LVI SBPO SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL
DE 04 ATÉ 07 NOVEMBRO 2024
FORTALEZA | CEARÁ

Otimização da capacidade de hospedagem por meio da alocação ótima de reguladores de tensão utilizando algoritmo genético

Gabriel Henrique Santos de Oliveira, Wandry Rodrigues Faria, Benvindo Rodrigues Pereira Junior
Universidade de São Paulo
Av. Trab. São Carlense, 400 - São Carlos
{gabrielhs.oliveira, wandry, brpjunior}@usp.br

RESUMO

Este artigo tem como objetivo apresentar uma metodologia de otimização para determinar a alocação ótima de reguladores de tensão (RTs) em sistemas elétricos de potência, visando maximizar a capacidade de hospedagem. Um algoritmo genético foi desenvolvido para minimizar as violações e o custo de instalação dos RTs, validando a eficácia da metodologia por meio de simulações em um sistema real de 135 barras. Os resultados demonstram que o algoritmo genético encontra soluções ótimas que maximizam a CH do sistema. Este artigo destaca a importância dos reguladores de tensão para melhora do perfil de tensão e mitigação das violações em sistemas elétricos, o que contribui para o aumento da estabilidade e confiabilidade do sistema.

PALAVRAS CHAVE. Capacidade de Hospedagem, Alocação Ótima de Reguladores de Tensão, Algoritmo Genético.

Tópicos: EN&PG - Energia, Óleo e Gás, MH - Metaheurísticas.

ABSTRACT

The aim of this article is to present an optimization methodology for determining the optimum allocation of voltage regulators (RTs) in electrical power systems, in order to maximize hosting capacity. A genetic algorithm was developed to minimize violations and the cost of installing RTs, validating the effectiveness of the methodology through simulations on a real system of 135 bars. The results show that the genetic algorithm finds optimal solutions that maximize the system's CH. This article highlights the importance of voltage regulators in improving the voltage profile and mitigating violations in electrical systems, which contributes to increasing system stability and reliability.

KEYWORDS. Hosting Capacity, Optimal Allocation of Voltage Regulators, Genetic Algorithm.

Paper topics: EN&PG - Energy, Oil and Gas, MH - Metaheuristics.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193331
https://proceedings.science/p/193331?lang=pt-br

1. Introdução

A diversificação da matriz energética, o surgimento do mercado atacadista de energia e as preocupações ambientais, no que tange os novos modos de produção de energia limpa, são alguns dos principais motivos para o aumento da implantação e utilização de geração distribuída (GD) [Bollen e Hassan, 2011; Schwanz et al., 2017]. Mesmo que o objetivo primário da utilização de GDs seja a injeção de energia nos sistemas elétricos, a alocação e controle estratégicos destas unidades podem proporcionar benefícios à rede tais como, o aumento da confiabilidade, aredução das perdas e a melhora do perfil de tensão do sistema. [Adefarati e Bansal, 2016]

As principais fontes primárias de energia utilizadas por geradores distribuídos são renováveis, a destacar a solar e a eólica. Estas possuem menor impacto ambiental e social na sua instalação e, com incentivos governamentais e o desenvolvimentos de novas tecnologias, houve uma redução do seu custo de implantação [Silva, 2017]. Contudo, ambas possuem algumas características peculiares, como a intermitância de sua geração, o que ocasiona grandes variações de injeção de potência na rede ao decorrer do dia.

No Brasil, houve um acréscimo considerável na inserção de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFVs) por meio da resolução normativa 482/2012 [ANEEL, 2012], a qual definiu regulamentação e incentivo para a instalação de sistemas com potência inferior a 75 kW , quando conectados à baixa tensão, e inferior a 5 MW quando conectados à média tensão, permitindo os consumidores a gerarem energia elétrica em seus próprios estabelecimentos, sendo o excedente injetado na rede elétrica local. Este aumento da inserção pode tornar-se problemático se o nível de penetração dos sistemas fotovoltaicos exceder a capacidade de hospedagem de GD do sistema [Torquato et al., 2018].

O módulo 8 do PRODIST estipula os limites mínimos de indicadores da qualidade da energia elétrica, como a magnitude da tensão em regime permanente, o fator de desequilíbrio e as componentes harmônicas [ANEEL, 2018]. O não cumprimento dos requerimentos apresentados no PRODIST por parte das empresas concessionárias pode levar a sanções em formas de multas. Para assegurar que os parâmetros de qualidade de energia permaneçam dentro das faixas estabelecidas, são utilizados dispositivos que realizam o controle da tensão, da potência reativa e do fator de potência, por exemplo.

Em geral, a tarefa de regulação de tensão é dependente de muitas variáveis, pois os sistemas de distribuição e seus alimentadores possuem uma topologia complexa, além de necessitar de uma escolha adequada dos tipos de dispositivos e suas respectivas localizações. Com isso, esta análise é combinatorial, dependente de variáveis inteiras e contínuas e restrições não lineares [SZUVOVIVSKI, 2008], o que torna imprescindível o desenvolvimento de ferramentas computacionais que auxiliem o operador em suas tomadas de decisão. Em resumo, pode-se subdividir esta tarefa em dois subproblemas:

- Planejamento: No qual busca-se otimizar a instalação, além de informar os parâmetros para o ajuste do equipamento;
- Operação: Visa coordenar a atuação deste dispositivo em conjunto com o restante do sistema, após a sua alocação.

Tendo em vista estas informações, este artigo se concentra no subproblema de planejamento, buscando determinar os melhores locais para a alocação dos reguladores de tensão (RTs), visando melhorar o perfil de tensão no sistema.

A alocação ótima de RTs no sistema de distribuição é dependente de alguns fatores, como a localização do ponto do sistema em que são inseridos, a sua capacidade de condução de corrente e dos ajustes do dispositivo (escolha dos taps). Assim, este trabalho visa desenvolver uma ferramenta

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193331
https://proceedings.science/p/193331?lang=pt-br

baseada em Algoritmo Genético (AG) para a maximização da capacidade de hospedagem de GD e melhoria de indicadores de qualidade de sistemas de distribuição a partir da alocação de RTs.

2. Metodologia Proposta

A proposta apresentada neste trabalho tem como objetivo a maximização da capacidade de hospedagem de GD de um sistema de distribuição a partir da instalação de RTs ao longo do alimentador. Neste sentido, é necessário determinar qual a capacidade de hospedagem de GDs apresentada pela rede antes e depois da alocação de RTs. Assim, antes de apresentar o método de solução do problema de maximização da capacidade de hospedagem de GDs é necessário estabelecer o modelo de cáculo da capacidade de hospedagem de GDs de um sistema de distribuição.

A literatura específica apresenta múltiplas formulações para estabelecer a capacidade de hospedagem de GD de um sistema elétrico. Assim, faz-se necessário apresentar qual o método adotado neste trabalho. Além disso, apresenta-se nesta seção o modelo de RTs empregado e o fluxograma do processo adotado para a determinação da capacidade de hospedagem de GD do sistema de distribuição.

2.1. Modelo de Capacidade de Hospedagem de GD Adotado

A capacidade de hospedagem de GD é definida como o índice de desempenho do sistema elétrico ao acomodar geração distribuída, sem desrespeitar os indicadores de qualidade da energia, além de não prejudicar a operação dos componentes da rede elétrica. Em geral, a capacidade de hospedagem de GD é definida em termos do grau de penetração de geração distribuída máximo que não causa a violação de limites operacionais pré-definidos. Neste trabalho, a capacidade de hospedagem de GD é definida conforme:.

$$CH = \frac{Pot_{GD}}{S_T} \tag{1}$$

Sendo CH a capacidade de hospedagem de GD do sistema, Pot_{GD} a potência instalada de GD que não causa a violação dos limites pré-estabelecidos, e S_T a demanda total do sistema. Além disso, o grau de penetração de GD é definido como o quociente entre a potência de GD instalada e a demanda total do sistema, i.e., o lado direito da igualdade da equação (1).

Os trabalhos encontrados na literatura podem ser divididos em dois grupos quanto à forma de determinação do ponto de conexão da GD. Enquanto alguns trabalhos, como o de [Lima e Freitas, 2022], consideram o aumento do grau de penetração a partir da inserção e aumento da capacidade de um único gerador instalado num ponto do sistema de distribuição, outros autores, como [Torquato et al., 2018], consideram a alocação pulverizada das unidades geradoras, ou seja, as localizações das unidades geradoras são escolhidas aleatoriamente entre as barras do sistema. Desta forma, o primeiro método tem como resultado a capacidade de acomodação de GD de um nó do sistema desconsiderando o efeito da inserção de geradores em outros pontos. O método adotado neste trabalho está em linha com o segundo grupo de autores.

Além da alocação dos geradores distribuídos, os trabalhos encontrados na literatura apresentam critérios distintos para o cálculo da capacidade de hospedagem de GD em um sistema de distribuição. Embora seja comum a consideração da magnitude da tensão, desequilíbrio de tensão, magnitude da corrente, carregamento de transformadores e fluxo reverso de potência, a capacidade de hospedagem de GD em geral é limitada pela variação da magnitude das tensões nodais [Abad et al., 2018].

Neste artigo, considerou-se a magnitude da tensão em regime permanente e o fator de desequilíbrio, os quais são apresentados a seguir segundo as definições e limiares toleráveis pelo módulo 8 do PRODIST [ANEEL, 2018], para calcular a capacidade de hospedagem de GD no sistema. Assim, a capacidade de hospedagem de GD em um sistema de distribuição é definida neste

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193331
https://proceedings.science/p/193331?lang=pt-br

trabalho como o maior grau de penetração, obtido a partir da alocação pulverizada de geradores distribuídos, que não causa a violação dos limiares de magnitude de tensão e desequilíbrio de tensão.

2.1.1. Magnitude da Tensão em Regime Permanente

O PRODIST define três patamares de qualidade baseado na magnitude da tensão do ponto de conexão: adequada, precária e crítica. Os limiares da faixa adequada, considerando que a tensão nominal seja superior a 1 kV e inferior a 69 kV, são definidos como:

$$0,93 \leq V \leq 1,05 \tag{2}$$

sendo V a magnitude da tensão, em p.u., medida no ponto de conexão de uma unidade consumidora.

2.1.2. Desequilíbrio de Tensão

O desequilíbrio de tensão é um distúrbio de qualidade da energia caracterizado pela diferença entre os valores de magnitude das tensões fase-neutro e/ou defasagem diferente de 120º, em um sistema trifásico.

Os desequilíbrios de tensão afetam fortemente os sistemas de distribuição e, em geral, estão relacionados ao tipo de carga e ao seu correspondente arranjo no sistema. Uma das principais causas é a alocação de cargas monofásicas e trifásicas desequilibradas, sobretudo cargas especiais, como fornos à arco e equipamentos de solda. O fator de desequilíbrio (FD) pode ser calculado como segue.

$$FD\% = \frac{V^-}{V^+} \cdot 100 \tag{3}$$

Sendo V^- e V^+ as componentes de sequência negativa e positiva da tensão, respectivamente, calculadas em cada barra do sistema. O módulo 8 do PRODIST determina que, para sistemas com tensão nominal entre 2,3 kV e 230 kV, o FD não deve ultrapassar 2% [ANEEL, 2018].

2.2. Reguladores de Tensão

Os reguladores de tensão são dispositivos amplamente utilizado em sistemas de distribuição e com custo de aquisição relativamente baixo. Estes equipamentos sãocompostos por um autotransformador com tap é variável que, em geral, é ajustado para a manutenção da magnitude da tensão de um dos terminais dentro dos limiares tolerados pelas agências reguladoras.

As características apresentadas possibilitam utilizar os reguladores de tensão para mitigar eventos de desequilíbrio de tensão, visto que os taps dos reguladores de tensão podem ser definidos individualmente para cada fase. Assim, um evento de desequilíbrio de tensão devido às diferenças de magnitude das tensões fase-neutro pode ser eliminado através da determinação dos taps do regulador de tensão conforme ilustrado na Figura 1. Neste trabalho, os reguladores de tensão são utilizados tanto para garantir a adequação aos limites de magnitude de tensão nodal quanto de fator de desequilíbrio.

2.3. Fluxograma do Processo

O processo de otimização da capacidade de hospedagem de GD proposto neste artigo pode ser dividido em três grandes etapas: inicialização, verificação e otimização, conforme ilustrado na Figura 2. Durante a primeira etapa são carregados os dados do sistema de distribuição e alocados geradores distribuídos em um percentual das barras do sistema, sorteadas de forma aleatória (a quantidade de barras é definida pelo usuário). Na segunda etapa, determina-se a capacidade de base hospedagem de GD do sistema base, i.e., sem a alocação de qualquer equipamento adicional. Por fim, a etapa 3 trata da aplicação de um AG para maximização da capacidade de hospedagem de GD do sistema, obtida através da alocação de reguladores de tensão em pontos estratégicos da rede para eliminar ou mitigar eventos de sobretensão/subtensão e desequilíbrio de tensão. Cabe destacar que detalhes sobre a estrutura do AG empregado neste trabalho são fornecidos na próxima seção.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193331
https://proceedings.science/p/193331?lang=pt-br

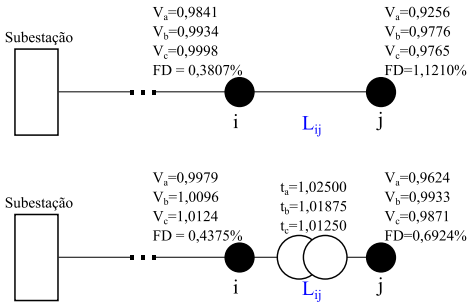


Figura 1: Ilustração do Impacto da Operação do Regulador de Tensão na Magnitude da Tensão e no Fator de Desequilíbrio.

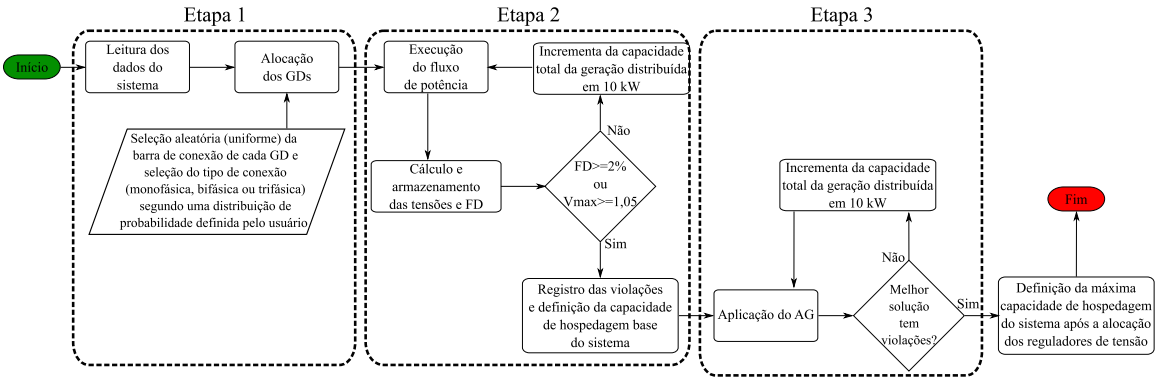


Figura 2: Fluxograma do Processo de Otimização Proposto.

3. Método de Solução do Problema de Otimização

O problema de otimização proposto possui como restrições as equações não-lineares que definem o estado operativo da rede, i.e., as equações de fluxo de potência. Além disso, a intervenção considerada para maximizar a capacidade de hospedagem é a alocação de reguladores de tensão, que é representada matematicamente através de variáveis binárias que indicam a presença ou ausência destes equipamentos nas linhas da rede. Portanto, o problema apresenta como características a não-linearidade de algumas restrições e a presença de variáveis discretas, o que faz deste um problema extremamente difícil de se resolver utilizando *solvers* comerciais. Neste contexto, optou-se pelo uso de uma metaheurística para encontrar soluções de boa qualidade para o problema de otimização em questão.

Neste artigo foi empregado o AG para a solução do problema de otimização, visto que esta é uma metaheurística bastante utilizada em problemas de grande porte especialmente quando as variáveis de decisão apresentam natureza discreta [Goldberg, 1989]. Nas subseções seguintes são apresentados o modelo de codificação e os operadores genéticos que foram utilizados na implementação do AG.

3.1. Codificação dos Indivíduos

Considerando a natureza tipicamente radial da topologia operativa das redes de distribuição, codifica-se um possível indivíduo como um vetor X de dimensão $n-1$, sendo n a quantidade de barras do sistema. Assim, o vetor tem dimensão igual à quantidade de linhas do sistema de distribuição e cada índice do vetor recebe um valor binário (i.e. $X_i \in \{0,1\}\ \forall i \in [0,1,..,n-1]$), que representa a presença, caso 1, ou ausência, caso 0, de um RT nesta linha. Uma ilustração da codificação de um indivíduo, e seu significado físico, é apresentada na Figura 3.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193331
https://proceedings.science/p/193331?lang=pt-br

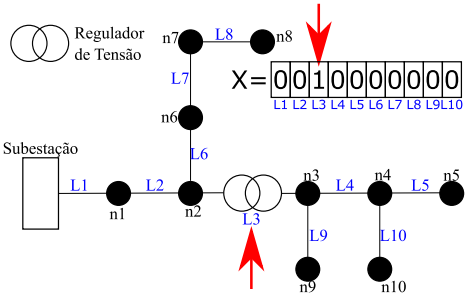


Figura 3: Ilustração da Codificação dos Indivíduos Adotada.

3.2. Operadores Genéticos

Os AGs exploram o espaço de busca a partir da aplicação de operadores genéticos, como a seleção de indivíduos, o cruzamento e a mutação, às soluções correntes (i.e., população atual). A princípio os operadores realizam uma avaliação dos indivíduos e, após isso, gera um processo de evolução natural, até encontrar um indivíduo que satisfaça a característica imposta pelo problema, sendo ou não a solução ótima.

3.2.1. Seleção

O operador de seleção baseia-se no processo de seleção natural, considerando os indivíduos com melhores *fitness*/APTIDÃO (estabelecidas pela função de avaliação), apresentam maior probabilidade de serem selecionados. Neste trabalho utilizou-se o torneio, no qual uma quantidade de n cromossomos são escolhidos aleatoriamente da população atual. O cromossomo com maior *fitness* entre eles é escolhido para compor a próxima população, e os não escolhidos são retornados à população atual. O processo se repete até que a nova população seja completada.

3.2.2. Cruzamento

Este operador é responsável por utilizar os indivíduos selecionados por meio do torneio como os pais para a geração seguinte, sendo que, no fim da aplicação deste operador, a geração nova substitui a geração anterior completamente.

3.2.3. Mutação

Este operador visa aumentar a diversidade genética entre os indivíduos. A mutação é realizada de forma aleatória e é realizada após a etapa de cruzamento, propiciando o surgimento de características nunca antes vistas ou existentes em pequenas quantidades, o que dificulta a estagnação da busca em ótimos locais. Um resumo sobre a aplicação dos operadores genéticos é apresentada na Figura 4.

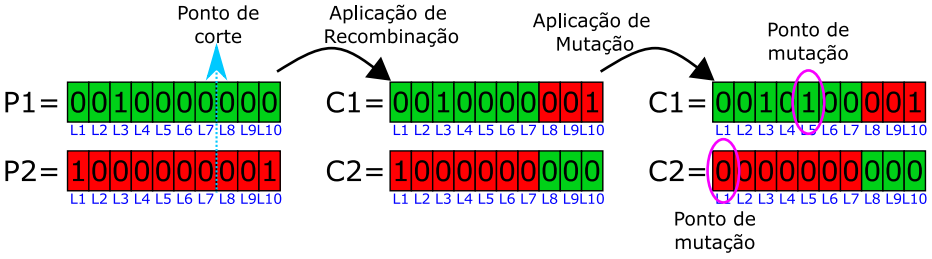


Figura 4: Ilustração dos Operadores Genéticos Considerados.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193331
https://proceedings.science/p/193331?lang=pt-br

4. Resultados

4.1. Sistema de 135 Barras

Neste artigo, utiliza-se um sistema de 135 barras real, ilustrado na Figura 5, com tensão nominal 13,8 kV. A demanda ativa total do sistema é 6,5 MW enquanto a demanda reativa é 2,7 MVar. Originalmente, o sistema apresenta apenas cargas trifásicas e equilibradas, conforme disponível em UNESP [2016]. No entanto, modificações foram feitas de forma que os dados utilizados neste trabalho podem ser encontrados em [Oliveira et al., 2024].

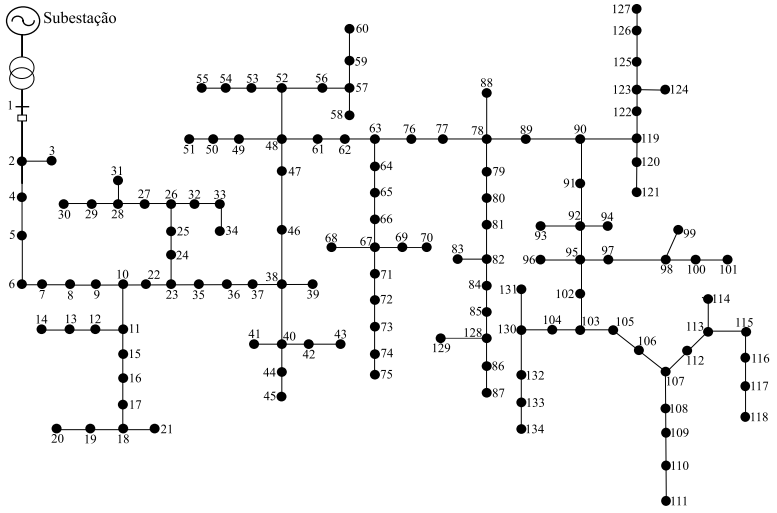


Figura 5: Sistema Teste de 135 Barras

4.2. Cenário 1: Sistema equilibrado e alocação de geradores com probabilidades iguais por fase

Para este estudo, foram utilizados os dados originais do sistema disponíveis em UNESP [2016]. Neste cenário operativo, o sistema apresenta menor tendência de apresentar violações, apresentando um baixo fator de desequilíbrio, devido às cargas equilibradas, e menor variação de tensão entre as barras mais próximas à subestação e as barras mais distantes, como verificado na Figura 6.

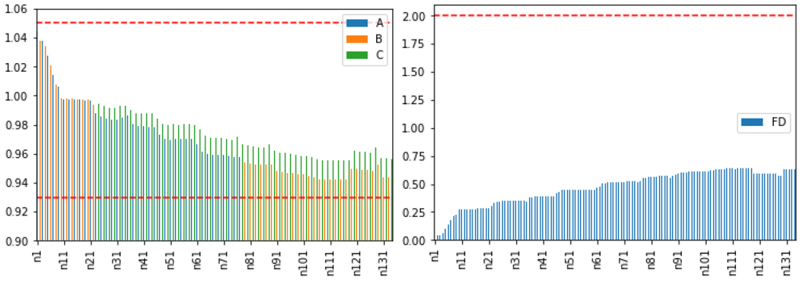


Figura 6: Cenário 1 –sem a Alocação de Reguladores ou Geradores.

Este seria cenário operativo ideal de um sistema elétrico. Desta forma, é possível avaliar como a inserção de GD alteraria seu perfil de tensão e os parâmetros de qualidade energia. Assim, utilizou-se a distribuição dos geradores como 60% monofásicos, 30% bifásicos e 10% trifásicos, com probabilidades de conexão para cada fase iguais, conforme descrito na Tabela 1, além da

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193331
https://proceedings.science/p/193331?lang=pt-br

potência nominal de cada gerador igual a 100 kW. O resultado do algoritmo de alocação está evidenciado na Tabela 2, que exprime a posição e as respectivas fases dos 31 geradores alocados no sistema (quantidade que equivale a, aproximadamente, 20% das barras do sistema).

Tabela 1: Probabilidade de Conexão dos Geradores por Fase para o Cenário 1

Fases do Gerador	Probabilidade de Conexão
A	20%
B	20%
C	20%
AB	10%
AC	10%
BC	10%
ABC	10%

Tabela 2: Relação Entre os Geradores e as Fases em Que Foram Alocados para o Cenário 1

Geradores/Fase		Geradores/Fase	
Barra Escolhida	Fase Escolhida	Barra Escolhida	Fase Escolhida
4	B	61	A
6	B	64	C
11	C	82	AC
13	BC	83	C
16	AB	89	AB
20	B	96	BC
26	C	97	B
29	AB	101	AC
32	B	102	C
40	A	108	AC
44	BC	113	BC
46	AC	117	A
50	C	124	C
53	C	131	C
57	AC	132	BC

Após realizar a alocação dos geradores nas posições descritas anteriormente, aplicou-se o algoritmo para incremento da potência de cada gerador, até o valor de 190 kW por gerador, momento em que houve a primeira violação, que ocorreu com penetração de GD igual a 91%. Segundo a Figura 7, houve uma elevação considerável nas tensões de fase, em especial na fase C, além de um aumento do fator de desequilíbrio, o qual foi responsável pela violação por superior o valor de 2%.

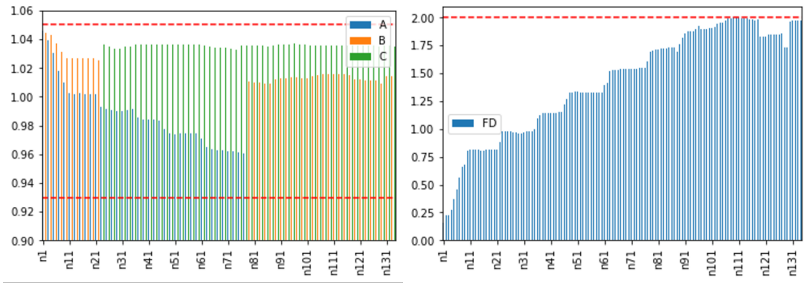


Figura 7: Cenário 1 –sem a Alocação de Reguladores e com 91% de Penetração de GD.

Após o surgimento da primeira violação, o AG realizou a busca das melhores posições

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193331
https://proceedings.science/p/193331?lang=pt-br

para alocar o RT, visando maximizar a capacidade de hospedagem de GD do sistema. Neste caso, como o sistema apresentou uma elevada capacidade de hospedagem antes da alocação do regulador, houve múltiplas soluções que apresentaram resultados equivalentes. Assim, considerou-se a alocação do regulador entre as barras 10 e 22, por ser uma barra próxima ao início do sistema e que pode influenciar em uma grande parte deste.

É possível notar uma grande diminuição do FD no sistema, além da redução das tensões de fase, conforme a Figura 8. Em seguida, o AG realizou novamente o incremento da potência dos geradores, resultando em uma capacidade de hospedagem de GD de 100%, conforme a Figura 9.

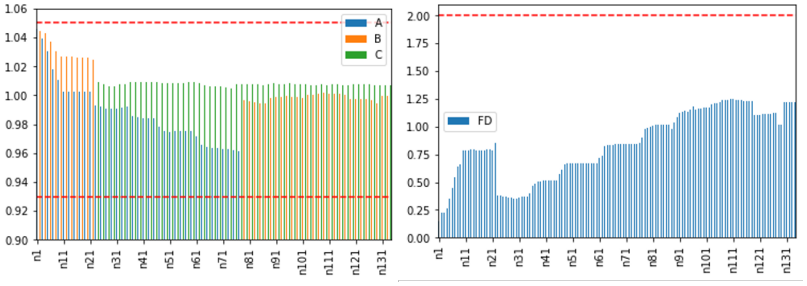


Figura 8: Cenário 1 –com a Alocação de 1 Regulador e 91% de Penetração de GD.



Figura 9: Cenário 1 –com a Alocação de 1 Regulador e com 100% de Penetração de DG.

4.3. Cenário 2: Sistema desequilibrado e alocação de geradores com probabilidades diferentes por fase

Para este estudo, foram utilizados os dados do sistema alterado, disponíveis em [Oliveira et al., 2024]. Neste cenário operativo, o sistema utilizado apresenta maior tendência de apresentar violações, pois como as suas cargas são desbalanceadas, mesmo sem a alocação de geradores, há um maior fator de desequilíbriom sendo que a fase C apresenta tensões próximas ao valor mínimo estipulado pela norma, nas barras mais distantes do sistema, conforme ilustrado na Figura 10.

Como neste cenário o objetivo é avaliar o comportamento do sistema frente a um alto desbalanço de carga e de potência injetada. A probabilidade de conexão manteve a distribuição dos geradores como 60% monofásicos, 30% bifásicos e 10% trifásicos, contudo, com uma proporção maior de geradores nas fases B e C, conforme apresentado na Tabela 3, mas ainda mantendo a potência inicial de 100 kW. A alocação dos 12 geradores está descrita na Tabela 4 (quantidade que equivale a, aproximadamente, 10% das barras totais).

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193331
https://proceedings.science/p/193331?lang=pt-br

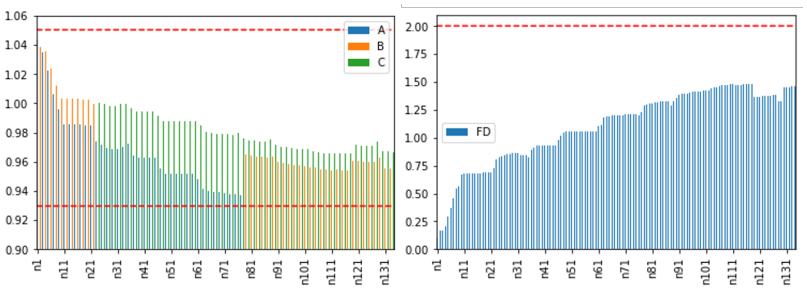


Figura 10: Cenário 2 –sem a Alocação de Reguladores ou Geradores.

Tabela 3: Probabilidade de Conexão dos Geradores por Fase para o Cenário 2

Fase do Gerador	Probabilidade de Conexão
A	10%
B	15%
C	35%
AB	5%
AC	5%
BC	20%
ABC	10%

Tabela 4: Relação entre os geradores e as fases em que foram alocados para o cenário 2

Geradores/Fase		Geradores/Fase	
Barra Escolhida	Fase Escolhida	Barra Escolhida	Fase Escolhida
23	B	96	C
38	A	98	BC
67	BC	102	B
74	C	104	A
89	C	106	B
92	BC	108	BC

Após a alocação dos geradores nas posições descritas na Tabela 4, aplicou-se o algoritmo para aumento da potência de cada gerador, até o momento de ocorrência da primeira violação. Dessa forma, obteve-se a capacidade de hospedagem de GD do sistema sem a alocação de reguladores, cujo valor foi de 1270 kW, sendo equivalente a uma penetração de 19,5% de GD no sistema. Conforme a Figura 11, houve uma elevação dos valores de tensão em regime permanente e ocorreu uma violação causada por fator de desequilíbrio elevado.



Figura 11: Cenário 2 –sem a Alocação de Reguladores e com 19,5% de Penetração de GD.

Após a aplicação do AG, encontrou-se a melhor posição para a alocação do RT, visando maximizar a capacidade de hospedagem de GD do sistema. O RT foi alocado entre as barras 46

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193331
https://proceedings.science/p/193331?lang=pt-br

e 47, resultando em uma melhora do perfil de tensão e diminuição do FD do sistema, conforme expresso na Figura 12.



Figura 12: Cenário 2, Com Alocação de 1 Regulador e 19,5% de Penetração .

Dessa forma, como não havia mais violações, o algoritmo aumentou a potência dos geradores até o momento que uma nova violação ocorreria. Esta surgiu quando a GD apresentou penetração de 64,6% no sistema, valor este da nova capacidade de hospedagem do sistema, equivalente a 4200 kW, distribuidos em cerca de 350 kW por cada um dos 12 geradores. É válido ressaltar que a violação apresentada teve como causa a sobretensão nas primeiras barras do sistema, conforme mostrado na Figura 13.

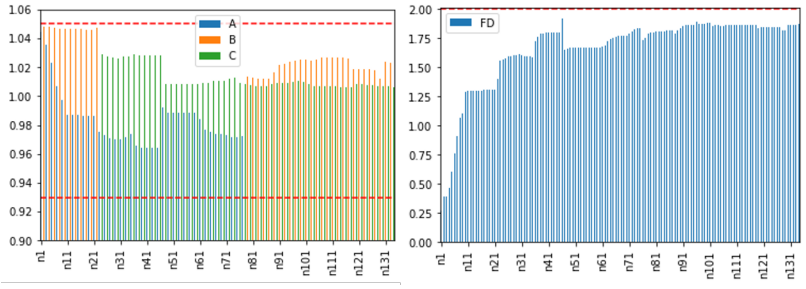


Figura 13: Cenário 2 –com a Alocação de 1 Regulador e com 64,6% de Penetração de GD.

5. Conclusões

Os resultados obtidos neste artigo demonstram que o AG é um método eficaz para a alocação de RTs em sistemas de distribuição. O algoritmo proposto foi validado para o sistema real de 135 barras, propriciando um aumento significativo da capacidade de hospedagem do sistema.

Para o cenário 1, a capacidade de hospedagem de GD inicial é de 5920 kW, equivalente a uma penetração de GD de 91% no sistema elétrico. A instalação do RT na barra 22 possibilita que a capacidade de hospedagem de GD do sistema aumente para 6500 kW, tornando-a igual a demanda ativa total do sistema.

Para o cenário 2, como tanto as cargas quanto as conexões dos geradores são desequilibradas, a capacidade de hospedagem de GD inicial do sistema é 1270 kW, o que equivale a uma penetração de 19,5%. A alocação de um RT entre as barras 46 e 47 melhora o perfil de tensão do sistema, diminuindo acentuadamente o fator de desequilíbrio, permitindo que a capacidade de hospedagem de GD do sistema aumente para 4200 kW, o que equivale a uma penetração de GD de 64,6%.

É notório que estes resultados expressam a importância da alocação estratégica dos RTs, garantindo estabilidade aos sistemas elétricos de potência, frente à inserção de GD. Outrossim, os

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193331
https://proceedings.science/p/193331?lang=pt-br

resultados evidenciam que o AG apresenta-se como uma ferramenta valiosa para os profissionais que realizam planejamento e operação de sistemas elétricos, para mitigar ou eliminar violações dos parâmetros de qualidade e operação que possam surgir.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) sob o processo 408464/2023-2.

Referências

Abad, M. S. S., Ma, J., Zhang, D., Ahmadyar, A. S., e Marzooghi, H. (2018). Integration of renewable distributed generators into the distribution system: a review. *IEEE TRANSACTIONS ON SUSTAINABLE ENERGY*, 9:1935–1947.

Adefarati, T. e Bansal, R. (2016). Probabilistic assessment of hosting capacity in radial distribution systems. *IET Renewable Power Generation*, 9:873–884.

ANEEL. *"Resolução Normativa 482/2012"*. Distrito Federal, 2012.

ANEEL. *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Naciona - PRODIST*. Distrito Federal, 2018.

Bollen, M. e Hassan, F. (2011). *Integration of Distributed Generation in the Power System*. Addison-Wesley Professional, New York.

Goldberg, D. E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison-Wesley Professional, Boston.

Lima, E. J. e Freitas, L. C. G. (2022). Hosting capacity calculation deploying a hybrid methodology: A case study concerning the intermittent nature of photovoltaic distributed generation and the variable nature of energy consumption in a medium voltage distribution network. *Energies*, 15: 1223.

Oliveira, G. H., Faria, W. R., e Pereira Jr., B. R. (2024). Conjunto de Dados Modelagem do Sistema de 135 Barras. URL `https://doi.org/10.5281/zenodo.13743738`.

Schwanz, D., Moller, F., Ronnberg, S. K., Meyer, J., e Bollen, M. H. J. (2017). Stochastic assessment of voltage unbalance due to singlephase-connected solar power. *IEEE Trans. Power Del*, 32:852–861.

Silva, F. M. (2017). Contribuições para a análise de capacidade de hospedagem em sistemas elétricos de potência. Master's thesis, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil.

SZUVOVIVSKI, I. (2008). Alocação simultânea de bancos de capacitores e reguladores de tensão em sistemas de distribuição usando algoritmos genéticos e fluxo de potência Ótimo. Master's thesis, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil.

Torquato, R., Salles, D., Pereira, C. O., Meira, P. C. M., e Freitas, W. (2018). A comprehensive assessment of pv hosting capacity on low-voltage distribution systems. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, 33:1002–1012.

UNESP (2016). Unesp - download de sistemas teste. `https://www.feis.unesp.br/#!/departamentos/engenharia-eletrica/pesquisas-e-projetos/lapsee/downloads/materiais-de-cursos1193/`. Acessado: 2024-05-02.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193331
https://proceedings.science/p/193331?lang=pt-br