



## SIMULAÇÃO E VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DO GRAU DE INCIDÊNCIA DOS RAIOS SOLARES NA CIDADE DE BELÉM/PA.

MAYARA S. CAMPOS<sup>1</sup>, CAROLINE R. S. BRÍGIDO<sup>2</sup>, JOÃO A. C. SOARES<sup>3</sup>, LICINIUS D. S. ALCANTARA<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Discente do curso de Engenharia Ambiental & Energias Renováveis da Universidade Federal Rural da Amazônia, UFRA, Belém -PA, Fone: (91) 83383765, may.s.campos@hotmail.com.

<sup>2</sup> Discente do curso de Engenharia Ambiental & Energias Renováveis da Universidade Federal Rural da Amazônia, UFRA, Belém -PA

<sup>3</sup> Geólogo, Prof. Assistente, Instituto Ciberespacial, Universidade Federal Rural da Amazônia, UFRA, Belém – PA.

<sup>4</sup> Eng. Elétrico, Prof. Adjunto, Instituto Ciberespacial, Universidade Federal Rural da Amazônia, UFRA, Belém - PA.

Apresentado no XVIII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia – 02 a 06 de Setembro de 2013 – Centro de Convenções e Eventos Benedito Silva Nunes, Universidade Federal do Para, Belém, PA.

**RESUMO:** *A partir do modelo teórico de órbita e rotação terrestre em torno do Sol, foi desenvolvido um software que prediz a direção de incidência dos raios solares ao longo do ano e dos horários do dia, o qual é utilizado para estimar a melhor orientação de painéis fotovoltaicos durante sua instalação, onde foi tomada como referência a cidade de Belém/PA. Medidas de campo usando teodolito também foram realizadas, onde os dados coletados foram comparados com resultados simulados.*

**PALAVRAS-CHAVE:** *Meteorologia Aplicada, energia solar, otimização do aproveitamento energético.*

## SIMULATION AND EXPERIMENTAL VALIDATION OF SUNLIGHT INCIDENCE DEGREE IN THE CITY OF BELÉM/PA.

**ABSTRACT:** *From the theoretical model of terrestrial rotation and orbit around the Sun, a software that predicts the direction of incidence of sunlight throughout the year and hours of day, was developed and used to estimate the best disposal of photovoltaic panels for the city of Belém/PA. Field measurements using theodolite were also performed, where the data were compared with the simulated results.*

**KEYWORDS:** *Applied Meteorology, solar energy, energy use optimization.*

## INTRODUÇÃO

A radiação eletromagnética emitida pelo sol e que atinge a terra é 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 brasileira. A energia solar fotovoltaica tem um grande potencial no Brasil, devido à sua localização geográfica (RÜTHER, 2004). Há um grande potencial de aplicação da conversão fotovoltaica no meio rural, como por exemplo, o provimento de energia a residências isoladas e o bombeamento de água para consumo e irrigação.





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). Além da aplicação na área de conversão fotovoltaica, através do conhecimento da variação da incidência dos raios solares ao longo do dia é possível estimar o fotoperíodo ao longo do ano, o que pode ser útil em atividades agrícolas, pois o fotoperíodo interfere na fisiologia de muitas espécies vegetais (VAREJÃO-SILVA, 2006). O presente 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 constituídas 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.

## MATERIAL E MÉTODOS

A cidade de Belém está localizada próxima a linha do equador, com coordenadas geográficas: latitude de 1° 28' S, longitude de 48° 29' W e altitude 10 metros (m). Essa latitude demonstra a distância angular da localização terrestre, a partir da linha equador, medida ao longo do meridiano de Greenwich (VAREJÃO-SILVA, 2006). A aplicação dos valores na programação utilizada determinou a latitude terrestre  $\Phi$  (*phi*), sendo os minutos de grau convertidos em frações decimais de grau. Obtendo assim, o valor de -1,433°.

O ângulo de incidência do sol dependerá do horário do dia, assim como do dia do ano. Define-se então a princípio o ângulo horário ( $\omega$ ), 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°/24), então o ângulo horário em graus 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).

Adicionalmente se faz necessário o cálculo da declinação solar, pois a inclinação do eixo terrestre influencia o ângulo de zênite ( $\theta_z$ ) em diferentes latitudes, considerando o dia de Equinócio/Solstícios (eventos que estabelecem o início das estações do ano em todos os hemisférios) e o meio-dia solar verdadeiro (não necessariamente indicado pelo relógio) que é definido como exato momento da culminação do sol no meridiano da localidade em análise. Considerando que há uma variação estacional de inclinação do eixo terrestre de 23° 27' em relação à normal ao plano da eclíptica, a declinação solar “percebida” por um observador no equador terrestre, em um dado dia do ano ( $J$ ), é dada por meio de

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

onde,  $\delta$  (delta) é o valor da declinação solar em graus, e  $J$  indica o número de ordem dos dias (dias Julianos), onde  $J=1$  em primeiro de janeiro,  $J=80$  em 21 de março, etc.

À medida que a Terra realiza o movimento de translação, a projeção da inclinação fixa do eixo terrestre na direção do sol vai variando, fazendo a radiação incidir com ângulos que variam no decorrer do ano. Após o cálculo da declinação, é calculada a altitude solar, que é o ângulo vertical entre a direção de incidência solar e o plano horizontal (MESSENGER, 2010).

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

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





O ângulo  $\alpha$  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.

Por fim determinamos o ângulo do azimute ( $\Psi$ ) que é ângulo, medido no plano da superfície da terra, entre a direção do pólo norte e a projeção da trajetória do raio solar na superfície terrestre. Este ângulo é positivo se medido no sentido horário a partir do pólo norte (MESSENGER, 2010). O ângulo de azimute solar ( $\Psi$ ) é calculado por

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

A partir da teoria descrita acima, foi implementado o programa usando o *software* MATLAB 7.0. Assim foi gerado o gráfico que demonstra qual a variação do ângulo da altitude solar versus ângulo azimutal ao longo do dia, para a cidade de Belém. As medidas em campo foram realizadas através de um teodolito eletrônico marca FOIF, modelo DT-202C, para a determinação do ângulo de elevação solar e do ângulo azimutal (tomando como referência o Polo Norte). Utilizou-se um sensor bússola para fixar o norte magnético como referência para o teodolito. Então a luneta do teodolito era direcionada ao sol, que por motivos de evitar danos à visão humana, a luz solar que atravessa a luneta deve ser projetada numa folha de cartolina e avaliada indiretamente. Quando esta luz projetada atinge maior intensidade, isto significa que a luneta está alinhada com os raios solares e anotam-se então os ângulos de azimute e de elevação solar. Os dados medidos foram armazenados em computador para visualização e comparação com os ângulos teóricos obtidos com o programa desenvolvido.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

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 nos mesmos.

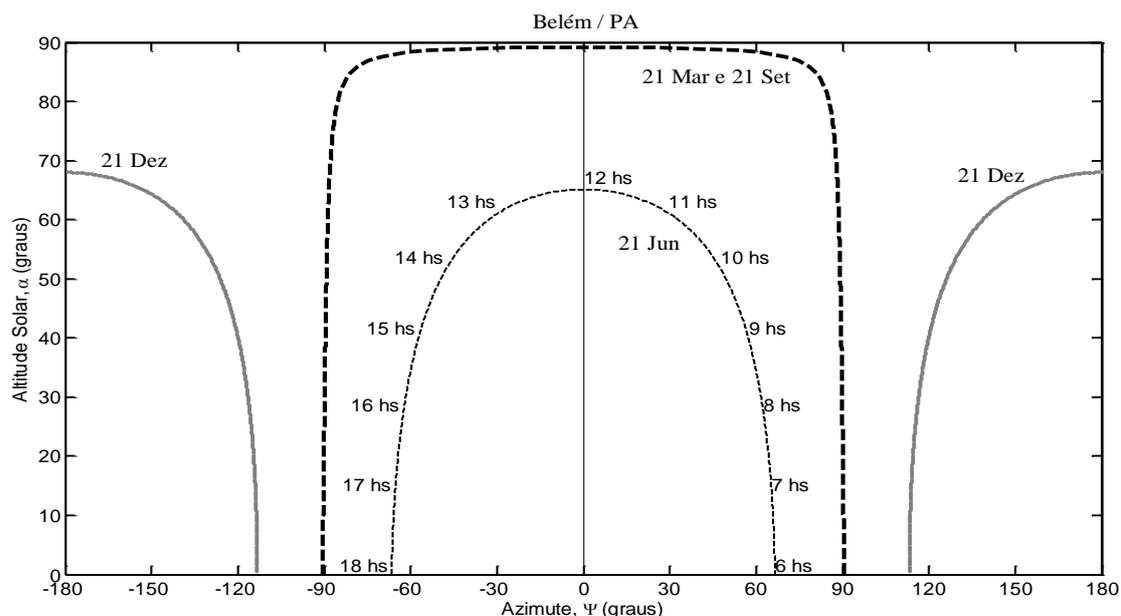
O gráfico obtido a partir da simulação, visualizado na Figura 1 apresenta a direção de incidência solar, em termos do ângulo de altitude solar ( $\alpha$ ) versus ângulo de azimute ( $\Psi$ ) em alguns dias, referentes aos solstícios e equinócios do ano, na cidade de Belém. O ângulo azimutal indica qual a melhor disposição angular do painel solar no plano do solo, em relação ao eixo 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 painel de um ângulo  $90^\circ - \alpha$ , a partir do plano horizontal, na direção do pólo sul. Na data 21 de dezembro, mostrada na Figura 1, percebe-se que o azimute central passa a ser,  $\Psi = 180^\circ$  (pólo sul). Esta mudança de orientação dos raios solares ocorre nesta época do ano, pois Belém se encontra em uma latitude terrestre próxima à linha do Equador.

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 conseguirem acompanhar essa dinâmica. Note que a



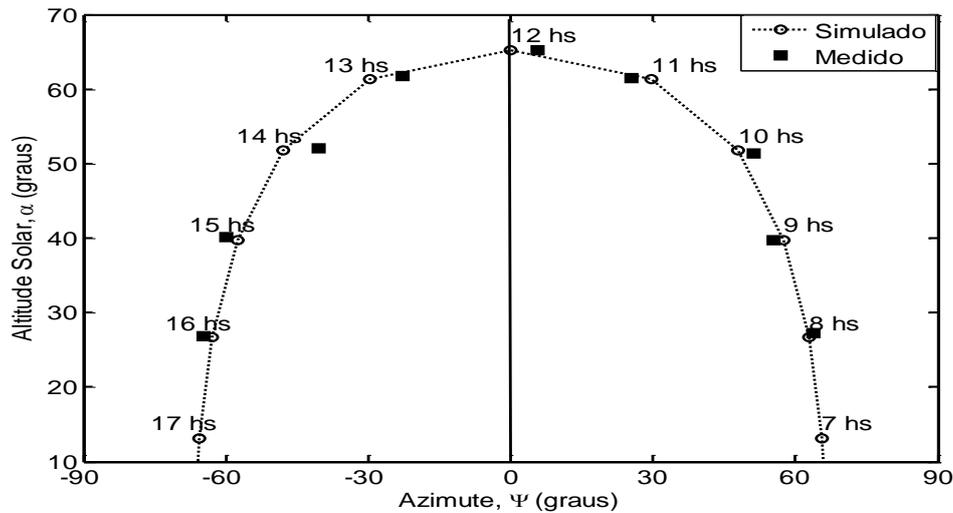
afirmação de que o sol nasce no leste ( $\Psi = 90^\circ$ ) e se põe no oeste ( $\Psi = -90^\circ$ ) é aproximada, pois isso apenas ocorrerá de fato nas datas de equinócio (21 de setembro e 21 de março), conforme pode ser visto na Fig. 1, datas nas quais o sol incide normalmente a região equatorial da Terra.

Na Figura 1, a disposição automática do horário do dia (uma opção do programa desenvolvido) foi ativada na curva para 21 de junho, onde nota-se que o sol nasce por volta das 06 horas e se põe por volta das 18 horas, apresentando uma excelente quantidade diária de horas de radiação solar (*daylight time*) para aproveitamento e conversão energética.



**Figura 1** – Altitude solar versus azimute para a cidade de Belém.

Como teste de validação, foram realizadas medidas de campo em uma área exposta à radiação solar na Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), no dia 21 de Junho de 2012, que corresponde  $J = 264$  na Equação (2). As medidas foram tomadas nos horários de 08:00 h às 16:00 h, medidos de uma em uma hora de acordo com o meio-dia solar verdadeiro. As medidas angulares com o equipamento foram realizadas no dia 21 de junho de 2012, desde 8 até às 16 horas com um intervalo de uma hora entre medidas consecutivas. A princípio, ao se traçar o gráfico de altitude *versus* azimute para os dados medidos, observou-se que o topo central da curva estava deslocado de aproximadamente  $20^\circ$  do centro para a direita. Após alguma ponderação sobre a questão, chegou-se à conclusão que isso de fato era devido ao efeito declinação magnética, pois o para o uso do teodolito é necessário referenciar o norte através de uma bússola para a medição dos ângulos. Porém, devido a distorções das linhas de campo magnético ao longo da superfície terrestre, haverá um desvio entre o norte magnético e o norte geográfico, onde a bússola apontará ao primeiro e não ao segundo. Este desvio é conhecido como declinação magnética, que varia com a localização terrestre. Ao realizar uma consulta em (NGDC, 2013), tomamos que a declinação magnética em Belém é de  $20^\circ$ , exatamente o valor angular no qual o gráfico das medidas estava descentralizado. Na Figura 2, o gráfico da prática de campo corrigido (eliminando o efeito da declinação magnética) é mostrado juntamente à curva simulada através do programa desenvolvido, onde se observa uma grande concordância entre os resultados medidos e os teóricos.



**Figura 2** – Medidas de campo e curvas simuladas (programa Matlab) de Altitude solar *versus* azimute para a cidade de Belém em 21 de junho.

## CONCLUSÕES

Este trabalho abordou a realização de simulações computacionais e de medidas experimentais para a estimativa do grau de incidência dos raios solares para a cidade de Belém. Esta prática pode ser estendida a qualquer localização geográfica terrestre, de modo que a informação obtida possa servir de suporte para uma orientação ótima dos painéis fotovoltaicos. Além disso, as estimativas dos ângulos de incidência solar e do fotoperíodo diário possibilitam resultados para uma análise qualitativa que possibilita uma melhor captação de energia solar nos painéis. Alternativamente, estas simulações também podem ter aplicação na agricultura, quando a estimativa do fotoperíodo for importante para avaliar a compatibilidade de certas culturas a uma determinada região em determinada época.

## REFERÊNCIAS:

- GREENPRO. **Energia fotovoltaica**: manual sobre tecnologias, projectos e instalação. Lisboa, 2004, v. 2. Disponível em: <<http://www.greenpro.de/po/fotovoltaico.pdf>>. Acesso em: 28 mai. 2013.
- MESSENGER, Roger A.; VENTRE, Jerry. **Photovoltaic systems engineering**. 3. ed. Florida: CRC Press LLC, 2010. cap. 2, p 21-46.
- NGDC (USA), The National Geophysical Data Center: Estimated value of magnetic declination, disponível em: <<http://www.ngdc.noaa.gov/geomag-web/#declination>> Acesso em: 20 mai. 2013.
- RÜTHER, R. **Edifícios solares fotovoltaicos**. Florianópolis: UFSC; LABSOLAR, 2004.
- SHAYANI, Rafael Amaral. **Medição do rendimento global de um sistema fotovoltaico isolado utilizando módulos de 32 células**. 2006. 184 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – UnB, Brasília, DF, 2006. cap. 3, p. 57-120.



**XVIII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia – XVIII CBA  
2013 e VII Reunião Latino Americana de Agrometeorologia**  
*Belém - PA, Brasil, 02 a 06 de Setembro 2013*  
**Cenários de Mudanças Climáticas e a Sustentabilidade  
Socioambiental e do Agronegócio na Amazônia**



VAREJÃO-SILVA, Mário Adelmo. **Meteorologia e climatologia**. Versão Digital 2, Recife, 2006, 463p. Disponível em: <[http://www.agritempo.gov.br/publish/publicacoes/livros/METEOROLOGIA\\_E\\_CLIMATOLOGIA\\_VD2\\_Mar\\_2006.pdf](http://www.agritempo.gov.br/publish/publicacoes/livros/METEOROLOGIA_E_CLIMATOLOGIA_VD2_Mar_2006.pdf)>. Acesso em: 22 mai. 2013.



Secretaria do XVIII Congresso Brasileiro e VII Reunião Latino Americana de Agrometeorologia – 2013  
Rua Augusto Corrêa, 01. Cidade Universitária Prof. José da Silveira Netto  
CEP 66075-900 Guamá. Belém - PA - Brasil  
<http://www.sbagro.org.br>

