

# Obtenção do Hosting Capacity em uma rede de distribuição.

Hugo Torquato - hugortorquato@gmail.com

**Abstract**—O trabalho apresenta uma metodologia de obtenção do *Hosting Capacity* (HC) de uma rede de distribuição de energia. A abordagem escolhida para realização e validação deste estudo consiste em realizar a obtenção do HC para as condições com alocações aleatórias de geradores distribuídos nas barras do sistema, podendo ser eles monofásicos, bifásicos ou trifásicos. O software OpenDSS foi escolhido para realizar o cálculo do fluxo de potência diário do sistema, a obtenção dos resultados foi feita de forma externa em Python e o armazenamento das informações geradas pelo bando de dados SQL. Ao final do projeto será possível observar uma metodologia de obtenção do HC de uma rede de distribuição e os principais problemas que limitam esse valor frente a inserção de geração distribuída na rede.

**Index Terms**—*Hosting Capacity*, PVSystm, Rede de Distribuição.

## I. INTRODUÇÃO

O Setor elétrico tende a experimentar mudanças na configuração e disposição dos elementos que compõem o sistema com o passar dos anos. O contexto brasileiro é um exemplo desse comportamento, vários estudos de viabilidade e elevação do número de unidades geradores fotovoltaicas instaladas mostram que o país está em crescente expansão neste seguimento e, por consequência, recebe notória atenção na matriz energética nacional [1], [2]. Diversos estudos, como [3]–[6], são realizados em prol de avaliar os impactos que podem ser causados pela introdução de novos elementos geradores em uma rede de distribuição. Dentre eles é possível citar a sobrecarga na operação de elementos devido à elevada produção de energia em momentos de baixo consumo, o risco de sobretensão nos barramentos com a instalação de usinas em localidades remotas dos polos consumidores de energia, perturbações na qualidade de energia como no desequilíbrio de tensão causado pela instalação desordenada de elementos monofásicos/bifásicos na rede e atuações indevidas ou não atuação de elementos de proteção.

Os efeitos negativos atrelados a tecnologia acabam recebendo maior atenção, mas essa forma de geração de energia também apresenta vantagens. Em [3], [7] são discutidos a correlação entre os benefícios técnicos e econômicos que podem ser obtidos. Quando instalados de maneira planejada, os geradores podem reduzir perdas elétricas no sistema por aproximar a geração do consumo, melhora no perfil de tensão em determinadas localidades, redução da emissão de poluentes, posterga investimentos de expansão do sistema por suprir a necessidade momentânea.

O termo *Hosting Capacity* (HC) contempla a necessidade de estabelecer um equilíbrio que permita extrair os benefícios

associados a geração fotovoltaica sem degradar o sistema em que a mesma será inserida. É definido em [3], [8] como o limite de geração distribuída que pode ser introduzido em um sistema sem que a performance ultrapasse os limites operacionais estabelecidos. A obtenção deste parâmetro consiste em selecionar variáveis elétricas e seus respectivos limites com o objetivo de analisar o desempenho de acordo com a montante de geração inserida no sistema. O conceito foi utilizado em [5], [9] para penetração de geração fotovoltaica monitorando, simultaneamente, os limites operacionais de violação e desequilíbrio de tensão, capacidade térmica dos condutores e sobrecarga nos transformadores. Foi abordado em [10] para a penetração de geração eólica, nesse caso o HC foi calculado baseado na análise do fluxo de potência na condição de carga mínima e potência máxima de geração eólica esperada. Além de estudos que visam obter o HC em determinada rede, existe uma área de estudo que tange a maximização da capacidade de um sistema absorver energia proveniente de fontes distribuídas. Nesta linha de pesquisa foi desenvolvido, em [11], um algoritmo genético capaz de atuar na potência das unidades geradoras e em outros elementos que atuam no controle de tensão do sistema com o objetivo de minimizar os efeitos negativos na qualidade da energia.

No caso deste trabalho, o objetivo principal tangencia validação da metodologia de obtenção do HC para diferentes cenários de instalação de inversores fotovoltaicos em uma rede de distribuição. As configurações contempladas neste estudo foram obtidas de maneira aleatória frente todas as barras do sistema, sem possibilidade de repetição entre elas. Em termos gerais, os resultados que serão apresentados visam validar a metodologia de cálculo, apresentar a obtenção do HC e ressaltar as principais figuras de mérito que precisam ser contempladas nas análises de inserção de geração distribuída em um sistema.

A disposição do texto consiste em uma introdução que aborda e contextualiza os principais pontos e objetivos que serão abordados no trabalho, seguido da metodologia que contempla a apresentação da rede de distribuição, ferramental e conceitos utilizados para o desenvolvimento das simulações. Posteriormente são apresentados os resultados obtidos para cada configuração mencionada de forma a possibilitar uma discussão acerca do impacto causado pela geração distribuída inserida no sistema.



é uma operação crítica. Já no caso do desequilíbrio de tensão, também para tensões de operação inferiores a 1kV, o PRODIST estabelece que a rede de distribuição deve operar com uma variação da amplitude de tensão entre as fases inferior a 3% e a obtenção desse método deve ser feito conforme norma IEEE, equação 1.

$$FD\% = \frac{3 * (V_{max} - V_{min})}{V_a + V_b + V_c} \times 100 \quad (1)$$

Onde FD representa o fator de desequilíbrio de tensão;  $V_{max}$  e  $V_{min}$ , a máxima e mínima tensão de fase das fases A, B e C que estão presentes no denominador. Conforme apresentado em [9], a violação de desequilíbrio de tensão somente será registrada quando seu valor exceder o limite por um período superior a 5% do tempo de simulação, no caso atual 4 amostras.

A última figura de mérito analisada contempla a sobrecarga nos condutores. Este foi aferido com uma medição de corrente nos elementos e com os valores previamente estipulados na definição da rede. Caso superior, uma violação é registrada.

Dados os limites estabelecidos por norma, os critérios estipulados neste trabalho para avaliar a capacidade de penetração fotovoltaica de um determinado sistema será o nível de tensão operando de forma adequada, entre o intervalo de 0.92pu e 1.05pu; O desequilíbrio de tensão inferior a 3% e corrente nos condutores inferior a seu valor nominal. Essas condições foram apresentadas em [9] como as variáveis mais sensíveis a causar violações junto da capacidade térmica nos condutores do sistema.

### E. Cálculo do Hosting Capacity

O processo de obtenção do *Hosting Capacity* é padronizado indiferente da disposição de geradores fotovoltaicos no sistema e pode ser observado na Fig. 3. De forma mais detalhada, o primeiro passo consiste em realizar as devidas configurações e procedimentos necessários antes de iniciar a simulação seguido de uma primeira simulação sem a inserção de GD no sistema. Dado início, serão analisadas  $N = 200$  disposições aleatórias para as unidades geradoras para o intervalo de um dia de operação. Para cada disposição o somatório das potências inseridas pelos geradores começará em zero e será incrementado até que ocorrer alguma violação elétrica, sendo o "delta" de incremento igual a 1% da potência nominal de operação do transformador de entrada do sistema, ou seja, 0,45kW. Esse processo é realizado até que ocorra a violação de alguma das figuras de mérito, obtendo assim o HC do conjunto. Nesta etapa o objetivo principal desta primeira etapa está quase concluído, falta apenas armazenar os dados importantes no banco de dados para serem utilizados posteriormente. O processo se repete até que todas as 200 configurações sejam avaliadas. Finalizada toda a coleta de dados e de posse das grandezas armazenadas no banco, é possível realizar as devidas correlações, análises e *plots* desejados.

## III. RESULTS

A apresentação dos resultados começa com a exposição da variação que as variáveis elétricas sofrem frente à condição

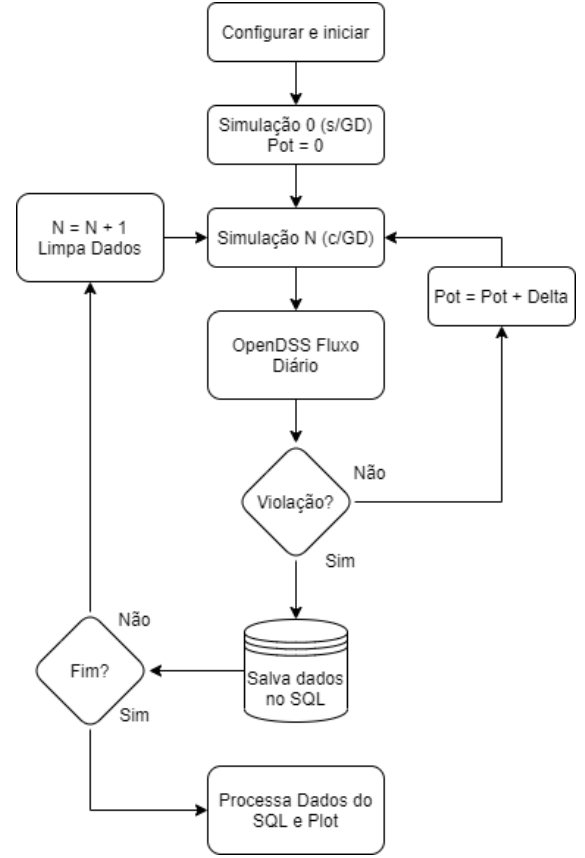


Fig. 3. Comportamento da obtenção do HC.

de violação do HC da rede. Posterior a esta exposição, será contemplado a correlação entre as figuras de mérito explanadas na seção II e sua frequência quando analisadas em uma ampla variedade de disposição das unidades geradoras na rede.

O primeiro parâmetro analisado consiste no fluxo de potência no PCC. Esta correlação é muito sensível dado que a inserção dos geradores na rede instituem um novo comportamento não antes observado, o fluxo bidirecional de potência. ocorrência deste fenômeno toma relevância frente a valores elevados de corrente reversa que podem ser observados, principalmente, na metade do dia durante o pico da geração solar. Danos a equipamentos, falha na operação de sistemas de proteção e violação de parâmetros de qualidade de energia são alguns dos problemas mais comuns que este evento pode causar.

A Fig. 4 e . 5 expõe o comportamento das potências ativa e reativa no PCC da rede. Como o fator de potência escolhido foi unitário, os gráficos inferiores das figuras permanecem praticamente inalterados, dado que os geradores não contribuem para inserção da parcela reativa. Em contrapartida, o efeito da corrente reversa pode ser observado no gráfico superior da Fig. 5. Para este caso, o HC foi obtido antes de essa corrente atingir valores mais elevados, mas é possível observar que toda a parcela ativa que era fornecida pela rede na metade do dia (gráfico superior da Fig. 4) foi compensada pelas unidades geradoras e uma pequena parcela é injetada ao transformador de entrada da rede.

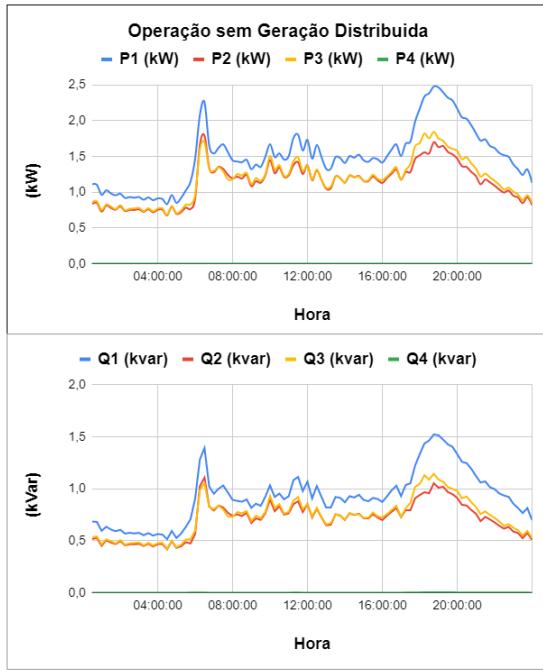


Fig. 4. Perfil de Potência no PCC da rede teste - Condição sem GD.

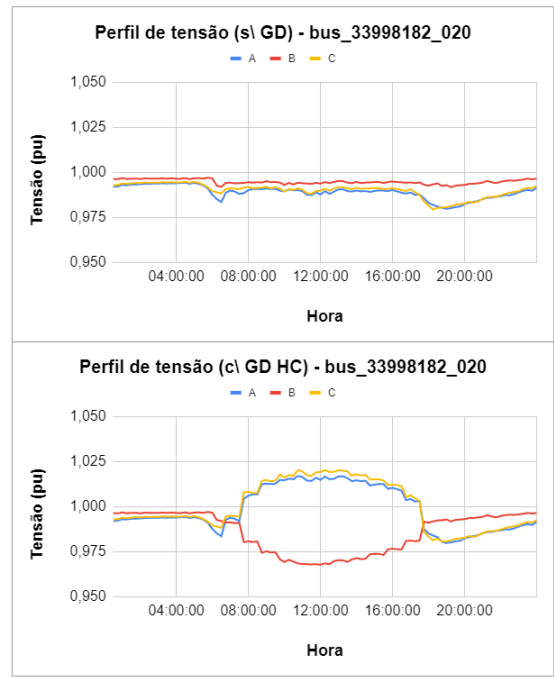


Fig. 6. Perfil de tensão em uma barra do sistema na simulação diária.

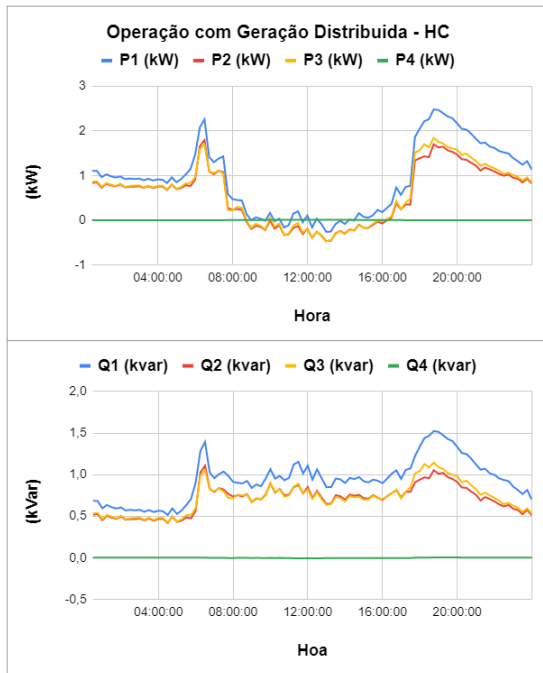


Fig. 5. Perfil de Potência no PCC da rede teste - Condição com GD após identificado o HC.

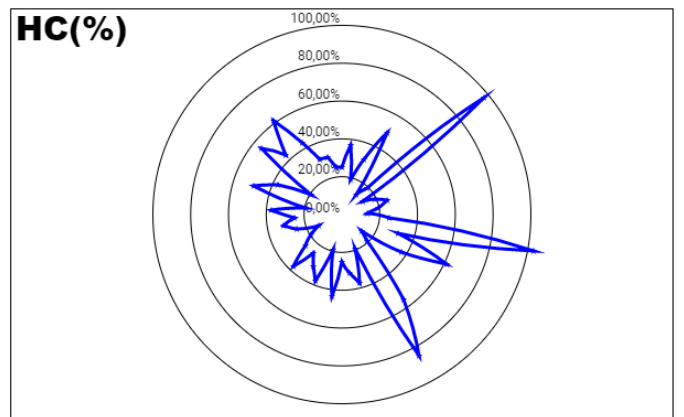


Fig. 7. Distribuição do HC(%) em relação a potência nominal do transformador de entrada.

A Fig. 6 expõe a variação dos níveis de tensão na barra  $bus_{33998182_020}$  do sistema, localidade escolhida por se destacar em termos de violações no sistema. A penetração fotovoltaica provoca uma elevação significativa na tensão na barra, principalmente entre as fases A e C. De forma análoga, a carga do sistema também exerce influência sobre a variável, reduzindo sua magnitude durante a hora de ponta do dia. Importante notar que a correlação entre a disposição

das unidades geradoras provocou uma assimetria entre os valores de tensão elevando assim o nível de desequilíbrio entre as barras. Condição verificada como maior causador de distúrbios para essa rede frente às considerações de violações estabelecidas na seção II.

A Fig. 7 relaciona cada simulação realizada com seu respectivo HC em porcentagem com relação a potência do transformador de entrada do sistema. Essa informação é extremamente importante por mostrar que apesar das diferentes disposições dos geradores, o resultado comum tende a um valor médio de aproximadamente 25%. Claro, não podemos deixar de observar que determinadas configurações podem favorecer ou prejudicar muito a dinâmica da rede, como pode ser observado nos valores extremos que foram coletados, maior que 100% e muito próximo a 0%.

Entre a gama de resultados coletados podem ser classi-

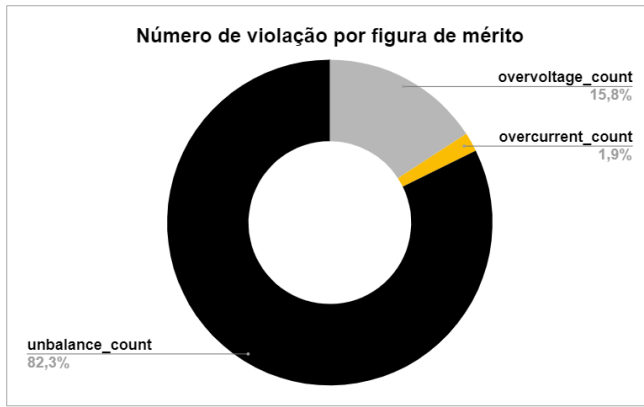


Fig. 8. Distribuição do número de violações pelas respectivas figuras de mérito.

ficadas frente ao tipo de violação que foi observada. No caso deste trabalho foram observadas o sobre e subtensão, sobrecorrente nos condutores e o desequilíbrio de tensão. Antes de comentar os resultados, vale ressaltar alguns pontos: A disposição das unidades geradoras segue um modelo puramente aleatório, sem considerar a quantidade de potência que está sendo injetada em cada fase; Em termos de funcionamento do OpenDSS, a potência dos geradores é dividida entre as fases, logo uma que apresente configuração monofásica irá injetar três vezes mais potência que uma trifásica, o que torna a configuração mais sensível ao desequilíbrio de tensão.

Considerações apresentadas, a Fig. 8 contempla o número de violações ocasionadas por cada figura de mérito, em (%). Aqui é possível observar que as considerações mencionadas realmente apresentaram diferenças ao resultado esperado. A base de comparação foi o artigo [9] que obteve um resultado com predominância da sobretensão, mas os pontos mencionados foram devidamente tratados e mapeados.

Em termos de incremento de verificação de violação de variáveis elétricas, foi obtido uma sensibilidade maior frente ao desequilíbrio de tensão, seguido da sobretensão e, por fim, a sobrecorrente.

#### IV. CONCLUSION

O trabalho apresentou uma metodologia de obtenção do *Hosting Capacity* (HC) de uma rede de distribuição de energia. A abordagem contemplou uma breve contextualização teórica sobre o assunto, uma descrição da rede teste utilizada, a metodologia de cálculo, avaliação dos parâmetros analisados e os resultados obtidos na implementação do projeto.

As diferentes configurações de GDs utilizadas proporcionaram uma visão sistemática dos possíveis cenários e casos que podem ser obtidos em uma rede. Em que foi evidenciada a influência que os geradores distribuídos acarretam no funcionamento diário da rede em uma situação de operação limite quanto a potência injetada na rede. O incremento de 1% da potência nominal do transformador de entrada possibilitou a avaliação precisa frente aos principais causadores de violação das figuras de mérito abordadas. Com atenção maior ao desequilíbrio de tensão, que obteve uma parcela superior ao quesito número de ocorrências.

Ademais as considerações necessárias para ajuste e melhoria na identificação das violações conforme mencionadas no texto, a estrutura da implementação se mostra eficiente frente a obtenção do HC de uma rede. A estrutura OpenDSS, Python e SQL possibilita uma relação atrativa entre o custo computacional e a facilidade de tratar os dados levantados sem a necessidade de compilar todo o circuito cada vez que quiser realizar uma nova figura com os dados já existentes.

#### REFERENCES

- [1] R. Nakabayashi, "Microgeração fotovoltaica no brasil: Condições atuais e perspectivas futuras," Dissertação, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2014.
- [2] N. Araujo, I. Zanesco, R. Lagos, and A. Moehlecke, "Evolução e análise de sistemas fotovoltaicos no brasil e chile," *Anais do VII Congresso Brasileiro de Energia Solar*, 2018.
- [3] *Power System Performance*. John Wiley Sons, Ltd, 2011, ch. 3, pp. 84–101. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781118029039.ch3>
- [4] A. Hoke, R. Butler, J. Hambrick, and B. Kroposki, "Steady-state analysis of maximum photovoltaic penetration levels on typical distribution feeders," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 4, no. 2, pp. 350–357, 2013.
- [5] A. Dubey, S. Santoso, and A. Maitra, "Understanding photovoltaic hosting capacity of distribution circuits," in *2015 IEEE Power Energy Society General Meeting*, 2015, pp. 1–5.
- [6] M. Ebad and W. M. Grady, "An approach for assessing high-penetration pv impact on distribution feeders," *Electric Power Systems Research*, vol. 133, pp. 347 – 354, 2016. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779615004034>
- [7] P. Chiradeja and R. Ramakumar, "An approach to quantify the technical benefits of distributed generation," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 19, no. 4, pp. 764–773, 2004.
- [8] S. M. Ismael, S. H. Abdel Aleem, A. Y. Abdelaziz, and A. F. Zobaa, "State-of-the-art of hosting capacity in modern power systems with distributed generation," *Renewable Energy*, vol. 130, pp. 1002 – 1020, 2019. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148118307936>
- [9] R. Torquato, D. Salles, C. Oriente Pereira, P. C. M. Meira, and 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, 2018.
- [10] S. Nursebo Salih, P. Chen, O. Carlson, and L. B. Tjernberg, "Optimizing wind power hosting capacity of distribution systems using cost benefit analysis," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 29, no. 3, pp. 1436–1445, 2014.
- [11] C. A. M. Gomes and H. P. Ferreira, "Hosting capacity evaluation of distributed generation systems with genetic algorithm," in *2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE)*, 2018, pp. 1–6.
- [12] OpenDSS. (2020) Epr distribution system simulator. [Online]. Available: <https://sourceforge.net/p/electricdss/wiki/Home/>
- [13] *Reference Guide: The Open Distribution System Simulator (OpenDSS)*, Electric Power Research Institute (EPRI), 2018.
- [14] R. Rajaram, K. Sathish Kumar, and N. Rajasekar, "Power system reconfiguration in a radial distribution network for reducing losses and to improve voltage profile using modified plant growth simulation algorithm with distributed generation (dg)," *Energy Reports*, vol. 1, pp. 116 – 122, 2015. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484715000165>
- [15] CRESESB. (2021) Cresesb centro de referência para as energias solar e eólica de s.brito. [Online]. Available: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>
- [16] Brazilian Elec. Reg. Agency. (Set.2020) Electrical energy distribution procedures in the national electrical system, module 8: Power quality. [Online]. Available: <http://www.aneel.gov.br/>

APPENDIX A  
IMAGEM DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO



Fig. 9. Diagrama do banco de dados gerado.