



PROGRAMA PARA O CÁLCULO DA VARIAÇÃO DA DIREÇÃO DE INCIDÊNCIA DOS RAIOS SOLARES AO LONGO DO ANO

Mayara Soares Campos – may.s.campos@hotmail.com

Universidade Federal Rural da Amazônia, Departamento de Engenharia Ambiental & Energias Renováveis

Avenida Presidente Tancredo Neves, Nº 2501

CEP: 66.077-901 – Belém – Pará – Brasil

Licinius Dimitri Sá de Alcantara – licinius@amazonet.com.br

Universidade Federal Rural da Amazônia, Instituto Ciberespacial

Resumo: *A partir do modelo teórico de órbita e rotação terrestre em torno do Sol, foi desenvolvido um algoritmo que calcula a variação do ângulo de incidência dos raios solares para aplicação em sistemas fotovoltaicos. Como referência a esta análise, foram escolhidas três cidades brasileiras, a saber, Belém, Brasília e Porto Alegre, onde a primeira está situada aproximadamente na linha do equador e a variação de latitude entre duas cidades consecutivas é de aproximadamente 15° no sentido do polo sul. O programa foi desenvolvido em MatLab®, para realizar os cálculos e traçar os gráficos que servirão de suporte a esta análise. Além da aplicação ao projeto de sistemas fotovoltaicos, o software desenvolvido também tem valor educacional nas áreas da Física, Engenharia, Meteorologia e Ciência da Computação.*

Palavras-chave: *Órbita terrestre, energia solar, otimização da captação energética.*

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 (KAYGESUSZ, 1995). Pensando nisso, as maiores potências do mercado já investem para aproveitar o sol como fonte de energia. 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.

Contudo, como a superfície da Terra é quase esférica e possui uma inclinação do eixo polar imaginário em torno da qual a terra gira diariamente (movimento de rotação), fazendo com que a radiação solar não atinja a superfície da mesma forma, devido a reflexão e absorção dos raios pelas condições atmosféricas, e essa incidência da radiação também dependerá da latitude local e do instante de tempo (dia do ano e horário do dia). Mas, estima-se que mesmo assim, a energia solar incidente sobre a superfície terrestre seja da ordem de 10 mil vezes o consumo energético mundial (CRESESB, 2000). Por isso, torna-se vantajoso

utilizá-la de forma complementar, para atender a demanda de energia elétrica. Todavia, a posição do sol (intensidade luminosa) em relação aos painéis fotovoltaicos, influencia na eficiência dos mesmos, de modo que é preciso aproveitar melhor a radiação solar, colocando os painéis orientados no sentido de receber os raios solares.

De tal modo, é relevante observar que o território brasileiro é privilegiado por sua localização geográfica no que se refere à exposição ao sol. No qual essa insolação na média incide de modo diferente em cada localidade, por isso a importância de um estudo que venha demonstrar qual deve ser a disposição do painel fotovoltaico no horário de maior pico de energia solar, para assim capturar o maior nível de incidência da radiação no decorrer do ano. Como objetivo deste estudo, o conhecimento da variação da direção da 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 do sistema fotovoltaico. Para tal fim, é desenvolvido um programa em MATLAB para a obtenção de gráficos que permitem analisar a variação da direção de incidência dos raios solares, onde a aplicação do método é feita para três cidades brasileiras. A Seção 2 descreve a base teórica que serviu de suporte à elaboração de um programa computacional para a estimativa dos ângulos de incidência solar. Os resultados são discutidos na Seção 3 e as considerações finais estão contidas na Seção 4.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido para estimar ângulos nos quais painéis fotovoltaicos devem ser orientados para obter-se a melhor captação de energia solar em dada localização geográfica. Para estabelecer referenciais em determinadas posições do solo brasileiro, foram escolhidas três cidades, uma localizada próxima a linha do equador, Belém com coordenadas geográficas: latitude de 1° 28' S, longitude de 48° 29' W e altitude 10 metros (m). A segunda foi Brasília, Distrito Federal, com latitude de 15° 47' S, longitude de 47° 55' W e altitude 1152 m do nível do mar. A terceira foi a cidade de Porto Alegre com latitude de 30° 02' S, longitude de 51° 13' W e altitude de 10 m. Na aplicação dos valores da latitude terrestre Φ (ϕ), os minutos de grau foram convertidos em frações decimais de grau. Assim, obtêm-se os seguintes valores representados na Tabela 1:

Tabela 1 – Valores da latitude terrestre (Φ) para as três cidades consideradas.

CIDADE	LATITUDE TERRESTRE
Belém	- 1,433°
Brasília	- 15,02°
Porto Alegre	- 30,02°

A terra realiza dois movimentos principais: rotação (em torno do seu eixo) e o de translação (movimento da terra em torno da órbita elíptica). 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°/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 resultado é dado em graus.

Foi 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 (θ_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 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 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, δ (delta) é o valor da declinação solar em graus, e J indica o número de ordem dos dias (dias Julianos), considerando $J=1$ em primeiro de janeiro, $J=80$ em 21 de março etc, tomando-se fevereiro sempre como 28 dias, acarretando assim em 365 dias no ano.

Nas simulações foram escolhidas quatro datas dos dias Julianos, os quais foram 21 de março, 21 de junho, 21 de setembro e 21 de dezembro, que corresponde respectivamente a $J = 80$, $J = 172$, $J = 264$ e $J = 355$, as quais se referem a pontos destacados na órbita da terra em torno do sol, conforme pode ser visto na Figura 1. À medida que a Terra realiza o movimento de translação, a inclinação do eixo terrestre na direção da linha que liga a terra ao Sol vai variando. Isto faz que a radiação incida, em qualquer localidade, em ângulos que variam significativamente no decorrer do ano. Isto pode ser percebido pela Equação (2), a qual toma como referência a incidência solar no equador terrestre, ao meio dia e no decorrer do ano (ao se variar J).

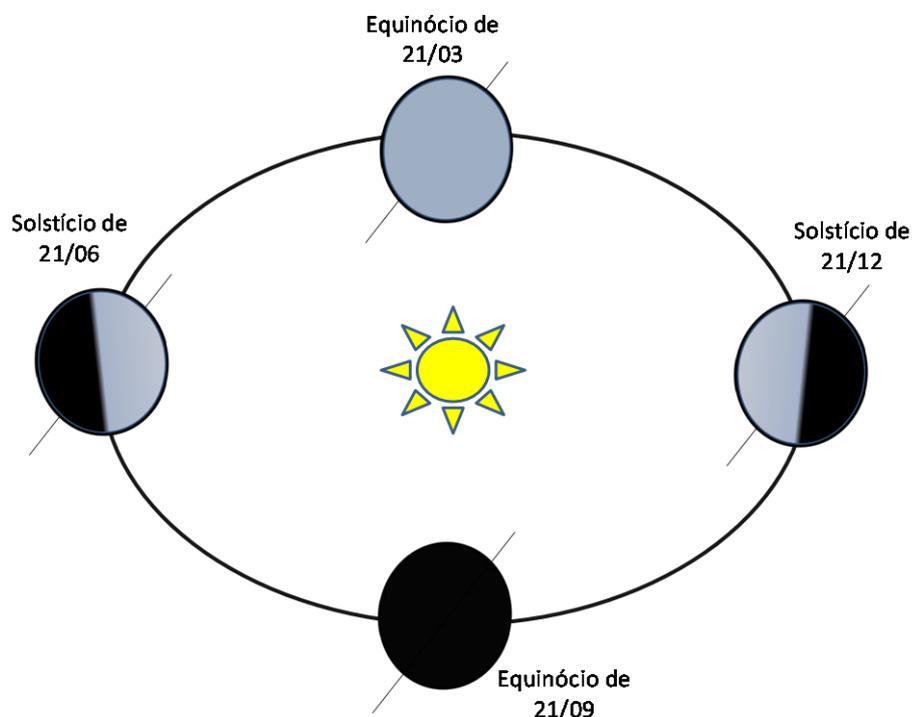


Figura 1 – Órbita da Terra em torno do Sol.

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 α (alfa) é o valor do ângulo da altitude solar, dado 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.

Por fim determinamos o ângulo do azimute (Ψ) que é 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 Figura 2). O ângulo de azimute solar é calculado por

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

onde Ψ é o ângulo do azimute. Um diagrama indicando os ângulos Ψ , α e θ_z é mostrado na Figura 2.

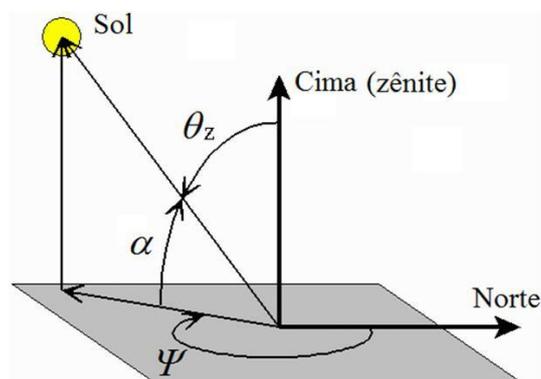


Figura 2 – Ângulos solares Ψ (Ângulo azimutal), α (altitude solar) e θ_z (ângulo de zênite).
 Note que $\theta_z = 90^\circ - \alpha$.

O valor do ângulo de zênite (θ_z) pode também ser obtido a partir do ângulo da latitude terrestre (Φ) subtraído da declinação solar (δ) para o dia do ano. Na verdade, θ_z indicará o ângulo ótimo de elevação do painel fotovoltaico, de modo que os raios solares incidam perpendicularmente ao plano do mesmo. Dessa forma,

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

Portanto, o ângulo de zênite θ_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 em torno do sol, conforme está ilustrado na Figura 1.

A Figura 3 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, foram gerados gráficos que demonstram qual a variação do ângulo da altitude solar versus ângulo azimutal ao longo do dia, para as cidades consideradas.

PROGRAMA PRINCIPAL

T ← 5:0,25:19; {vetor hora do dia (varia de 5 até 19 hs, em saltos de 0,25 h)}
phi ← valor de latitude terrestre (em graus);
N ← dia Juliano (um valor entre 1 e 365);
 [alfa psi] ← *alt_azm*(*T*, *phi*, *N*)
 {onde alfa é o vetor ângulo de altitude solar e psi é o vetor ângulo azimutal}
 Esboçar gráfico psi X alfa
 Associar texto das horas do dia aos pontos do gráfico (opção para o usuário)
 FIM DO PROGRAMA PRINCIPAL

FUNÇÃO [alfa psi] ← *alt_azm*(*T*, *phi*, *N*)

Calcular ω (ômega) pela Equação (1)
 Calcular δ (delta) pela Equação (2)
 Calcular α (alfa) pela Equação (3), utilizando ω , delta e *phi*
 Calcular Ψ (psi) pela Equação (4), utilizando alfa, delta e *phi*
 {alfa e psi são os parâmetros de saída da função, ambos vetores}
 FIM DA FUNÇÃO

Figura 3 – Algoritmo que descreve o fluxo lógico de execução do programa.

É relevante mencionar que este tipo de algoritmo é a base de *softwares* comerciais que predizem a ocorrência de sombras causadas por obstáculos durante os dias do ano, como o PVSYST (www.pvsyst.com) e o Shadow Analyser (www.drbaumresearch.com/prod38.htm).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

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 obter a incidência média normal dos raios solares nas suas superfícies.

Os gráficos obtidos a partir da simulação, visualizados nas Figuras 4-6 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, nas cidades de Belém, Brasília e Porto Alegre respectivamente. 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 ($\Psi = 0^\circ$). 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. Esta mudança de inclinação da face dos painéis segundo o outro pólo pode ser visto para a data 21 de dezembro em Belém e Brasília, conforme pode ser visto nas Figs. 4 e 5, respectivamente, pois estas cidades se encontram em uma latitude terrestre menor (em módulo) que a inclinação do eixo terrestre de $23,45^\circ$. Dessa forma, em Belém e Brasília, no solstício de 21 de junho, os raios solares provêm a partir do norte e no solstício de 21 de dezembro, eles provêm a partir do sul. A dinâmica no ano inteiro deve ser levada em conta na instalação dos painéis solares.

No caso de Porto Alegre (Figura 6), como sua latitude em módulo é superior a inclinação do eixo terrestre, então a elevação dos painéis solares é feita com suas faces voltadas à direção do pólo norte para qualquer dia do ano. Devido a isto, na Figura 6, as curvas para todas as datas estão centradas no azimute $\Psi = 0^\circ$ (Norte). Isto pode ser concluído também a partir da Figura 7, que fornece o ângulo de elevação do painel solar otimizada para o meio dia ao longo do ano inteiro. Nesta figura, ângulos positivos indicam uma elevação do painel segundo o pólo norte e ângulos negativos indicam uma elevação segundo o pólo sul. A Figura 7 já fornece diretamente o ângulo de elevação do painel, não sendo necessário calcular seu complemento. Retornando à Figura 6, note que a disposição automática do horário do dia (uma opção do programa desenvolvido) foi ativada nas curvas de todas as datas consideradas, onde se pode perceber que no dia 21 de dezembro (verão) em Porto Alegre, o sol nasce por volta das 05 horas e se põe por volta das 19 horas, enquanto que no dia 21 de junho (inverno), o sol nasce em torno das 07 horas e se põe aproximadamente às 17 horas, apresentando uma menor quantidade diária de horas de radiação solar (*daylight time*) para aproveitamento e conversão energética.

Como esperado, observa-se nos gráficos 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, α 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 α 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. Nota-se 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 nas Figs. 4, 5 e 6, datas nas quais o sol incide normalmente a região equatorial da Terra.

Através de uma análise geométrica simples, pode-se demonstrar o ângulo de inclinação do painel ilustrado na Figura 7 é igual ao ângulo de zênite solar, θ_z . Nos meses de novembro, dezembro, janeiro e fevereiro, Brasília possui ângulos θ_z negativos, de modo que os painéis terão suas faces voltadas para o hemisfério sul. No restante do ano, os painéis estarão voltados para o hemisfério norte, com um ângulo máximo de elevação de aproximadamente de $38,5^\circ$ em 21 de junho. Porto Alegre deverá ter sempre seus painéis voltados para hemisfério norte durante o ano, com uma inclinação que varia entre $6,6^\circ$ no verão e $53,5^\circ$ no inverno.

Em Belém, por estar próxima à linha do Equador, os períodos do ano nos quais os painéis devem estar voltados para o polo norte e para o polo sul são aproximadamente iguais em duração. A inclinação média dos painéis durante o ano é igual ao ângulo de latitude terrestre da localidade. Logo, Porto Alegre, por exemplo, terá em média seus painéis mais inclinados do que Belém ao longo do ano. Dessa forma, se não forem levados em conta previsões climáticas como a ocorrência de tempo nublado, o aproveitamento energético dos raios solares será maior na cidade de Belém, pois na média a direção de incidência solar se

aproxima mais do zênite e, portanto, a radiação solar atravessará uma massa menor de atmosfera, sofrendo menos os efeitos de absorção e difração de sua energia à medida que os raios solares atravessam a mesma.

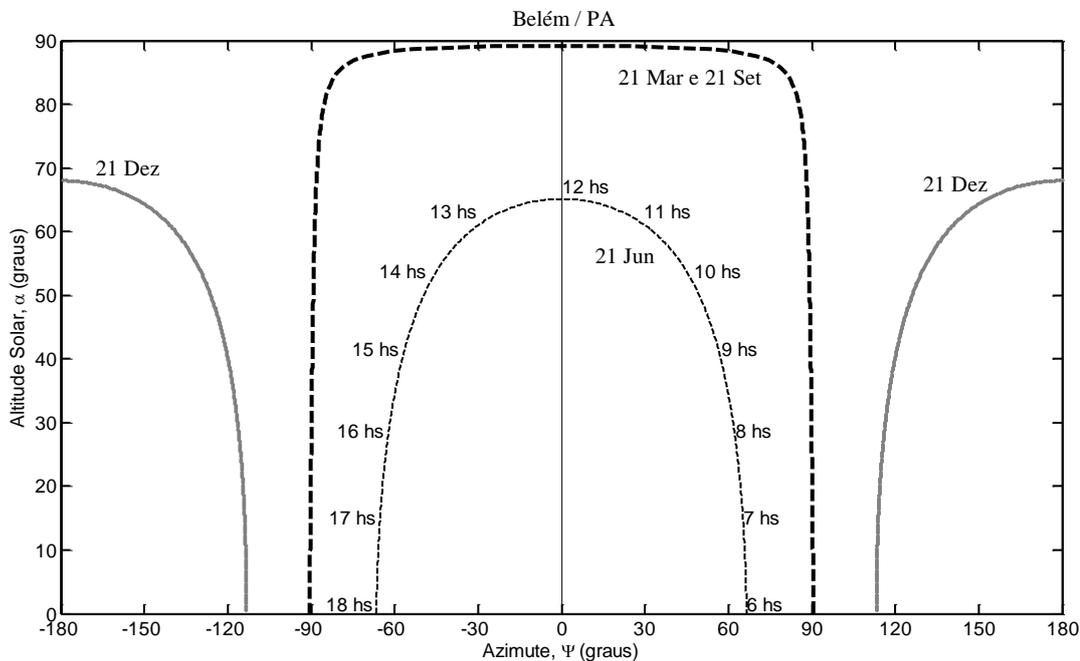


Figura 4 – Altitude solar versus azimute para a cidade de Belém.

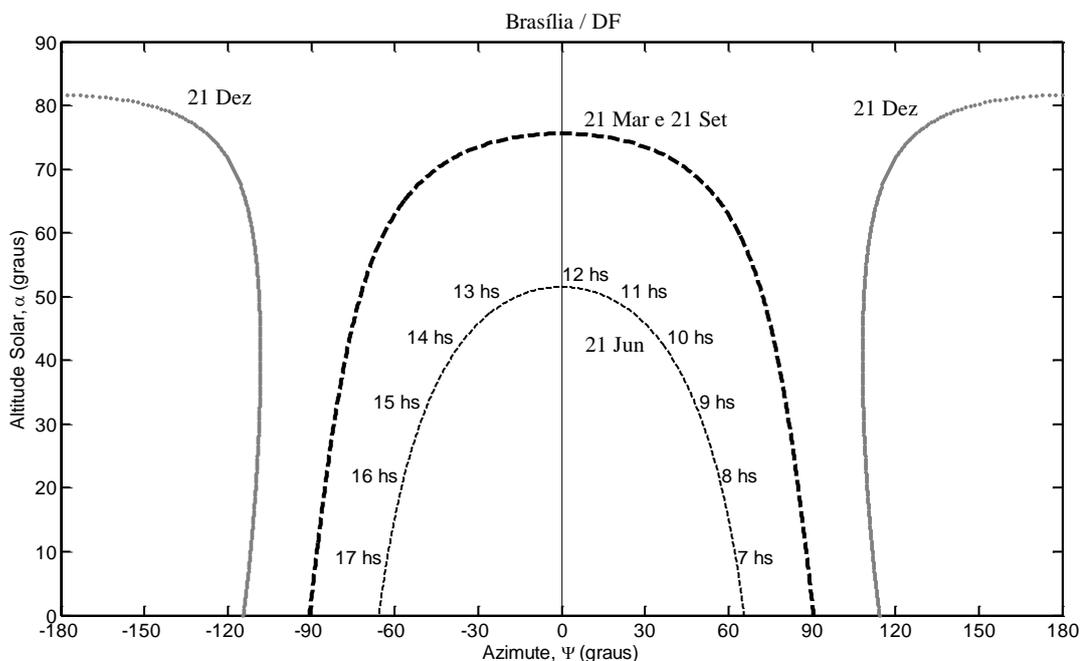


Figura 5 – Altitude solar versus azimute para a cidade de Brasília.

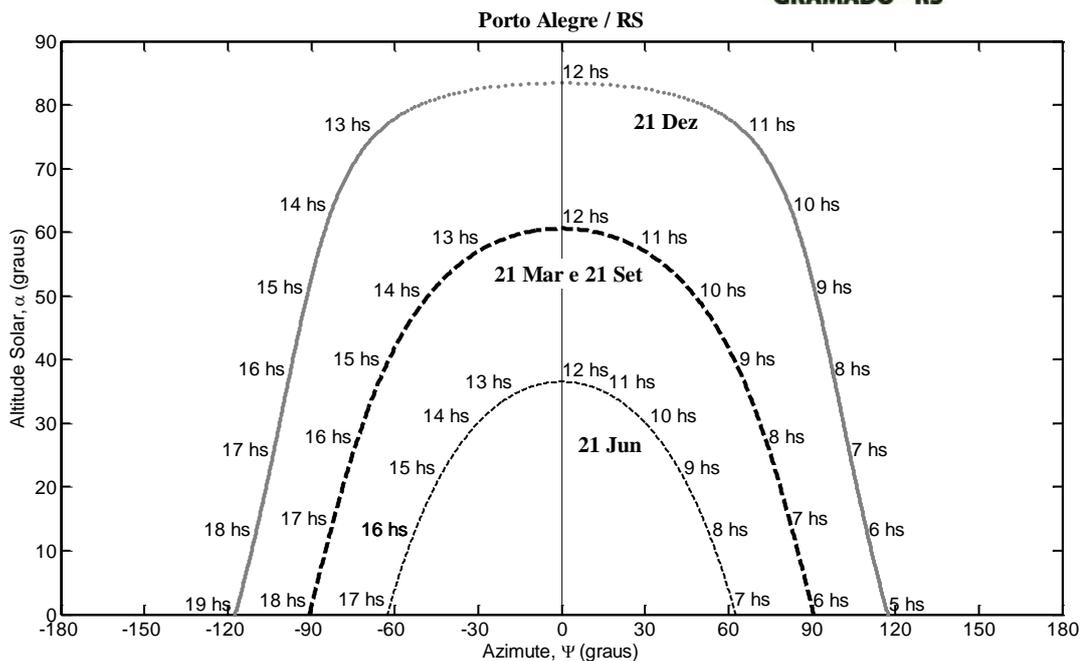


Figura 6 – Altitude Solar versus Azimute para a cidade de Porto Alegre

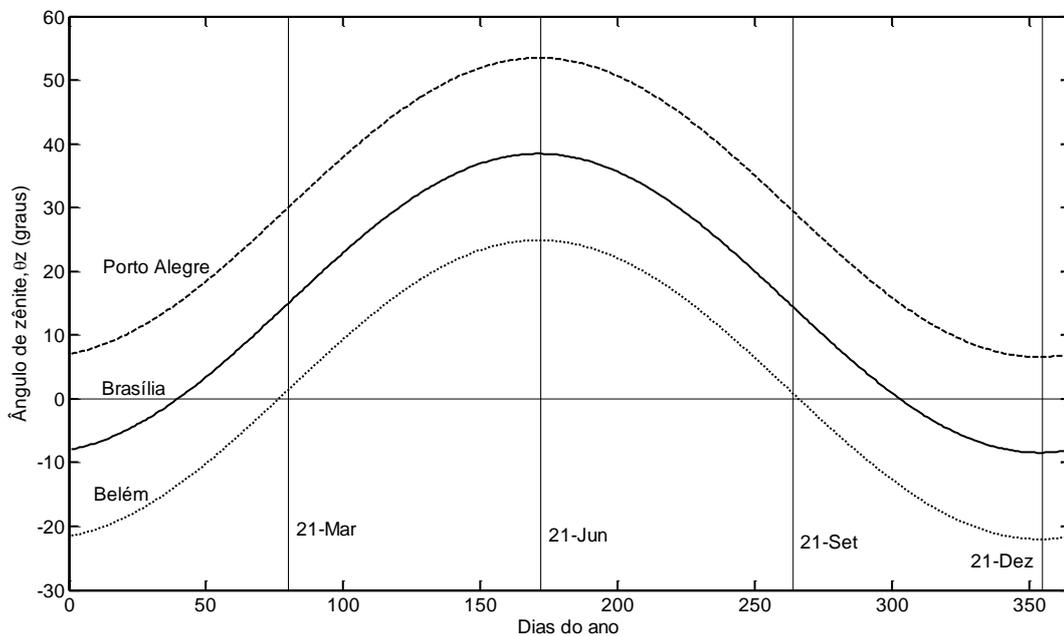


Figura 7 – Inclinação do painel fotovoltaico no decorrer do ano, otimizada para melhor captação de radiação ao meio dia.

A fim de obter-se uma validação 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. 8. Devido ao local estar situado no hemisfério norte, o centro de referência do gráfico (azimute zero) é o polo sul, ao contrário dos gráficos anteriores, onde o azimute zero representa o polo norte.

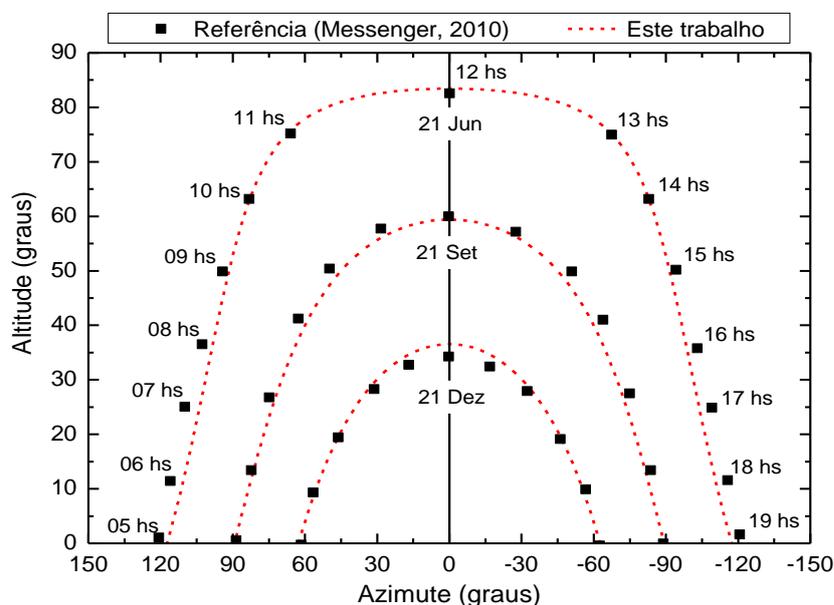


Figura 8 – Altitude versus azimute solar para a latitude 30° N.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi elaborado um programa que possibilita calcular a direção de incidência dos raios solares para qualquer localização geográfica terrestre, para qualquer dia do ano, em qualquer horário do dia, de modo que esta informação possa servir de suporte para uma orientação ótima dos painéis fotovoltaicos. Os parâmetros calculados a partir desses dados e que se mostraram suficientes a esta análise foram os ângulos de azimute e de altitude solar. Contudo, outros parâmetros interessantes podem ser extraídos indiretamente, como o ângulo de zênite solar e o número diário de horas de radiação solar (*daylight time*). Para validar a aplicabilidade do algoritmo, foram extraídos dados da incidência de radiação para três cidades brasileiras de latitudes distintas: Belém, Brasília e Porto Alegre. Através de uma análise qualitativa dos resultados, observou-se que eles são consistentes, interpretáveis e agregam uma informação significativa ao projeto de sistemas fotovoltaicos eficientes.

Através de uma análise completa dos resultados, observou-se que eles são consistentes, interpretáveis e podem ser aplicados tanto no planejamento da instalação de painéis fotovoltaicos, quanto de forma educacional, para ilustrar didaticamente a influência dos movimentos relativos da terra em torno do sol sobre a incidência de energia solar em uma dada localização terrestre, além de poder servir como apoio na disciplina Meteorologia e Climatologia do curso de Engenharia Ambiental da UFRA, onde o assunto é abordado devido à sua influência no clima. Como trabalho futuro, almeja-se estender o programa desenvolvido para calcular a variação de sombras provocadas por construções e obstáculos em um dado local, a partir de um modelo gráfico do mesmo, e assim estimar as regiões que estarão livres de sombras durante o ano inteiro e aptas para a instalação de painéis solares.

Agradecimentos

Ao CNPq/Vale, processo no. 455140/2012-0.

5 REFERÊNCIAS

CAMUS, Cristina; EUSÉBIO, Eduardo. **Gestão de Energia: energia solar**. Lisboa: ISEL, 2006, p.28.

GREENPRO. **Energia fotovoltaica: manual sobre tecnologias, projectos e instalação**. Lisboa, 2004, v. 2. Disponível em: < <http://www.greenpro.de/po/fotovoltaico.pdf>>. Acesso em: 07 jun. 2013.

MESSENGER, Roger A.; VENTRE, Jerry. **Photovoltaic systems engineering**. 3. ed. Flórida : CRC Press LLC, 2010. cap. 2, p 21-46.

RÜTHER, Ricardo. **Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial de geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública**. Florianópolis: UFSC; LABSOLAR, 2004.

SHAYANI, Rafael Amaral. 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, 2006. cap. 3, p. 57-120.

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>. Acesso em: 22 mai. 2013.

**SOFTWARE FOR THE CALCULATION OF SUNLIGHT INCIDENCE
DIRECTION VARIATION OVER THE YEAR**

Abstract: *From the theoretical model of terrestrial rotation and orbit around the Sun, we developed an algorithm that calculates the variation of the solar radiation incidence angle variation for use in photovoltaic systems. As a reference to this analysis, we selected three Brazilian cities, namely, Belém, Brasília and Porto Alegre, where the first one is located approximately at the Equator and the latitude variation between two consecutive cities is approximately 15 ° towards the south pole. The program was developed in MATLAB®, to perform calculations and draw graphs that will support this analysis. Besides its use on the design of photovoltaic systems, the developed software also has educational value in the areas of Physics, Engineering, Meteorology and Computer Science.*

Key-words: *Terrestrial orbit, solar energy, energy use optimization.*