

Estratégias de Mitigação dos Impactos na Tensão Decorrentes da Integração da Geração Distribuída Solar Fotovoltaica

Guilherme Broslavski

*Energ/USP (Centro de Estudos em Regulação e Qualidade de Energia)
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
guibroslavski@usp.br*

Paulo Radatz

*EPRI (Electric Power Research Institute)
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
paulo.radatz@gmail.com*

Carlos Frederico Meschini Almeida

*Dept. de Engenharia e Automação Elétricas
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
cfmalmeida@usp.br*

Resumo: O crescente consumo de energia elétrica e a busca por alternativas sustentáveis têm impulsionado a adoção de Geração Distribuída (GD), especialmente a partir de fontes renováveis. Este estudo avalia o impacto da inserção de uma GD solar fotovoltaica de 3.000 kW em uma rede de distribuição, analisando a qualidade da energia e as medidas de mitigação necessárias, como reguladores de tensão e controles presentes em inversores de frequência. O uso de simulações no OpenDSS revelou desafios técnicos, como a sobretensão, exigindo soluções específicas para diferentes cenários. A análise identificou que o uso das diversas soluções de controles do inversor e a otimização do local de instalação do regulador de tensão são eficazes na mitigação dos impactos. Assim, a integração de GDs requer modernização da infraestrutura e estratégias bem planejadas para garantir estabilidade, eficiência e conformidade regulatória no setor elétrico.

Palavras-chave: Geração Distribuída, Hosting Capacity, Sistemas de Potência, OpenDSS.

I. INTRODUÇÃO

O Crescimento constante da demanda por energia elétrica exige avanços no planejamento e no projeto de sistemas elétricos de potência em todo o mundo. Para atender a essa necessidade, investimentos em novas fontes de geração e na viabilização econômica de Redes Elétricas Distribuídas (REDs) que têm ganhado destaque, especialmente com a adoção de fontes renováveis. No entanto, restrições ambientais e o custo elevado de grandes usinas e linhas de transmissão impulsionam a busca por alternativas mais sustentáveis e descentralizadas, como a geração distribuída (GD), além de melhorias nos sistemas de comunicação para otimizar o monitoramento da rede elétrica.

Historicamente, o consumo de energia elétrica aumentou com o avanço das revoluções industriais, desde o uso de máquinas a vapor até a disseminação de eletrodomésticos e veículos elétricos. Hoje, a descentralização do sistema elétrico com a GD traz vantagens significativas, como a redução da distância entre geração e consumo, menores perdas elétricas e custos, além da possibilidade de consumidores produzirem

sua própria energia. Isso marca a transição de um modelo centralizado para um sistema mais dinâmico e resiliente, ampliando a diversificação das fontes renováveis e limpas.

Apesar dos benefícios, a expansão da GD impõe desafios técnicos e regulatórios. É necessária a adequação da infraestrutura elétrica para lidar com fluxos de potência variáveis, a modernização dos sistemas de proteção e o aprimoramento das normas que regulamentam a integração da GD à rede. Além disso, a atualização das metodologias de planejamento para expansão da geração, transmissão e distribuição de energia elétrica é essencial para garantir a eficiência e a segurança do sistema em um cenário energético cada vez mais descentralizado e sustentável.

II. OBJETIVO

O objetivo deste estudo é avaliar o impacto de um pedido de conexão para uma geração de energia solar fotovoltaica em um determinado ponto da rede de distribuição de energia elétrica, identificando os impactos gerados na qualidade de energia elétrica, principalmente por sobretensão e meios de mitigação que podem ser adotados para que ocorra a implementação da GD proposta, demonstrando a viabilidade técnica dessas possíveis soluções de mitigação, respeitando o ponto de Hosting Capacity. Para realizar este estudo utilizamos o *Open Distribution System Simulator* (OpenDSS), desenvolvido pelo *Electric Power Research Institute* (EPRI), para realizar simulações com o objetivo de avaliar o impacto da penetração da geração distribuída em um alimentador.

III. PROGRAMA OPENDSS E LINGUAGEM PYTHON

O *software* OpenDSS é uma ferramenta de simulação no domínio da frequência, amplamente utilizada para modelagem de sistemas de distribuição de energia elétrica. Sendo de código aberto e de uso geral, o OpenDSS oferece funcionalidades avançadas para análises de planejamento de redes elétricas e avaliação da qualidade da energia elétrica (QEE). Ele é capaz de realizar simulações de fluxo de potência em tempo sequencial e permite modelar linhas e

transformadores em diversas configurações, atendendo às necessidades específicas de diferentes estudos [1].

A linguagem de programação *Python*, por sua vez, é reconhecida por ser de alto nível, interpretada e de propósito geral, destacando-se por sua simplicidade e legibilidade. Sua sintaxe clara facilita tanto a escrita quanto a compreensão do código, tornando-a ideal para iniciantes e profissionais. *Python* é altamente versátil, sendo aplicada em áreas diversas como desenvolvimento web, automação, ciência de dados e aprendizado de máquina, consolidando-se como uma ferramenta poderosa para múltiplas finalidades [2].

IV. PANORAMA GERAL DA MICRO E MINIGERAÇÃO DISTRIBUÍDA (MMGD)

A Micro e Mini Geração Distribuída (GD) referem-se a sistemas de geração de energia elétrica que são instalados e operados próximos ao local de consumo, permitindo que a energia seja produzida de forma descentralizada. Esses sistemas se destacam por serem fontes renováveis de energia, com foco em eficiência e sustentabilidade.

Como definição Microgeração Distribuída se refere a sistemas de geração de energia com potência instalada de até 75 kW (quilowatts). Em geral, são voltados para residências ou pequenas empresas e podem gerar energia a partir de fontes renováveis, como solar fotovoltaica, eólica ou biomassa. Para a Minigeração Distribuída a potência instalada neste caso é maior, variando de 75 kW a 3 MW (megawatts). Esses sistemas são usados por empresas de maior porte, indústrias ou até municípios, e também têm como foco fontes renováveis.

Entre as mais variadas fontes renováveis de energia comumente utilizadas como geração distribuída estão:

- Solar Fotovoltaica
- Eólica
- Biomassa
- Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs)

A geração distribuída oferece diversas vantagens, sendo a principal o uso de fontes renováveis de energia, o que contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa. A redução de custos para o consumidor, que pode diminuir ou até eliminar a conta de energia elétrica, especialmente em sistemas solares fotovoltaicos, devido à compensação da energia gerada. Empresas e residências podem se tornar autossuficientes, ou seja, mais independentes das distribuidoras de energia elétrica, aumentando a segurança do fornecimento de energia. Menor perda de energia, pois, como a energia é gerada próxima ao ponto de consumo, há uma redução nas perdas de transmissão e distribuição de energia. Além disso, há o estímulo à economia Local, no qual pequenas e médias empresas podem se beneficiar da geração distribuída, com impacto positivo nas economias locais.

Mas, também expõem desafios, como o custo inicial de implantação, que embora os custos de instalação de sistemas fotovoltaicos, por exemplo, tenham caído significativamente nos últimos anos, ainda existe um investimento inicial considerável, o que pode ser um obstáculo para pequenos consumidores. Não podemos nos esquecer da manutenção e o do monitoramento, para que tenhamos uma operação eficiente desses sistemas, isso exige monitoramento contínuo e manutenção periódica, embora os sistemas como os fotovoltaicos tenham uma vida útil longa e exijam relativamente pouca manutenção. Já a integração desses novos sistemas com a rede, vem se demonstrando como o maior desafio para as

distribuidoras de energia. A interação com a rede elétrica, especialmente em áreas com grande adoção de GD, pode exigir ajustes tecnológicos, como a instalação de sistemas de controle para garantir a estabilidade do fornecimento de energia.

Com a inserção da geração distribuída surgiu a necessidade de criar regulamentações e incentivos, bem como um sistema de compensação de energia (SCEE), também conhecido como *net metering*. O SCEE é um modelo no qual a energia ativa gerada por uma unidade consumidora com micro ou minigeração distribuída é enviada para a rede da distribuidora local, de forma gratuita e temporária. Essa energia injetada é depois compensada na fatura de energia elétrica do consumidor ou registrada como crédito de energia, podendo ser utilizada pela própria unidade consumidora que está gerando essa energia ou por outras unidades da mesma área da distribuidora de energia. Este sistema é aplicável exclusivamente para unidades consumidoras que estão no mercado cativo de energia.

É importante comentar brevemente como decorreu o desenvolvimento do SCEE. O SCEE começou em 2012 com a Resolução Normativa nº 482, que estabelecia as condições gerais para o sistema de compensação de energia elétrica, permitindo que consumidores que produzem sua própria energia possam devolver o excedente à rede e compensar o valor na fatura de energia. Em 2015, a Resolução Normativa nº 687 alterou e ampliou as regras para a geração distribuída, promovendo melhorias na implantação de sistemas de geração distribuída no Brasil. Em 2017, a Resolução Normativa nº 786 estabelece as diretrizes e regras para a remuneração do uso da infraestrutura das distribuidoras de energia para os sistemas de geração distribuída, em que as usinas outorgadas não podem entrar no SCEE. Em 2018, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) iniciou o processo de revisão da Resolução Normativa nº 482. Em 2019, o Projeto de Lei nº 5.829 foi elaborado com o objetivo de fomentar a criação de um Marco Legal para a GD, promovendo a modernização e o aprimoramento da regulamentação sobre a geração distribuída de energia no Brasil. Entre as principais propostas estão a expansão do modelo de compensação de energia, o ajuste nas regras de acesso às redes de distribuição e a criação de mecanismos para fomentar o uso de fontes renováveis, como a energia solar, eólica e biomassa. Além disso, o PL 5.829 buscou proporcionar maior previsibilidade e segurança jurídica para os consumidores e investidores do setor, estimulando o aumento da participação de sistemas de geração distribuída, ao mesmo tempo que visou equilibrar a remuneração das distribuidoras de energia e a aplicação das tarifas. Sancionado em janeiro de 2022 o Marco Legal da geração distribuída que finalmente foi estabelecido no Brasil, por meio da Lei nº 14.300. O que trouxe inovações importantes para a regulamentação do setor e garantindo um novo modelo de negócios para os consumidores, que podem gerar sua própria energia de forma descentralizada, com geração de créditos de energia que podem ser utilizados em até 60 meses o que oferece maior flexibilidade aos consumidores. Essa legislação trata das regras e dos direitos dos consumidores que optam por investir em sistemas de geração de energia renovável (como solar, eólica e biomassa) em pequena escala, com o objetivo de reduzir custos, melhorar a eficiência energética e contribuir para a sustentabilidade ambiental. No mesmo ano, em dezem-

bro de 2022, a Resolução Homologatória nº 3.169 definiu os diferentes percentuais de redução das tarifas de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD) e Uso do Sistema de Transmissão (TUST), dependendo do tipo de sistema de geração distribuída. Esses sistemas são classificados em três grupos: GD I (para sistemas com até 100 kW de potência instalada), GD II (para sistemas com potência entre 100 kW e 1 MW) e GD III (para sistemas com potência superior a 1 MW). Em fevereiro de 2023, a Resolução Normativa nº 1059 regulamentou a Lei nº 14.300, alterando a Resolução Normativa nº 1000 de 2021, que havia revogado a Resolução Normativa nº 482, para adequá-la às diretrizes estabelecidas pelo Marco Legal da geração distribuída.

Nos últimos anos, houve um crescimento significativo da geração distribuída no Brasil, especialmente com sistemas fotovoltaicos. Isso foi impulsionado por incentivos regulatórios, redução de custos de tecnologias, e maior conscientização sobre as questões ambientais. De acordo com a ABGD (Associação Brasileira de Geração Distribuída), milhares de novos projetos estão sendo instalados anualmente, e o setor continua a expandir, com perspectivas de crescimento futuro no país [3].

Apenas para nos conscientizar a geração distribuída contribuiu com aproximadamente 26,627 GW de energia elétrica, até o ano de 2023, segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), conforme mostra a Fig.1.

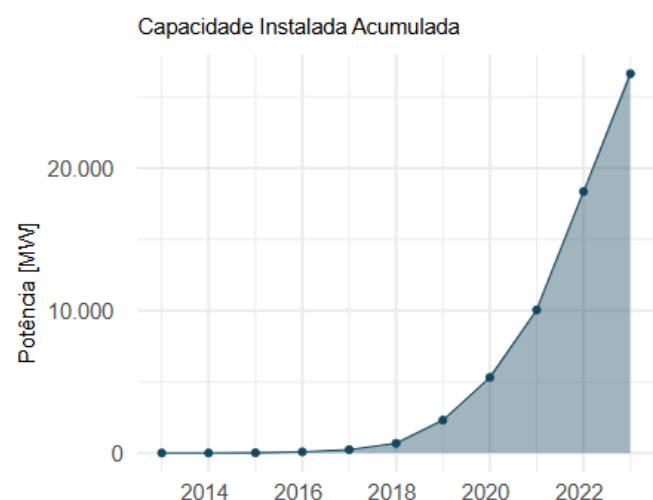


Figura 1. Capacidade instalada de GD no Brasil [4].

Sendo que a geração distribuída em sua imensa maioria é composta por sistemas fotovoltaicos, que cresceram muito em quantidade de instalações conectadas à rede de distribuição de energia elétrica nos últimos anos. Só em 2023 foram instalados aproximadamente 786,5 mil sistemas fotovoltaicos, e atualmente, janeiro de 2025, temos 3,15 milhões de MMGDs operando no Brasil, segundo dados da ANEEL e exposto graficamente pelo EPE na Fig. 2 [5].

V. PEDIDO DE CONEXÃO E MITIGAÇÃO DOS IMPACTOS

Para a mitigação dos impactos causados pela inserção de novas GDs utilizaremos as possíveis funções de controle presentes nos inversores de frequência e o regulador de tensão. Tais inversores possuem diferentes tipos de controle, cada um com funcionalidades específicas para melhorar o desempenho e a estabilidade do sistema elétrico em que estão inseridos. A seguir, vamos abordar brevemente os principais tipos de controle do inversor.

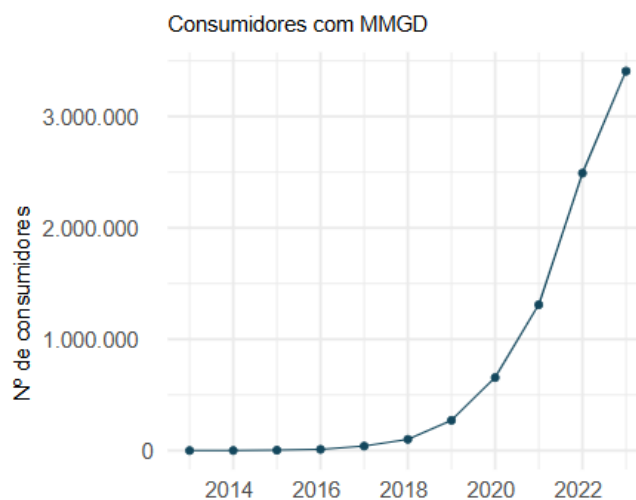


Figura 2. MMGD no cenário brasileiro [4].

O tipo de controle por fator de potência constante ajusta o funcionamento do inversor para manter, como já diz o nome, um fator de potência constante, geralmente próximo à 0,95 *pu*. Essa estratégia é empregada para minimizar a sobretenção no sistema elétrico e melhorar a eficiência, ajustando a relação entre potência ativa e reativa. O fator de potência constante é útil em cenários onde o gerenciamento da potência reativa é simples e previsível.

O controle mais conhecido e bastante abordado por diversas bibliografias é o controle volt-var. Esse controle é projetado para gerenciar a injeção ou absorção de potência reativa pelo inversor com base nos níveis de tensão no ponto de conexão. Quando a tensão está acima ou abaixo de certos limites, o inversor ajusta a potência reativa para estabilizar a tensão na rede. Essa funcionalidade é amplamente utilizada para melhorar a qualidade de energia e reduzir variações indesejadas de tensão em sistemas elétricos.

O controle volt-watt quando programado no inversor ajusta a potência ativa injetada na rede em função dos níveis de tensão. Quando a tensão no ponto de conexão excede um limite predefinido, o inversor reduz gradualmente a injeção de potência ativa para evitar sobrecarga na rede. Esse método é especialmente útil em sistemas com alta penetração de geração distribuída, onde a injeção excessiva de energia pode elevar a tensão para níveis indesejados. Mas, como a compensação de energia é baseada na potência ativa injetada na rede, logo, este controle é o mais prejudicial em termos econômicos para quem busca lucrar com a venda da energia excedente.

O próximo tipo de controle se trata do uso combinado entre o controle volt-var e o controle volt-watt. Essa abordagem combina as estratégias de controle volt-var e volt-watt para gerenciar simultaneamente a potência ativa e reativa do inversor. O objetivo é estabilizar a tensão na rede enquanto se mantém um equilíbrio adequado entre potência ativa e reativa. Essa combinação permite uma resposta mais abrangente e eficiente às variações de tensão, sendo particularmente útil em redes elétricas com alta complexidade e múltiplos geradores distribuídos.

Esses controles são fundamentais para melhorar a operação da infraestrutura das redes de energia elétrica no cenário atual, ajudando a manter a qualidade de energia, a estabilidade da rede e a eficiência no uso de recursos elétricos.

Além das funções de controle do inversor, analisaremos

também o regulador de tensão, que é um dispositivo elétrico utilizado para estabilizar e manter os níveis de tensão dentro de uma faixa específica em sistemas de distribuição de energia elétrica. Ele opera ajustando automaticamente a tensão de saída, compensando variações causadas por flutuações na carga ou na rede elétrica. Esse equipamento é essencial para garantir a qualidade do fornecimento de energia, proteger equipamentos sensíveis e otimizar a eficiência do sistema elétrico, sendo amplamente utilizado em redes de distribuição, subestações e aplicações industriais.

Para este estudo nós vamos abordar um pedido de conexão de uma GD, especificamente um sistema de energia solar fotovoltaico de 3.000 kW estrategicamente alocado. Nós utilizamos o alimentador *ckt5* disponível no *software* OpenDSS, e em ambas as condições do alimentador, em horário de pico e fora de pico. Na Fig. 3, vemos a topologia do alimentador e, em vermelho, o local de instalação pretendido pelo pedido de conexão da GD solar fotovoltaica, no qual realizaremos as análises de mitigação do impacto causado.

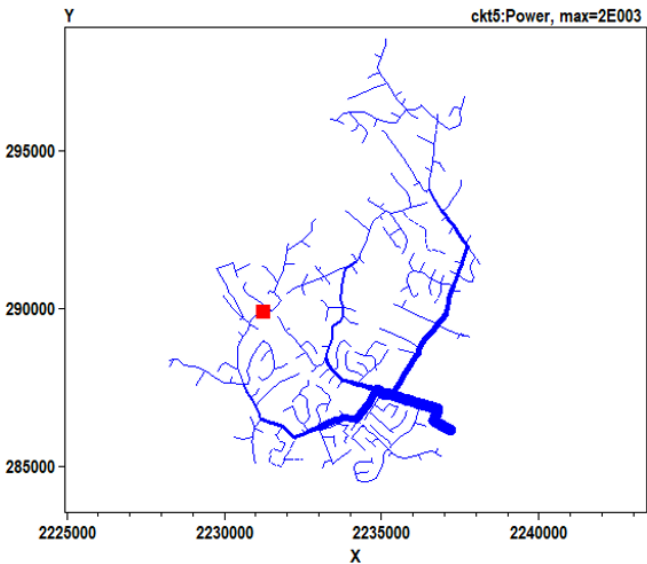


Figura 3. Local do pedido de conexão da GD solar fotovoltaica.

Para entendermos qual é o ponto de *Hosting Capacity* daquele ponto do alimentador, avaliamos as métricas de sobretensão e sobrecarga, para a pior condição durante o dia, ou seja, quando a demanda da carga é mínima e a geração de energia solar é máxima. Obtivemos os seguintes resultados na tabela I:

Tabela I
ANÁLISE DO PONTO DE HOSTING CAPACITY.

Métrica	Potência (kW)
Sobretensão	2300
Sobrecarga	5000

Portanto, podemos perceber que a inserção de uma GD de 3.000 kW naquele ponto do alimentador irá ocasionar uma sobretensão acima dos valores estabelecidos pelo módulo 8 do PRODIST [6], já que para a métrica de sobretensão analisada apenas permitiria até a potência de 2300 kW sem afetar a rede de energia elétrica da distribuidora.

Inserindo o gerador solar fotovoltaico pretendido teremos o seguinte perfil de tensão, na Fig. 4, e os pontos em que os níveis de tensão adequados foram extrapolados, na Fig. 5.

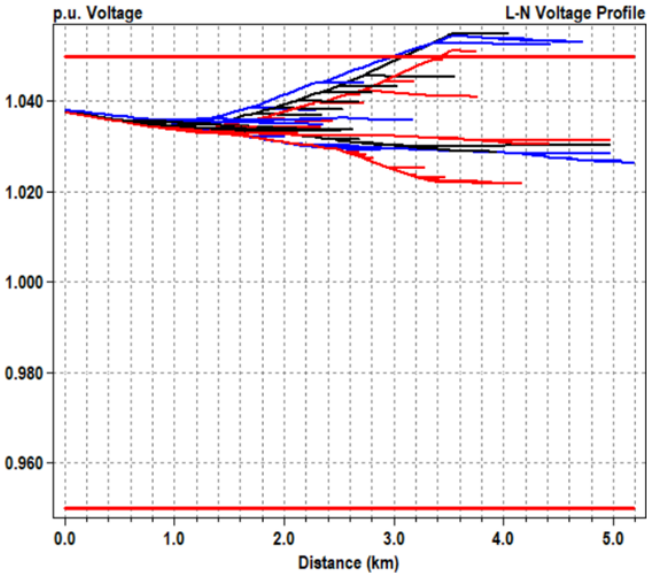


Figura 4. Impacto na tensão causada pela GD.

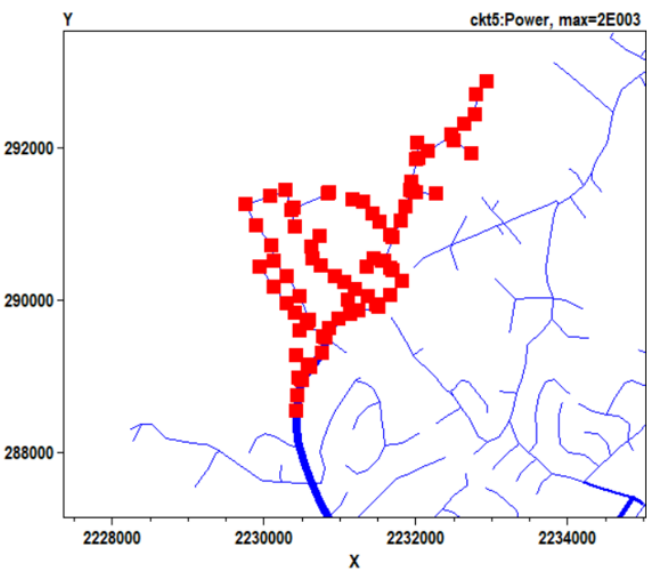


Figura 5. Barras na qual ocorreram as sobretensões

Sendo assim, começamos a avaliar os diferentes meios de mitigação dos efeitos para a sobretensão propostos, o regulador de tensão e os diversos tipos de controle do inversor de frequência, descritos acima. Primeiramente, inserimos na simulação um regulador de tensão no início do alimentador, na condição do horário fora de pico, e obtivemos o seguinte perfil de tensão Fig. 6. Para o horário fora de pico a situação de tensão foi normalizada, mas quando simulamos para o horário de pico, obtivemos o seguinte resultado Fig. 7, o que demonstra que está solução não seria ideal, pois causaria subtensão em determinadas locais do alimentador.

Alterando o local de instalação do regulador para um ponto do alimentador mais próximo da GD solar fotovoltaica, e avaliando para os horários de pico, conforme a Fig. 8, e fora de pico, Fig. 9, podemos perceber que agora essa solução mitigou adequadamente a sobretensão causada pela GD.

Na sequência nós simulamos os diferentes tipos de controle presentes no inversor de frequência, e podemos analisar pelos perfis de tensão obtidos e demonstrados a seguir, que conseguimos mitigar a sobretensão para todos os tipos de

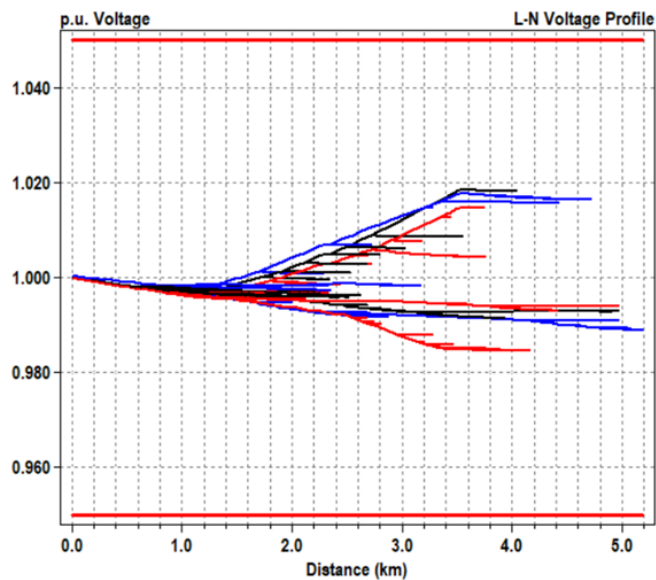


Figura 6. Efeito do regulador no início do alimentador em horário fora de pico

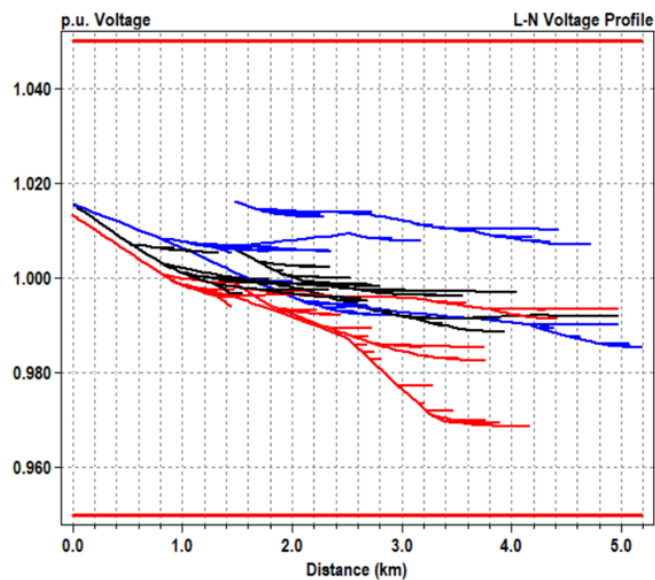


Figura 9. Efeito do regulador em local mais próximo da GD em horário de pico

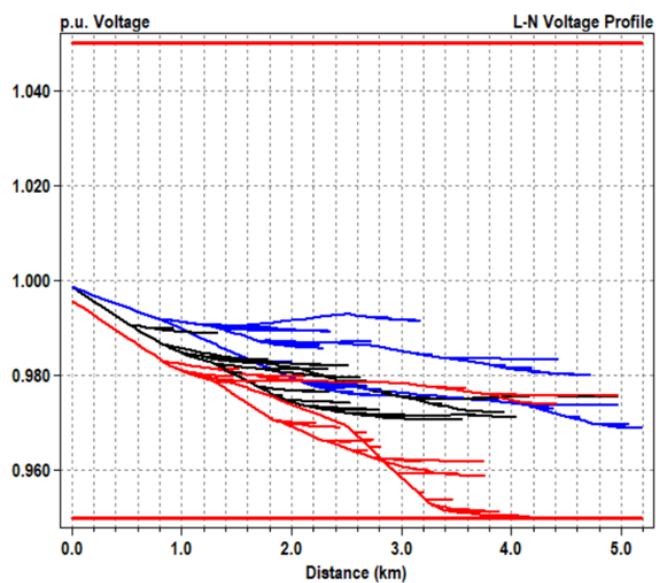


Figura 7. Efeito do regulador no início do alimentador em horário de pico

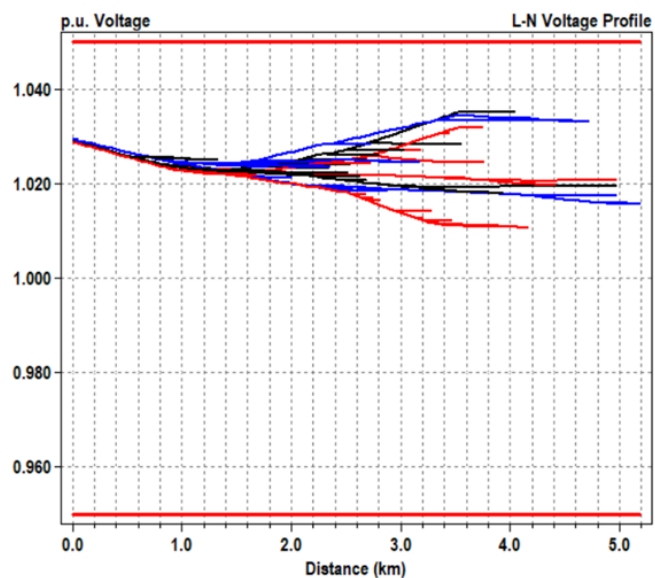


Figura 10. Efeito do controle do fator de potência constante

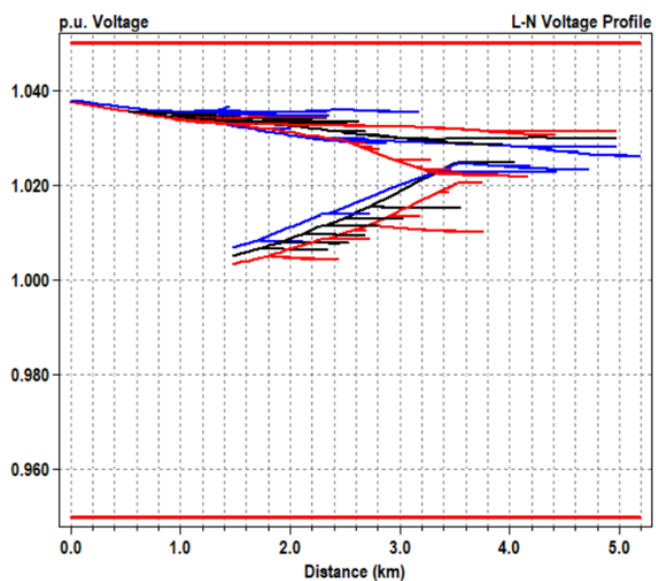


Figura 8. Efeito do regulador em local mais próximo da GD em horário fora de pico

VI. CONCLUSÃO

O estudo demonstra que a inserção de GDs, como sistemas solares fotovoltaicos, oferece benefícios significativos, incluindo redução de perdas na transmissão e maior independência energética. No entanto, também apresenta desafios técnicos que precisam ser enfrentados para preservar a qualidade e a estabilidade do fornecimento de energia. As análises realizadas indicam que as soluções de controle presentes em inversores e a otimização do local de instalação de reguladores de tensão, desempenham papéis fundamentais na mitigação de sobretensões e na adequação da infraestrutura elétrica.

A modernização dos sistemas de proteção e a escolha estratégica do ponto de instalação dos equipamentos são essenciais para garantir eficiência e segurança na operação da rede. Além disso, o uso dos diferentes tipos de controles do inversor e a instalação do regulador de tensão demonstrou ser uma estratégia eficaz para atender às demandas de redes mais complexas e com alta penetração de GD, para mitigar os impactos causados na tensão. A abordagem integrada permite uma resposta mais abrangente às variações de tensão e melhora a resiliência do sistema.

Por fim, a expansão da GD no Brasil exige investimentos contínuos em tecnologias e regulamentações que incentivem a integração segura e sustentável dessas fontes de energia. A legislação recente, como o Marco Legal da GD, representa um avanço significativo ao promover previsibilidade e segurança para consumidores e investidores. À medida que a GD continua a crescer, será fundamental alinhar inovação técnica e política regulatória para atender às necessidades de um sistema elétrico moderno e descentralizado.

VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. C. Dugan and T. E. McDermott, "An open source platform for collaborating on smart grid research," in *2011 IEEE power and energy society general meeting*. IEEE, 2011, pp. 1–7.
- [2] N. N. C. Menezes, *Introdução à Programação com Python: Algoritmos e lógica de programação para iniciantes*. Editora Novatec, 2024.
- [3] "Crescimento da energia renovável no brasil: The smarter e south america 2024," ABGD, Ed., 2024. [Online]. Available: <https://www.abgd.com.br/portal/crescimento-da-energia-renovavel-no-brasil-the-smarter-e-south-america-2024/>
- [4] "Painel de dados de micro e minigeração distribuída," MME/EPE, Ed., 2025. [Online]. Available: <https://dashboard.epe.gov.br/apps/pdgd/>
- [5] "Dashboard para geração distribuída," ANEEL, Ed., 2025. [Online]. Available: <https://app.powerbi.com/view?>
- [6] "Regras e procedimentos de distribuição (prodist)," ANEEL, Ed., 2023. [Online]. Available: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/procedimentosregulatorios/prodist>

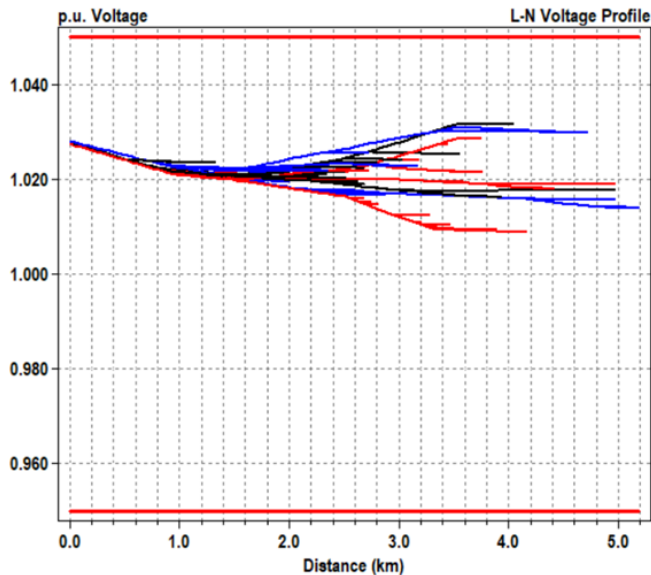


Figura 11. Efeito do controle volt-var

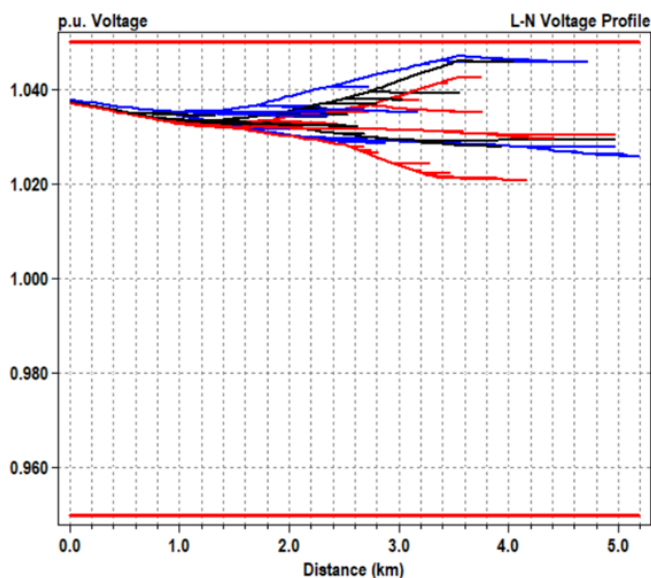


Figura 12. Efeito do controle volt-watt

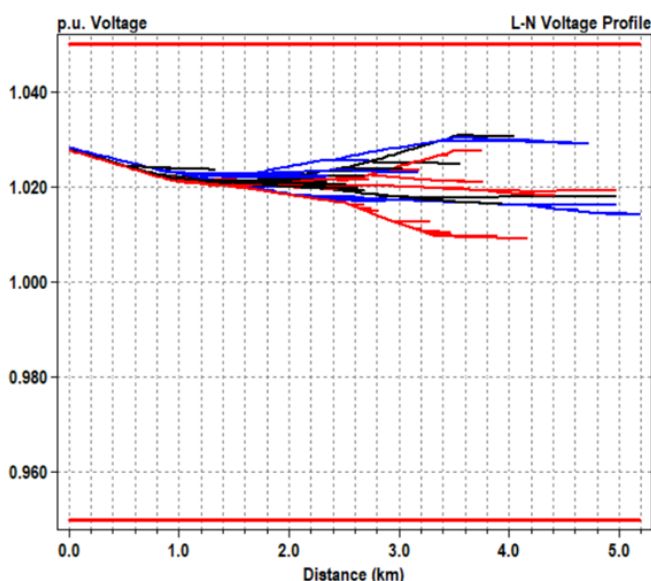


Figura 13. Efeito do controle volt-var combinado com volt-watt