

RELATO DE EXPERIÊNCIA

Implementação computacional do método de Gauss-Seidel na análise de sistemas elétricos de potência: uma abordagem pedagógica.

Vitor Amadeu Souza¹

1 – UniFOA, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, RJ.

vitor.amadeu@foa.org.br

<https://orcid.org/0009-0002-1857-6799>

Resumo: Este artigo apresenta uma análise da implementação computacional do método de Gauss-Seidel para a solução de fluxo de potência em sistemas elétricos utilizando a linguagem de programação Python. O estudo demonstrou a aplicação do método iterativo em um sistema teste de 3 barras, caracterizado por sua matriz admitância nodal. Os resultados obtidos mostraram convergência após 13 iterações, com tempo de execução de aproximadamente 0,001 segundos, demonstrando a eficiência da implementação. As tensões nodais calculadas foram apresentadas em formato retangular e polar, facilitando a análise do estado operativo do sistema. Destaca-se a importância da integração de ferramentas computacionais no ensino de Sistemas de Potência, proporcionando aos estudantes uma compreensão mais profunda dos fenômenos eletromagnéticos e dos métodos numéricos aplicados à engenharia elétrica. A abordagem computacional utilizada constitui um recurso pedagógico valioso para o desenvolvimento de habilidades técnicas e analíticas essenciais aos futuros engenheiros eletricitistas.

Palavras-chave: Fluxo de carga. Métodos computacionais em engenharia. Matriz admitância.

Abstract: This article presents an analysis of the computational implementation of the Gauss-Seidel method for solving power flow in electrical systems using the Python programming language. The study demonstrated the application of the iterative method on a 3-bus test system, characterized by its nodal admittance matrix. The results showed convergence after 13 iterations, with an execution time of approximately 0.001 seconds, highlighting the efficiency of the implementation. The calculated nodal voltages were presented in both rectangular and polar formats, facilitating the analysis of the system's operational state. The study emphasizes the importance of integrating computational tools in the teaching of Power Systems, providing students with a deeper understanding of electromagnetic phenomena and numerical methods applied to electrical engineering. The computational approach used constitutes a valuable pedagogical resource for developing essential technical and analytical skills for future electrical engineers.

Keywords: Power flow. Computational methods in engineering. Admittance matrix.

INTRODUÇÃO

A análise de sistemas elétricos de potência constitui um dos pilares fundamentais da formação em engenharia elétrica, sendo essencial para o planejamento, operação e controle de redes elétricas. Dentro deste contexto, os estudos de fluxo de carga (ou fluxo de potência) representam uma ferramenta indispensável para determinar o estado operativo de um sistema elétrico em regime permanente (GRAINGER; STEVENSON, 1994). O método de Gauss-Seidel, desenvolvido pelos matemáticos Carl Friedrich Gauss e Philipp Ludwig von Seidel, é uma das técnicas iterativas mais tradicionais para resolução desses problemas, caracterizando-se pela simplicidade conceitual e facilidade de implementação.

A resolução manual de problemas de fluxo de carga, mesmo para sistemas de pequeno porte, demanda esforço considerável e está sujeita a erros. Conforme ressalta Monticelli (1983), a natureza iterativa destes cálculos torna imprescindível o uso de ferramentas computacionais, não apenas para agilizar o processo, mas principalmente para garantir a precisão dos resultados. Neste sentido, a incorporação de métodos computacionais ao ensino de Sistemas de Potência representa uma evolução pedagógica significativa.

O advento de linguagens de programação de alto nível, como Python, com suas bibliotecas especializadas em computação científica, como NumPy e SciPy, revolucionou o ensino de disciplinas técnicas em engenharia. Como observam Zimmerman et al. (2011), estas ferramentas permitem aos estudantes concentrarem-se nos conceitos fundamentais da disciplina, sem se deterem excessivamente nas complexidades da implementação de algoritmos básicos. Segundo Kezunovic et al. (2004), a integração de ferramentas computacionais no currículo de engenharia elétrica proporciona um ambiente de aprendizado mais dinâmico e alinhado às demandas da prática profissional contemporânea.

Este trabalho tem como objetivo implementar e analisar o método de Gauss-Seidel aplicado a um sistema elétrico de 3 barras, utilizando Python como ferramenta computacional. A análise dos resultados visa não apenas validar a implementação, mas também demonstrar a relevância pedagógica desta abordagem para o ensino de Sistemas de Potência.

METODOLOGIA

O método de Gauss-Seidel aplicado a sistemas elétricos de potência baseia-se na formulação nodal, onde a relação entre as correntes injetadas (I) e as tensões nodais (V) é expressa pela equação matricial $I = YV$, sendo Y a matriz admitância nodal do sistema (ARRILLAGA; WATSON, 2001). A solução iterativa para a tensão na barra i pode ser calculada pela expressão da Equação 1.

Equação 1 - Convergência da aproximação conforme aumenta i

$$V_i = \frac{I_i - \sum_{j \neq i} Y_{ij} V_j}{Y_{ii}}$$

Fonte: O autor

A implementação computacional do método foi realizada utilizando a linguagem Python, com a biblioteca NumPy para operações matriciais e o módulo time para medição do desempenho. O algoritmo foi estruturado seguindo as etapas do Quadro 1.

Quadro 1 - Passos do algoritmo

Número de pontos
Definição da matriz admitância Y de dimensão 3×3 para o sistema teste;
Especificação do vetor de correntes injetadas I nas barras;
Inicialização do vetor de tensões V_0 com valores unitários (flat start);
Aplicação do método iterativo de Gauss-Seidel;
Verificação da convergência baseada em uma tolerância predefinida;
Conversão e apresentação dos resultados em coordenadas retangulares e polares.

Fonte: O Autor

A matriz admitância utilizada caracteriza um sistema de 3 barras com elementos está apresentada na Figura 1. O objetivo ao aplicar o método computacional é achar os valores das tensões nodais que resolvem a mesma através de um método eficiente.

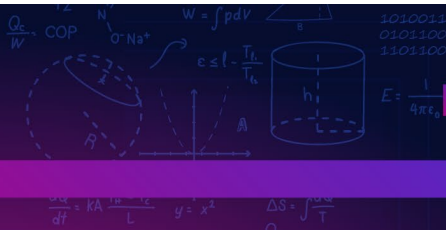


Figura 1 - Matriz no formato I=YE

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.8 \\ 1.2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.1 - 0.2j & -0.1j & -0.1j \\ -0.1j & 0.2 - 0.3j & -0.1j \\ -0.1j & -0.1j & 0.2 - 0.2j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix}$$

Fonte: O autor

O critério de convergência adotado foi a norma euclidiana da diferença entre os vetores de tensão de duas iterações consecutivas, com tolerância de 10^{-6} , valor considerado adequado para aplicações didáticas conforme recomendado por Saadat (1999). O número máximo de iterações foi limitado a 50 para evitar loops infinitos em caso de não convergência.

O código-fonte desta implementação está disponível no link: https://github.com/vitor-souza-ime/gauss_seidel e o mesmo foi testado no Google Colab.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A implementação do método de Gauss-Seidel para o sistema de 3 barras produziu os resultados apresentados no Quadro 2.

Quadro 2 - Resultados da aplicação do método de Gauss-Seidel

Tensão na barra 1: $0.70+3.08j$ ($3.16 \angle 77.23^\circ$)
Tensão na barra 2: $-0.15+1.04j$ ($1.05 \angle 98.28^\circ$)
Tensão na barra 3: $1.83+2.11j$ ($2.79 \angle 48.96^\circ$)

Fonte: O Autor

O algoritmo convergiu após 13 iterações, com tempo de execução de aproximadamente 0,001 segundos, demonstrando a eficiência computacional da implementação para sistemas de pequeno porte.

Os resultados obtidos apresentam características coerentes com sistemas elétricos reais. A barra 1 apresenta a maior magnitude de tensão (3.16 pu), enquanto a barra 2

mostra uma magnitude próxima de 1 pu, valor nominal típico em sistemas por unidade. As diferenças angulares entre as barras são significativas, indicando fluxos de potência consideráveis entre elas, como seria esperado em um sistema com carregamento assimétrico.

Conforme observado por Milano (2010), embora o método de Gauss-Seidel apresente convergência mais lenta que métodos como Newton-Raphson para sistemas de grande porte, ele oferece vantagens pedagógicas significativas por sua clareza conceitual e implementação direta. Isso corrobora a escolha deste método para introdução aos estudos de fluxo de carga em disciplinas de graduação.

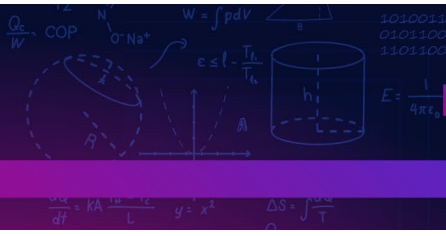
A representação das tensões tanto em formato retangular quanto polar facilita a compreensão dos resultados pelos estudantes, estabelecendo conexões entre os conceitos matemáticos e sua interpretação física no contexto dos sistemas elétricos. Como destacado por Kundur (1994), a representação polar é particularmente útil na análise de estabilidade e fluxo de potência, onde o ângulo de fase é um parâmetro fundamental.

A implementação computacional utilizando Python demonstra como ferramentas modernas podem aprimorar significativamente o processo de ensino-aprendizagem em disciplinas técnicas. Como observam Oliphant (2007) e Arnt (2006), a sintaxe intuitiva do Python e a robustez das bibliotecas científicas disponíveis permitem que os estudantes se concentrem nos aspectos conceituais do problema, sem se perderem em detalhes de programação de baixo nível.

O tempo de execução extremamente reduzido (0,001 segundos) evidencia que, mesmo com recursos computacionais modestos, é possível implementar modelos eficientes para análise de sistemas elétricos em ambiente acadêmico. Isso reforça o argumento de Gonzalez-Longatt e Rueda (2014) sobre a democratização do acesso a ferramentas de simulação avançadas através de software livre e de código aberto.

CONCLUSÕES

Este trabalho demonstrou a implementação bem-sucedida do método de Gauss-Seidel para a solução do fluxo de carga em um sistema elétrico de 3 barras utilizando



Python. Os resultados obtidos evidenciam a eficácia da abordagem computacional para a análise de sistemas de potência em ambiente educacional.

A integração de métodos computacionais no ensino de Sistemas de Potência representa um avanço pedagógico significativo, proporcionando aos estudantes uma compreensão mais profunda dos fenômenos eletromagnéticos e dos métodos numéricos aplicados à engenharia elétrica. Como evidenciado por Kezunovic et al. (2004) e reforçado por este estudo, esta abordagem desenvolve não apenas o conhecimento técnico específico, mas também competências essenciais em programação e análise de dados.

A implementação em Python, utilizando a biblioteca NumPy, demonstrou-se adequada para operações matriciais complexas, oferecendo uma alternativa acessível e eficiente para estudantes e educadores. A apresentação dos resultados em formato retangular e polar facilita a interpretação física dos fenômenos e fortalece a conexão entre teoria e prática.

Como sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se a implementação de outros métodos como Newton-Raphson e Desacoplado Rápido para análise comparativa de desempenho, bem como a extensão do estudo para sistemas de maior porte, incluindo restrições operacionais e controle de tensão. Adicionalmente, o desenvolvimento de interfaces gráficas para visualização dos resultados poderia enriquecer ainda mais a experiência educacional.

A metodologia e os resultados apresentados neste artigo contribuem para o avanço das práticas pedagógicas em engenharia elétrica, reforçando a importância da computação científica como ferramenta indispensável no ensino contemporâneo de Sistemas de Potência.

REFERÊNCIAS

ARRILLAGA, J.; WATSON, N. R. Computer Modelling of Electrical Power Systems. 2. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2001.

ARNT, Holger. Enhancing system thinking in education using system dynamics. ResearchGate, 2006. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/220165084_Enhancing_System_Thinking_in_Education_Using_System_Dynamics. Acesso em: 12 maio 2025.

GONZALEZ-LONGATT, F.; RUEDA, J. L. PowerFactory Applications for Power System Analysis. Cham: Springer, 2014.

GRAINGER, J. J.; STEVENSON, W. D. Power System Analysis. New York: McGraw-Hill, 1994.

KEZUNOVIC, M. et al. The role of digital modeling and simulation in power engineering education. IEEE Transactions on Power Systems, v. 19, n. 1, p. 73-79, 2004.

KUNDUR, P. Power System Stability and Control. New York: McGraw-Hill, 1994.

MILANO, F. Power System Modelling and Scripting. London: Springer, 2010.

MONTICELLI, A. Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica. São Paulo: Edgard Blücher, 1983.

OLIPHANT, T. E. Python for Scientific Computing. Computing in Science & Engineering, v. 9, n. 3, p. 10-20, 2007.

SAADAT, H. Power System Analysis. New York: WCB/McGraw-Hill, 1999.

ZIMMERMAN, R. D.; MURILLO-SÁNCHEZ, C. E.; THOMAS, R. J. MATPOWER: Steady-State Operations, Planning, and Analysis Tools for Power Systems Research and Education. IEEE Transactions on Power Systems, v. 26, n. 1, p. 12-19, 2011.