

Analysis of Seasonal Aspects of Nebulosity on the Project of Fixed Photovoltaic Installations at the City of Belém, Brazil

L. Alcantara, and M. Campos

Abstract—By using INMET meteorological data, the Radiasol 2 program and calculations performed to estimate the solar zenith angle, this work aims to estimate the effect of the orientation of fixed photovoltaic panels, taking into account the seasonal aspects of the cloudiness at Belém city, Brazil. At first, the periods of the year of smaller and greater cloudiness are identified. Then, the average angles of solar zenith are estimated for the cloudiest season, for the clearest sky season and for the whole year. Thereafter, the Radiasol 2 program is used to estimate the incident solar energy density on the fixed panels inclined at these estimated zenith angles and during one year. This work intends to estimate and to analyze the impact of the solar panels orientation, considering periods of cloudiness, on the generation of electric energy. The results of solar radiation received at inclined planes show that if the photovoltaic panels are inclined considering the average angle of solar incidence for the least cloudy period of the year, a slight increase is observed in the solar radiation received annually at the panels plane, when compared with the radiation received for the calculated mean zenith angle regarding the cloudiest period.

Index Terms—Photovoltaic Panels, Meteorological Data, Incident Irradiation

I. INTRODUÇÃO

O BRASIL dispõe de bons níveis de incidência de radiação solar, devido sua localização geográfica, com valores de irradiação solar global incidente em qualquer região do território brasileiro superiores a maioria dos países da União Europeia, o que faz com que o País tenha um grande potencial para a energia solar fotovoltaica [1].

A energia solar alimenta todos os processos térmicos, dinâmicos e químicos, sejam eles naturais ou artificialmente desenvolvidos, com aplicação do conhecimento científico e tecnológico produzido pela sociedade. Dentre os processos naturais, a fotossíntese (produção de biomassa), o ciclo hidrológico (evaporação/ precipitação), a dinâmica da atmosfera e oceanos (ventos e correntes oceânicas) são exemplos comuns.

O aquecimento solar, a geração de eletricidade e a climatização de ambientes exemplificam os processos e tecnologias produzidos pelo desenvolvimento científico e tecnológico. Um avanço significativo foi conseguido nas últimas décadas tanto no aproveitamento térmico para atendimento de demandas residenciais ou processos industriais, quanto para conversão em eletricidade [2].

Com a crise de escassez que o setor elétrico brasileiro enfrentou entre 2013 e 2015, que expôs a fragilidade do sistema de geração no Brasil, o modelo energético empregado, que é altamente centralizado e amplamente dependente da geração hidrelétrica começou a ser questionado, ampliando o debate sobre a descentralização e diversificação da matriz energética [3]. Atualmente, o aproveitamento da energia solar tornou-se uma alternativa viável para complementação da matriz energética brasileira [4], podendo ser utilizada para obtenção de energia elétrica. Porém, embora o aproveitamento da energia solar seja uma preocupação bastante antiga em todo mundo, ainda hoje se busca o conhecimento sobre as variáveis climáticas em relação à eficiência energética do módulo [5].

Um fator muito importante para se dimensionar sistemas que fazem o aproveitamento da energia solar é o conhecimento de parâmetros que influenciam diretamente na quantidade de radiação que chega à superfície terrestre, e um desses parâmetros estudados é a nebulosidade que possui características distintas existentes em cada região [6]-[7].

É relevante a realização de estudos que venham a indicar qual deve ser a disposição do módulo, para capturar o maior nível de incidência da radiação no decorrer do ano, e como algumas características climáticas influenciam na quantidade de radiação que chega à superfície terrestre. A radiação solar que chega à superfície terrestre e incide sobre uma superfície

receptora para geração de energia é constituída por uma componente direta (ou de feixe) e por uma componente difusa [8]. Segundo os autores, essa radiação direta é aquela que provém diretamente do sol e produz sombras nítidas e a difusa é aquela proveniente de todas as direções e que atinge a superfície após sofrer espalhamento pela atmosfera terrestre.

Quanto mais limpa estiver a atmosfera, menor será a proporção da radiação solar que sofrerá o processo de difusão, e a direção dos raios será bem definida (unidirecional) e determinada pelo ângulo zenital (θ_z), no qual a espessura da camada atmosférica a ser atravessada pelos raios solares depende proporcionalmente deste ângulo. Do contrário, quando há um aumento da extensão do céu encoberto com nuvens, ocorre um acréscimo em intensidade da componente de

L. D. S Alcantara, Universidade Federal Rural da Amazônia, Instituto Ciberespacial, Belém, Pará, Brasil (e-mail: licinius@ufra.edu.br).

M. S. Campos, Universidade Federal do Pará, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Belém, Pará, Brasil (email: msc.campos@outlook.com).

radiação difusa e um decréscimo da componente de radiação direta [9]. Uma vez que, segundo [10], a radiação incidente na atmosfera ocasiona reflexão causada pelas nuvens, enquanto que a absorção é realizada por gases como vapor d'água, gás carbônico, ozônio, etc., e o espalhamento (difusão) pode ser seletivo, quando realizado por partículas com as mesmas dimensões do comprimento de onda incidente e não-seletivo causado por partícula sem suspensão (nuvens e aerossóis). O estudo realizado neste trabalho considera os dados de radiação solar na cidade de Belém/PA [11], que está situada na latitude $01^{\circ}27'21''$ Sul e longitude $48^{\circ}30'14''$ Oeste, e sua localização no território brasileiro é mostrada na Fig. 1.

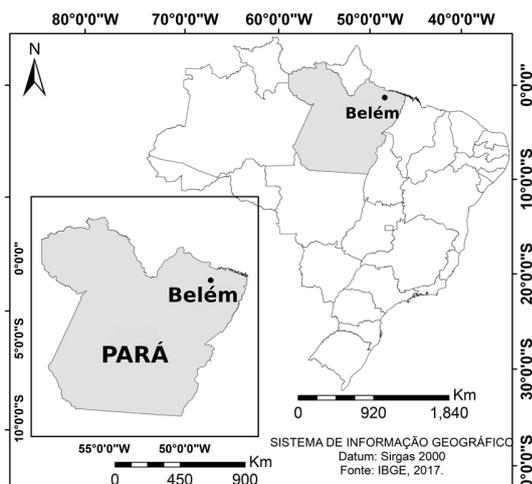


Fig. 1. Localização da cidade de Belém/PA.

As condições climáticas influenciam a radiação solar que chega à superfície em diferentes locais. Em Belém/PA, por exemplo, é favorável à radiação solar global por sua localização de baixa latitude, proporcionando que a altura do Sol seja sempre elevada às doze horas, com o menor ângulo de elevação solar acima de 60° , condicionando assim a um elevado potencial de radiação incidente nos meses de maior altitude solar [12]. Todavia, devido à localização de Belém próximo a foz do Rio Amazonas, há grande interferência do oceano causando uma elevada nebulosidade na região, com uma considerável concentração de nebulosidade na época chuvosa, 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 o que reduz a radiação solar incidente [13].

O Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) do Brasil armazena e disponibiliza dados medidos da irradiância solar global, a qual é a soma das componentes de radiação direta, difusa e refletida. Essa radiação interage com as partículas presentes na atmosfera, uma vez que, a radiação solar é uma variável meteorológica afetada pela presença de nuvens sobre o céu, como já mencionado por [13], 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 [10]. Portanto, com o intuito de analisar os valores de irradiação média global, o trabalho simulou a irradiação média

recebida pelos painéis solares nas diferentes inclinações usando o programa Radiasol 2, desenvolvido pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, que emprega modelos matemáticos baseado em informações meteorológicas de superfície de todo o Brasil, no qual, contém em seu banco de dados uma compilação de dados climatológicos do Atlas Solarimétrico do Brasil e de estações coletadas pelo programa *Solar and Wind Energy Resource Assessment* (SWERA), e interpola valores para o ponto desejado, com base nas coordenadas geográficas definidas pelo usuário [14].

O *software* Radiasol 2 se tornou bastante popular nacionalmente dentro meio científico e acadêmico na área de energia solar por ser eficaz, de interface amigável e de distribuição livre, sendo geralmente usado em trabalhos onde se faz necessária uma análise do potencial de captação de energia solar em planos de incidência em qualquer inclinação e para um determinado local do território nacional, como, por exemplo, em [15], [16]. Um resumo dos modelos matemáticos utilizados e as interfaces gráficas desenvolvidas para o programa Radiasol 2 são apresentados em [17]. Entretanto, o seu uso para avaliar o desempenho de captação de energia solar para inclinações de painéis levando em conta os períodos de nebulosidade no ano, ainda não foi documentado até então.

Em [18] são realizados cálculos de ângulos solares e estimativas de radiação solar para demonstrar o fato de que tais variáveis meteorológicas também são importantes para caracterizar com precisão o perfil de missão fotovoltaico, de modo a identificar o conjunto dos níveis de energia mínimos, médios e críticos de operação do sistema.

Visando um melhor aproveitamento da energia solar incidente, a análise 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 [12]. Outro aspecto leva em conta o aperfeiçoamento do processo de fabricação de células solares fotovoltaicas, resultando em um gradual decréscimo do custo de aquisição de módulos fotovoltaicos desde 1975 [19]. 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 [20].

A eficiência nominal do painel fotovoltaico, em porcentagem, é a sua eficiência de conversão da energia solar incidente em energia elétrica. Este valor depende dos materiais e da tecnologia adotada no processo de fabricação do painel. Por exemplo, um painel fotovoltaico construído com silício monocristalino geralmente possui uma eficiência maior do que um construído com silício policristalino. Este valor de eficiência é sempre informado na ficha técnica que acompanha cada painel. O tema abordado no artigo também é aplicável na otimização da captação de energia solar para conversão em calor (aquecimento de água), o que envolve outros tipos de

materiais e tecnologia. Um estudo sobre o potencial de incidência de radiação solar em planos inclinados com o auxílio do programa Radiasol e voltado para o aquecimento solar de água no Brasil, pode ser visto em [21]. Um sistema híbrido fotovoltaico/térmico é analisado em termos de eficiência em [22]. Contudo, na região Norte do Brasil, onde temperaturas altas são comuns, a aplicação em aquecimento não se faz tão requisitada e o tema de interesse principal de aproveitamento da energia solar e de pesquisas é acerca de sua conversão em energia elétrica.

Este trabalho visa estimar a densidade de irradiação solar captada para certas orientações de painéis fotovoltaicos fixos e para a cidade de Belém/PA, durante um ano. Estas orientações são calculadas tomando como referência a direção média de incidência solar anual, assim como os períodos do ano apresentam menor nebulosidade e maior nebulosidade. Desta forma, é possível fazer uma análise comparativa e indicar qual orientação fixa se tornará mais favorável à geração de energia fotovoltaica, levando em conta os aspectos sazonais de nebulosidade. O cálculo de ângulos de inclinações fixas para painéis fotovoltaicos levando em conta dados meteorológicos de nebulosidade, incluindo uma análise de desempenho estimado na geração de energia elétrica dos painéis para tais inclinações é uma proposta inédita deste trabalho.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção são descritos os passos elaborados que permitem analisar o desempenho de captação de irradiação solar por painéis fotovoltaicos e que são inclinados levando em conta os períodos do ano de menor nebulosidade, maior nebulosidade e sem considerar efeitos de nebulosidade (inclinação otimizada para o ano inteiro).

A Fig. 2 ilustra os valores de nebulosidade para diferentes cidades do Brasil que compõem as Normais Climatológicas do Brasil para o período de 1961-1990, disponibilizadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) [23]. 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. Observa-se que em média períodos de maior nebulosidade (menor insolação) ocorrem em Belém durante o primeiro semestre enquanto que o oposto ocorre durante o segundo semestre [12].

A Fig. 2 indica que em oito cidades consideradas em diferentes pontos do Brasil há uma sazonalidade no decorrer do ano, com períodos de maior nebulosidade no início do ano, com um decréscimo entre os meses junho a outubro, voltando a aumentar no final do ano.

A. Dados de Nebulosidade

A Fig. 3 mostra os valores de nebulosidade na cidade de Belém em uma escala de valores de 0 a 1 para os anos de 2010 a 2017, disponibilizados pela estação convencional local do INMET (código OMM 82191) situada nas coordenadas 1,43° S e 48,43° O a 10 metros de altitude. Optou-se por adotar curvas de nebulosidade relativas a alguns anos imediatamente anteriores à realização deste trabalho apenas para servir de critério na distinção entre os períodos de céu mais claro e de céu

mais encoberto por nuvens. Isto imprime um aspecto de maior contemporaneidade à esta decisão do que se fossem adotados dados mais antigos, como os das Normais Climatológicas do Brasil (1961-1990). Contudo, observa-se que em termos de nebulosidade observou-se um comportamento médio similar comparando-se o intervalo atual referido na Fig. 3 com o intervalo mais antigo referente às Normais Climatológicas.

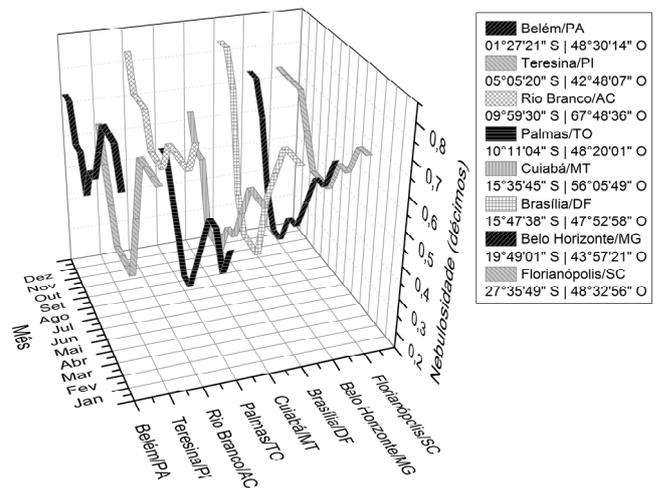


Fig. 2. Dados de nebulosidade das Normais Climatológicas do Brasil (1961-1990) para diferentes cidades.

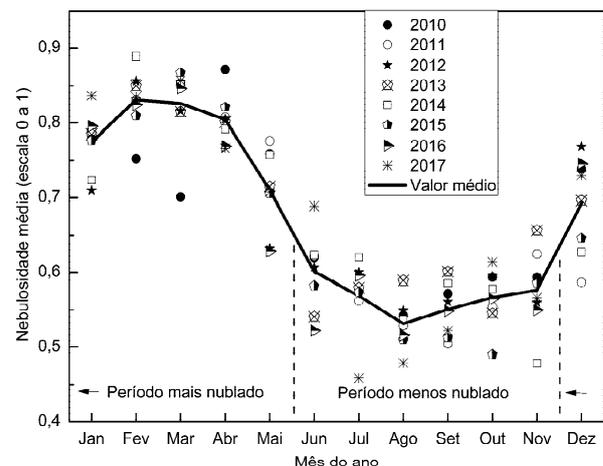


Fig. 3. Valores de nebulosidade média em Belém/PA nos anos de (2010 a 2017).

Através da curva de valor médio da nebulosidade, também exibida na Fig. 3, é possível identificar um período de maior nebulosidade que abrange dezembro a maio, e também um período de menor nebulosidade nos meses de junho a novembro. Para estes períodos serão calculados os ângulos de zênite solar médio, assim como o ângulo de zênite médio considerando o ano inteiro. Esses ângulos serão a referência para o ângulo de inclinação dos painéis solares fixos referente a cada período (mais nublado, menos nublado e ano inteiro).

Observa-se na Fig. 3 que podem ocorrer variações dos valores de nebulosidade média de um certo mês, para anos distintos. Ocorrências de fenômenos climáticos como El-Niño e La-Niña podem afetar o clima regional e global, mudando os

padrões de vento a nível mundial, e afetando assim, os regimes de chuva em regiões tropicais e de latitudes médias.

Estudos dos impactos de fenômenos climáticos em eventos extremos de precipitação na região urbana de Belém foram realizados por [24]. Em relação à variação sazonal de nebulosidade, as percepções obtidas a partir da Fig. 3 estão de acordo com o estudo realizado em [25], onde é afirmado que a variação sazonal da precipitação no Estado do Pará é caracterizada por uma estação chuvosa, que na maioria das localidades no Estado compreende os meses de dezembro a maio, e por uma estação menos chuvosa (estação seca) que corresponde geralmente ao período de junho a novembro.

B. Estimativa dos Ângulos de Zênite Médios

A Fig. 4 mostra os ângulos solares que descrevem a direção de incidência dos raios solares em relação à superfície local. Para que os raios incidam normalmente na superfície de um arranjo de painéis solares, este arranjo deve ser inclinado de um ângulo igual ao ângulo de zênite (θ_z) de modo a otimizar a captação da energia solar. Para equiparar a energia solar captada pelos painéis durante a manhã com a captada durante a tarde, o ângulo de azimute é fixado em $\Psi = 0^\circ$, que é o ângulo de azimute solar ao meio dia, momento do dia em que a irradiância solar é máxima. Como consequência, a obtenção de ângulos de zênite solares positivos indicam que o arranjo de painéis solares deve ser inclinado com a face voltada para o sentido do polo norte, e ângulos de zênite negativos indicam que o arranjo deve ser inclinado com a face voltada para o sentido do polo sul.

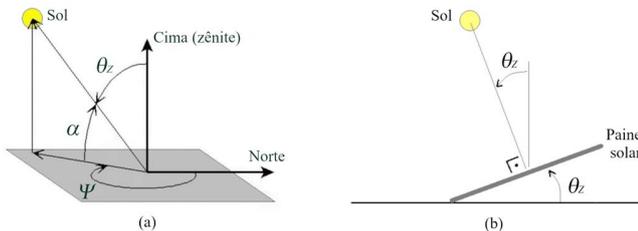


Fig. 4. (a) Ângulos solares Ψ (Ângulo de azimute), α (altitude solar) e θ_z (ângulo de zênite); (b) Inclinação do painel solar para incidência normal dos raios solares.

A Fig. 5 ilustra o ângulo de zênite solar estimado para todos os dias do ano em Belém, através de programa desenvolvido em [12], usando cálculos descritos em [19], onde também são destacados os períodos de maior e menor nebulosidade, identificados pela Fig. 3. Os ângulos de zênite para Porto Alegre/RS também são expostos apenas para comparação e referência. Observe que Belém, por estar nas proximidades da linha do Equador, possui valores de θ_z que alternam entre valores positivos e negativos de forma equilibrada. Entre aproximadamente 21 de março e 21 de setembro θ_z é positivo, o que significa que ao meio dia o Sol é visto ao olhar o céu na direção do polo norte. No entanto, entre aproximadamente 21 de setembro e 21 de março θ_z é negativo e neste caso o Sol é visto ao meio dia ao se olhar o céu no sentido do polo sul. Esta alternância não ocorre para a cidade de Porto Alegre, para a qual θ_z é sempre positivo e os raios solares são recebidos sempre

através dos céus do hemisfério norte.

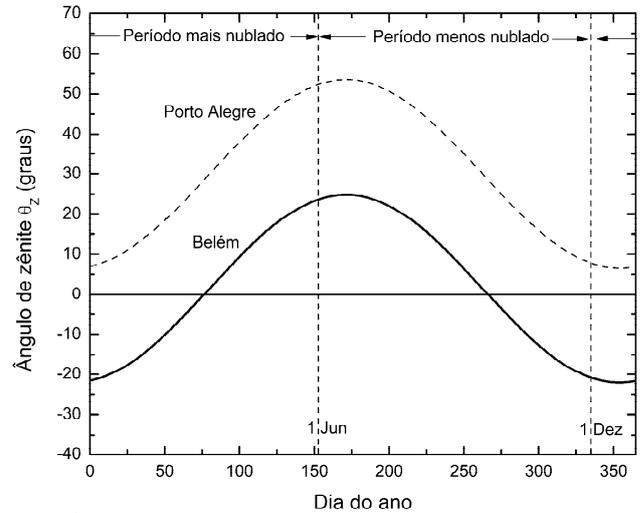


Fig. 5. Ângulos de zênite em função dos dias do ano, para $\Psi = 0^\circ$ (azimute solar ao meio dia).

A estimativa do ângulo de zênite médio é feita para três casos ou períodos, a saber, “período menos nublado”, “período mais nublado” e “ano inteiro”. Esta estimativa é feita através da fórmula de média para variáveis contínuas, expressa por (1), onde d_1 e d_2 são o dia inicial e o dia final, respectivamente, do período considerado.

$$\theta_{ZM} = \frac{1}{d_2 - d_1} \int_{d_1}^{d_2} \theta_z dt \quad (1)$$

A integral em (1) é resolvida numericamente (método trapezoidal) considerando a função θ_z da Fig. 5, para a cidade de Belém. Os parâmetros e valores médios obtidos para cada período são mostrados na Tabela I. Os valores de θ_{ZM} foram arredondados para inteiro.

TABELA I
ÂNGULOS DE ZÊNITE MÉDIOS

Período	d_1	d_2	θ_{ZM}
Menos Nublado	152	334	7°
Mais Nublado	335	365+151	-4°
Ano Inteiro	1	365	2°

O valor de d_2 para o período mais nublado leva em conta a periodicidade anual da função θ_z . O próximo passo é estimar a incidência de densidade de energia solar nas faces de painéis fotovoltaicos inclinados nos ângulos θ_{ZM} encontrados e expostos na Tabela I. Isto é feito através do programa Radiasol 2.

C. Uso do Programa Radiasol 2

A Fig. 6 mostra a interface gráfica e de inserção dos valores de entrada do programa Radiasol 2. No parâmetro de entrada “Inclinação do Módulo” (ou inclinação do arranjo de painéis), foram inseridos os valores (em módulo) obtidos para θ_{ZM} , um por simulação. No parâmetro “Desvio Azimutal” foi inserido 0° se θ_{ZM} é positivo e 180° se θ_{ZM} é negativo. A partir do mapa do

Brasil exibido na interface, selecionou-se o estado do Pará e então a localidade desejada no mesmo (Belém). Como origem dos dados da média de irradiação, foi selecionada a base de dados do projeto *Solar and Wind Energy Resource Assessment* (SWERA), que disponibilizam esses valores estimados a partir de 10 anos de dados colhidos desenvolvidos através de parceria entre a Divisão de Clima e Meio Ambiente do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais DMA/CPTEC/INPE e o Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal de Santa Catarina (LABSOLAR/UFSC), fazendo uso do modelo de transferência radiativa BRASIL-SR [3], bastante utilizado em estudos que informam o potencial da região para o aproveitamento energético solar [6], [26-27].

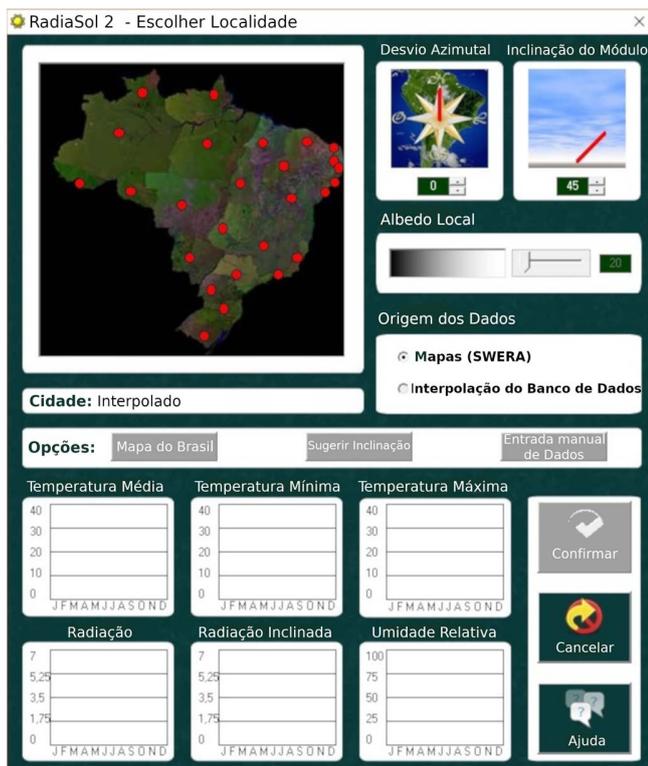


Fig. 6. Interface gráfica inicial do programa RadiaSol 2 [28].

O projeto SWERA, realizado no período de 2001 a 2011, teve como foco principal promover o levantamento de uma base de dados confiável e de alta qualidade visando auxiliar no planejamento e desenvolvimento de políticas públicas de incentivo a projetos nacionais de energia solar e eólica.

Foram extraídos então os resultados pertinentes a cada inclinação θ_{ZM} do módulo solar. Estes resultados são apresentados na próxima seção, assim como as discussões sobre os mesmos.

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados exibidos na Fig. 7 são de irradiação global recebida por painéis solares nos diferentes ângulos de inclinação e foram obtidos através do uso do software RadiaSol 2. Estes valores de irradiação levam em conta também a

influência estatística da nebulosidade local, pois a fonte de dados adotada (SWERA) é baseada em médias de dados medidos de radiação solar ao longo de 10 anos. Estes dados, por serem medidos, irão conter naturalmente o impacto da nebulosidade no valor da radiação solar.

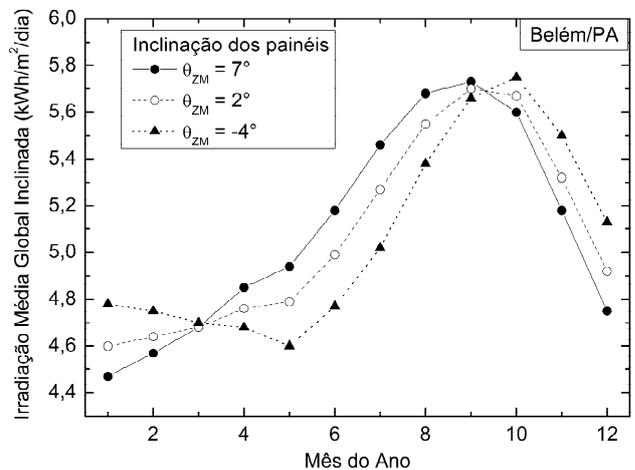


Fig. 7. Resultados de Irradiação média recebida pelos painéis solares nas diferentes inclinações usando o programa RadiaSol 2.

A partir dos valores de irradiação mostrados na Fig. 7 para painéis inclinados em -4° , observa-se que a irradiação recebida por painéis com tal orientação é sensivelmente maior em relação a painéis inclinados a 7° nos meses de outubro a março. Contudo o desempenho para esta mesma inclinação (-4°) é inferior durante os meses de abril a setembro. Os painéis orientados em 2° , considerando a média do ângulo de incidência solar para o ano inteiro, apresentaram um meio termo entre as inclinações considerando o período menos nublado (melhor desempenho anual) e o mais nublado (pior desempenho anual). Seria de se esperar que a inclinação otimizada para o período de ano inteiro apresentasse o melhor desempenho durante o ano inteiro, contudo vale lembrar que essa inclinação é obtida considerando o ângulo médio anual de incidência solar através da Eq. (1), o que despreza os efeitos sazonais da nebulosidade.

A Tabela II mostra os cálculos da soma de irradiação total anual recebidas em cada ângulo de inclinação. Observa-se que a diferença de irradiação recebida entre as inclinações otimizada para período menos nublado e mais nublado é de $11,68 \text{ kWh/m}^2$, que representa em termos relativos uma diferença de apenas $0,63\%$. Este acréscimo relativo também será sentido na geração de energia elétrica por meio de um arranjo de painéis fotovoltaicos, caso seja adotada a inclinação otimizada para o período menos nublado.

TABELA II
VALORES DA IRRADIAÇÃO TOTAL ANUAL RECEBIDA PELOS PAINÉIS NAS DIFERENTES INCLINAÇÕES

Inclinação dos painéis (θ_{ZM})	Inclinação refinada para período	Irradiação anual recebida (kWh/m^2)
7°	Menos Nublado	1859,14
-4°	Mais Nublado	1847,46
2°	Ano Inteiro	1852,90

Fazendo uma simples estimativa, se considerarmos um arranjo de 30 painéis de 325 Wp (modelo GCL-P6/72), cada um possuindo área de $1,94 \text{ m}^2$, então a área total do arranjo é de $58,2 \text{ m}^2$ e a diferença de energia solar incidente nas duas inclinações seria de $11,68 \times 58,2 = 679,78 \text{ kWh}$. Se for levada em conta a eficiência nominal do painel de 16,7% na conversão em energia elétrica, então inclinar este arranjo fotovoltaico em função do período menos nublado do ano (em um ângulo de 7°) resultaria em um acréscimo de $113,52 \text{ kWh}$ (ou de 0,63%) na produção de energia elétrica anual, em comparação se os painéis estivessem inclinados de -4° , que gerariam um total anual de $17956,20 \text{ kWh}$ de energia elétrica, conforme ilustrado na Fig. 8, a qual compara as estimativas da energia solar recebida e a energia elétrica gerada para as inclinações do arranjo do exemplo nos ângulos de 7° e -4° . Observa-se, entretanto, que uma vantagem em termos de produção de energia elétrica é obtida para grandes arranjos fotovoltaicos ou usinas fotovoltaicas. Para arranjos de poucos painéis e que ocupam uma área reduzida, a vantagem obtida na geração de energia elétrica pode ser considerada desprezível em termos absolutos. A Tabela III compara as estimativas de energia elétrica gerada anualmente pelo arranjo de 30 painéis citado como exemplo nas três distintas inclinações. Vale observar, pela Fig. 2, que a diferença de valores de nebulosidade entre os períodos mais nublado e menos nublado é menor em Belém/PA se comparada com outras cidades, como Teresina/PI e Brasília/DF. Se a diferença dos níveis de nebulosidade entre esses períodos fosse maior em Belém, provavelmente a diferença de energia elétrica gerada entre estas diferentes inclinações do arranjo fotovoltaico, estimada pela metodologia proposta, também seria maior.

TABELA III

VALORES DA ESTIMATIVA DE ENERGIA ELÉTRICA GERADA ANUALMENTE PELO ARRANJO DO EXEMPLO NAS DIFERENTES INCLINAÇÕES

Inclinação dos painéis (θ_{ZM})	Estimativa de energia elétrica gerada (kWh/m^2)	Desvio relativo em relação a $\theta_{ZM} = 2^\circ$
7°	18069,725	0,34 %
-4°	17956,203	-0,29 %
2°	18009,076	—

Em relação aos dados de irradiação solar, estes podem ser considerados altamente precisos por serem oriundos do projeto SWERA. Uma análise da precisão desses dados em território brasileiro e informações adicionais sobre o projeto SWERA são fornecidos em [29].

Após realizada a avaliação do potencial de captação de radiação solar em um local, o tipo e a quantidade de painéis a serem usados em uma instalação fotovoltaica depende também da demanda de consumo energético da residência ou estabelecimento comercial que será beneficiado. Ou seja, deve ser feita uma análise prévia dos equipamentos elétricos que serão assistidos pelo sistema, assim como da sua frequência de uso. Dessa forma, poderão haver grandes variações de dimensões entre sistemas fotovoltaicos, dependendo da necessidade do cliente.

O sistema de 30 painéis de 325 Wp citado como exemplo visa fornecer a um prédio ou estabelecimento aproximadamente

1500 kWh de energia elétrica por mês, dependendo da quantidade de radiação solar incidente no mês. Portanto, esse sistema foi proposto em cima de uma suposição de demanda energética que deve ser satisfeita usando um arranjo de painéis de um dado modelo comercial. Aqui é considerado um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFCR), o qual possui uma maior eficiência em relação a um sistema isolado [30] e não requer o uso de baterias. Estima-se que o custo de um sistema fotovoltaico conectado à rede usando 30 painéis de 325 Wp e ligados a um inversor de 8200 W (dispositivo elétrico que converte corrente contínua em corrente alternada), seja em torno de R\$ 55.000,00. Este valor estimado leva em conta o custo de equipamento consultado em lojas especializadas *online*, mais uma margem considerando eventuais custos de frete, mão de obra e instalação elétrica.

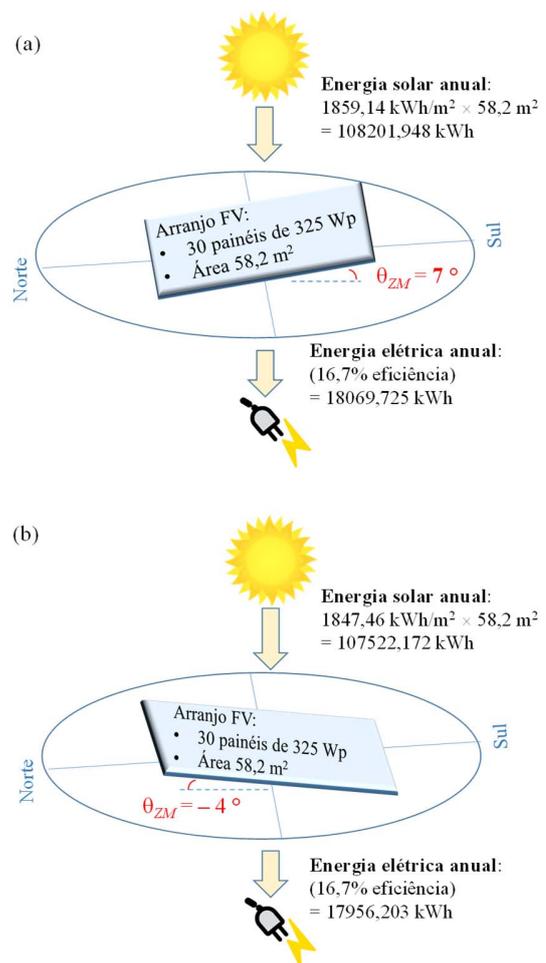


Fig. 8. Estimativa da energia elétrica produzida para duas inclinações distintas de um arranjo fotovoltaico específico: (a) para $\theta_{ZM} = 7^\circ$ e (b) para $\theta_{ZM} = -4^\circ$.

Segundo dados da Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica (ABRADEE) [31], o número de residências atendidas pelas Centrais Elétricas do Pará (CELPA) em 2016 foi de 2.095.448 e o consumo total residencial neste mesmo ano foi de 3746 GWh. Isto resulta em um consumo médio mensal de $148,97 \text{ kWh}$. Voltando ao arranjo fotovoltaico citado como exemplo, se levarmos em conta um acréscimo anual na

produção de energia de 113,52 kWh devido a uma melhor orientação deste arranjo, este acréscimo seria capaz de prover 76% do consumo médio mensal de uma residência dentro do período de um ano. Vale ressaltar que para este exemplo de sistema fotovoltaico, orientado conforme a estação menos nublada, a geração anual estimada de energia elétrica é de 18069,725 kWh anuais, conforme mostrado na Fig. 8(a), ou uma média de 1505,81 kWh/mês. Portanto, este sistema fotovoltaico de 30 painéis de 325 Wp seria capaz de atender 10 residências que consumissem a média de 148,97 kWh/mês.

Vale lembrar que esta análise se refere a Belém/PA. Para uma análise referente a outra localidade geográfica, onde ocorra períodos com acentuadas diferenças de nebulosidade, este procedimento deve ser realizado usando os dados meteorológicos e os ângulos de zênite solar médios desta localidade.

IV. CONCLUSÃO

Na cidade de Belém, em função de sua latitude local de 1,48°S, é comum adotar-se uma pequena inclinação para obter-se um melhor desempenho na captação de irradiação solar pelos painéis fotovoltaicos. Entretanto, a partir dos resultados deste trabalho levando em conta as variações anuais de nebulosidade e considerando grandes arranjos de painéis fotovoltaicos, é preferível aplicar esta pequena inclinação com as faces dos painéis voltadas para o polo norte, de modo a obter um desempenho anual um pouco melhor em termos de geração de energia elétrica.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) por disponibilizar publicamente os dados medidos através de suas estações meteorológicas automáticas e ao Laboratório de Energia Solar (LABSOL) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul pela disponibilização do software Radiansol 2.

REFERÊNCIAS

- [1] R. Rüther, *Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial de geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública*. Florianópolis, SC, Brasil: UFSC; LABSOLAR, 2004.
- [2] E. B. Pereira, F. R. Martins, A. R. Gonçalves, R. S. Costa, F. J. L. Lima, R. Rüther, S. L. Abreu, G. M. Tiepolo, S. V. Pereira, J. G. Souza, *Atlas Brasileiro de Energia Solar*. 2. ed. São José dos Campos, SP, Brasil, 2017.
- [3] A. B. A. Amaral, A. L. Z. L. G. Mendonça, A. A. M. Resende, E. E. Rego, "Solar Energy and Distributed Generation: 2015, a Year of Inflection in Brazil?," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 14 no. 8, pp. 3731-3737, Aug. 2016.
- [4] MME- Ministério de Minas e Energia. *Plano Nacional de Energia 2030*. Brasília, DF, Brasil: Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2007.
- [5] F. R. Martins, E. B. Pereira, S. A. B. Silva, S. L. Abreu, S. Colle, "Solar energy scenarios in Brazil, Part one: Resource assessment," *Energy Policy*, vol. 36, no. 8, pp. 2853-2864, 2008.
- [6] G. D. P. S. Silva, M. J. R. Souza, "Análise de variáveis de projeto de sistema solar fotovoltaico utilizando o modelo SAM: Uma comparação entre Belém, Fortaleza e Brasília," *Rev. Bras. Energ. Renov.*, vol. 5, no. 2, pp. 297-312, 2016, 10.5380/rber.v5i2.46220.
- [7] M. B. Teles, "Avaliação operacional das diferentes arquiteturas de interligação de geradores fotovoltaicos à rede elétrica de baixa tensão," Dissertação de Mestrado, Prog. Pós-Grad. Eng. Elétr., UFPA, Belém, PA, Brasil, 2017.
- [8] R. A. Hinrichs, M. Kleinbach, *Energia e meio ambiente*. 3.ed. São Paulo, SP, Brasil: Cengage Learning, 2009.
- [9] A. P. Souza, J. S. Escobedo, A. Dal Pai, E. N. Gomes, "Annual evolution of global, direct and diffuse radiation and fractions in tilted surfaces," *Eng. Agric.*, vol. 32, no. 2, pp. 247-260, Abr. 2012, 10.1590/S0100-69162012000200005.
- [10] M. A. Varejão-Silva, *Meteorologia e climatologia*. Recife, PE, Brasil, 2006. Versão Digital, 443p.
- [11] IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. [Online]. Disponível em: <https://downloads.ibge.gov.br/>. Acesso em 15 Mai. 2018.
- [12] M. S. Campos, L. D. S. Alcantara, "Interpretação dos efeitos de tempo nublado e chuvoso Sobre a Radiação Solar em Belém/PA para uso em sistemas fotovoltaicos," *Rev. Bras. Meteorol.*, vol. 31, no. 4(suppl.), pp. 570-579, Dez. 2016, 10.1590/0102-7786312314b20150065.
- [13] T. X. Bastos, N. A. Pacheco, D. Nechet, T. D. A. SÁ, "Aspectos climáticos de Belém nos últimos cem anos," *Embrapa Amazônia Oriental: Documentos 128*, Belém, PA, Brasil, Fev. 2002. [Online]. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/389773/1/OrientalDoc128.pdf>, Acessado em: 11 Nov. 2018.
- [14] J. T. Pinho, M. A. Galdino, "Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Edição Revisada e Atualizada," Cepel - CRESEB. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Mar. 2014. [Online]. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/manual_de_engenharia_fv_2014.pdf, Acessado em: 11 Nov. 2018.
- [15] E. L. Didoné, A. Wagner, O. R. P. Pereira, "Estratégias para edifícios de escritórios energia zero no Brasil com ênfase em BIPV," *Ambient. Constr.*, vol. 14, no. 3, pp. 27-42, Set. 2014, 10.1590/S1678-86212014000300003.
- [16] J. D. Mariano, H. M. Campos, F. S. Tonim, J. Urbanetz JR, E. F. Casagrande JR, "Performance of photovoltaic systems: Green office's case study approach," *Int. J. Energy Environ.*, vol.7, no. 2, pp. 123-136, Mar. 2016.
- [17] A. Krenzinger, R. C. Bugs, "Radianol 2 software para sintetizar dados de radiação solar," in: *Anais do IV ISES CLA e XVII SPES*, 2010, Cuzco, Peru, 2010, pp. 1-5.
- [18] J. M. Lenz, H. C. Sartori, J. R. Pinheiro, "Defining photovoltaic mission profile for the pre-design of static converters," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 16 no. 5, pp. 1402-1409, Mai. 2018.
- [19] R. A. Messenger, J. Ventre, "The Sun," in *Photovoltaic systems engineering*. 3. ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press LLC, pp. 21-46, 2010.
- [20] T. M. Razykov, C. S. Ferekides, D. Morel, E. Stefanakos, H. S. Ullal, H. M. Upadhyaya, "Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects," *Sol. Energy*, vol. 85, no. 8, pp. 1580-1608, Ago. 2011, 10.1016/j.solener.2010.12.002.
- [21] Í. A. G. Rispoli, M. G. Montaute, J. L. F. Cassuci, "Equacionamento simplificado para a estimativa da irradiação solar média anual em plano inclinado junto ao dimensionamento de sistemas de aquecimento solar de água no Brasil," *Av. energ. renov. medio ambiente*, vol. 19, pp. 11.01-11.12, 2015.
- [22] L. M. Rubio, J. P. Brito Filho, J. R. Henríquez, "Performance of a PV/T solar collector in a tropical monsoon climate city in Brazil," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 16 no. 1, pp. 140-147, Jan. 2018.
- [23] INMET- Instituto Nacional de Meteorologia. [Online]. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br>. Acesso em 19 Jun. 2018.
- [24] T. L. O. B. Campos, M. A. S. Mota, S. R. Q. Santos, "Eventos extremos de precipitação em Belém-PA: uma revisão de notícias históricas de jornais," *Rev. Ambient. Água*, vol. 10, no. 1, pp. 182-194, Mar. 2015, 10.4136/ambi-agua.1433.
- [25] B. C. Moraes, J. M. N. Costa, A. C. L. Costa, M. H. Costa, "Variação espacial e temporal da precipitação no Estado do Pará," *Acta Amaz.*, vol. 35, no. 2, pp. 207-214, Jun. 2005, 10.1590/S0044-59672005000200010.
- [26] H. S. Moraes Junior, R. L. Cavalcante, M. A. B. Galhardo, W. N. Macêdo, "Aplicação de Energia Solar Fotovoltaica-Estudo de Caso na Região Amazônica," *Rev. Geonorte*, vol. 2, no. 4, pp. 1303 - 1309, Nov. 2012.
- [27] I. P. Santos, R. Rüther, L. R. Nascimento, L. C. Pereira Junior, "Ábacos para análise simplificada de orientação e inclinação de sistemas solares fotovoltaicos integrados a edificações," in: *Anais do IV CBENS e V Conf. Lat. Am. Int. Sol. Energy Soc.*, São Paulo, SP, Brasil, 2012, pp. 1-8.
- [28] UFRGS, Radiansol, Porto Alegre, Laboratório de Energia Solar - GESTE-PROMECA, 2017.
- [29] F. R. Martins, E. B. Pereira, S. L. Abreu, "Satellite-derived solar resource maps for Brazil under SWERA project," *Sol. Energy*, vol. 81 no. 4, pp. 517-528, Abr. 2007, 10.1016/j.solener.2006.07.009.
- [30] G. Salazar, D. Carrión, "Characterization and modeling of the efficiency of photovoltaic systems," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 13 no. 8, pp. 2580-2586, Ago. 2015.

- [31] ABRADÉE- Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica. [Online]. Disponível em: <<http://www.abradee.com.br/setor-de-distribuicao/banco-de-dados/comercial>>. Acesso em 19 Jun. 2018.



Licinius D. S. Alcantara tem graduação em Tecnologia em Processamento de Dados pelo Centro Universitário do Estado do Pará (CESUPA) em 1995, graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará (UFPA) em 1998, Mestrado em Engenharia Elétrica pela UFPA em 2000 e Doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade de

São Paulo (USP) em 2004.

De 2005 a 2009, ele atuou em atividades de ensino e pesquisa na Universidade Federal do Pará, Belém, Brasil. Desde 2009 é Professor da Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, Brasil. Tem experiência na aplicação de modelos matemáticos e de simulação computacional em problemas diversos.



Mayara S. Campos possui graduação em Engenharia Ambiental e Energias Renováveis pela Universidade Federal Rural da Amazônia (2014), mestrado em Ciências Ambientais pela Universidade Federal do Pará (2018). Possui experiência em geociências, e tem interesse em modelos energéticos

autossustentáveis.