

# COMPARAÇÃO DE ESTIMATIVA ENERGÉTICA DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE EM DUAS PLATAFORMAS: *PVsyst e EnergyPlus*

Mamadou Gning – mamadougning@id.uff.br

Valéria Henrique Vitória

Daniel Henrique

Gilberto Figueiredo

Universidade Federal Fluminense, Escola de Engenharia

## 4.2. Tecnologias e ensaios de módulos fotovoltaicos

**Resumo.** Este estudo realiza uma análise comparativa entre as plataformas de simulação PVsyst e EnergyPlus no contexto de sistemas fotovoltaicos (FV). Inicialmente, apresenta-se o detalhamento dos modelos de simulação de sistemas de geração FV adotados em ambas as plataformas. Apesar de uma concordância geral nos parâmetros analisados, nuances surgem ao examinar detalhadamente a Irradiação Anual ( $H$ ) no plano do gerador, a Energia elétrica gerada anualmente em corrente contínua ( $E_{c.c.}$ ) e corrente alternada ( $E_{c.a.}$ ); Perdas Elétricas ( $E_{perdas}$ ), Produtividade Final ( $Y_F$ ) e a Taxa de Desempenho ( $P_R$ ). O EnergyPlus destaca-se ligeiramente em algumas variáveis, enquanto o PVsyst demonstra eficiência superior na  $P_R$ . A consistência global sugere confiabilidade em ambas as plataformas, mas uma análise crítica aponta para oportunidades de aprimoramento. Questões como produção excedente no EnergyPlus e limitações na consideração da irradiância no PVsyst são discutidas, enfatizando a necessidade de ajustes para simulações mais realistas. Este estudo não apenas direciona melhorias nas plataformas, mas contribui para avanços coletivos na modelagem eficaz de sistemas FV, destacando a importância contínua da evolução tecnológica em energia renovável.

**Palavras-chave:** Energyplus, Pvsyst, Geração Distribuída

## 1. INTRODUÇÃO

Diante da crescente demanda global por energia elétrica nas edificações principalmente relacionada à refrigeração e ao aquecimento, impulsionada pelo estilo de vida da sociedade contemporânea, e em face dos desafios ambientais gerados pela atividade humana, a busca por sustentabilidade emergiu como uma prioridade de alcance mundial. No contexto mencionado, destaca-se a contribuição dos edifícios para a eficiência energética em cenários de médio e longo prazo.

A mitigação das mudanças climáticas tem sido alvo de atenção por parte da Organização das Nações Unidas (ONU), que propôs quatro diretrizes principais para esse fim. Essas diretrizes incluem a necessidade de ajustar os padrões de consumo e estilo de vida da sociedade, aprimorar a eficiência no uso de energia, adotar práticas agrícolas revistas e reestruturar nossa matriz energética para incorporar uma maior proporção de fontes renováveis. Essas medidas têm como objetivo central a redução das emissões de carbono na geração de eletricidade, contribuindo assim para a descarbonização desse setor crucial (Brunet *et al.*, 2022).

Nessa perspectiva, a exploração de métodos alternativos de geração de eletricidade que possam mitigar os impactos ambientais e atender à crescente demanda global por eletricidade se tornou imperativa. Nesse contexto, a geração fotovoltaica (FV) se destaca como uma alternativa de extrema relevância para a geração de eletricidade, uma vez que ao longo de sua vida útil não emite resíduos poluentes, ao contrário do uso de combustíveis fósseis, por exemplo (Chae *et al.*, 2014 e EPE, 2022).

No Brasil, a importância da geração FV se evidencia pelo seu expressivo crescimento recente, notado no país, bem como pela sua proeminência nos recentes leilões de energia elétrica de acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2022), em grande parte devido à crescente adoção da tecnologia de geração distribuída (GD).

Os incentivos financeiros proporcionados pelos projetos em GD, originados da regulamentação do sistema de compensação de energia pela ANEEL em 2012, combinados aos reajustes anuais nas tarifas de energia elétrica e à redução nos custos das aplicações, permitiram a disseminação da GD, principalmente na rede de baixa tensão.

Apesar do curto período de adoção da GD no país, seus resultados têm demonstrado grande promessa. É evidente que o crescimento da capacidade instalada em Sistemas FV Conectados à Rede (SFCR) tem contribuído, pelo menos em parte, para solucionar a questão da demanda por eletricidade (Gning *et al.*, 2022).

Além disso, as aplicações da geração FV são diversas e podem desempenhar um papel crucial nas construções sustentáveis, indo além do fornecimento de energia para atender às necessidades. Essas aplicações podem envolver a

integração de sistemas FV nas estruturas construtivas, permitindo que atuem ativamente na regulação das trocas térmicas das envoltórias e coberturas dos edifícios (Biwole *et al.*, 2013; Agathokleous e Kalogirou 2018).

Para fortalecer a competitividade dos sistemas de geração FV nas próximas décadas, os projetistas devem direcionar seus esforços para a contínua redução dos custos por quilowatt (kW) instalado. Além da natural diminuição dos custos tecnológicos, uma estratégia disponível para alcançar esse objetivo é aprimorar a otimização e a precisão das características de projeto. Assim, a integração da tecnologia FV aos edifícios deve evoluir no sentido de aprimorar a eficiência na geração de eletricidade, visando atrair potenciais clientes.

Nesse contexto, a precisão na estimativa energética por SFCR torna-se crucial, pois afeta não apenas o desempenho financeiro dos projetos, mas também o impacto ambiental e a confiabilidade do abastecimento de energia elétrica. Para atender a essa necessidade, diversas ferramentas de simulação e modelagem foram desenvolvidas, permitindo que profissionais do setor avaliem o desempenho de sistemas FV.

Duas dessas ferramentas amplamente utilizadas são o *PVSyst* e o *EnergyPlus*. O *PVSyst* é uma ferramenta especializada em sistemas FV, desenvolvida para prever o desempenho de sistemas conectados à rede e autônomos de acordo com os dados climáticos e geográficos inseridos no cenário de simulação. Bastante utilizada em geração distribuída e centralizada, o foco principal do programa são os modelos representativos das etapas de conversão da energia (radiação-elétrica), após o tratamento e transposição dos dados climáticos. O *EnergyPlus* é uma ferramenta voltada à simulação termoenergética do ambiente construído, com foco principal nos modelos representativos dos mecanismos de transferência de calor e massa dos efeitos passivos e aplicações ativas que ocorrem durante a operação de uma edificação. Além disso, a ferramenta incorpora capacidades de simulação energética e dos impactos térmicos de diversos tipos de sistemas prediais, o que inclui agregação de geração distribuída a partir de sistemas FV conectados à rede, permitindo a avaliação do desempenho termoenergético da geração FV adaptada a edificações.

No âmbito deste tema, a comparação e avaliação de ambas as ferramentas se torna crucial para compreender as vantagens, desvantagens e limitações de cada uma na estimativa energética dos sistemas FV. Esta pesquisa visa apresentar de forma geral os modelos representativos da geração FV nas duas plataformas, além de realizar uma comparação dos resultados obtidos para ambas, utilizando um SFCR de 189 kW nominais, parametrizados da mesma maneira e com os dados climáticos de entrada sintetizados da mesma fonte.

## 2. PLATAFORMAS E MODELOS ASSOCIADOS

A avaliação de sistemas de energia solar requer consideração das características elétricas das células solares, envolvendo as relações entre tensão e corrente sob diferentes níveis de radiação e temperaturas. Diversos modelos de células, desde os simples até os detalhados, foram desenvolvidos para este fim (Duffie e Beckman, 2013; I. Ceylan *et al.*, 2019). Neste cenário, a simulação computacional emerge como uma ferramenta de grande relevância, possibilitando uma análise detalhada e com a previsão do comportamento e desempenho de sistemas FV conectados à rede.

Importante ressaltar que um modelo de simulação é, em essência, uma representação simplificada de uma realidade mais complexa. Além disso, os *softwares* utilizados para a modelagem apresentam limitações que devem ser devidamente reconhecidas. Isso é especialmente evidente, por exemplo, quando se trata da simulação térmica de sistemas *BIPV* por meio do *EnergyPlus* (Changhai Peng e Jianqiang Yang, 2016). Estimativas precisas da produção energética e seus impactos secundários podem desempenhar um papel fundamental ao oferecer suporte precioso na fase de planejamento, antecipando resultados antes mesmo de iniciar a construção ou reforma. A utilização dessa metodologia tem ganhado crescente aceitação como uma alternativa altamente eficaz para enriquecer o processo de projeto e promover a tomada de decisões embasadas em dados sólidos.

Neste sentido, este trabalho foca na comparação da estimativa da geração de eletricidade entre duas plataformas amplamente utilizadas em nichos distintos de mercado: *PVSyst* (versão 7.1) e o *EnergyPlus* (versão 8.7.1). Uma usina FV em GD, com 189 kW nominais, foi implementada com as mesmas parametrizações dos modelos representativos escolhidos nas duas plataformas, além de se ter usado dados climáticos sintetizados da mesma fonte, o programa *Meteonorm 7.1*. A seguir são descritos brevemente os modelos matemáticos referentes à conversão da energia solar FV em eletricidade nos dois programas de simulação utilizados.

### 2.1 *PVSyst*

Projetado para atender às demandas de arquitetos, engenheiros e pesquisadores, o *PVSyst* não apenas se destaca como uma ferramenta crucial para profissionais do campo, mas também se revela como um recurso educacional significativo. Sua interface de usuário, amigável e intuitiva, é aprimorada por meio de um extenso menu de “Ajuda”, que oferece um guia abrangente para a elaboração de projetos, esclarecendo detalhadamente os procedimentos e modelos empregados.

Além disso, a adaptabilidade do *PVSyst* é destacada pela sua capacidade de importar dados meteorológicos e informações pessoais de diversas fontes. Essa característica amplia o alcance e a utilidade da ferramenta, proporcionando flexibilidade em diferentes contextos de aplicação.

## Modelos PVsyst

- **Fotovoltaico:** Modelo de 1 diodo

O programa *PVsyst* emprega o modelo *One-Diode*, conhecido como um diodo, para descrever as características corrente-tensão dos conversores FV. O modelo, baseado no desenvolvimento de Duffie e Beckman (2013), baseia-se em um circuito equivalente originalmente concebido para uma única célula. A generalização para todo o módulo pressupõe a igualdade rigorosa de todas as células, tornando-o inadequado para arranjos com parâmetros distintos entre as células. Embora adequado para módulos de silício cristalinos, o modelo requer adaptações para reproduzir o comportamento de tecnologias de filme fino (*PVsyst*; 2022 a).

A expressão principal que descreve o modelo "um diodo" sob as condições-padrão de ensaio (STC: 1000 W/m<sup>2</sup>, 25°C, AM=1,5) é apresentada na Eq. (1).

$$I = I_{L,ref} - I_{o,ref} \left[ \exp\left(\frac{q(V+I.R_s)}{N_{CS} \lambda \cdot k \cdot T_c}\right) - 1 \right] - \frac{V+I.R_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

Onde  $I$  é a corrente fornecida pelo módulo, e os cinco parâmetros do modelo ( $I_{L,ref}$ : Fotocorrente;  $I_{o,ref}$ : corrente de saturação inversa do diodo;  $R_s$ : Resistência em série;  $R_{sh}$ : Resistência de derivação e  $\lambda$ : Fator de qualidade do diodo) são declarados a partir das características de corrente e tensão de um módulo em condições de referência fornecidas pelo fabricante e outras características ( $q$ : Carga do elétron;  $k$ : Constante de Boltzmann;  $N_{CS}$ : Número de células em série) são conhecidas. A temperatura operativa das células FV ( $T_c$ ) é uma variável crítica, cuja estimativa precisa é desafiadora devido à complexidade do processo de conversão de energia. A literatura apresenta diversas correlações propostas para estimar  $T_c$ , destacadas em trabalhos como Skoplaki e Palyvos (2009), Santos *et al.* (2020) e Gning *et al.* (2022).

O modelo assume uma proporção perfeita entre a fotocorrente e a irradiância, com uma leve dependência da  $T_c$ . Em termos de temperatura, a corrente de saturação inversa do diodo  $I_o$  é modelada de acordo com a  $T_c$ , utilizando uma equação derivada da física fundamental do estado sólido. Essa modelagem é sensível às rápidas variações de temperatura, apresentando uma dependência cúbica e exponencial. Contudo, é importante destacar que o modelo principal de um diodo não incorpora uma correção espectral padrão. O *PVsyst* aborda essa questão de forma diferenciada para diferentes tecnologias de módulos solares.

- **Inversor/conexão à rede:** Modelo da eficiência de conversão

O *PVsyst* disponibiliza quatro modelos distintos para a definição da eficiência de inversores solares:

a) **Curva única de eficiência:** Define a eficiência como uma função da potência de entrada. Especificada por até 8 pontos. Utiliza interpolação linear quando especificado por até 9 pontos.

b) **Curva única de eficiência (Automática):** Construída automaticamente a partir das eficiências máximas, EURO ou CEC, e do Limiar de Potência ( $P_{thresh}$ ). Oferece uma abordagem automatizada para a definição da curva eficiência-potência.

c) **Conjunto de 3 curvas de eficiência:** Define eficiências para três diferentes tensões de entrada. Realiza uma interpolação quadrática entre essas curvas durante a simulação.

d) **Conjunto de 3 curvas de eficiência (Automático):** Automatiza a construção do conjunto de três curvas a partir das eficiências máximas, EURO ou CEC, e  $P_{thresh}$ . Proporciona maior precisão na representação da eficiência em diferentes condições de operação.

Em relação aos Perfis Automáticos, estes são construídos sob hipóteses específicas: A produção c.a. é proporcional à energia c.c. disponível, descontando o "consumo interno" ( $P_{thresh}$ ). A eficiência é penalizada por perdas ôhmicas nos circuitos de saída de forma quadrática. A curva de transferência deve coincidir com o valor máximo de potência especificado.

É importante observar que o *PVsyst* não considera explicitamente as perdas de rastreamento do Ponto de Potência Máxima (MPP). Recomenda-se incorporar essas perdas no perfil de eficiência fornecido pelo fabricante para uma análise mais completa do desempenho dos inversores solares. Este conjunto diversificado de modelos oferece uma base robusta para a análise e simulação eficaz de sistemas FV. Nas simulações realizadas neste estudo, foi adotado o modelo disponibilizado na folha de dados do fabricante do inversor, com uma única curva de eficiência, em função da potência de entrada, com interpolação linear dos pontos indicados (*PVsyst*; 2022 b).

## 2.2 EnergyPlus

O *EnergyPlus* se destaca como uma abrangente ferramenta de simulação de energia para edifícios completos, amplamente adotada por engenheiros, arquitetos e pesquisadores. Ao empregar o *EnergyPlus* na modelagem, é possível

analisar de forma precisa o consumo de energia e água em edifícios. Isso oferece aos profissionais da construção a capacidade de otimizar os projetos de edifícios, visando a redução do consumo de energia e água de forma eficiente e sustentável.

Nos recursos documentais fornecidos pelo *EnergyPlus*, encontra-se uma variedade de informações relevantes relacionadas ao software. Entre os manuais que desempenham um papel significativo na elaboração deste estudo, destaca-se o *Engineering Reference* (*EnergyPlus*, 2020-a), que oferece uma explicação abrangente dos cálculos e dos modelos matemáticos empregados no processo de simulação. Adicionalmente, um documento relacionado aos arquivos de entrada e saída do programa, intitulado *Input Output Reference* (*EnergyPlus*, 2020-b), foi consultado para compreender a metodologia de modelagem dos sistemas.

## Modelos *EnergyPlus*

### • Fotovoltaico

Os dados relativos à incidência da radiação solar são adquiridos a partir de arquivos climáticos, notadamente o TMY2. O *software*, por sua vez, estabelece uma conexão entre os modelos FV e as superfícies designadas no arquivo de entrada, onde são definidos os parâmetros, incluindo área, localização, inclinação e orientação da superfície atribuída ao gerador. Isto permite que o *software* acesse e utilize os resultados dos cálculos de insolação, de acordo com o modelo de distribuição solar selecionado pelo simulador.

Dentro do *EnergyPlus*, os sistemas FV são modelados de forma a permitir a análise do impacto da geração de eletricidade no consumo global do edifício. O *software* considera diversos parâmetros, como a eficiência dos módulos, a orientação e a inclinação, para fornecer estimativas precisas de geração de eletricidade. O *EnergyPlus* oferece três modelos distintos para estimar a geração de eletricidade por meio da geração FV, intitulados “*Simple*,” “*Equivalent One-Diode*,” e “*Sandia*.” A distinção entre esses modelos reside nos algoritmos e nos dados de entrada empregados para calcular a geração de eletricidade. Todos os três modelos compartilham a mesma estrutura para prever a incidência da radiação solar, a qual é também utilizada nos cálculos térmicos (*EnergyPlus*, 2020-a).

a) *Simple*: O modelo mais básico para a previsão da geração de eletricidade, sendo especialmente útil na fase inicial de análise de projetos. Ele oferece uma estimativa rápida dos níveis anuais de geração e da potência máxima, sem a necessidade de especificar detalhadamente os coeficientes de desempenho de um módulo FV específico (*EnergyPlus*, 2020-a). Nesse modelo, o usuário determina a eficiência com a qual as superfícies convertem a radiação solar incidente em eletricidade, podendo configurá-la como uma constante ou permitir que varie de acordo com um padrão de utilização específico.

b) *Equivalent One-Diode*: Este modelo prevê o desempenho elétrico de módulos FV cristalinos, incluindo os tipos mono e policristalinos, também conhecido como o modelo “*TRNSYS PV*”. Este modelo utiliza equações baseadas em um circuito equivalente para estimar as características de corrente e tensão de um único módulo, e os resultados são extrapolados para avaliar o desempenho de uma matriz de vários módulos (*EnergyPlus*, 2020-a). O modelo pode ser parametrizado com os dados do fabricante e sua modelagem é semelhante à mostrada na seção 2.1.1. Cabe ressaltar que, no contexto deste estudo, optou-se por utilizar o modelo *Equivalent One-Diode*, uma vez que ambos os programas empregados (*EnergyPlus* e *PVsyst*) o incorporam. Essa escolha foi feita para permitir uma comparação objetiva dos resultados entre os dois programas.

c) *Sandia Photovoltaic Performance Model*: O terceiro modelo oferecido no *EnergyPlus* é conhecido como o modelo Sandia, sendo baseado em pesquisas realizadas no *Sandia National Laboratory*. Esse modelo consiste em uma série de relações empíricas que utilizam coeficientes derivados de medições reais e testes experimentais (*EnergyPlus*, 2020-a). Muitos desses coeficientes estão disponíveis na base de dados do *EnergyPlus*. Semelhante ao modelo *Equivalent One-Diode*, o núcleo do modelo Sandia é utilizado para prever o desempenho de um único módulo FV, com essas previsões sendo extrapoladas para estimar o desempenho do conjunto (*EnergyPlus*, 2020-a).

Vitória *et al.* (2022) conduziram um estudo comparativo sobre a produção anual de energia de um sistema FV, utilizando os três modelos do *EnergyPlus*. Os resultados indicaram estimativas de energia anual entre 1600 e 1800 kWh, com o sistema de quatro módulos de 290W apresentando uma produtividade de cerca de 1500 kWh/kW, alinhada à média anual regional. No entanto, é importante destacar que a simulação não abordou integralmente todas as perdas elétricas e térmicas no sistema.

### • Inversor

Além de modelar a geração solar, o *EnergyPlus* também incorpora modelos para representar o desempenho dos inversores. Esses modelos abrangem a eficiência na conversão da geração FV em eletricidade e garantem que os resultados da simulação sejam o mais realistas possível. O *EnergyPlus* incorpora três modelos para converter energia elétrica de corrente contínua (c.c.) em energia elétrica de corrente alternada (c.a.) (*EnergyPlus*, 2020-a). A eficiência do inversor ( $\epsilon_{\text{Inversor}}$ ) é determinada por meio de um dos três modelos disponíveis. A energia em c.c. que entra no inversor ( $P_{\text{c.c. - Entrada}}$ ), é transformada em energia em c.a. ( $P_{\text{c.a. - Saída}}$ ) pelo inversor, utilizando a Eq. (2) (*EnergyPlus*, 2020-a).

$$P_{c.a. - Saída} = P_{c.c. - Entrada} \times \varepsilon_{Inversor} \quad (2)$$

a) *Simple*: Neste modelo, a eficiência do inversor é uma constante que é inserida pelo usuário. Isso significa que o usuário determina a eficiência do inversor como um valor fixo.

b) *Look Up Table*: A eficiência do inversor é calculada utilizando interpolação linear. Em vez de uma constante fixa, a eficiência é determinada com base em uma tabela de consulta, que permite a estimativa da eficiência para diferentes condições de operação. Entre as alternativas disponíveis, é importante destacar que, neste estudo específico, optou-se pelo uso do modelo *Look Up Table*, uma vez que se assemelha ao modelo de curva única utilizado no *PVsyst*.

c) *Function of Power*: A eficiência do inversor é calculada nesse caso utilizando um objeto de curva de variável única. Isso significa que a eficiência varia de acordo com a potência de entrada, e a curva de eficiência é especificada para refletir essa relação.

Nos modelos "*Look Up Table*" e "*Function of Power*", a geração de eletricidade é normalizada em relação à  $P_{c.c. - Entrada}$ . Essa normalização permite uma avaliação consistente da eficiência do inversor sob diferentes níveis de potência de entrada.

### 3. CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO

Este trabalho surge no contexto do projeto “UFV Iguaba (UFV-IG), Laboratório da Universidade Federal Fluminense para Inovação Aberta na Indústria Solar Fotovoltaica”, que se encontra atualmente em fase de implementação na região da Ponta da Farinha, que abrange os municípios de Iguaba Grande e São Pedro d'Aldeia, no estado do Rio de Janeiro. O projeto está planejado para operar com uma capacidade nominal total de geração de 1.309,83 kW, distribuída entre cinco miniusinas, compreendendo uma usina principal e quatro usinas secundárias. O propósito primordial da UFV-IG reside na geração de eletricidade destinada a suprir as demandas elétricas das instalações da Universidade Federal Fluminense (UFF). Além disso, este empreendimento desempenha um papel fundamental como laboratório interdisciplinar, fomentando pesquisas relacionadas à GD.

Na metodologia deste estudo, o foco recaiu sobre um arranjo da usina do projeto UFV-IG. Este arranjo apresenta uma potência nominal do gerador de 189 kW, sendo composto por 7 fileiras, cada uma equipada com 50 módulos FV monofaciais. Esses módulos, considerando o modelo BYD MLK-36 MONOFACIAL, possuem uma potência nominal de 540 W e dimensões de 2,28 metros de comprimento por 1,14 metros de largura. Cada sub-arranjo é composto de duas séries FV conectadas a um inversor de 20 kW nominais, do modelo SN-20PT, do fabricante Sineng. O diagrama unifilar do arranjo considerado pode ser visualizado na Fig. 1.

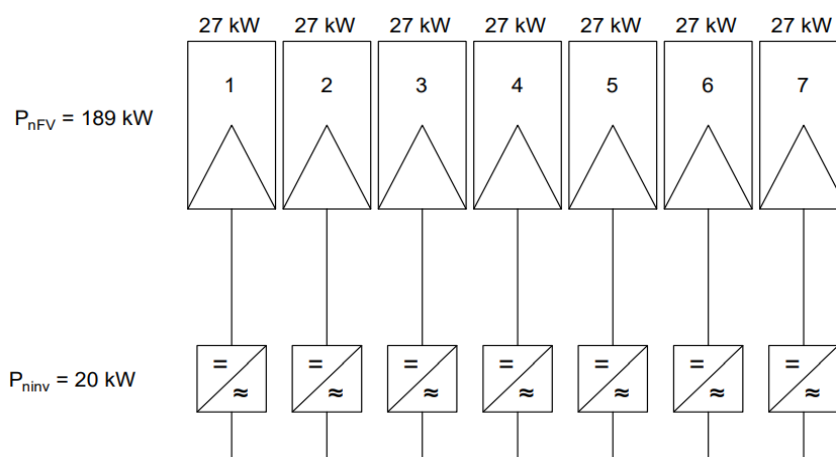
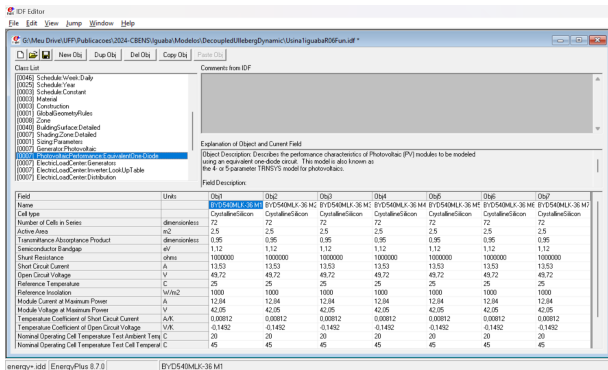


Figura 1 - Diagrama Unifilar do arranjo FV considerado nas simulações.

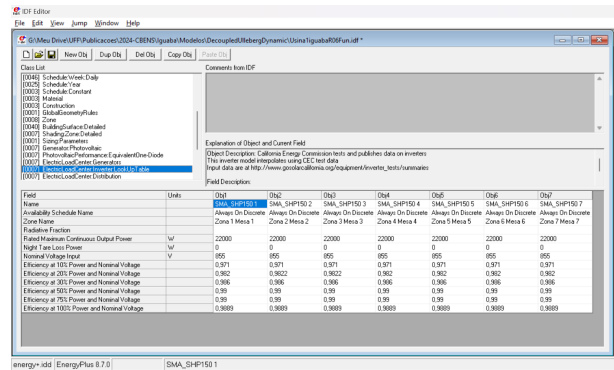
A fim de conduzir a estimativa energética, adotou-se a utilização de duas notórias plataformas de simulação no domínio da energia solar: *PVsyst* e *EnergyPlus*. A escolha dessas ferramentas se deve à sua eficácia amplamente reconhecida na modelagem de sistemas FV, no caso da primeira, e ao seu uso difundido tanto na indústria quanto em pesquisas em eficiência energética das edificações, no caso da segunda. Ambas as plataformas foram configuradas para simular o desempenho do arranjo FV para as mesmas condições geográficas, dados climáticos sintetizados da mesma fonte e parametrização semelhante relativa aos módulos, inversores e às configurações elétricas. A Fig. 2 mostra a configuração do arranjo no *EnergyPlus* e a Fig. 3 no *PVsyst*.



(a)

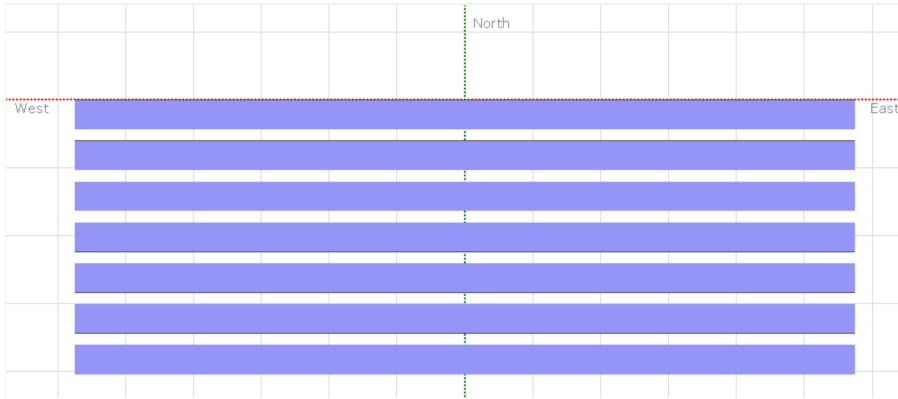


(b)

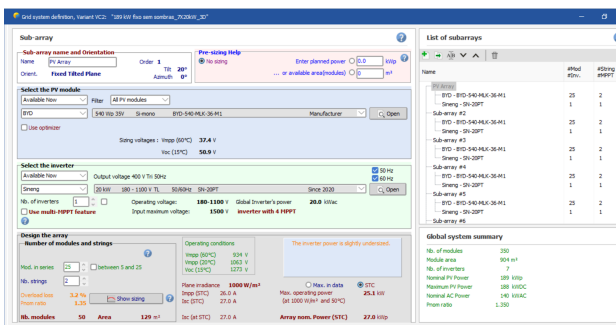


(c)

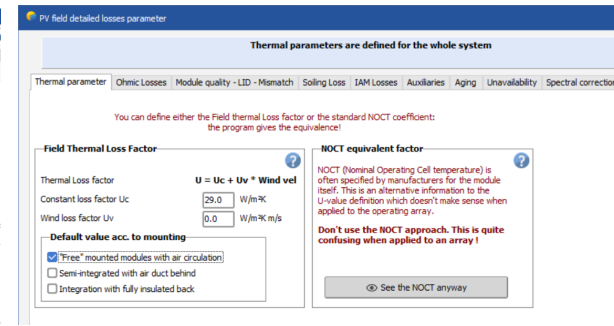
Figura 2 - Modelagem do arranjo no EnergyPlus: (a) geométrica, (b) módulo FV e (c) inversor.



(a)



(b)



(c)

Figura 3 - Modelagem do arranjo no PVsyst: (a) geométrica, (b) módulo FV e inversor, e (c) parâmetros térmicos.

Ressalta-se que no *EnergyPlus* foi configurado o modelo térmico dinâmico (“*Ulleberg Dynamic*”) para o cálculo de  $T_c$ , o qual necessita da parametrização do coeficiente global de transmissão de calor, além da capacidade térmica do módulo FV. No *PVsyst* somente é possível configurar o coeficiente global de transmissão de calor. Em ambos os cenários os geradores foram orientados para o norte, com inclinação de  $20^\circ$  e *pitch* de 3 m. Este distanciamento foi proposital para forçar perdas por sombreamento nos do ano de menor altura solar nos períodos de maior incidência de radiação no dia.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tab. 1 apresenta os resultados obtidos a partir das simulações de geração FV utilizando as plataformas *PVsyst* e *EnergyPlus*. As variáveis de saída analisadas incluem a Irradiação Anual ( $H$ ) no plano do gerador, a Energia elétrica gerada anualmente em corrente contínua ( $E_{c.c.}$ ) e corrente alternada ( $E_{c.a.}$ ); Perdas Elétricas de conversão c.c./c.a. ( $E_{perdas}$ ), Produtividade Final ( $Y_F$ ) e a Taxa de Desempenho ( $P_R$ ), além da diferença percentual dos valores encontrados em ambas as plataformas de simulação, tomando como referência o valor retornado pelo *PVsyst* para cada uma das variáveis consideradas, de acordo com a Eq. (3)

$$100 \times \frac{V_{PVsyst} - V_{EPlus}}{V_{PVsyst}} \quad (3)$$

Tabela 1 - Comparação de resultados de simulação entre as plataformas

Variável	Unidade	<i>PVsyst</i>	<i>EnergyPlus</i>	Diferença
$H$	kWh/m <sup>2</sup>	1.840,2	1.888,8	-2,64%
$E_{c.c.}$	kWh	299.167,0	299.889,1	-0,24%
$E_{perdas}$	kWh	3.660,0	3.550,2	3,00%
$E_{c.a.}$	kWh	288.889,0	296.338,9	-2,58%
$Y_F$	kWh/kW	1.528,5	1.567,9	-2,58%
$P_R$	-	0,83	0,83	0,06%

Observa-se que a irradiação anual de na superfície do gerador estimada pelo *EnergyPlus* é superior ao calculado pelo *PVsyst*. Tal diferença pode ser atribuída às características específicas dos modelos de transposição do recurso solar de cada plataforma, indicando a importância de considerar as peculiaridades de cada *software* ao interpretar os resultados do recurso primário, principalmente no que se diz respeito aos efeitos do sombreamento.

Os valores de energia obtidos com a simulação no *EnergyPlus* são ligeiramente superiores, em comparação ao *PVsyst*, além de apresentar menores perdas de conversão. Essa diferença pode ser resultado de diferentes abordagens na modelagem dos sistemas FV e nas condições climáticas consideradas por cada plataforma. O  $P_R$ , que reflete a eficiência global do sistema, retornou valores muito próximos para ambas as plataformas. Isso pode indicar que, apesar das diferenças nas metodologias de cálculo de perdas e eficiências, não houve consequência na avaliação global do desempenho dos sistemas FV simulados.

Uma análise crítica dos programas *PVsyst* e *EnergyPlus* revela pontos cruciais que demandam atenção para aprimorar a confiabilidade das simulações de geração FV. No caso do *EnergyPlus*, a análise das variáveis de saída revelou uma produção que excede a potência nominal do gerador e dos inversores, suscitando questionamentos quanto à eficácia dos modelos de conversão FV e de eficiência de conversão do inversor, apontando para a necessidade de investigações detalhadas. A Fig. 4 mostra dois dias típicos simulados em ambas as plataformas, com ocorrência de efeitos de sobre-irradiação. Percebe-se claramente a atuação do mecanismo de limitação de potência no cenário da simulação no *PVsyst*, enquanto que o *EnergyPlus* considera o gerador, e consequente o inversor, operando acima de suas capacidades nominais. Cabe ressaltar que, quando da parametrização do modelo representativo do inversor, o *EnergyPlus* solicita o valor da máxima potência de saída admitida para operação contínua do equipamento, o que claramente não é respeitado, ao se analisar o traçado da Fig. 3(b).

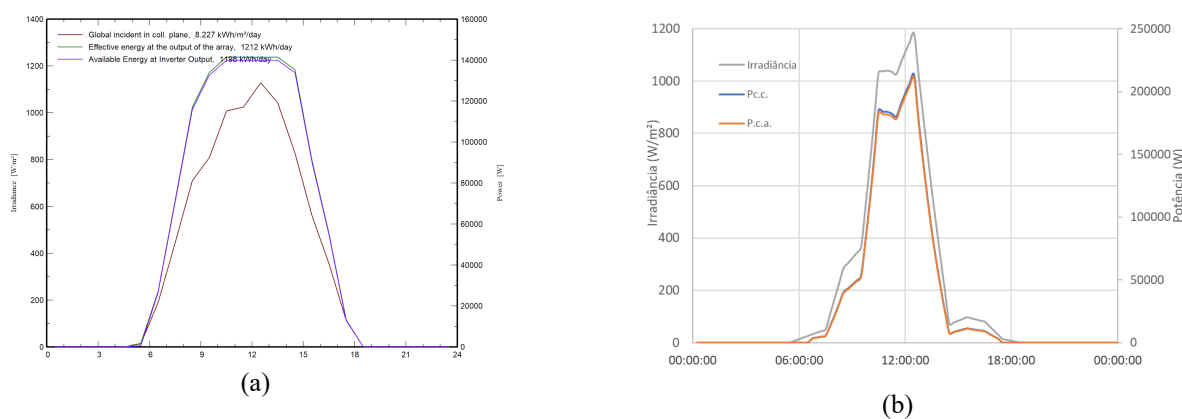


Figura 4 - Comparação do perfil diário: (a) *PVsyst* e (b) *EnergyPlus*.

Esses pontos críticos não apenas evidenciam desafios, mas também apontam oportunidades para o refinamento constante dessas ferramentas, enfatizando a necessidade de transparência e flexibilidade para garantir simulações alinhadas com as complexidades do cenário real da geração FV.

## 5. CONCLUSÃO

A comparação dos resultados obtidos nas simulações de geração FV utilizando as plataformas *PVsyst* e *EnergyPlus* revelou uma concordância geral nos parâmetros analisados. As diferenças observadas nos resultados, embora leves, fornecem insights valiosos sobre as nuances inerentes às abordagens de modelagem adotadas por cada plataforma.

Com base na análise comparativa entre as plataformas de simulação *PVsyst* e *EnergyPlus*, destaca-se que a *EnergyPlus*, em média, apresentou um desempenho ligeiramente superior em variáveis críticas como a Irradiação Anual (H), as perdas elétricas ( $E_{\text{perdas}}$ ), Produtividade Final ( $Y_f$ ) e as Energias Elétricas geradas anualmente em corrente alternada ( $E_{c.a.}$ ) e corrente contínua ( $E_{c.c.}$ ), registrando diferenças favoráveis de 2,64%; 3,00%; 2,58%; 2,58% e 0,24%, respectivamente. Estas discrepâncias sugerem uma eficiência relativa maior do *EnergyPlus* na minimização de perdas elétricas e na estimativa de energia gerada quando comparado ao *PVsyst*. Entretanto, no que diz respeito à Taxa de Desempenho ( $P_R$ ), o *PVsyst* destaca-se, superando essa dualidade e consolidando-se como a plataforma preferencial para essa métrica específica, com uma diferença de 0,06%.

A consistência global entre os resultados sugere que as plataformas *PVsyst* e *EnergyPlus* são ferramentas confiáveis para simulações de geração FV. No entanto, é essencial reconhecer as diferenças observadas e abordar cuidadosamente as limitações de cada plataforma. A cautela na interpretação dos resultados é vital para a validação e aprimoramento contínuo dos modelos.

Em resumo, a análise crítica dos programas *PVsyst* e *EnergyPlus* na simulação de sistemas FV destaca oportunidades de aprimoramento. Pontos críticos, como a produção excedente no *EnergyPlus* e as limitações na consideração da irradiância no *PVsyst*, apontam para a necessidade de ajustes. A busca por simulações mais realistas, a consideração de condições extremas e a implementação de mecanismos dinâmicos são cruciais. A transparência nos modelos e a prontidão para adaptações são fundamentais para garantir a fidedignidade das simulações. Essa análise não apenas direciona melhorias nos programas, mas também contribui para o progresso coletivo na modelagem eficaz de sistemas FV, destacando a importância contínua da evolução tecnológica em energia renovável.

## Agradecimentos

Este estudo conta com suporte do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC) do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ), no âmbito dos programas de Auxílio Básico à Pesquisa (APQ1) e de Apoio a Projetos Científicos e Tecnológicos em Geração e Armazenamento de Energia (Projeto UFV-Iguaba). Os autores agradecem ao CNPq, à FAPERJ e à UFF pelo apoio concedido ao longo da realização desta pesquisa.



## REFERÊNCIAS

- Agathokleous, R. A., Kalogirou, S. A., 2018. Part I: Thermal analysis of naturally ventilated BIPV system: Experimental investigation and convective heat transfer coefficients estimation. *Solar Energy* 169, 673–681.
- Biwole, P. H., Eclachec, P., Kuznik, F. (2013). Phase-change materials to improve solar panel's performance. *Energy and Buildings*, 62, 59–67.
- Brunet, C. et al. 2022. Does solar energy reduce poverty or increase energy security? A comparative analysis of sustainability impacts of on-grid power plants in Burkina Faso, Madagascar, Morocco, Rwanda, Senegal, and South Africa. *Energy Research & Social Science*, 87, 102212.
- Chae, Y. T. et al. (2014). Building energy performance evaluation of building-integrated photovoltaic (BIPV) window with semi-transparent solar cells. *Applied Energy*, 129, 217–227.
- Changhai Peng e Jianqiang Yang, 2016. The Effect of Photovoltaic Panels on the Rooftop Temperature in the EnergyPlus Simulation Environment. *International Journal of Photoenergy*.
- Duffie, J.A., Beckman, W.A., 2013. *Solar energy thermal processes* (4rd ed.), Wiley, Hoboken (NJ)
- EnergyPlus*. Engineering Reference. 2020 a. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory.
- EnergyPlus*. Input Output Reference. 2020 b. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory.
- EPE, E. DE P. E. Atlas2021\_PT\_2022\_02\_04Atlas2021\_PT\_2022\_02\_04, 2022. Disponível em: <[https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-651/Atlas2021\\_PT\\_2022\\_02\\_04.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-651/Atlas2021_PT_2022_02_04.pdf)>
- Gning, M., Figueiredo, G., Faisca, R. G. (2022). Representação termoenergética de geradores fotovoltaicos relacionados com o ambiente construído. IX Congresso Brasileiro de Energia Solar, Florianópolis.
- I. Ceylan et al. 2019 Determination of the heat transfer coefficient of PV panels. *Energy* 175 (2019) 978e985
- King, D. L., Boyson, W. E., Kratochvil, J. A. 2004. Photovoltaic Array Performance Model. Photovoltaic System R&D Department Sandia National Laboratories P. O. Box 5800
- PVsyst 7 Help 2022 a. Disponível em: <[https://www.pvsyst.com/help/index.html?pvmodule\\_model.htm](https://www.pvsyst.com/help/index.html?pvmodule_model.htm)> Acesso em: 10 novembro 2023.
- PVsyst 7 Help 2022 b. Disponível em: <[https://www.pvsyst.com/help/index.html?inverter\\_efficiency.htm](https://www.pvsyst.com/help/index.html?inverter_efficiency.htm)> Acesso em: 10 nov. 2023.
- Santos, L. O., Carvalho, P. C. M., Carvalho Filho, C. de O., 2020. Modelos para a temperatura de operação de módulos fotovoltaicos: uma revisão das correlações e variáveis pertinentes. VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar Sineng. Disponível em: <<https://en.si-neng.com/ueditor/php/upload/file/20230227/1677462837271823.pdf>> Acesso em: 13 nov. 2023.
- Skoplaki, E. P. J. A., Palyvos, J. A., 2009a. Operating temperature of photovoltaic modules: A survey of pertinent correlations, *Renewable energy*, 34(1), 23-29.
- Vitória, H. V., Figueiredo, G., Meiriño, M. J. (2022). Geração de energia fotovoltaica no contexto da análise energética de uma edificação residencial padrão nzeb para a cidade do Rio de Janeiro. IX Congresso Brasileiro de Energia Solar, Florianópolis.

### COMPARISON OF ENERGY ESTIMATION FOR GRID-CONNECTED PHOTOVOLTAIC SYSTEMS ON TWO PLATFORMS: PVsyst and EnergyPlus

**Abstract.** *This study conducts a comparative analysis between the PVsyst and EnergyPlus simulation platforms in the context of photovoltaic systems. Initially, a detailed exposition of the photovoltaic energy simulation models adopted in both platforms is presented. Despite a general agreement on the analyzed parameters, nuances emerge upon examining the Annual Irradiation ( $H$ ) on the generator plane, the electric energy generated annually in direct current ( $E_{DC}$ ) and alternating current ( $E_{AC}$ ); Loss Energy ( $E_{Loss}$ ), Final Productivity ( $Y_F$ ), and Performance Ratio ( $P_R$ ). EnergyPlus slightly outperforms in some variables, while PVsyst demonstrates superior efficiency in the performance ratio. Overall consistency suggests reliability in both platforms, but our critical analysis points to opportunities for improvement. Issues such as excess production in EnergyPlus and limitations in considering irradiance in PVsyst are discussed, emphasizing the need for adjustments for more realistic simulations. This study not only guides improvements in the platforms but contributes to collective advancements in effective modeling of photovoltaic systems, highlighting the ongoing importance of technological evolution in renewable energy.*

**Keywords:** *EnergyPlus, PVsyst, Distributed Generation*