ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM PLATAFORMAS FOTOVOLTAICAS FLUTUANTES ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.

DOI: 10.37702/2175-957X.COBENGE.2023.4676

Damasio Alves de Lima Júnior - damasio.junior@itec.ufpa.br
Universidade Federal do Pará

Iris Caroline dos Santos Rodrigues - iris.rodrigues@itec.ufpa.br
Universidade Federal do Pará

Antonio Roniel Marques de Sousa - roniel@ufpa.br
UFPA

WELLINGTON DA SILVA FONSECA - fonseca.ufpa@gmail.com
UFPA

Resumo: *Enquanto muitos países ainda dependem majoritariamente de combustíveis fósseis, como o petróleo e o carvão, o Brasil possui uma matriz elétrica diversificada com uma parcela expressiva de fontes renováveis. Dentre elas, a energia solar vem se destacando, com um grande crescimento nos últimos anos. No entanto, apesar de seu grande crescimento, ela tem sido catalogada como uma fonte intermitente, devido ao fato de que a qualidade da energia gerada depende de fatores como o clima e a temperatura do ambiente em que se encontra. Assim, estudos têm sido feitos sobre como essas condições afetam essa geração de energia. No entanto, quando se visa o ensino deste fenômeno, ocorrem complicações, pois a análise do efeito da temperatura requer físicos especializados e sensores para o devido monitoramento, que demandam um alto custo para sua construção. Além disso, soluções puramente analíticas tornam-se difíceis para uma melhor visualização do aluno. Assim, este trabalho tenta amenizar este problema por meio de simulações computacionais realizando análises térmicas em dois modelos de painéis fotovoltaicos de empresas diferentes. Essas simulações são feitas utilizando o software Elmer, que utiliza o método dos elementos finitos para os cálculos. Em seguida, comparam-se os resultados obtidos com os dois modelos e a forma como representam o fenômeno estudado.*

Palavras-chave: *Simulações, análise térmica, energia fotovoltaica, elementos*

finitos, qualidade da energia, ensino.

ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM PLATAFORMAS FOTOVOLTAICAS FLUTUANTES ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

1 INTRODUÇÃO

As áreas da Engenharia têm acompanhado os avanços tecnológicos e científicos de forma acelerada, resultando em um constante progresso do conhecimento nessas áreas. De acordo com as Diretrizes Curriculares Nacionais (DCNs), dos cursos de Engenharia, torna-se fundamental que os cursos de graduação ofereçam subsídios para a qualificação e aperfeiçoamento dos estudantes, proporcionando a formação de uma identidade profissional, que atenda às demandas atuais do mercado de trabalho (BRASIL, 2021).

Uma maneira de viabilizar esse estudo consiste na utilização de softwares de simulações. Para Santos *et al*. (2022), a utilização desses softwares possibilita uma abordagem interdisciplinar na área da engenharia, o que proporciona maior dedicação aos estudos e contribui para a formação de profissionais qualificados. Além disso, a utilização desses programas proporciona a observação de cenários complexos, pois realizam cálculos matemáticos de maneira mais eficiente.

No contexto educacional, as simulações podem ser trabalhadas para o desenvolvimento de habilidades de modelagem, além da compreensão de princípios científicos e as linguagens envolvidas nesse processo (MAGANA; JONG, 2018). Ainda, a simulação permite adquirir conhecimento sobre um objeto ou sistema específico, bem como aprender sobre um determinado tema por meio da interação com modelos simulados (GARBIN; KAMPFF, 2021).

Nesse contexto, observa-se a necessidade de adaptações dos cursos de graduação em Engenharia, para atender às demandas do setor energético brasileiro. A matriz elétrica brasileira apresenta particularidades significativas em comparação com o restante do mundo. Enquanto muitos países ainda dependem majoritariamente de combustíveis fósseis, como petróleo e carvão, o Brasil possui uma matriz elétrica diversificada e com expressiva participação quanto à participação de fontes renováveis. Com destaque para a fonte hídrica, representando 53,4% da oferta interna de energia, segundo dados do Balanço Energético Nacional. Contudo, após a crise hídrica ocorrida em 2021, tem-se observado investimentos em novas fontes energéticas, como forma de garantir maior segurança ao setor energético nacional (EPE, 2022).

A fonte solar tem se destacado nos últimos anos, com um crescimento de 55,9%, em 2021, atingindo 16,8 TWh, em geração centralizada e micro e minigeração distribuída (MMGD) (EPE, 2022). No entanto, é válido ressaltar que embora a fonte solar seja renovável, seu uso não está diretamente relacionado à eficiência energética. Diferente das fontes convencionais, a energia solar é considerada intermitente devido a sua grande variabilidade espacial e dependência das condições meteorológicas locais, o que gera "impactos em aspectos técnicos de qualidade e de segurança do sistema elétrico" (PEREIRA *et al.*, 2017).

A temperatura de um painel fotovoltaico é um importante fator para a análise da sua eficiência energética, assim como o tempo de degradação de suas células

(SPIECKER *et al.,* 2017). Conforme demonstrado por Nasir et al. (2020), modificações de temperatura de até 1°C podem ter impacto na capacidade de geração de energia dos painéis solares, além de também afetar outros dispositivos conectados à estrutura. Por esse motivo, pesquisas têm sido desenvolvidas para analisar sistemas de resfriamento de painéis solares, ressaltando a importância da compreensão dos fenômenos térmicos para a área (SACRAMENTO, 2015; BACELAR, 2019; SOUSA *et al.,* 2021; SUTANTO *et al.,* 2022; FONSECA *et al.*, 2022).

A análise do efeito térmico em painéis solares é influenciada por diversos fatores, como a temperatura ambiente e as propriedades dos materiais empregados. Uma área de estudo potencial para a contribuição e aplicabilidade no contexto das abordagens teórico-práticas direcionadas a turmas de engenharia. No entanto, a visualização prática desses fenômenos pode ser um desafio, uma vez que requer a utilização de sistemas físicos e sensores especializados para monitoramento adequado.

O objetivo deste artigo é apresentar um estudo com potencial para aplicação nos cursos de engenharia, de acordo com as DCNs, contemplando conteúdos básicos de Ciências do Materiais, além de Algoritmos e Programação (BRASIL, 2021), a partir da análise térmica e estrutural de plataformas fotovoltaicas flutuantes (PFFs), utilizando o método de elementos finitos. Para isso, o software Elmer FEM, que apresenta solucionadores e equações térmicas incorporadas, adequadas para a resolução desse tipo de problema (VENCELS *et al.*, 2019). Além de ser um software de código aberto, o que facilita e viabiliza sua utilização por professores e alunos em sala de aula.

Foram realizadas duas simulações de condução térmica, considerando dois modelos diferentes de PFFs disponíveis no mercado, a fim de demonstrar e ensinar de maneira mais simples o comportamento da transferência de calor em diferentes materiais visando a maior eficiência energética do sistema.

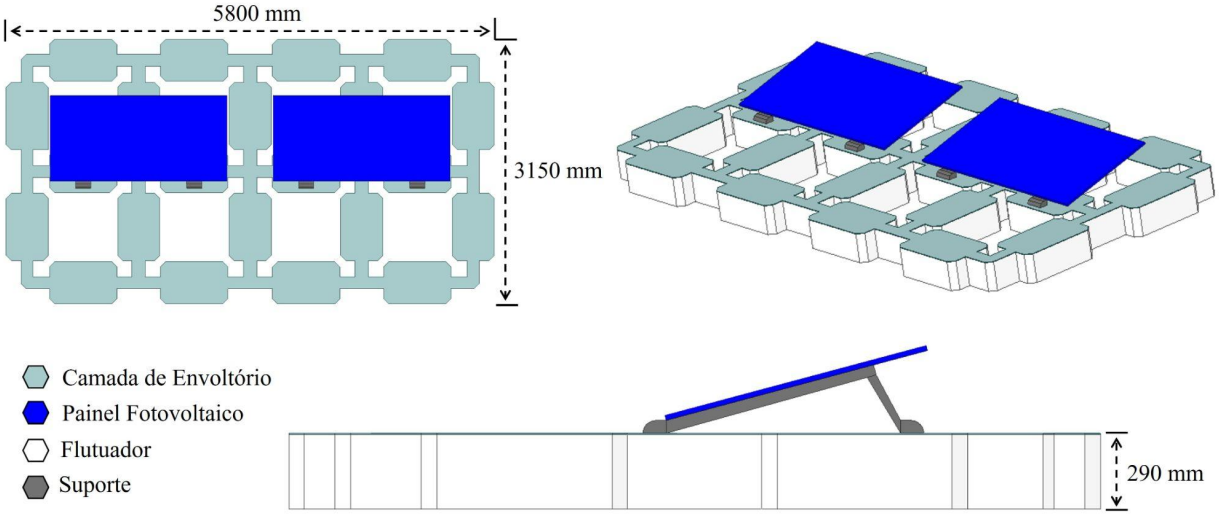
2 MODELAGEM DO PROBLEMA

Para o desenho da geometria das PFFs foi utilizado o software Ansys SpaceClaim. Dessa forma, foi realizada a modelagem CAD de dois modelos de plantas fotovoltaicas flutuantes (PFFs), Figuras 1 e 2, fornecidos por diferentes empresas. Ambos compostos por quatro estruturas: a) painel fotovoltaico; b) suporte; c) envoltório; d) flutuador.

Na geometria da PFF desenvolvida pela empresa 1 (figura 1), a estrutura de flutuante é composta por pequenos flutuadores de mesmo tamanho conectados por junções que formam os arranjos de acordo com a potência desejada para o sistema. Para o trabalho em questão foram considerados dois painéis fotovoltaicos, visando a redução de esforço computacional para o desenvolvimento das simulações. É possível observar que para este modelo, o suporte de fixação dos painéis comporta apenas um módulo fotovoltaico por vez.

Para a construção dessa geometria foram utilizados um total de 22 flutuadores conectados por junções totalizando uma área com dimensões de (5800mm por 3150mm) com uma profundidade de 290mm, além de 2 suportes e 2 módulos fotovoltaicos.

Figura 1. Modelagem da Planta Fotovoltaico Flutuador da empresa 1.

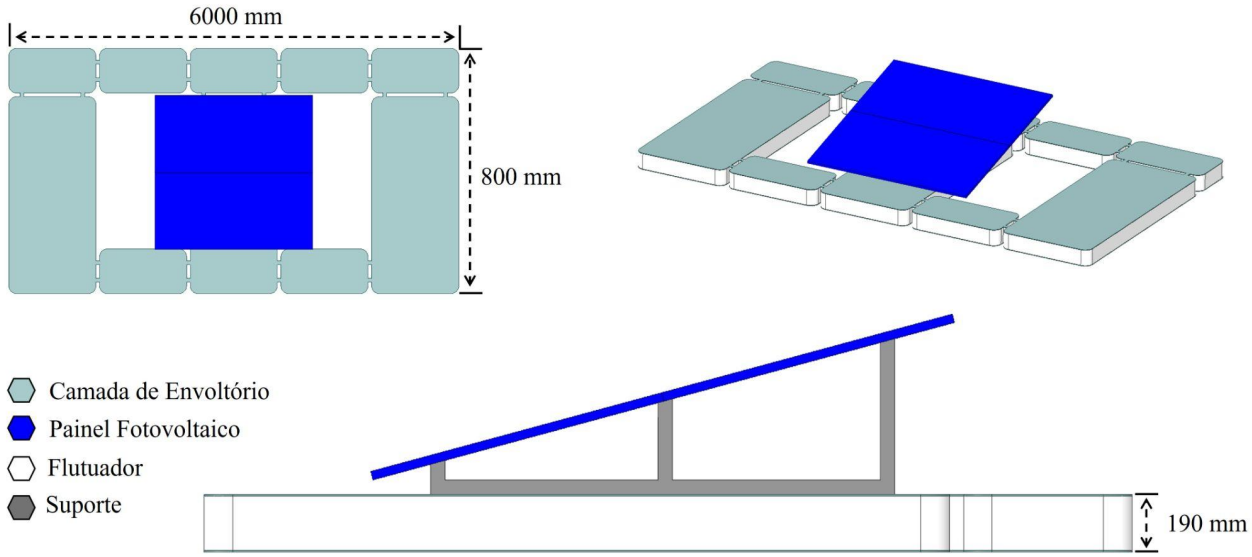


Fonte: Autores

Na geometria da PFF desenvolvida pela empresa 2 (figura 2), o modelo de estrutura flutuante é composto por dois modelos de flutuadores de tamanhos diferentes, o maior e denominado flutuador primário, e o menor é denominado flutuador secundário conectados por bielas de conexão, semelhante ao anterior os arranjos dessa estrutura estão de acordo com a potência desejada da PFF. Para esta estrutura o suporte dos painéis suportam 2 módulos fotovoltaicos por vez.

Na construção dessa geometria foram utilizados um total de 3 flutuadores primários e 7 flutuadores secundários conectados por bielas totalizando uma área com dimensões de (6000mm por 3238mm) com uma profundidade de 190mm, além de 1 suporte e 2 módulos fotovoltaicos.

Figura 2. Modelagem da Planta Fotovoltaico Flutuador da empresa 2.



Fonte: Autores

Em ambos os casos foram utilizados o mesmo modelo de painel fotovoltaico a base de silício medindo (2100mm x 1050mm x 30mm), além de se manter o mesmo ângulo de inclinação dos painéis igual a 15°.

Além da disposição de painéis e flutuadores, as PFFs apresentam diferenças na composição dos materiais que compõem os suportes e os flutuadores. O modelo oferecido pela empresa 1, apresenta: painel fotovoltaico de silício, suporte de alumínio e flutuador de polietileno de alta densidade (PEAD), preenchido com espuma de PEAD. Assim, considerando a mesma composição, nesse caso, para o flutuador optou-se por utilizar um único corpo na simulação.

No caso da empresa 2, existem mudanças na composição do suporte, agora feitos em fibra de vidro, e no flutuador, com envoltório de pultrudado de PRFV (plástico reforçado com fibra de vidro) e preenchimento de isopor (poliestireno expandido - EPS). Contudo, considerando a complexidade da estrutura de compósito do envoltório do flutuador, para a simulação foi considerada apenas a composição plástica do corpo, nesse caso composta de PEAD.

Dessa forma, foram definidos os corpos das estruturas de PFFs simuladas. A seguir são apresentadas as propriedades físico-químicas de cada material, disponíveis na biblioteca de materiais do software ou adicionados manualmente de acordo com dados da literatura. Considerando o modelo da empresa 1 e 2, respectivamente nas tabelas.

Tabela 1 - Corpos e materiais do flutuador da empresa 1.

Corpo	Material	Densidade (g/m3)	Capacidade Térmica (J/g·K)	Condutividade Térmica (J/K)
Painéis	Silício	2330,0	555,8	156
Suportes	Alumínio	2700,0	897,0	237,0
Flutuador	PEAD	960,0	225,0	0,35

Fonte: Autores

Tabela 2 - Corpos e materiais do flutuador da empresa 2.

Corpo	Material	Densidade (g/m3)	Capacidade Térmica (J/g·K)	Condutividade Térmica (J/K)
Painéis	Silício	2330,0	555,8	156
Suportes	Fibra de vidro	0,0018	887,0	83,1
Envoltório Flutuador	PEAD	960,0	225,0	0,35
Flutuador	EPS	0,00105	1760,0	0,131

Fonte: Autores

Para a configuração da malha, utilizou-se o software Salome, assim, as geometrias das PFFs foram divididas em elementos tetraédricos. Assim, o flutuador da empresa 2, foi dividido em corpos diferentes para simplificar as simulações, representando apenas a camada superficial do envoltório. Em seguida, a malha gerada foi exportada para o software Elmer FEM para a realização das simulações térmicas.

O Elmer FEM permite realizar simulações computacionais utilizando o método dos elementos finitos, do inglês *finite elements method* (FEM). Método utilizado para resolver problemas estruturais, além de permitir a utilização de superfícies curvas, considerando a continuidade nos vetores tangenciais e potenciais (VENCELS *et al.,* 2019).

Para isso, o software utiliza um conjunto de equações e solucionadores, em linguagem Fortran, onde os parâmetros são retirados de um arquivo de texto. Deste arquivo são extraídas informações referentes às simulações, como os materiais, as constantes necessárias e o *solver* utilizado. Para a realização das simulações térmicas foi implementado um *solver* térmico nativo do software, denominado *HeatSolver*, que se baseia na equação geral de condução de calor (1).

$$k\nabla^{2}T + q = \rho Cp\frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

Onde k representa a condutividade térmica do material, e T é a variável de temperatura e a geração interna de calor é representada por q. Enquanto o lado esquerdo da equação, é representado pela taxa de variação de calor com ρ e Cp sendo respectivamente, a densidade e a capacidade térmica.

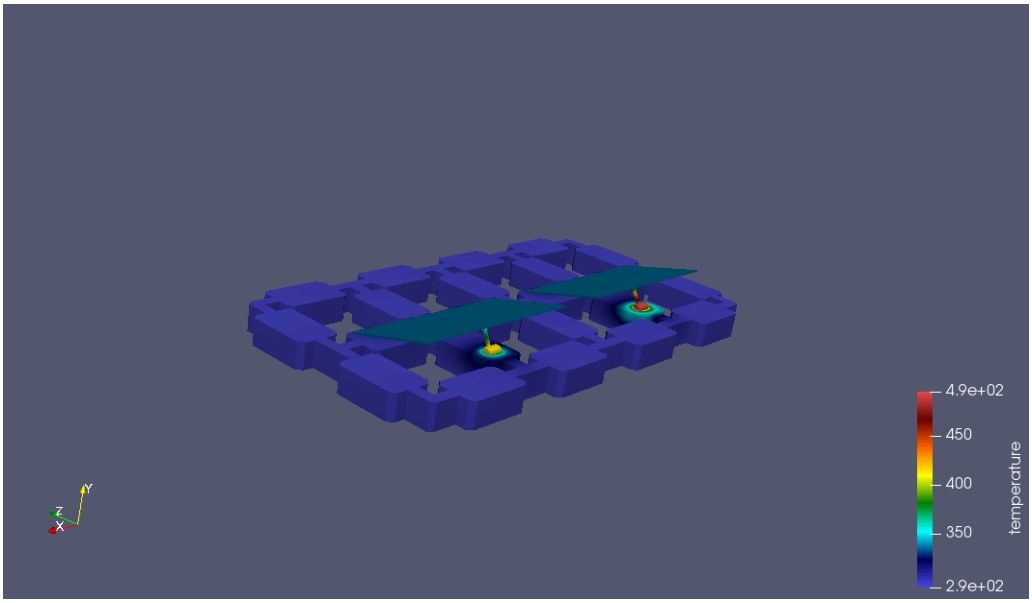
As simulações realizadas foram feitas considerando o problema em estado estacionário, e sem geração interna de calor, portanto, a equação 1 pode ser representada a partir da equação de Laplace para a condução de calor (2).

$$k\nabla^{2}T = 0 \quad (2)$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

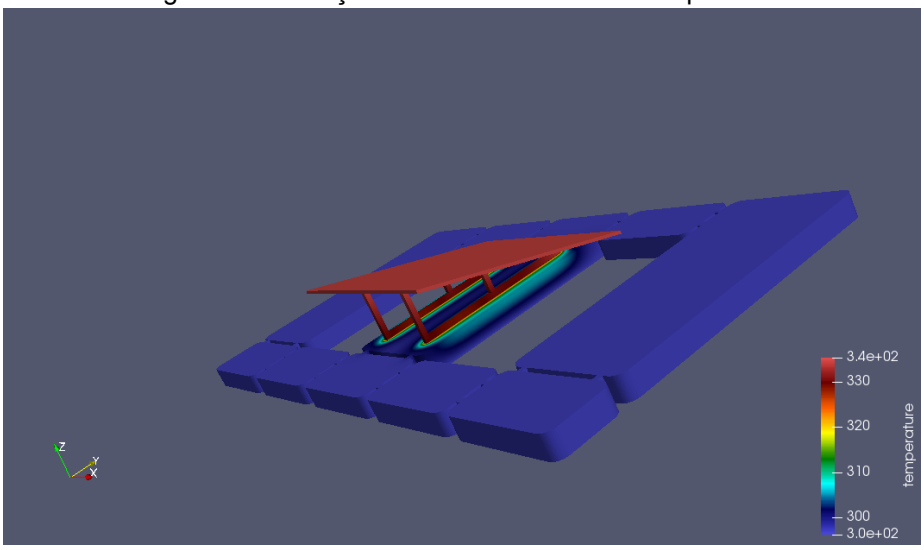
A partir dos resultados obtidos nas simulações realizadas é possível perceber que, em ambos os modelos a diferença de temperatura entre os painéis, que estão por volta de 335.15 K, e a temperatura da parte inferior dos flutuadores (296.15 K), faz com que a temperatura se dissipe na região onde o flutuador e o suporte entram em contato. Isso pode ser observado na Figura 3, referente ao modelo da empresa 1, e na Figura 4, referente a empresa 2.

Figura 3. Simulação térmica do modelo da empresa 1.



Fonte: Autores.

Figura 4. Simulação térmica do modelo da empresa 2.

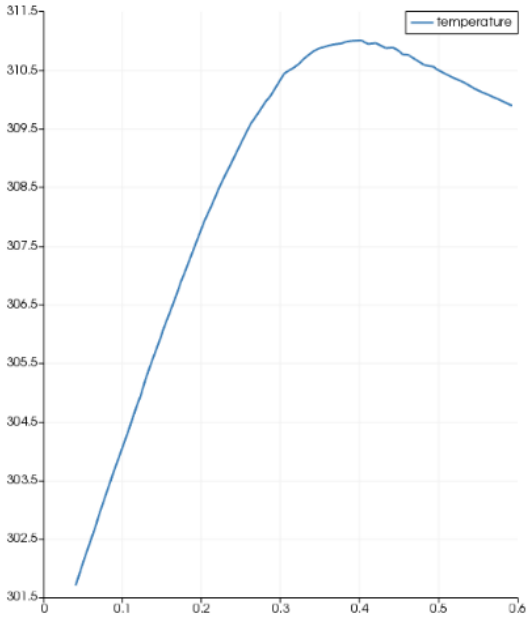


Fonte: Autores

Com a simulação realizada com o modelo 1, é perceptível que, devido à maior condutividade do alumínio, uma quantidade maior de calor chega ao flutuador, fazendo com que este dissipe uma maior quantidade de calor no seu topo. Porém como o valor de da condutividade térmica (k) para o PDE é baixo, o material se comporta como isolante térmico, garantindo uma concentração de pequenas áreas de temperatura elevada perto da base do suporte, que pode a longo prazo deteriorar o material. A temperatura do suporte próximo aos painéis se dissipa mais, o que ajuda na geração de energia pelos mesmos.

O comportamento dessa temperatura pode ser visto na Figura 5, onde o eixo das abscissas representa o comprimento da divisão do flutuador onde o suporte faz contato, enquanto o eixo das ordenadas representa o valor da temperatura em Kelvin.

Figura 5. Gráfico do comportamento da temperatura no modelo 1.

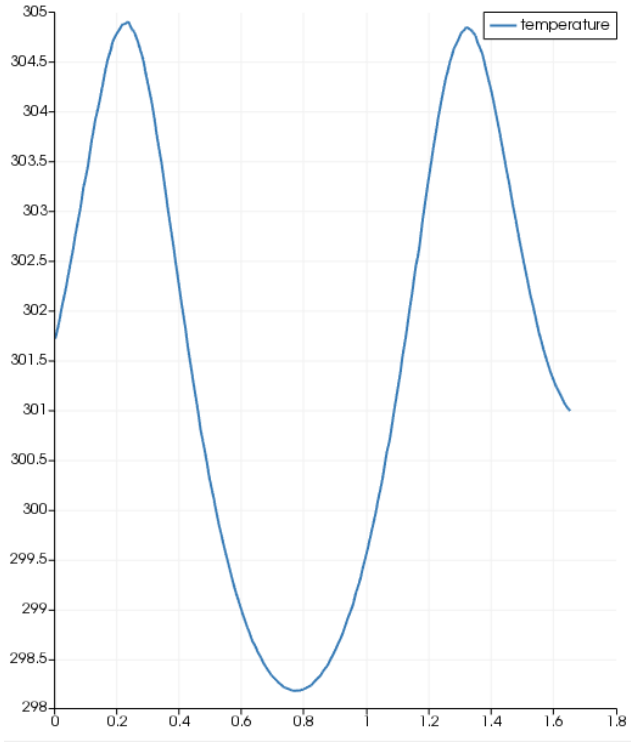


Fonte: Autores.

Para a simulação do segundo modelo é perceptível que, devido ao fato de a fibra de vidro ter uma condutividade mais baixa que o alumínio, o calor não encontra mais resistência para se propagar até a base do flutuador, fazendo com que a parte do suporte próximo aos painéis fique a uma temperatura maior que a da base, o que pode afetar a produção de energia do mesmo. Contudo, diferente da primeira simulação, a temperatura presente nos flutuadores é menor e o calor se dissipa de forma mais equilibrada, o que pode afetar menos a durabilidade dos flutuadores.

O comportamento da temperatura no flutuador da empresa 2 pode ser visto na Figura 6, onde o eixo horizontal mostra o comprimento da divisão central do flutuador, enquanto que o eixo vertical representa a temperatura em Kelvin.

Figura 6. Gráfico da temperatura no flutuador da empresa 2.



Fonte: Autores.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base no observado, nota-se que as simulações facilitam a visualização e análise de problemas, que seriam extremamente complexos de serem resolvidos de forma analítica. Além disso, torna possível uma melhor compreensão de como as propriedades físicas dos materiais podem afetar o fenômeno analisado. Outra vantagem da aplicação das simulações se encontra no fato de que é possível realizar o efeito de vários materiais diferentes, sem assim precisar construir diversos modelos reais com composições diferentes. Dessa forma é possível realizar uma análise na qualidade de energia de módulos fotovoltaicos, e fazer a predição de durabilidade de materiais, pois, se tem conhecimento de como a temperatura será distribuída.

Com essa vantagem percebe-se também que o uso de simulações computacionais como forma de ensino sobre os efeitos da temperatura na qualidade de energia gerada por um módulo fotovoltaico, se mostra como uma opção de baixo custo, pois torna-se

necessário apenas a utilização de um computador. Além de uma forma mais dinâmica e interativa para o aluno visualizar o problema estudado, e como ele se comporta.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Pará (UFPA)
À Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP)
Ao Centro de Excelência em Eficiência Energética da Amazônia (CEAMAZON)

REFERÊNCIAS

BRASIL. Resolução CNE/CES nº 1, de 26 de março de 2021 - Diretrizes Curriculares Nacionais dos Cursos de Graduação de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo.

EPE (Empresa de Pesquisa Energética). Balanço Energético Nacional (BEN) 2022: Ano base 2021. Disponível em: https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2022. Acesso em 21 de maio de 2023.

FONSECA, W. S. et al. Estudo Sobre o Efeito Térmico em Planta Fotovoltaica Flutuante (PFF) através de Simulação Computacional. In: ANAIS DO 11º CONGRESSO BRASILEIRO DE PETRÓLEO E GÁS, 2022, Belém. **Anais eletrônicos...** Campinas, Galoá, 2022. Disponível em: <https://proceedings.science/pdpetro-2022/trabalhos/estudo-sobre-o-efeito-termico-em-planta-fotovoltaica-flutuante-pff-atraves-de-si?lang=pt-br> Acesso em: 10 junho de 2023.

GARBIN, F. G. B.; KAMPFF, A. J. C. USO DA SIMULAÇÃO PARA O ENSINO DE ENGENHARIA: APLICAÇÕES EM CURSOS DE GRADUAÇÃO BRASILEIROS. in: XLXI Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia e IV Simpósio Internacional de Educação em Engenharia da ABENGE. 2021. DOI: 10.37702/2175-957X.COBENGE.2021.3568

MAGANA, A. J.; JONG T. Modeling and Simulation Practices in Engineering Education. Computer Application. **Engineering Education**, Honolulu, v.26, n.4, p. 731- 738, 2018.

PEREIRA, E. B. et al. Atlas brasileiro de energia solar. 2.ed. São José dos Campos: INPE, 2017. 80p. Disponível em: http://doi.org/10.34024/978851700089

SEICKER, J.; et al. A review of solar photovoltaic systems cooling technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 79, p.192–203, 2017. http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.053

BACELAR, Tarcisio Souto. **Características das condições ambientais no reservatório da UHE Sobradinho no contexto da geração fotovoltaica flutuante.** 2019. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Pernambuco, 2019 - Curso de Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, Universidade Federal de Pernambuco. Recife. 2019. Disponível em:

https://attena.ufpe.br/bitstream/123456789/36153/1/DISSERTA%c3%87%c3%83O%20Tarc%c3%adsio%20Souto%20Bacelar.pdf. Acesso em 20 de maio de 2023.

SACRAMENTO, Elissandro Monteiro do. **Modelo Elétrico-Térmico Para Representar O comportamento de Módulos Fotovoltaicos Flutuantes em água a partir das condições climáticas do Semiárido brasileiro.** 2015. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Ceará: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2015. Disponível: https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/36495. Acesso em 30 de maio de 2023.

SOUSA, A. R. M. et al. Magneto-Thermo-Structural Analysis of Power Transformers under Inrush and Short Circuit Conditions **Energies**, v. 14, n. 11., 2021. https://doi.org/10.3390/en14113266.

SUTANTO, B.; et al. Enhancing the performance of floating photovoltaic system by using thermosiphon cooling method: Numerical and experimental analyses. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 180, 2022. https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2022.107727

NASIR, U.; et al. Improving Photovoltaic Module Efficiency Using Back Side Water-Cooling Technique. in: *2020 IEEE 23rd International Multitopic Conference (INMIC).* doi:10.1109/inmic50486.2020.9318093

SANTOS, M.M.G; et al. AME-WEB: Um ambiente de simulação para análise de estruturas planas utilizando o método da rigidez direta. L Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, 2022 .DOI: 10.37702/2175-957X.COBENGE.2022.4066

VENCELS, J.; et al. *EOF-Library: Open-source Elmer FEM and OpenFOAM coupler for electromagnetics and fluid dynamics. SoftwareX, 9, 68–72,2019.* doi:10.1016/j.softx.2019.01.007

SALOME. 9.7.0.Disponível em: https://www.salome-platform.org/?page_id=15. Acesso: 11 de Junho de 2023.

Elmer FEM. Disponível em: http://www.elmerfem.org/blog/. Acesso: 11 de Junho de 2023.

ENERGY EFFICIENCY ANALYSIS IN FLOATING PHOTOVOLTAIC PLATFORMS: THERMAL AND STRUCTURAL MODELING BY FINITE ELEMENT METHOD

Abstract: *While many countries still depend mostly on fossil fuels, such as oil and coal, Brazil has a diversified electric matrix with an expressive share of renewable sources. Among them solar energy has been standing out, with a large growth in recent years. However, despite its great growth, it has been cataloged as an intermittent source due to the fact that the quality of the energy generated depends on factors such as the climate and the temperature of the environment in which it is located. Thus, studies have been made on how these conditions affect this energy generation. However, when aimed at the teaching of this phenomenon, complications occur because the analysis of the temperature effect requires specialized physicists and sensors for proper monitoring, which require a high cost to build them. In addition, purely analytical solutions become*

difficult for a better visualization of the student. Thus, this paper attempts to alleviate this problem by means of computer simulations performing thermal analysis on two models of photovoltaic panels from different companies. These simulations are made using the Elmer software, which uses the finite element method for the calculations. Next, the results obtained from the two models and how they represent the studied phenomenon are compared.
Keywords: *Simulations, thermal analysis, photovoltaics, finite elements, power quality, teaching.*