

METODOLOGIA BASEADA EM MAPEAMENTO DE COMBINAÇÕES PARA AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE ACOMODAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO

Leonardo Jaime Machado Simões; Olga Moraes Toledo; Danielly Norberto Araujo; Ana Tereza Andrade Borba; Lucas do Espírito Santo Fernandes

Iniciação Tecnológica – Centro de Competências de Sistemas Elétricos; leonardo.simoes@fbest.org.br
Centro Universitário SENAI CIMATEC; Salvador-BA; lucas.fernandes@fieb.org.br

RESUMO

O artigo descreve um algoritmo para calcular a Capacidade de Acomodação (HC) de redes de distribuição com recursos energéticos distribuídos (REDs), com foco em sistemas fotovoltaicos. O HC representa o nível máximo de penetração desses recursos que a rede pode suportar sem ultrapassar os limites de violação. O algoritmo utiliza uma metodologia de mapeamento de combinações para identificar os barramentos de carga e as possibilidades de inserção de sistemas fotovoltaicos. Os índices de desempenho avaliados foram sobretensão e sobrecarga de linha, e a metodologia utilizou uma combinação simples. A simulação foi realizada utilizando o software OpenDSS e a biblioteca py-dss-interface do Python, e os resultados mostraram que o algoritmo é eficiente em determinar o HC. O estudo também revelou que inserções de sistemas FV em diferentes barramentos podem trazer resultados distintos, o que pode ser útil para a concessionária de energia realizar uma melhor gestão da rede de distribuição.

PALAVRAS-CHAVE: Capacidade de Acomodação, Recursos Energéticos Distribuídos, Sistemas Fotovoltaicos.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, uma mudança de paradigma tem ocorrido na maneira em que os Sistemas Elétricos de Potência (SEP) são planejados e operados devido à crescente implementação de tecnologias de baixo carbono na geração, transmissão, distribuição e no consumo de energia elétrica¹. Entre essas tecnologias, os REDs têm ganhado destaque, tendo em vista que englobam os conceitos da descarbonização, digitalização e descentralização do setor elétrico, que são pilares essenciais para a transição energética dos setores econômicos². Um RED pode ser definido como um elemento de geração e/ou armazenamento conectado à rede elétrica³. Geralmente, essa tecnologia está localizada antes do medidor (behind-the-meter) e instalada próximos aos consumidores de energia elétrica⁴. Entre os REDs, os sistemas Fotovoltaicos (FV) estão sendo amplamente implementados para conversão de energia solar em energia elétrica de forma distribuída e descentralizada⁵.

A partir da massiva inserção de sistemas FV nas redes elétricas, o planejamento e a operação de sistemas elétricos têm se tornado cada vez mais complexos. Além disso, a depender do nível de penetração FV nas redes elétricas, diferentes violações na rede ocorrem, tais como sobrecarga e sobretensão⁶. A fim de mensurar esses impactos, deve ser avaliada a capacidade de acomodação da rede elétrica (HC, do inglês Hosting Capacity), a partir da avaliação dos índices de desempenho associados. A capacidade de acomodação se refere ao nível máximo de penetração do RED que pode ser acomodado em uma rede de distribuição sem gerar violações⁷. Acerca dos índices, podem ser divididos em: problemas de tensão, sobrecarga e harmônicas, por exemplo. Estes, são importantes para o cálculo de HC, pois são a partir deles que são identificadas as violações dos limites suportados pelas redes elétricas⁶.

Diante disso, o presente artigo tem como objetivo apresentar um algoritmo de HC baseado em uma metodologia de mapeamento de combinações, que inspeciona e identifica os barramentos com carga de uma rede de distribuição e, por meio de análise combinatória, mapeia as possibilidades de inserção de sistemas FV e determina o HC do RED em todos os cenários avaliados. Para isso, o software OpenDSS foi utilizado e integrado a biblioteca py-dss-interface do Python.

2. METODOLOGIA

Para a realização da simulação, além da utilização do *software* OpenDSS e do Python, supracitada, foram utilizados os alimentadores de teste IEEE 13 barras e IEEE 34 barras, para a modelagem, simulação e avaliação do HC, a partir da inserção de sistemas FV. Em relação à escolha dos índices de desempenho, são considerados sobretensão nos barramentos e sobrecarga nas linhas.

No que concerne a metodologia de mapeamento de combinações, mencionada na seção anterior, é utilizada a combinação simples, que a partir de um conjunto de elementos, cria diferentes subconjuntos, de menor tamanho, a fim de avaliar todas as possibilidades de associação possíveis, sem considerar a ordem⁸. Para a análise do HC da rede a partir da inserção de REDs, o conjunto de elementos para a aplicação do cálculo de combinação simples são os barramentos da rede que possuem carga e que são trifásicos. Sendo

ISSN 0805-2010 – Anuário de resumos expandidos apresentados no VIII SAPCT - SENAI CIMATEC, 2023

assim, os subconjuntos são formados pelas diferentes combinações desses barramentos, tendo como finalidade mapear diferentes inserções de sistemas FV, com a quantidade de elementos variando de acordo com o número de barras em que serão inseridos os REDs simultaneamente. Com o objetivo de reduzir o consumo de recursos computacionais e otimizar as simulações, foi estabelecido um limite máximo de cinco sistemas FV que podem ser inseridos simultaneamente.

Para a modelagem do sistema, são considerados um percentual de carga de 40%, bem como fator de potência unitário, tanto para o IEEE 13 barras quanto para o 34 barras, com a finalidade de simular o momento de pico de irradiação solar. No que diz respeito aos limites máximos da rede para o desenvolvimento do algoritmo, a condição de sobrecarga é a ultrapassagem da capacidade nominal total das linhas, modeladas pelo OpenDSS, enquanto a sobretensão tem o limiar máximo definido pelo módulo 8 do PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional), de 105% da capacidade nominal⁹. No que se refere à quantificação do HC, é realizada iterativamente, considerando um passo incremental de potência do sistema FV de 10 kW.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da execução do algoritmo, foram quantificadas as barras que foram selecionadas de acordo com os critérios citados na metodologia. Para o IEEE 13 barras foram selecionados cinco barramentos, enquanto para o IEEE 34 barras, foram 19. A avaliação da quantidade de associações possíveis é observada na tabela a seguir.

Tabela 1: Quantificação das combinações possíveis de barramentos, segmentadas pela quantidade de barras em que há inserção concomitante de sistemas FV

Qtd. de Barramentos	1	2	3	4	5
IEEE 13 barras	5	10	10	5	1
IEEE 34 barras	19	171	969	3876	11628

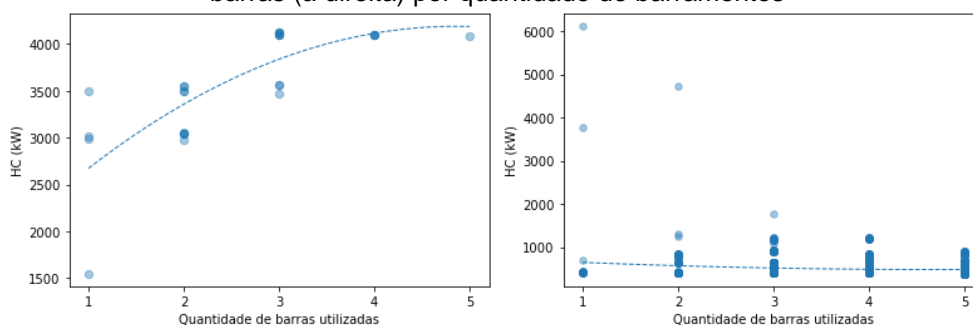
Além disso, foram coletados os dados referentes ao nível de penetração dos sistemas FV na rede, bem como as perdas técnicas totais, além dos índices de desempenho que geraram as violações em cada uma das combinações. Com relação aos índices, foram observados resultados para cada um dos sistemas, como mostrado na tabela a seguir.

Tabela 2: Avaliação de índices de desempenho para o IEEE 13 barras e IEEE 34 barras

Índice de Desempenho	IEEE 13 barras	IEEE 34 barras
Sobrecarga	81%	0%
Sobretensão	19%	100%

Além disso, foi avaliado o comportamento dos valores de potência de sistemas FV, através de gráficos de dispersão, separando os resultados pelo número de barras em que foram inseridos os REDs concomitantemente, como é visto na figura a seguir.

Figura 1: Avaliação do nível de penetração fotovoltaico para o IEEE 13 barras (à esquerda) e IEEE 34 barras (à direita) por quantidade de barramentos



A partir do cruzamento dos dados, é possível observar que o IEEE 13 barras, possui a maioria de suas violações de rede sendo ocasionadas por sobrecarga, além de possuir maior potência FV que o 34 barras, o que demonstra um bom nível de tensão do sistema, bem como uma melhor adaptabilidade,

considerando a sua capacidade de acomodação. Já no IEEE 34 barras, todas as combinações de barramentos testadas apresentaram sobretensão como índice de desempenho, o que mostra um sistema que opera mais próximo do limiar de 105% estabelecido pelo PRODIST.

Quando são observados os valores de potência FV em relação à quantidade de barramentos em que são inseridos os REDs, é visto que há um comportamento oposto para cada um dos sistemas, enquanto no 13 barras, sistemas descentralizados apresentam maior nível de penetração, para o IEEE 34 barras os sistemas centralizados mostram uma maior capacidade de acomodação na rede. Além disso, sistemas centralizados de maneira geral apresentam uma maior dispersão, devido às diferentes características apresentadas em barras distintas do circuito, que são suprimidas quando há um maior número de barramentos.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante do exposto, é inferido que a inserção de recursos energéticos distribuídos (REDs), como os sistemas fotovoltaicos (FV), tem aumentado a complexidade dos sistemas elétricos de potência (SEP). A partir da observação dos resultados, é visto que diferentes inserções de sistemas FV em barramentos distintos apresentam variações nos níveis de penetração do RED e na capacidade de acomodação. Sendo assim, utilizando a metodologia de mapeamento de combinações, a concessionária de energia está apta a entender todas as possibilidades de inserção de REDs e pode realizar uma otimização nos planejamentos de reforço de rede, assim efetuando uma melhor gestão da capacidade de acomodação dos sistemas elétricos.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao SENAI CIMATEC pelo apoio financeiro ao Centro de Competência em Sistemas Elétricos.

5. REFERÊNCIAS

- ¹ GUERRERO, Jaysson et al. **Towards a transactive energy system for integration of distributed energy resources: Home energy management, distributed optimal power flow, and peer-to-peer energy trading.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 132, p. 110000, 2020
- ² DI SILVESTRE, Maria Luisa et al. **How Decarbonization, Digitalization and Decentralization are changing key power infrastructures.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 93, p. 483-498, 2018.
- ³ EPE, **Distributed Energy Resources: Impacts on Energy Planning Studies**, 2018.
- ⁴ HARISH, V. S. K. V.; ANWER, Naqui; KUMAR, Amit. **Applications, planning and socio-techno-economic analysis of distributed energy systems for rural electrification in India and other countries: A review.** Sustainable Energy Technologies and Assessments, v. 52, p. 102032, 2022.
- ⁵ GHOSH, Santosh; YADAV, Vinod Kumar; MUKHERJEE, Vivekananda. **Impact of environmental factors on photovoltaic performance and their mitigation strategies—A holistic review.** Renewable Energy Focus, v. 28, p. 153-172, 2019.
- ⁶ DE CILLO MORO, Vinicius; BONADIA, Rodrigo S.; TRINDADE, Fernanda CL. **A Review of Methods for Assessing DER Hosting Capacity of Power Distribution Systems.** IEEE Latin America Transactions, v. 20, n. 10, p. 2275-2287, 2022.
- ⁷ LLIUYACC-BLAS, Ruben; KEPPLINGER, Peter. **Violation-mitigation-based method for PV hosting capacity quantification in low voltage grids.** International Journal of Electrical Power & Energy Systems, v. 142, p. 108318, 2022.
- ⁸ GEBRA JÚNIOR, Osvaldo. **Uma proposta de Sequência Didática para o ensino de Combinações Simples no Ensino Médio através da Resolução de Problemas.** 2016.
- ⁹ AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL: “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8 Qualidade da Energia Elétrica”.