

Cálculo da Capacidade de Hospedagem de Microgeração Fotovoltaica em Redes de Distribuição de Energia Elétrica

Palavras-Chave: Capacidade de Hospedagem, Geração distribuída, Geração fotovoltaica.

Autores(as):

Gustavo Elias da Silva, FEEC – UNICAMP

Dr. Ricardo Torquato Borges (orientador(a)), FEEC – UNICAMP

INTRODUÇÃO:

O número de conexões de geradores distribuídos fotovoltaicos em redes de distribuição secundárias (baixa tensão) tem crescido exponencialmente nos últimos anos no Brasil, sendo que a capacidade total instalada de mini e microgeração nas redes de distribuição brasileiras superou 20 GW em 2023. Apesar dos diversos benefícios desta geração renovável, sua conexão massiva nas redes de distribuição pode causar impactos adversos na operação e níveis de qualidade de energia do circuito. Por exemplo, a conexão massiva pode causar elevação da tensão e eventual violação da tensão máxima permitida na rede, elevação dos níveis de desequilíbrio de tensão (em redes secundárias) e sobrecarga de condutores do circuito. Portanto, surge a necessidade de determinar o limite de conexão de microgeração, que não provoca violação desses limites técnicos. Este limite é chamado capacidade de hospedagem, a qual é a razão entre a potência máxima de geração que pode ser injetada em uma rede e a potência do transformador de distribuição. Neste contexto, este projeto de iniciação científica busca desenvolver metodologias para calcular esta capacidade de hospedagem, tanto utilizando simulações computacionais na ferramenta *OpenDSS* [1] (amplamente utilizada no setor elétrico nacional), quanto utilizando cálculos analíticos simplificados que são mais rápidos e não demandam simulação computacional.

METODOLOGIA:

As análises e metodologias utilizadas neste projeto de iniciação científica foram desenvolvidas de acordo com a seguinte abordagem sistemática:

Inicialmente, a capacidade de hospedagem de uma rede secundária com microgeração distribuída foi estimada através de simulações computacionais intensivas. Nestas simulações foram realizados estudos para identificar as condições em que ocorre a violação de alguma condição de operação da rede (sobretensão, sobrecargas nos condutores e desequilíbrio de tensão entre as fases), e quais os parâmetros do circuito que afetam a capacidade de hospedagem. Foram avaliadas diferentes condições operativas da rede, além de diferentes localizações dos microgeradores distribuídos.

Os limites operativos das redes foram definidos conforme os limites regulatórios estabelecidos pelo PRODIST [2]:

- Todas as barras da rede secundária devem operar com uma tensão igual ou inferior a 1,05 pu;
- Todas as linhas da rede devem operar com uma corrente igual ou abaixo do limite térmico (ampacidade) dos seus respectivos condutores;
- O desequilíbrio entre as tensões de fase nas barras do circuito, calculado como a razão entre a tensão de sequência negativa e a tensão de sequência positiva, deve ser igual ou inferior a 3%.

Para acelerar a aplicação do método, não foram simulados todos os casos possíveis. O número de casos simulados foi escolhido como um percentual da quantidade de casos possíveis na combinação do número e localização de geradores em cada situação. Tal ajuste foi materializado com o método de Monte Carlo, visando um número mínimo de simulações para se obter um resultado confiável.

Em cada estudo, foram obtidos os valores da capacidade de hospedagem total média (a partir da média da soma da potência de todos os geradores em cada simulação), capacidade de hospedagem individual média (a partir da média da potência individual gerada por cada gerador em cada simulação), capacidade de hospedagem total com nível de confiança de 90% (correspondente a potência máxima inferior a 90% dos resultados obtidos em cada simulação) e capacidade de hospedagem individual com nível de confiança de 90%.

Posteriormente, foi desenvolvida uma metodologia analítica simplificada para estimação da capacidade de hospedagem de uma rede secundária. Esta metodologia foi desenvolvida através de cálculos simplificados e análise de resultados obtidos nas simulações computacionais, considerando os parâmetros da rede. Esta metodologia é de grande interesse de distribuidoras de energia elétrica, pois permite acelerar o tempo necessário para análise de solicitações de acesso de microgeração.

As metodologias de estimação e capacidade de hospedagem foram validadas de forma intensiva e extensiva, comparando-se a capacidade de hospedagem obtida via simulações computacionais com a estimativa obtida pelo método analítico simplificado. A ferramenta de simulação que foi empregada nos estudos é a versão do OpenDSS disponibilizada de forma gratuita por meio da organização *DSS Extensions* [3], a qual é amplamente empregada pelas empresas do setor no país.

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Desta forma, foram realizadas simulações em 32 redes secundárias reais, escolhendo aleatoriamente, as barras com conexão de geradores, sendo escolhida a quantidade de geradores conforme o percentual de geradores na rede pré-definido na simulação. Durante cada simulação, foram verificados os limites técnicos para a operação dos sistemas descritos anteriormente. Assim, pode-se obter a relação entre a capacidade de hospedagem do circuito e o percentual de geradores conectados.

Embora as redes reais analisadas possuam características diversas, como quantidade de cargas, comprimento de linha, tipo de condutores entre outras, as curvas obtidas para as capacidades de hospedagem são, em geral, bem definidas. Enquanto o resultado total com nível de confiança apresenta um comportamento aproximadamente linear, os resultados e individual com nível de confiança e médios são aproximadamente logarítmicos. Tais comportamentos são crescentes, em relação à quantidade de geradores, nas curvas de capacidade total, porém são decrescentes para as curvas de capacidade individual.

Devido ao comportamento definido dos gráficos apresentados, os mesmos puderam ser aproximados por curvas logarítmicas ou lineares obtidas a partir dos resultados das simulações. As Figura 1 e Figura 2 apresentam as aproximações logarítmicas obtidas e as curvas da capacidade de hospedagem total média e individual média por nível de penetração de geradores distribuídos respectivamente, para uma das redes testadas. As Figura 3 e Figura 4 apresentam as aproximações obtidas para as curvas da capacidade de hospedagem total média (linear) e individual com nível de confiança de 90% (logarítmica) e as curvas obtidas através do estudo probabilístico por nível de penetração, para a mesma rede real estudada. As equações de aproximação obtidas estão dispostas nos gráficos.

Além das curvas de capacidade de hospedagem, outro resultado analisado foi a frequência da violação de cada uma das condições limite durante todo o estudo, apresentado na Figura 5. Foi observado que a violação da tensão máxima de operação é a infração mais frequente na rede, sendo predominante principalmente entre os níveis de penetração mais elevados.

Como a sobretensão foi a condição mais crítica para a determinação da capacidade de hospedagem, foi desenvolvido um método analítico simplificado a fim de estimar a potência máxima que pode ser

injetada por um gerador fotovoltaico com fator de potência unitário, sem violar os limites de tensão na barra de conexão. Para tal desenvolvimento, foram consideradas redes trifásicas inicialmente equilibradas, além da aproximação da matriz de impedâncias da rede pela matriz de impedâncias de curto-circuito da barra. Tal matriz é obtida através da simulação da rede no *software OpenDSS [1]*, no modo *faultstudy*.

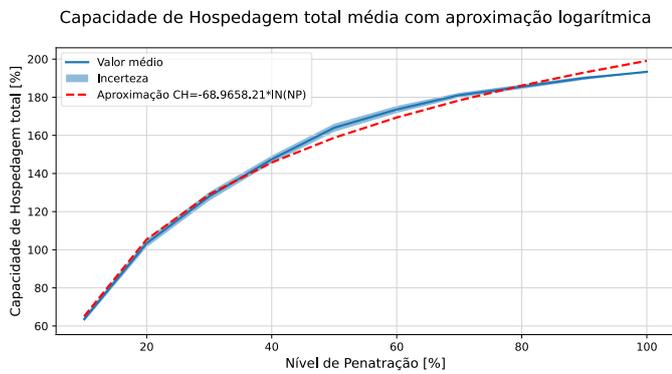


Figura 1 - Curva da capacidade de hospedagem total média de uma rede real com aproximação logarítmica

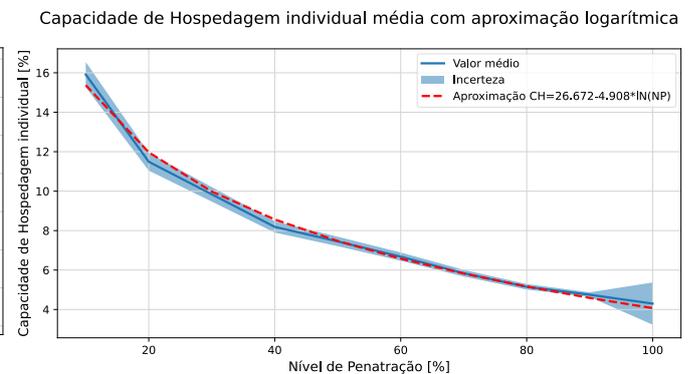


Figura 2 - Curva a capacidade de hospedagem individual média de uma rede real com aproximação logarítmica

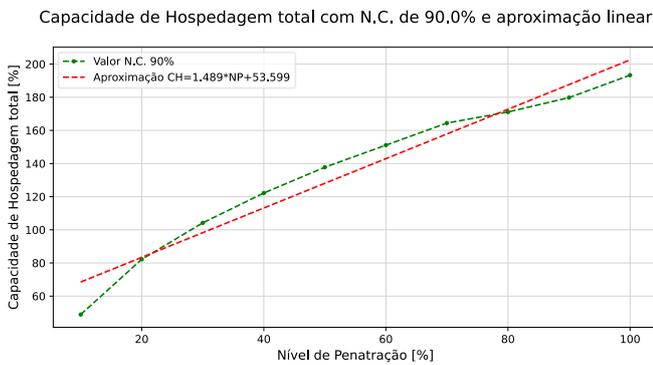


Figura 3 - Curva da capacidade de hospedagem total com nível de confiança de 90% de uma rede real com aproximação linear

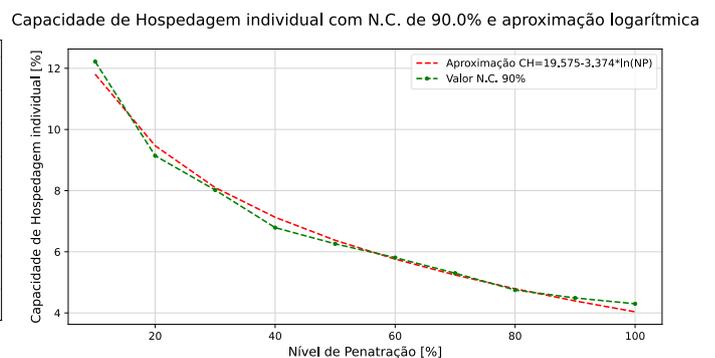


Figura 4 - Curva a capacidade de hospedagem individual com nível de confiança de 90% de uma rede real com aproximação logarítmica

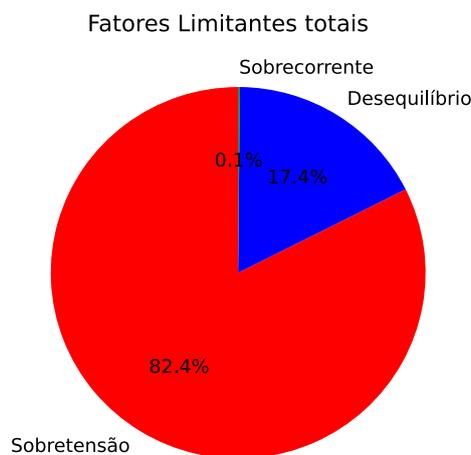


Figura 5 - Número de violações de cada condição limite em toda a simulação

As Equação 1 e Equação 2 apresentam a potência máxima que um gerador trifásico e monofásico, respectivamente, podem injetar em uma barra trifásica de uma rede de baixa tensão.

$$\begin{bmatrix} P_a \\ P_b \\ P_c \end{bmatrix}_{GD \text{ máx}} = \left(Z_{sc}^{-1} \cdot \left(\begin{bmatrix} 1,05 \angle -30^\circ \\ 1,05 \angle -150^\circ \\ 1,05 \angle 90^\circ \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}_{base} \right) \right)^* \cdot \begin{bmatrix} 1,05 \angle -30^\circ \\ 1,05 \angle -150^\circ \\ 1,05 \angle 90^\circ \end{bmatrix} \cdot S_{base} \quad \text{Equação 1}$$

$$\begin{bmatrix} P_{ab} \\ P_{bc} \\ P_{ca} \end{bmatrix}_{GD \text{ máx}} = \left(Z_{sc}^{-1} \cdot \left(\begin{bmatrix} 1,05 \angle -30^\circ \\ 1,05 \angle -150^\circ \\ 1,05 \angle 90^\circ \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}_{base} \right) \right)^* \cdot \begin{bmatrix} 1,05 \angle -30^\circ \\ 1,05 \angle -150^\circ \\ 1,05 \angle 90^\circ \end{bmatrix} \cdot \frac{\sqrt{3} \angle 30^\circ}{3} S_{base} \quad \text{Equação 2}$$

Para a validação dos métodos desenvolvidos, foram analisadas 1413 redes reais de baixa tensão, contendo ao todo mais de 25 mil barras trifásicas. Aplicando os métodos nas redes citadas e analisando o desvio relativo, conforme calculado na Equação 3, foram obtidos os histogramas das Figura 6 e Figura 7.

$$\text{Desvio relativo} = \frac{\text{Potência}_{simulada} - \text{Potência}_{analítica}}{\text{Potência}_{simulada}} \quad \text{Equação 3}$$

A Figura 6 apresenta o histograma dos desvios relativos para geradores trifásicos, enquanto a Figura 7 apresenta o histograma dos desvios relativos para geradores monofásicos.

Os resultados obtidos nos estudos evidenciam a boa proximidade das metodologias analíticas com a realidade. Esta afirmação se confirma pelo fato de 94% dos casos testados possuírem um desvio máximo de 40% para geradores trifásicos, enquanto o método aplicado a geradores monofásicos apresenta um desvio positivo inferior a 30% para 84,5% dos casos. Além disto, 99,8% das barras testadas com a conexão de geradores trifásicos apresentam um desvio positivo, enquanto para geradores monofásicos se obteve 85,1% dos casos. Estes resultados indicam que, a metodologia desenvolvida apresenta uma estimativa conservadora, confiável e aplicável para redes reais.

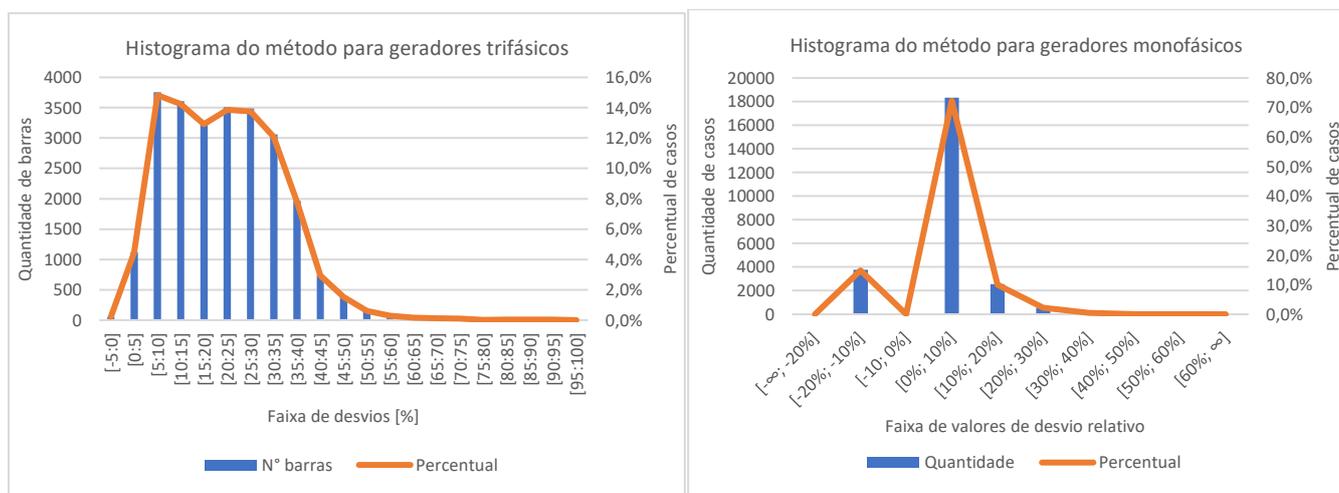


Figura 6 - Resultados para geradores trifásicos

Figura 7 - Resultados para geradores monofásicos

CONCLUSÕES:

Através das análises realizadas neste projeto, pode-se concluir que a conexão de geradores fotovoltaicos em redes de baixa tensão apresenta um limite técnico, o qual pode ser definido por três condições principais: Tensão máxima de operação, desequilíbrio nos níveis de tensão ou sobrecarga nos condutores. As análises indicam que a condição de sobretensão é frequentemente a mais crítica e, portanto, a análise apenas deste impacto pode ser suficiente para estimar com certo grau de precisão a capacidade de hospedagem de uma barra.

A análise dos estudos probabilísticos, permite concluir que as capacidades de hospedagem totais e individuais das redes possuem um comportamento bem definido em relação a quantidade de geradores

conectados ao sistema. As capacidades de hospedagem totais tanto média, quanto com nível de confiança de 90% se mostrou linearmente proporcional ao nível de penetração de GDs na rede. Enquanto as capacidades de hospedagem individuais médias e com nível de confiança de 90% decrescem de forma logarítmica ao passo que o nível de penetração dos geradores cresce.

Embora não seja possível estabelecer uma relação entre os coeficientes das aproximações e alguns dos parâmetros das redes, pode-se desenvolver métodos analíticos para prever a máxima potência de um gerador conectado a uma barra trifásica.

Os métodos analíticos desenvolvidos se mostraram conservadores e confiáveis para aplicação em redes reais, por apresentarem desvios relativos majoritariamente positivos e inferiores a 40%, representando que não só a aproximação testada é sólida para diferentes topologias de redes, mas também apresenta uma proximidade conservadora, tendo em vista que o valor estimado via formulação simplificada é inferior ao real (obtido via simulação computacional). Este resultado é importante pois, na prática, não se deseja atingir o valor máximo da potência injetada, mas um valor um pouco inferior a este.

BIBLIOGRAFIA

- [1]. EPRI Home, Epri.com, 2024 [Online]. Disponível em: <https://www.epri.com/pages/sa/openss>. Acessado em 05 de junho de 2024.
- [2]. PRODIST - Módulo 8 – Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica, Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), Resolução normativa nº956, 2021. [Online] Disponível em: https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956_2_7.pdf.
- [3]. DSS Extensions [Online]. Disponível em: <https://dss-extensions.org/>. Acessado em 05 de maio de 2023.
- [4]. R. Torquato, W. Freitas and F. C. L. Trindade, "Practical Method for First-Screening Assessment of New PV Connection Requests on Unbalanced Low Voltage Distribution Systems," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 38, no. 1, pp. 363-375, Feb. 2023, doi: 10.1109/TPWRD.2022.3187273.
- [5]. R. Torquato, D. Salles, C. O. Pereira, P. C. M. Meira e W. Freitas, "A Comprehensive Assessment of PV Hosting Capacity on Low-Voltage Distribution Systems," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 33, no. 2, pp. 1002-1012, Abr. 2018.
- [6]. Lei nº 14.300 de 06 de janeiro de 2022 [Online]. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/lei/114300.htm. Acessado em: 9 de abril de 2023.
- [7]. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Geração Distribuída. [Online]. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiY2VmMmUwN2QtYWFiOS00ZDE3LWI3NDMtZDk0NGI4MGU2NTkxIiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOiJR9>. Acessado em: 9 de abril de 2023.
- [8]. L. Flávio. (14 nov. 2022). Capacidade instalada de energia fotovoltaica teve aumento de 80% em relação a 2021. Brasil 61. [Online]. Disponível em: <https://brasil61.com/n/capacidade-instalada-de-energia-fotovoltaica-teve-aumento-de-80-em-relacao-a-2021-pind223640>. Acessado em: 14 de abril de 2023.
- [9]. R. Casarin. (16 mar. 2023). Geração de energia solar no Brasil tem crescimento de 74% em fevereiro. Portal Solar. [Online]. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/noticias/operacao-e-expansao/oem/geracao-de-energia-solar-no-brasil-tem-crescimento-de-74-em-fevereiro>. Acessado em: 14 de abril de 2023.
- [10]. N. Jenkins, R. Allan, P. Crossley, D. Kischen e G. Strbac, "Embedded Generation," London: The Institute of Electrical Engineers, 2000
- [11]. C. L. Masters, "Voltage rise the big issue when connecting embedded generation to long 11 kV overhead lines," Power Engineering Journal, no. 1, Vol. 16, pp. 5-12, Fevereiro 2002.
- [12]. P. Trichakis, P. C. Taylor, P. F. Lyons e R. Hair, "Predicting the technical impacts of high levels of small-scale embedded generators on low-voltage networks," IET Renewable Power Generation, no. 4, Vol. 2, pp. 249-262, Dezembro 2008.