

ALOCAÇÃO OTIMIZADA DE REATORES LINEARES POR MEIO DE ALGORITMOS GENÉTICOS.

MSc Luciano Jorge Menezes¹; Victor Barros dos Santos².

RESUMO

O sistema elétrico de potência é complexo e dinâmico, e o seu correto funcionamento depende do adequado controle dos níveis de tensão em seus barramentos. Caso estes valores estejam fora dos limites aceitáveis pelas normativas vigentes, podem surgir problemas técnicos e financeiros. Sabe-se que a alocação de reatores lineares é uma das técnicas utilizadas para manter os níveis de tensão dentro de limites aceitáveis, pois eles reduzem os valores de tensão quando presentes em uma rede elétrica. Contudo, determinar o local e a potência desses reatores é uma tarefa difícil. Com vistas a contornar este problema tem-se como recurso a aplicação dos algoritmos genéticos. Como consequência, este trabalho apresenta a aplicação de um algoritmo genético para otimizar a alocação de reatores lineares em um sistema elétrico de potência com trinta barras. Esse algoritmo é implementado na linguagem de programação Python, com o auxílio do fluxo de potência de Newton-Raphson, que tem como função obter as tensões para cada um dos indivíduos gerados pelo algoritmo genético.

PALAVRAS-CHAVE: Python, Algoritmo Genético, Alocação Otimizada de Reatores Lineares.

INTRODUÇÃO

Visto que este trabalho está relacionado à temática da qualidade de energia elétrica, é fundamental apresentar uma definição clara neste enfoque. Logo, como consequência, de acordo com a referência [1], a qualidade da energia elétrica se refere a qualquer variação na tensão, corrente ou frequência que possa levar a falhas ou mau funcionamento dos equipamentos elétricos do consumidor.

No que se diz respeito à qualidade da energia elétrica, é possível subdividi-la em três aspectos: qualidade do atendimento, qualidade do serviço e qualidade do produto.

A qualidade do atendimento concentra-se no relacionamento comercial entre a empresa e o cliente. Por sua vez, a qualidade do serviço está intimamente ligada à continuidade no fornecimento de energia elétrica, que de maneira resumida, pode ser exemplificada com possíveis interrupções no fornecimento de energia elétrica [2].

No contexto apresentado, a qualidade do produto é determinada pelas características da forma de onda da tensão fornecida ao cliente. Caso a tensão esteja fora dos padrões em termos de frequência, amplitude, ou apresentar componentes harmônicos distintos da frequência fundamental, é possível concluir que há um problema associado à qualidade do produto [2].

No que tange às normativas brasileiras, têm-se como referência dois órgãos regulamentadores. O primeiro, trata-se dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico (PRODIST), e, complementarmente tem-se os procedimentos de rede, estabelecido pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

O PRODIST, em seu módulo oito, estabelece que o sistema elétrico deve atender aos níveis de tensão de energia elétrica em regime permanente preestabelecidos, os quais são fiscalizados e passíveis de aplicação de multas.

Com o propósito de corroborar as informações mencionadas no parágrafo anterior, apresentam-se a seguir as Tabelas 1, 2 e 3, as quais destacam os valores considerados adequados, precários e críticos para pontos de conexão com tensão nominal igual ou superior a 230 kV (Tabela 1.1), tensão nominal igual ou superior a 69 kV e inferior a 230 kV (Tabela 1.2) e tensão nominal igual ou superior a 2,3 kV e inferior a 69 kV (Tabela 1.3). Todos esses valores estão em conformidade com o PRODIST.

Tabela 1 - Pontos de conexão em tensão nominal igual ou superior a 230 kV.

Tensão de atendimento	Faixa de variação da tensão de leitura (TL) em relação à tensão de referência (TR)
Adequada	$0,95\text{TR} \leq \text{TL} \leq 1,05\text{TR}$
Precária	$0,93\text{TR} \leq \text{TL} < 0,95\text{TR}$ ou $1,05\text{TR} < \text{TL} \leq 1,07\text{TR}$
Crítica	$\text{TL} < 0,93\text{TR}$ ou $\text{TL} > 1,07\text{TR}$

Fonte: [3]

Tabela 2 - Pontos de conexão em tensão nominal igual ou superior a 69 kV e inferior a 230 kV.

Tensão de atendimento	Faixa de variação da tensão de leitura (TL) em relação à tensão de referência (TR)
Adequada	$0,95\text{TR} \leq \text{TL} \leq 1,05\text{TR}$
Precária	$0,90\text{TR} \leq \text{TL} < 0,95\text{TR}$ ou $1,05\text{TR} < \text{TL} \leq 1,07\text{TR}$
Crítica	$\text{TL} < 0,90\text{TR}$ ou $\text{TL} > 1,07\text{TR}$

Fonte: [3].

Tabela 3 - Pontos de conexão em tensão nominal igual ou superior a 2,3 kV e inferior a 69 kV.

Tensão de atendimento	Faixa de variação da tensão de leitura (TL) em relação à tensão de referência (TR)
Adequada	$0,93\text{TR} \leq \text{TL} \leq 1,05\text{TR}$
Precária	$0,90\text{TR} \leq \text{TL} < 0,93\text{TR}$
Crítica	$\text{TL} < 0,90\text{TR}$ ou $\text{TL} > 1,05\text{TR}$

Fonte: [3].

Seguindo no âmbito de normativas brasileiras, para níveis de tensão em regime permanente, é importante ressaltar os procedimentos da rede básica, que é estabelecido pelo ONS. No Submódulo 9.7, Indicadores de Qualidade de Energia elétrica da Rede Básica, é dada a classificação da tensão de atendimento em regime permanente, em função da tensão nominal para barramentos sob responsabilidade de concessionárias de transmissão, conforme tabela que segue:

Tabela 4 - Indicadores de qualidade de energia elétrica da rede básica.

Tensão nominal do ponto de observação da tensão (kV)	Adequada	Precária	Crítica
$\text{TN} \geq 230$	$0,95\text{TC} \leq \text{TL} \leq 1,05\text{TC}$	$0,93\text{TC} \leq \text{TL} < 0,95\text{TC}$ ou $1,05\text{TC} \leq \text{TL} < 1,07\text{TC}$	$\text{TL} < 0,93\text{TC}$ ou $\text{TL} > 1,07\text{TC}$
$69 \leq \text{TN} \leq 230$	$0,95\text{TC} \leq \text{TL} \leq 1,05\text{TC}$	$0,90\text{TC} \leq \text{TL} < 0,95\text{TC}$ ou $1,05\text{TC} < \text{TL} \leq 1,07\text{TC}$	$\text{TL} < 0,90\text{TC}$ ou $\text{TL} > 1,07\text{TC}$
$1 < \text{TN} < 69$	$0,93\text{TC} \leq \text{TL} \leq 1,05\text{TC}$	$0,90\text{TC} \leq \text{TL} < 0,93\text{TC}$	$\text{TL} < 0,90\text{TC}$ ou $\text{TL} > 1,05\text{TC}$

Fonte: [4].

Diante do exposto até o momento, torna-se evidente a preocupação com os níveis de tensão nos barramentos do sistema elétrico de potência, sobretudo diante do considerável aumento na demanda por energia elétrica de qualidade nas últimas décadas.

Nesse contexto, a gestão de potência reativa tem adquirido uma importância crescente para as empresas fornecedoras de energia, cujo objetivo é manter a tensão em conformidade com as normativas nacionais e/ou internacionais [5].

Basicamente, quando se trata dos níveis de tensão em regime permanente duas situações podem ocorrer. A primeira diz respeito a barramentos com tensão inferior a tensão adequada preconizada (subtensão). A segunda diz respeito a barramentos com tensão superior a tensão adequada (sobretensão).

Na tentativa de resolver o problema de subtensão podem ser utilizados bancos de capacitores. Essa prática é comum em subestações de todo mundo, de modo a elevar a tensão de um ponto específico da rede elétrica [6].

Em outra vertente, pode ocorrer a sobretensão. Nessa situação podem ser empregados reatores lineares, que buscam diminuir a tensão na barra em que foi alocado e na sua vizinhança [7].

Feitas essas breves considerações, além da escolha do dispositivo para manter a tensão dentro de níveis aceitáveis, deve-se dar o devido destaque aos possíveis pontos de instalação desses equipamentos, de maneira a minimizar os custos e manter a tensão dentro de limites aceitáveis por normas.

Visto que o problema de alocação ótima representa um problema que possui espaço de busca combinatório, que dificilmente pode ser varrido por método exaustivo, os algoritmos genéticos (AGs) são largamente utilizados de maneira a encontrar possíveis soluções ótimas [8].

De acordo com [8], [9] e [10], os algoritmos genéticos são fundamentados na computação evolutiva, sendo classificados como uma técnica heurística, realizando uma busca em um espaço de soluções possível e complexo.

Diante do cenário delineado, este trabalho tem como objetivo central a implementação de um algoritmo genético no sistema IEEE 30 barras modificado. A proposta visa alocar reatores lineares, com o intuito de manter as tensões nas barras tão próximas quanto possível de 1 p.u, observando-se que, na ausência dos reatores lineares, as tensões do sistema ultrapassam os limites estabelecidos pelas normas vigentes.

O método de fluxo de potência de Newton-Raphson foi empregado como componente essencial do algoritmo genético, revelando a tensão em cada barra após a seleção de um indivíduo (possível solução para o problema em pauta). Tanto o algoritmo genético quanto o método de Newton-Raphson foram implementados na linguagem Python, escolhida por sua sintaxe relativamente simples e pela ausência de custos associados.

MÉTODO

Para alcançar os objetivos estabelecidos neste projeto de iniciação científica, foi aplicada uma metodologia abrangente que integrou diferentes etapas, desde a revisão bibliográfica até a implementação prática do algoritmo genético. A seguir, são detalhadas as principais etapas executadas e os resultados alcançados:

1. Revisão Bibliográfica

Uma revisão bibliográfica foi realizada, abordando temas relacionados à qualidade de energia elétrica, normativas brasileiras, gestão de potência reativa e técnicas de otimização com foco

em algoritmos genéticos. Essa etapa permitiu fundamentar teoricamente o projeto e identificar os principais desafios e abordagens na área.

2. Análise das Normativas Brasileiras

Foram analisadas em detalhes as normativas brasileiras, como os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico (PRODIST) e os indicadores de qualidade da rede básica estabelecidos pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Essa análise orientou o desenvolvimento do projeto em conformidade com as diretrizes regulatórias.

3. Desenvolvimento do Algoritmo Genético:

Com base nos conhecimentos obtidos, um algoritmo genético foi desenvolvido para otimizar a alocação de reatores lineares no sistema IEEE 30 barras modificado. O algoritmo foi implementado utilizando a linguagem Python, escolhida por sua versatilidade e eficiência.

4. Implementação do Método de Fluxo de Potência de Newton-Raphson:

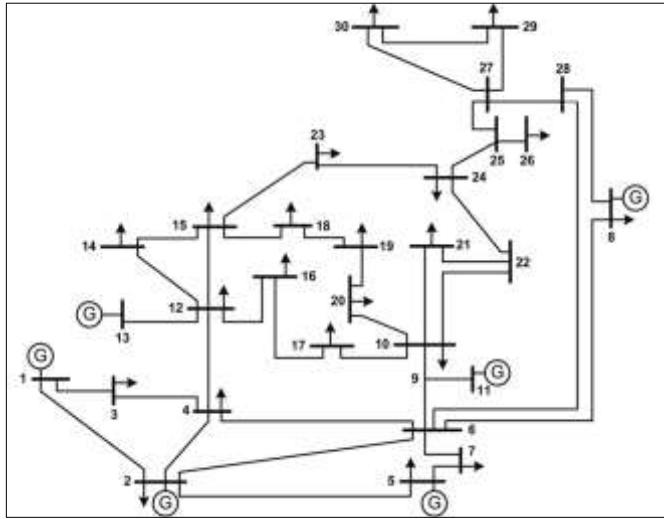
O método de fluxo de potência de Newton-Raphson foi integrado ao algoritmo genético, possibilitando determinar as tensões em cada barra do sistema após a seleção de soluções potenciais pelo algoritmo.

A aplicação dessa metodologia permitiu não apenas o alcance dos objetivos propostos, mas também contribuiu para o avanço do conhecimento na área de qualidade de energia elétrica e otimização de sistemas elétricos de potência.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

O sistema elétrico sob investigação, o IEEE 30 barras, desempenha um papel central neste estudo de alocação ótima de reatores lineares por meio de algoritmos genéticos. Visando atender aos propósitos específicos da pesquisa, foram realizadas modificações no sistema, introduzindo ajustes nos níveis de tensão em diversos barramentos. Essa adaptação foi crucial para identificar barras com tensão crítica, constituindo a base para a alocação estratégica dos reatores lineares. A Figura 1 ilustra a topologia do sistema estudado, apresentando as informações das barras e dos ramos de ligação entre elas. A representação gráfica oferece uma visão abrangente da estrutura do sistema, evidenciando a complexidade das interconexões.

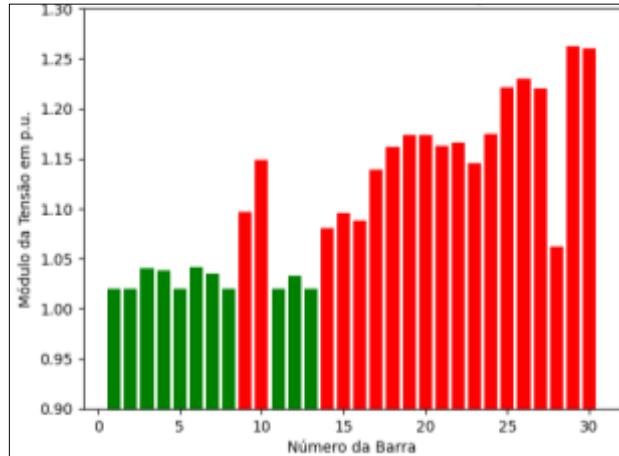
Figura 1 – Topologia do sistema IEEE 30 Barras.



Fonte: [11].

Nesse contexto a Figura 2 fornece uma representação gráfica abrangente das tensões que se afastam dos níveis aceitáveis, conforme estabelecido pelas normativas brasileiras.

Figura 2 – Demonstração gráfica das tensões nos barramentos do sistema IEEE 30 barras modificado.



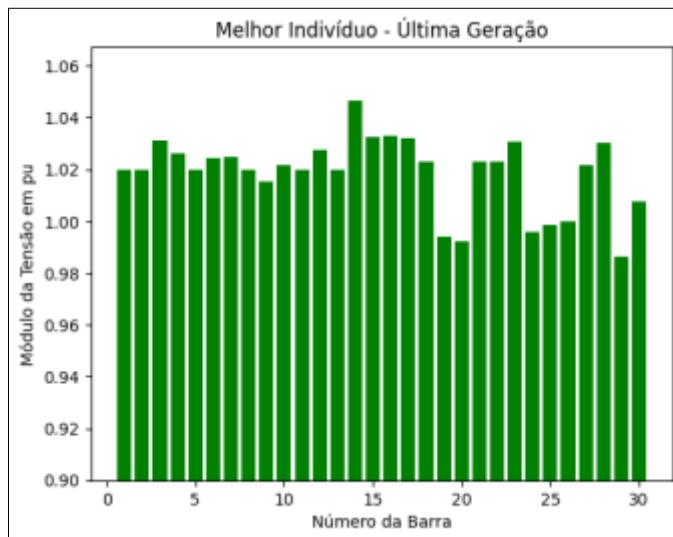
Fonte: autoria própria.

O gráfico em barras acima destaca claramente as condições de operação fora dos limites permitidos, identificando as tensões em vermelho como aquelas que excedem as faixas permissíveis de variação. Em contraste, as barras em verde indicam os pontos em que as tensões se mantêm dentro dos parâmetros adequados. Essa análise visual é de suma importância para identificar locais específicos que demandam atenção imediata e possíveis intervenções, visando otimizar o desempenho e a confiabilidade do sistema elétrico.

Posto isso, os resultados obtidos nas simulações revelaram-se satisfatórios. Na abordagem metodológica adotada, os reatores lineares foram incrementalmente inseridos, iniciando com

dois reatores distribuídos em barras distintas na primeira simulação. Na segunda simulação, consideraram-se três reatores, e assim sucessivamente, até que todas as barras atingissem níveis adequados de tensão. É relevante destacar que, para o sistema em análise, todos os barramentos alcançaram níveis de tensão apropriados quando a simulação contemplou a alocação de sete reatores, conforme pode ser verificado na Figura 3.

Figura 3 – Níveis das tensões em cada barramento dispostos em gráfico de barras para o sistema com sete reatores alocados.



Fonte: autoria própria.

CONCLUSÕES

Diante do resultado obtido nas simulações, é possível concluir que a aplicação do algoritmo genético no contexto da alocação de reatores shunt apresentou resultados promissores para a melhoria da qualidade de energia elétrica em sistemas de potência. A abordagem adotada, utilizando o algoritmo genético em conjunto com o método de fluxo de potência de Newton-Raphson, demonstrou eficácia na busca por soluções ótimas para a alocação de reatores, visando manter as tensões próximas a 1 pu.

Além disso, a metodologia proposta não apenas busca melhorar a qualidade das tensões, mas também considera a eficiência econômica ao otimizar a alocação dos reatores. A minimização do número de reatores necessários para atingir os objetivos de tensão desejados pode representar uma economia significativa para as empresas do setor elétrico.

Diante do exposto, fica evidente que a abordagem baseada em algoritmos genéticos pode ser uma ferramenta valiosa para a tomada de decisões na gestão de potência reativa, contribuindo para a otimização dos sistemas elétricos de potência.

REFERÊNCIAS

- [1] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso, and H. W. Beaty, *Electrical Power Systems Quality* , Second Edition. New York: Mc. Graw-Hill, 2003.
- [2] N. Kagan, E. J. Robba, and H. P. Schmidt, *Estimação de indicadores de qualidade da energia elétrica*, 1a edição. Blucher, 2009.
- [3] Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico nacional (PRODIST): Módulo 8 - Qualidade da energia elétrica. Brasil”, 2021.
- [4] Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), “Procedimentos de Rede do Operador Nacional do Sistema Elétrico: Submódulo 9.7 - Indicadores de qualidade de energia elétrica da Rede Básica. Brasil”.
- [5] T. Sousa, “Estudo de planejamento de reativos em sistemas elétricos de potência,” Dissertação, Universidade Federal de São Carlos, 2003.
- [6] L. W. de Oliveira, “Reconfiguração e alocação ótima de capacitores em sistemas de distribuição,” Tese, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.
- [7] C. de S. Chaves, “Projeto, modelagem e avaliação da eficácia dos reatores a núcleo saturado ao processo da regulação de tensão,” Tese, Universidade Federal de Uberlândia, 2016.
- [8] R. Linden, *Algoritmos genéticos*, 3a Edição. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2012.
- [9] L. de Castro and F. J. Von Zuben, *Introdução à computação evolutiva*. Campinas: Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, 2002.
- [10] J. O. Rezende, “Otimização de Potência Reativa em Sistemas Elétricos com Energia Solar Fotovoltaica Utilizando Algoritmo Genético,” Tese, Universidade Federal de Uberlândia, 2021.

[11] “Sistema IEEE: 30 barras-Modelagem da Rede Elétrica”.
https://www.researchgate.net/figure/Figura-2-Sistema-IEEE-30-barras-Modelagem-da-Rede-Eletrica-no-Nivel-Barra-Ramo_fig2_262745037 (accessed August. 12, 2023).