

Simulação Dinâmica Transiente de Sistemas Fotovoltaicos Utilizando Modelagem Multiagente

1st Felipe Lima Aires
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Universidade Federal de Goiás
Aparecida de Goiânia, GO - Brasil
Limafelipe255@discente.ufg.br

2nd Fernando Nunes Belchior
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Universidade Federal de Goiás
Aparecida de Goiânia, GO - Brasil
fnbelchior@ufg.br

3th Pedro José Abraão
Faculdade de Engenharia Elétrica
Instituto Federal de Goiás
Goiânia, GO - Brasil
pedro.abrao@ifg.edu.br

4th Bierley Souza Machado
Engenharia de Produção e Sistemas
Pontifícia Universidade Católica de
Goiás
Goiânia, GO - Brasil
bierley@gmail.com

Resumo — A crescente adoção de fontes de energia renováveis tem impulsionado a demanda por ferramentas que possibilitem a análise técnica e econômica de sistemas de geração distribuída. No entanto, as soluções de software existentes frequentemente não possuem a capacidade de realizar simulações dinâmicas que representem com precisão o comportamento dos sistemas sob diferentes condições operacionais. Este estudo propõe o desenvolvimento de uma plataforma de simulação baseada em sistemas multiagentes para geração fotovoltaica, com o objetivo de modelar o comportamento de componentes-chave, como painéis fotovoltaicos, inversores e cargas, considerando variações ambientais, sendo a arquitetura proposta aplicada a simulações dinâmicas de um sistema fotovoltaico e seu respectivo inversor, utilizando dados reais fornecidos pelos fabricantes. A metodologia adotada envolve uma arquitetura modular, na qual cada subsistema foi desenvolvido e validado individualmente antes da integração. Embora a integração completa dos subsistemas não tenha sido concluída neste trabalho, os modelos individuais demonstraram um bom resultado em suas simulações. Os resultados indicam que a abordagem proposta oferece uma solução flexível e escalável para a análise de sistemas de energia renovável.

Palavras-chave — Geração fotovoltaica, Energia renovável, Simulações dinâmicas, Sistemas multiagentes, Microrredes

I. INTRODUÇÃO

A adoção de tecnologias sustentáveis tem sido uma prioridade global, especialmente no setor energético, com foco em fontes renováveis como eólica e fotovoltaica. Segundo o relatório da Agência Internacional de Energia (IEA) de 2024 [1], em 2023, a capacidade instalada de energias renováveis cresceu 50%, alcançando 510 GW, com previsão de atingir 7300 GW até 2028. No Brasil, 49,1% da geração de energia provém de fontes renováveis, com uma potência instalada total de 225 GW [2–4]. Essa porcentagem tende a crescer, já que fontes descentralizadas promovem a autossuficiência energética, reduzindo a dependência da rede elétrica e aumentando a estabilidade das operações [5,6].

Apesar dos desafios impostos pelo alto custo inicial, a queda nos preços e o crescimento do mercado de energias renováveis impulsionam a demanda por ferramentas de análise técnica e econômica desses sistemas [7]. No entanto, ainda há falta de aplicativos que promovam análises dinâmicas transitórias integradas às de regime permanente. Estas análises possibilitam subsidiar o comportamento das proteções bem como a operação do sistema em tempo real,

considerando as contingências relacionadas ao sistema. As simulações transitórias possibilitam verificar as condições de estabilidade frente a distúrbios a partir da representação fidedigna do comportamento das dinâmicas de equipamentos elétricos, dando maior contribuição à Segurança Operacional do Sistema.

A utilização de sistemas multiagentes para o desenvolvimento do aplicativo alinha-se ao paradigma de integração de modelos (sistema modular), proporcionando flexibilidade e atualização. Estudos na área de energia destacam o potencial dos sistemas multiagentes (MAS) no controle, monitoramento e reconfiguração de redes elétricas. O estudo [8] investiga a utilização do MAS no desenvolvimento de sistemas autorreconfiguráveis para distribuição de energia. Já o controle de carga, essencial para equilibrar oferta e demanda, é abordado em [9]. No contexto do gerenciamento de microrredes, a pesquisa [10] explora o uso de agentes para otimizar a operação desses sistemas. Além disso, o trabalho [11] analisa co-simulações aplicadas a redes elétricas inteligentes. Essas iniciativas reforçam a importância dos MAS na construção de sistemas energéticos mais eficientes e adaptáveis.

Neste trabalho, busca-se modelar corretamente os componentes do sistema, como painéis fotovoltaicos, inversores e cargas, e integrá-los em uma plataforma unificada de análise. A metodologia envolve a criação de uma arquitetura modular, onde cada subsistema foi modelado individualmente e analisado de forma isolada para validar seu funcionamento. Isto contribui para o avanço das ferramentas de análise de sistemas fotovoltaicos, oferecendo um modelo flexível e escalável para a avaliação de diferentes cenários operacionais. Embora a integração completa dos subsistemas tenha sido prevista, sua implementação ainda não foi concluída em razão de desafios técnicos identificados durante o processo. Estratégias para superação dessas limitações já estão em andamento, e os resultados obtidos até o momento indicam que os modelos individuais apresentam comportamento compatível com o esperado, demonstrando consistência em suas simulações isoladas.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A. Simulações computacionais em sistemas elétricos

A simulação computacional é uma ferramenta essencial na engenharia elétrica para modelagem, análise e otimização de sistemas. Essa metodologia envolve a criação

de modelos matemáticos que representam fenômenos físicos e sua resolução por meio de algoritmos numéricos.

Estas simulações são amplamente utilizadas para análises como fluxo de cargas, transitórios eletromagnéticos, estabilidade de sistemas de potência e funcionamento de dispositivos eletrônicos de potência. Permite prever o desempenho do sistema, avaliar diferentes cenários e reduzir custos. [12,13], sendo desejável a validação com dados reais. Diferentes abordagens podem ser aplicadas, conforme a complexidade e os objetivos da análise. As mais adotadas são os métodos analíticos e o método de Monte Carlo [14].

B. Modelagem de painéis fotovoltaicos

Os painéis fotovoltaicos são geralmente simulados por meio de modelos analíticos, que utilizam circuitos equivalentes para descrever seu comportamento. Embora não haja um consenso sobre a equação ideal para representar a curva I-V, a maioria dos estudos parte da teoria de Shockley da junção p-n iluminada, resultando em diferentes níveis de aproximação para o circuito equivalente da célula fotovoltaica [15,16].

Uma célula fotovoltaica ideal, exposta na Figura 1, pode ser modelada como uma fonte de corrente em paralelo com um diodo, baseada no efeito fotovoltaico. A exposição à luz gera pares elétron-buraco, e o campo elétrico interno da junção p-n separa essas cargas, produzindo uma corrente elétrica proporcional à irradiação incidente I_{pv} . Na ausência de luz, a célula se comporta como um diodo p-n convencional. Com esses princípios, deriva-se o modelo que descreve seu comportamento [17].

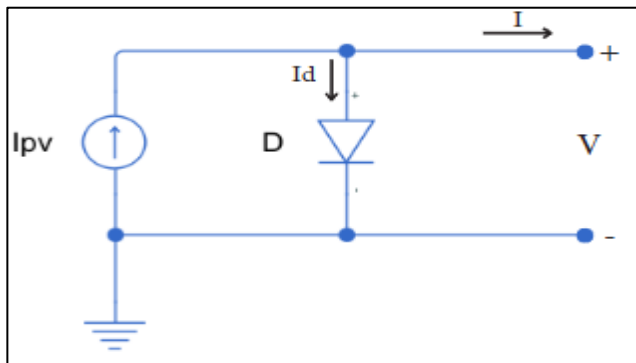


Fig. 1. Modelo ideal da célula fotovoltaica

A equação (1) descreve o sistema fotovoltaico, relacionando diversos parâmetros, como a corrente entregue à carga (I), a corrente gerada pela célula fotovoltaica (I_{pv}), a corrente do diodo (I_D), e a corrente de saturação do diodo (I_s). Além disso, considera o fator de idealidade do diodo (a), a constante de Boltzmann (k), a carga do elétron (q), a temperatura da junção P-N (T) e a tensão na célula (V).

$$I = I_{pv} - I_D = I_{pv} - I_s \left(e^{\frac{qV}{akT}} - 1 \right) \quad (1)$$

Esse modelo não é utilizado para simulação de painéis fotovoltaicos devido à incapacidade de simular perdas presentes nas células. Para contornar essa limitação, diversos autores propuseram melhorias que aumentam a precisão do modelo [16,18].

Modelos mais avançados incluem resistores, capacitores e diodos para capturar perdas e efeitos negligenciados. No

entanto, à medida que a complexidade cresce, a determinação dos parâmetros necessários se torna mais difícil. Os modelos mais utilizados equilibram precisão e simplicidade, destacando-se os modelos 1D2R (1 diodo e 2 resistores) e o modelo 1D2R1C (1 diodo, 2 resistores e 1 capacitor) [16].

O modelo 1D2R, mostrado na figura 2, melhora a acurácia do modelo adicionando dois resistores para simular as perdas causadas pelas resistências internas e as perdas associadas à defeitos de construção. Apesar da melhoria, o modelo possui baixa acurácia em baixas irradiancias e em tensões próximas a de circuito aberto. De acordo com Jordehi, 2016 ele é o modelo mais utilizado, já que produz um balanço entre complexidade e acurácia aceitável [18].

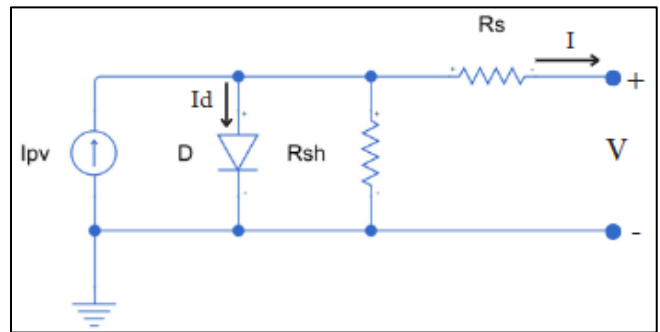


Fig. 2. Modelo 1D2R de uma célula fotovoltaica

Além disso, obtém-se (2), que descreve esse sistema.

$$I = I_{pv} - I_s \left(e^{\frac{q(V+R_s I)}{akT}} - 1 \right) - \frac{V+R_s I}{R_{sh}} \quad (2)$$

O modelo 1D2R, embora útil para regimes permanentes, não simula comportamentos transitórios, pois carece de componentes com dependência temporal. Para superar essa limitação, utiliza-se o modelo 1D2R1C, visto na figura 3, que adiciona um capacitor para representar o comportamento transitório [19]. O capacitor armazena e libera carga elétrica, permitindo simular variações dinâmicas de tensão e corrente. Assim, o modelo 1D2R1C captura melhor os efeitos transitórios, incluindo a capacitância parasita da junção p-n [16,19], conforme mostrado na Fig. 3.

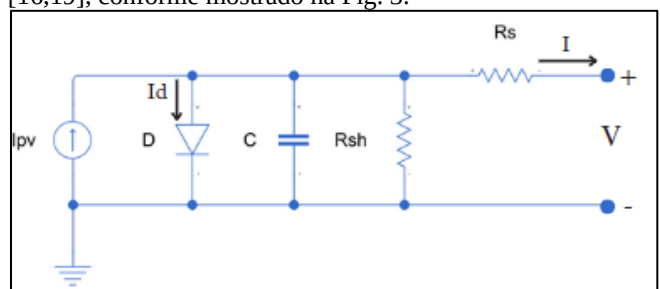


Fig. 3. Modelo 1D2R1C de uma célula fotovoltaica

A equação (3) descreve esse sistema mostrado na Fig. 3.

$$I = I_{pv} - I_s \left(e^{\frac{q(V+R_s I)}{akT}} - 1 \right) - \frac{V+R_s I}{R_{sh}} - C \frac{dV}{dt} \quad (3)$$

D. Modelagem de inversores

Os inversores são dispositivos essenciais para converter corrente contínua (CC) em corrente alternada (CA). Entre os tipos mais comuns estão os inversores de onda quadrada, meia ponte, ponte completa e os de modulação por largura de pulso

(PWM). Os inversores de onda quadrada são simples e econômicos, mas geram distorções significativas na saída. Já os inversores PWM produzem uma forma de onda senoidal de alta qualidade, com baixa distorção harmônica, similar à da rede elétrica [20–22]. Estes inversores PWM que utilizam duas ondas senoidais de referência são frequentemente usados em aplicações de baixa tensão, como sistemas fotovoltaicos, devido à sua alta eficiência na conversão de energia. A modulação PWM permite o controle preciso da amplitude e frequência da tensão de saída [20–22].

Nos inversores PWM, duas ondas senoidais defasadas são comparadas com uma onda portadora de alta frequência, geralmente triangular. A comparação gera os sinais de chaveamento dos semicondutores, determinando os períodos de condução de cada chave e a forma da tensão de saída. Porém, a modulação resulta em uma onda modulada com alta frequência, que contém componentes harmônicas indesejadas [20–23].

Para aproximar a saída de uma onda senoidal pura, utiliza-se um filtro passa-baixa RLC, composto por um indutor (L), um capacitor (C) e uma resistência (R). Esse filtro atenua as componentes de alta frequência, eliminando oscilações de chaveamento do inversor e reduzindo a distorção harmônica total (THD), garantindo uma onda puramente senoidal [21,22,24,25]. O Circuito equivalente para o inversor de modulação PWM monofásico é dado pela fig. 4:

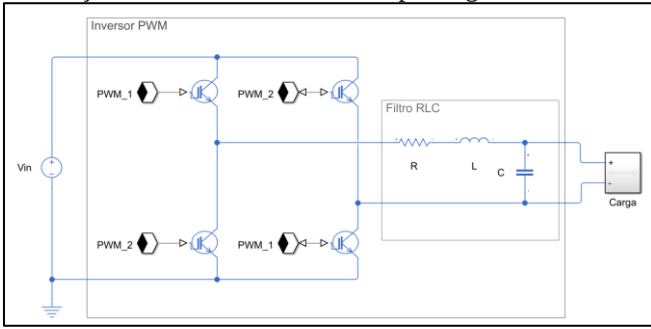


Fig. 4. Circuito equivalente do Inversor PWM monofásico

Matematicamente, a descrição da tensão de saída do inversor envolve a análise da interação entre a tensão modulada PWM e a resposta do filtro RLC. A entrada do filtro é a tensão PWM gerada pelo inversor, modelada por uma função de modulação que depende das ondas senoidais de referência. Aplicando as equações do circuito RLC e considerando a tensão de entrada como a tensão modulada do inversor, pode-se derivar a equação diferencial que descreve a dinâmica do sistema [26], conforme (4) e (5).

$$V_{in} = L \frac{di}{dt} + RI + \frac{1}{C} \int Idt \quad (4)$$

$$V_{in} = L \frac{d^2q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} \quad (5)$$

Sendo $m(t)$ o sinal PWM gerado pela comparação entre as ondas senoidais de referência e a onda triangular, pode-se substituir V_{in} por $V_{nom} * m(t)$ e reorganizar a equação para obter a equação diferencial final que se usa para achar a tensão de saída do inversor.

$$\frac{d^2q}{dt^2} = \frac{V_{nom} * m(t) - R \frac{dq}{dt} - \frac{q}{C}}{L} \quad (6)$$

Ao resolver (6), encontra-se os valores para q e através de (7) e (8), descobre-se a tensão e a corrente de saída do sistema.

$$V_{out} = V_c = \frac{q}{C} \quad (7)$$

$$I_{out} = \frac{dq}{dt} \quad (8)$$

E. Modelagem da carga

A modelagem de cargas elétricas é essencial para o planejamento e controle de sistemas de energia elétrica, sendo crucial para estudos de estabilidade de tensão e análise de desempenho das redes. A diversidade de dispositivos que compõem as cargas, além das dificuldades na coleta de dados precisos, torna a modelagem desafiadora. O objetivo é desenvolver modelos matemáticos simplificados que aproximem os comportamentos das cargas para análise eficiente dos sistemas. Existem três tipos principais de modelos de carga: estáticos, dinâmicos e mistos, cada um adequado conforme o tipo de carga e o nível de precisão desejado [27].

Os modelos estáticos são os mais simples e assumem que a carga tem um comportamento constante ou previsível em resposta às variações de tensão. Entre os modelos estáticos mais comuns estão o modelo ZIP, o modelo exponencial e o modelo dependente de frequência. O modelo ZIP é amplamente utilizado para representar cargas em baixa tensão [28]. O modelo exponencial e o modelo dependente de frequência usados frequentemente quando a carga apresenta comportamentos mais complexos que não seguem um comportamento linear simples [29,30].

Modelos dinâmicos são mais complexos e são utilizados para representar cargas com características que variam com o tempo. Exemplos típicos de modelos dinâmicos incluem o modelo de motor de indução e o modelo de recuperação exponencial [31]. O modelo de recuperação é especialmente útil para representar cargas que após um distúrbio, voltam para suas condições de operação iniciais.

Modelos mistos combinam características de modelos estáticos e dinâmicos, como o modelo ZIP+IM, que inclui o modelo ZIP com motor de indução, e o Modelo de Carga Complexa (CLOD), que engloba cargas resistivas e indutivas, além de elementos de impedância e saturação de transformadores [32]. O modelo WECC (*Western Electricity Coordinating Council*) é outro exemplo, combinando uma parte estática e dinâmica, sendo utilizado para capturar os efeitos de cargas dinâmicas em picos de demanda [33].

A modelagem precisa das cargas é essencial para prever o comportamento do sistema diante de variações de demanda, falhas ou transientes. Com a integração de tecnologias emergentes, como geradores distribuídos e veículos elétricos, a modelagem torna-se ainda mais importante para garantir a estabilidade e eficiência das redes elétricas [28,34].

F. Simulações multiagentes e sistemas elétricos

O método de simulação multiagente é uma abordagem que utiliza múltiplos agentes autônomos para modelar e resolver problemas complexos em sistemas dinâmicos. Cada agente é um modelo individual que toma decisões baseadas em suas percepções e regras de comportamento. Essa abordagem é útil para simular sistemas energéticos, onde as interações entre os

componentes são essenciais para entender o comportamento global do sistema [11,35].

No contexto de sistemas fotovoltaicos, a tecnologia de agentes pode ser utilizada para otimizar a geração e o consumo de energia de forma distribuída. Cada painel pode ser modelado como um agente que ajusta sua operação com base na radiação solar e no desempenho, enquanto inversores e unidades de armazenamento tomam decisões sobre balanceamento de carga e armazenamento de energia, possibilitando a simulação de cenários em tempo real e análise de estratégias de controle para maximizar a eficiência [9,10].

Apesar das vantagens, a modelagem multiagente exige um esforço significativo na definição das regras de interação e no controle da complexidade computacional. A escolha de técnicas adequadas de programação e modelagem é essencial para garantir a eficiência e escalabilidade das simulações [8,11,36].

III. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento da simulação, foi utilizada a linguagem Python, com o código estruturado de forma modular para integrar o modelo multiagente. No sistema fotovoltaico, cada equipamento foi modelado como um agente independente, incluindo o inversor, a carga, os arrays de painéis, os dados ambientais e eventos como falhas, perturbações e objetivos de execução.

Cada componente opera conforme suas configurações iniciais, mas sua atuação pode ser alterada com base nas informações recebidas de outros agentes e nas diretrizes definidas pela regra de negócio, que atua como sistema de supervisão, coordenando interações e enviando comandos específicos quando necessário. A relação entre os agentes é ilustrada no diagrama da Figura 5.

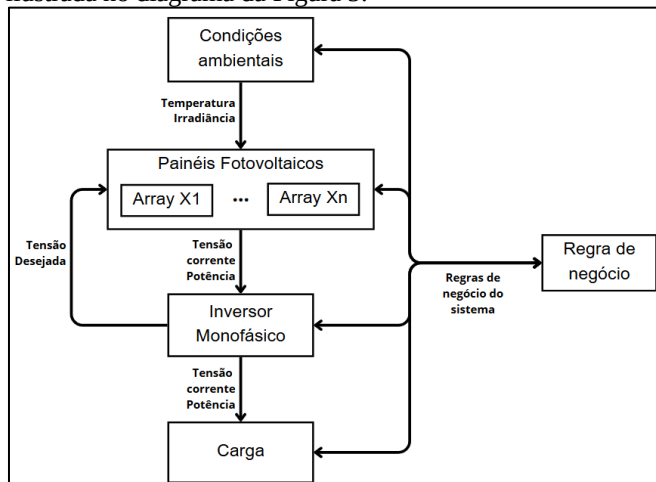


Fig. 5. Diagrama de troca de informações dos agentes da aplicação

A. Simulação das condições ambientais

A obtenção das informações meteorológicas é realizada por meio da API do serviço POWER, desenvolvido pelo Langley Research Center (LaRC) da NASA. Essa plataforma fornece dados ambientais e meteorológicos confiáveis para modelagem de sistemas de energia renovável, estudos climáticos e análise ambiental. Os dados são derivados de modelos climáticos globais e de coletas por estações meteorológicas, oferecendo cobertura espacial e temporal abrangente.

Para cada simulação, são definidos a localização geográfica (em coordenadas de latitude e longitude) e o período de interesse. A API retorna os dados conforme a

resolução temporal especificada, e, após a coleta, aplica-se um processo de tratamento e filtragem para assegurar a consistência das informações. Neste estudo, priorizou-se a análise de temperatura e irradiância solar, cujos valores foram agrupados por hora do dia, com cálculo das médias horárias no intervalo de 0 a 23 horas, gerando um perfil representativo das condições típicas da região.

A interpolação cúbica foi empregada com o objetivo de transformar os dados discretos em curvas contínuas, promovendo suavidade e continuidade nas derivadas, o que contribui para uma simulação mais estável do comportamento atmosférico ao longo do tempo. No entanto, reconhece-se que esse procedimento pode limitar a representação de variações meteorológicas locais ou eventos extremos, os quais não são capturados por médias horárias nem por dados derivados de reanálises globais.

Como forma de ampliar a representatividade do modelo, estão sendo implementados recursos que possibilitam ao usuário modificar diretamente as curvas meteorológicas geradas, permitindo a inserção de eventos extremos, como variações abruptas de irradiância e temperatura. Essa funcionalidade está sendo desenvolvida para oferecer tanto a edição manual dos pontos da curva, quanto a aplicação de perfis predefinidos de anomalias climáticas, como simulações de passagem de nuvens densas, ondas de calor ou frentes frias intensas e repentinas.

A incorporação desses recursos visa possibilitar a simulação de cenários climáticos atípicos, ampliando a diversidade de condições ambientais analisadas e permitindo uma avaliação mais abrangente do desempenho dos sistemas simulados. Com isso, busca-se aumentar a robustez do modelo diante de variações ambientais críticas, além de auxiliar no estudo da resiliência e confiabilidade de sistemas energéticos frente à instabilidade climática.

B. Modelagem e simulação do painel fotovoltaico

Para modelar o painel fotovoltaico, foi adotado o modelo 1D2R, que permite derivar as equações estáticas para descrever seu comportamento com precisão. No entanto, embora a estrutura matemática do modelo seja bem estabelecida, os parâmetros necessários para sua implementação prática — como a resistência série (R_s), a resistência paralela (R_{sh}), o fator de idealidade do diodo (n), a corrente de saturação (I_s) e a corrente fotogerada (I_{pv}) — não são fornecidos diretamente pelos fabricantes nos manuais técnicos ou datasheets [16,37]. Diversos estudos propõem algoritmos para essa estimativa, com variações em precisão e complexidade.

Diante dessa limitação, torna-se necessário utilizar métodos de estimação paramétrica para obter os valores adequados a partir das informações disponíveis no datasheet, como corrente de curto-circuito, tensão de circuito aberto, ponto de máxima potência, temperatura de operação, entre outros. A literatura apresenta diversos algoritmos destinados a essa tarefa, com diferentes níveis de precisão, robustez e complexidade computacional.

Neste trabalho, foi utilizado o algoritmo proposto por Orioli [37]. Esse método realiza o cálculo iterativo dos parâmetros elétricos com base em equações derivadas do modelo 1D2R. O algoritmo parte de condições padronizadas de teste (STC) e, a partir das informações típicas do datasheet, estima de forma confiável os valores de R_s , R_{sh} , n , I_{pv} e I_s . A lógica de funcionamento do algoritmo pode ser visualizada na Fig. 6.

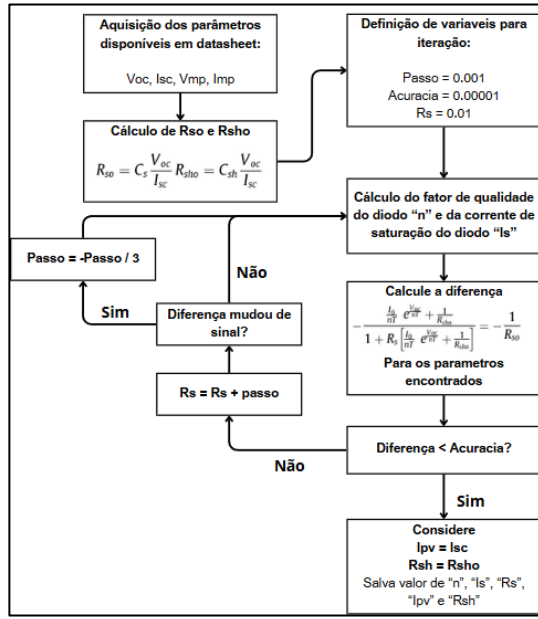


Fig. 6. Diagrama para cálculo de parâmetros do painel

Um aspecto relevante é que o algoritmo foi desenvolvido especificamente para painéis de silício monocristalino, policristalino e Sanyo HIT. Isso ocorre porque os cálculos dos parâmetros exigem a definição das constantes C_s e C_{sh} , cujos valores, no estudo original, foram estabelecidos apenas para esses tipos de construção [37].

Após a determinação dos parâmetros, é necessário ajustá-los para as condições de irradiância e temperatura, recalculando a corrente de curto-circuito, a corrente de saturação do diodo e a tensão de circuito aberto, conforme (9) a (13).

$$a_G = \frac{G_{Sim}}{G_{STC}} \quad (9)$$

$$a_T = T_{Sim} - T_{STC} \quad (10)$$

$$I_{sc_GT} = a_G(I_{sc} + \mu_{Isc} * a_T) \quad (11)$$

$$V_{oc_GT} = V_{oc} * (1 + C_1 * \text{Log}(a_G) + C_2 * \text{Log}^2(a_G) + C_3 * \text{Log}^3(a_G)) + \mu_{Voc} * a_T \quad (12)$$

Onde $C_1 = 5.468E^{-2}$, $C_2 = 5.974E^{-3}$ e $C_3 = 7.616E^{-4}$

$$I_{s_GT} = a_G \left(\frac{I_{sc_GT} - \left(\frac{V_{oc_GT}}{R_{sh}} \right)}{e^{\frac{V_{oc_GT}}{nT}} - 1} \right) \quad (13)$$

Com esses valores, aplica-se o método de Newton-Raphson para encontrar iterativamente a corrente de operação do painel para uma dada tensão. Esse cálculo utiliza (14), que corresponde à derivada da equação 2. Para obter a curva I-V do painel, constrói-se uma lista de tensões de 0 até V_{oc_GT} , e o método de Newton-Raphson é aplicado para determinar a corrente correspondente em cada ponto, considerando a temperatura e a irradiância do sistema.

$$f'(I) = -I_s \left(\frac{R_s}{nT} e^{\frac{(V+R_s*I)}{nT}} \right) - \frac{R_s}{R_{sh}} - 1 \quad (14)$$

C. Modelagem e simulação do inversor monofásico

A modelagem do inversor monofásico foi baseada nas equações discutidas na fundamentação teórica, utilizando um inversor com modulação PWM de onda senoidal pura, comum em aplicações fotovoltaicas.

Como o foco está nos parâmetros de saída e não na operação interna do circuito, a modelagem foi simplificada, considerando apenas o filtro passa-baixa RLC presente na saída do inversor. Esse filtro tem a função de atenuar harmônicas, garantindo uma tensão puramente senoidal na saída. A tensão PWM fornecida ao filtro é gerada comparando duas ondas de referência senoidais (Sgn_{sen1} e Sgn_{sen2}) com uma onda portadora triangular (Sgn_{tri}). O resultado dessa comparação é um sinal PWM que define a comutação dos IGBTs do inversor, gerando uma tensão de saída modulada. A média ponderada dessa tensão, multiplicada pelo valor da tensão de entrada, resulta na tensão nominal desejada. As equações (15) à (20) demonstram essas relações.

$$Onda_{tri} = A_{tri} * (1 - 2 * \left| \frac{t}{T_{sw}} - \left\lfloor \frac{t}{T_{sw}} + \frac{1}{2} \right\rfloor \right|) \quad (15)$$

$$Onda_{sen1} = \text{sen}(wt) \quad (16)$$

$$Onda_{sen2} = \text{sen}(wt + \pi) \quad (17)$$

$$Onda_{PWM1} = \frac{1}{2} * (1 + \text{sgn}(Onda_{sen1} - Onda_{tri})) \quad (18)$$

$$Onda_{PWM2} = \frac{1}{2} * (1 + \text{sgn}(Onda_{sen2} - Onda_{tri})) \quad (19)$$

$$V_{ac_PWM} = V_{dc}(Onda_{PWM1} - Onda_{PWM2}) \quad (20)$$

Nessas equações, sgn representa a função sinal, que retorna o sinal da expressão dentro de seus parênteses. Já a amplitude da onda triangular (A_{tri}) e a frequência de chaveamento (T_{sw}) são determinadas pelas relações de modulação de amplitude (M_a) e modulação de frequência (M_f), conforme (21) e (22).

$$A_{tri} = \frac{1}{M_a} = \frac{V_{entrada}}{V_{saída}} \quad (21)$$

$$T_{sw} = \frac{1}{M_f * f_{saída}} \quad (22)$$

Com a tensão PWM definida, a equação diferencial do filtro RLC é resolvida para obter a tensão de saída do inversor. Para calcular a corrente de saída, é necessário considerar a carga conectada, já que o sistema ajusta a corrente para fornecer a potência demandada, mantendo a tensão constante dentro dos limites dos equipamentos.

A equação diferencial é resolvida numericamente pelo método de Runge-Kutta de quarta e quinta ordem (RK45), que ajusta automaticamente o tamanho do passo de integração, garantindo precisão e eficiência. O método RK45 é utilizado para integrar a equação do filtro RLC com alta precisão, mantendo o erro relativo dentro da tolerância especificada, " τ_{tol} " que neste estudo foi definida como 10^{-10} para preservar a precisão da forma de onda da tensão de saída.

D. Modelagem e simulação da carga

A modelagem da carga elétrica foi feita utilizando o modelo ZIP, que combina três componentes: impedância (Z),

corrente (I) e potência constante (P). Esse modelo é útil para representar cargas em sistemas de energia elétrica, como em instalações fotovoltaicas e redes de distribuição. A carga ZIP é expressa por uma fórmula que relaciona a potência ativa e reativa consumida pela carga e a tensão aplicada. A potência ativa e reativa são modeladas conforme (23) e (24):

$$P = P_Z * V^2 + P_I * V + P_p \quad (23)$$

$$Q = Q_Z * V^2 + Q_I * V + Q_p \quad (24)$$

Onde:

- P é a potência ativa consumida pela carga;
- Q é a potência reativa consumida pela carga;
- V é a tensão aplicada à carga;
- P_Z , P_I e P_p são os coeficientes correspondentes à parte de impedância, corrente e potência constante, respectivamente;
- Q_Z , Q_I e Q_p são os coeficientes correspondentes à potência reativa para os componentes de impedância, corrente e potência constante, respectivamente.

As equações do modelo ZIP são úteis para simular o comportamento da carga. Para implementá-las em um inversor e analisar sua dinâmica, é necessário determinar a impedância equivalente do circuito. Com esses valores, é possível observar o comportamento transitório da corrente e potência demandada. A impedância equivalente é obtida pela relação entre a potência aparente e a impedância, sendo manipulada conforme (25), (26) e (27):

$$S = \frac{|V|^2}{Z^*} \quad (25)$$

$$P + jQ = \frac{|V|^2}{R - jX} \quad (26)$$

$$R - jX = \frac{|V|^2 * (P - jQ)}{P^2 + Q^2} = \frac{V^2 P}{P^2 + Q^2} - j \frac{V^2 Q}{P^2 + Q^2} \quad (27)$$

Por fim, obtém-se a seguinte relação para os componentes da impedância equivalente, conforme (28):

$$R_{eq} = \frac{V^2 P}{P^2 + Q^2} \quad X_{eq} = \frac{V^2 Q}{P^2 + Q^2} \quad (28)$$

Vale destacar que não é estritamente necessário resolver o modelo ZIP para determinar os valores de resistência e reatância equivalentes. Entretanto, ao combinar ambas as abordagens, a simulação se torna mais precisa e robusta.

IV. RESULTADOS E ESTUDO DE CASO

A metodologia proposta possibilita a análise do comportamento dinâmico do sistema ao longo do tempo, bem como sua representação gráfica. No entanto, foram identificadas dificuldades técnicas associadas à incompatibilidade entre os tempos de simulação dos modelos, à sobrecarga computacional, à instabilidade numérica e à necessidade de coordenação entre os subsistemas para garantir coerência física. Esses fatores impediram a conclusão e validação da integração completa dos dispositivos simulados.

Como estratégia para superar essas limitações, estão sendo aplicadas diferentes abordagens. Para mitigar a sobrecarga computacional e reduzir os tempos de simulação, estão sendo implementadas técnicas de simulação paralela e estratégias de co-simulação com acoplamento fraco ou semissincronizado, permitindo que cada subsistema seja simulado com sua própria escala temporal, mas mantendo trocas de informações em pontos-chave previamente definidos. Também está sendo realizada a reestruturação da comunicação dos modelos, com a definição de envio de dados padronizados em barramento comum, garantindo que as trocas de variáveis físicas entre subsistemas ocorram de forma sincronizada e fisicamente coerente. Diante desse cenário, os resultados apresentados neste trabalho referem-se exclusivamente aos comportamentos individuais dos equipamentos, cujas simulações demonstraram consistência em suas respectivas validações isoladas.

O estudo de caso modelou um sistema fotovoltaico em Goiânia, Goiás, Brasil, operando em janeiro de 2024. O sistema possui um inversor Fronius Primo 4.6-1 e 25 módulos Kyocera KC175GHT-2, totalizando 4,3 kW de potência instalada. As tabelas I e II apresentam os valores relevantes do inversor e dos painéis.

TABELA I - DADOS TABULARES DO PAINEL FOTOVOLTAICO SIMULADO

Kyocera KC175GHT-2							
Pmax (W)	Vmp (V)	Imp (A)	Voc (V)	Isc (A)	μVoc (V/°C)	μIsc (A/°C)	$\mu Pmax$ (%/°C)
175	23,6	7,57	29,35	8,07	-1,07E-1	2,22E-3	-0,49

TABELA II - DADOS TABULARES DO INVERSOR SIMULADO

Fronius Primo 4.6-1						
Entrada DC			Saída AC			
I _{max} (A)	V _r ange (V)	P _{max} (kW)	I _{max} (A)	V _{nom} (V)	P _{max} (kW)	THD
12	80 - 800	6,9	20	220	4,6	<5%
						F _p
						0,85 - 1

Os dados meteorológicos utilizados no estudo foram obtidos por meio da API do serviço POWER da NASA, considerando a localização geográfica de Goiânia e o mês de janeiro de 2024. Após a coleta, os dados brutos de irradiância solar e temperatura ambiente foram organizados por hora e tratados estatisticamente, resultando em valores médios horários que caracterizam o comportamento típico diário das variáveis climáticas da região.

Com o objetivo de gerar uma representação contínua e mais próxima das variações reais ao longo do tempo, foi aplicada a interpolação cúbica sobre os dados médios. Essa técnica foi escolhida por preservar a suavidade da curva e garantir a continuidade das derivadas, aspectos fundamentais para simulações dinâmicas mais estáveis e precisas.

A curva resultante, ilustrada na Figura 7, foi utilizada como entrada para o modelo computacional, permitindo a análise do desempenho do sistema fotovoltaico em condições ambientais realistas e continuamente variáveis ao longo do dia.

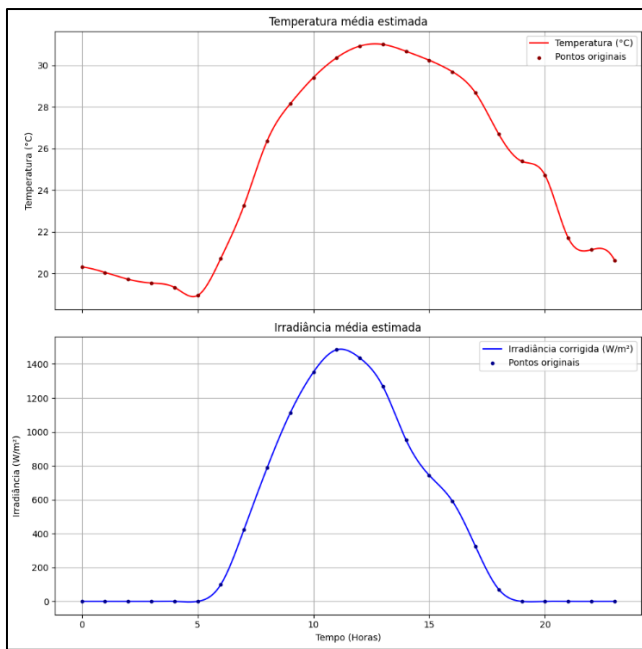


Fig. 7. Gráficos de temperatura e irradiância média para Goiânia-GO

Agora é possível modelar o painel fotovoltaico e obter as curvas I-V para diversas condições de irradiância e temperatura. A figura 8 apresenta estas curvas. Os valores dessas variáveis foram selecionados com base nas informações fornecidas no datasheet do painel, garantindo a validação das curvas resultantes.

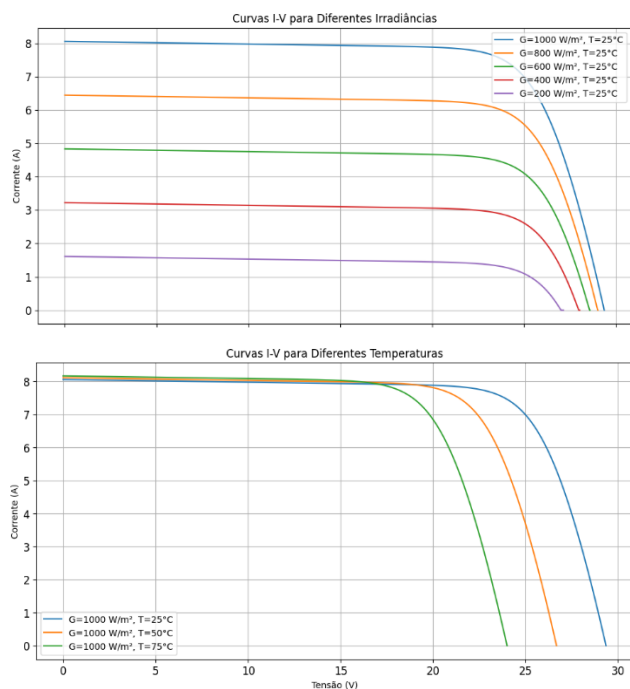


Fig. 8. Gráfico das curvas I-V do painel para diferentes parâmetros meteorológicos

Ao integrar a modelagem ambiental à simulação do painel fotovoltaico, torna-se possível representar graficamente a variação da potência gerada ao longo do tempo. Esse procedimento permite uma análise mais precisa do desempenho do sistema, mostrada na figura 9.

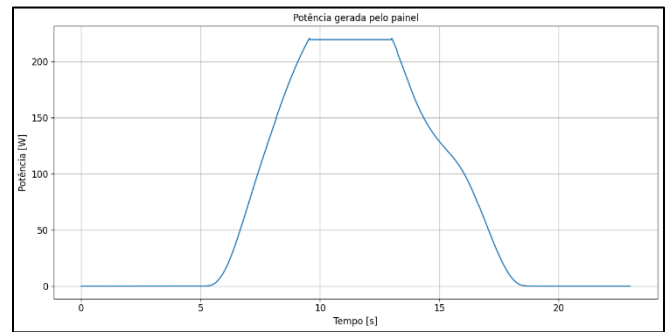


Fig. 9. Gráfico de potência gerada pelo painel ao longo do dia

Ao examinar a curva gerada, observa-se que, apesar do aumento da irradiância ao longo do dia, o painel atinge um estado de saturação quando a irradiância ultrapassa 1000 W/m^2 devido às limitações físicas e elétricas do dispositivo.

Ao analisar o modelo do inversor, é possível determinar seus valores de saída, mostrados na figura 10. Como a integração entre as simulações ainda não foi realizada, a entrada do inversor não corresponde à saída do painel fotovoltaico. Para a análise, considerou-se uma entrada de 420 Vdc.

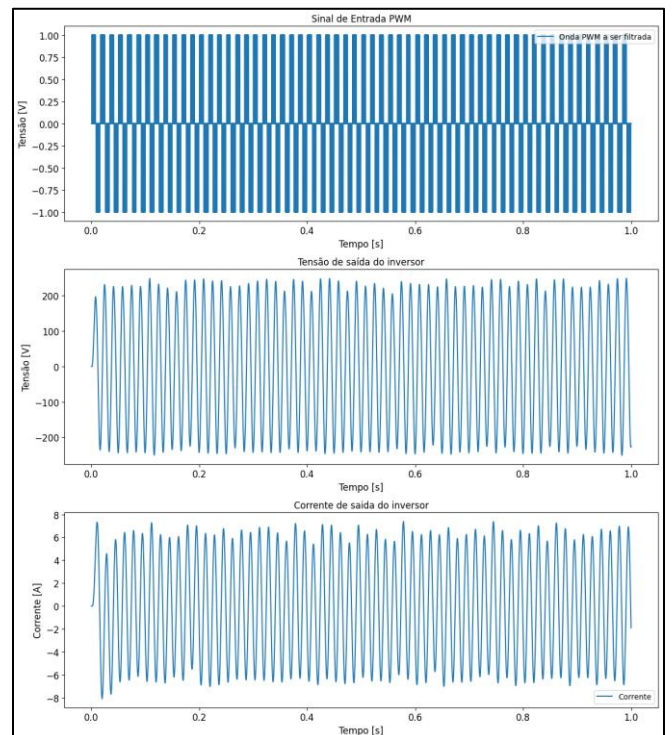


Fig. 10. Gráficos de saída para o inversor

V. CONCLUSÃO

A arquitetura proposta para a integração dos sistemas foi concebida para suportar algoritmos baseados em modelagem multiagente. Entretanto, a implementação completa da integração foi limitada por desafios técnicos, como incompatibilidades temporais entre modelos, sobrecarga computacional e a necessidade de garantir estabilidade numérica e coerência física nas interações. Estratégias para superar esses desafios estão sendo implementadas, e, até o momento, são apresentados os modelos individuais dos equipamentos.

Apesar dessa limitação, os modelos individuais foram desenvolvidos com base em dados fornecidos por fabricantes

específicos e apresentaram comportamento coerente nas simulações. No entanto, reconhece-se a necessidade de validações adicionais, especialmente em condições operacionais variadas. Como parte do desenvolvimento contínuo, estão sendo avaliadas metodologias complementares que permitam comparar os resultados simulados com dados experimentais obtidos em campo, a fim de reforçar a confiabilidade dos modelos em contextos reais.

Como continuidade deste estudo, sugere-se a aplicação de técnicas de redução de complexidade computacional, como uso de estratégias de co-simulação e métodos de discretização otimizados, com o objetivo de viabilizar a integração eficiente dos modelos simulados. Além disso, recomenda-se a expansão da plataforma para incluir a modelagem e simulação de outras fontes de geração de energia, como eólica, hidrelétrica e sistemas de armazenamento por hidrogênio ou baterias, possibilitando uma análise mais abrangente de sistemas híbridos e de sua viabilidade técnica, econômica e ambiental. Também se indica o desenvolvimento de interfaces que permitam a personalização de cenários pelos usuários e a realização de análises de sensibilidade, de modo a avaliar o impacto de diferentes condições operacionais e ambientais no desempenho global do sistema.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seu agradecimento ao Centro de Excelência em Hidrogênio e Tecnologias Sustentáveis (CEHTES) da Universidade Federal de Goiás e ao Instituto Federal de Goiás – IFG pelo apoio e supervisão ao longo do desenvolvimento deste projeto. Agradecemos também à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG) pelo financiamento da pesquisa por meio da concessão de bolsa, viabilizando a realização deste estudo.

REFERÊNCIAS

- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. 2024 Renewables 2023.
- Ministério de Minas e Energia. 2023 Relatório de Gestão MME 2023.
- Operador Nacional do Sistema Elétrico. 2024 Evolução da Capacidade instalada no SIN - Outubro 2024/ Dezembro 2028. See <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros> (accessed on 2 October 2024).
- EPE. 2024 Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional 2024.
- Bazmi AA, Zahedi G. 2011 Sustainable energy systems: Role of optimization modeling techniques in power generation and supply—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **15**, 3480–3500. (doi:10.1016/j.rser.2011.05.003)
- Javid I, Chauhan A, Thappa S, Verma SK, Anand Y, Sawhney A, Tyagi VV, Anand S. 2021 Futuristic decentralized clean energy networks in view of inclusive-economic growth and sustainable society. *J Clean Prod* **309**, 127304. (doi:10.1016/j.jclepro.2021.127304)
- Gross R, Leach M, Bauen A. 2003 Progress in renewable energy. *Environ Int* **29**, 105–122. (doi:10.1016/S0160-4120(02)00130-7)
- Gomez-gualdron J, Velez-Reyes M. 2006 Simulating a Multi-Agent based Self-Reconfigurable Electric Power Distribution System. In *2006 IEEE Workshops on Computers in Power Electronics*, pp. 1–7. IEEE. (doi:10.1109/COMPEL.2006.305644)
- Zhao T, Man Z, Bi G. 2008 The Research of Electric Load Control System Based on Multi-agent. In *2008 International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering*, pp. 482–486. IEEE. (doi:10.1109/ICACTE.2008.181)
- Nagata T, Okamoto K. 2014 Electric power interchange between micro-grids by using multi-agent approach. In *2014 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, pp. 50–55. IEEE. (doi:10.1109/CoASE.2014.6899303)
- Azeroual M, Lamhamdi T, El Moussaoui H, El Markhi H. 2020 Simulation tools for a smart grid and energy management for microgrid with wind power using multi-agent system. *Wind Engineering* **44**, 661–672. (doi:10.1177/0309524X19862755)
- Nasir FHM, Husaini Y. 2018 MATLAB Simulation of Photovoltaic and Photovoltaic/Thermal Systems Performance. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng* **341**, 012019. (doi:10.1088/1757-899X/341/1/012019)
- Yu T-C, Lin Y-B, Chang F-S. 2013 Establishment of the Photovoltaic Simulation System Using Mixed Programming with LabVIEW and Simulink. pp. 383–394. (doi:10.1007/978-1-4614-6747-2_46)
- A. Prokhorova, Yu. Borovikob, A. Guseva. 2012 Real Time Hybrid Simulation of Electrical Power Systems: Concept, Tools, Field Experience and Smart Grid Challenges. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*
- Mares O, Paulescu M, Badescu V. 2015 A simple but accurate procedure for solving the five-parameter model. *Energy Convers Manag* **105**, 139–148. (doi:10.1016/j.enconman.2015.07.046)
- Araújo NMFTS, Sousa FJP, Costa FB. 2020 EQUIVALENT MODELS FOR PHOTOVOLTAIC CELL-A REVIEW. *Science Engenharia Térmica (Thermal Engineering)*. **19**.
- Villalva MG, Gazoli JR, Filho ER. 2009 Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays. *IEEE Trans Power Electron* **24**, 1198–1208. (doi:10.1109/TPEL.2009.2013862)
- Jordehi AR. 2016 Parameter estimation of solar photovoltaic (PV) cells: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. **61**, 354–371. (doi:10.1016/j.rser.2016.03.049)
- Suskis P, Galkin I. 2013 Enhanced photovoltaic panel model for MATLAB-simulink environment considering solar cell junction capacitance. In *IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 1613–1618. IEEE. (doi:10.1109/IECON.2013.6699374)
- Albakri M, Darwish A, Twigg P. 2024 A Comprehensive Review of dc/ac Single-Phase Differential-Mode Inverters for Low-Power Applications. *Electronics (Basel)* **13**, 2474. (doi:10.3390/electronics13132474)
- Hart D. 2011 Inverters. In *Power Electronics*, McGraw-Hill.

22. MUHAMMAD H. 2001 Inverters. In *Power Electronics Handbook*, pp. 225–267. Academic Press.
23. Nekbil N, Guettaf Y, Boudiaf M, Nour M. 2024 Real-time of a two-level three-phase inverter controlled by PWM and full wave techniques. *STUDIES IN ENGINEERING AND EXACT SCIENCES* **5**, 1011–1027. (doi:10.54021/seesv5n1-053)
24. Sezen S, Ozdemir E, Özdemir E. 2013 Modeling, simulation and control of three-phase three level multilevel inverter for grid connected photovoltaic system. *Article in Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*.
25. Ravi A, Manoharan PS, Vijay Anand J. 2011 Modeling and simulation of three phase multilevel inverter for grid connected photovoltaic systems. *Solar Energy* **85**, 2811–2818. (doi:10.1016/j.solener.2011.08.020)
26. Pels A, Sabariego R V., Schöps S. 2019 Efficient simulation of DC-AC power converters using Multirate Partial Differential Equations. (doi:10.1002/jnm.2683)
27. Arif A, Wang Z, Wang J, Mather B, Bashualdo H, Zhao D. 2018 Load Modeling — A Review. *IEEE Trans Smart Grid* **9**, 5986–5999. (doi:10.1109/TSG.2017.2700436)
28. Bokhari A *et al.* 2014 Experimental Determination of the ZIP Coefficients for Modern Residential, Commercial, and Industrial Loads. *IEEE Transactions on Power Delivery* **29**, 1372–1381. (doi:10.1109/TPWRD.2013.2285096)
29. W.W. Price, C.W. Taylor, G.J. Rogers. 1995 Standard load models for power flow and dynamic performance simulation. *IEEE Transactions on Power Systems* **10**, 1302–1313. (doi:10.1109/59.466523)
30. Price WW, Wirgau KA, Murdoch A, Mitsche JV, Vaahedi E, El-Kady M. 1988 Load modeling for power flow and transient stability computer studies. *IEEE Transactions on Power Systems* **3**, 180–187. (doi:10.1109/59.43196)
31. Hill DJ. 1993 Nonlinear dynamic load models with recovery for voltage stability studies. *IEEE Transactions on Power Systems* **8**, 166–176. (doi:10.1109/59.221270)
32. 1993 Load representation for dynamic performance analysis (of power systems). *IEEE Transactions on Power Systems* **8**, 472–482. (doi:10.1109/59.260837)
33. Kosterev D, Meklin A, Undrill J, Lesieutre B, Price W, Chassin D, Bravo R, Yang S. 2008 Load modeling in power system studies: WECC progress update. In *2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, pp. 1–8. IEEE. (doi:10.1109/PES.2008.4596557)
34. Grandjean A, Adnot J, Binet G. 2012 A review and an analysis of the residential electric load curve models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **16**, 6539–6565. (doi:10.1016/j.rser.2012.08.013)
35. Ma Z, Schultz MJ, Christensen K, Værbak M, Demazeau Y, Jørgensen BN. 2019 The Application of Ontologies in Multi-Agent Systems in the Energy Sector: A Scoping Review. *Energies (Basel)* **12**, 3200. (doi:10.3390/en12163200)
36. Yuan H, Yuan H. 2006 Multi-agent Approach for Monitoring and Diagnosis Evaluation of Electric Apparatus Control System. In *2006 International Conference on Mechatronics and Automation*, pp. 815–819. IEEE. (doi:10.1109/ICMA.2006.257714)
37. Orioli A, Di Gangi A. 2013 A procedure to calculate the five-parameter model of crystalline silicon photovoltaic modules on the basis of the tabular performance data. *Appl Energy* **102**, 1160–1177. (doi:10.1016/j.apenergy.2012.06.036)