

# ANÁLISE DOS ASPECTOS SAZONAIS DA NEBULOSIDADE NO PROJETO DE INSTALAÇÕES FOTOVOLTAICAS FIXAS EM BRASÍLIA/DF

**Licinius Dimitri Sá de Alcantara** (UFRA) - licinius@ufra.edu.br

**Mayara Soares Campos** (UFPA) - msc.campos@outlook.com

## **Resumo:**

*Utilizando dados meteorológicos do INMET, do programa Radiasol 2, e de cálculos realizados para a estimativa do ângulo de zênite solar, este trabalho tem por objetivo estimar o efeito da orientação de painéis fotovoltaicos fixos levando em conta os aspectos sazonais da nebulosidade, para a cidade de Brasília/DF. A princípio, identificam-se os períodos do ano de menor e maior nebulosidade. Estima-se então os ângulos médios de zênite solar para a época mais nublada, para o ano inteiro e para a época de céu mais claro, os quais foram 4°, 16° e 22°, respectivamente. Usa-se então o programa Radiasol 2 para estimar a densidade de energia solar incidente durante um ano nos painéis inclinados de forma fixa para estes ângulos estimados. A partir desta metodologia, analisa-se a influência da orientação de painéis solares, considerando períodos de nebulosidade, na captação de irradiação. A cidade de Brasília foi escolhida para esta análise por apresentar grande diferença entre a nebulosidade medida no seu período mais nublado em relação à medida no seu período menos nublado do ano. Os resultados de irradiação solar recebida em planos inclinados para Brasília mostram que a reorientação dos painéis de 16° para 22°, com as faces dos painéis voltadas para o Norte, preservará a quantidade de irradiação solar anual captada, estimada em aproximadamente 2040 kWh/m<sup>2</sup>. A diferença é que a reorientação para 22° irá melhorar a captação da irradiação solar recebida nos meses de abril a agosto, mas diminuirá a irradiação recebida em novembro a fevereiro. Uma estratégia para melhorar a captação anual é proposta ao se estabelecer dois ângulos para a orientação dos painéis ao longo do ano, um mais adequado para o período menos nublado e o outro para o período mais nublado, onde se observou um aumento da irradiação anual para 2093,20 kWh/m<sup>2</sup>.*

**Palavras-chave:** *Painéis Fotovoltaicos, Dados Meteorológicos, Irradiação Incidente*

**Área temática:** *Radiação Solar*

**Subárea temática:** *Recursos Solares e Meteorologia da Radiação Solar*

# ANÁLISE DOS ASPECTOS SAZONAIS DA NEBULOSIDADE NO PROJETO DE INSTALAÇÕES FOTOVOLTAICAS FIXAS EM BRASÍLIA/DF

Licinius Dimitri Sá de Alcantara – licinius@ufra.edu.br

Universidade Federal Rural da Amazônia, Instituto Ciberespacial

Mayara Soares Campos – msc.campos@outlook.com

Universidade Federal do Pará, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais

**Resumo.** Utilizando dados meteorológicos do INMET, do programa Radiasol 2, e de cálculos realizados para a estimativa do ângulo de zênite solar, este trabalho tem por objetivo estimar o efeito da orientação de painéis fotovoltaicos fixos levando em conta os aspectos sazonais da nebulosidade, para a cidade de Brasília/DF. A princípio, identificam-se os períodos do ano de menor e maior nebulosidade. Estima-se então os ângulos médios de zênite solar para a época mais nublada, para o ano inteiro e para a época de céu mais claro, os quais foram 4°, 16° e 22°, respectivamente. Usa-se então o programa Radiasol 2 para estimar a densidade de energia solar incidente durante um ano nos painéis inclinados de forma fixa para estes ângulos estimados. A partir desta metodologia, analisa-se a influência da orientação de painéis solares, considerando períodos de nebulosidade, na captação de irradiação. A cidade de Brasília foi escolhida para esta análise por apresentar grande diferença entre a nebulosidade medida no seu período mais nublado em relação à medida no seu período menos nublado do ano. Os resultados de irradiação solar recebida em planos inclinados para Brasília mostram que a reorientação dos painéis de 16° para 22°, com as faces dos painéis voltadas para o Norte, preservará a quantidade de irradiação solar anual captada, estimada em aproximadamente 2040 kWh/m<sup>2</sup>. A diferença é que a reorientação para 22° irá melhorar a captação da irradiação solar recebida nos meses de abril a agosto, mas diminuirá a irradiação recebida em novembro a fevereiro. Uma estratégia para melhorar a captação anual é proposta ao se estabelecer dois ângulos para a orientação dos painéis ao longo do ano, um mais adequado para o período menos nublado e o outro para o período mais nublado, onde se observou um aumento da irradiação anual para 2093,20 kWh/m<sup>2</sup>.

**Palavras-chave:** Painéis Fotovoltaicos, Dados Meteorológicos, Irradiação Incidente

## 1. 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 explorar a energia solar fotovoltaica (Rüther, 2004). 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 (Pereira et al., 2017).

Atualmente, o aproveitamento da energia solar tornou-se uma alternativa viável para complementação da matriz energética brasileira (MME, 2007), 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 faz necessário ampliar o conhecimento sobre as variáveis climáticas em relação à eficiência energética do módulo (Martins et al., 2008). Um fator muito importante para se dimensionar sistemas baseados em 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, a qual possui características distintas existentes em cada região (Silva e Souza, 2016; Teles, 2017). A nebulosidade pode ser quantificada em um parâmetro técnico que mede o nível de área de céu encoberto pelas nuvens, adotando uma escala de 0 (céu limpo) a 1 (céu totalmente nublado), por exemplo.

É relevante a realização de estudos sobre ângulos solares, que venham a indicar qual deve ser à disposição do módulo para capturar o maior nível de incidência da radiação no decorrer do ano. Também é importante investigar como algumas características climáticas influenciam na quantidade de radiação que chega à superfície terrestre. Esta radiação, a qual também incide sobre uma superfície receptora para geração de energia, é constituída por uma componente direta (ou de feixe) e por uma componente difusa (Hinrichs e Kleinbach, 2009). 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 ( $\theta_z$ ). A espessura da camada atmosférica a ser atravessada pelos raios solares depende proporcionalmente de  $\theta_z$ . Do contrário, quando há um aumento da extensão do céu encoberto com nuvens, ocorre um acréscimo em intensidade da componente de radiação difusa e um decréscimo da componente de radiação direta (Souza et al., 2012). Uma vez que, segundo (Varejão-Silva, 2006), 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. O espalhamento (difusão) pode ser seletivo, quando realizado por partículas com as mesmas dimensões que o 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 Brasília/DF, que está situada na latitude 15°47'38" Sul e longitude 47°52'58" Oeste. De acordo com estudo realizado pela Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (Suaia, 2015), a potencialidade de captação de radiação solar para o Centro-Oeste é equivalente à encontrada nas regiões Nordeste e Sudeste, sendo que uma das melhores irradiações do Centro-Oeste e do Brasil se encontra no Distrito Federal. Contudo, a matriz energética do Distrito Federal é majoritariamente dominada por energia hidrelétrica, sendo que desta cerca de 80% é proveniente de Furnas e 20% de Itaipu. Isto torna o Distrito Federal vulnerável aos potenciais efeitos da mudança do clima no fornecimento de energia, considerando sua dependência do Sistema Interligado Nacional e os impactos climáticos esperados por sobre a maioria das hidrelétricas brasileiras (GT Brasília Solar, 2016).

A irradiância solar global 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 Bastos et al., (2002). Estas partículas atuam como atenuadoras da radiação solar ao absorver quase toda a radiação no comprimento de onda do infravermelho, e de atenuar a radiação direta (Varejão-Silva, 2006). 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. Este programa 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 (Pinho e Galdino, 2014).

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 (Didoné et al., 2014; Mariano et al., 2016). Krenzinger e Bugs (2010) apresentam um resumo dos modelos matemáticos utilizados e as interfaces gráficas desenvolvidas para o programa Radiasol 2. 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.

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 (Campos e Alcantara, 2016). 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 (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).

Este trabalho visa estimar a energia solar captada para certas orientações de painéis fotovoltaicos fixos para a cidade de Brasília/DF, 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 propor reajustes na orientação dos painéis caso isso se faça pertinente, levando em conta os aspectos sazonais de nebulosidade.

## 2. MATERIAL 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 fixa otimizada para o ano inteiro).

A Fig. 1 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). A nebulosidade mede o nível de área de céu encoberto pelas nuvens em uma escala de 0 (céu limpo) a 1 (céu totalmente nublado). 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 um período contínuo de menor nebulosidade (maior insolação) ocorre em Brasília, o qual se estende pelos meses centrais do ano enquanto que períodos de maior nebulosidade ocorrem nos meses iniciais e finais do período anual.

A Fig. 1 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.

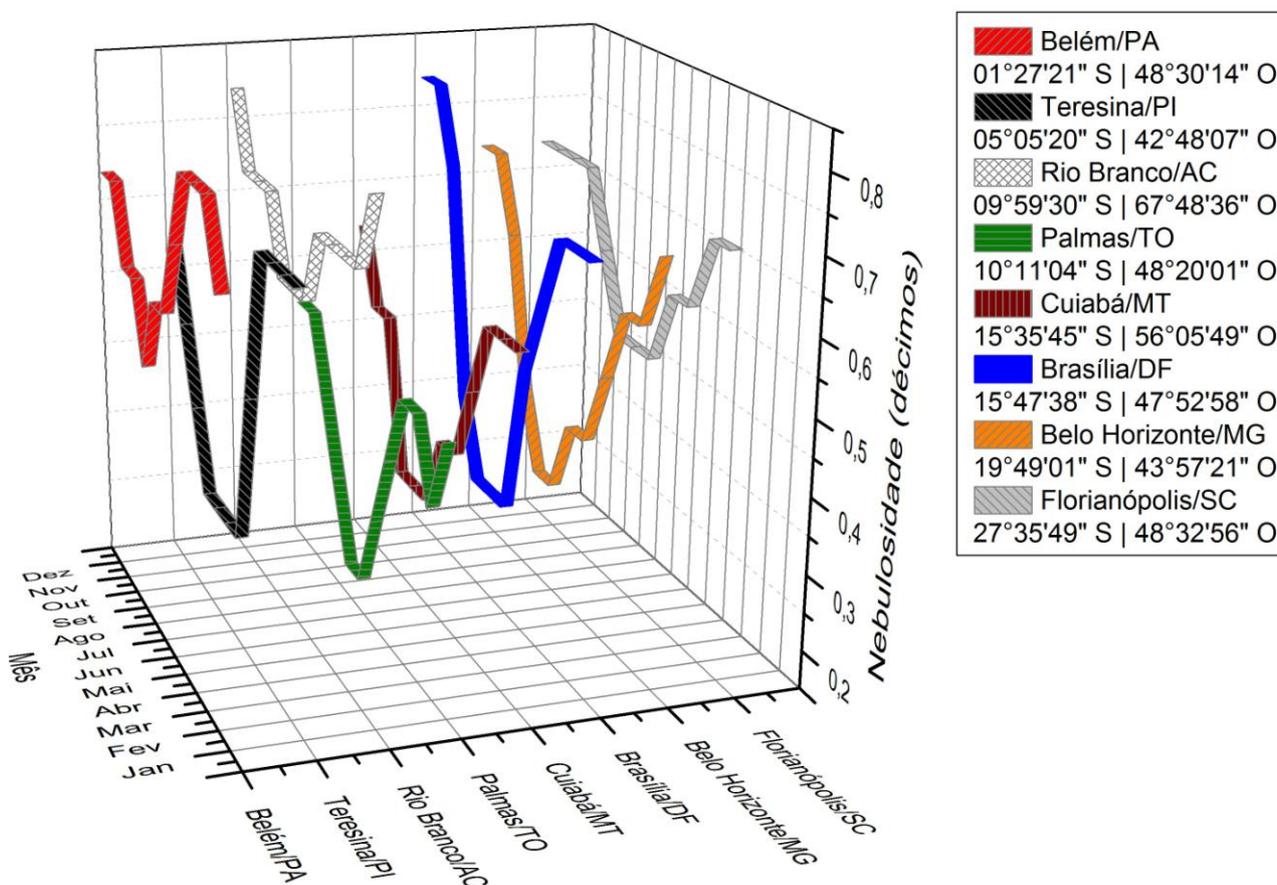


Figura 1 - Dados de nebulosidade das Normais Climatológicas do Brasil (1961-1990) para diferentes cidades.

## 2.1 Dados de nebulosidade

A Fig. 2 mostra os valores de nebulosidade na capital federal em uma escala de valores de 0 a 1 para os anos de 2009 a 2018, disponibilizados pela estação convencional local do INMET (código OMM 83377) situada nas coordenadas 15,78° S e 47,92° O a 1159,54 metros de altitude. Optou-se por adotar curvas de nebulosidade relativas a dez 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).

Através da curva de valor médio mensal da nebulosidade, também exibida na Fig. 2, e considerando o valor anual computado de 0,56 como limiar de decisão, é possível identificar um período de maior nebulosidade que abrange outubro a abril, e também um período de menor nebulosidade nos meses de maio a setembro. 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. 2 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.

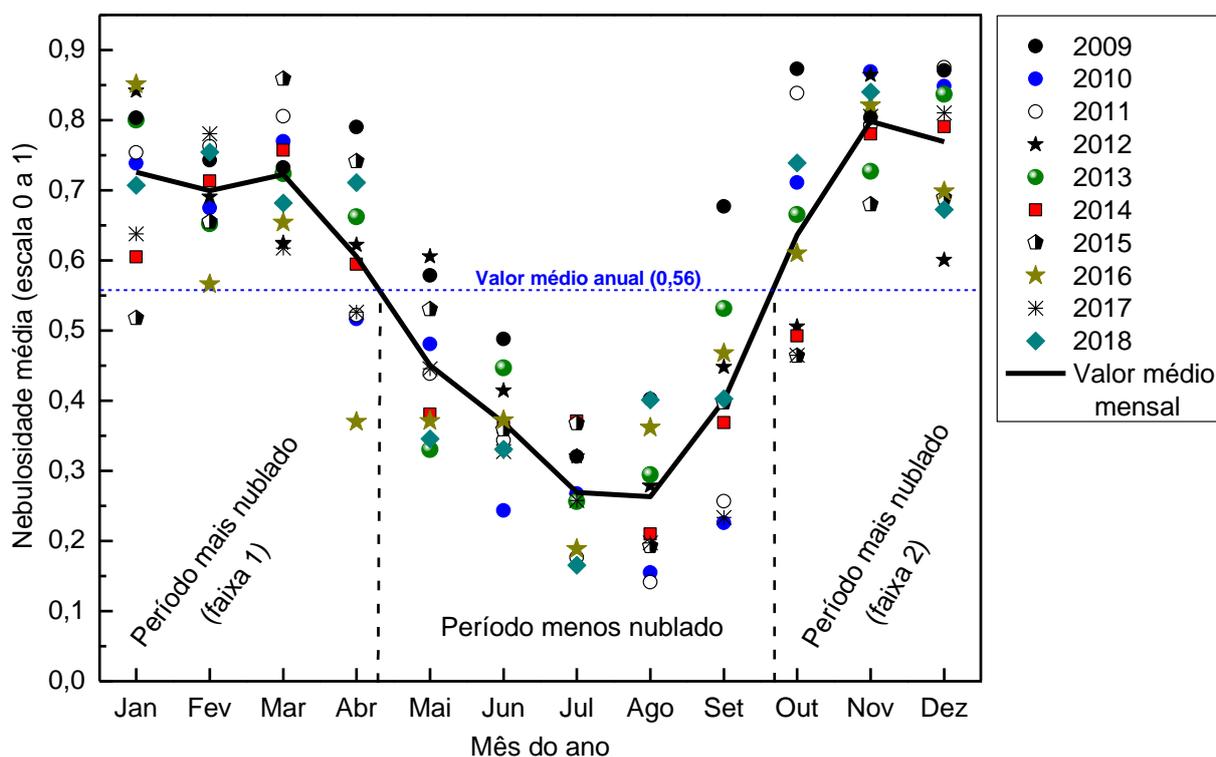


Figura 2 - Valores de nebulosidade média em Brasília/DF nos anos de (2009 a 2018).

## 2.2 Estimativa dos ângulos de zênite médios

A Fig. 3 mostra os ângulos solares que descrevem a direção de incidência dos raios solares em relação à superfície local. Para que os raios solares incidam normalmente na superfície de um arranjo de painéis solares, este arranjo deve ser inclinado de um ângulo igual ao ângulo de zênite ( $\theta_z$ ) de modo a otimizar a captação da energia solar. Para equiparar a energia solar captada pelos painéis durante a manhã com a captada durante à 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 Pólo Norte, e ângulos de zênite negativos indicam que o arranjo deve ser inclinado com a face voltada para o sentido do Pólo Sul.

A Fig. 4 ilustra o ângulo de zênite solar estimado para todos os dias do ano em Brasília, através de programa desenvolvido em (Campos e Alcantara, 2016), usando cálculos descritos em (Messenger, 2010), onde também são destacados os períodos de maior e menor nebulosidade, identificados pela Fig. 2. Os ângulos de zênite para Porto Alegre/RS também são expostos apenas para comparação e referência. Observe que em Brasília, em alguns dias do ano, o ângulo de zênite solar se torna negativo. Nestes dias a radiação solar seria melhor recebida ao se voltar a face dos painéis solares na direção do Pólo Sul. Esta mudança de sinal no ângulo de zênite solar não ocorre para a cidade de Porto Alegre, para a qual  $\theta_z$  é sempre positivo e os raios solares são recebidos sempre através dos céus do hemisfério norte. Isto se deve ao fato de que Porto Alegre está situada em uma latitude superior (em módulo) ao ângulo de inclinação axial da Terra que mede  $23^\circ 26' 21''$ .

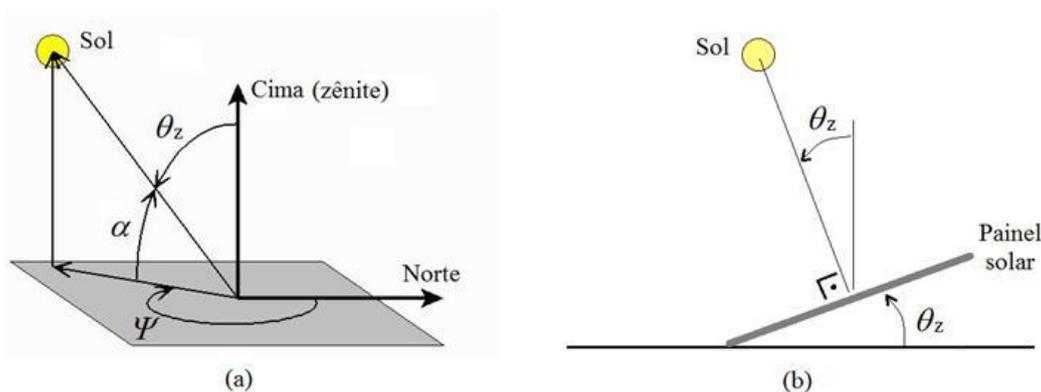


Figura 3 - (a) Ângulos solares  $\Psi$  (Ângulo de azimute),  $\alpha$  (altitude solar) e  $\theta_z$  (ângulo de zênite); (b) Inclinação do painel solar para incidência normal dos raios solares.

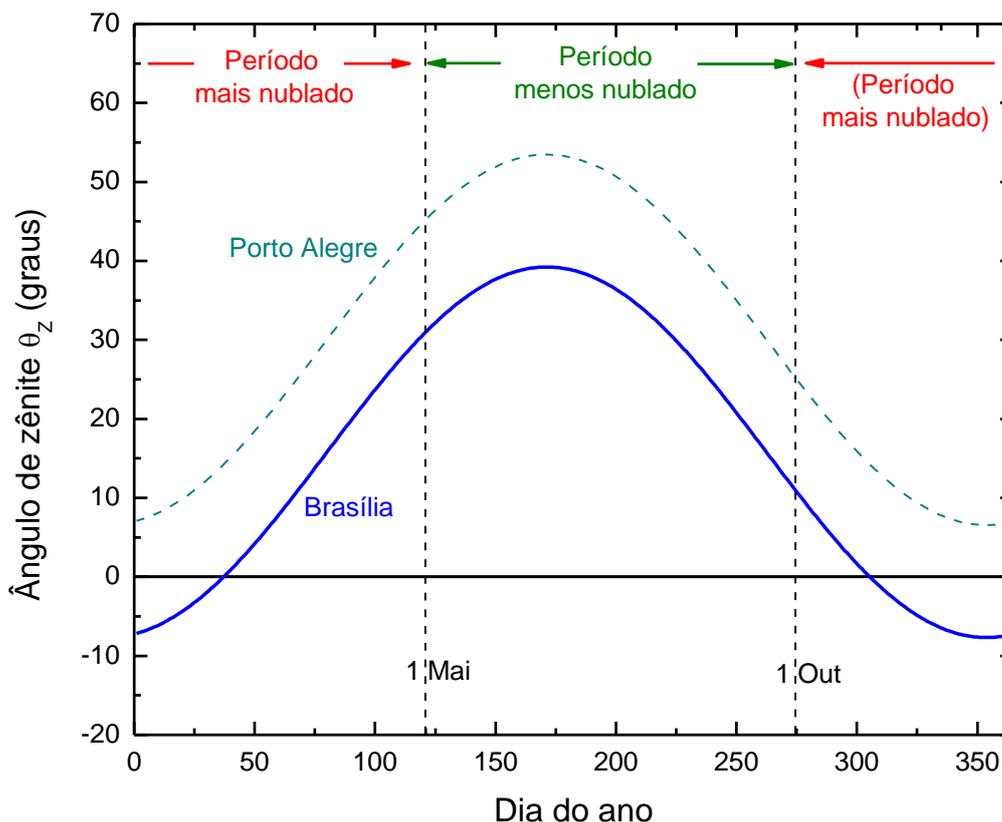


Figura 4 - Ângulos de zênite solar em função dos dias do ano, para  $\Psi = 0^\circ$  (azimute solar ao meio dia).

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 pela Eq. (1), onde  $d_1$  e  $d_2$  são o dia inicial e o dia final, respectivamente, do período considerado. A integral na Eq. (1) é resolvida numericamente (método trapezoidal) considerando a função  $\theta_Z$  da Fig. 4, para a cidade de Brasília. Os parâmetros e valores médios obtidos para cada período são mostrados na Tab. 1. Os valores de  $\theta_{ZM}$  foram arredondados para inteiro. Observe que o resultado obtido aplicando a média no ano inteiro é aproximadamente igual à latitude de Brasília.

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

Tabela 1 - Ângulos de zênite médios.

PERÍODO DO ANO	$d_1$	$d_2$	$\theta_{ZM}$
Menos nublado	121	274	22°
Mais nublado	275	365+120	4°
Ano Inteiro	1	365	16°

O valor de  $d_2$  para o período mais nublado leva em conta a periodicidade anual da função  $\theta_Z$ . O próximo passo é estimar a incidência de densidade de energia solar nas faces de painéis fotovoltaicos inclinados nos ângulos  $\theta_{ZM}$  encontrados e expostos na Tab. 1. Isto é feito através do programa Radiasol 2.

### 2.3 Uso do programa Radiasol 2

A Fig. 5 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  $\theta_{ZM}$ , um por simulação. No parâmetro “Desvio Azimutal” é inserido  $0^\circ$  se  $\theta_{ZM}$  é positivo e  $180^\circ$  se  $\theta_{ZM}$  é negativo (no caso da Tab. 1 todos os ângulos médios foram positivos). A partir do mapa do Brasil exibido na interface, selecionou-se o ponto correspondente ao estado de Goiás (estado onde Brasília encontra-se geograficamente) e então a localidade desejada no mesmo (Brasília).

Como origem dos dados da média de irradiação, foi selecionada a base de dados do projeto Solar and Wind Energy Resource Assessment (SWERA). Esta base de dados disponibiliza valores estimados de radiação a partir de 10 anos de dados construídos 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 (Pereira, 2017). Este acervo é bastante utilizado em estudos que informam o potencial da região para o aproveitamento energético solar (Silva; Souza, 2016; Morais-Junior et al., 2012; Santos et al., 2012). 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  $\theta_{ZM}$  do módulo solar. Estes resultados são apresentados na próxima seção, assim como as discussões sobre os mesmos.

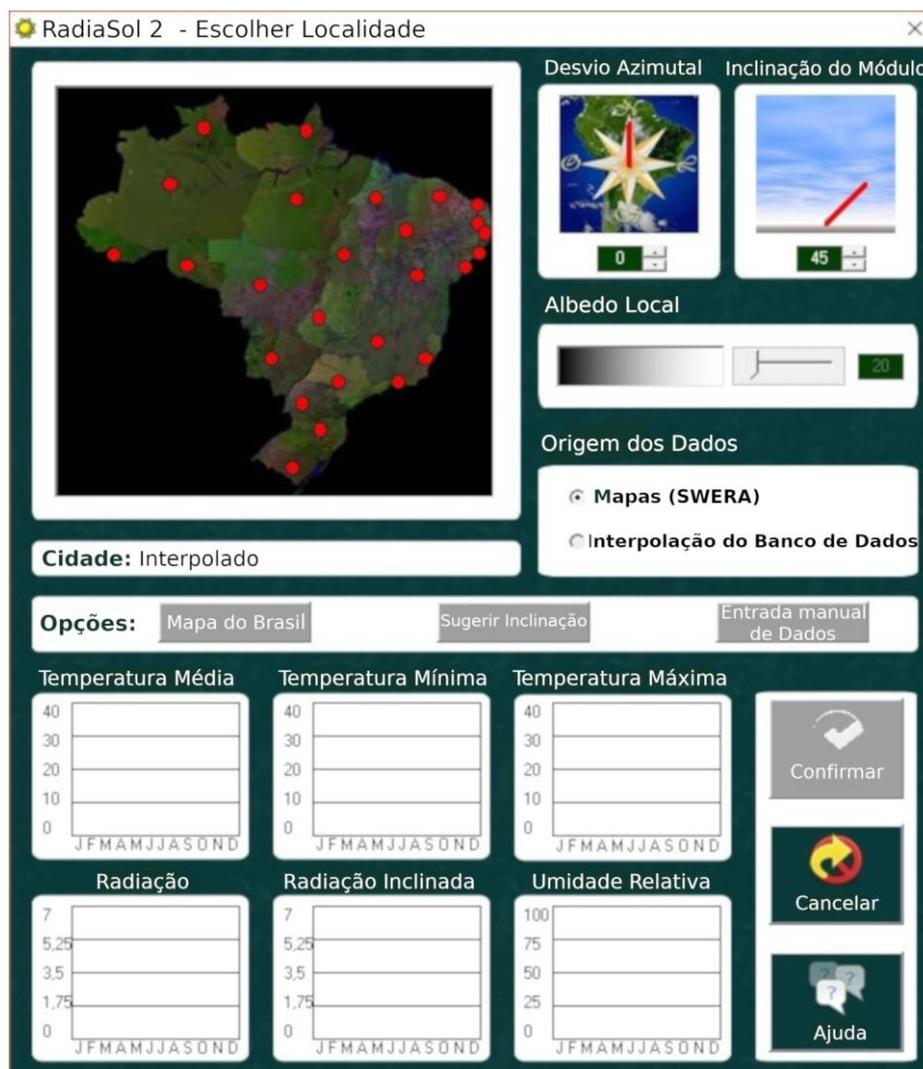


Figura 5 - Interface gráfica inicial do programa Radiasol 2, desenvolvido na UFRGS.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados exibidos na Fig. 6 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.

A partir dos valores de irradiação mostrados na Fig. 6 e comparando os resultados para painéis inclinados em  $22^\circ$  (otimizada para períodos menos nublados) com os resultados para a inclinação padrão de  $16^\circ$ , observou-se para a primeira inclinação o aumento da radiação recebida durante os meses de abril a agosto. Nos meses de outubro a

fevereiro houve uma redução da irradiação captada nos painéis inclinados a  $22^\circ$ , inclusive se tornando inferior à radiação captada nas outras inclinações consideradas. Quando os painéis são inclinados em  $4^\circ$ , a qual é a inclinação otimizada para os períodos mais nublados do ano, há uma melhoria da captação de radiação nos meses de novembro a fevereiro, mas nos meses intermediários do ano esta captação é reduzida ao comparar-se com as outras duas inclinações.

A Tab. 2 fornece valores da irradiação anual estimada para as inclinações consideradas, onde observa-se que os valores obtidos anualmente para as inclinações de  $16^\circ$  e  $22^\circ$  são bem próximos. Ou seja, é possível inclinar os painéis dentro de uma faixa de  $16^\circ$  a  $22^\circ$  com as faces dos painéis voltadas para o Pólo Norte, sem perda na quantidade de irradiação solar anual recebida. Contudo, no caso da inclinação em  $22^\circ$ , haverá um aumento na captação nos meses de abril a agosto e uma redução na mesma nos meses de outubro a fevereiro.

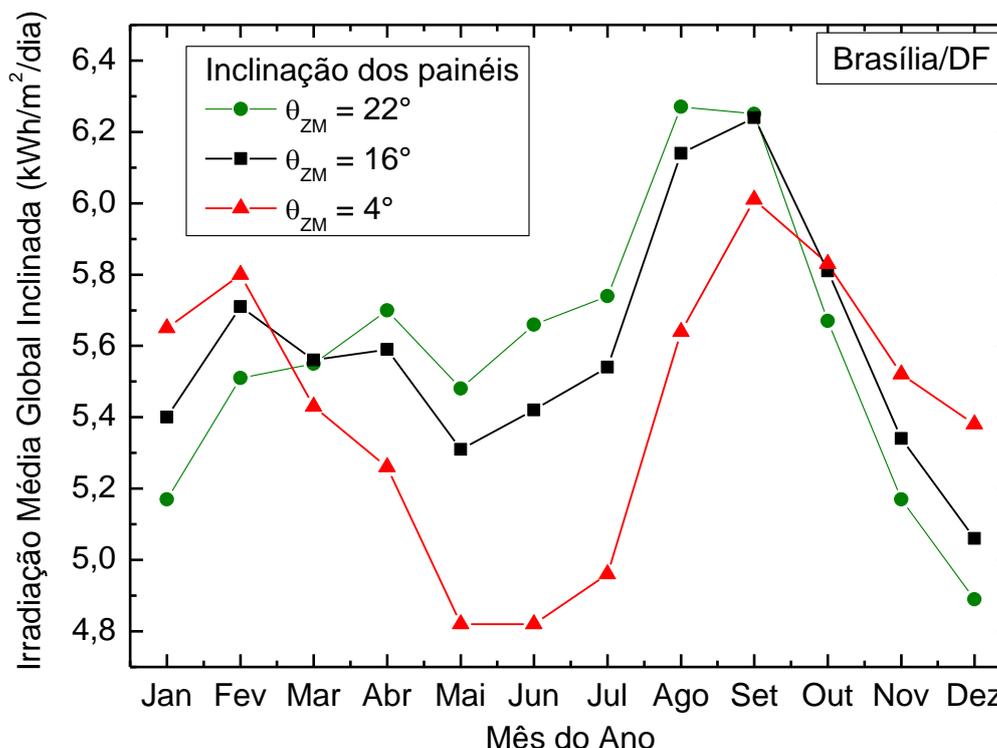


Figura 6 - Resultados de Irradiação média recebida pelos painéis solares nas diferentes inclinações usando o programa Radiasol 2.

Tabela 2 - Valores da irradiação total anual recebida pelos painéis nas diferentes inclinações.

INCLINAÇÃO DOS PAINÉIS ( $\theta_{ZM}$ )	INCLINAÇÃO REFINADA PARA PERÍODO	IRRADIAÇÃO ANUAL RECEBIDA ( $\text{kWh/m}^2$ )
$22^\circ$	Menos nublado	2039,55
$16^\circ$	Ano Inteiro	2041,00
$4^\circ$	Mais nublado	1979,71

A Fig. 7 fornece as estimativas de uma situação idealizada, onde um mesmo arranjo fotovoltaico é inclinado de  $22^\circ$  nos meses de março a setembro visando melhorar a captação no período menos nublado do ano e de  $4^\circ$  nos meses de outubro a fevereiro, para melhorar a captação no período mais nublado. Observou-se que nesta situação houve um aumento estimado da irradiação anual recebida para o valor de  $2093,20 \text{ kWh/m}^2$ .

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 da eficiência dos painéis e 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 qualidade dos painéis e da energia elétrica necessária.

Vale lembrar que esta análise se refere a Brasília/DF. Para uma análise referente a outra localização 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.

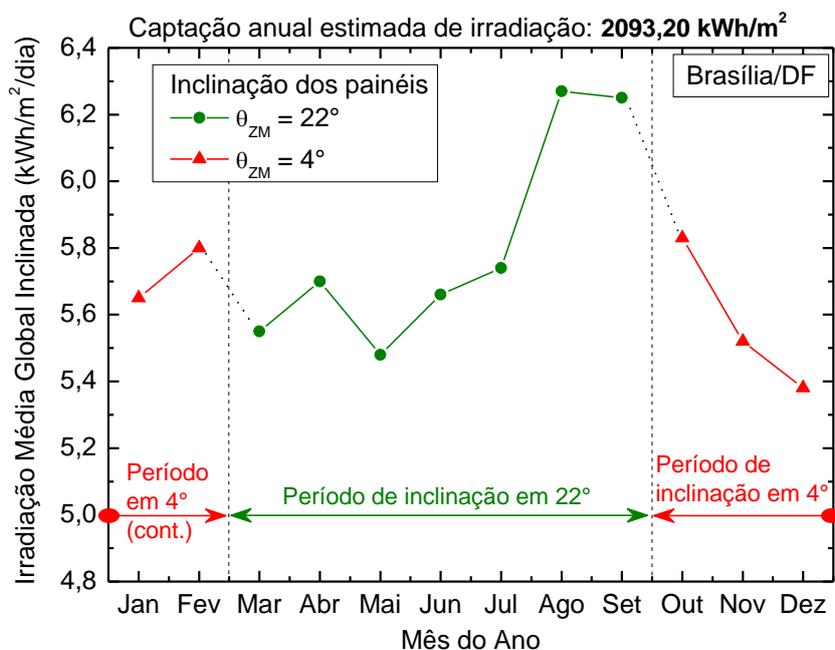


Figura 7 - Resultados de Irradiação média recebida pelos painéis solares comutando a orientação dos painéis para aumentar o desempenho de captação de irradiação.

#### 4. CONCLUSÕES

Na cidade de Brasília, a partir dos resultados deste trabalho levando em conta as variações anuais de nebulosidade, verificou-se que é possível inclinar os painéis dentro de uma faixa de 16° a 22° com as faces dos painéis voltadas para o Pólo Norte, sem perda na quantidade de irradiação solar anual recebida, a qual foi estimada em aproximadamente 2040 kWh/m<sup>2</sup> nesta faixa de inclinação. A diferença é que a orientação de 22° é otimizada para o período menos nublado do ano, onde observou-se que nesta inclinação haverá uma melhoria na irradiação solar recebida nos meses de abril a agosto, mas haverá uma diminuição da irradiação recebida de novembro a fevereiro, se comparada com a inclinação de 16° (inclinação padrão dos painéis solares para Brasília).

O ângulo de inclinação de 4° é otimizado para receber a radiação solar no período mais nublado do ano em Brasília, onde observou-se que há uma melhoria da captação de irradiação nos meses de novembro a fevereiro, mas haverá uma grande decréscimo nesta captação nos meses de março a setembro, impactando na redução da irradiação anual, estimada em 1979,71 kWh/m<sup>2</sup> para esta orientação dos painéis em 4°. Em uma situação idealizada, onde um mesmo arranjo fotovoltaico é inclinado de 22° nos meses de março a setembro a fim de melhorar a captação no período menos nublado do ano e de 4° nos meses de outubro a fevereiro, para melhorar a captação no período mais nublado, observou-se que nesta situação houve um aumento estimado da irradiação anual recebida para 2093,20 kWh/m<sup>2</sup>.

Além da nebulosidade, a baixa eficiência de conversão dos painéis fotovoltaicos comerciais atuais é outro fator que impede uma margem ainda maior de produção de energia elétrica, pois apenas uma relativamente baixa fração da irradiação incidente estimada será convertida em energia elétrica. Contudo, através de avanços nas pesquisas acerca dos materiais envolvidos e dos processos de fabricação dos painéis, espera-se que o aumento da eficiência de conversão fotovoltaica ainda seja factível ao longo dos anos futuros e, conseqüentemente, uma vantagem maior na produção de energia elétrica, associada também a uma inclinação adequada dos painéis, poderá ser obtida.

#### 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 Radasol 2.

#### REFERÊNCIAS

- Campos, M. S., Alcantara, L. D. S., 2016. Interpretação dos efeitos de tempo nublado e chuvoso sobre a radiação solar em Belém/PA para uso em sistemas fotovoltaicos. Revista Brasileira de Meteorologia, v.31,n.4(suppl.), p.570-579.
- Didoné, E. L., Wagner, A., Pereira, O. R. P., 2014. Estratégias para edifícios de escritórios energia zero no Brasil com ênfase em BIPV. Ambiente Construído, v. 14, n. 3, p. 27-42.

- GT Brasília Solar – Grupo de Trabalho Brasília Solar, 2016. Programa Brasília Solar: Consulta Pública. Brasília: Secretaria do Meio Ambiente (SEMA-DF). Brasil. Disponível em: < <http://epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-PNE-2030> >. Acesso em: 14 nov 2019.
- Hinrichs, R. A., 2009; Kleinbach, M. Energia e meio ambiente. 3. ed. São Paulo: Cengage Learning.
- INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br>>. Acesso em: 08 nov. 2019.
- Krenzinger, A., Bugs, R. C., 2010. Radasol 2 software para sintetizar dados de radiação solar. In: IV ISES CLA - XVII SPES, Cuzco. Anais... Cuzco: [s.n.]
- Mariano, J. D., Campos, H. M., Tonim, F. S., Urbanetz Jr, J., Casagrande Jr, E. F, 2016. Performance of photovoltaic systems: Green office's case study approach. International Journal of Energy and Environment, v.7,n.2, p.123-136.
- Martins, F. R., Pereira, E. B., Silva, S. A. B., Abreu, S. L., Colle, S., 2008. Solar energy scenarios in Brazil, Part one: Resource assessment. Energy Policy, v. 36, n. 8, p. 2853–2864.
- Messenger, R. A., Ventre, J., 2010. Photovoltaic systems engineering. 2. ed. Flórida: CRC Press LLC, cap. 2, p. 21-46.
- MME- Ministério de Minas e Energia, 2007. Plano Nacional de Energia 2030. Brasília: Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Disponível em: < <http://epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-PNE-2030> >. Acesso em: 14 nov 2019.
- Morais Junior, H. S., Cavalcante, R. L., Galhardo, M A. B., Macêdo, W., 2012 Aplicação de Energia Solar Fotovoltaica-Estudo de Caso na Região Amazônica. Revista Geonorte, Edição Especial, v.2, n.4, p.1303 - 1309.
- Pereira, E. B., Martins, F. R., Gonçalves, A. R., Costa, R. S., Lima F. J. L., Rütther, R.; Abreu, S. L., Tiepolo, G. M., Pereira, S. V., Souza, J. G, 2017. Atlas Brasileiro de Energia Solar. 2. ed. São José dos Campos
- Pinho, J. T., Galdino, M. A, 2014. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Edição Revisada e Atualizada. Cepel - CRESESB. Rio de Janeiro.
- Razykov, T. M., Ferekides, C. S., Morel D., Stefanakos, E., Ullal, H. S., Upadhyaya, H. M., 2011. Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects. Solar Energy, v.85, p.1580–1608.
- Rütther, R. Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial de geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública. Florianópolis: UFSC; LABSOLAR, 2004.
- Santos, I. P., Rütther, R., Nascimento, L. R., Pereira Junior, L. C., 2012. Ábacos para análise simplificada de orientação e inclinação de sistemas solares fotovoltaicos integrados a edificações. In: IV Congresso Brasileiro de Energia Solar – IV CBENS e V Conferência Latino Americana da International Solar Energy Society – ISES, 2012, São Paulo – SP. Anais.... São Paulo – SP: ABENS – Associação Brasileira de Energia Solar. v. 1. p. 1-8.
- Sauaia, R., 2015. Proposta para a Energia Solar Fotovoltaica no GDF. Brasília: ABSOLAR.
- Silva, G. D. P. S, Souza, M. J. R., 2016. Análise de variáveis de projeto de sistema solar fotovoltaico utilizando o modelo SAM: Uma comparação entre Belém, Fortaleza e Brasília. Revista Brasileira De Energias Renováveis, v5, n.2, p.297-312.
- Souza, A. P., Escobedo, J. S., Dal Pai, A., Gomes, E. N., 2012. Annual evolution of global, direct and diffuse radiation and fractions in tilted surfaces. Engenharia Agrícola, v. 32, n. 2, p. 247-260.
- Teles, M. B., 2017. Avaliação operacional das diferentes arquiteturas de interligação de geradores fotovoltaicos à rede elétrica de baixa tensão. 2017.84 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará. Instituto de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belém.
- Varejão-Silva, M. A., 2006. Meteorologia e Climatologia. Recife, p. 463.

## ANALYSIS OF SEASONAL ASPECTS OF NEBULOSITY ON THE PROJECT OF FIXED PHOTOVOLTAIC INSTALLATIONS AT BRASÍLIA, BRAZIL

**Abstract.** *By Using INMET meteorological data, the Radasol 2 software 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 cloudiness at Brasília, Brazil. At first, the periods of the year with smaller and greater cloudiness are identified. Then, average angles of solar zenith estimated for the cloudiest season, for the whole year and for the clearest sky season, which were 4°, 16° and 22°, respectively. Thereafter, the Radasol 2 program is used to estimate the incident solar energy density on the fixed panels inclined at these estimated zenith angles, during one year. The purpose of this work is to analyze the influence of solar panels orientation, considering cloudiness periods, on the irradiation uptake. The city of Brasilia was chosen for this analysis because it presents great difference between the cloudiness measured in its cloudiest period compared to the cloudiness measured at its least cloudy period of the year. The results of solar irradiation received over inclined surfaces at Brasília show that the reorientation of the panels from 16° to 22°, with the faces of the panels facing north, will preserve the amount of annual solar radiation captured, estimated at approximately 2040 kWh/m<sup>2</sup>. The difference is that the redirection to 22° will improve the capture of solar radiation received at the months of April to August, but will decrease the radiation received at November to February. A strategy to improve the annual capture is proposed by establishing two angles for the orientation of the panels throughout the year, one more suitable for the least cloudy period and the other for the cloudiest period, where an increase in annual irradiation was estimated to 2093.20 kWh/m<sup>2</sup>.*

**Key words:** *Photovoltaic Panels, Meteorological Data, Incident Irradiation*