

ANÁLISE DE FATORES CLIMÁTICOS NO APROVEITAMENTO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA EM LAGES/SC

Luis Fernando Xavier Padilha (UDESC-CAV) - luis.padilha21@edu.udesc.br

Julia Pereira (UDESC) - julia.pereira@edu.udesc.br

Vitor Augusto Cavalheri Rocha (Udesc) - 09894650988@edu.udesc.br

Vítor Rodrigo Nienow dos Santos (UDESC) - 03470753040@edu.udesc.br

Claudia Campos (UDESC) - claudia.campos@udesc.br

Jeane de Almeida do Rosário (UDESC) - jeane.rosario@udesc.br

Gabriela Zanatta Otto (UDESC) - deluccagabi@hotmail.com

Resumo:

Decorrente do surgimento da revolução industrial e o avanço tecnológico global, a emissão de gases poluentes vem crescendo ano após ano, causando sobrepressões ambientais que têm potencializado o risco de colapso entre as novas demandas da sociedade e a dinâmica do meio ambiente. Uma das saídas que podem ser adotadas para minimizar os impactos de fontes energéticas convencionais é a utilização da energia solar, que muitas vezes é negligenciada como alternativa em locais de clima mais frio e chuvoso. Neste trabalho, procurou-se avaliar o potencial de geração de energia elétrica a partir de três módulos solares fotovoltaicos comerciais na cidade de Lages - SC, analisando a interferência de algumas variáveis climáticas, como radiação solar global, temperatura do ar e nebulosidade, que podem limitar o uso deste tipo de fonte de energia. Os resultados indicam que, mesmo sob o período de pior condição climática para o aproveitamento solar fotovoltaico no local do estudo, a maior parte dos dias observados apresentou uma radiação solar superior à média do período (553,9 W/m²), o que representaria uma geração satisfatória, em torno de 2,0 kWh/dia, a partir de módulos fotovoltaicos de silício policristalino disponíveis no mercado.

Palavras-chave: *Radiação Solar, Nebulosidade, Módulos Fotovoltaicos*

Área temática: *Radiação Solar*

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

ANÁLISE DE FATORES CLIMÁTICOS NO APROVEITAMENTO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA EM LAGES/SC

Luis Fernando Xavier Padilha – luis.padilha21@edu.udesc.br

Julia Pereira – julia.pereira@edu.udesc.br

Gabriela Zanatta Otto – gabriela.otto@edu.udesc.br

Vitor Augusto Cavalheri Rocha – vitor.acr@edu.udesc.br

Vitor Rodrigo Nienow dos Santos – vrnd.santos@edu.udesc.br

Cláudia Guimarães Camargo Campos – claudia.campos@udesc.br

Jeane de Almeida do Rosário – jeane.rosario@udesc.br

Universidade do Estado de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Ambiental e Sanitária

1.1. Recursos solares e meteorologia da radiação solar

Resumo. Decorrente do surgimento da revolução industrial e o avanço tecnológico global, a emissão de gases poluentes vem crescendo ano após ano, causando sobrepressões ambientais que têm potencializado o risco de colapso entre as novas demandas da sociedade e a dinâmica do meio ambiente. Uma das saídas que podem ser adotadas para minimizar os impactos de fontes energéticas convencionais é a utilização da energia solar, que muitas vezes é negligenciada como alternativa em locais de clima mais frio e chuvoso. Neste trabalho, procurou-se avaliar o potencial de geração de energia elétrica a partir de três módulos solares fotovoltaicos comerciais na cidade de Lages - SC, analisando a interferência de algumas variáveis climáticas, como radiação solar global, temperatura do ar e nebulosidade, que podem limitar o uso deste tipo de fonte de energia. Os resultados indicam que, mesmo sob o período de pior condição climática para o aproveitamento solar fotovoltaico no local do estudo, a maior parte dos dias observados apresentou uma radiação solar superior à média do período ($553,9 \text{ W/m}^2$), o que representaria uma geração satisfatória, em torno de $2,0 \text{ kWh/dia}$, a partir de módulos fotovoltaicos de silício policristalino disponíveis no mercado.

Palavras-chave: Radiação Solar, Nebulosidade, Módulos Fotovoltaicos.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com Gore (2010), a civilização humana e o ecossistema terrestre estão em iminente colapso, sendo a manifestação mais proeminente desta situação a atual crise climática. Desde a Revolução Industrial, o mundo passou a se tornar cada vez mais tecnológico. Entretanto, concomitantemente a isto, os níveis de emissão de CO_2 , CH_4 e outros gases de efeito estufa (GEEs) chegaram a valores extremamente altos.

Diante deste cenário, faz-se necessário o investimento e a aplicação de energias renováveis menos poluentes. O atual panorama energético nacional e mundial indicam uma forte dependência de combustíveis fósseis (Fig. 1), em especial, no petróleo, carvão mineral e gás natural. A principal representante das fontes renováveis neste contexto é a energia hidráulica, porém esta causa significativos impactos ambientais durante a fase de instalação, em função da inundação de áreas para construção do reservatório, o que acaba contribuindo também para a liberação de GEEs através da formação de metano e outros gases provenientes da decomposição da matéria orgânica submersa neste processo. O CH_4 apresenta um potencial de efeito estufa 21 vezes maior que o do CO_2 (Hinrichs *et al.*, 2014).

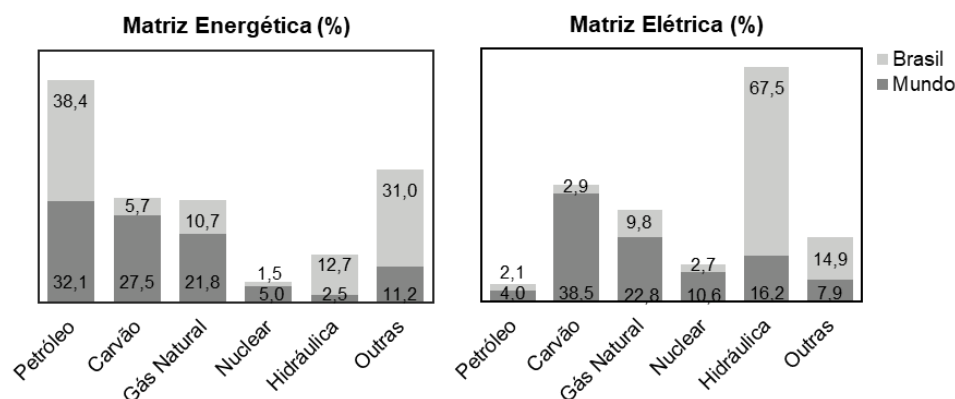


Figura 1 - Matrizes Energética e Elétrica nacional e mundial em 2016. Adaptado de BRASIL (2017).

Frente à esta situação, torna-se necessário a diversificação da matriz energética, permitindo a inserção de fontes energéticas mais limpas e renováveis. Entre as alternativas para geração de eletricidade, destaca-se a energia solar fotovoltaica (FV), que permite o aproveitamento de um recurso natural inextinguível, de grande intensidade e disponibilidade no Brasil (Fig. 2), e de amplo uso em geração distribuída, o que permite uma maior uso e propagação da tecnologia através de iniciativas individuais, sem a dependência de investimentos governamentais para tal. De acordo com Ferreira *et al.* (2018), a tecnologia também é de baixa manutenção, e mesmo que ainda tenha um custo elevado se comparada às fontes convencionais, estes custos vêm diminuindo em função do aumento na sua procura para o atendimento às demandas tanto de grande quanto de baixa potência.

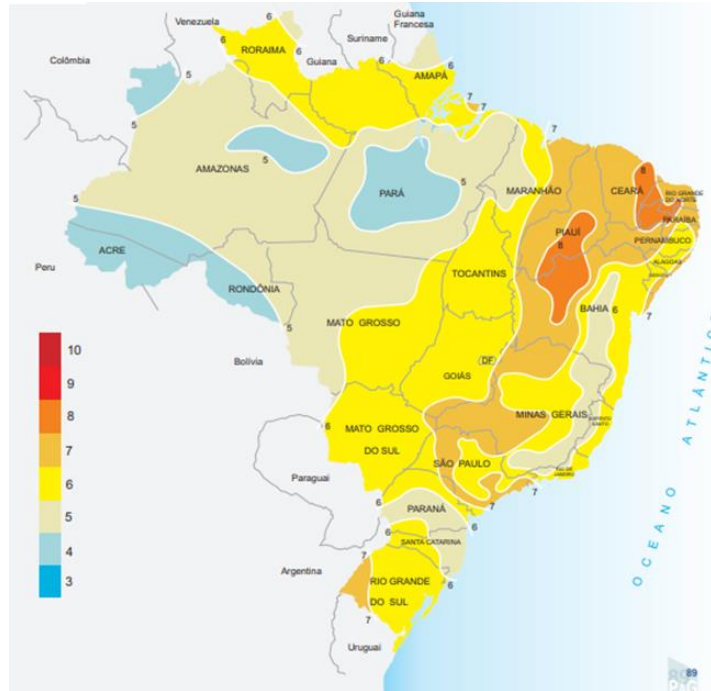


Figura 2 - Insolação Diária Média Anual no Brasil (ANEEL, 2005).

O recurso solar é influenciado por diversos fatores, como a latitude do local, o período do dia e do ano, e as condições climáticas. Deste último, a presença de nebulosidade pode ser considerada um dos parâmetros de maior relevância em se tratando dos fluxos de entrada e saída da radiação solar na atmosfera terrestre. As moléculas de ar, as partículas em suspensão e, principalmente, as nuvens presentes na atmosfera difundem a radiação, que acaba se espalhando em todas as direções (Hinrichs *et al.*, 2014). Isto faz com que uma parte considerável da radiação emitida pelo Sol e que chega ao planeta Terra acabe sendo refletida de volta ao espaço ou espalhada de forma difusa de volta para a Terra, o que não contribui para uma incidência efetiva e direta da insolação sobre a superfície terrestre.

Por outro lado, o aproveitamento de energia solar em regiões mais ao Sul do Brasil muitas vezes não é visto como viável. Isto se dá por causa das condições climáticas nem sempre favoráveis, em especial em regiões que apresentam elevada precipitação e nebulosidade ao longo de todo o ano (Monteiro, 2001; Soccol *et al.*, 2010), como por exemplo no Estado de Santa Catarina. Outro fator é o posicionamento geográfico mais distante da Linha do Equador, o que significa menor incidência de radiação solar direta. Porém, muito desta sensação de inviabilidade é devido a um falso entendimento que locais mais quentes são mais aptos a geração de energia solar. Isto é diametralmente oposto à realidade, visto que os módulos solares FV operam com maior produtividade sob menores temperaturas ambientes, uma vez que a temperatura reduz a tensão elétrica produzida pela célula FV, o que diminui a potência gerada (Ruviano *et al.*, 2018). Com isto, se faz necessário estudos que venham a mostrar que a energia solar fotovoltaica pode ser sim aproveitada em municípios da Região Sul do Brasil, e que possam difundir ainda mais a aplicação desta fonte de energia renovável e ambientalmente menos danosa em uma escala nacional mais ampla.

Neste sentido, o presente artigo tem como objetivo determinar o potencial de aproveitamento da energia solar na geração distribuída de eletricidade na cidade de Lages – Santa Catarina, relacionando-o a medidas da radiação solar incidente sobre a superfície terrestre e demais características referentes ao clima local.

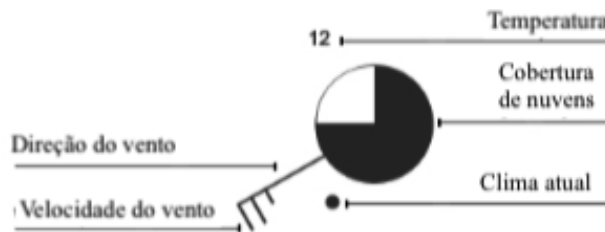
2. METODOLOGIA

Os dados climáticos foram mensurados em uma região central do município de Lages, SC (coordenadas de 27°49'00.10"S de latitude e 50°19'09.43"O de longitude), entre os meses de setembro e outubro de 2018, ao longo de

30 dias (não consecutivos), em diferentes horários (entre 12h e 13h; e entre 15h e 17h). Este período foi escolhido pois detém a maior precipitação média observada entre 1925 e 2005 para o município de Lages (Soccol et al., 2010). De acordo com Monteiro (2001), estes são os meses com maior ocorrência de CCMs (Complexos Convectivos de Mesoescala) no Estado de Santa Catarina, o que significa uma maior nebulosidade e uma redução das horas de insolação e, com isso, a época do ano mais limitante quanto ao aproveitamento de energia solar a partir de sistemas fotovoltaicos.

Os dados de radiação solar global foram obtidos a partir do instrumento MES-100 da marca Instrutherm. As medições foram realizadas a cerca de um metro e meio do solo, com o instrumento direcionado o mais próximo possível para a posição horária do Sol. Além das medidas de radiação solar, dados relacionados às condições climáticas, como temperatura e nebulosidade, também foram observados. A medição da temperatura do ar foi realizada com termohigrômetro digital da marca Instrusul. Para medição de nebulosidade, utilizou-se uma escala em oitavos (sinóticos) e décimo (climatológico), onde divide-se o céu em oito partes e contabiliza-se o total deste coberto por nuvens (Fig. 3), via observação.

número do código	Quantidade de nuvens
0 ausência de nuvens.....	0
1 oitavo ou menos de céu coberto, mas não zero (1°octa).....	1/10 ou menos
2 oitavo de céu coberto (2°octa).....	2/10 - 3/10
3 oitavo de céu coberto (3°octa).....	4/10
4 oitavo de céu coberto (4°octa).....	5/10
5 oitavo de céu coberto (5°octa).....	6/10
6 oitavo de céu coberto (6°octa).....	7/10 - 8/10
7 oitavo de céu coberto (7°octa).....	9/10 ou mais
8 céu completamente encoberto (8°octa).....	10/10
9 céu obscurecido ou impossibilidade de avaliar a quantidade.	



Símbolos utilizados no diagrama de clima

Símb.	Precipitação	Círculos	Cob. nuvens	Círculos	Velocidade vento
☉	Chuvisco	○	Céu Limpo	○	Calmo
▽	Aguaceiro	◐	1 Octa	○	1 - 2 nós
●	Chuva	◑	2 Octas	○	5 nós
★	Neve	◒	3 Octas	○	10 nós
△	Granizo	◓	4 Octas	○	15 nós
⚡	Trovoada	◔	5 Octas	○	20 nós
		◕	6 Octas	○	50 nós ou mais
●●●	Chuva Forte	◖	7 Octas		
●★	Água-neve	◗	8 Octas		
★▽	Nevasca	⊗	Céu Encoberto		
≡	Neblina				
≡≡	Nevociro				

Figura 3 - Codificação e representação da nebulosidade (LAPA, 2012; NOAA, 2019).

A carta solar da região (Fig. 4) foi obtida a partir do programa Sun Path Chart Program (SRML, 2007), que indica uma duração solar no período de estudo de cerca de 12 h.

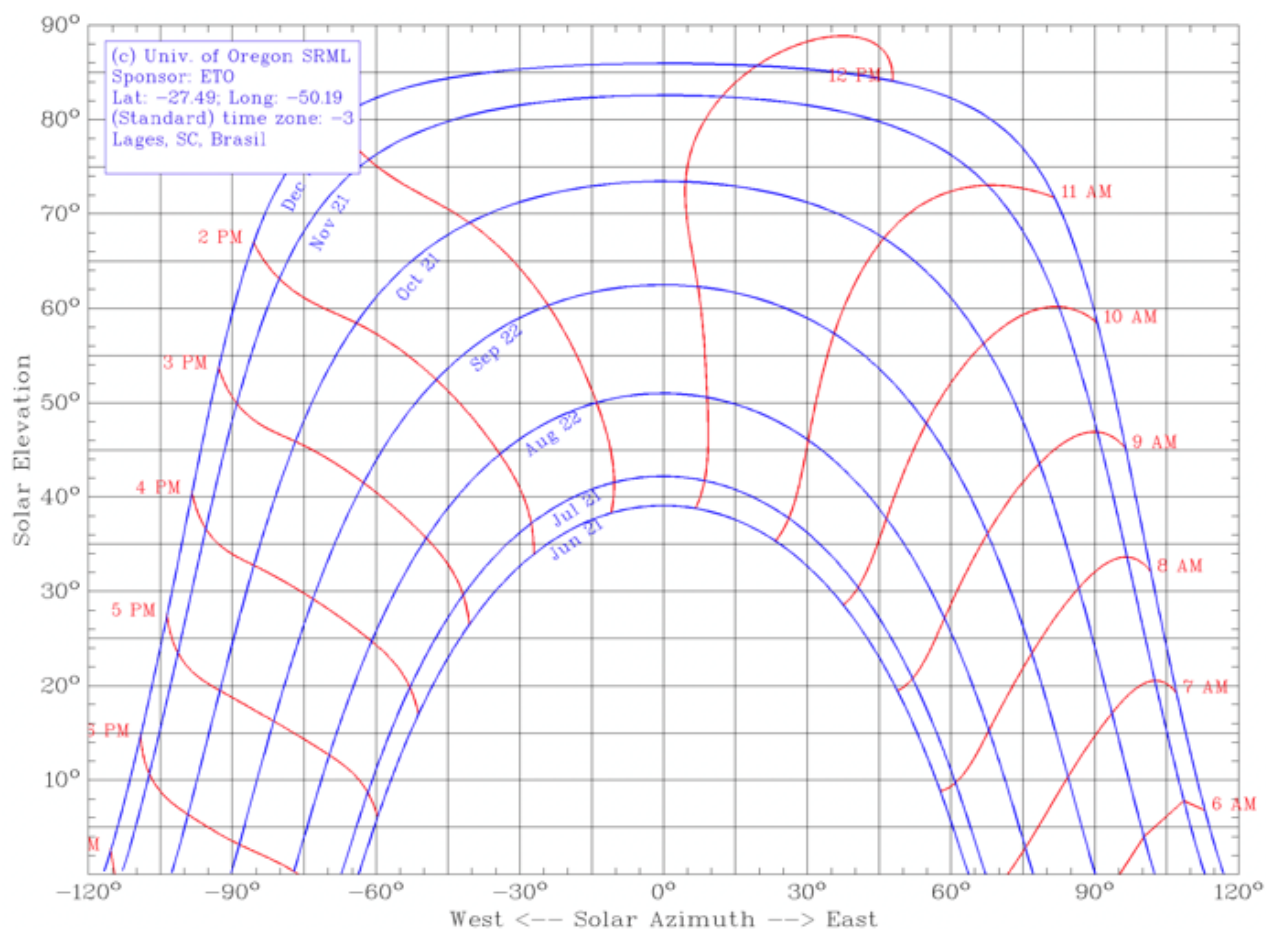


Figura 4 – Carta solar de Lages, SC (SRML, 2007).

Para realizar o cálculo do potencial de geração de energia, utilizou-se como referências três módulos solares FV comerciais, de diferentes marcas e modelos, todos compostos por células de silício policristalino, e cujas especificações encontram-se na Tab. 1. A escolha por módulos de Si-policristalino se deu por apresentarem excelente custo-benefício, tendo um menor custo em relação aos módulos de Si-monocristalino. Entretanto, é importante ressaltar que os módulos de Si-monocristalino possuem uma eficiência maior e, conseqüentemente, ocupam uma menor área, sendo o seu estudo interessante para serem considerados em trabalhos futuros. As curvas de potência em função da irradiação incidente para os módulos estão apresentadas na Fig. 5 (Canadian Solar Inc., 2017; Risen Energy, 2017; Byd Energy do Brasil, 2017).

Tabela 1 – Especificações dos módulos solares fotovoltaicos utilizados no estudo.

MARCA	MODELO	ÁREA (m ²)	CORRENTE DE PICO – I _{mpp} (A)	TENSÃO DE PICO – V _{mpp} (V)	POTÊNCIA MÁXIMA – P _{max} (W)
Canadian Solar	CS6U-330P	0,068	8,88	37,20	330
Risen	RSM72-6-330P	0,078	8,70	38,10	330
Byd	310-P6C-36	0,068	8,52	36,38	310

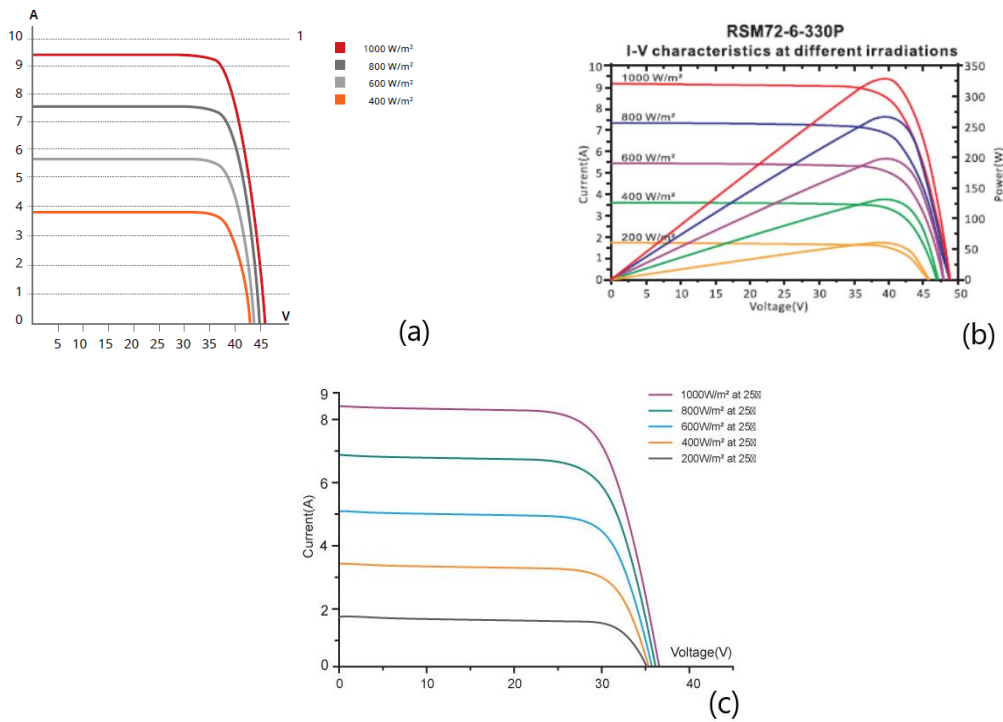


Figura 5 - Curvas de potência em função da irradiação: (a) Canadian Solar; (b) Risen; (c) Byd.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante o período estudado, verificou-se a relação entre a radiação que incide na superfície terrestre, a presença de nuvens na atmosfera e a temperatura do ar. Conforme mostrado na Fig. 6, a radiação solar variou bastante, e em cerca de 1/3 dos períodos observados, manteve-se acima de 800 W/m², com valor médio de 553,9 W/m² (desvio padrão de 396,0 W/m², valor máximo de 1228,0 W/m², e valor mínimo de 33,7 W/m²). Observou-se uma forte influência da nebulosidade sobre a radiação, como esperado, exceto em algumas medições (como nos períodos 4, 15 e 22) em que, mesmo sob céu praticamente limpo, a radiação ficou abaixo ou próximo da média. Isto pode ter sido devido a presença de poucas nuvens, porém mais densas e concentradas em alguns pontos do céu, o que caracterizava uma baixa nebulosidade (de acordo com a metodologia adotada), mas ainda assim, com interferência sobre a propagação da radiação incidente. Isto é consistente com o apresentado por Chrobak *et al.* (2016), que observou que a extensão da cobertura de nuvens não permite determinar a sua força, tipo e densidade, fatores que afetam muito a transmitância dos raios solares através das nuvens. Para o período em análise, em apenas 30% dos dias a fração de nuvens indica a condição de céu parcialmente nublado a nublado (ou seja, superior a 4 oktas). Vale ressaltar que em condições de céu parcialmente nublado a nublado há um predomínio de radiação difusa, reduzindo a incidência solar direta. Porém, na maioria dos dias a condição foi favorável a ocorrência de radiação direta, o que favorece a presença de raios solares.

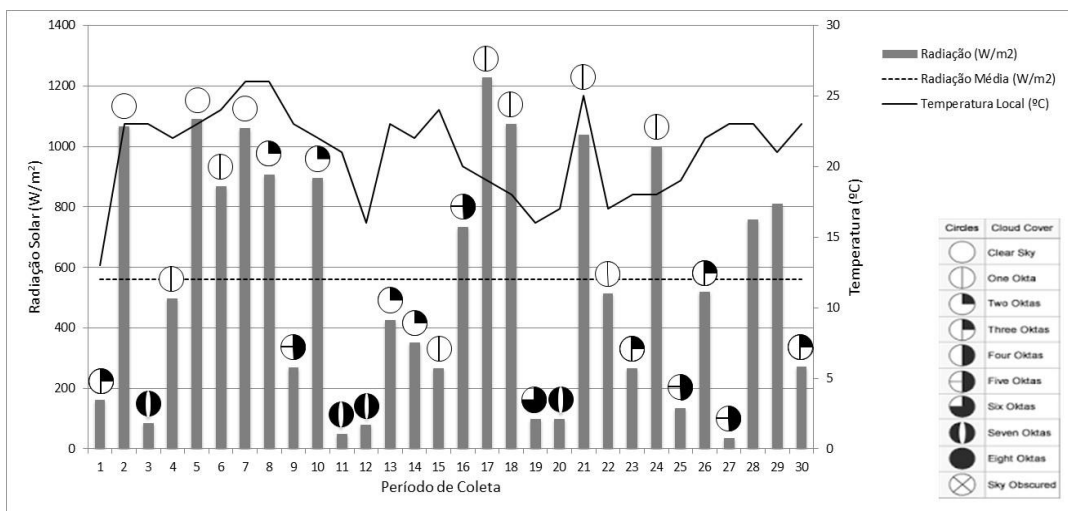


Figura 6 - Dados de radiação solar, nebulosidade e temperatura locais no período.

Os resultados demonstram que a temperatura do ar, mesmo em períodos de alta irradiação, não ultrapassou 30°C, o que indica um ponto positivo para o funcionamento de uma placa solar, cuja eficiência é reduzida quando sujeita a temperaturas elevadas. Mesmo com variações nas condições de nebulosidade, a radiação média para o período foi de 553,9 W/m², o que pode ser considerado um valor aceitável, visto que representaria uma perda de menos de 50% sobre a potência máxima produzida por todos os módulos (perdas de 39% para o módulo da Canadian Solar e de 45% para os demais módulos).

Para uma melhor visualização, classificou-se os dados medidos de radiação local em ótimo, regular e ruim, em relação ao valor médio obtido nas medições (553,9 W/m²). Desta forma, obteve-se a quantidade de dias correspondentes a cada categoria, conforme pode ser visto na Tab. 2.

Tabela 2 – Classificação da radiação solar local.

CLASSIFICAÇÃO	RADIAÇÃO SOLAR (W/m ²)	Nº DE DIAS	% DOS DIAS
Ótima	> 554	13	43
Regular	100 a 554	11	36
Ruim	< 100	6	20

Como se pode observar, dos 30 dias de medição, em 13 deles a radiação esteve acima da média calculada para o período, o que indica um total de 43% dos dias no período classificados com ótima radiação. Dentre o período de observação, 11 dias foram classificados como regulares, totalizando 36% dos dias medidos com radiação regular; apenas 6 desses dias de medições foram classificados como ruins, dando um total de 20% de dias com radiação ruim. Desta forma, pode-se constatar que dos 30 dias avaliados, foram registrados 24 dias com uma radiação que pode ser considerada aproveitável.

Para estimar o quanto seria produzido de eletricidade a partir de módulos FV no período estudado, obteve-se, a partir da regressão linear dos dados dos módulos selecionados (e apresentados na Tab. 1), as equações que relacionavam a irradiação com a potência produzida, sendo a Eq. (1) referente ao módulo da Canadian Solar ($R^2 = 0,9997$), a Eq. (2) referente ao módulo da Risen ($R^2 = 0,9993$), e a Eq. (3) referente ao módulo da Byd ($R^2 = 0,9999$).

$$P = 0,358.I + 0,9 \quad (1)$$

$$P = 0,335.I - 5 \quad (2)$$

$$P = 0,3094.I + 0,014 \quad (3)$$

A partir dos dados de radiação, obteve-se o quanto cada módulo produziria. Os valores médios estão apresentados na Tab. 3. Considerando a duração solar em Lages/SC de 12 h no período, pode-se estimar aproximadamente a partir do valor médio o quanto cada módulo FV geraria por dia.

Tabela 3 – Estimativa da energia elétrica média produzida no período.

MÓDULO FV	POTÊNCIA MÉDIA (W)	ENERGIA ELÉTRICA ESTIMADA (kWh/dia)	CUSTO (R\$)
Canadian Solar	199,2	2,39	839,00
Risen	180,5	2,17	909,00
Byd	171,4	2,06	855,00

Avaliando os dados segundo o consumo médio residencial na Região Sul do Brasil de 267,2 kWh/mês (Fedrigo *et al.*, 2009), o que corresponderia a um gasto mensal de aproximadamente 155 reais (excluindo-se as demais taxas), calculados a partir do valor de R\$ 0,58 por kWh (média do tarifário que é cobrado no local do estudo), conclui-se que 5 módulos de Si-policristalino seriam suficientes para suprir esta demanda energética. Em Santa Catarina, uma residência com ligação solar fotovoltaica *on-grid*, ou seja, ligada à rede, está sujeita a um custo de disponibilidade na fatura de luz que, de acordo com o tipo de ligação (monofásica, bifásica ou trifásica), estabelece uma taxa tarifada segundo um consumo de 30 kWh, 50 kWh e 100 kWh, respectivamente. Com isto, ao considerar-se um suprimento total da energia pelos módulos fotovoltaicos, o valor a ser cobrado em fatura residencial no caso descrito seria de apenas 17,4 reais para uma rede monofásica e de cerca de 29,0 reais para uma rede bifásica.

4. CONCLUSÃO

Conclui-se com este trabalho que os resultados indicam um aproveitamento satisfatório da energia solar fotovoltaica na cidade de Lages/SC, com base no período estudado e segundo as condições climáticas observadas. Com isto, demonstra-se um potencial de aplicação deste tipo de energia para a região. A instalação de módulos fotovoltaicos de Si-policristalino permite uma redução de 81% a 88% no valor da conta de luz de seus usuários e proporciona um efeito muito positivo do ponto de vista ambiental. Na sequência, novos estudos serão aplicados na região serrana catarinense, de forma a avaliar o potencial de energia solar em função de outros elementos meteorológicos (insolação, radiação direta, radiação difusa, vento, entre outros parâmetros), assim como as diferenças espaciais e sazonais, e outros tipos de módulos fotovoltaicos.

REFERÊNCIAS

- ANEEL, 2005. Atlas de Energia Elétrica do Brasil, 2. ed., Agência Nacional de Energia Elétrica.
- Byd Energy do Brasil, 2017. Ficha Técnica dos Módulos Fotovoltaicos P6C-36-SERIES-4BB, V 2.0.2017.
- Canadian Solar Inc., 2017. PV Module Product Datasheet CS6U-325P-340P, V 5.551_EN.
- Chrobak, P., Skovajsa, J., Zalesak, M., 2016. Effect of cloudiness on the production of electricity by photovoltaic panels, MATEC Web of Conferences, vol. 76.
- Fedrigo, N. S., Gonçalves, G., Lucas, P. F., Guisi, E., 2009. Usos Finais de Energia Elétrica no Setor Residencial Brasileiro, Relatório de Iniciação Científica, ECV, UFSC, Florianópolis.
- Ferreira, L., Amarante, M., Cintra, A., Lourenço, R., Cristiano, C., 2018. Energia solar fotovoltaica, Revista Pesquisa e Ação, vol. 4, n. 1, pp. 153-161.
- Gore, A., 2010. Nossa escolha: um plano para solucionar a crise climática, Manole.
- Hinrichs, R. A., Kleinbach, M., Reis, L. B., 2014. Energia e Meio Ambiente, Cengage Learning.
- LAPA, 2012. Codificação de Nebulosidade. Laboratório de Análises e Previsões Ambientais, CEFET, RJ. Disponível em: <http://meteoro.cefet-rj.br/almir/observacional/observacional_nebulosidade2_1_12.pdf>.
- Monteiro, M. A., 2001. Caracterização climática do estado de Santa Catarina: uma abordagem dos principais sistemas atmosféricos que atuam durante o ano, Geosul, vol. 16, n. 31, pp. 69-78.
- NOAA, 2019. Explanation of Standard International Symbols, National Oceanic and Atmospheric Administration. Disponível em: <<https://www.wpc.ncep.noaa.gov/dailywxmap/explanation.html>>.
- Risen Energy, 2017. PV Module Product Datasheet, RSM72-6-320P-340P/4BB, V REM72-4BB-EN-BVC-H2.2017.
- Ruviaro, R. S., Daltrozo, J. G., Garlet, L., Lourenço, W. M., Santos, I. P., 2018. Análise da variação da eficiência do módulo fotovoltaico em função da temperatura, VII CBENS - VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Gramado.
- Soccol, O. J., Cardoso, C. O., Miquelluti, D. J., 2010. Análise da precipitação mensal provável para o município de Lages, SC, Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, vol. 14, n. 6, pp. 569-574.
- SRML, 2007. Sun Path Chart Program, Solar Radiation Monitoring Laboratory, University of Oregon. Disponível em: <<http://solardat.uoregon.edu/SunChartProgram.html>>.

ANALYSIS OF CLIMATE FACTORS IN THE APPLICATION OF SOLAR PHOTOVOLTAIC ENERGY IN LAGES/SC

Abstract. *Due to the emergence of the industrial revolution and the global technological advance, the emission of polluting gases has been growing year after year, causing environmental overpressures that have increased the risk of collapse between the new demands of society and the dynamics of the environment. One of the solutions that can be adopted to minimize the impacts of conventional energy sources is the use of solar energy, which is often neglected as an alternative in cold and rainy places. In this work, it was evaluated the potential of electric power generation from three commercial photovoltaic solar modules in the city of Lages - SC, analyzing the interference of some climate variables, such as global solar radiation, air temperature and cloudiness, which may limit the use of this type of power source. The results indicate that even under the worst climatic conditions for photovoltaic solar at the study site, most of the observed days presented solar radiation higher than the period average (553.9 W/m²), which would represent satisfactory electric generation, around 2.0 kWh/day, from commercially available polycrystalline silicon photovoltaic modules.*

Key words: *Solar Radiation, Cloudiness, Photovoltaic Modules*