

Planejamento de Geração Distribuída em Sistemas de Distribuição com Suporte de Soft Open Points

Victor R. Lúcio* Ricardo de Oliveira* Leonardo W.de Oliveira*
Edimar J. de Oliveira*

* Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora, MG, Brasil (Tel: 55-32-2102-3440; e-mail: victor.ribeiro@engenharia.ufjf.br, roliveira@eletrobras.com, leonardo.willer@engenharia.ufjf.br, edimar.oliveira@ufjf.br).

Abstract: This paper presents a methodology for distributed generation planning in distribution systems with the aim of maximizing the hosting capacity of renewable distributed resources in the power grid. The methodology is based on the application of a genetic algorithm combined with a nonlinear programming model that maximizes the hosting capacity given a decision on distributed generation allocation. To do so, scenarios with equipment called soft open points in the network are considered, as distributed resources that impact the hosting capacity. Therefore, evaluating the influence of these resources on hosting capacity is also the objective of this article. Results are presented for the well-known in the literature 33-bus system, which demonstrate the advantages of the soft open point and the applicability of the presented planning methodology.

Resumo: Este trabalho apresenta uma metodologia para planejamento de geração distribuída em sistemas de distribuição com o objetivo de maximizar a capacidade de hospedagem de recursos renováveis distribuídos na rede elétrica. A metodologia é baseada na aplicação de algoritmo genético combinada com um modelo de programação não linear que maximiza a capacidade de hospedagem dada uma decisão de alocação de geração distribuída. Para tanto, são considerados cenários com equipamentos denominados *soft open points* na rede, como recursos distribuídos que impactam na capacidade de hospedagem. Portanto, a avaliação da influência desses recursos na capacidade de hospedagem também é objetivo deste artigo. Resultados são apresentados para o sistema de 33 barras conhecido da literatura, que comprovam as vantagens do *soft open point* e a aplicabilidade da metodologia de planejamento apresentada.

Keywords: distributed generation; soft open points; maximum hosting capacity; genetic algorithm; distribution network

Palavras-chaves: geração distribuída; soft open points; máxima capacidade de hospedagem; algoritmo genético; sistema de distribuição

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, tópicos como desenvolvimento sustentável e transição energética têm sido relevantes por todo o mundo. Neste cenário, a implantação de sistemas de geração baseados em energia renovável desempenha um papel importante na redução dos impactos negativos oriundos da queima de combustíveis fósseis e na redução das emissões de gases de efeito estufa. Dados fornecidos em REN21 (2022) destacam a participação das energias renováveis na geração de eletricidade, onde a participação da eletricidade renovável aumentou de 20,4% em 2011 para 28,3% em 2021, enquanto os combustíveis fósseis caíram de 68% para 62% no mesmo período. Além disso, as adições anuais de capacidade instalada de fonte renovável foram de cerca de 315 GW em 2021 (IEA (2022)).

No Brasil, cabe destacar a predominância da geração solar fotovoltaica distribuída entre os Recursos Energéticos Distribuídos (REDs). De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, uma quantidade de 3,9 GW de capacidade de geração fotovoltaica distribuída foi

instalada até agosto de 2020. Após mais de dois anos, em março de 2023, a geração solar fotovoltaica distribuída atingiu a capacidade instalada total de 19,8 GW no Brasil.

Ultimamente a geração distribuída (GD) tem se mostrado como uma das áreas de pesquisa mais atrativas em sistemas de potência. Num primeiro momento, o crescimento da inserção da GD impulsionou pesquisas com relação ao problema de alocação e dimensionamento ótimo da GD objetivando o aumento da eficiência e maximizar os potenciais benefícios nos sistemas de distribuição de energia, com destaque para a redução de perdas técnicas, melhoria do perfil de tensão e minimização dos custos de perdas elétricas no sistema. Em Nascimento et al. (2019) é observado o impacto da geração distribuída, com foco em renováveis, nas perdas técnicas da rede. Já Quint et al. (2019), por sua vez, analisam de forma mais generalizada os impactos de recursos energéticos distribuídos no planejamento e operação de sistemas de potência de larga escala. Rey et al. (2018) estudam o planejamento de sistemas de distribuição dada a presença de geração distribuída e/ou políticas de resposta do lado da demanda, examinando os benefícios

de tal integração. Ehsan & Yang (2019) investigam a combinação entre geradores fotovoltaicos, aerogeradores e sistemas de armazenamento a baterias, fazendo tanto a alocação quanto o dimensionamento de tais recursos, com a finalidade de maximizar os lucros do operador do sistema. Enfim, cita-se Zhang et al. (2018), que investigam o planejamento da alocação ótima de geradores renováveis distribuídos, com a consideração das incertezas acerca desse tipo de gerador, além da variabilidade temporal da demanda.

Por outro lado, devido ao cenário atual e à perspectiva de aumento da penetração dos REDs, o conceito de capacidade de hospedagem (HC, do inglês *Hosting Capacity*) tornou-se importante para os operadores do sistema de distribuição e outros *players*, uma vez que HC representa a capacidade do sistema para hospedar GD sem ultrapassar os limites operacionais do sistema (Abideen et al. (2020)).

Várias estratégias têm sido propostas na literatura para aumentar a HC, tais como: sistemas de armazenamento, compensadores estáticos de reativos, reconfiguração de rede (NR), inversores inteligentes, reforço de rede e *soft open points* (SOPs) (Ismael et al. (2019)). Dentre essas, SOPs são equipamentos baseados em eletrônica de potência que fornecem flexibilidade operacional à rede com controle do fluxo de potência e da tensão nodal, melhorando a performance operacional. Além disso, nos últimos anos, diversos trabalhos têm sido realizados com o objetivo de mensurar a capacidade dos SOPs em aumentar a HC. A referência Qi & Wu (2017) propôs a maximização da HC usando SOP em conjunto com NR, considerado a GD em locais pré-estabelecidos ou fixos. Em Ji et al. (2017), SOPs também foram adotados para maximizar a HC, permanecendo a GD fixa em cinco pontos distintos da rede. Esses trabalhos não consideraram o posicionamento da GD na rede como variável de controle para maximizar a HC.

Por outro lado, trabalhos como em Karunarathne et al. (2021) endereçaram o estudo de alocação ótima da GD, posicionamento e sua capacidade, com a adoção de SOP. A minimização de perdas é considerada em Karunarathne et al. (2021) como função objetivo. Outrossim, em Diaeldin et al. (2019), os autores propuseram a solução do problema alocação de até 3 GDs em conjunto com NR e SOPs no sistema IEEE-33 barras, e de até 8 GDs em um sistema teste de 83 barras. A função objetivo adotada também foi a minimização de perdas técnicas. Em recente trabalho (Oliveira et al. (2023)), foi proposta a solução do problema de planejamento de SOPs para maximização da HC, considerando a otimização simultânea da NR e da alocação do SOP. Porém, o trabalho não adota a alocação ótima de GD, ou seja, o local de instalação das GD foi pré-estabelecido, sendo mantido fixo.

Tendo em vista a importância de maior aproveitamento de recursos energéticos renováveis e a potencialidade de equipamentos como o SOP para essa finalidade, o presente trabalho investiga o comportamento desses equipamentos na maximização da capacidade de hospedagem de REDs, mais especificamente de GD. Para tanto, uma metodologia de otimização baseada em algoritmo genético para planejamento de GD é aplicada e cenários envolvendo a presença de SOPs em um sistema de distribuição de energia (SDE) conhecido na literatura são considerados. Os estudos de

casos demonstram a aplicabilidade do método proposto e as vantagens de se investir em SOPs para a maximização da HC.

O artigo está estruturado da seguinte forma: seção 2 introduz a modelagem do SOP para estudos em regime permanente, bem como apresenta a modelagem matemática para a determinação da função objetivo do problema de otimização. A seção 3 descreve a metodologia proposta para o planejamento de GDs com o suporte de SOPs. A seção 4 apresenta os estudos de casos com base no sistema teste adotado e, por fim, as principais conclusões são destacadas na seção 5.

2. MODELAGEM DO PROBLEMA

Essa seção apresenta uma breve descrição do modelo de operação dos SOPs, bem como a modelagem do problema de otimização, incluindo a função objetivo e suas restrições.

2.1 Modelo Operacional do SOP

O SOP é um dispositivo de eletrônica de potência que pode substituir chaves normalmente abertas presentes nos sistemas de distribuição além de permitir a transferência do fluxo de potência ativa entre alimentadores adjacentes, bem como podem realizar a compensação de reativos nos nós onde seus terminais estão conectados. Uma representação típica do SOP é apresentada na Fig. 1, onde é mostrada a topologia *back-to-back voltage source converter* (VCS), a qual foi adotada nesse trabalho.

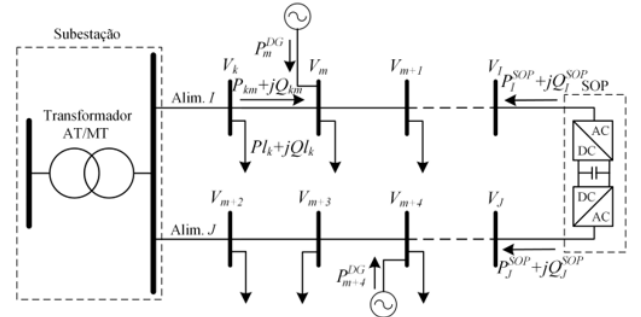


Figura 1. Sistema de distribuição de MT com SOP.

As principais variáveis do modelo do SOP apresentado na Figura 1 são:

P_I^{SOP}, P_J^{SOP} - Potência ativa do SOP nos terminais I e J , respectivamente;

Q_I^{SOP}, Q_J^{SOP} - Potência reativa do SOP nos terminais I e J , respectivamente;

Com base na representação apresentada na Fig. 1, os terminais I e J do SOP pertencem a dois alimentadores adjacentes, e a operação do SOP pode ser modelada da seguinte forma (Cao et al. (2016)):

$$P_I^{SOP} + P_J^{SOP} = 0 \quad (1)$$

$$\sqrt{(P_I^{SOP})^2 + (Q_I^{SOP})^2} \leq S_{SOP} \quad (2)$$

$$\sqrt{(P_J^{SOP})^2 + (Q_J^{SOP})^2} \leq S_{SOP} \quad (3)$$

Onde:

S_I^{SOP}, S_J^{SOP} - Potência nominal dos VSCs conectados aos terminais I e J , respectivamente.

Cabe destacar que (1) representa a equação de balanço de potência do SOP, i.e., a restrição interna de operação do equipamento. As equações (2) e (3) representam as restrições de capacidade do SOP. No presente trabalho, as perdas internas do SOP foram desprezadas pois o coeficiente de perda é da ordem de 0,02, o que é relativamente baixo comparado com a condição de carregamento do sistema.

2.2 Modelo de Otimização da HC

O problema de otimização de fluxo de potência (FPO) é de natureza não-linear e a função objetivo é definida como a maximização da HC do sistema de distribuição de média tensão, conforme em (4).

$$\max HC = \sum_{u \in ngd} P_u^{GD} / \sum_{v \in npc} P_v \quad (4)$$

Sujeito a:

$$P_{gI} - P_{lI} + P_I^{SOP} + x_I \cdot P_I^{GD} + \sum_{m \in \Omega_I} P_{IJ} = 0 \quad (5)$$

$$Q_{gI} - Q_{lI} + Q_I^{SOP} + x_I \cdot Q_I^{GD} + \sum_{m \in \Omega_I} Q_{IJ} = 0 \quad (6)$$

$$P_{IJ}^{SE} \geq 0 \quad (7)$$

$$x_I = 0 \text{ ou } 1 \quad (8)$$

$$\mathbf{Z}^{min} \leq \mathbf{Z} \leq \mathbf{Z}^{max} \quad (9)$$

Onde:

ngd - Conjunto ou número de sistemas GD alocados;

npc - Conjunto ou número de barras de carga;

P_u^{GD} - Potência ativa injetada pelo u -ésimo sistema GD;

Ω_I - Conjunto de barras diretamente conectada à barra I ;

x_I - Valor associado à alocação ($x_I = 1$) ou não ($x_I = 0$) de GD na barra I ;

P_{gI}, Q_{gI} - Potências ativa e reativa geradas na barra I , respectivamente;

P_{lI}, Q_{lI} - Potências ativa e reativa da carga conectada na barra I , respectivamente;

P_{IJ}, Q_{IJ} - Fluxos de potência ativa e reativa no alimentador I - J , respectivamente;

P_I^{GD} - Potência ativa injetada pelo sistema GD conectado na barra I ;

P_I^{SOP}, Q_I^{SOP} - Potências ativa e reativa do SOP conectado na barra I , respectivamente;

\mathbf{Z} - Vetor que contém as variáveis do problema de FPO, as quais possuem limites inferior e superior;

$\mathbf{Z}^{min}, \mathbf{Z}^{max}$ - Vetor que contém os limites inferior e superior das variáveis \mathbf{Z} , respectivamente.

A equação (4), que define a função objetivo do problema de alocação de GD com suporte de SOP, representa a maximização da capacidade de hospedagem de GD do sistema de distribuição. As equações (5) e (6) correspondem às equações de balanço de potência ativa e reativa, respectivamente.

A restrição (7) é responsável por fazer com não seja observada a ocorrência de fluxo reverso na rede, ou seja, através da mesma busca-se evitar a passagem de fluxo ativo do sistema de distribuição para o de transmissão.

As restrições (8) determinam a característica discreta da alocação da GD, modelagem que será tratada, no presente trabalho, de forma específica no processo de solução via AG. Dessa forma, a variável de decisão x_I requer a modelagem de variáveis inteiras, sendo que $x_I = 1$ significa sistema GD alocado na barra k , enquanto que $x_I = 0$ significa a não alocação de GD na barra I .

Vale ressaltar que os sistemas GD são modelados com injeções de potência com fator de potência unitário, e por isso, a potência reativa injetada é nula, portanto, não considerada em (6). Por fim, as demais variáveis de otimização do problema têm seus limites definidos em (9). Nesse conjunto de restrições estão incluídos os limites das tensões nodais e dos fluxos de corrente nos segmentos dos alimentadores da rede.

3. METODOLOGIA

3.1 Algoritmos Genéticos

As meta-heurísticas consistem em algoritmos que buscam emular fenômenos existentes na natureza, com o intuito de lidarem com problemas de otimização de grande complexidade computacional, além de daqueles que não podem ser resolvidos por técnicas clássicas, como os não-convexos, através da promoção de uma busca inteligente pelo espaço de soluções. Elas podem ser classificadas de diferentes maneiras, incluindo as meta-heurísticas cujo mecanismo de busca se baseia em apenas uma solução, e as meta-heurísticas cujo processo de busca é populacional, ou seja, baseado em um conjunto de soluções.

O AG, proposto originalmente pelo professor da Universidade de Michigan John H. Holland, consiste em uma técnica de otimização inserida no grupo das meta-heurísticas populacionais. Em suma, os AGs buscam reproduzir a teoria da evolução das espécies, proposta em 1859 pelo naturalista britânico Charles Darwin, segundo a qual todos os indivíduos descendem de um ancestral em comum, sobrevivendo apenas os considerados mais aptos, ou seja, aqueles que melhor se adaptam ao processo de seleção natural. Além disso, esses indivíduos estão sujeitos à reprodução, mutações e cruzamentos, o que contribui para alterações e perpetuação de suas características.

Nos algoritmos genéticos, cada solução encontrada corresponde a um cromossomo, sendo que cada posição do cromossomo corresponde a um gene. Os cromossomos são

avaliados de acordo com a função objetivo (FOB) do modelo, sendo que os que apresentarem a melhor FOB são selecionados para reprodução, ao passo que os piores passam pelos processos de cruzamento e mutação, no intuito de se obter soluções melhores.

Tal processo é feito sucessivamente até que o critério de parada do algoritmo seja atendido. Comumente, são utilizados como critérios de parada o número de iterações, tempo de execução e/ou número de estagnações da FOB, isso é, número de iterações sucessivas em que a solução obtida pelo algoritmo permaneceu a mesma. Nesse trabalho o número máximo de iterações foi considerado como critério de convergência, ou parada.

3.2 Metodologia Proposta

Visando a modelagem do problema de alocação de GD, ou seja, a definição de sua posição na rede elétrica de distribuição, a estrutura dos indivíduos ou cromossomos do AG no presente trabalho é definida na forma de um vetor binário (Ind) que indica a presença ou não de GD em cada barra. Nessa codificação, $Ind(I) = 1$ indica GD na barra I , enquanto que $Ind(I) = 0$ indica ausência de GD nessa barra. Portanto, cada vetor Ind tem um número de posições igual ao número de barras candidatas à alocação de GD. Por exemplo, o vetor da Equação (10), para um caso hipotético de cinco barras candidatas à alocação de GD, barras 1 à 5, indica a alocação de GD nas barras 2 e 4.

$$Ind = [0, 1, 0, 1, 0] \quad (10)$$

Destaca-se que a capacidade das fontes de GD é determinada pelo modelo de otimização formulado em (4)-(9), que maximiza a capacidade de hospedagem através da maximização da geração das GDs, observando os limites operacionais do sistema, definidos em (9).

A Figura 2 apresenta o fluxograma da metodologia proposta. Na Etapa 1, a população de soluções candidatas é inicializada, onde cada indivíduo define os pontos de instalação de GD conforme estrutura da Equação (10). Na Etapa 2, o sistema de Equações (4)-(9) maximiza a capacidade de hospedagem das GDs definidas para cada indivíduo do AG. Após isso, o critério de convergência, dado pelo número máximo de gerações, é verificado. Caso a convergência seja alcançada, o algoritmo é finalizado. Caso contrário, na Etapa 3, os mecanismos evolutivos do AG são aplicados à população de indivíduos, que é atualizada (posições de GD atualizadas) para nova maximização de HC na Etapa 2.

Adicionalmente, destaca-se que os parâmetros do AG, tamanho da população (N_i), taxa de cruzamento (γ), taxa de mutação (σ), coeficiente de probabilidade de seleção dos indivíduos para cruzamento (β) e número máximo de gerações (g_{max}) foram definidos empiricamente. Os valores que foram utilizados no presente trabalho encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros do AG

N_i	γ	σ	β	g_{max}
50	0,1	0,01	1	100

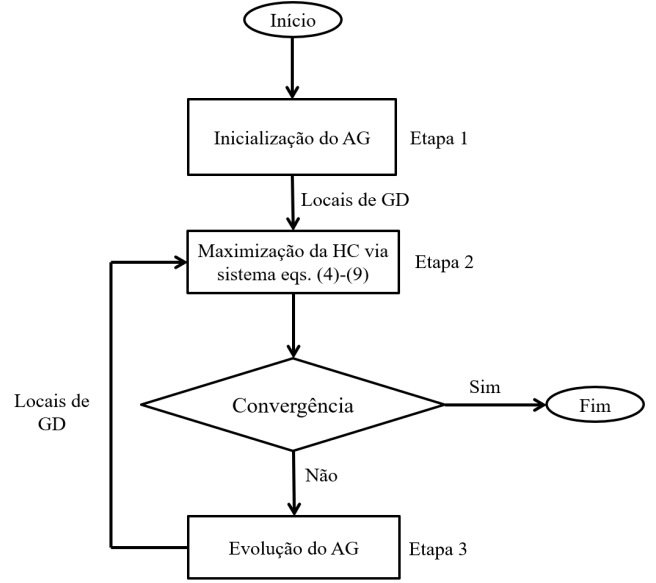


Figura 2. Metodologia proposta para maximização da HC.

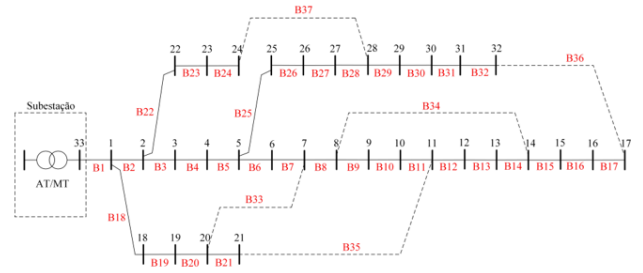


Figura 3. Sistema teste de distribuição de 33 barras em MT.

4. ESTUDO DE CASOS

4.1 Descrição Geral do Sistema Teste

A metodologia proposta foi aplicada a um sistema teste de distribuição de energia amplamente conhecido (Baran & Wu (1989)), sendo o mesmo de média tensão e composto por 33 barras, conforme topologia mostrada na Figura 3. O sistema é de característica radial, com cinco chaves de interconexão ou normalmente abertas (NA), nível de tensão de 12,66 kV e demandas de potência ativa e reativa de 3.715 kW e 2.300 kVAr, respectivamente. Na Fig. 3, as chaves NA são as tracejadas B33 a B37.

Os cenários considerados são os seguintes:

Cenário 1: cenário com ausência de SOPs no sistema (caso base). Nesse caso, os trechos B33 a B37 são chaves NA.

Cenário 2: cenário com um SOP no sistema no trecho B33. Neste cenário, B34 a B37 permanecem como chaves NA.

Cenário 3: cenário com dois SOPs no sistema nos trechos B33 e B34. Neste cenário, B35 a B37 permanecem como chaves NA.

Cenário 4: cenário com três SOPs no sistema nos trechos B33 a B35. Neste cenário, B36 e B37 permanecem como chaves NA.

Cenário 5: cenário com quatro SOPs no sistema nos trechos B33 a B36. Neste cenário, B37 permanece como chave NA.

Cenário 6: cenário com cinco SOPs no sistema nos trechos B33 a B37. Neste cenário, não há chaves NA.

4.2 Plataforma de Desenvolvimento

Os algoritmos desenvolvidos nesse trabalho foram implementados no ambiente de desenvolvimento integrado (IDE, do inglês *Integrated Development Environment*) *Spyder*, próprio para a escrita de códigos em linguagem *Python*. Além disso, o solver escolhido para a resolução do modelo de otimização foi o *Interior Point Optimizer* (*ipopt*), devido à sua capacidade de lidar com problemas não-lineares e não-convexos.

4.3 Resultados

Com o intuito de obter os resultados, cada cenário foi executado dez vezes, sendo que as HCs para cada execução e cenário são mostradas na Figura 4. Os resultados mostrados nas demais figuras e tabelas são relacionadas à execução do algoritmo genético que retornou a maior capacidade de hospedagem. Os resultados de HC para cada cenário de inserção de *soft open points* são apresentados de forma sucinta na Figura 5, além da Tabela 3 que, por sua vez, também abrange as perdas técnicas do sistema estudado. Na Tabela 2 é apresentada a escolha de barras feita pelo AG, para cada configuração de *soft open points*, além da capacidade das GDs alocadas em cada uma. Por fim, o perfil de tensão do sistema é disposto na Figura 6.

Pela análise da Tabela 3 e da Figura 5, verifica-se a efetividade da presença de SOPs para a maximização da capacidade de hospedagem de GDs. Portanto, o investimento nesses equipamentos permite maior aproveitamento dos recursos renováveis do sistema, contribuindo para a sustentabilidade ambiental na oferta de energia elétrica. Outro ponto que se pode concluir a partir da Tabela 2 é a atratividade da barra 21 para a alocação de GD, uma vez que essa barra é selecionada em múltiplos cenários. Tal barra é final de alimentador e, nesse caso, apresenta afundamento de tensão. Portanto, a melhoria de tensão dessa barra contribui significativamente para um melhor ponto operativo do sistema e aumento da HC.

A observação da Figura 6 em conjunto com a Tabela 3 indica uma piora nas tensões e nas perdas técnicas a medida que os *soft open points* são inseridos, já que o sistema estudado apresentou maiores afundamentos de tensão e perdas técnicas com a progressão dos cenários, dada a maior circulação de fluxo ativo na rede. Tal fato aponta para a necessidade da utilização de uma abordagem multiobjetivo, de modo a evitar a melhoria de uma grandeza com a consequente piora de outras.

5. CONCLUSÕES

Nesse trabalho, foi elaborada uma metodologia para a determinação da alocação ótima de REDs, sobretudo geração

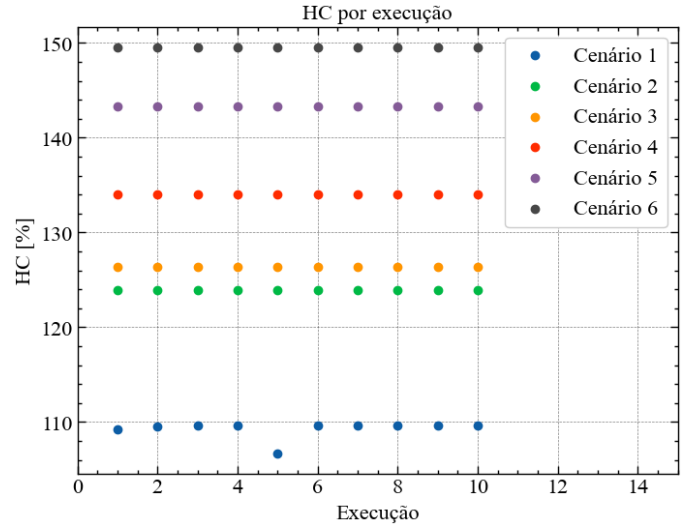


Figura 4. HC por execução, para cada cenário

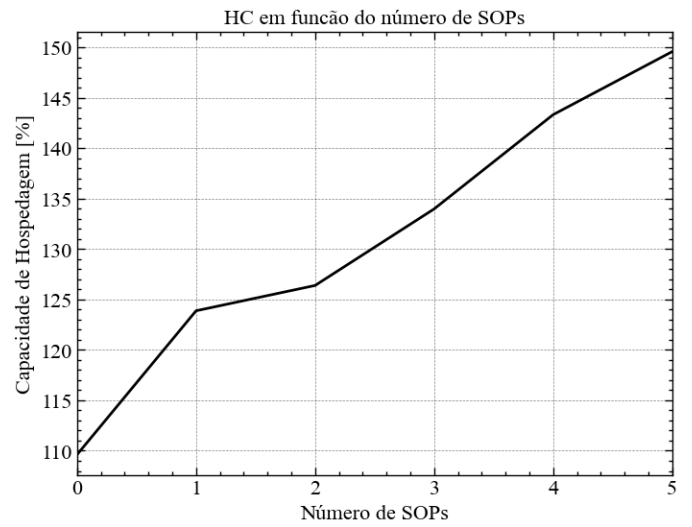


Figura 5. Comportamento da HC em função da inserção de SOPs.

Tabela 2. Alocação de GD por cenário

	Barras escolhidas pelo AG	Capacidade alocada [kW]
Cenário 1	1	627,11
	21	3444,91
Cenário 2	21	4602,12
Cenário 3	21	4695,50
	2	850,48
	3	353,89
	14	303,59
Cenário 4	15	310,16
	20	3159,24
	2	408,42
	17	2272,51
Cenário 5	20	1100,39
	21	1543,53
	24	5556,86
Cenário 6	24	5556,86

distribuída, visando a maximização da capacidade de hospedagem considerando a presença de *soft open points* no sistema. Para a geração das soluções candidatas, foi usado um algoritmo genético, ao passo que para a resolução do fluxo de potência, foi elaborado um modelo de otimização

Tabela 3. HC e perdas técnicas por cenário.

	HC [%]	Perdas técnicas [kW]
Cenário 1	109,61	357,02
Cenário 2	123,88	3723,69
Cenário 3	126,39	4095,33
Cenário 4	133,98	11017,18
Cenário 5	143,33	31522,88
Cenário 6	149,57	42785,12

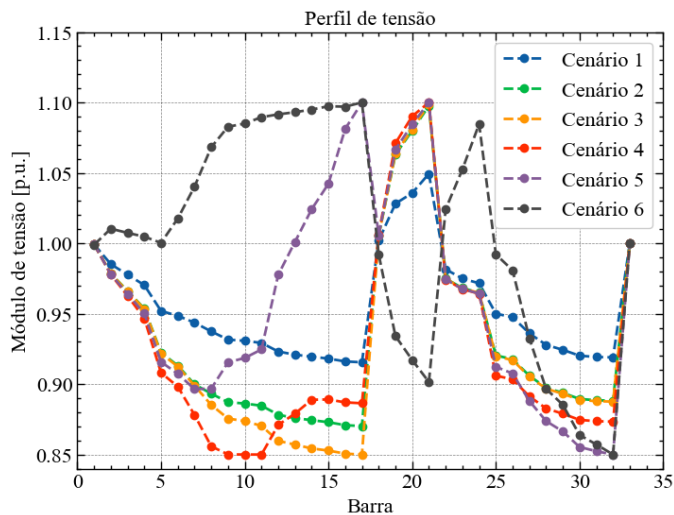


Figura 6. Perfil de tensão por cenário

próprio, capaz de lidar com equações não-lineares. Com base nos resultados obtidos pode-se concluir que:

- A presença de SOPs no sistema de fato contribui para o aumento da capacidade de hospedagem.
- Quanto maior o número de SOPs, maior a capacidade de hospedagem, apontando para a eficácia do investimento nesses equipamentos. Deve-se ressaltar que os custos devem ser considerados numa abordagem multiobjetivo, que deverá ser objeto de estudo de trabalhos futuros.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Fundação e Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), e Instituto Nacional de Energia Elétrica (INERGE) pelo seu apoio técnico/financeiro.

REFERÊNCIAS

Baran, M. and Wu, F. (1989). Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing. *IEEE Trans Power Deliver*, 4 (2).

Cao, W., Wu, J., Jenkins, N., Wang, C. and Green, T. (2016). Benefits analysis of soft open points for electrical distribution network operation. *Applied Energy*, 165, 36–47.

Diaaeldin, I., Abdel Aleem, S., El-Rafei, A., Abdelaziz, A., and Zobaa, A. F. (2019). Optimal network reconfiguration in active distribution networks with soft open points and distributed generation. *Energies*, 12, 4172.

Ehsan, A., and Yang, Q. (2019). Coordinated Investment Planning of Distributed Multi-Type Stochastic Generation and Battery Storage in Active Distribution Networks. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 10, 1813–1822.

IEA (2022). Snapshot of global pv markets – 2022. *iea photovoltaic power systems programme. report iea-pvps t1-42:2022*, april 2022. <https://iea-pvps.org/snapshot-reports/snapshot-2022/>. Acessado: 16 de setembro de 2022.

Ismael, S. M., Abdel Aleem, S. H. E., Abdelaziz, A. Y., and Zobaa, A. F. (2019). State-of-the-art of hosting capacity in modern power systems with distributed generation. *Renewable Energy*, 130, 1012–1020.

Ji, H., Li, P., Wang, C., Song, G., Zhao, J., Su, H., and Wu, J. (2017). A strengthened socp-based approach for evaluating the distributed generation hosting capacity with soft open points. *Energy Procedia*, 142, 1947–1952.

Karunaratne, E., Pasupuleti, J., Ekanayake, J., and Almeida, D. (2021). The optimal placement and sizing of distributed generation in an active distribution network with several soft open points. *Energies*, 14.

Nascimento, P. H. M., Ávila, O. F., Oliveira, L. E., Filho, J. A. P., Saraiva, J. T., and Silva, I. C. (2019). Impact of Distributed Generation Penetration on Distribution Network Technical Losses In *2019 16th International Conference on the European Energy Market (EEM)*.

Oliveira, R., Oliveira, L. W., and Oliveira, E. J. (2023). Optimization approach for planning soft open points in a mv-distribution system to maximize the hosting capacity. *Energies*, 16, 1–22.

Qi, Q., and Wu, J. (2017). Increasing distributed generation penetration using network reconfiguration and soft open points. *Energy Procedia*, 105, 2169–2174.

Quint, R., Dangelmaier, L., Green, I., Edelson, D., Ganugula, V., Kaneshiro, R., Pigeon, J., Quaintance, B., Riesz, J., and Stringer, N. (2019). Transformation of the Grid: The Impact of Distributed Energy Resources on Bulk Power Systems *IEEE Power and Energy Magazine*, 17, 35–45.

REN21 (2022). Renewables 2022 global status report, paris. https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2022_Full_Report.pdf. Acessado: 6 de setembro de 2022.

Rey, M., Oca, S. M., Giusto, Á., and Vignolo, M. (2018). Distributed Generation and Demand Response Effects on the Distribution Network Planning. In *2018 IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exhibition - Latin America (T&D-LA)*. 1-5.

Zain ul Abideen, M., Ellabban, O., and Al-Fagih, L. (2020). A review of the tools and methods for distribution networks hosting capacity calculation. *Energies*, 13.

Zhang, C., Li, J., Zhang, Y. J., and Xu, Z. (2018). Optimal Location Planning of Renewable Distributed Generation Units in Distribution Networks: An Analytical Approach *IEEE Transactions on Power Systems*, 33, 2742–2753.