



INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS METEOROLÓGICOS NA GERAÇÃO DE ENERGIA EM PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

David Lopes Pires¹, Thiago Luís Rodrigues¹, Italo Medeiros Pereira¹, Murilo Carlos Novais¹, Thiago Cardoso dos Santos¹, Ad Jefferson Custódio Gomes¹

¹UESC – Universidade Estadual de Santa Cruz

Resumo – A geração fotovoltaica tem importante relevância quando se trata de energias renováveis e minimização da dependência de combustíveis fósseis. Nesse contexto, é de suma importância realizar estudos, a partir de revisões bibliográficas, que visem identificar temas relacionados com o desempenho e produção continuada de energia elétrica através desse tipo de sistema de geração de energia. Um desses estudos abrange a análise da influência de parâmetros meteorológicos na geração da energia proveniente da ação dos painéis fotovoltaicos. Assim, esse trabalho busca apontar quais são esses parâmetros e de que forma estes influenciam essa forma de geração. Além disso, busca-se também estabelecer condições para análises futuras acerca de concretizações de projetos eficientes que levem em conta tais parâmetros, assim como ser um breve guia acerca deste tema.

Palavras-Chave – Geração de Energia, Parâmetros Meteorológicos, Sistemas Fotovoltaicos

INFLUENCE OF METEOROLOGICAL PARAMETERS ON THE GENERATION OF ENERGY IN PHOTOVOLTAIC PANELS

Abstract – Photovoltaic generation has an important relevance when it comes to renewable energies and minimizing dependence on fossils. In this context, it is extremely important to carry out studies based on bibliographic reviews that aim to identify topics related to the performance and continuous production of electric energy through this type of power generation system. This kind of study covers the analysis of the influence of meteorological parameters on the generation of energy from the action of photovoltaic panels. Thus, this work seeks to point out what these parameters are and how they influence this form of generation. In addition, it also seeks to establish conditions for future analysis on the implementation of efficient projects that take into account such parameters, as well as serving as a brief guide on this specific topic.

Keywords – Energy Generation, Meteorological Parameters, Photovoltaics Systems.

I. INTRODUÇÃO

Com o passar dos anos é cada vez mais evidente a utilização de fontes de geração de energia que venham de recursos naturais. Essas fontes de energia englobam as chamadas energias renováveis.

Nesse contexto, com o intuito de crescimento sustentável da sociedade e o afastamento da dependência de combustíveis fósseis, assim como concretização de projetos de diversificação da matriz energética, impulsiona-se a geração de energia a partir de fontes renováveis. Uma dessas formas de geração se dá por meio dos sistemas fotovoltaicos [1].

Atualmente, os países tentam afastar a dependência de combustíveis fósseis, tanto por questões econômicas, por exemplo, as crises do petróleo, quanto por impactos ambientais oriundos da queima desse tipo de combustível [1].

Nesse sentido, entre as vantagens do uso das energias renováveis, além de sua abundância, podemos citar sua instalação rápida, excelente solução para áreas remotas e uma alta confiabilidade e duração [2].

Com relação a suas desvantagens, deve-se levar em conta o alto custo (principalmente devido aos painéis fotovoltaicos e inversores, apesar de atualmente o preço de mercado ser altamente competitivo), intermitência e baixa eficiência em algumas regiões do planeta por conta da baixa irradiação solar (a potência elétrica produzida em sistemas fotovoltaicos varia com esse parâmetro) [2].

A Figura 1 representa o gigantesco potencial para uso de energia solar do Brasil. A radiação solar varia de acordo com a estação do ano e a região, sendo de 1500 a 2300 kWh/m² no ano, enquanto na Alemanha, país referência em potência de sistemas fotovoltaicos instalados, é de 900 a 1250 kWh/m² no ano. Mesmo com a radiação solar no território da Alemanha menor, o referido país se destaca na geração fotovoltaica em razão dos grandes incentivos governamentais, o que ainda não vemos no Brasil [3].

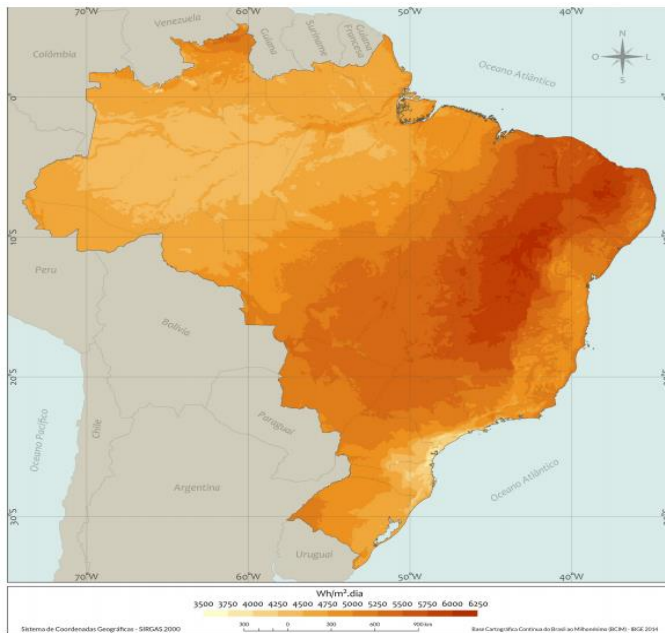
Desse modo, diversas pesquisas são realizadas com intuito de desenvolver tecnologias que maximizem a conversão de energia nos painéis fotovoltaicos e ao mesmo tempo as deixem acessíveis ao público em geral.

Nesse contexto, é importante apontar que a produção de energia solar em painéis fotovoltaicos é diretamente afetada

por parâmetros meteorológicos. Assim, um dos estudos fundamentais é identificar tais parâmetros, pois eles afetam diretamente o desempenho do sistema [2].

Dessa maneira, pretende-se estudar como os parâmetros de temperatura, umidade, radiação, velocidade do vento, etc, afetam a produção de energia de painéis fotovoltaicos, de forma a abrir possibilidade de explorar a viabilidade de implementação da geração de energia fotovoltaica em diferentes regiões do país.

Fig. 1. Média anual de total diário da irradiação no plano inclinado na latitude do Brasil.



Fonte: [3].

II. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

A partir desse momento é fundamental explicitar o funcionamento básico de sistemas fotovoltaicos, haja vista que assim é possível tratar sobre o tema central e expor os fundamentos necessários para a análise da influência dos parâmetros meteorológicos na geração de energia solar.

Dito isso, primeiramente, é necessário destacar as características relacionadas com a geração fotovoltaica em si. Para isso, é preciso identificar características do sistema e como se dá o processo de geração de energia [4].

Assim, a característica fundamental que permite o uso de células fotovoltaicas é a de que quando um fóton incide sobre um material semiconductor (normalmente silício), com energia superior à banda proibida, gera pares elétron-lacuna. Estes elétrons e lacunas fotogerados podem mover-se dentro do material, aumentando assim sua condutividade elétrica [4].

Contudo, uma célula fotovoltaica composta por cristais de silício puro não produziria energia elétrica ao absorver fótons. Os elétrons entrariam na banda de condução, mas acabariam recombinando-se com as lacunas, sem gerar nenhuma corrente elétrica [5].

Para gerar corrente elétrica, deve haver um campo elétrico, que é obtido por meio de um processo denominado dopagem de silício [5].

Normalmente, essa dopagem contém elementos como o boro e o fósforo para alterar suas propriedades elétricas, criando duas camadas na célula: a camada tipo p e a camada tipo n, que possuem, respectivamente, um excesso de cargas positivas e um excesso de cargas negativas, em relação ao silício puro [6].

Na região onde os dois materiais se encontram, designada junção p-n, é formado um campo elétrico que separa os portadores de carga que a atingem: os elétrons, excitados pelos fótons, são acelerados para um terminal negativo, enquanto as lacunas são enviadas para um terminal positivo.

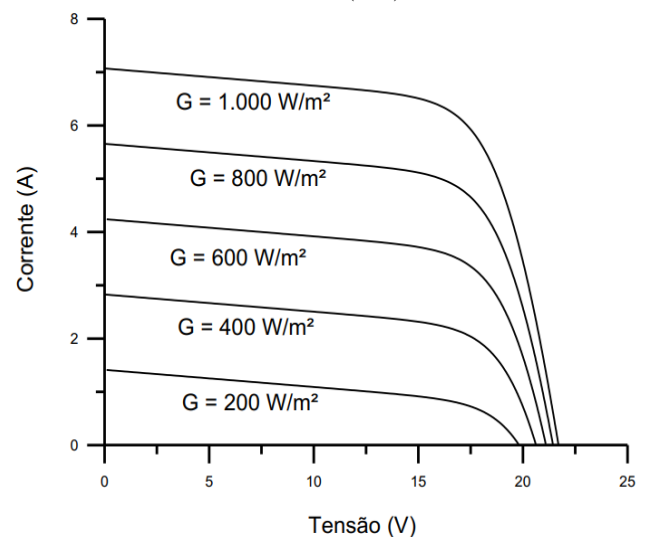
Dessa forma, quando o circuito é fechado, através da conexão dos terminais a uma carga, haverá circulação de corrente elétrica [6].

Logo, os fótons provenientes da radiação solar são fundamentais para a geração de corrente elétrica nas células fotovoltaicas, mas nem toda partícula incidente sobre o material é aproveitada [6].

O nível de energia de um fóton depende diretamente da frequência da radiação eletromagnética, então fótons que não possuem energia superior à banda proibida do silício apenas levam ao aquecimento das células, já os que possuem, tem a energia excedente dissipada em calor [7].

A partir da Figura 2, é possível perceber que a corrente elétrica gerada pelo módulo aumenta com o aumento da irradiação solar. No entanto, ao mesmo tempo, a incidência de radiação solar e a variação de temperatura ambiente implicam em uma variação de temperatura nas células que compõem os módulos.

Fig. 2. Efeito causado pela variação da irradiação solar sobre a curva característica I-V para um módulo fotovoltaico de 36 células de silício cristalino (c-Si) a 25 °C.



Fonte: [4].

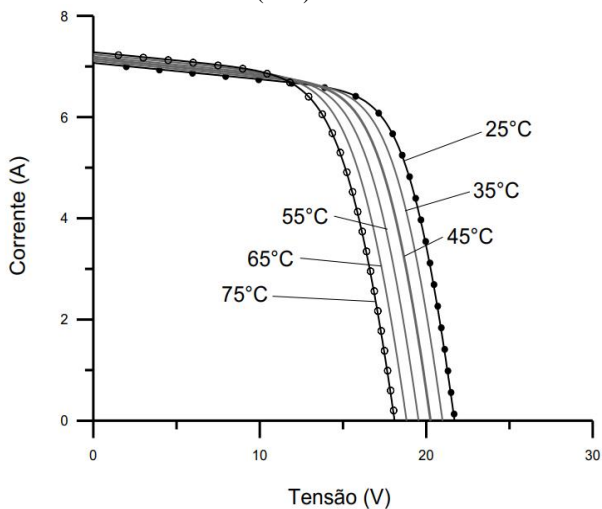
A Figura 3, por exemplo, deixa evidente que há uma queda de tensão considerável para o aumento da temperatura da célula [4].

Ainda, em razão da oferta solar e da temperatura ambiente, o clima do local de instalação do sistema fotovoltaico é de grande relevância [2].

Em geral, regiões mais próximas da linha do equador possuem maior aproveitamento, embora o potencial real de

geração em localidades mais distantes, como no Sul do Brasil, possa ser subestimado, caso seja observada exclusivamente a disponibilidade de irradiação [8].

Fig. 3. Efeito causado pela variação da temperatura das células sobre a curva característica I-V para um módulo fotovoltaico de 36 células de silício cristalino (c-Si) sob irradiação de 1.000 W/m².



Fonte: [4].

Nesse contexto, ainda, sabe-se que o clima de uma região afeta o quão bem definidas são suas estações. No inverno, os dias têm menor duração e, conseqüentemente, menor a exposição do sistema ao Sol, o que resulta em menor geração de energia quando comparado ao verão [9].

Essa variação é maior em cidades próximas ao hemisfério Sul. Já o outono, há queda de folhagem, e essas quando acumuladas, podem provocar sombreamento nos painéis, prejudicando a eficiência do sistema [9].

Já com relação à chuva, quando acompanhada de nebulosidade, leva à diminuição dos níveis de irradiação, o que afeta negativamente a geração de energia elétrica, ainda que proporcione a limpeza dos painéis fotovoltaicos [9].

Assim, percebe-se que há diversos parâmetros meteorológicos que podem impactar diretamente no processo de geração de energia a partir de painéis fotovoltaicos. Por isso, é relevante identificar uma metodologia em que se abordam as principais análises feitas no que diz respeito a esse tema.

III. METODOLOGIA DE ANÁLISE

Durante o ano existem diversas alterações meteorológicas que afetam inúmeros setores da sociedade, como produção de alimentos, execução de tarefas como pesca e até mesmo a geração de energia. Do mesmo modo como o período seco afeta a produção de energia elétrica por fontes hidráulicas, existem fatores que influenciam na geração de energia advinda da irradiação solar [10].

Temperatura, vento, umidade, radiação, dentre outros aspectos, são fatores específicos de cada região do Brasil e do mundo que devem ser levados em consideração no momento da implementação de um sistema fotovoltaico, visto que são fundamentais para a eficiência do sistema [2].

Para verificação da influência de tais fatores na geração de um sistema fotovoltaico, aborda-se, neste trabalho: a análise de uma metodologia aplicada em um local específico (bem como seus resultados); os equacionamentos envolvidos na análise das interferências meteorológicas, e, por fim uma análise acerca das conseqüências da urbanização na geração fotovoltaica.

A. Metodologia aplicada ao Centro Universitário Facens

O Centro Universitário Facens desenvolve diversos projetos visando a transformação das cidades em locais mais sustentáveis e inteligentes. Um dos projetos é voltado à eficiência energética, a CICE (Comissão Interna de Conservação de Energia) [10].

Esta apresenta como trabalho mais relevante a instalação de painéis fotovoltaicos, os quais são responsáveis pelo fornecimento de cerca de 15% da energia que se utiliza no local. Este sistema conta com 4 inversores ligados à arranjos fotovoltaicos disponíveis para cada unidade, com potência total de 61,74 kWp [10].

Inicialmente, durante o estudo, observou-se as médias diárias de radiação, velocidade do vento, umidade e temperatura, a qual considera-se apenas os valores máximos de média.

Por meio de inspeção visual gráfica gerada a partir do método *stepwise forward* (análise de regressão) e com mapeamento de 120 dados, no qual se repetiu o procedimento 10000 vezes a fim de compensar o fato do estudo ser realizado no mesmo local. Portanto, a partir dos dados, fica estabelecida uma relação entre as variáveis citadas acima e a energia gerada pelo sistema [10].

B. Análise de resultados referente à metodologia aplicada ao Centro Universitário Facens

Segundo [10], a análise das relações entre as variáveis independentes (temperatura, velocidade do vento e umidade) e dependente (energia) envolve uma correlação significativa entre elas, de modo que, por exemplo, a razão entre radiação e energia é da ordem de 0,82 e entre temperatura e energia na ordem de 0,60.

Nesse caso, pode-se dizer que quanto maior a radiação, maior a energia gerada; já com relação à temperatura, isso não é necessariamente verdade, pois a níveis altos de temperatura as células perdem sua eficiência.

A velocidade do vento também pode ou não favorecer o aumento da geração de energia elétrica a partir da fonte considerada, de modo que a correlação entre ela e a energia gerada é de 0,12.

Já com relação à umidade, a qual possui correlação de -0,49, pode-se dizer que quanto maior o seu valor menor será a energia gerada, de modo a ser inversamente proporcional, como mostrado na Figura 4.

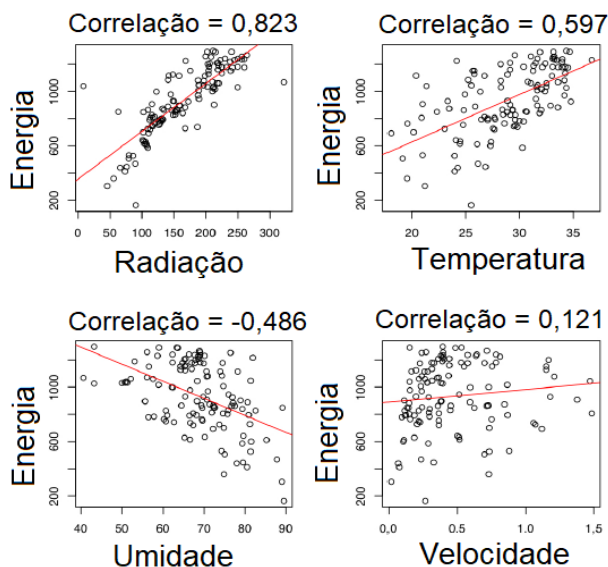
Após a realização da amostragem (10000 vezes), percebe-se que a radiação é a maior influenciadora da geração de energia fotovoltaica tendo um fator significativo em 100% dos casos, seguido pela umidade, com 33%.

Já as variáveis temperatura e velocidade do vento foram significativas em uma quantidade menor de amostragens, 6,76% e 7,88%, respectivamente. Além disso, verifica-se que

estes fatores representam aspectos que reduzem a geração energética do sistema [10].

De fato, o aumento da umidade indica dias chuvosos ou até mesmo com certa nebulosidade e a temperatura elevada ocasiona o aquecimento inesperado dos componentes do sistema.

Fig. 4. Análise visual da correlação entre as variáveis.



Fonte: [10].

C. Formulação das interferências meteorológicas

Como já dito, diversos fatores ambientais são responsáveis por interferências na geração fotovoltaica. É interessante destacar a maneira conforme estes podem intervir nesta.

Em relação à irradiância solar, sabe-se que a corrente gerada pelo painel é proporcional à incidência dos fótons na junção p-n dos módulos, fazendo com que os elétrons se movimentem de maneira mais intensa de acordo com irradiância incidente. Do mesmo modo, a tensão nos terminais destes podem variar decorrente desta causa [11].

A possibilidade de equacionamento do fator da irradiância em vista da corrente elétrica permite perceber que esta é diretamente proporcional ao aspecto ambiental considerado, de forma que, segundo [4]:

$$I_{SC} = I_{SC_{STC}} \cdot \frac{G}{1000} \quad (1)$$

Onde, $I_{SC_{STC}}$ é o valor da corrente de curto circuito do módulo considerando os padrões de teste (STC) e G é o valor da irradiância incidente (W/m^2).

Visto que a corrente de operação é diretamente proporcional à irradiância solar, pode-se afirmar que o valor da tensão de circuito aberto gerada evolui de forma logarítmica com base no valor da corrente fotogerada, conforme visto na Equação 2 [11].

$$V_{OC} = \frac{K \cdot T}{q} \ln\left(\frac{I_L}{I_0} + 1\right) \quad (2)$$

Onde, K é a constante de Boltzman ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K), T a temperatura absoluta (K), q carga do elétron ($1,6 \times 10^{-19}$ C), I_L o valor de corrente fotogerada (A) e I_0 a corrente de saturação reversa do diodo (A).

Portanto, a corrente elétrica gerada pelo arranjo fotovoltaico e a tensão de circuito aberto são medidas importantes, diretamente proporcionais à irradiância solar incidente no local da instalação do sistema.

Outro fator importante que pode afetar a produção energética da fonte em questão é a temperatura. Este fator, assim como o aumento de carga, pode elevar a temperatura da célula e, conseqüentemente, a sua eficiência [4]. O efeito do aumento da temperatura acarreta em duas conseqüências principais para o sistema, que podem ser acompanhadas pela Equação 2.

Primeiramente, o aumento da temperatura ocasiona um aumento demasiadamente maior no valor da corrente de saturação reversa do diodo I_0 , de modo que a expressão logarítmica da Equação 2 reduza numa proporção muito maior do que o aumento da temperatura, fazendo com que o valor da tensão de circuito aberto sofra redução [11].

Conseqüência disto, a potência dos módulos fotovoltaicos é reduzida, visto que o aumento da corrente de curto circuito não é proporcional à redução da tensão de circuito aberto [11].

Além disso, um aumento de 100°C na temperatura gera uma variação de até -30% no valor da tensão de circuito aberto, ao passo que a corrente de curto circuito é elevada em $0,2\%$ [4].

Visto as influências da irradiação solar e da temperatura, pode-se citar também as conseqüências do sombreamento no arranjo fotovoltaico.

De acordo com a Equação 1, a redução da irradiação solar devido ao sombreamento parcial ou total nas placas podem reduzir drasticamente o valor da corrente no sistema, originando a perda de potência.

Além da redução da potência, o sombreamento ainda traz riscos de defeito ao módulo devido ao aquecimento gerado pelo aumento da resistência interna [11].

A redução da incidência da irradiação solar também pode ser ocasionada devido ao acúmulo de sujeira na superfície das placas. A depender do nível de depósito de matérias sobre as placas, a perda de eficiência pode chegar até 25% num determinado período de tempo [11].

Portanto, a manutenção e limpeza do arranjo fotovoltaico são imprescindíveis para a obtenção de melhor desempenho do sistema. Ainda, a temperatura e a velocidade do vento podem influenciar a eficiência elétrica real da instalação fotovoltaica [11].

Nesse contexto, dentre as regiões com melhores índices de eficiência elétrica do sistema, uma boa parte está localizada em regiões onde a temperatura ambiente é baixa e apresenta excelentes índices de vento. Ainda, a complementariedade entre a geração fotovoltaica e eólica nestes locais se destacam [8].

Dentre as diversas tecnologias aplicadas às placas fotovoltaicas, a utilização das constituídas de filme fino com CdTe podem apresentar melhor rendimento dentre os modelos disponíveis, em termos de aproveitamento real [8].

D. Consequências da urbanização na geração fotovoltaica

A avaliação da interferência das edificações na produção de energia fotovoltaica é de grande interesse, visto que cada vez mais unidades consumidoras de baixa tensão, em grandes centros populacionais, adotam este sistema de geração em suas residências [3].

Para tanto, a viabilidade da instalação deve levar em consideração as edificações vizinhas, de modo a realizar um estudo acerca das interferências destas na geração [3].

De acordo com [3], propõe-se uma metodologia de avaliação para estes casos. Neste, adota-se duas cidades em locais com diferentes zonas bioclimáticas e sugere-se a utilização de 8 diferentes tipos de edificações verticais, dividindo-os por alturas proporcionais ou não.

Em seguida, um estudo indicará o nível mínimo de radiação solar na superfície para enfim analisar a influência do sombreamento causado pelas edificações em torno da geração de energia [3].

Em seguida, elaborou-se um modelo urbano para cada tipo de edifício, distribuídos de maneira uniforme numa planta, com distâncias proporcionais, de modo que se fez um modelo para edifícios de tamanhos uniformes e outro de tamanhos distintos [3].

Neste modelo, existem 25 edifícios, distribuídos em 5 colunas e 5 linhas, para avaliação do edifício localizado na parte central do modelo [3].

Por meio de simulação das plantas sugeridas, obtiveram-se os valores de irradiação solar para os diferentes tipos de edificação e orientação de instalação do arranjo.

A simulação da geração energética mostra que os edifícios sem obstáculos ao redor podem ter seus sistemas instalados com maior liberdade de posicionamento dos painéis, não sendo viável essa liberdade quando considerado o meio urbano [3].

Além disso, é considerado também a instalação de painéis não somente nos telhados, como também nas faixadas das edificações, com diferentes tecnologias aplicadas [3].

Além disso, em ambientes urbanos com edificações uniformes os edifícios com 6 pavimentos apresentam melhor desempenho na geração energética, ao passo que o contexto urbano com alturas alternadas favorecem a geração energética em edificações com alturas maiores, onde a instalação dos painéis possam ser realizadas em locais com maior área disponível [3].

Ainda, a largura das ruas também apresenta influência importante para o sombreamento das placas, de modo que quanto maior a largura desta menor poderá ser o sombreamento ocasionado no arranjo, de modo a melhor a geração energética por parte deste [3].

Em conformidade com isso, de acordo com [8], a temperatura associada a edificações em ambiente urbano pode afetar a produção energética em sistemas fotovoltaicos em até 30% [8].

Portanto, fica evidente a interferência dos diversos aspectos ambientais na geração fotovoltaica, tais como temperatura, velocidade dos ventos, umidade e sombreamento.

Cabe destacar a importância do estudo do local da instalação do sistema, de modo a observar as edificações

vizinhas, e de maneira a reduzir as possibilidades de interferências do sombreamento na eficiência do sistema.

IV. CONCLUSÃO

A partir do trabalho realizado foi possível identificar os principais aspectos metodológicos no que diz respeito à análise de parâmetros meteorológicos que influenciam na geração de energia através de painéis fotovoltaicos.

Esse trabalho permitiu a identificação de quais são esses parâmetros bem como a análise detalhada de como e por que eles impactam na geração de energia no tipo de sistema em análise.

Além disso, foi possível identificar estudos de caso envolvendo análises de projetos reais que envolvem esse tema. Com isso, foi possível destacar aplicações objetivas e analisar na prática a influência dos parâmetros meteorológicos no desempenho de sistemas fotovoltaicos.

Ainda, identificou-se também, gráficos e equações que mostram o significado teórico dos parâmetros e quais são as variáveis que os influenciam. Isso é imprescindível para que se estabeleça uma análise detalhada e com fundamentos científicos.

Além disso, coube destacar também as consequências da urbanização na geração fotovoltaica, haja vista que se trata de um tema muito relevante e que mostra a significância de uma análise social acerca desse tema.

Por fim, espera-se que esse trabalho possa auxiliar nos estudos e projetos que envolvem esse tema de pesquisa, servindo como guia auxiliar para concretização de projetos ou para estudos mais avançados e/ou específicos.

REFERÊNCIAS

- [1] MONTEIRO, Leandro da Silva; SILVEIRA, Dierci. Energia solar fotovoltaica no Brasil: uma análise das políticas públicas e das formas de financiamento. Simpósio de Excelência de Gestão e Tecnologia, Resende/RJ, ano 2018.
- [2] LOFHAGEN, Janaina; HAWKINS, Christopher. Influência de parâmetros meteorológicos na geração de energia em painéis fotovoltaicos. Revista Brasileira de Gestão Urbana, [s. l.], ed. 20190027, p. 1/15, 2019. Disponível em: [http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf](http://www.scielo.br/j/urbe/a/f5NZ33Mv5FNCFVpjjv6DsSn/abstract/?lang=pt#:~:text=Este%20trabalho%20busc%20relaciona%20de,de%20gera%C3%A7%C3%A3o%20de%20energia%20fotovoltaica. Acesso em: 17 maio 2021.[3] DIDONÉ, Evelise Leite; WAGNER, Andreas; PEREIRA, Fernando Oscar Ruttkay. Avaliação da influência do contexto urbano na radiação solar para geração de energia. Urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana, v. 9, 2017.[4] PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro: Cepel - Cresesb, 2014.. Disponível em: <a href=). Acesso em: 18 de maio de 2021.

- [5] SOUZA, R.d., Os sistemas de energia solar fotovoltaica. ca 2011, Ribeirão Preto - SP: Blue Sol Energia Solar. P. 114.
- [6] CASTRO, R.M.G., Introdução à Energia Fotovoltaica. 2002: Universidade Técnica de Lisboa.
- [7] BASTOS, W.d.S., Estudo de Caso de um Projeto Fotovoltaico Integrado à Edificação. 2018, Paraíba - PB: Universidade Federal da Paraíba.
- [8] SIMIONI, T., O impacto da temperatura para o aproveitamento do potencial solar fotovoltaico do Brasil. 2017, Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE. 2017.
- [9] Meteorologia, S. Energia Solar: Como o clima interfere na geração de energia elétrica? 2018 25/05/2021]; Acesso em: <https://blog.somarmeteorologia.com.br/energia-solar-como-o-clima-interfere-na-geracao-de-energia-eletrica/>. Acesso em 27 de maio de 2021.
- [10] FRANCISCO, A. C. C., Vieira, H. E. M., Romano, R. R., & Roveda, S. R. M. M. (2019). Influência de parâmetros meteorológicos na geração de energia em painéis fotovoltaicos: um caso de estudo do smart campus Facens, SP, Brasil. *Urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana*, v. 11, e20190027. <https://doi.org/10.1590/2175-3369.011.e20190027>
- [11] SILVA, J. A. A. Tratamento de dados meteorológicos e análise de desempenho do sistema fotovoltaico da EMC/UFG. 2019. 188 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e da Computação) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2019.