

COMPARAÇÃO ENTRE VALORES DE IRRADIAÇÃO NO PLANO INCLINADO NA LATITUDE MEDIDA E CALCULADA A PARTIR DOS SOFTWARES RADIASOL E RADIASOL2

Diego Vitoriano Freitas – vitorianofreitas@gmail.com

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento Acadêmico de Eletrotécnica

Muriele Bester de Souza – murielebester@gmail.com

Édwin Augusto Tonolo – edwintonolo@gmail.com

Jair Urbanetz Junior – urbanetz@utfpr.edu.br

Gerson Máximo Tiepolo – tiepolo@utfpr.edu.br

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Energia

1.1. Recursos solares e meteorologia da radiação solar

Resumo. Este trabalho tem por finalidade determinar a diferença entre os valores de estimativa da irradiação no plano inclinado na latitude a partir de modelos computacionais disponíveis pelos softwares RADIASOL e RADIASOL2 disponibilizados pelo Laboratório de Energia Solar (LABSOL) da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) em Porto Alegre – RS, e valores medidos por um piranômetro instalado na inclinação da latitude local disponíveis por uma estação SONDA (Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais) instalada na cidade de Curitiba-PR pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) na sede Neoville. Estas diferenças foram analisadas através dos cálculos de variação absoluta e variação percentual. As cinco estimativas realizadas resultaram em valores próximos aos do piranômetro inclinado e os programas apresentaram baixas variações para este estudo. O programa RADIASOL2 apresentou as menores variações (percentual e absoluta) no período estudado, com valor exato ao do piranômetro (5,210 kWh/m².dia), enquanto o modelo de Perez do software RADIASOL resultou no mais alto índice de variação percentual (6,41%), resultados esses obtidos no mês de dezembro.

Palavras-chave: Energia Solar, Irradiação Global, RADIASOL

1. INTRODUÇÃO

Para avaliar a disponibilidade de energia solar que chega à Terra, é essencial medir a radiação solar em alguns locais (Iqbal, 1983). Os estudos de energia solar fotovoltaica dependem de medições de radiação solar para fornecer dados que possam ser utilizados em avaliação de recursos, monitoramento do sistema solar e desenvolvimento ou validação de modelos de irradiação (Gueymard e Myers, 2008).

Medições precisas de irradiância solar são importantes em muitas aplicações, principalmente aquelas relacionadas ao desenvolvimento, implantação e operação de tecnologias solares, como sistemas fotovoltaicos, concentradores fotovoltaicos ou concentradores solares térmicos (Al-Rasheedi *et al.*, 2018). A medição da radiação solar por unidade de superfície (W/m²) é chamada de irradiância. A utilização eficiente da energia solar e a seleção de componentes para aplicações agrícolas, industriais, de telecomunicações e domésticas requer conhecimento da irradiação solar real que atinge a superfície da Terra nos locais de interesse. A radiação solar pode ser medida diretamente usando radiômetros ou sensores fotovoltaicos, ou indiretamente analisando imagens de satélite (DGS, 2008) (Shenoy *et al.*, 2018).

A energia solar é conhecida por ser limpa, por não haver emissões de carbono durante o seu período de geração de energia elétrica. Com o desenvolvimento da tecnologia fotovoltaica, usinas conectadas à rede em larga escala estão sendo construídas em todo o mundo nos últimos anos. No entanto, devido à variabilidade da irradiação solar e da temperatura ambiente, a geração de energia da usina fotovoltaica é um processo não determinístico e estocástico (Tao *et al.*, 2010).

O objetivo da medição dos dados solares é a obtenção experimental dos valores de irradiância, os quais podem ser integrados ao longo de tempo (minuto, hora, dia ou ano) para calcular a irradiação. Tanto pesquisadores como empresas se utilizam do conhecimento dos valores da irradiância ou irradiação global e de suas componentes direta e difusa incidentes em uma superfície (Pinho e Galdino, 2014).

Medições terrestres da radiação solar vêm sendo realizadas há algumas décadas e constituem uma base de dados importante para estudos sobre energia solar tanto para a avaliação técnica e econômica de projetos de aproveitamento do recurso energético solar, quanto para o desenvolvimento e validação de modelos (Pereira *et al.*, 2017).

São necessários vários parâmetros de radiação para o dimensionamento, avaliação de desempenho e pesquisa de aplicações de energia solar. Isso inclui radiação solar total, radiação direta, radiação difusa e duração do dia. Vários tipos de equipamentos medem os valores instantâneos e integrados em uma superfície, os quais geralmente empregam os efeitos termoeletrônicos e fotovoltaicos para medir a radiação (Kalogirou, 2014).

Entre as fontes de energia renováveis, a tecnologia fotovoltaica permite obter energia elétrica a partir da radiação solar, possuindo o benefício de baixo impacto ambiental. Por outro lado, sua principal fraqueza é que sua disponibilidade não pode ser totalmente controlada. Muitos aspectos precisam ser considerados, como posição geográfica, clima local e eficiência global do painel. Entre elas, a posição e a influência do clima na radiação solar podem ser facilmente obtidas a partir de dados astronômicos e estatísticos, mas o clima é caracterizado por uma alta variabilidade e depende de muitos fatores físicos (Lazzaroni *et al.*, 2015).

A medição da radiação solar global, como também das componentes direta e difusa, na superfície terrestre é de grande importância para o estudo das influências das condições climáticas e atmosféricas, como também para o desenvolvimento de projetos de geração de energia fotovoltaica. Obtendo um histórico dessas medidas, pode-se viabilizar a instalação de sistemas fotovoltaicos em uma determinada região, garantindo assim o máximo aproveitamento do recurso ao longo do ano (Pinho e Galdino, 2014).

Desta forma, o conhecimento do recurso solar é a variável de maior peso para o desenvolvimento de um projeto de sistema de aproveitamento da energia solar. Com esses dados, é possível identificar e selecionar a localização mais adequada para instalação do sistema fotovoltaico, dimensionamento mais preciso, calcular com mais assertividade a geração de energia anual, mensal ou diária e estabelecer estratégias operacionais e dimensionamento do sistema de armazenamento (para sistemas isolados) (Pinho e Galdino, 2014).

A radiação solar incidente na superfície terrestre apresenta uma variabilidade espacial e temporal associada aos movimentos do planeta, com ciclos diário e sazonal bem determinados. Ela também é afetada por fatores atmosféricos como a emissão de poluentes, a variação da nebulosidade e a concentração de aerossóis (Pereira *et al.*, 2017).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

De acordo com Pinho e Galdino (2014), para uma operação adequada e eficiente, os módulos fotovoltaicos devem estar orientados em direção ao norte verdadeiro, quando instalados no hemisfério sul, e voltados para o sul, quando a instalação for realizada no hemisfério norte. Outro parâmetro importante é a instalação com inclinação igual a latitude local, porém isso nem sempre é possível, seja por motivo arquitetônico ou financeiro. O impacto causado na geração de energia elétrica devido a diferença entre a configuração instalada e a ideal é medido através da comparação entre ambas. Uma forma de mensurar é calculando a diferença de irradiação que incide sobre os módulos nas duas situações.

O objetivo deste experimento é determinar qual a diferença entre os valores de irradiação global no plano inclinado na latitude a partir de métodos computacionais comparado à um piranômetro instalado na inclinação da latitude local.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), campus Curitiba, sede Neoville, concluiu no final de setembro a instalação de uma estação solarimétrica padrão SONDA, com latitude $25^{\circ} 30' 26''$ S, longitude $49^{\circ} 19' 07''$ O, altitude de 932 m, a qual possui dois piranômetros padrão secundário Kipp & Zonen, modelo CMP10, sendo um no plano horizontal e outro no plano inclinado na latitude do local, conforme ilustrado na Fig. 1. Os dados de irradiação global horizontal e global inclinada na latitude do local para este trabalho, foram obtidos da base de dados inicial disponibilizada por estes piranômetros para os meses de outubro de 2019 a janeiro de 2020.

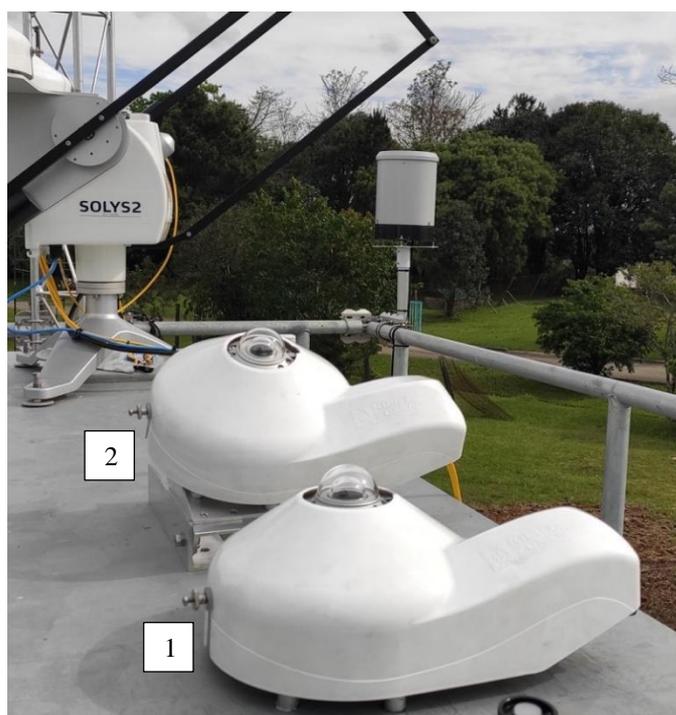


Figura 1 – Piranômetros no plano horizontal (1) e inclinado (2).

Os dados de irradiância são coletados a cada segundo através de uma *datalogger* da Campbell modelo CR1000X, registrando a cada minuto a média dos valores obtidos nos últimos 60 segundos. Uma curva típica de irradiância ao longo do dia pode ser observada na Fig. 2, que representa um dia ensolarado com alguma nebulosidade no início da manhã.

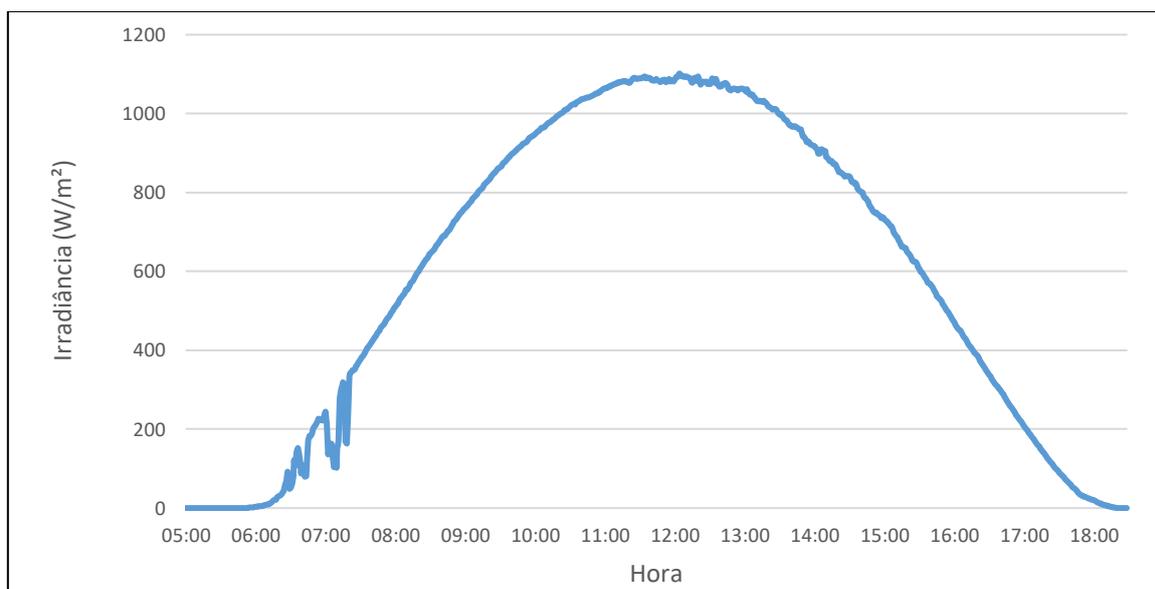


Figura 2 – Irradiância global no plano inclinado na latitude no dia 01/10 de 2019.

Para o cálculo da irradiação diária, é necessário primeiramente converter os dados de irradiância do minuto medidos em W/m^2 para valores de irradiação em Wh/m^2 , o que é feito dividindo-se o valor de irradiância no minuto por 60. Essa irradiação representa a quantidade de energia incidente na superfície no intervalo de um minuto, e a soma dessas irradiações no período de 24 horas nos leva ao valor da irradiação diária. Esse procedimento foi realizado para todos os dias do período estudado para a obtenção das irradiações diárias, e a partir delas foi obtida a irradiação global diária média mensal para o plano horizontal (H), e a irradiação global diária média mensal no plano inclinado na latitude local (H_T), para os meses de outubro a janeiro.

O Laboratório de Energia Solar (LABSOL) da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) em Porto Alegre – RS, trabalha com o desenvolvimento de modelos matemáticos apropriados à simulação computacional dos sistemas de aproveitamento da energia solar e suas componentes. Dentro de um pacote de programas que visa projetos de sistemas de energia solar e seus componentes, chamado SOLARCAD, está disponível o *software* RADIASOL que possui duas versões: RADIASOL e RADIASOL2, cujas interfaces estão apresentadas na Fig. 3 e Fig. 4, respectivamente. Os dois programas apresentam-se de forma distinta, porém de fácil uso (LABSOL, 2019).

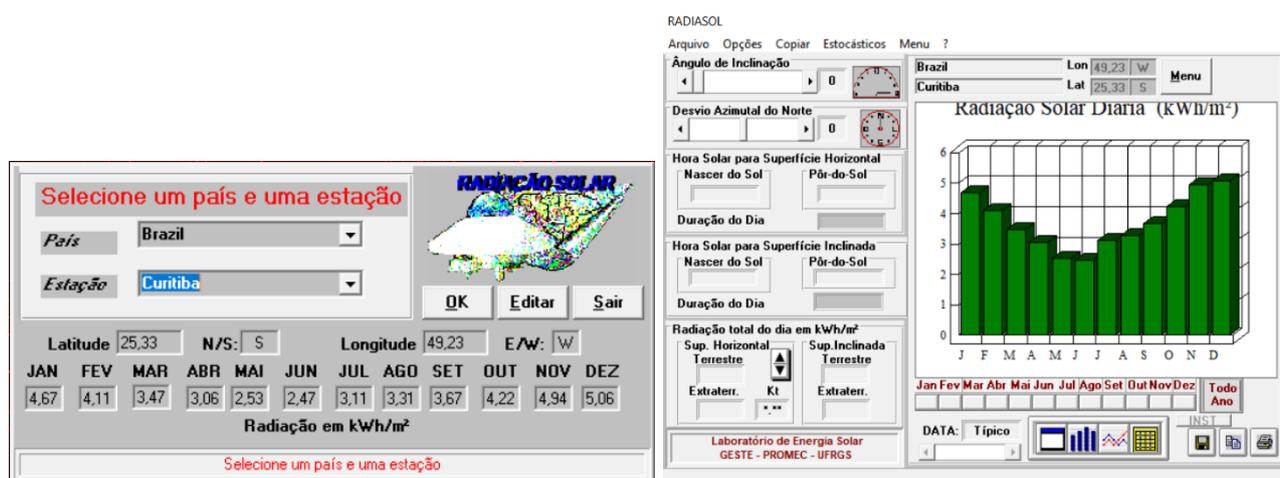


Figura 3 – Interface RADIASOL.

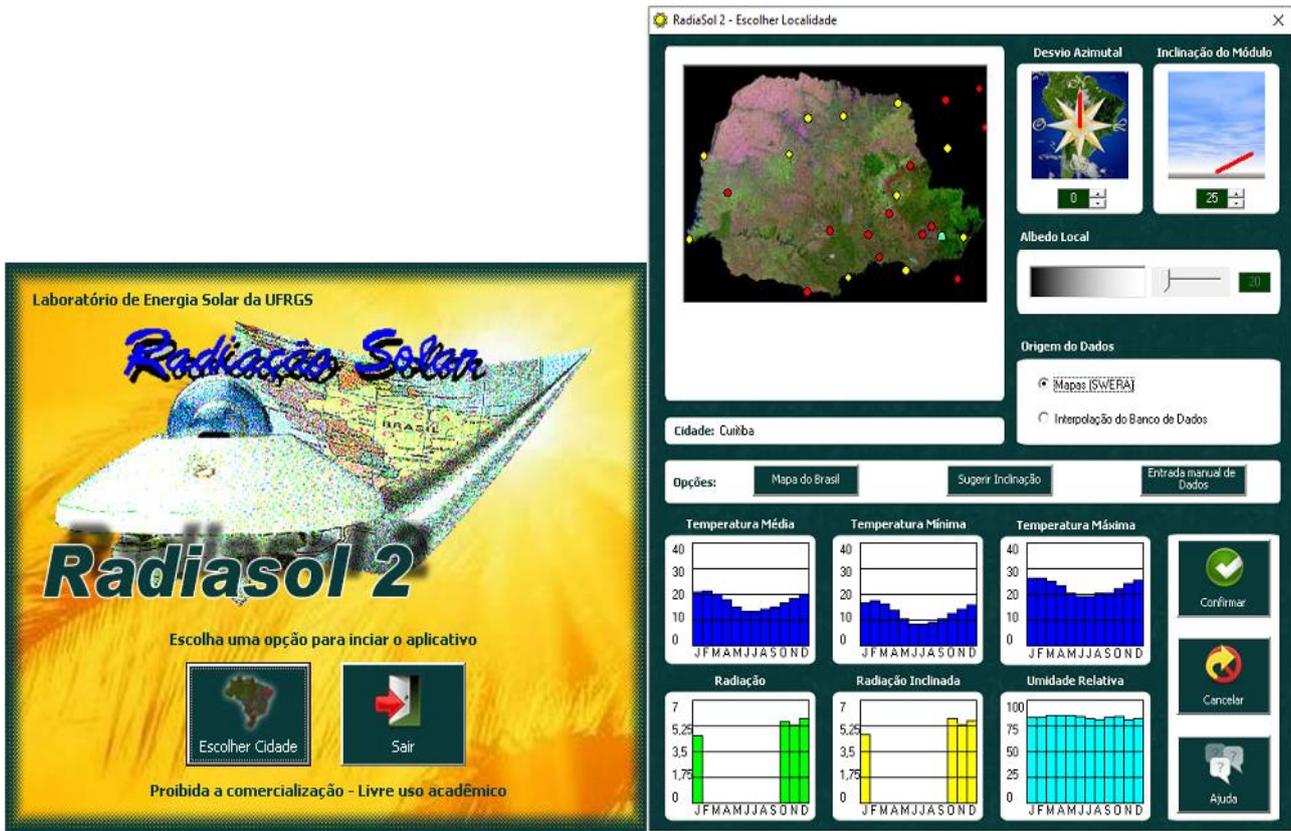


Figura 4 – Interface RADIASOL2.

Segundo Krenzinger e Bugs (2010), a primeira versão do programa RADIASOL visava atender a demanda de profissionais de engenharia e arquitetura a encontrar dados para a radiação solar média incidente em planos de orientação qualquer, onde os dados de irradiação solar em média mensal eram utilizados para estimar a irradiação esperada para um único dia. O programa RADIASOL2 é um *software* que utiliza interface de mapa para chegar ao local onde se pretende estudar a radiação solar. Além de substituir o RADIASOL por realizar tarefas similares, o RADIASOL2 sintetiza os dados pelos mesmos mecanismos para obtenção de dados estocásticos de irradiação solar diária e horária e permite ao usuário selecionar o local e o método de obtenção dos dados climáticos médios.

Os valores de irradiação global diária média mensal no plano horizontal, inclinação conforme a latitude, desvio azimutal e albedo foram inseridos no RADIASOL e também no RADIASOL2. Para o *software* RADIASOL, há 4 modelos de radiação difusa, sendo eles: Isotrópico, Klucher, Perez, e Hay e McKay. Todos os 4 serão utilizados na análise. Os *softwares* retornam valores calculados de irradiação global diária média mensal no plano inclinado selecionado (H_{calc}) que foram comparados com os valores calculados a partir dos dados coletados pelo piranômetro instalado na estação SONDA da UTFPR em Curitiba, através dos cálculos de variação absoluta e variação percentual apresentados nas Eq. (1) e Eq. (2), respectivamente.

$$\Delta H = H_{calc} - H_T \quad (1)$$

$$\Delta H\% = 100 \times \frac{\Delta H}{H_T} \quad (2)$$

Onde: H_{calc} : irradiação global diária média mensal no plano inclinado calculada [Wh/m².dia];
 H_T : irradiação global diária média mensal no plano inclinado na latitude [Wh/m².dia].

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Por se tratar de um projeto recém-inaugurado existem dados completos apenas para os meses de outubro, novembro, dezembro e janeiro. Contudo, os valores continuarão a serem atualizados ao longo do tempo para melhor análise. Na Fig. 5 é apresentado um gráfico com todos os valores de irradiação global diária no plano horizontal e inclinado na latitude dos meses de outubro e novembro de 2019.

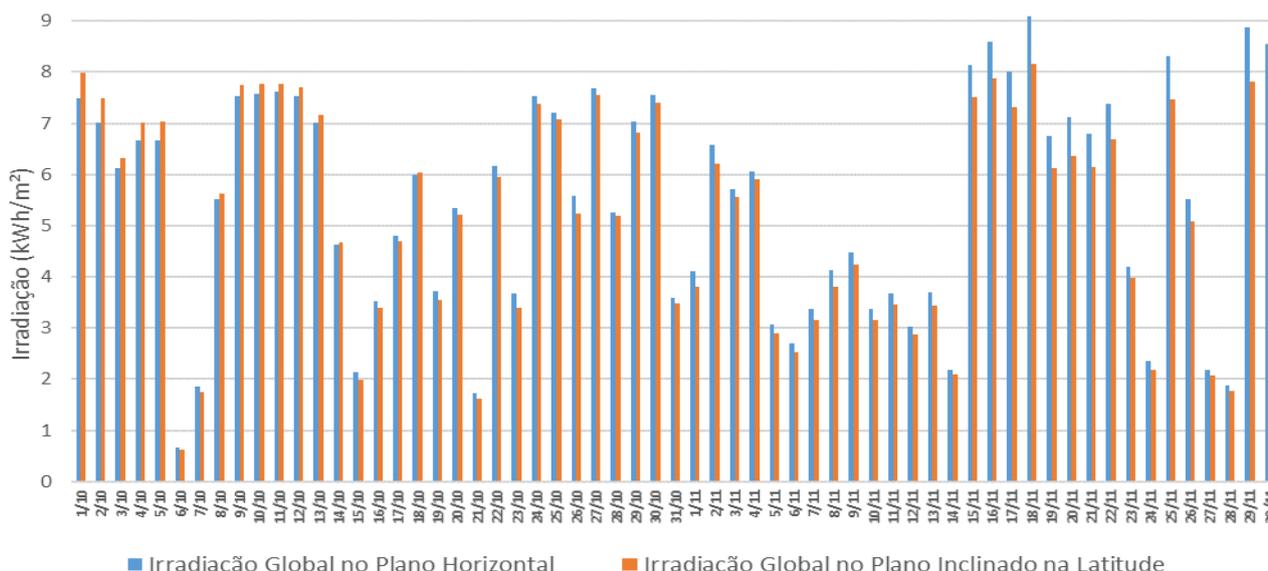


Figura 5 – Irradiação global diária no plano horizontal e inclinado na latitude.

Os valores de irradiação global horizontal média mensal para outubro (5,564 kWh/m²), novembro (5,330 kWh/m²), dezembro (5,770 kWh/m²) e janeiro (4,650 kWh/m²), albedo (0,2 por padrão do programa), inclinação do plano (25°) e desvio azimutal (0°) foram inseridos no *software* RADIASOL, conforme a Fig. 6.



Figura 6 – Página inicial do *software* RADIASOL com os valores de irradiação dos meses de outubro a janeiro.

O mesmo procedimento é realizado no RADIASOL2, incluindo os mesmos valores para todos os parâmetros, conforme apresentado na Fig. 7. Nota-se que esta versão leva em consideração parâmetros de temperatura e umidade relativa, os quais já estavam preenchidos pelo programa e não foram alterados.

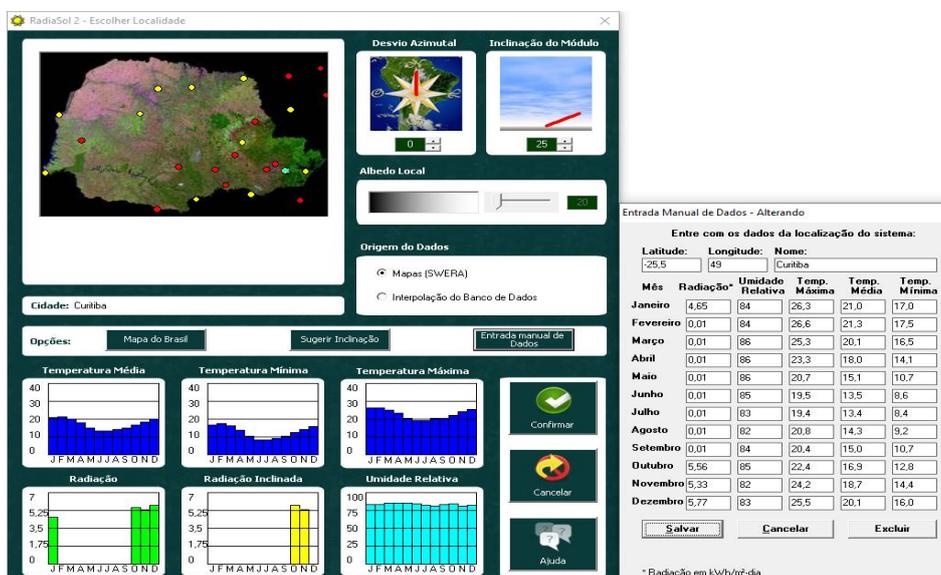


Figura 7 – *Software* RADIASOL2 com os valores de irradiação dos meses de outubro a janeiro.

Os resultados dos cálculos apresentados por ambos os *softwares*, bem como os dados de entrada de irradiação e as variações percentuais e absolutas em relação ao valor obtido a partir do piranômetro instalado na posição inclinada, com ângulo igual a latitude local, foram inseridos na Tab. 1. Os dados no plano horizontal são coletados para serem inseridos em ambos os *softwares*, enquanto os do plano inclinado na latitude são utilizados para fazer a comparação com resultados apresentados pelos programas utilizados.

Tabela 1 – Comparação dos valores entre o piranômetro inclinado e o *software* RADIASOL e RADIASOL2.

		Medido		Calculado				
		Plano Horizontal (CMP10)	Plano Inclinado (CMP10)	RADIASOL Isotrópico	RADIASOL Klucher	RADIASOL Perez	RADIASOL Hay e McKay	RADIASOL 2
Out	Irradiação Diária Média Mensal [kWh/m ² .dia]	5,564	5,569	5,504	5,684	5,658	5,552	5,610
	Variação Percentual [%]	-	-	-1,17	2,07	1,60	-0,31	0,74
	Variação Absoluta [kWh/m ² .dia]	-	-	-0,07	0,12	0,09	-0,02	0,04
Nov	Irradiação Diária Média Mensal [kWh/m ² .dia]	5,33	4,91	5,086	5,176	5,220	5,068	5,050
	Variação Percentual [%]	-	-	3,58	5,42	6,31	3,22	2,85
	Variação Absoluta [kWh/m ² .dia]	-	-	0,18	0,27	0,31	0,16	0,14
Dez	Irradiação Diária Média Mensal [kWh/m ² .dia]	5,77	5,21	5,434	5,520	5,544	5,384	5,210
	Variação Percentual [%]	-	-	4,30	5,95	6,41	3,34	0,00
	Variação Absoluta [kWh/m ² .dia]	-	-	0,22	0,31	0,33	0,17	0,00
Jan	Irradiação Diária Média Mensal [kWh/m ² .dia]	4,65	4,34	4,444	4,490	4,570	4,430	4,440
	Variação Percentual [%]	-	-	2,40	3,46	5,30	2,07	2,30
	Variação Absoluta [kWh/m ² .dia]	-	-	0,10	0,15	0,23	0,09	0,10

Analisando a Tab. 1, é possível verificar que os dados da radiação global horizontal e no plano inclinado no mês de outubro são praticamente iguais, ao contrário dos meses seguintes (novembro a janeiro) em que a irradiação no plano horizontal é superior à do plano inclinado, o que era esperado pois na primavera ocorre essa transição. Nos meses de verão, a trajetória do Sol privilegia os ângulos mais rasos, ao contrário do inverno, onde é melhor para ângulos mais acentuados.

As variações percentuais máximas mensais foram de 2,07 % para o mês de outubro, 6,31 % para novembro, 6,41 % para dezembro e 5,30 % para janeiro. Enquanto as variações percentuais mínimas mensais foram de 0,31 % para o mês de outubro, 2,85 % para novembro, 0,00% para dezembro e 2,07 % para janeiro.

Para o mês de outubro o resultado que mais se aproximou ao do piranômetro inclinado instalado na estação SONDA de Curitiba foi o do modelo de Hay e McKay, com variação de -0,31%, ou -0,02 kWh/m², enquanto para o mês de novembro o resultado que mais se aproximou foi o do modelo RADIASOL2, com variação de 2,85 %, ou 0,14 kWh/m², com o modelo de Hay e MacKay apresentando também valores bem próximos aos medidos com variação percentual de 3,22% ou 0,16 kWh/m². Em dezembro, novamente o RADIASOL2 obteve o melhor resultado, sem variação devido ao resultado ter sido igual ao medido pelo piranômetro inclinado na latitude, enquanto para o mês de janeiro o modelo de Hay e McKay do *software* RADIASOL apresentou 2,07 %, resultando na menor variação percentual ou 0,09 kWh/m² de variação absoluta.

4. CONCLUSÃO

Os cálculos apresentados resultaram em valores próximos aos medidos pelo piranômetro no plano inclinado na latitude, com variações entre 0,00 % e 6,41%, ou 0,00 a 0,33 kWh/m². Os valores de variações máxima e mínima apresentados foram obtidos no mês de dezembro, a variação máxima corresponde ao modelo de Perez do *software* RADIASOL enquanto a variação mínima (nula) foi calculada e apresentada pelo RADIASOL2.

Analisando os dados da Tab. 1, é possível verificar que o modelo de Hay e McKay do RADIASOL e o RADIASOL2, para todos os meses, são os que apresentam as menores variações. Os modelos de Klucher e Perez do RADIASOL apresentam as maiores variações em todo o período analisado.

Os programas apresentaram variações absolutas baixas (máximo de 0,33 kWh/m²), possibilitando a aplicação onde não há possibilidade para a instalação de um piranômetro no plano inclinado na latitude.

Comparações com apenas 4 meses ainda não refletem um resultado sólido, porém a estação está em operação desde o final de setembro, sendo assim, os dados continuarão a serem atualizados todos os meses. Além disso, há outras duas estações SONDA instaladas no interior do Paraná, as quais futuramente também serão comparadas, aumentando a base de dados.

O *software* RADIASOL é bastante consolidado na literatura, portando obtendo valores medidos com baixa variação em relação ao calculado no programa significa que há coerência nos dados apresentados pelo piranômetro.

Agradecimentos

Os autores agradecem a UTFPR pelo apoio e infraestrutura disponibilizada para o desenvolvimento destas pesquisas e a COPEL - Distribuição pelo apoio e financiamento dos recursos para realização do projeto P&D ANEEL/COPEL Distribuição PD 2866-0464/2017 - METODOLOGIA PARA ANÁLISE, MONITORAMENTO E GERENCIAMENTO DA GD POR FONTES INCENTIVADAS”.

REFERÊNCIAS

- Al-Rasheedi, M., Gueymard, C. A., Ismail, A., Hussain, T., 2018. Comparison of two sensor technologies for solar irradiance measurement in a desert environment, *Solar Energy*, vol. 161, pp. 194–206.
- Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie (The German Energy Society) (DGS), 2008. *Planning and Installing Photovoltaic Systems*, Earthscan.
- Gueymard, C. A., Myers, D. R., 2009. Evaluation of Conventional and High-Performance Routine Solar Radiation Measurements for Improved Solar Resource, Climatological Trends, and Radiative Modeling, *Solar Energy*, vol. 83, pp. 171–185.
- Iqbal, M., 1983. *An Introduction to Solar Radiation*, Academic Press.
- Kalogirou, S., 2014. *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*. Academic Press.
- Krenzinger, A. Bugs, R. C., 2010. RADIASOL2 Software para Sintetizar Dados de Radiação Solar. IV Conferencia Latino Americana de Energía Solar (IV ISES CLA) y XVII Simpósio Peruano de Energía Solar (XVII-SPES), Cuzco.
- Lazzaroni, M., Ferrari, S., Piuri, V., Salman, A., Cristaldi, L., Faifer, M., 2015. Models for solar radiation prediction based on diferente measurement sites, *Measurement*, vol. 63, pp. 346–363.
- Pereira, E. B., Martins, F. R., Gonçalves, A. R., Costa, R. S., de Lima, F. J.L., Rüther, R., de Abreu, S. L., Tiepolo, G. M., De Souza, J. G., 2017. *Atlas Brasileiro De Energia Solar*, INPE.
- Pinho, J. T., Galdino, M. A., 2014. *Manual de Engenharia Para Sistemas Fotovoltaicos*, CRESESB.
- Shenoy, V. Ttipathi, P., Mahadik, A. Nalawade, P. Mahajan, A., 2018. Devices Used For Measuring Solar Radiation-A Review, *Journal of Engineering*, vol. 7, pp. 1-4.
- Tao, C., Shanxu, D., Changsong, C., 2010. Forecasting Power Output for Grid-connected Photovoltaic Power System without using Solar Radiation Measurement, 2nd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems, Hefei, China.
- LABSOL - Laboratório de Energia Solar, 2019. Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS – Brasil. Disponível em: <http://www.solar.ufrgs.br/#softwares>. Acesso: 04 dez. 2019.

COMPARISON BETWEEN IRRADIATION VALUES ON THE INCLINED PLANE AT LATITUDE MEASURED AND CALCULATED FROM RADIASOL AND RADIASOL2 SOFTWARES

Abstract. *The purpose of this work is to determine the difference between the latitude inclined plane irradiation estimation values from the computational models available by the softwares RADIASOL and RADIASOL2 provided by the Solar Energy Laboratory (LABSOL) of the School of Engineering of the Federal University of Rio Grande do Sul (UFRGS) in Porto Alegre - RS, and values measured by a pyranometer installed at the local latitude slope available at a SONDA (National Organization of Environmental Data Organization) station installed in Curitiba-PR by the Federal*

Technological University of Paraná (UTFPR) at Neville's campus. These differences were analyzed through the calculation of absolute and percentage variation. The five estimates had obtained resulted that can be considered close to the inclined pyranometer and the programs presented low variations for this study. The RADIASOL2 program presented the smallest variations (percentage and absolute) in the studied period, with an exact value to that of the pyranometer (5,210 kWh / m².day), while the Perez model of the RADIASOL software resulted in the highest percentage variation index (6, 41%), results obtained in the month of December.

Key words: *Solar Energy, Global Irradiation, RADIASOL*