

AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA TEMPERATURA NO RENDIMENTO DA PRODUÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA: ESTUDO DE CASO

Gustavo Neves **Margarido**¹, Federico Bernardino Morante **Trigoso**², Carlos **Frajuca**³

(1 – Universidade Federal do ABC, <https://orcid.org/0000-0003-1186-5694>, gnmargarido@ifsp.edu.br, 2 – Universidade Federal do ABC, <https://orcid.org/0000-0003-0343-5096>, federico.trigoso@ufabc.edu.br, 3 – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, <https://orcid.org/0000-0001-8463-3451>, frajuca@ifsp.edu.br)

Resumo: Este artigo apresenta a comparação de desempenho de módulos fotovoltaicos em dois cenários em que as temperaturas de operação são diferentes. A temperatura de operação influencia na potência máxima alcançada pelos módulos durante sua atuação. A comparação foi feita utilizando-se as temperaturas médias de duas cidades do Estado de São Paulo (Brasil). A comparação mostra que locais mais quentes apresentam considerável redução no desempenho em geração fotovoltaica. A análise da comparação indica ser necessário levar esse problema em consideração na geração fotovoltaica em regiões quentes.

Palavras-chave: Influência da temperatura, eficiência, módulos fotovoltaicos.

EVALUATION OF THE TEMPERATURE IMPACT ON THE PRODUCTION OF PHOTOVOLTAIC ENERGY: CASE STUDY

Abstract: This article presents the performance comparison of photovoltaic modules in two scenarios in which the operating temperatures are different. The operating temperature influences the maximum power achieved by the modules during their operation. The comparison was made using the average temperatures of two cities of the State of São Paulo (Brazil). The comparison shows that warmer locations have a considerable reduction in performance in photovoltaic generation. The comparison analysis indicates that it is necessary to take this problem into consideration in photovoltaic generation in hot regions.

Keywords: Influence of temperature, efficiency, photovoltaic modules.

EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA TEMPERATURA EN EL RENDIMIENTO DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA: ESTUDIO DE CASO

Resumen: Este artículo presenta la comparación de rendimiento de módulos fotovoltaicos en dos escenarios en los que las temperaturas de funcionamiento son diferentes. La temperatura de funcionamiento influye en la potencia máxima alcanzada por los módulos durante su funcionamiento. La comparación se realizó utilizando las temperaturas promedio de dos ciudades del Estado de São Paulo (Brasil). La comparación muestra que los lugares más cálidos muestran una reducción considerable en el rendimiento de la generación fotovoltaica. El análisis de la comparación indica que es necesario tener en cuenta este problema en la generación fotovoltaica en regiones cálidas.

Palabras clave: Influencia de la temperatura, eficiencia, módulos fotovoltaicos.

1. Introdução

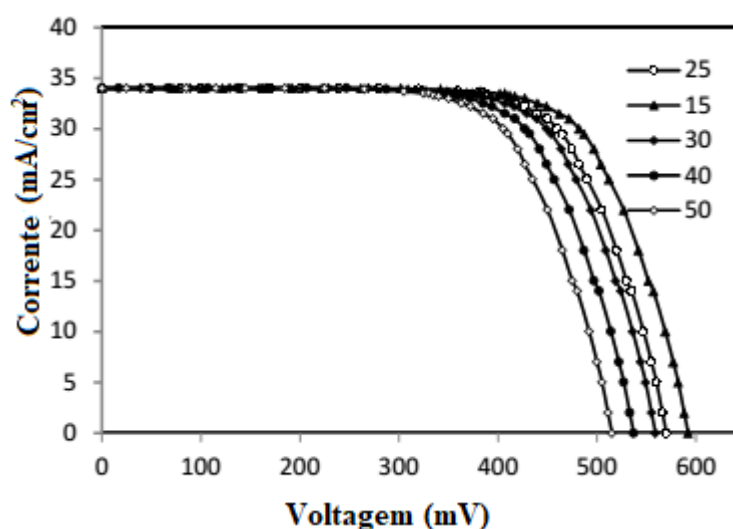
A energia solar vem ganhando cada vez mais espaço na matriz energética mundial, não só pela busca de soluções para possíveis esgotamentos das já exploradas fontes energéticas tradicionais, mas também pela busca de fontes que proporcionem menos impactos ambientais, tais como o lançamento de poluentes ou ainda a liberação de calor ao ambiente, já que “a energia solar não perturba o equilíbrio térmico da Terra” (PALZ, 1995, p. 110). A utilização direta de energia solar pode ser realizada com o aproveitamento térmico de energia ou a geração elétrica por efeito fotovoltaico. No Brasil houve o registro de um aumento da potência instalada para geração fotovoltaica nos últimos anos, sendo registrado o valor total de 2473 MW em 2019 de potência instalada (EPE: BEN, 2020, p. 158).

Alguns fatores influenciam a capacidade dos módulos na geração fotovoltaica, tais como o tempo de exposição plena do Sol, presença de fatores que possam causar sombreamento (nos módulos), a incidência solar presente na região e a temperatura de trabalho, pois os módulos fotovoltaicos apresentam sensibilidade à temperatura. A

temperatura do ambiente em que está exposto o módulo fotovoltaico, irá influenciar no seu funcionamento, sendo que o excesso irá limitar a potência prevista em ensaios de laboratório, que geralmente são realizados à 25 °C (ZAINI, 2015). O estudo e conhecimento dos fatores operacionais limitantes tornam-se importantes para o melhor emprego da tecnologia fotovoltaica.

A temperatura afeta o funcionamento das células fotovoltaicas, componentes dos módulos, com a diminuição da tensão apresentada em decorrência do aumento da temperatura. A corrente elétrica também é afetada nas células, apresentado uma elevação em correspondência ao aumento da temperatura, porém, essa alteração de corrente é muito pequena (Figura 1). Quando a alteração de corrente (devido a alteração de temperatura), é comparada à alteração da tensão, a mesma pode ser considerada desprezível (PINHO, 2014).

Figura 1 - Relação de tensão e corrente em diversas temperaturas



Fonte: Adaptado de TOBNAGHI (2013)

Para o relacionamento entre a temperatura de trabalho e a tensão encontrada na célula fotovoltaica, é estabelecido o coeficiente β que relaciona a tensão de circuito aberto e a variação temperatura (Equação 1).

$$\beta = \frac{\Delta V_{oc}}{\Delta T} \quad (1)$$

Onde:

V_{OC} – Tensão de circuito aberto [V]

T - Temperatura [°C]

A tensão de circuito aberto para uma dada temperatura pode ser calculada com o conhecimento de β e da tensão de circuito aberto informados pelo fabricante do módulo (Equação 2).

$$V_{oc}(T) = V_{oc_{stc}} \cdot (1 + \beta \cdot (T - 25)) \quad (2)$$

Onde:

V_{OCstc} – Tensão de circuito aberto nas condições-padrão de ensaio [V]

A corrente de curto circuito também é relacionada à variação de temperatura, estabelecendo essa relação o coeficiente α (Equação 3).

$$\alpha = \frac{\Delta I_{SC}}{\Delta T} \quad (3)$$

Onde:

I_{SC} – Corrente de curto-circuito [A]

O coeficiente γ relaciona a máxima potência de pico com a variação de temperatura (Equação 4).

$$\gamma = \frac{\Delta P_{MP}}{\Delta T} \quad (4)$$

Onde:

P_{MP} – Potência máxima ou potência de pico [W]

A temperatura encontrada no módulo fotovoltaico pode ser aproximada por um cálculo simplificado que leva em consideração a incidência solar (Equação 5).

$$T_{mod} = T_{amb} + K_t \times G \quad (5)$$

Onde:

T_{amb} – Temperatura ambiente [$^{\circ}\text{C}$]

K_t – Coeficiente térmico do módulo [$^{\circ}\text{C}/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]

G – Irradiância incidente sobre o módulo [W/m^2]

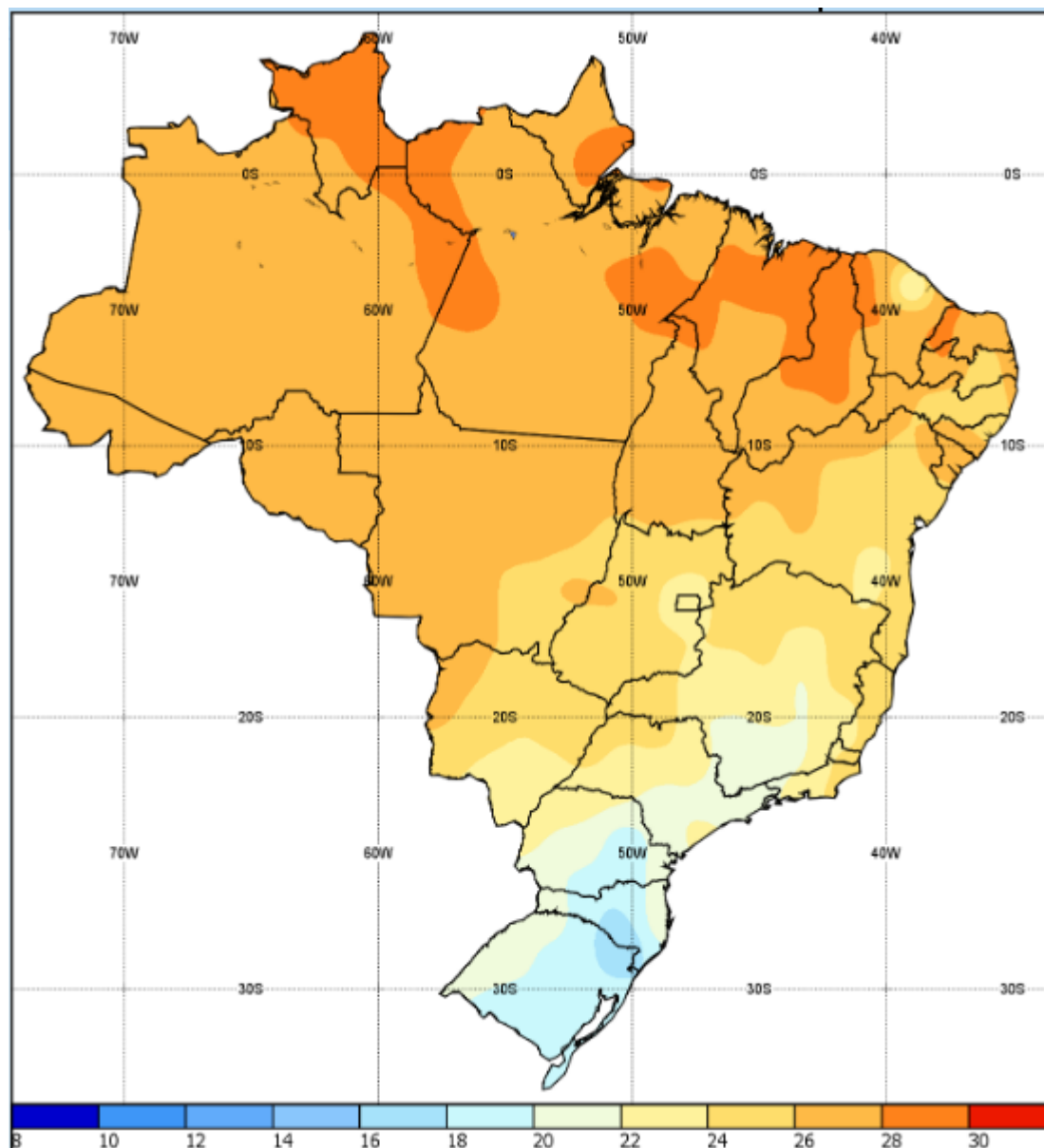
2. Condições do cenário nacional

O Brasil apresenta uma ampla variedade de temperaturas e intensidade de radiação solar em suas vastas extensões. Essas variações são observadas todos os anos, em decorrência da região e da época do ano. Analisando o levantamento de dados constante em normais climatológicas, podemos obter dados de temperatura de algumas cidades brasileiras e ainda outros dados climatológicos, tais como pressão atmosférica e umidade relativa do ar. O entendimento de normais climatológicas pode ser alcançado através das regulamentações técnicas da Organização Meteorológica Mundial (OMM), que definem normais como “valores médios calculados para um período relativamente longo e uniforme, compreendendo no mínimo três décadas consecutivas” (INMET, 2018). As diferenças de temperaturas no território nacional ficam mais evidentes quando são observados mapas de temperatura que possibilitam a análise gráfica de níveis de temperatura por período. O mapa de temperaturas médias anuais de uma normal climatológica nacional com dados de 1981 à 2010 (Figura 2), mostra a variação da intensidade de temperaturas encontradas por região ou localidade.

Assim como a temperatura, a incidência de irradiação solar também não é igual e uniforme em toda a extensão do território nacional, conforme pode ser observado no mapa de irradiação solar diária (Figura 3).

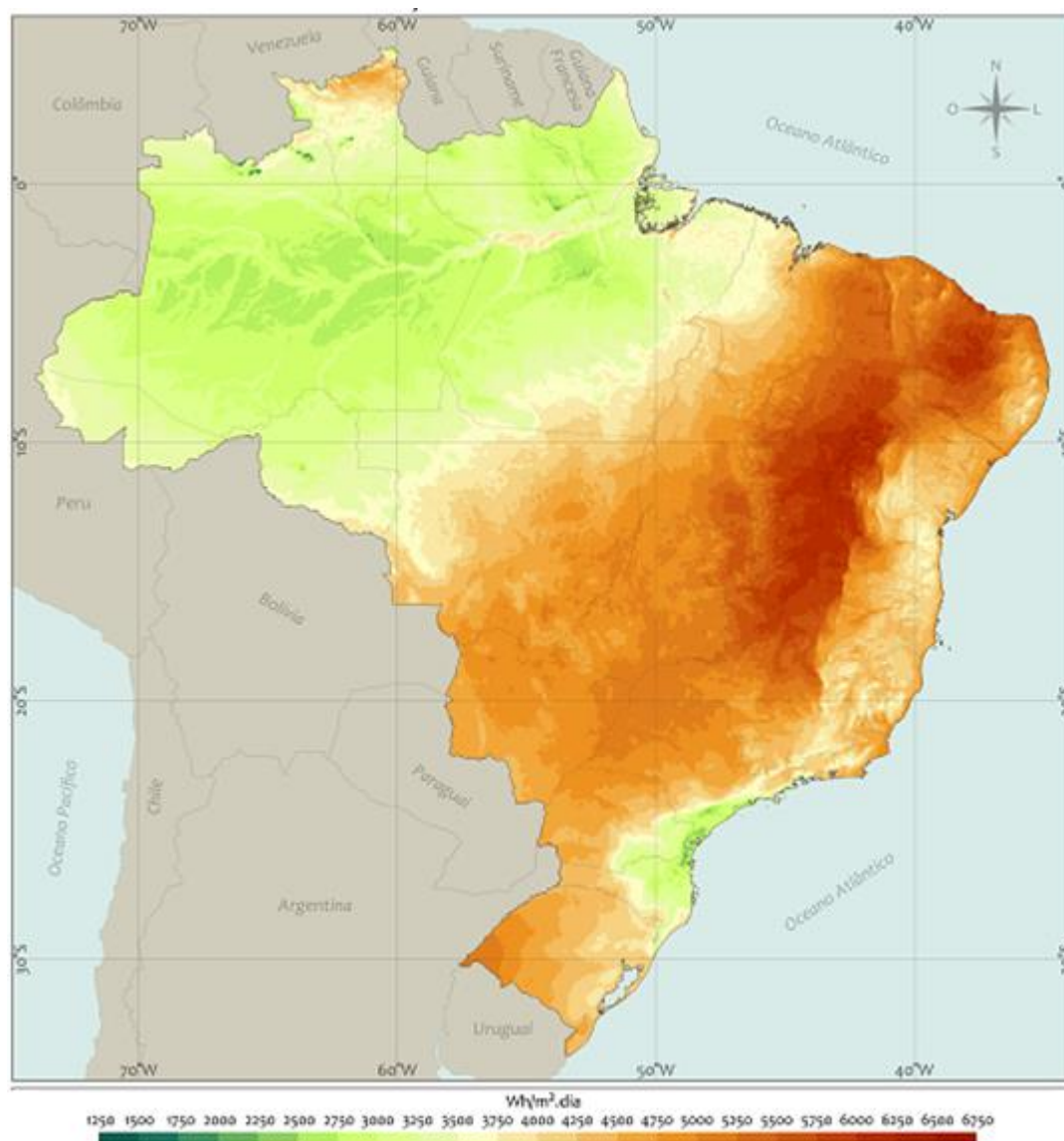
O diferencial da incidência de irradiação acaba por proporcionar um total de energia diferente recebido em cada região, conforme pode ser observado no mapa do total anual de irradiação solar direta normal (Figura 4). Algumas regiões acabam aparecendo como receptoras de quantidade bem maior de energia solar anual do que outras. O mapa ainda mostra que a maior quantidade de energia solar total incidente em um ano, apresenta-se em duas porções limitadas da região nordeste do território nacional.

Figura 2 - Temperatura média anual de normal climatológica do período de 1981-2010 –
Valores de temperatura em °C



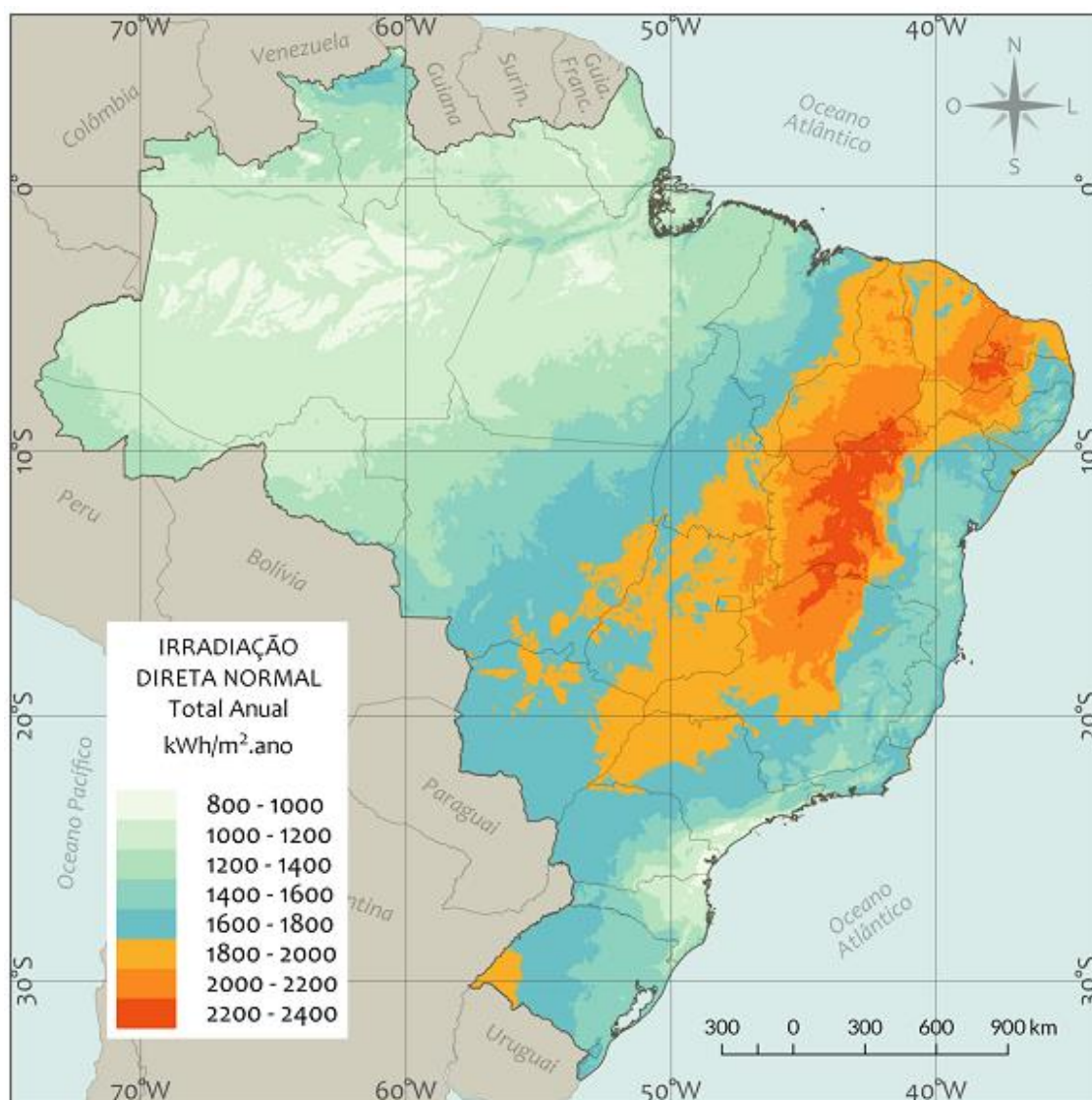
Fonte: INMET (2018)

Figura 3 - Média anual do total diário de irradiação solar direta normal



Fonte: INPE (2017)

Figura 4 - Total anual de irradiação solar direta normal



Fonte: INPE (2017)

Algumas regiões com maior irradiação solar total, também acabam por apresentar temperaturas médias de trabalho mais altas, podendo proporcionar assim um menor rendimento do aproveitamento da irradiação solar total na geração fotovoltaica. Ainda em uma comparação, poderá ser observado (nos mapas), regiões com menor irradiação solar total e ainda a apresentação de temperaturas médias altas, podendo proporcionar assim, ainda um

menor aproveitamento. As comparações sugerem que um estudo de irradiação e temperatura locais, podem proporcionar um melhor conhecimento do potencial de geração fotovoltaica por região.

3. Estudo comparativo

Foi realizado um estudo comparativo entre dois cenários de operação de módulos fotovoltaicos, com a comparação de condições proporcionadas por duas regiões com características climáticas diferenciadas em uma mesma divisão político-administrativa do território nacional, no caso, o Estado de São Paulo. Foi selecionada uma cidade em cada uma dessas regiões para a realização do estudo (Figura 5).

Figura 5 - Mapa do Estado com indicação das regiões de estudo



Fonte: Adaptação de mapa de estado apresentado por IBGE (2009)

As cidades selecionadas foram: a cidade de Votuporanga como objeto de estudo da região 1 e a cidade de Itapeva como objeto de estudo da região 2. A seleção levou em conta a disponibilidade de dados para o estudo, tais como registros de normais de temperatura (Tabela 1).

Tabela 1 - Temperatura média mensal de normal climatológica do período de 1961-1990

	Temperatura Média (°C)												Média
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	
Votuporanga	24,9	25,1	25,0	24,2	21,9	20,1	20,2	22,5	23,2	24,8	25,4	25,0	23,5
Itapeva	22,6	23,0	22,0	19,7	17,1	15,2	15,1	16,3	17,4	19,2	20,7	21,7	21,7

Fonte: Dados de Normais Climatológicos - INMET (2018)

Outros dados importantes para o estudo foram os valores regionais de irradiação solar incidente por período (Tabela 02).

Tabela 2 - Radiação solar global média do período entre 1995-2005

	Irradiação Solar (kWh/m ² .dia)				
	Anual	Primavera	Verão	Outono	Inverno
Votuporanga	5,6	6,8	6,0	4,7	5,0
Itapeva	4,9	5,9	5,6	4,0	4,0

Fonte: Dados da Secretaria de Energia do Estado de São Paulo

4. Análise e discussão

Utilizando-se os valores de temperatura média de cada período e a irradiação solar dos respectivos períodos, foram calculados os valores estimados de temperatura dos módulos fotovoltaicos (Equação 5). A diferença de potência máxima foi calculada (Equação 4), utilizando a temperatura calculada do módulo e considerando a temperatura padrão de ensaio de 25 °C e $\gamma = -0,5 \% / ^\circ\text{C}$, e tempo de 07 horas de sol pleno. Os valores foram reunidos em uma tabela (Tabela 3).

A tabela mostra a diferença de potência encontrada para os módulos instalados em cada uma das regiões (1 e 2), considerando a temperatura dos módulos em cada mês, possibilitando assim calcular o déficit total de potência acumulada no ano. Observa-se que, ambas as regiões, a soma das perdas mensais relativas à temperatura durante a operação em um ano são altas, podendo assim representar até a perda de um mês de geração fotovoltaica em cada ano.

Tabela 3 - Comparação de temperatura, irradiação e influência nos módulos fotovoltaicos por região.

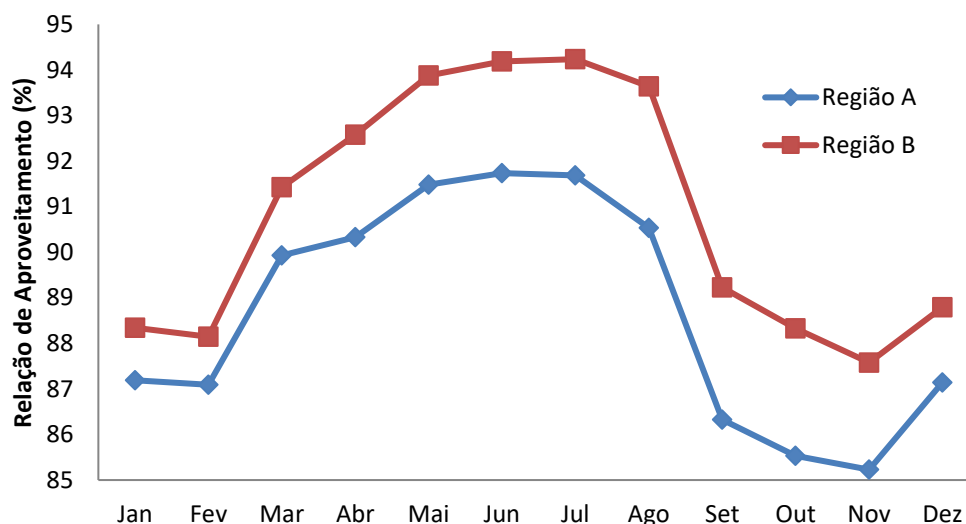
Região 1 -Votuporanga (SP) / Região 2 - Itapeva (SP)								
	Temp. Ambiente (°C)		Irradiação (kWh/m ² .dia)		T. Módulo (°C)		ΔP_{MP} (%)	
	Reg. 1	Reg. 2	Reg. 1	Reg. 2	Reg. 1	Reg. 2	Reg. 1	Reg. 2
Jan	24,9	22,6	6,0	5,6	50,6	48,3	-12,81	-11,66
Fev	25,1	23,0	6,0	5,6	50,8	48,7	-12,91	-11,86
Mar	25,0	22,0	4,7	4,0	45,1	42,1	-10,07	-8,57
Abr	24,2	19,7	4,7	4,0	44,3	39,8	-9,67	-7,42
Mai	21,9	17,1	4,7	4,0	42,0	37,2	-8,52	-6,12
Jun	20,1	15,2	5,0	4,0	41,5	36,6	-8,26	-5,81
Jul	20,2	15,1	5,0	4,0	41,6	36,5	-8,31	-5,76
Ago	22,5	16,3	5,0	4,0	43,9	37,7	-9,46	-6,36
Set	23,2	17,4	6,8	5,9	52,3	46,5	-13,67	-10,77
Out	24,8	19,2	6,8	5,9	53,9	48,3	-14,47	-11,67
Nov	25,4	20,7	6,8	5,9	54,5	49,8	-14,77	-12,42
Dez	25,0	21,7	6,0	5,6	50,7	47,4	-12,86	-11,21

Fonte: Autores

Verifica-se que a região 1 (cidade de Votuporanga-SP), apresenta uma perda de 26,15% maior do que a região 2 (cidade de Itapeva-SP), em cada ano, observando-se que a diferença média de temperaturas médias mensais das duas regiões foi de 4,36 °C ao ano.

Apesar do melhor rendimento da região 2, não encontramos nessa mesma região um rendimento maior que 95% durante todo o ano, rendimento esse no qual é considerado apenas as perdas de aproveitamento devido a influência da temperatura, sem considerar outras perdas e rendimento do módulo na conversão da energia solar em energia elétrica. Um gráfico comparativo foi feito, exibindo a relação de aproveitamento percentual da irradiação solar considerando as perdas de rendimento devido à temperatura e trabalho para cada mês do ano (Gráfico 1). No gráfico é possível observar claramente a diferença de desempenho das regiões estudadas.

Gráfico 1 - Resultado do estudo da potência solar mensal aproveitada.



Fonte: Autores

Observa-se que a região 1 (cidade de Votuporanga-SP), apresentaria um desempenho menor dos módulos fotovoltaicos em todo o período do ano, levando-se somente em consideração as perdas pelo fator da temperatura de operação, já que outros fatores também irão influenciar para o balanço do desempenho global dos módulos fotovoltaicos, tais como as condições de limpeza de suas superfícies, os materiais utilizados na fabricação da célula fotovoltaica, já que os diferentes materiais empregados na fabricação de células fotovoltaicas irão apresentar diferentes coeficientes de perda de rendimento em relação à temperatura de trabalho (HOLZMANN, 2021, p. 119), e a eficiência dos circuitos utilizados no controle e tratamento da potência elétrica gerada. A potência incidente da irradiação solar no local também é determinante nos resultados em termos da produção total de potência elétrica, já que tem relação direta com a conversão em energia elétrica pelos módulos fotovoltaicos, assim, para módulos com mesmo desempenho de trabalho, terão menos energia de conversão na região 2 (cidade de Itapeva-SP), onde a incidência solar é o menor entre as duas regiões estudadas.

5. Conclusões e comentários

- O estudo comparativo entre regiões que apresentam temperaturas diferenciadas, mostra que essa diferença de temperatura ambiental exerce forte influência no desempenho de trabalho dos módulos na geração fotovoltaica, devido à influência direta na temperatura de operação do módulo. Outro fator importante é a intensidade de radiação solar presente na região, que irá também exercer influência na temperatura do módulo, além de estar diretamente ligado com a capacidade de produção energética do recurso solar.
- As informações de temperaturas regionais mostram-se um dos fatores importantes para análises estratégicas de localidades para implantação de plantas de usinas fotovoltaicas, ou ainda a importância de buscar, para uma dada localidade, soluções para minimizar a perda de desempenho.
- A região 1 (cidade de Votuporanga-SP), que apresentou o histórico de temperaturas médias mensais maiores que a região 2 (cidade de Itapeva-SP), apresentou perdas de desempenho maior na análise simulada de eficiência em função da temperatura de trabalho, chegando a apresentar perda de cerca de até 15 % no aproveitamento da energia solar, somente pelo efeito da temperatura, sem considerar outras possíveis perdas.
- O estudo limitou-se a comparação hipotética e simulada entre duas cidades que apresentavam histórico de diferentes temperaturas médias e valores médios de irradiação solar, assim, incertezas são associadas ao estudo, que utiliza equações e coeficientes para o cálculo aproximado das perdas de eficiência.
- Mostra-se importante um maior conhecimento de temperaturas e incidência de energia solar no território nacional, com mais pontos de medições e registros frequentes, proporcionando assim, um melhor mapeamento e compartilhamento de dados.

Referências

- DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. *Solar Engineering of Thermal Processes*. Hoboken, New Jersey (USA): WILEY, 4rd. Edition, 2013, 910 p.
- EPE, Empresa de Pesquisa Energética (Brasil). BEN – *Balanço Energético Nacional 2020: Ano base 2019*. Ministério de minas e energia. Rio de Janeiro: EPE, 2020, 292 p.

HOLZMANN, H. A. (org). Impactos das Tecnologias na Engenharia de Materiais e Metalúrgica. Ponta Grossa - PR: Atena, 2021.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Atlas geográfico escolar. 5. Ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2009. 218p.

INMET, Instituto Nacional de Meteorologia. Normais Climatológicas do Brasil, período 1982-2010. Brasília: INMET, 2018. 23p.

INPE, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Atlas brasileiro de energia solar. 2.ed. São José dos Campos: INPE, 2017. 88p.

PALZ, W. *Energia solar e fontes alternativas*. Tradução de Norberto de Paula Lima. São Paulo: Hemus Editora Ltda., 1995. 358 p.

PINHO, J. T; GALDINO, M. A. (Orgs.). *Manual de Engenharia Para Sistemas Fotovoltaicos*. Rio de Janeiro: Grupo de Trabalho de Energia Solar, GTES– CEPEL – DTE - CRESESB, Edição revisada e atualizada, Março 2014, 530 p.

SÃO PAULO (Estado). Energia solar paulista: levantamento do potencial. São Paulo: Secretaria de energia, 2013. 46p.

TIBA, C. et al. Atlas Solarimétrico do Brasil: banco de dados solarimétricos. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2000. 111 p.

TOBNAGHI, D. M; MADATOV, R; NADERI, D. (2013) The Effect of Temperature on Electrical Parameters of Solar Cells. *IJAREEIE - International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*. Vol. 2, Issue 12, December.

ZAINI, N. H., et al. The effect of temperature on a mono-crystalline solar PV panel. *Energy Conversion (CENCON)*, 2015 IEEE Conference on. IEEE, 2015. DOI: 10.1109/CENCON.2015.7409548