu limpo) e a radiação medida disponibilizada pelo INMET, que estima a radiação real, o que leva em conta efeitos que afetam a radiação, como céu nublado. Portanto, a partir da análise conjunta da radiação solar incidente na superfície com o índice pluviométrico, foi avaliada a potencialidade energética solar do local durante o ano, onde foi possível perceber uma correlação do período de menor precipitação com a elevação no índice de radiação medido, favorecendo nesse período um melhor rendimento energético para o painel fotovoltaico.

**Palavras-chave:** eficiência energética, radiação solar, painel fotovoltaico.

## Interpretation of the Effects of Cloudy and Rainy Weather in the Solar Radiation at Belem/PA For Use in Photovoltaic Systems

### Abstract

A software that predicts the sunlight direction changes throughout the year and the hours of the day was developed. It is used to estimate the best disposition of photovoltaic panels during installation, with reference to the city of Belém / PA. The local solar radiation can potentially be transformed into useful energy. However, the photovoltaic conversion at the solar site also depends on the atmospheric conditions that interfere with this use. Therefore, we also evaluated the effects of cloudy and rainy weather through precipitation and comparison of the simulated radiation (for clear sky) with the measured radiation provided by INMET, that estimates the real radiation, which takes into account effects impairing the received radiation, such as cloudy sky. Therefore, from the joint analysis of the incident solar radiation on the surface with the rainfall, it is possible to assess the local solar energy potential over the year, whereas a correlation of the lowest rainfall period with an increase of the measured radiation index was noticed, favoring within this period a better energy generation output for the photovoltaic panel.

**Keywords:** energy efficiency, solar radiation, photovoltaic panel.

### 1. Introdução

A radiação eletromagnética que o sol emite e atinge a Terra é considerada hoje uma das fontes de energia renováveis mais viáveis a ser utilizada para conversão à energia elétrica no mundo, tornando-se uma das alternativas promissoras para complementação da matriz energética brasi-

leira. A energia solar fotovoltaica tem um grande potencial no Brasil, devido à sua localização geográfica (Rüther, 2004). Porém, a forma geométrica e a inclinação da terra fazem com que o sol 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).

A insolação recebida em um determinado local da superfície terrestre pode variar, e um dos fatores responsáveis por essa variação é a nebulosidade (Silva, 2011). Pois, as nuvens fazem com que ocorra uma variação na intensidade da radiação solar incidente na superfície, e por conta dessa variação de radiação explica-se a variabilidade de radiações incidente de uma região (Bastos *et al.*, 2002). Adicionalmente, somente parte da radiação solar atinge a superfície terrestre, devido a transmissividade atmosférica (Pereira e Oliveira, 2011). Portanto, 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 o desempenho das placas solares (Silva, 2011). Gonçalves (2013) realizou simulações de produção energética de instalações de painéis solares no Aeroporto Internacional de Belém durante um ano, estipulando a energia gerada de acordo com a radiação solar recebida em certos períodos e mostrando que há uma relação direta entre a radiação solar recebida pelas placas solares e a energia elétrica produzida pelas mesmas.

A intensidade de radiação solar que atinge uma superfície horizontal é variável, devido à atenuação sofrida ao atravessar a atmosfera, em função da presença de nuvens, poeira, poluição e outros. Naturalmente que num dia nublado, a intensidade da radiação solar será menor e, consequentemente o desempenho do módulo será prejudicado. Ocorre o contrário num dia claro ou com céu sem nuvens (Marques; Pereira; Assis, 2000).

A análise das condições climáticas leva em conta especificamente a cidade de Belém do Pará, localizada a latitude 01° 28' Sul, longitude 48° 29' Oeste e altitude de 10 metros, situada a uma distância de aproximadamente 100 km do Oceano Atlântico, possuindo um clima quente e úmido, com temperatura média de 26 °C. Suas características climáticas de precipitação média anual são de 3.372,7 mm variando entre 2.769,4 a 3.775,9 mm no intervalo de 2003 a 2013, caracterizada por dois períodos distintos de quantidade de precipitação, o chuvoso que se estende de dezembro a maio e o menos chuvoso de junho a novembro, sendo considerada uma região com elevado índice pluviométrico anual (Bastos *et al.*, 2002). Por isso, buscou-se compreender quantitativamente qual a influência média que períodos de céu encobertos causam no potencial de captação local de energia solar por meio de painéis fotovoltaicos, calculando através de modelos teóricos e dados estatísticos, a variação de incidência de radiação solar du-

rante o ano e estimando o impacto da nebulosidade na redução da radiação solar recebida. A título de ilustração, a Fig. 1 ilustra dados médios de nebulosidade, precipitação e insolação para Belém/PA, que compõem as Normas Climatológicas do Brasil para o período de 1961-1990, disponibilizadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Estes e outros valores normais padronizados obtidos para um período de 30 anos podem servir como referência na execução de estudos mais recentes sobre variáveis climáticas.

A Fig. 1 mostra que o grau de precipitação tende a acompanhar o grau de nebulosidade enquanto que o gráfico de insolação apresenta tendência inversa à de ambos. Observa-se que em média períodos de maior nebulosidade e precipitação (menor insolação) ocorrem em Belém durante o primeiro semestre enquanto que o oposto ocorre durante o segundo semestre. Para o contexto deste trabalho, ao invés de horas de sol é mais interessante lidar com a radiação solar incidente em unidades de energia solar por unidade de área ( $J/m^2$  ou  $kWh/m^2$ ). Isto, contudo requer a integração no tempo dos dados de irradiância (potência por unidade de área) dentro do período de um dia (radiação diária) ou de um mês (radiação mensal). Os resultados deste procedimento para os dados simulados e medidos de 2014 serão exibidos na seção de resultados.

Belém, por estar em uma região com grande potencial de incidência de energia solar durante todo o ano apresenta condições extremamente favoráveis para o emprego de energia solar fotovoltaica, e o rendimento de um sistema fotovoltaico depende essencialmente da radiação solar e, por isso, devem-se conhecer os níveis de radiação solar típicos da região onde se pretende implementar o empreendimento (Camus e Eusébio, 2006). A partir disso, o trabalho tem como objetivo conhecer a dinâmica de incidência dos raios solares tomando como referência a cidade de Belém/PA, que é uma cidade promissora para implantação de painéis solares, que são constituídos por semicondutores, que convertem a luz solar em energia útil. Logo, o conhecimento da direção de incidência dos raios solares é importante de modo a orientar os painéis na direção de maior incidência dos raios e assim aumentar o aproveitamento energético dos painéis. Além disso, o uso da radiação solar é de grande relevância, principalmente com as limitações cada vez mais evidentes dos recursos não renováveis e o incremento mundial na demanda por energia. Com isso, o aproveitamento desta radiação passou a despertar maior interesse para essa finalidade, onde a radiação solar tem sido foco de muitos estudos voltados ao seu aproveitamento. Um aspecto de tais estudos leva em conta a avaliação da disponibilidade de radiação solar na superfície, sendo fundamental para projetos voltados ao seu máximo aproveitamento, onde a Alemanha investiu sistematicamente nessa forma de energia, a ponto de se tornar o maior produtor mundial de energia fotovoltaica em 2010 (Weber, 2011). Outro aspecto leva em conta o aperfei-

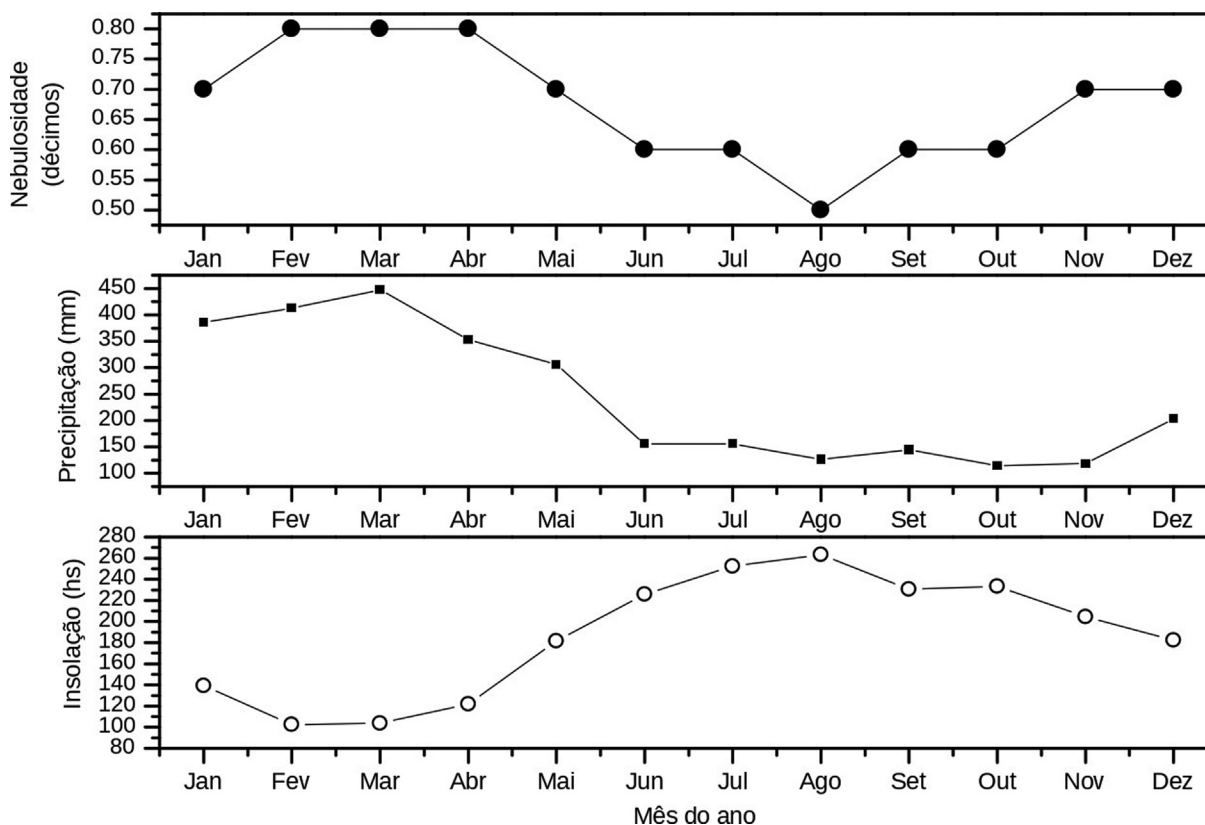


Figura 1 - Dados de nebulosidade, precipitação e insolação em Belém das Normais Climatológicas do Brasil (1961-1990). Fonte: INMET.

çoamento do processo de fabricação de células solares, resultando em um gradual decréscimo do custo de aquisição de módulos fotovoltaicos desde 1975 (Messenger, 2010). Células solares baseadas em semicondutores compostos foram investigadas pela primeira vez na década de 1960. Ao mesmo tempo, tecnologias de células solares de silício policristalino (PC-Si) e de filme fino foram desenvolvidas para proporcionar elevada capacidade de produção com redução do consumo de material e de demanda de energia no processo de fabricação, além de maior integração na estrutura dos módulos através de processo de deposição e, conseqüentemente, a redução de custos para aplicações terrestres de grande escala (Razykov *et al.*, 2011).

Além disso, procurou-se obter através de dados referentes à cidade de Belém, provenientes das simulações a partir do código de programa desenvolvido pelos autores e das medidas disponibilizadas pelo INMET, o apoio para compreender a influência dos índices de radiação solar em diferentes meses, através da análise estatística da variação de precipitação pluviométrica, possibilitando assim identificar o comportamento conjunto destas variáveis na eficiência de captação da energia solar durante o intervalo de um ano. Dessa forma, verificaram-se quais os melhores períodos para melhores rendimentos energéticos que o módulo fotovoltaico pode oferecer.

## 2. Materiais e Métodos

### 2.1. Ângulo de incidência dos raios solares

Para o cálculo do ângulo de incidência dos raios solares foi desenvolvido um algoritmo para estimar os ângulos nos quais os módulos fotovoltaicos devem ser orientados visando obter-se a melhor captação de energia solar em dada localização geográfica. Para estabelecer referenciais em determinadas posições do solo brasileiro, é necessária a aplicação dos valores da latitude terrestre  $\Phi$ . Essas latitudes demonstram a distância angular da localização terrestre, a partir da linha equador, medida ao longo do meridiano de Greenwich, podendo então variar entre 0 e 90° para o norte ou para o sul. Na aplicação dos valores da latitude terrestre, os minutos e segundos de grau devem ser convertidos em frações decimais de grau.

A Terra realiza dois movimentos principais: rotação (em torno do seu eixo) e translação (movimento da terra na órbita elíptica em torno do sol). O ângulo de incidência do sol dependerá do horário do dia. Define-se então, o ângulo horário do sol ( $\omega$ ), como o 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 do Sol 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 24 h). O resultado é dado em graus.

É necessário o cálculo da declinação solar para definir o ângulo que o painel fotovoltaico deve ter no decorrer do ano, pois a inclinação do eixo terrestre influencia no ângulo de zênite ( $\theta_z$ ) em diferentes latitudes, considerando o dia de Equinócio/Solstício (eventos que estabelecem o início das estações do ano em todos os hemisférios) e o meio-dia solar verdadeiro (não necessariamente coincidente com o meio-dia indicado pelo relógio) que é definido como o exato momento da culminação dos raios solares no meridiano do observador (Varejão-Silva, 2006). Considerando que há uma variação estacional de inclinação do eixo terrestre de  $23^{\circ}27'$  em relação à normal ao plano da eclíptica, a declinação solar “percebida” por um observador ao meio dia no equador terrestre, em um dado dia do ano ( $J$ ), é dada por meio de

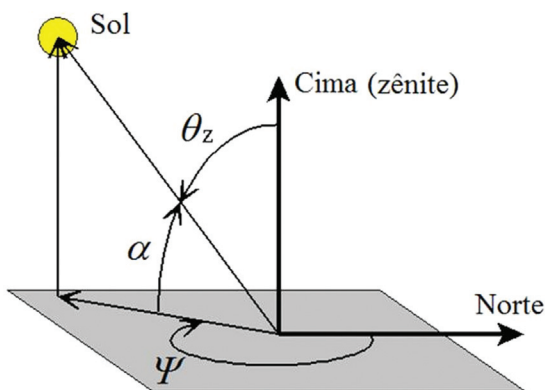
$$\delta = 23,45^{\circ} \cdot \sin[360 \times (J - 80) / 365], \quad (2)$$

onde  $\delta$  (delta) é o valor da declinação solar em graus, e  $J$  indica o número de ordem do dia (dia Juliano), considerando  $J = 1$  em primeiro de janeiro,  $J = 80$  em 21 de março, etc. Isto pode ser percebido pela Eq. (2), a qual toma como referência a incidência solar no equador terrestre, ao meio dia e no decorrer do ano (ao se variar  $J$ ). Após o cálculo da declinação, é calculada a altitude solar que é o ângulo entre a direção do feixe de radiação e a projeção desta mesma direção no plano horizontal. Para isso é utilizada a Eq. (3) (Messenger, 2010):

$$\sin \alpha = \sin \delta \cdot \sin \Phi + \cos \delta \cdot \cos \Phi \cdot \cos \omega \quad (3)$$

onde  $\alpha$  (alfa) é o valor do ângulo da altitude solar, dado em graus.

O ângulo  $\alpha$ , mostrado na Fig. 2, influencia o caminho da radiação solar na atmosfera. Se  $\alpha$  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.



**Figura 2** - Ângulos solares  $\Psi$  (Ângulo azimute),  $\alpha$  (altitude solar) e  $\theta_z$  (ângulo de zênite). Note que  $\theta_z = 90^{\circ} - \alpha$ . Fonte: Autores.

Por fim determina-se o ângulo do azimute solar ( $\Psi$ ), que é o ângulo medido no plano da superfície da terra, entre a direção do pólo norte e a projeção da trajetória de incidência direta da irradiação solar na superfície terrestre. Este ângulo é positivo se medido no sentido horário a partir do pólo norte (veja a Fig. 2). O ângulo de azimute solar é calculado por,

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

Se o horário de referência for o meio dia, o valor do ângulo de zênite ( $\theta_z$ ) pode ser obtido a partir do ângulo da latitude terrestre ( $\Phi$ ) subtraído da declinação solar ( $\delta$ ) para o dia do ano. Na verdade,  $\theta_z$  indicará o ângulo ótimo de elevação do módulo fotovoltaico (na direção do norte ou sul geográfico), de modo que os raios solares incidam perpendicularmente ao plano do mesmo ao meio dia. Dessa forma,

$$\theta_z = \Phi - \delta \quad (5)$$

Portanto, o ângulo de zênite  $\theta_z$  da incidência solar é influenciado tanto pela latitude terrestre da localização geográfica, quanto pela época do ano, devido à variação da projeção da inclinação do eixo terrestre na direção do sol ao longo do ano. Essa variação periódica ocorre na faixa de  $-23,45^{\circ} \leq \delta \leq 23,45^{\circ}$  a cada ano, devido ao movimento de translação da Terra.

O conhecimento da variação da direção da incidência dos raios solares é importante de modo a orientar os módulos na direção de maior incidência dos raios e assim aumentar o aproveitamento energético do sistema fotovoltaico. Para isso, um algoritmo foi desenvolvido usando a base teórica apresentada, o qual serviu de suporte à elaboração de um programa computacional em MATLAB 7.0 para a estimativa dos ângulos de incidência solar para dada localização geográfica, e diferentes dias do ano, onde os vetores de entrada são representados pelas variáveis  $T$ ,  $\Phi$  e  $J$ , onde  $T$  representa a hora do dia que como padrão contém os horários de 5 a 19 hs (horário local) com incremento de 0,25 h. O vetor  $\Phi$  é a latitude do local, sendo que esse valor deverá ser convertido em frações decimais de grau e  $J$  são valores de 1 a 365 correspondendo aos dias do ano.

## 2.2. Análise dos efeitos de tempo nublado e chuvoso em Belém/PA

Para compreender como ocorre o comportamento da incidência de radiação na cidade sob influência da precipitação foi criado um banco de dados com valores mensais de radiação solar, e do índice de precipitação médio no período de 11 anos, 2003 até 2013. Os dados analisados de precipitação e radiação foram fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), disponibilizados pelo Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP).

A radiação disponibilizada pelo instituto é obtida em intervalos de 1 em 1 hora UTC em  $\text{kJ/m}^2$  em termos de densidade média de potência, e para esse estudo os horários foram convertidos para horas local, e por conveniência houve a conversão de unidade para os dados de radiação solar, ficando expressos em  $\text{W/m}^2$  e  $\text{kWh/m}^2$ . Os dados de radiação utilizados foram dos dias 21 dos meses de janeiro a dezembro de 2014. A energia solar recebida em um dado dia do ano é obtida a partir da integração da potência instantânea recebida ao longo dos horários desse dia.

A intensidade da radiação solar no topo da atmosfera depende da distância entre o Sol e a Terra, que pode variar no decorrer do ano, o que consequentemente influencia na variação da irradiância solar. No entanto, apenas uma parte dessa quantidade total chega à Terra e atinge a superfície terrestre considerando a espessura da camada atmosférica (Massa de Ar - AM), que está relacionada com o ângulo de zênite (eixo vertical da Terra), com a posição do Sol ( $\alpha$ ) e com as condições atmosféricas e meteorológicas. Na Eq. (6) emprega-se o valor de  $AM = 1$  se a radiação incide perpendicularmente ( $\alpha = 90^\circ$ ) a uma superfície horizontal ao nível do mar (Vilaça, 2009). A massa de ar varia com a altitude solar ( $\alpha$ ) conforme apresenta Eq. (6).

$$AM = 1/\text{sen}\alpha \quad (6)$$

Caso a atmosfera sobre a localidade esteja sem nenhuma ocorrência de nuvens, com condições de máxima incidência da radiação direta, o nível de irradiância na Terra atinge um total aproximado de  $1.000 \text{ W/m}^2$  ao meio-dia (Vilaça, 2009). O valor atribuído à 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 Eq. 7. A radiação solar que chega à superfície da Terra depende, da hora e dia do ano ( $J$ ), considerado. A Eq. (7) (Messenger, 2010; Vilaça, 2009) é usada para determinar  $I$ , que é a radiação recebida no plano perpendicular à direção dos raios solares incidentes.

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

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 radiação incidente perpendicular a um plano fixo paralelo ao solo através da Eq. (8) segundo Vilaça (2009), levando em consideração que o painel também esteja paralelo ao solo.

$$I_y = I \cdot \text{sen}\alpha \quad (8)$$

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. (8), e em plano móvel sempre perpendicular à incidência de radiação, Eq. (7).

Posteriormente, foram analisados estatisticamente os dados descritivos de índice pluviométrico, calculando-se a média do acumulado de precipitação durante o período de 11 anos. Também foram agrupados e organizados os dados da radiação medida pelo INMET e a simulada para visualização e análise conjunta. A demonstração gráfica gerada permitiu a informação tanto do comportamento do acentuado regime de chuvas, como a visualização dos valores da radiação solar incidente no solo simulados, desconsiderando o céu nublado, e a radiação medida pelo INMET que abrange as condições climáticas, visto que, como já foi citado por Marques, Pereira e Assis (2000), em um dia nublado e por conta das chuvas, a intensidade da radiação solar que atinge o módulo será menor. Dessa forma, pode-se compreender o que ocorre nessa localidade para auxiliar na avaliação da instalação de módulos fotovoltaicos.

### 3. Resultado e Discussão

#### 3.1. Cálculo da direção de incidência dos raios solares na cidade de Belém

Devido a fatores climáticos adversos, a incidência de radiação solar pode ser prejudicada. Porém é possível realizar uma análise que demonstre qual posição o painel fotovoltaico deve estar orientado no período de maior incidência solar durante os meses, determinando assim uma orientação da estrutura fixa que otimize a captação de radiação (Camus e Eusébio, 2006). Dessa forma, torna-se vantajosa a utilização das fórmulas aplicadas em um ambiente de simulação para o cálculo dos ângulos solares visando esta aplicação prática. 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 (Shayani, 2006). Por isso a importância de inclinar os painéis com o objetivo de se obter a incidência normal dos raios solares.

O gráfico obtido a partir da simulação, visualizado na Fig. 3 apresenta a posição do Sol, calculada em termos do ângulo de altitude solar ( $\alpha$ ) vs. ângulo de azimute ( $\Psi$ ) 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  $30^\circ$  (complemento de  $\alpha$ ) na direção do pólo norte ( $\Psi = 0^\circ$ ). Se o azimute for  $\Psi = 180^\circ$ , então isso significa que devemos inclinar o

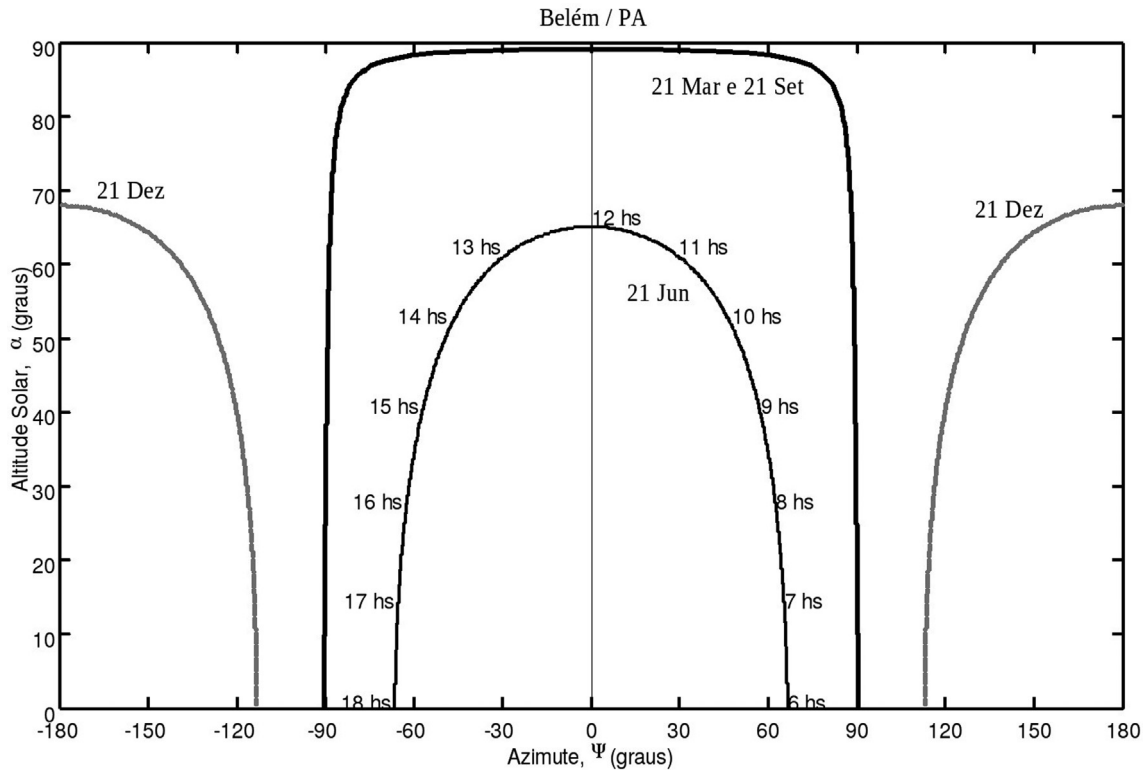


Figura 3 - Altitude solar vs. azimute para a cidade de Belém. Fonte: Autores.

painel de um ângulo  $90^\circ - \alpha$ , a partir do plano horizontal, na direção do pólo sul. Esta mudança de inclinação da face dos painéis segundo o outro pólo se dá na época do ano representada pela data 21 de dezembro, mostrada na Fig. 3, na qual se percebe que azimute central passa a ser,  $\Psi = 180^\circ$  (pólo sul). Isto ocorre, pois Belém se encontra em uma latitude terrestre menor (em módulo) que a inclinação do eixo terrestre de  $23,45^\circ$ .

Como esperado, observa-se no gráfico que durante o dia a direção de incidência solar modifica, pois o sol nasce a partir do leste (azimute positivo) com altitude solar  $\alpha = 0^\circ$ . No decorrer do dia esses ângulos seguem variando, e ao meio dia,  $\alpha$  é máximo com valor de azimute  $\Psi = 0^\circ$ , indicando que qualquer objeto na Terra terá sua sombra projetada no eixo norte-sul. O ângulo  $\alpha$  volta a ser nulo no pôr do sol, o qual se dá no oeste (azimute negativo). Obviamente, a eficiência de captação solar será máxima, no intervalo de um dia, se os painéis forem móveis e conseguirem acompanhar essa dinâmica. Note que a afirmação de que o sol nasce no leste ( $\Psi = 90^\circ$ ) e se põe no oeste ( $\Psi = -90^\circ$ ) é aproximada, pois isso apenas ocorrerá de fato nas datas de equinócio (21 de setembro e 21 de março), conforme pode ser visto na Fig. 3, datas nas quais o sol incide normalmente a região equatorial da Terra.

Note na Fig. 3, a disposição automática do horário do dia (uma opção do programa desenvolvido) foi ativada na curva da data considerada, onde se pode perceber que no

dia 21 de junho em Belém, o Sol nasce por volta das 06 horas e se põe por volta das 18 horas, e assim acontece no decorrer das outras datas, apresentando uma excelente quantidade diária de horas de radiação solar (*daylight time*) para aproveitamento e conversão energética.

### 3.2. Interpretação do comportamento climático em sistemas fotovoltaicos em Belém/PA

Os componentes de radiação direta, difusa e refletida somados geram a radiação global (MESSENGER, 2010), sendo que o INMET mede a irradiância solar global, ou seja, a radiação que interage com as partículas 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 maiores espalhamento e conseqüentemente uma radiação menor atinge o solo. A Fig. 4 expõe através das imagens de A a L, as curvas de radiação simulada no MATLAB que considera o céu sem nuvens, e as medidas pela estação do INMET que estima a radiação real, o que leva em conta efeitos que afetam a radiação, como céu nublado.

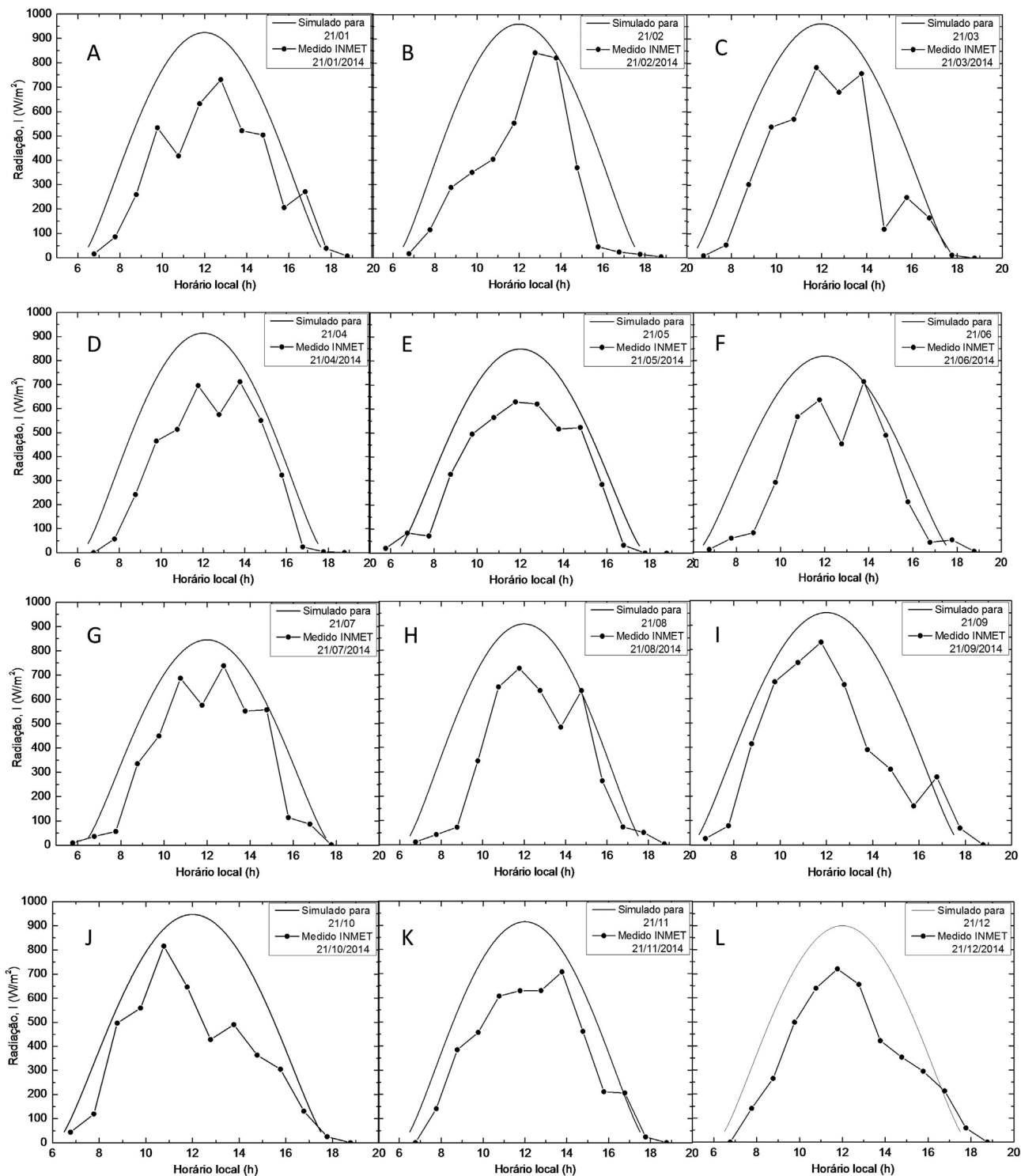


Figura 4 - Radiação simulada no MATLAB vs. Radiação medidas pela estação do INMET, 2014. Fonte: Autores.

Na cidade de Belém, por mais que esteja próximo à linha do Equador, durante o período chuvoso regionalmente chamado de inverno, ocorre um decréscimo natural da incidência de radiação solar por conta da nebulosidade. Para uma análise do comportamento climático na cidade, a Fig.4 oferece dados medidos e simulados de radiação, nas

datas amostradas referentes aos dias 21 dos meses de janeiro a dezembro. Através dela, verifica-se que no período chuvoso de dezembro a maio, representados pelas imagens A, B, C, D, E e L as radiações medidas pelo INMET estão bem abaixo da curva simulada, apresentando em geral grande diferença ,com exceção de 21 de fevereiro, que em

torno de 14 horas coincidiu com a curva simulada que desconsidera a influência da nebulosidade, chegando a mais de 800 W/m<sup>2</sup> de radiação e em 21 de dezembro que próximo às 17 h coincidiu com a simulação para céu limpo, mesmo no final da tarde. Entretanto percebe-se que 21 de fevereiro foi o dia com menores índices de radiação no decorrer do dia. Ao analisar os meses de junho a novembro, que é considerado regionalmente como verão, representados pelas imagens F, G, H, I, J e K observamos que as curvas se aproximam e chegam a igualar-se em alguns horários com a curva simulada. Os índices de radiação elevada foram observados nos meses de setembro e outubro, onde a radiação excedeu a 800 W/m<sup>2</sup>, e se não fosse a nebulosidade no período da tarde, o painel fotovoltaico poderia desempenhar um melhor rendimento energético. Percebemos que o período da manhã geralmente ocorre um maior índice de radiação, e nos horários vespertinos a tendência é a redução desse índice, sendo que no dia 21 de fevereiro após as 14 horas se tem um grande decréscimo de radiação, com isso estima-se que o céu ficou nublado, e com possíveis precipitações. Sendo, que foi verificado pelo site do INMET que ocorreu precipitação no período vespertino nessa data. Além de fevereiro, também ocorreu considerável decréscimo na radiação no mês de março, verificados na imagem C após as 14h. Em julho às 15h também houve redução da radiação de 600 W/m<sup>2</sup> para 100 W/m<sup>2</sup> em apenas uma hora, e no dia 21 do mês de outubro visualizado na imagem J depois das 10 h ocorreu um declínio de radiação no decorrer do dia. Esses exemplos, indicam que o céu estava com nuvens que espalhavam a radiação e impediam que índices maiores chegassem à superfície, considerando que a interação com a atmosfera gera influência nos valores da radiação solar incidente, que influi no comportamento do painel fotovoltaico na captação da energia solar e consequentemente, sua capacidade de geração de energia é prejudicada no momento da nebulosidade.

A Tabela 1 mostra os valores do coeficiente de correlação de Pearson ( $\rho$ ) e da Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE em inglês) entre os dados simulados e medidos para cada data considerada. As fórmulas para a obtenção de  $\rho$  e RMSE são

$$\rho = \frac{\sum (s_i - \bar{s})(m_i - \bar{m})}{\sqrt{(\sum (s_i - \bar{s})^2)(\sum (m_i - \bar{m})^2)}} \quad \text{e} \quad (9)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (s_i - m_i)^2}{n}}$$

onde  $s_i$  e  $m_i$  representam valores pontuais de dados simulados e medidos, respectivamente. Uma variável sobrelinhada significa seu valor médio e  $n$ , o número de pontos tomados de cada variável. O coeficiente  $\rho$  varia entre -1 e 1, e quando seu módulo se aproxima de 1, significa que as variáveis simuladas e medidas estão fortemente correlacionadas no sentido em que uma variável acompanha a tendência de variação da outra. As correlações serão menores quando a ocorrência de nebulosidade afeta a variação prevista da radiação no dia. O RMSE, por outro lado, estima diretamente desvios médios na amplitude e se torna mais apropriado para avaliar o impacto da nebulosidade na redução da radiação medida, ou seja, quanto maior o RMSE maior será a redução na radiação solar incidente.

Analisando estatisticamente a variação de precipitação pluviométrica, correlacionando-a com os valores da radiação solar incidente, pode-se identificar o comportamento conjunto destas variáveis na eficiência de captação da energia solar durante o intervalo de um ano, através do gráfico visualizado na Fig. 5, o qual apresenta o índice de precipitação (mm) e a incidência de radiação (kWh/m<sup>2</sup>) em relação aos dias do ano representados pelo número de ordem dos dias (dias Julianos).

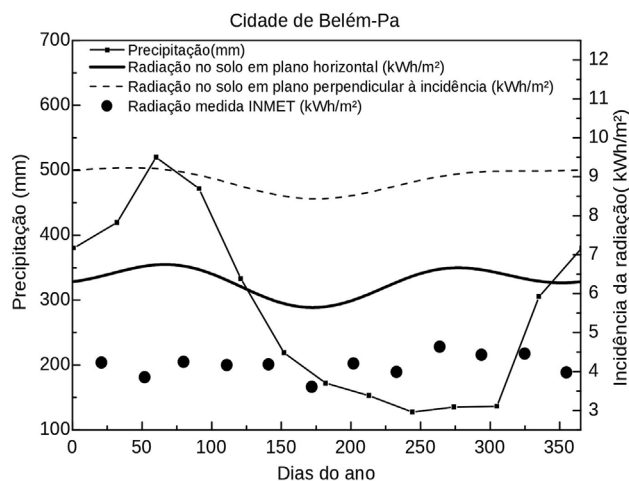
Na Fig. 5 podemos verificar que o período de maior eficiência na placa fotovoltaica será nos dias do ano de 250 a 325, o que corresponde aos meses de setembro a novembro, pois se percebe que nesse estágio existe uma elevação no índice de radiação, e o inverso ocorre na pluviosidade da localidade, pois o índice de precipitação médio chega aproximadamente a 150 mm, um dos menores índices durante os meses. Em vista disso, podemos aferir que nesse período teremos uma maior eficiência do painel solar ao se verificar que o índice pluviométrico na cidade é baixo o que favorecerá que as grandes incidências de radiação cheguem à superfície, onde esse rendimento dependerá também do tipo de plano que estiver o módulo fotovoltaico. Observando ainda a Fig. 5, verificamos na curva de incidência de radiação em plano horizontal que este terá menor incidência de energia solar devido estar fixo e paralelo ao solo, em contraposto à curva de plano perpendicular à incidência, que obterá melhores rendimentos energéticos por estar voltado aos raios solares durante o ano, uma vez que a parcela que é convertida em energia é devida à componente perpendicular dos raios incidentes no painel, a qual será maximizada nesta situação.

Como esperado, observa-se no gráfico também que durante o período chuvoso que se estende de dezembro a maio, o regime de chuvas é acentuado chegando ao máximo

**Tabela 1** - Coeficientes de correlação de Pearson ( $\rho$ ) e RMSE entre os dados simulados e medidos.

Data	21/01	21/02	21/03	21/04	21/05	21/06	21/07	21/08	21/09	21/10	21/11	21/12
$\rho$	0,912	0,869	0,899	0,944	0,974	0,871	0,951	0,888	0,889	0,908	0,966	0,947
RMSE (W/m <sup>2</sup> )	233,55	289,68	252,24	212,67	165,89	221,21	165,48	240,81	224,15	232,76	182,94	202,04





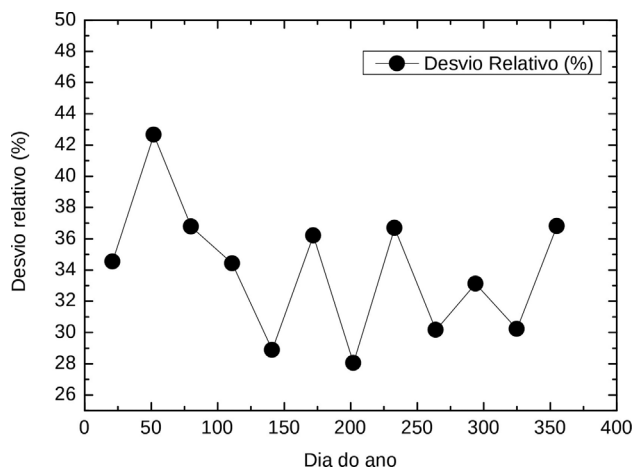
**Figura 5** - Gráfico da evolução temporal do índice de Precipitação (mm) e da incidência de radiação ( $\text{kWh/m}^2$ ). Fonte: Autores.

de mais de 500 mm no mês de março, que é considerado o mês de maior precipitação na região (Bastos *et al.*, 2002). Por conta disso, mesmo que a incidência solar seja alta, o dia será nublado, o que compromete a eficiência na captação dos raios solares pela placa, e com isso a radiação terá maiores empecilhos para chegar à superfície. Pois, por mais que o período de janeiro a março, equivalente aos dias julianos de 1 a 90, possua um perfil de irradiância solar alto, a considerável concentração de nuvens nesta época chuvosa reduz o brilho solar que atravessa a atmosfera e, conseqüentemente, a radiação solar que atinge o painel.

Analisando as medidas de radiação incidente do INMET, representadas pelo gráfico de pontos na Fig. 5, observadas nos dias 21 dos meses de Janeiro a Dezembro, é possível fazer uma comparação com a incidência da radiação simulada via MATLAB também expostas na Fig. 5. Quando essas curvas são contrapostas, confirma-se o que é esperado em relação ao comportamento climático na cidade, pois após o dia 200 há um período de menor precipitação em Belém, e com isso visualiza-se um aumento da incidência da radiação nesse período.

O cálculo do coeficiente de Pearson ( $\rho$ ) entre as evoluções temporais de precipitação e de radiação medida foi de  $-0,283$ , indicando que há uma correlação negativa entre essas variáveis, ou seja, um aumento na precipitação resulta em certo decréscimo na radiação recebida. Também foi realizado o cálculo de  $\rho$  entre as evoluções temporais de precipitação diária e das radiações simuladas em plano horizontal e em plano perpendicular, resultando em  $0,083$  e  $0,074$ , respectivamente, mostrando numericamente haver uma correlação muito fraca entre precipitação e radiações simuladas pelo fato de que estas não consideram efeito de nebulosidade com chuvas e teoricamente seus valores independem da precipitação.

Para uma maior compreensão da energia perdida devido ao céu nublado durante o ano, foi gerada a Fig. 6, que



**Figura 6** - Desvio relativo entre a radiação simulada incidente em plano paralelo ao solo vs. radiação medida em Belém. Fonte: Autores.

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 perda de energia suposta por esse método variou dentro da faixa de 28% a 44%.

#### 4. Conclusão

Os resultados obtidos poderão auxiliar instaladores de painel fotovoltaico, no que concerne à orientação adequada para melhor rendimento. O trabalho apresenta uma análise da inclinação ótima dos módulos fotovoltaicos de acordo com a variação da posição do sol ao longo do ano, obtendo-se as ferramentas necessárias para estudar o desempenho dos módulos fotovoltaicos, assim como efetuar os cálculos necessários para dimensionar os equipamentos considerando os efeitos climáticos no desempenho dos sistemas fotovoltaicos.

Para aplicação do algoritmo computacional foi escolhida como referência a cidade de Belém. A programação apresentada, entretanto, possibilita calcular a direção de incidência dos raios solares tomando qualquer localização geográfica terrestre, em qualquer dia do ano e em qualquer horário do dia, de modo que esta informação possa servir de suporte para uma orientação ótima das placas fotovoltaicas. As estimativas dos ângulos de incidência solar e o número diário de horas de radiação solar possibilitam resultados para uma análise qualitativa, no qual agregam informações

que possibilitarão a máxima captação de energia solar do painel, durante a maior parte do ano.

A energia solar na cidade de Belém poderá ser utilizada ao transformar a radiação eletromagnética que o sol emite e atinge a terra para a geração de energia elétrica através do painel fotovoltaico e com isso gerar enormes benefícios ao promover desenvolvimento sustentável pela utilização do potencial de radiação solar na localidade. Todavia, a conversão solar do local também depende das condições atmosféricas que interferem nesse aproveitamento, avaliada aqui através da precipitação e da comparação entre a radiação simulada (para céu limpo) e a radiação medida disponibilizada pelo INMET, o que leva em conta efeitos que afetam a radiação, como céu nublado.

O conhecimento das estimativas dos índices de incidência solar e o número diário de horas de radiação solar possibilitaram dados para uma análise qualitativa, agregando informações que possibilitarão planejar a máxima captação de energia solar do painel, durante a maior parte do ano. Podemos verificar que no período vespertino os índices de radiação reduzem, indicando que nesse período há maiores quantidades de nuvens e possivelmente precipitação. Portanto a conversão fotovoltaica no local também depende destas variáveis, como a precipitação e a nebulosidade, que provocam a redução da energia solar captada no decorrer do ano. Porém, através do trabalho realizado constatou-se que a conversão fotovoltaica é uma alternativa energética viável para Belém, mesmo com índices de precipitação altos, visto que boa parte do ano as condições são favoráveis para que a irradiação atinja a placa fotovoltaica. O trabalho constatou que os meses mais propícios para a máxima captação de energia solar na cidade de Belém são os de setembro a novembro, onde os parâmetros climáticos favorecem um melhor desempenho de sistemas fotovoltaicos.

### Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao MEC/SESu/DIFES pelo financiamento durante a realização deste estudo.

### Referências

BASTOS T.X.; PACHECO N.A.; NECHET D.; SÁ T.D.A. **Aspectos climáticos de Belém nos últimos cem anos**. Embrapa Amazônia Oriental: Documentos 128, Belém, 31 p, 2002.  
CAMUS, C.; EUSÉBIO, E. **Gestão de energia: energia solar**. Lisboa: ISEL, 2006.

- GONÇALVES, F.A.V.S. **Avaliação técnica e econômica da implantação de sistemas fotovoltaicos no Aeroporto Internacional de Belém**. 2013. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2013.
- GREENPRO. **Energia fotovoltaica: manual sobre tecnologias, projectos e instalação**. Lisboa, 2004, v. 2. Disponível em: <http://www.greenpro.de/po/fotovoltaico.pdf>. Acesso em: 14nov. 2015.
- INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). Disponível em: <http://www.inmet.gov.br>. Acesso em: 14 nov. 2015.
- MARQUES, K.; PEREIRA, T.P.; ASSIS, S.V. Análise do comportamento mensal do Índice de Limpeza. In: **XI Congresso Brasileiro de Meteorologia**, edição XI. Anais..., Rio de Janeiro, 2000.
- MESSINGER, R.A.; VENTRE, J. **Photovoltaic systems engineering**. 2. ed. Flórida: CRC Press LLC, cap. 2, p. 21-46, 2010.
- PEREIRA, F.A.S.; OLIVEIRA, M.A.S. **Curso técnico instalador de energia solar fotovoltaica**. Portugal: Publindústria, 2011.
- RAZYKOV, T.M.; FERKIDES C.S.; MOREL D.; STEFANAKOS E.; ULLAL H.S.; UPADHYAYA H.M. Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects. **Solar Energy**, v.85, p.1580-1608, 2011.
- RÜTHER, R. **Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial de geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública**. Florianópolis: UFSC; LABSOLAR, 2004.
- SHAYANI, R.A. Método para cálculo do rendimento global do sistema fotovoltaico. In: \_\_\_\_\_. **Medição do rendimento global de um sistema fotovoltaico isolado utilizando módulos de 32 células**. 2006. 184 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade de Brasília, Brasília, DF. cap. 3, p. 57-120, 2006.
- SILVA, V.A.M. **Influência da cobertura do céu na estimativa da radiação solar utilizando modelo digital de elevação**. 2011. 73 f. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental) - Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2011.
- VAREJÃO-SILVA, M.A. **Meteorologia e climatologia**. Recife, 2006, 463 p.
- VILAÇA, I.N.C. **Projecto de uma instalação fotovoltaica de 1,5 MW**. 2009. 95f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica Industrial e Computadores) - Universidade do Minho, 2009.
- WEBER, E.J. **Estimativa e mapeamento da radiação solar incidente em superfícies com topografia heterogênea na zona de produção vitivinícola Serra Gaúcha**. 2001. 145 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.