

**Evento:** XV Seminário de Inovação e Tecnologia ▾**ESTUDO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA EM AMBIENTE
DIDÁTICO DE SMART GRID: MODELAGEM DE CURVAS DE POTÊNCIA¹****Jean Schäffel Moreira², Paulo Sérgio Sausen³, Airam Teresa Zago Romcy Sausen⁴,
Leonardo Ojczenasz Schmidt⁵, Matheus Reis de Almeida⁶**¹ Projeto de pesquisa desenvolvido na Unijuí, no Grupo de Automação Industrial e Controle GAIC;² Bolsista; estudante do curso Ciência da Computação; Bolsista do programa de fomento: Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Tecnológica do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - PIBITI/CNPq³ Professor orientador⁴ Professora pesquisadora⁵ Bolsista do GAIC⁶ Doutorando do PPGMMC.**INTRODUÇÃO**

Nos últimos anos, o setor elétrico brasileiro tem passado por profundas transformações, impulsionadas por mudanças regulatórias, crescimento da demanda energética e avanços tecnológicos que favorecem a diversificação da matriz elétrica. Nesse contexto, destaca-se a expansão da geração distribuída (GD), especialmente a partir de fontes renováveis como a fotovoltaica, que representa um caminho viável e sustentável para descentralizar a produção de energia reduzindo os impactos ambientais da geração tradicional (ANEEL, 2024).

A GD proporciona benefícios ambientais, econômicos e operacionais, mas também impõe desafios à estabilidade, ao controle e ao planejamento do sistema elétrico. A inserção de múltiplos pontos de geração intermitente e geograficamente dispersos exige novas abordagens para monitoramento, modelagem e gestão da rede. Entre essas abordagens, a simulação computacional e os modelos matemáticos assumem papel central, permitindo prever o comportamento dos sistemas e otimizar sua operação (UFERSA, 2024).

Neste cenário, os ambientes didáticos de simulação ganham relevância como ferramentas para experimentação e validação de soluções aplicadas à GD. O uso de plataformas modulares, como o laboratório Smart Grid da empresa De Lorenzo (DE LORENZO, 2021), permite reproduzir em escala reduzida diferentes fontes de geração, possibilitando o estudo prático de estratégias de controle, armazenamento e injeção de energia na rede.

Paralelamente, o suporte computacional, por meio de linguagens como Python e Matlab, oferece recursos robustos para o desenvolvimento e validação de modelos matemáticos que representam curvas de potência em função de variáveis ambientais, como irradiância solar e temperatura. O presente trabalho apresenta os resultados de um estudo desenvolvido no

âmbito de um projeto de iniciação científica, cujo objetivo foi aplicar modelos matemáticos para a modelagem de curvas de potência de painéis fotovoltaicos a partir de dados reais obtidos em testes experimentais em ambiente didático. A proposta envolveu desde a montagem física de cenários de geração solar até a aquisição e análise de dados em diferentes condições meteorológicas. O trabalho está alinhado aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 da ONU, especialmente os ODS 7 (Energia limpa e acessível), ODS 9 (Indústria, inovação e infraestrutura) e ODS 13 (Ação contra a mudança global do clima), ao promover o uso de fontes renováveis, a inovação tecnológica e o aprendizado científico aplicado.

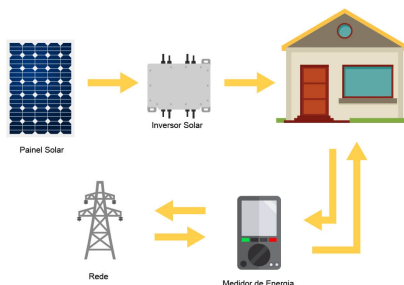
METODOLOGIA

A metodologia empregada neste estudo concentrou-se na modelagem, simulação e validação experimental de um sistema de geração fotovoltaica, em um cenário representativo de nanogrid. As atividades foram realizadas no Laboratório de Smart Grids da UNIJUÍ, que conta com infraestrutura didática da empresa De Lorenzo, a qual possibilita simulações físicas em pequena escala de sistemas elétricos.

O processo iniciou-se com o estudo conceitual do funcionamento de sistemas de geração distribuída fotovoltaica conectados à rede elétrica (on-grid). A estrutura básica desse tipo de sistema está representada na Figura 1, a qual ilustra o funcionamento de um arranjo típico composto por painel solar, inversor e medidor bidirecional. O painel converte radiação solar em corrente contínua, que é transformada em corrente alternada pelo inversor, possibilitando seu uso na residência ou laboratório, já o medidor registra o fluxo de energia consumida e injetada na rede elétrica.

Figura 1 - Sistema On Grid

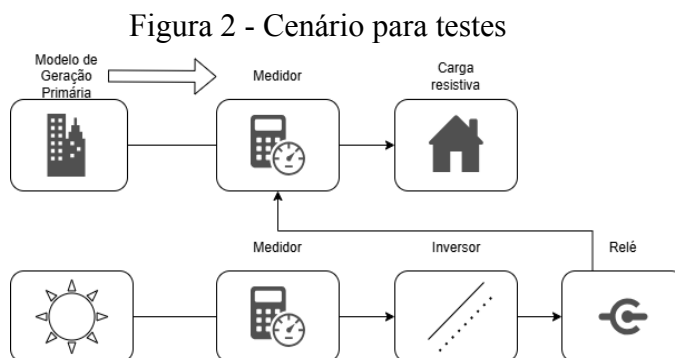
Sistema On Grid



Fonte: (NeoSolar, 2025).

Com base nesse entendimento, foi elaborado um cenário experimental utilizando a estrutura do laboratório. A montagem contemplou, além do painel fotovoltaico e do inversor, a inclusão de um segundo medidor e de um relé de manobra, permitindo o controle dinâmico do sistema

e a coleta de dados sob diferentes condições operacionais. A configuração do cenário experimental montado está ilustrada na Figura 2.



A execução dos ensaios contemplou a realização de testes em dois momentos distintos. No primeiro, com céu nublado, o sistema não operou devido à baixa irradiância. O segundo teste foi conduzido em um dia de céu limpo, com duração de 12 horas, utilizando dados de irradiância e temperatura fornecidos pela estação meteorológica do INMET (Cruz Alta - código A853). Durante esse período, foram registrados dados horários da potência gerada pelo painel, permitindo correlacionar as variáveis ambientais com o desempenho do sistema.

A análise dos dados foi complementada pela aplicação de um modelo computacional baseado na teoria do diodo único, conforme proposto por Villalva, Gazoli e Filho (2009). A implementação do modelo foi realizada em linguagem Python, utilizando a biblioteca NumPy, e aplicada sobre os registros experimentais para estimar a potência máxima teórica do sistema a cada hora do dia. O algoritmo empregado incorporou uma função recursiva para simular o comportamento do painel fotovoltaico com base nas condições ambientais observadas.

Para validar o modelo, os dados estimados foram comparados com os valores reais medidos na saída do painel, permitindo avaliar a consistência da modelagem matemática em relação à operação prática do sistema. A estrutura laboratorial da De Lorenzo foi essencial para a condução dos testes, uma vez que seus módulos interligáveis abrangem fontes de geração, proteção, medição e cargas simuladas, possibilitando a experimentação em condições seguras e controladas. A integração dessas ferramentas físicas com os modelos computacionais proporcionou um ambiente de experimentação representativo de uma nanogrid, favorecendo o desenvolvimento de habilidades em instrumentação, simulação e análise de dados aplicados.

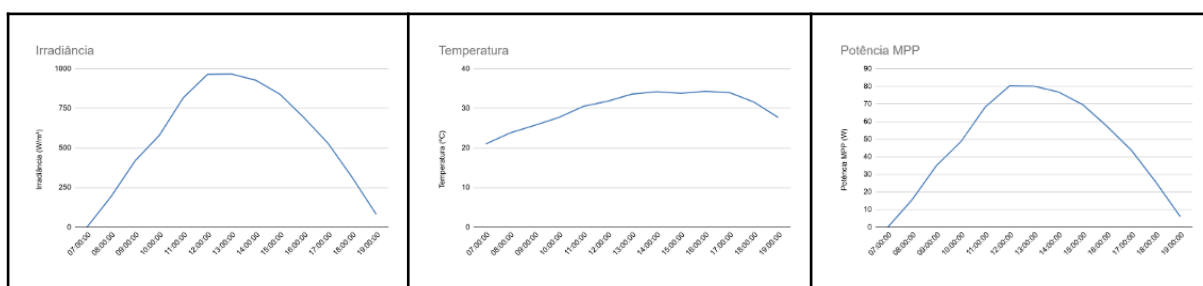
RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da montagem do cenário experimental, foram realizados dois ensaios com o objetivo de avaliar o desempenho de um sistema fotovoltaico sob diferentes condições de irradiação solar. No primeiro teste, executado em um dia de céu nublado, o painel fotovoltaico — instalado com orientação ao Norte e inclinação de 28° , não gerou energia elétrica devido à irradiância insuficiente, impedindo o acionamento do inversor.



No segundo experimento, realizado em 7 de março de 2025, em condições ideais de sol, foi conduzida uma medição ao longo de 12 horas consecutivas. As variáveis ambientais (temperatura e irradiância) foram obtidas junto à estação meteorológica do INMET em Cruz Alta (A853), e os dados horários de potência elétrica gerada foram organizados no Quadro 1. A evolução dos parâmetros durante o ensaio pode ser visualizada na Figura 3, que ilustram, respectivamente, a irradiância solar, a temperatura ambiente e a potência efetivamente gerada pelo painel.

Figura 3 - Resultados das medições.



Com o objetivo de estimar a potência máxima teórica do sistema, foi aplicado o modelo matemático do diodo único (Villalva, Gazoli e Filho, 2009), implementado em Python com auxílio da biblioteca NumPy. A função desenvolvida processou os dados climáticos coletados e simulou a resposta do painel fotovoltaico a cada instante de tempo. Os resultados estão representados no Gráfico 4, e mostram boa concordância com a curva de irradiância observada (Figura 3), confirmando a validade do modelo em relação ao comportamento esperado do sistema.

Quadro 1 - Resultados do teste final

Data	Hora GMT-3	Temperatura (°C)	Irradiância (W/m²)	Resultados REAIS (W)
07/03/2025	07:00:00	21	0	0
07/03/2025	08:00:00	23,8	192,807098	0
07/03/2025	09:00:00	25,7	419,225576	29
07/03/2025	10:00:00	27,7	579,615748	44
07/03/2025	11:00:00	30,5	817,78432	47
07/03/2025	12:00:00	31,8	965,035498	48
07/03/2025	13:00:00	33,6	966,6744	45
07/03/2025	14:00:00	34,2	927,424086	42
07/03/2025	15:00:00	33,8	839,284492	40
07/03/2025	16:00:00	34,3	691,283308	36
07/03/2025	17:00:00	34	529,004232	19
07/03/2025	18:00:00	31,6	314,196958	3
07/03/2025	19:00:00	27,7	80,13953	0



Apesar da coerência geral entre os dados simulados e reais, foram identificadas pequenas discrepâncias que podem ser atribuídas à distância entre o local do experimento (Ijuí) e a estação meteorológica de referência (Cruz Alta), bem como à ausência de parâmetros precisos do painel utilizados na modelagem, como resistência série e fator de forma. Essas limitações impactaram diretamente na acurácia da estimativa de potência, mas não comprometem a relevância dos resultados obtidos, que validam o potencial da abordagem adotada para estudos futuros em geração distribuída fotovoltaica integrada a nanogrids.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A realização das atividades previstas neste projeto de iniciação científica permitiu aplicar conhecimentos teóricos em um ambiente experimental, integrando conceitos de energias renováveis, modelagem matemática e análise computacional. A experiência com a plataforma Smart Grid da De Lorenzo, aliada ao uso de dados meteorológicos reais e simulações em Python, resultou na montagem de um sistema fotovoltaico experimental, na execução de testes em diferentes condições climáticas e na implementação de modelos baseados na literatura especializada, como o modelo de diodo único. O suporte do GAIC, a infraestrutura laboratorial e a orientação técnica foram fundamentais para a evolução do trabalho e indicam caminhos promissores para o aprofundamento da pesquisa.

Palavras-chave: Smart Grid. Modelagem Matemática. Simulação Computacional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Micro e minigeração distribuída apresenta acréscimo de 7,4 GW em 2023. Brasília: ANEEL, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2024/micro-e-minigeracao-distribuida-apresenta-acrescimento-de-7-4-gw-em-2023>. Acesso em: 25 jul. 2025.

DE LORENZO. Catálogo técnico: laboratório modular de Smart Grid – DL Smart Grid Trainer. Milano: De Lorenzo S.p.A., 2021. Material institucional.

GITHUB. Modelo de um diodo: simulação da curva de potência segundo Villalva, Gazoli e Filho (2009). Disponível em: https://github.com/dealmeida94/modelo_de_um_diodo/blob/main/villalva_gazoli_filho_2009.ipynb. Acesso em: 25 jul. 2025.

UFERSA – UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO. Desafios e oportunidades para a expansão da geração distribuída no setor elétrico brasileiro. Mossoró, 2024. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/server/api/core/bitstreams/8dc0f2f5-9fd0-4713-9c6f-21b369728ca6/content>. Acesso em: 25 jul. 2025.

VILLALVA, Marcelo Gradella; GAZOLI, José Renato; FILHO, Ernesto Ruppert. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays. IEEE Transactions on Power Electronics, v. 24, n. 5, p. 1198–1208, 2009.