

LABORATÓRIO VIRTUAL PARA ENSINO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

 <https://doi.org/10.56238/sevened2024.041-003>

Hiuri Santana de Noronha

Mestre em Engenharia Elétrica
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)
Endereço: Campinas, São Paulo, Brasil
E-mail: hiuri.noronha@ieee.org

José Gomes da Silva

Especialista em Engenharia Elétrica
Universidade do Estado do Amazonas (UEA)
Endereço: Manaus, Amazonas, Brasil
E-mail: jmsilva@uea.edu.br

Cláudio Gonçalves de Azevedo

Doutor em Engenharia Elétrica
Universidade do Estado do Amazonas (UEA)
Endereço: Manaus, Amazonas, Brasil
E-mail: cgoncalves@uea.edu.br

RESUMO

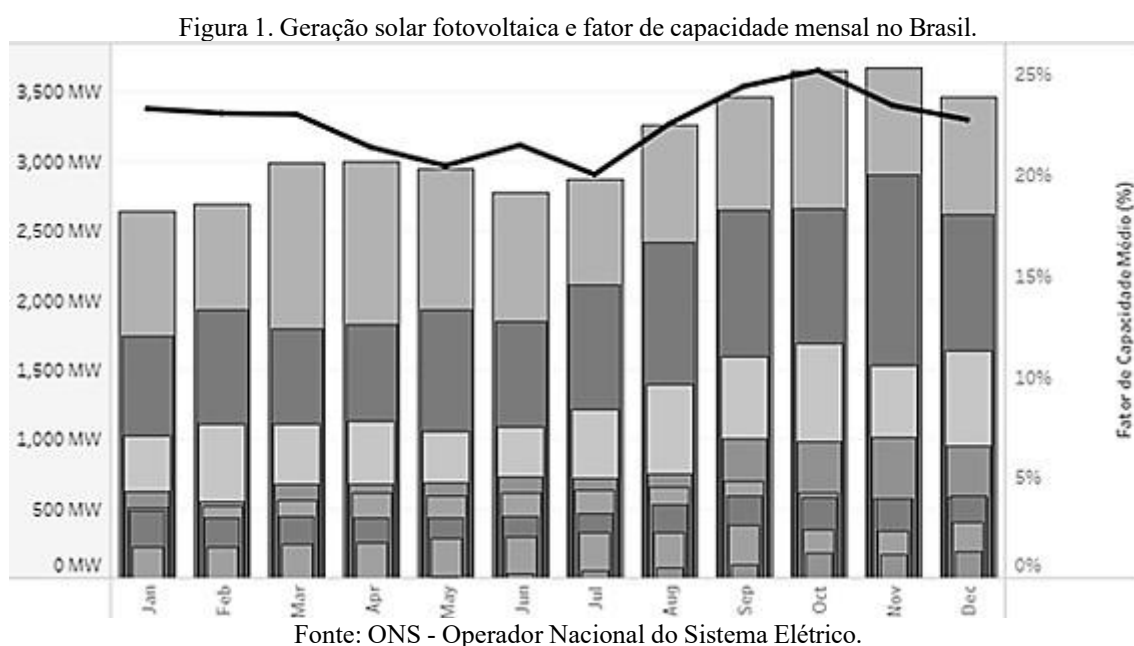
Este artigo apresenta o desenvolvimento de uma plataforma computacional para o ensino e projeto de geração fotovoltaica, autônoma e conectada à rede. A plataforma utiliza dados meteorológicos e ferramentas que permitem o dimensionamento da potência ativa e avaliação técnico- econômica e ambiental. A metodologia desenvolvida permite ao usuário uma interação amigável com a plataforma com visualizações gráficas e numéricas. Para validar o programa computacional desenvolvido, foi realizado um experimento numérico, a partir das cargas consumidoras de uma residência, o que possibilitou comprovar sua aplicabilidade como uma ferramenta para discentes e projetistas de sistemas fotovoltaicos.

Palavras-chave: Energia solar fotovoltaica. Laboratório virtual de ensino. Projeto de gerador fotovoltaico. Simulação computacional.

1 INTRODUÇÃO

A geração distribuída (GD) tem apresentado um crescimento constante ao longo dos anos, consolidando-se como uma alternativa sustentável para o fornecimento de energia elétrica, em um arranjo de geração próxima do consumidor final (ACKERMANN et al., 2001). A GD é caracterizada majoritariamente pelo uso de fontes renováveis e alinha-se ao consenso global de transição energética na redução das emissões de carbono e contribuindo para a mitigação de impactos ambientais (BOYLE, 2012).

A Figura 1 mostra o crescimento da capacidade instalada da geração solar fotovoltaica (GFV) de 2015 a 2024, de acordo com os dados do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Nesse sentido, a GFV tem crescido devido à modularidade, facilidade de instalação e baixo custo de manutenção, sendo utilizada tanto para prover energia elétrica a regiões isoladas quanto para unidades consumidoras conectadas à rede pública.



No Brasil, o mercado de energia solar fotovoltaica tem apresentado um crescimento expressivo nos últimos anos. Em 2024, conforme o relatório de Micro e Minigeração Distribuída (MMGD) da ANEEL, o Brasil atingiu 34 GW de potência instalada em GD, beneficiando mais de 4,2 milhões de consumidores e abrangendo mais de 3 milhões de instalações residenciais e empresariais (ANEEL, 2024). Esse avanço tem contribuído significativamente para a ampliação da produção energética sustentável no país e para a redução dos custos com energia elétrica por parte dos agentes que adotam sistemas de MMGD.

Para efeito de comparação, em 2022, o Brasil possuía 20 GW de potência instalada, representando um aumento de 70% no número de micro e minigeradores em apenas dois anos. O

resultado reflete a implementação de políticas favoráveis ao crescimento, como a isenção fiscal estadual introduzida em 2015 e o Marco Legal da Geração Distribuída aprovado em 2021, por meio da Lei 14.300, consolidando a energia solar como uma das principais fontes renováveis no país.

Nesse contexto, plataformas computacionais de ensino e projeto destacam-se como ferramentas atrativas para estudantes e projetistas, uma vez que permitem a realização e desenvolvimento de projetos, simulações de sistemas elétricos de potência e contemplam todos os componentes de sistemas de MMGD (PINHEIRO, C.; RIBEIRO, M., 2005).

Essas plataformas possibilitam a implementação em qualquer escala e oferece ao projetista uma solução de baixo custo financeiro para o aprendizado e/ou projeto, viabilizando desde o dimensionamento até o comissionamento de uma usina, por exemplo de GFV, criada a partir de um framework especializado. Esses ambientes computacionais de ensino e projeto tornam-se atrativos para estudantes e profissionais de engenharia, os quais podem criar, projetar e simular as diversas configurações de geradores fotovoltaicos (OCHS, D. S.; MILLER, R. D., 2015).

Considerando o ambiente de plataforma de ensino e projeto, este artigo apresenta o desenvolvimento de um software especializado para o ensino e o projeto de GFV, com foco em sistemas de MMGD. A plataforma foi projetada para auxiliar estudantes e profissionais de engenharia no aprendizado e no projeto de usinas fotovoltaicas, incorporando critérios técnicos que atendem às normas vigentes e o dimensionamento de parâmetros elétricos essenciais de uma usina FV.

Parâmetros como potências geradas e consumidas, tensão de circuito aberto (VOC), corrente de curto-circuito (ISC), temperatura de operação dos módulos, tensão e corrente no ponto de máxima potência (V_{mpp} e I_{mpp}), perdas no sistema FV, irradiação solar, autonomia e outros parâmetros utilizados no estudo e projeto de GFV são fundamentais para garantir o desempenho, a confiabilidade e a conformidade com as exigências técnicas de micro e minigeração, permitindo o aprendizado e elaboração de projetos otimizados para diferentes condições geográficas e climáticas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A geração FV ocorre pelo efeito fotovoltaico, em um processo de captação de fótons do espectro da luz solar incidentes em uma área específica (A) de uma ou mais células fotovoltaicas, fabricadas a partir de materiais semicondutores, como o silício, que pode ser dopado com átomos de Boro (B) e Fósforo (P) para formação de materiais semicondutores tipo P e N, tendo, assim, a junção PN da célula FV (DIMROTH; KURTZ, 2007).

Assim, a interação da luz solar com a zona de depleção formada na junção PN, caracterizada pela separação das cargas espaciais no material semicondutor, captura a energia dos fótons ($h\omega$) e gera pares elétron-lacuna que resultam na criação de tensão e corrente elétrica quando um há um circuito elétrico consumidor nos terminais da célula.

De outro modo, células conectadas em série formam um módulo FV, o qual apresenta características elétricas específicas que dependem do material semicondutor utilizado na fabricação das células. Os materiais mais comuns são o silício policristalino e monocristalino, que diferem em eficiência, custo e desempenho sob determinadas condições solarimétricas.

Alguns parâmetros elétricos que constam da placa de identificação dos módulos são tensão em circuito aberto (VOC), corrente de curto-circuito (ISC), tensão e corrente no ponto de máxima potência (V_{mpp} e I_{mpp}), eficiência nominal (η), entre outros.

Esses parâmetros são determinados sob condições padrão de teste (Standard Test Conditions, STC), que correspondem a uma irradiância de 1000 W/m^2 , temperatura da célula de 25°C e massa de ar de 1,5. No entanto, as condições de operação em campo diferem de STC, pois fatores como temperatura ambiente, variabilidade da irradiância, sombreamento parcial, orientação e inclinação dos módulos influenciam significativamente no seu desempenho, podendo alterar a eficiência do sistema e impactar diretamente na energia gerada (PINHO; GALDINO, 2014).

Conforme a carga elétrica consumidora, apenas um módulo FV pode não ser suficiente para prover potência elétrica, o que leva a necessidade de um GFV de potência adequada, composto por módulos solares conectados na configuração série e/ou paralela, formando M strings, sendo cada string formada por N módulos ligados em série.

2.1 PARÂMETROS ELÉTRICOS E DE PRODUÇÃO ENERGÉTICA

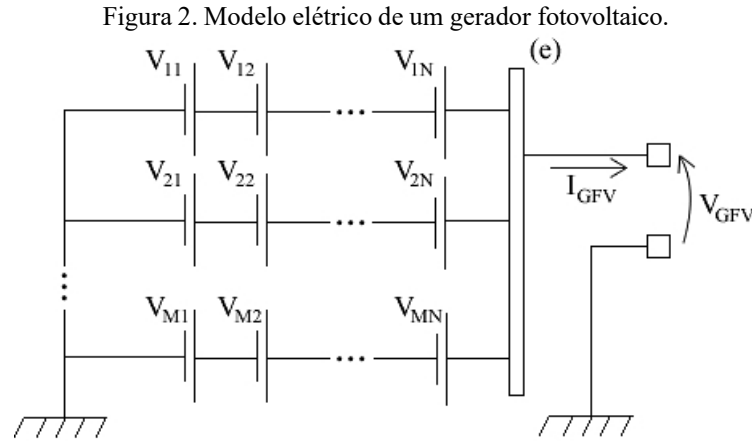
A potência de saída de um GFV é calculada a partir de diversos fatores e deve levar em conta a temperatura do módulo e perdas de eficiência oriundas do acúmulo de poeira, sombreamento parcial, perdas por quedas de tensão no cabeamento e nas conexões, entre outros (BALFOUR, J.; SHAW, M.; NASH, N. B, 2013). É importante levar em conta a temperatura de operação do módulo fotovoltaico, denotada por T_C ($^\circ\text{C}$), que pode ser estimada com a equação empírica dada por (ABBES et al., 2012):

$$T_C = 30 + 0,0175 \times (G_i - 300) + 1,14 \times (T_A - 25) \quad (1)$$

A Equação 1 fornece uma estimativa da temperatura de operação do módulo FV (T_C em $^\circ\text{C}$), G_i a irradiância solar incidente em W/m^2 e T_A a temperatura ambiente em $^\circ\text{C}$. Assim, é possível incorporar o impacto da temperatura de operação no cálculo da potência ativa do módulo FV (P_{mpi}), com base na potência de pico do módulo em condições STC, (P_{mpref}) e expressa em watt-pico (W_p). A expressão a seguir permite o cálculo de P_{mpi} :

$$P_{mpi} = P_{mpref} \times \frac{G_i}{G_{ref}} \times [1 + \gamma_{mp}(T_C - T_{ref})] \quad (2)$$

onde G_{ref} é a irradiância de referência = 1000 W/m^2 , e γ_{mp} o coeficiente de variação da potência por temperatura ($1/^\circ\text{C}$). O comportamento elétrico de um GFV, com M strings em paralelo e N módulos conectados em série por string, pode ser representado conforme a Figura 2.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Além da potência ativa, a tensão de operação (V_{mpi}) do módulo FV pode ser ajustada para refletir as condições reais de operação. O ajuste fica em função da tensão de referência no ponto de máxima potência (V_{mpref}), do coeficiente de variação da tensão (β_{mp}) em função da temperatura ($^\circ\text{C}-1$) e temperaturas de operação do módulo e de referência, conforme a equação:

$$V_{mp_i} = V_{mp_{ref}} \times [1 + \beta_{mp}(T_c - T_{ref})] \quad (3)$$

A potência total de saída de um GFV (P_{GFVref}), configurado com M strings em paralelo e N módulos conectados em série por string, é dado por:

$$P_{GFVref} = P_{mp_{ref}} \times M \times N \quad (4)$$

Ao combinar as equações 2 e 4, a potência de operação do GFV, considerando condições específicas de temperatura e irradiância, fica:

$$P_{GFV} = P_{mp_i} \times M \times N \quad (5)$$

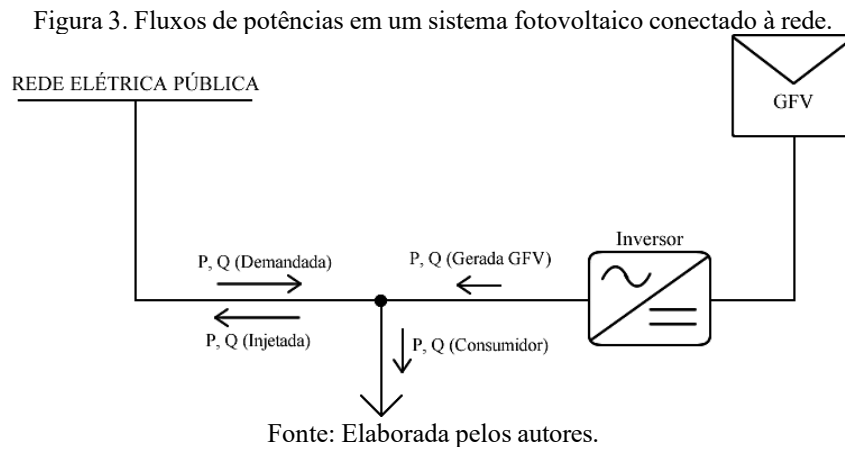
A tensão total de saída do GFV (V_{GFV}) pode ser calculada considerando a tensão operacional dos módulos e a quantidade em série (N):

$$V_{GFV} = V_{mp_i} \times M \times N \quad (6)$$

A potência ativa de saída do inversor ($P_{out\ inv}$) considera o seu rendimento (η_{inv}) e perdas por fatores externos η_{ext} , dada por:

$$P_{o_{inv}} = P_{GFV} \times \eta_{inv} \times \eta_{ext} \quad (7)$$

As equações de 1 a 7 permitem calcular a performance de um sistema FV próximas às condições reais, considerando perdas e eficiência, garantindo um dimensionamento mais preciso do gerador e do inversor FV de acordo com os parâmetros elétricos dos módulos e equipamentos. A figura 3 ilustra os fluxos de potências em um sistema FV, sendo P e Q a potência ativa e reativa, demandadas ou injetadas na rede.



Dentre os parâmetros de dimensionamento de uma usina solar FV, o balanço energético produzido pela usina é essencial para estimar o desempenho dos sistemas e avaliar o impacto de fatores como irradiância, perdas e crescimento do perfil de consumo. As expressões do balanço de energia permitem modelar a geração e o consumo energético em condições reais de operação, incorporando taxa de perdas, crescimento da carga e eficiência do sistema ao longo do tempo.

A energia elétrica gerada por um GFV em condições ideais, denotada como E_{GFVref} , pode ser calculada com base na potência nominal (P_{GFVref}), conforme equação 4, considerando a hora de sol pleno mínima mensal (HSP_{min}) e a quantidade de dias em um mês (N_d), conforme:

$$E_{GFV_{ref}} = P_{GFV_{ref}} \times HSP_{min} \times N_d \quad (8)$$

Sob condições operacionais reais, a energia gerada ($EGFV$) é ajustada para considerar a hora de sol pleno média mensal (HSP_{med}), conforme:

$$E_{GFV} = P_{GFV} \times HSP_{med} \times N_d \quad (9)$$

A eficiência de geração energética da usina FV é reduzida devido a fatores como temperatura elevada, sujeira sobre as células, perdas elétricas, inclinação inadequada, orientação desfavorável e sombreamento (BALFOUR et al., 2013). Considerando as principais perdas em uma usina FV, como perdas de temperatura (ΔP_T), perdas por sujeira (ΔP_S), e perdas elétricas (ΔP_C), a energia gerada com perdas é dada por:

$$E_{GFV} = E_{GFV_{ref}} \times (1 - \Delta P_T) \times (1 - \Delta P_S) \times (1 - \Delta P_C) \quad (10)$$

Além disso, a degradação do GFV, i.e., perda de eficiência na conversão de energia, afeta a eficiência do gerador como um todo. A energia gerada anual pode ser considerada com uma taxa de perda de eficiência anual (i_{PE}), que pode ser expressa como:

$$E_{GFV_{ANUAL}} = \frac{E_{GFV}}{(1 + i_{PE})^t} \quad (11)$$

O balanço energético de uma planta de geração FV é fundamental para planejar os sistemas energéticos, visando atender a carga atual e crescimento futuro. Assim, a energia demandada (E_{DEM}) em um determinado ano é calculada a partir da energia inicial demandada (E_{DEM0}), ponderada por uma taxa anual de crescimento de consumo (i_{AC}) dado o período t , conforme:

$$E_{DEM} = E_{DEM0} \times (1 + i_{AC})^t \quad (12)$$

A análise, utilizando as equações relacionadas à geração e demanda de energia elétrica, bem como os fatores de perdas e condições operacionais e ambientais do GFV, é essencial para a integração dos sistemas fotovoltaicos em projetos de diferentes escalas, assegurando que atendam aos objetivos técnicos e econômicos do projeto.

2.2 ANÁLISE ECONÔMICA DA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

A decisão de implementação de um projeto de GFV requer a avaliação da viabilidade financeira do investimento. Essa análise tem como base indicadores econômicos e valor do ativo ao longo do tempo, aplicando-se métodos que projetem os custos e benefícios durante a vida útil do sistema, os quais podem ser analisados com o uso de um software de forma síncrona com o projeto técnico para pequenas ou grandes usinas, conforme destacado por Parente (2017).

A economia monetária resultante da geração FV é proveniente da energia elétrica gerada pelo sistema (E_{EC}), a qual é igual à energia gerada no GFV (E_{GFV}), $E_{EC} = E_{GFV}$. O custo total do projeto (C_{totINV}) inclui o investimento em equipamentos e pode ser expresso como (PARENTE, 2017):

$$C_{totINV} = \sum_{i=1}^N C_i + C_{mob} + C_{proj} \quad (13)$$

Na qual, C_i representa os custos individuais dos equipamentos da usina, C_{mob} e C_{proj} consideram as despesas com mão-de-obra de instalação e de projeto elétrico. No entanto, ao longo da vida útil do sistema FV, é necessário considerar os custos de operação e manutenção (O&M), como limpeza, substituição de módulos ou inversores e outros serviços. O custo de O&M, ajustado pela taxa de inflação dos custos (TIC) (PARENTE, 2017), fica:

$$C_{O\&M} = D_{O\&M}_i \times (1 + TIC)^t, \quad t = 0, 1, \dots, T \quad (14)$$

sendo $D_{O\&M}_i$ a despesa anual de O&M e T o tempo máximo de análise.

O benefício financeiro bruto (R_F), dado na moeda corrente, é calculado com base na energia elétrica gerada (E_{EC}) e na tarifa de energia elétrica (d_{TE}), ajustados pela inflação ao longo do tempo, como:

$$R_F = E_{EC} \times d_{TE} \times (1 + TIC)^t, \quad t = 0, 1, \dots, T \quad (15)$$

A renda líquida (R_L) é obtida subtraindo os custos de O&M do benefício bruto e fornece o resultado líquido da operação financeira para o investimento da usina solar fotovoltaica, dada na forma de:

$$R_L = R_F - C_{O\&M} \quad (16)$$

A GFV também contribui com a redução de emissões de gases de efeito estufa, como o dióxido de carbono (CO_2). A avaliação ambiental, disponível na plataforma, é realizada a partir do cálculo do volume de CO_2 evitado (V_{CO_2}), o qual é obtido multiplicando-se a energia gerada no sistema FV pelo fator de emissão de CO_2 mitigado (T_{CO_2}), ficando:

$$V_{CO_2} = E_{GFV} \times T_{CO_2} \quad (17)$$

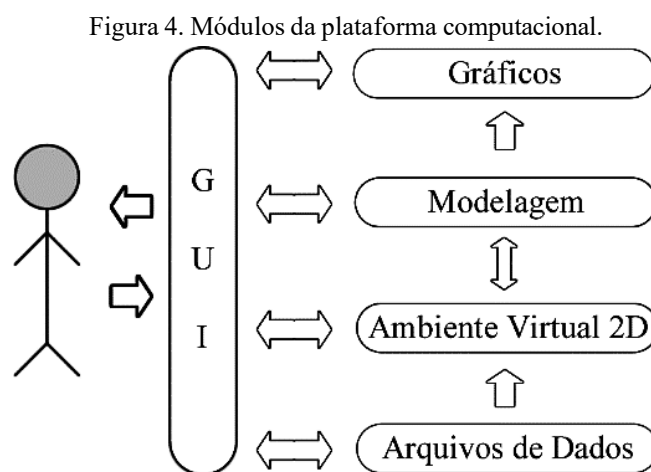
Assim, avaliar as despesas recorrentes e os benefícios ao longo da vida útil do sistema FV, bem como o impacto positivo no meio ambiente, pela redução de emissões de CO₂, permite ao projetista uma avaliação adequada quanto ao projeto, implantação e de maximização do retorno econômico, promovendo a eficiência no uso dos recursos naturais.

3 METODOLOGIA

A ferramenta computacional desenvolvida apresenta uma arquitetura composta por três módulos principais: Interface Gráfica do Usuário (GUI), ambiente virtual bidimensional e um módulo de modelagem do Sistema FV (SFV). Esses módulos interagem de forma integrada, proporcionando ao usuário uma experiência completa de análise e configuração do SFV com visualização das conexões físicas do sistema por meio de esquemas unifilares, representando módulos, inversores e cabeamento, facilitando a compreensão das interligações entre os elementos.

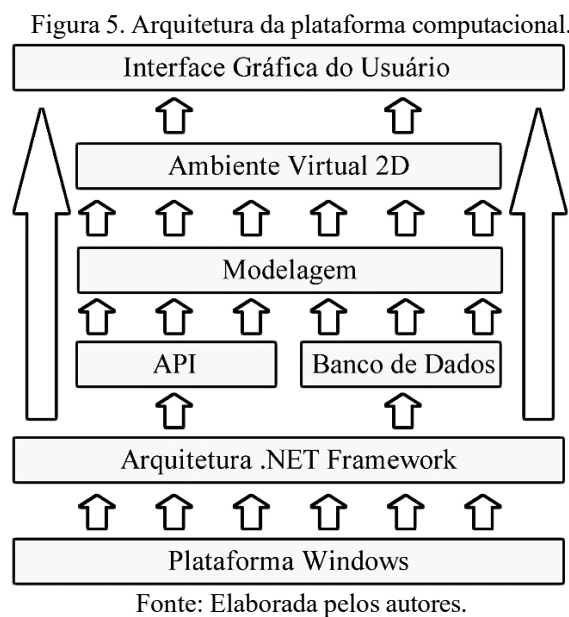
A Interface GUI permite acesso simplificado às principais funcionalidades da ferramenta por meio de menus e painéis organizados. A GUI permite que o usuário insira, armazene e recupere informações em um banco de dados dedicado, além de configurar parâmetros dos componentes do sistema de maneira intuitiva.

O módulo de modelagem é responsável por coletar os dados necessários e realizar as simulações do SFV, resolvendo as equações relacionadas ao sistema com os diversos parâmetros meteorológicos e elétricos. Os resultados das simulações alimentam o ambiente virtual e permite que o usuário visualize o desempenho do sistema em diferentes cenários. A figura 4 mostra representações dos módulos da plataforma.



Fonte: Elaborada pelos autores.

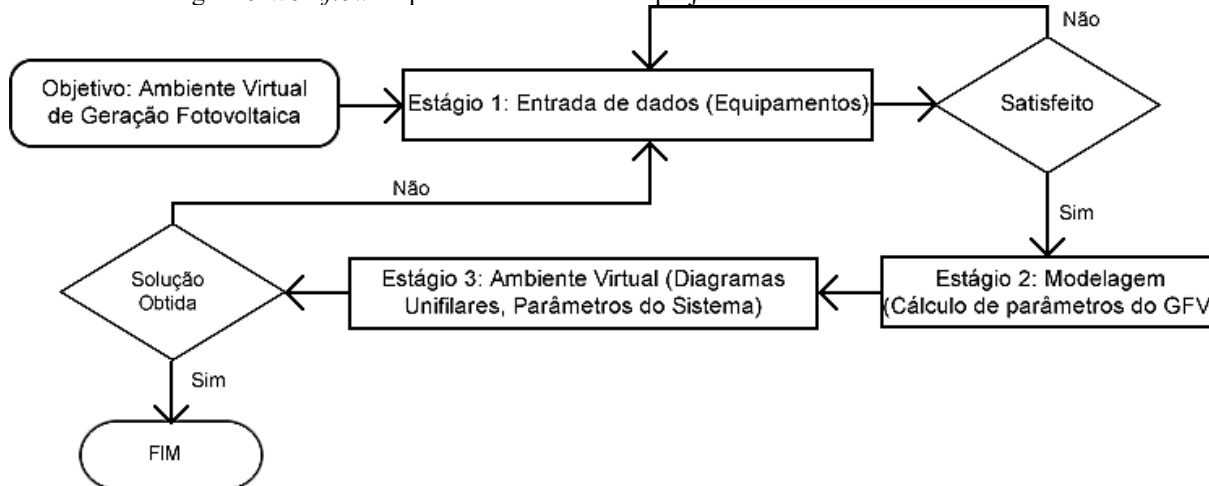
A estrutura da plataforma computacional utiliza um conjunto de bibliotecas e APIs da linguagem C# para permitir a interação fluída entre os componentes internos e o usuário, por meio da Interface GUI. A arquitetura também facilita o acesso e a manipulação de um banco de dados integrado, que armazena informações fundamentais para o projeto do SFV em arquivo próprio em formato “.sfv”. A Figura 5 ilustra a arquitetura proposta, evidenciando a construção da plataforma no sistema operacional Windows, utilizando as capacidades do .NET Framework e das APIs fornecidas pela linguagem C# (MICROSOFT, 2000).



A arquitetura do .NET Framework oferece suporte robusto para a representação geométrica do SFV, permitindo a execução de operações básicas, como o deslocamento e a manipulação dos modelos no ambiente virtual. Essas operações são implementadas diretamente através das APIs do C#, que fornecem as funcionalidades necessárias para garantir o desempenho eficiente da plataforma.

O banco de dados da plataforma desempenha um papel central ao possibilitar que o usuário selecione equipamentos de acordo com os requisitos específicos do projeto FV. Desenvolvido utilizando a arquitetura do C#, o banco de dados interno do simulador emprega o padrão de criptografia avançada (AES) para assegurar a segurança dos dados armazenados de fabricantes e usuários avançados, utilizando a biblioteca da RFC2898, que implementa um esquema de geração de chave baseada em senha com um gerador de números pseudoaleatórios para aumentar a segurança dos dados. Essa abordagem permitiu a criação de uma estrutura de dados personalizada dentro do simulador, com o objetivo de armazenar informações detalhadas sobre componentes fotovoltaicos: módulos, baterias, controladores de carga, inversores, disjuntores e outros acessórios. O workflow para a criação do ambiente virtual de geração FV é organizado em três estágios principais, conforme apresentado no fluxograma da Figura 6.

Figura 6. *Workflow* da plataforma de ensino e projeto de usinas solares fotovoltaicas.



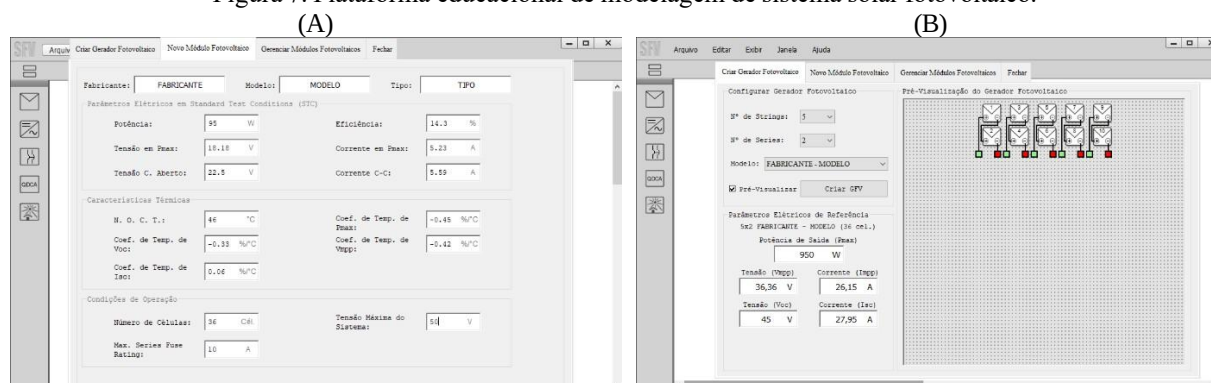
Fonte: Elaborada pelos autores.

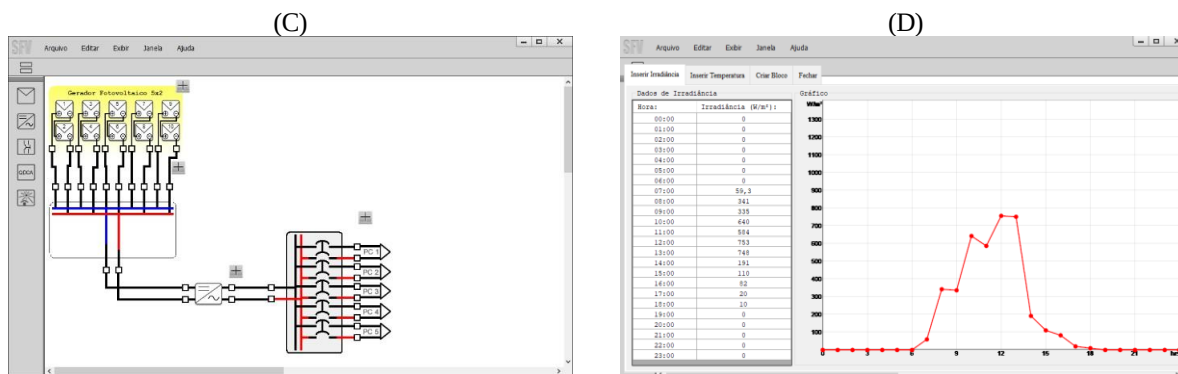
No estágio 1 são inseridos dados dos equipamentos do gerador FV, parâmetros técnicos, custos, dados meteorológicos, taxas econômicas e a demanda da carga. O estágio 2 é responsável pelos cálculos dos parâmetros do gerador, perdas e fluxo de potência até o ponto de saída do sistema. No estágio 3, o usuário pode visualizar e interagir com o sistema, realizar testes operacionais, receber alertas de segurança, fazer a análise econômica, além de avaliar a mitigação de emissões de gases poluentes do sistema.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A metodologia proposta neste artigo demonstra uma solução para simulações em ambientes virtuais de GFV. A flexibilidade da ferramenta permite ao usuário selecionar equipamentos cadastrados de sistemas fotovoltaicos ou inserir novos itens. Além disso, é possível modificar os dados cadastrados sob demanda. A Figura 7 mostra a interface gráfica da plataforma educacional de modelagem de sistema solar fotovoltaico.

Figura 7. Plataforma educacional de modelagem de sistema solar fotovoltaico.

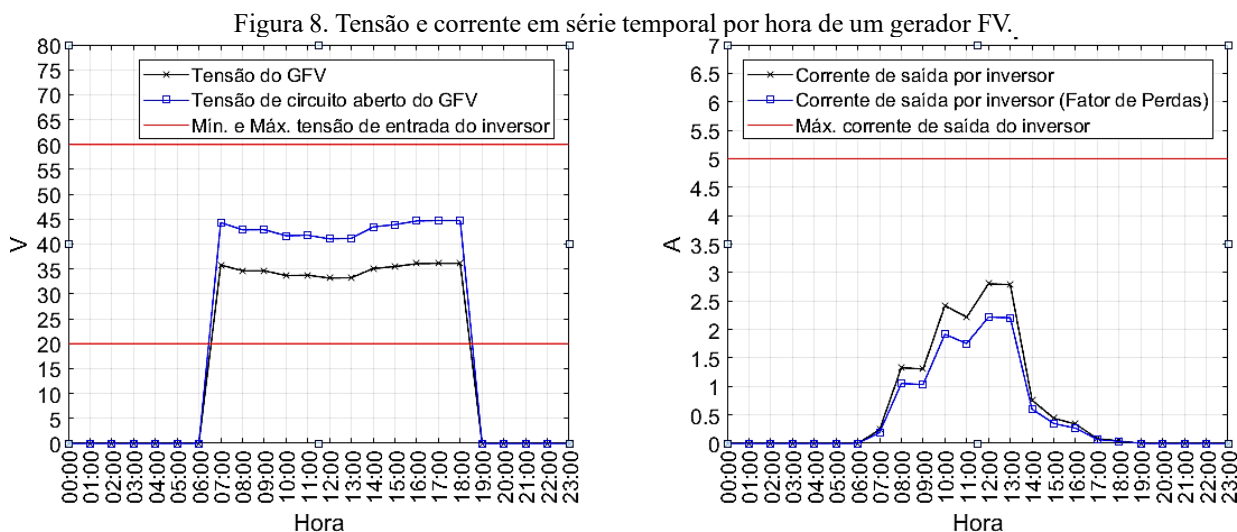




Fonte: Elaborada pelos autores.

A plataforma é composta por dois módulos principais, um destinado à sistemas fotovoltaicos autônomos (SFVA) e outro para sistemas conectados à rede (SFCR), sendo ambos desenvolvidos para dimensionar geradores fotovoltaicos em duas configurações distintas de GD. O cálculo da potência ativa do gerador FV é realizado por meio de um método matricial, conforme seção 2, no qual M representa o número de strings e N a quantidade de módulos conectados em série. Os parâmetros de referência do gerador são exibidos diretamente na interface, de acordo com a Figura 7, com alertas automáticos no caso de inconsistências, a exemplo de tensão máxima do gerador excede o limite suportados dos módulos.

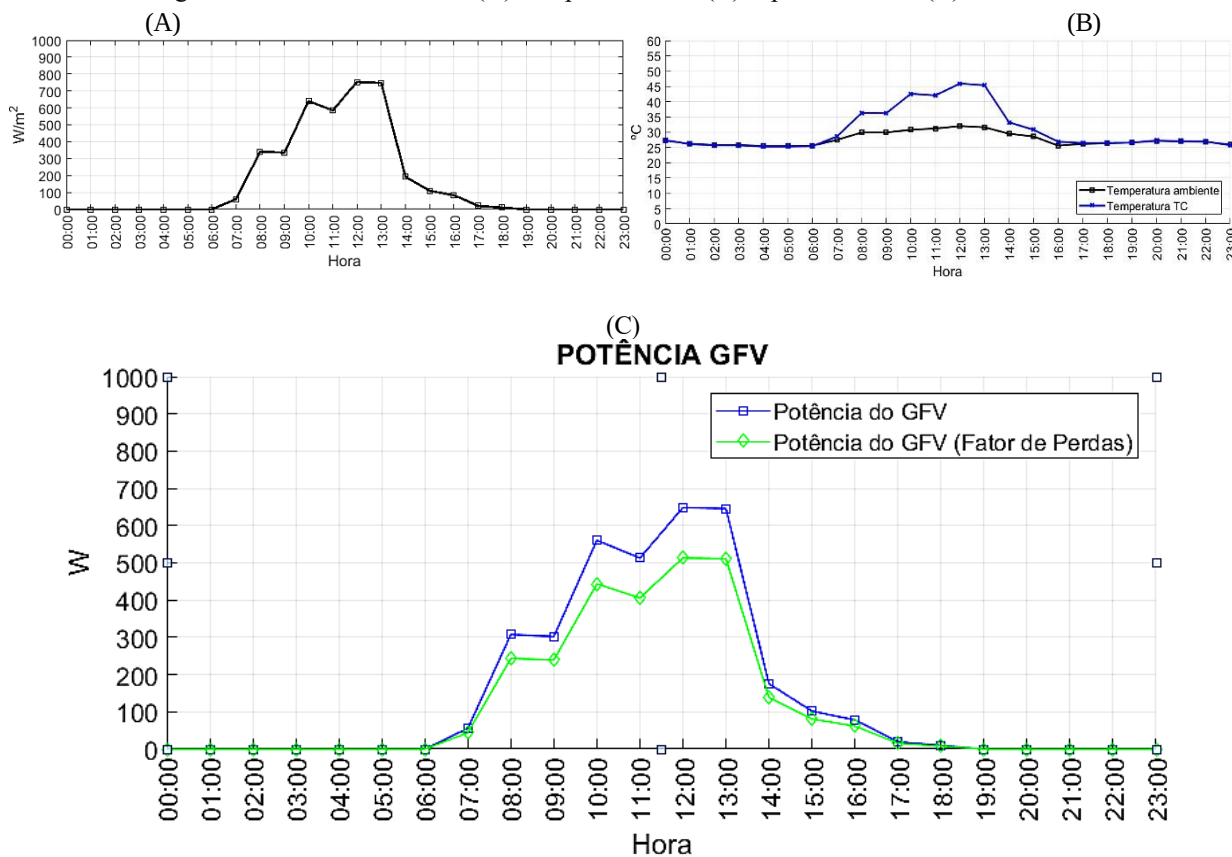
Outra funcionalidade da plataforma é a simulação de geradores fotovoltaicos, onde o usuário pode inserir dados meteorológicos, como irradiância e temperatura, que são armazenados no banco de dados interno para uso na simulação, conforme mostra a Figura 7-D. A partir desses dados, a modelagem do gerador FV é realizada em conjunto com os demais equipamentos, string boxes CC, inversores CC/CA, e string boxes CA, conforme mostra a Figura 7-C, podendo os resultados serem visualizados no ambiente virtual por meio de instrumentos do tipo probe, amperímetros e voltmíetros, ou em gráficos detalhados, conforme mostrados na Figura 8.



Fonte: Elaborada pelos autores.

A plataforma computacional permite o cálculo da potência ativa de saída do gerador FV, a partir de variáveis como irradiância, temperatura ambiente, temperatura do módulo e índices de perdas, considerando cenários de operação sem perdas e com perdas, conforme mostra a Figura 9.

Figura 9. Curva de irradiância (A), temperatura TC (B), e potência ativa (C) de um GFV.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Ainda, como ferramenta computacional de ensino e projeto de GFV, disponibiliza um recurso notável para realizar o check-list automático de parâmetros dos equipamentos e auxilia na verificação da compatibilidade e o desempenho do gerador FV projetado, considerando limites técnicos de equipamentos e de normas técnicas vigentes. Um exemplo dessa funcionalidade está mostrado na Figura 10, na qual alguns parâmetros da GFV foram verificados automaticamente.

Figura 10. Sistema de verificação no console.

```
[Verificado] Potência de surto do sistema e potência de surto de saída do inversor.
[Verificado] Potência instalada do sistema e máxima potência de saída do inversor.
[Verificado] Corrente de saída do inversor.
[Verificado] Tensão de entrada do inversor.
```

Fonte: Elaborada pelos autores.

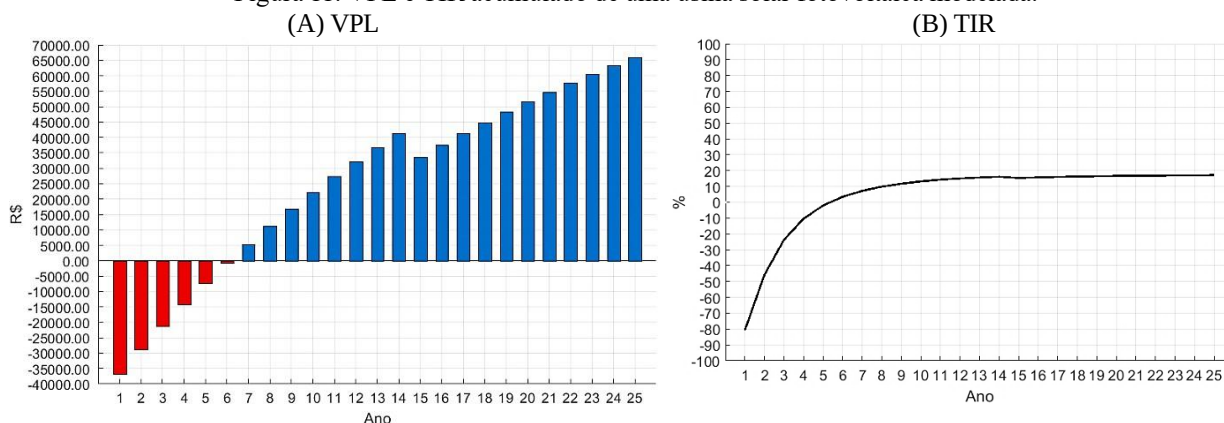
A plataforma computacional possui um módulo que permite o cálculo da energia consumida diária (E_{CD}), sendo $E_{CD} = \sum_{i=1}^{24} E_{Ci}$, onde E_{Ci} representa a energia consumida em cada hora do dia na

forma de um vetor $E_{Ci} \in \mathbb{R}^N$ para N igual a 24 h. Aumentos de carga da energia demandada do gerador são ajustados com base no fator de crescimento anual especificado, conforme equação 12. A energia demandada do gerador FV é dada pelo consumo de energia E_{CA} anual, corrigido por uma taxa de aumento de carga na forma de $E' = E_{CA} \times (1 + i_{AC})^t$, sendo a energia demandada corrigida.

Para o dimensionamento do gerador FV considera-se a energia consumida de referência mensal (E_{CMREF}) e diária (E_{CD}), os valores de HSP mínimo e médio, fatores de perdas ΔPT , ΔPS e ΔPC para o cálculo do fator de perdas global vetorial (I_{FP}) e a potência do GFV vetorial (P_{GFV}) a partir do HSP mínimo, sendo $P_{GFV} = I_{FP}(50\% \times E_{CMREF})/HSP_{min}$. Nesta expressão, além dos parâmetros já declarados, considera-se um fator de segurança de 50% para variações sazonais da radiação solar.

Os dados de potência incluem o perfil de potência ativa diária e anual do gerador FV com e sem perdas, calculados através dos índices de eficiência e degradação anual. Esses valores alimentam os dados de produção energética e permitem a análise econômica do sistema. O cálculo do Valor Presente Líquido (VPL) considera uma taxa de desconto t_d e a Taxa Interna de Retorno (TIR) reflete a viabilidade financeira do investimento, conforme exemplo de cálculo realizado na plataforma computacional, mostrado na Figura 11.

Figura 11. VPL e TIR acumulado de uma usina solar fotovoltaica modelada.



Fonte: Elaborada pelos autores.

4 CONCLUSÃO

A plataforma computacional desenvolvida demonstrou ser uma ferramenta eficiente e versátil para o planejamento, simulação e análise de sistemas fotovoltaicos, com potencial para atender às demandas de ensino e de desenvolvimento da área. A interface amigável permite o fácil acesso a parâmetros técnicos e elétricos, o dimensionamento do gerador FV e diagramas interativos para visualização e operação do sistema projetado.

A possibilidade de simular condições reais, incluindo falhas e variações meteorológicas, contribui significativamente para a avaliação técnica e econômica de projetos de GFV. O ambiente



virtual proposto oferece informações detalhadas, como perfis de consumo e geração em diferentes escalas temporais, auxiliando na identificação de otimizações no sistema.

A incorporação de fatores de perdas e condições locais no dimensionamento aumentam a precisão dos cálculos, enquanto a análise econômica agrega valor ao processo de tomada de decisão. Desta forma, a plataforma se destaca como uma solução integrada para projetos sustentáveis de geração solar fotovoltaica.

REFERÊNCIAS

- ABBES, D.; MARTINEZ, A.; CHAMPENOIS, G. Eco-design optimization of an autonomous hybrid wind-photovoltaic system with battery storage. *IET Renewable Power Generation*, v. 6, p. 358–371, 2012.
- ACKERMANN, T.; ANDERSSON, G.; SÖDER, L. Distributed generation: a definition. *Electric Power Systems Research*, v. 57, p. 195–204, 2001.
- ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Relatório de Micro e Minigeração Distribuída. Disponível em: <www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/relatorios-e-indicadores/micro-e-minigeracao-distribuida>. Acesso em: 5 dez. 2024.
- BALFOUR, J.; SHAW, M.; NASH, N. B. *Introduction to Photovoltaic System Design*. Burlington: Jones and Bartlett Learning, 2013.
- BOYLE, G. *Renewable Energy: Power for a Sustainable Future*. 3. ed. Oxford: Oxford University Press, 2012.
- DIMROTH, F.; KURTZ, S. High-Efficiency Multijunction Solar Cells. *MRS Bulletin*, v. 32, p. 170–177, 2007.
- MICROSOFT. *Standard ECMA-334, C# Language Specification*. 5. ed. Geneva: ECMA International, 2017.
- OCHS, D. S.; MILLER, R. D. Teaching Sustainable Energy and Power Electronics to Engineering Students in a Laboratory Environment Using Industry-Standard Tools. *IEEE Transactions on Education*, v. 58, p. 173–178, 2015.
- ONS - OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Dados da geração solar fotovoltaica no SIN. Disponível em: <www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/boletim-geracao-solar.aspx>. Acesso em: 5 dez. 2024.
- PARENTE, V. Análise de investimentos aplicada a projetos de energia. In: MOREIRA, J. (org.). *Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética*. Rio de Janeiro: LTC, 2017. p. 336–348.
- PINHEIRO, C. D. B.; RIBEIROFILHO, M. L. V. R. - Laboratório Virtual de Redes - Protótipo para Auxílio ao Aprendizado em Disciplinas de Redes de Computadores. In: *Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Informática na Educação (SBIE)*, 2005.
- PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*. Rio de Janeiro: CEPEL-CRESESB, 2014.