

15º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2024

ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE UM PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE DE FLUXO DE POTÊNCIA EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

VICTOR GABRIEL MACHADO DA SILVA¹, DANILO BASSETO DO VALLE²

¹ Graduando em Engenharia Elétrica, Bolsista PIBIFSP, IFSP, Câmpus Votuporanga, machado.victor@aluno.ifsp.edu.br.

² Doutor em Engenharia Elétrica, Docente, IFSP-GPAI, Câmpus Votuporanga, daniilo.valle@ifsp.edu.br.

Área de conhecimento (Tabela CNPq): 3.04.00.00-7 Engenharia Elétrica

RESUMO: Este estudo teve como objetivo desenvolver e validar um programa computacional para a análise de fluxo de potência em sistemas de energia elétrica, utilizando o *software GNU Octave*. A validação foi realizada por meio da comparação dos resultados obtidos com aqueles gerados por um *software* profissional, o *PowerWorld*, garantindo, assim, a precisão e confiabilidade da ferramenta desenvolvida. O programa foi aplicado a um sistema *IEEE* de 9 barras, cujos resultados demonstraram uma excelente concordância entre as duas ferramentas, com diferenças insignificantes nas potências ativas e reativas. A análise confirmou que o programa é capaz de reproduzir com alta precisão os resultados obtidos pelo *PowerWorld*, tornando-o uma alternativa robusta e acessível para uso acadêmico e prático. Além disso, o programa oferece flexibilidade para personalizações, sendo especialmente útil em contextos de pesquisa, nos quais a adaptação das ferramentas é crucial. O uso do *GNU Octave* promove o acesso democratizado a ferramentas avançadas de análise de sistemas de energia, representando uma solução econômica e eficaz para instituições educacionais e pequenas empresas.

PALAVRAS-CHAVE: Análise de fluxo de potência; *GNU Octave*; *IEEE* 9 barras; *PowerWorld*; Sistemas de energia elétrica; *Software* de código aberto.

STUDY AND DEVELOPMENT OF A COMPUTATIONAL PROGRAM FOR POWER FLOW ANALYSIS IN ELECTRICAL POWER SYSTEMS

ABSTRACT: This study aimed to develop and validate a computational program for power flow analysis in electrical power systems using GNU Octave. The validation was performed by comparing the results obtained with those generated by professional software, PowerWorld, thus ensuring the precision and reliability of the developed tool. The program was applied to a 9-bus IEEE system, whose results showed excellent agreement between the two tools, with negligible differences in active and reactive powers. The analysis confirmed that the program is capable of reproducing with high accuracy the results obtained by PowerWorld, making it a robust and accessible alternative for academic and practical use. Additionally, the program offers flexibility for customizations, making it especially useful in research contexts where tool adaptation is crucial. The use of GNU Octave promotes democratized access to advanced power system analysis tools, representing an economical and effective solution for educational institutions and small businesses.

KEYWORDS: Electrical power systems; GNU Octave; IEEE 9-bus; Open-source software; Power flow analysis; PowerWorld.

INTRODUÇÃO

A análise de fluxo de potência é uma ferramenta essencial para a operação e o planejamento de sistemas de energia elétrica, permitindo a determinação das condições operacionais de um sistema em termos de tensões, correntes e potências em cada componente da rede. Este tipo de análise é crucial para garantir a eficiência, a confiabilidade e a segurança do fornecimento de energia elétrica, especialmente

em um cenário onde a demanda por energia cresce constantemente e a integração de fontes de energia renováveis se torna cada vez mais comum (Grainger & Stevenson, 1994).

O objetivo deste estudo é desenvolver um programa computacional para a análise de fluxo de potência em sistemas de energia elétrica, utilizando o *GNU Octave*. Muitos dos *softwares* disponíveis comercialmente para essa finalidade são caros e inacessíveis para estudantes e pequenas instituições. O uso do *GNU Octave*, uma ferramenta de código aberto e gratuita, permite democratizar o acesso a ferramentas avançadas de análise de sistemas de energia elétrica, proporcionando um recurso educacional que facilita o aprendizado e a compreensão dos conceitos de análise de fluxo de potência (Moura, 2018).

Ademais, o programa desenvolvido oferece a possibilidade de personalização, permitindo que estudantes e pesquisadores explorem o código, compreendam os algoritmos subjacentes e modifiquem o programa conforme suas necessidades específicas. Este projeto, portanto, contribui para a área de sistemas elétricos de potência ao oferecer uma ferramenta robusta e adaptável, adequada tanto para a pesquisa acadêmica quanto para a aplicação prática.

MATERIAL E MÉTODOS

Neste estudo, foram utilizados os seguintes materiais: um computador para a implementação e execução do programa computacional; o *software GNU Octave*, uma ferramenta de código aberto, utilizada para o desenvolvimento do programa de análise de fluxo de potência em sistemas de energia elétrica; e literatura técnica relevante sobre análise de fluxo de potência, componentes de sistemas de energia elétrica e modelos matemáticos, conforme as referências de Monticelli (1999), Moura (2018) e Grainger e Stevenson (1994), entre outras.

O desenvolvimento do programa computacional e a subsequente análise de fluxo de potência seguiram as etapas descritas a seguir. O *GNU Octave* foi escolhido para o desenvolvimento do programa devido à sua acessibilidade e facilidade de uso, especialmente em contextos educacionais e em pequenas instituições.

A modelagem dos principais componentes do sistema de energia elétrica foi realizada com base em uma abordagem matemática detalhada. Para os geradores, foram considerados a potência ativa P_k e a potência reativa Q_k injetadas no sistema, onde P_k é positivo e Q_k é positivo para geradores sobrecarregados e negativo para geradores subcarregados.

Os elementos *shunt*, incluindo reatores e capacitores, foram modelados para representar suas funções de regulação de tensão e correção do fator de potência. As equações utilizadas foram as seguintes: para reatores *shunt*, \bar{Y}_k é dada por:

$$\bar{Y}_k = jb_L, \quad (1)$$

onde:

$$b_L = \frac{-1}{X_L}, \quad (2)$$

e a potência reativa shunt Q_{sh} é calculada como:

$$Q_{sh} = b_L V_k^2. \quad (3)$$

Para capacitores *shunt*, a admitância \bar{Y}_k é dada por:

$$\bar{Y}_k = jb_C, \quad (4)$$

onde:

$$b_C = \frac{-1}{X_C}, \quad (5)$$

e a potência reativa shunt Q_{sh} é calculada como:

$$Q_{sh} = b_C V_k^2. \quad (6)$$

As linhas de transmissão foram modeladas utilizando o modelo π , que adota a abordagem de parâmetros concentrados. Nesse modelo, a linha é representada por uma impedância série, composta pela resistência e indutância da linha, expressa como:

$$\bar{Z}_{km} = r_{km} + jx_{km}. \quad (7)$$

Já em termos de admitância série, tem-se que:

$$\bar{Y}_{km} = g_{km} + jb_{km}. \quad (8)$$

Além disso, a susceptância *shunt*, representada por jb_{km}^{sh} , corresponde às capacitâncias distribuídas ao longo da linha. Esses parâmetros são considerados concentrados em pontos específicos, o que simplifica a análise e permite uma representação eficaz das características elétricas da linha. Para os transformadores defasadores, considerou-se a redistribuição da potência ativa por meio da modificação do módulo e do ângulo da tensão. A tensão primária \bar{V}_p foi calculada como:

$$\bar{V}_p = \frac{\bar{V}_k}{a e^{j\Phi_{km}}}, \quad (9)$$

e a corrente \bar{I}_{km} foi obtida por:

$$\bar{I}_{km} = \left(\frac{1}{a^2} \bar{Y}_{km} \right) \bar{V}_k + \left(\frac{-1}{a e^{-j\Phi_{km}}} \bar{Y}_{km} \right) \bar{V}_m. \quad (10)$$

Neste estudo, tanto o programa desenvolvido quanto o software *PowerWorld* utilizaram o modelo de potência constante para a simulação das cargas. Nesse modelo estático, a potência ativa (P) e a potência reativa (Q) permanecem inalteradas, independentemente das variações de tensão no sistema. A escolha desse modelo simplifica a análise de fluxo de potência, permitindo uma comparação direta e precisa entre as duas ferramentas. Essa abordagem garante que as diferenças nos resultados sejam devidas apenas às variações nos algoritmos de cálculo, e não à modelagem das cargas.

Para a análise de fluxo de potência, foi implementado o método iterativo de *Newton-Raphson* baseado na descrição apresentada por Monticelli (1999) em seu livro *Introdução a Sistemas de Energia Elétrica*. Este método é amplamente utilizado devido à sua capacidade de lidar com as equações não lineares presentes nos sistemas de energia elétrica. O método *Newton-Raphson* utiliza um processo iterativo onde uma estimativa inicial é refinada em cada iteração com base na linearização das equações em torno do ponto atual. O sistema de equações é resolvido por meio da matriz Jacobiana, que relaciona as variações de potência ativa e reativa às variações de tensões e ângulos de fase nas barras do sistema. A iteração continua até que a convergência seja alcançada, isto é, quando as discrepâncias nas potências caem abaixo de um limite estabelecido, garantindo assim a precisão do fluxo de potência calculado.

O programa foi implementado no *GNU Octave*, e submetido a uma série de testes para verificar a precisão dos resultados. Os testes incluíram diferentes topologias de redes, incluindo o sistema *IEEE* de 9 barras e outras variações simplificadas de sistemas elétricos de potência obtidos na literatura. Além disso, foram simulados cenários com diferentes valores de geração e variações de carga, permitindo testar o comportamento do sistema sob diferentes condições de operação.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para avaliar a eficácia do programa desenvolvido para o cálculo de fluxo de potência, foram realizadas simulações no conhecido sistema *Western System Coordinating Council (WSCC)* de 9 barras. Os dados deste sistema, em valores por unidade (pu), com base de potência de 100 MVA e tensão de 230 kV, estão apresentados na Figura 1.

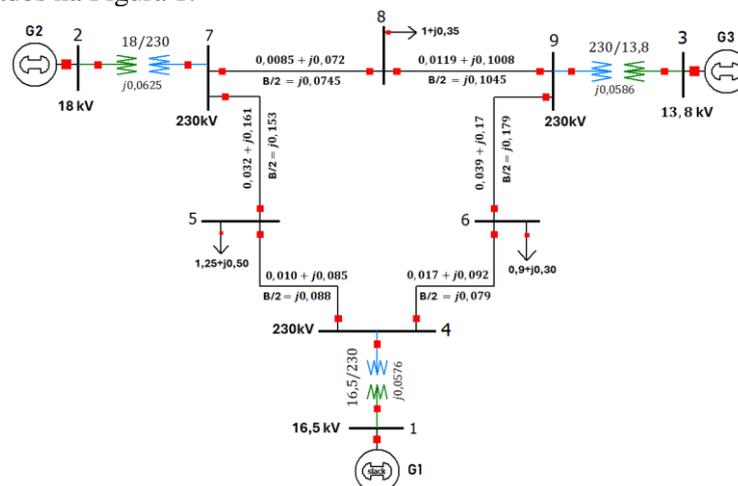


Figura 1: Sistema *IEEE* de 9 barras simulado.

Este sistema, amplamente conhecido, é utilizado em estudos de fluxo de potência e estabilidade, sendo composto por três geradores, nove barras e três cargas, conectadas às barras cinco, seis e oito. Ele

está detalhadamente documentado nas obras clássicas *Power System Control and Stability* de Anderson e Fouad (2003) e *Power System Dynamics and Stability* de Peter W. Sauer e M. A. Pai (2006).

No programa desenvolvido, foi adotada uma tolerância de 10^{-6} para o método de *Newton-Raphson*. Os valores iniciais de tensão foram estabelecidos em 1,04, 1,025 e 1,025 pu para as barras 1, 2 e 3, respectivamente, enquanto para as demais barras foi utilizado o valor de 1,0 pu. Para os ângulos de todas as barras, o valor inicial adotado foi zero.

Com o objetivo de validar o programa desenvolvido, as simulações foram replicadas utilizando o *software* profissional *PowerWorld*. A Figura 2 apresenta os resultados comparativos das tensões das barras (em pu) e dos ângulos correspondentes (em graus) obtidos por ambas as ferramentas após a convergência.

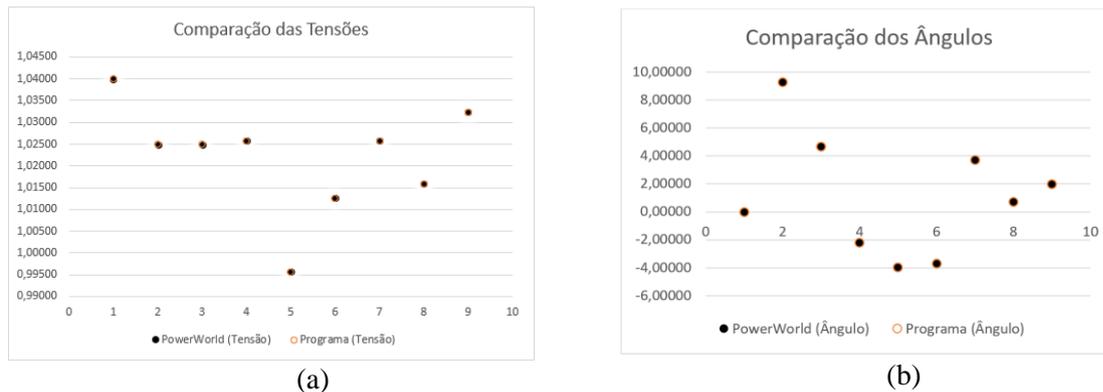


Figura 2: (a) Comparação das magnitudes e (b) comparação dos ângulos das barras.

A análise da Figura 2 revela que os valores obtidos das tensões das barras e seus respectivos ângulos estão bastante próximos entre as duas ferramentas, o que comprova a eficácia do programa desenvolvido para a análise de fluxo de potência.

A Figura 3 apresenta os resultados obtidos pela ferramenta desenvolvida, após a convergência pelo método de *Newton-Raphson*, incluindo as tensões nas barras e seus respectivos ângulos, além dos fluxos de potência ativa e reativa nas linhas de transmissão e suas respectivas perdas.

Análise do Fluxo de Carga pelo método de Newton Raphson									
Barras [Número]	V pu	Ângulo Graus	Injeção		Geração		Carga		
			MW	MVar	MW	MVar	MW	MVar	
1	1.0400	0.0000	71.641	27.047	71.641	27.047	0.000	0.000	
2	1.0250	5.2791	163.000	6.663	163.000	6.663	0.000	0.000	
3	1.0250	4.6658	85.000	-10.867	85.000	-10.867	0.000	0.000	
4	1.0258	-2.2168	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	0.000	0.000	
5	0.9956	-3.9892	-125.000	-50.000	-0.000	0.000	125.000	50.000	
6	1.0127	-3.6870	-90.000	-30.000	-0.000	0.000	90.000	30.000	
7	1.0258	3.7187	-0.000	0.000	-0.000	0.000	0.000	0.000	
8	1.0159	0.7263	-100.000	-35.000	-0.000	0.000	100.000	35.000	
9	1.0324	1.9677	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	0.000	0.000	
Total			4.641	-92.158	319.641	22.942	315.000	115.000	

(a)

Fluxos de Potências e Perdas									
[De Bus]	[Para Bus]	P MW	Q MVar	[De Bus]	[Para Bus]	P MW	Q MVar	Perdas nas Linhas	
								MW	MVar
1	4	71.641	27.047	4	1	-71.641	-23.924	0.000	3.123
2	7	163.000	6.663	7	2	-163.000	9.169	0.000	15.832
3	9	85.000	-10.867	9	3	-85.000	14.963	0.000	4.096
4	5	40.945	22.894	5	4	-40.687	-38.687	0.258	-15.794
4	6	30.696	1.030	6	4	-30.530	-16.544	0.166	-15.514
5	7	-84.313	-11.313	7	5	86.613	-8.383	2.300	-19.695
6	9	-59.470	-13.956	9	6	60.924	-18.074	1.354	-31.530
7	8	76.387	-0.787	8	7	-75.912	-10.714	0.475	-11.500
8	9	-24.088	-24.286	9	8	24.176	3.111	0.088	-21.175
Perdas Totais									
Total		4.6410	-92.1580						

(b)

Figura 3: (a) Tensões e ângulos convergidos e (b) fluxos de potência e perdas.

Os resultados obtidos no programa de cálculo de fluxo de potência foram analisados de acordo com a convenção de sinais adotada, onde um sinal positivo indica potência ativa ou reativa saindo da barra, e um sinal negativo, potência entrando na barra. No que diz respeito às perdas, um sinal positivo representa dissipação de potência ao longo da linha de transmissão, enquanto um sinal negativo, especialmente no caso da potência reativa, pode indicar injeção de potência reativa, como ocorre com elementos *shunt* (por exemplo, capacitores), que fornecem potência reativa ao sistema.

Observando as tensões nodais do sistema, verifica-se uma boa regulação de tensão, já que as tensões dos barramentos se mantêm dentro da faixa aceitável de 0,95 pu a 1,05 pu. Dessa forma, não há necessidade de medidas adicionais de controle para este ponto de operação.

A Figura 4 apresenta resultados semelhantes aos da Figura 3, porém obtidos por meio do *software PowerWorld*. Ao comparar ambas as figuras, observa-se uma grande proximidade entre os resultados, reforçando a consistência do programa desenvolvido.

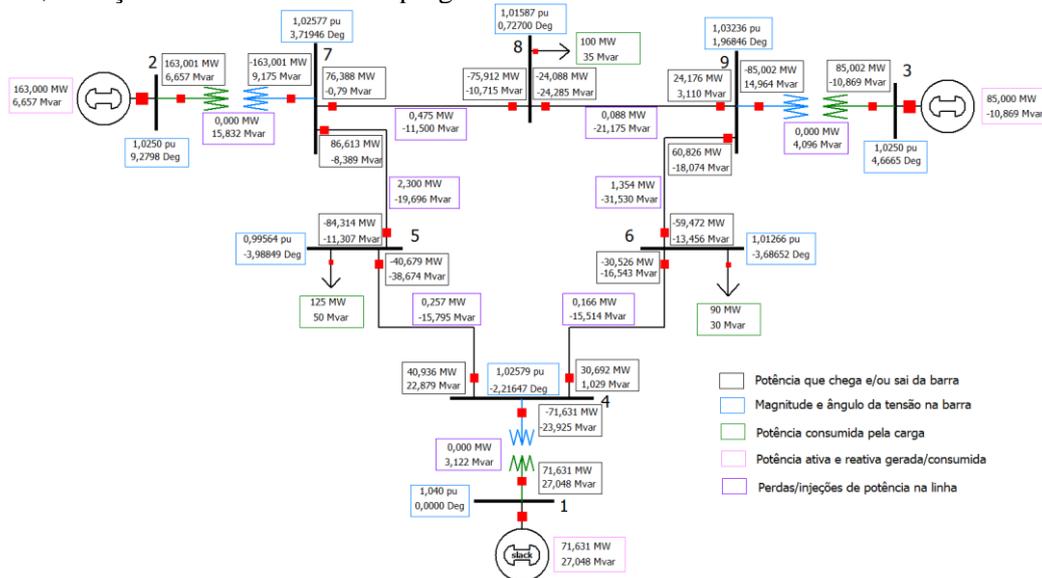


Figura 4: Resultados do sistema analisado pelo simulador PowerWorld.

No que diz respeito ao atendimento da potência ativa na carga da Barra 5, observa-se, com base na Figura 3 (programa desenvolvido), que uma potência de 86,613 MW sai da Barra 7 e chega 84,313 MW à Barra 5. Além disso, através da linha de transmissão 4-5, chegam 40,687 MW, totalizando os 125 MW de potência ativa atendida.

Para o atendimento da potência reativa, verifica-se pela Figura 3 que uma injeção de 19,695 MVAR (representada pelas perdas reativas negativas) é realizada pelo elemento *shunt* da linha de transmissão 7-5, resultando na chegada de 11,313 MVAR à Barra 5. Pela linha de transmissão 4-5, saem 22,894 MVAR da Barra 4, aos quais se somam 15,794 MVAR injetados pelo elemento *shunt* dessa linha, resultando na chegada de 38,687 MVAR à Barra 5. Somando-se ambas as contribuições, tem-se um total de 50 MVAR de potência reativa atendida na Barra 5.

Fazendo uma comparação com os dados apresentados na Figura 4, observa-se que as potências ativas que chegam à Barra 5 são 84,314 MW e 40,679 MW, totalizando 124,993 MW. Verifica-se, portanto, uma pequena discrepância, já que a carga demanda 125 MW.

De modo semelhante, ao analisar a potência reativa na Figura 4, verifica-se que chegam à Barra 5 um valor de 38,674 MVAR pela linha de transmissão 4-5 e 11,307 MVAR pela linha de transmissão 7-5, totalizando 49,981 MVAR. Essa soma apresenta uma pequena discrepância em relação aos 50 MVAR requeridos pela carga.

Pela análise dos fluxos de potência ativa e reativa nas Figuras 3 e 4, verifica-se que, para a carga da Barra 8, não houve discrepâncias entre os dois programas. O balanço de potência ativa e reativa foi fechado em sua totalidade, com concordância plena entre ambos.

Já para a carga conectada à Barra 6, o balanço nodal obtido pelo simulador *PowerWorld* foi de 89,998 MW e 29,999 MVAR, enquanto pelo programa desenvolvido foi de 90 MW e 30 MVAR, demonstrando resultados bastante satisfatórios para ambos os programas, com uma diferença mínima entre os valores.

Deste modo, constatou-se que o programa desenvolvido apresentou um balanço de potência mais preciso em relação ao *software PowerWorld*, demonstrando maior conformidade com as demandas de potência ativa e reativa do sistema.

A análise comparativa revela que o programa desenvolvido é capaz de reproduzir os resultados do *PowerWorld* com grande precisão. Isso pode ser atribuído à implementação cuidadosa dos métodos numéricos de solução do fluxo de potência, como o método de *Newton-Raphson*, e à consideração adequada dos parâmetros do sistema. Além disso, as simulações realizadas com o programa desenvolvido também estão de acordo com a literatura, reforçando a confiabilidade e a validade dos resultados obtidos.

O programa desenvolvido possui a vantagem de ser customizável, permitindo adaptações e extensões conforme a necessidade do usuário. Isso contrasta com *softwares* comerciais que, apesar de robustos, podem apresentar limitações em termos de flexibilidade para pesquisa e desenvolvimento.

CONCLUSÕES

O programa de cálculo de fluxo de potência desenvolvido atingiu com sucesso os objetivos estabelecidos, demonstrando alta precisão e eficiência quando comparado com o *software* profissional *PowerWorld*. A análise dos resultados mostrou que as diferenças entre as tensões e ângulos de fase calculados pelo programa e pelo *PowerWorld* foram insignificantes, validando a confiabilidade do algoritmo implementado. Além da precisão, o programa destacou-se pela flexibilidade e potencial de customização de diversos parâmetros, como a modelagem de novas topologias de rede, inserção de novas funcionalidades para controle de geração e de carga, além da possibilidade de ajustar os critérios de convergência e tolerância do método de *Newton-Raphson*. Em contraste, o *software* comercial *PowerWorld* possui limitações quanto à flexibilidade para alterações no código fonte, o que torna o nosso programa mais adequado para fins de pesquisa, onde a adaptação às necessidades específicas do estudo em sistemas elétricos de potência é crucial. A eficiência computacional comparável ao *PowerWorld* reforça seu potencial para aplicações práticas, confirmando a adequação do programa para estudos de maior complexidade.

O programa desenvolvido não só alcançou os objetivos de replicar os resultados de um *software* comercial, mas também oferece uma base sólida para futuras expansões e otimizações, incluindo testes em sistemas maiores e a integração de funcionalidades adicionais. Portanto, este projeto representa uma contribuição para a área de sistemas elétricos de potência, proporcionando uma ferramenta robusta e adaptável tanto para a pesquisa acadêmica quanto para a aplicação em campo.

Para estudos futuros, pretende-se dar continuidade à análise detalhada dos fluxos de potência de forma isolada, abrangendo especificamente os fluxos de potência ativa e reativa. Tal abordagem permitirá um entendimento mais profundo dos comportamentos e interações dentro do sistema elétrico, possibilitando otimizações e melhorias na operação e planejamento dos sistemas de energia elétrica.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

D.B.V contribuiu na concepção do tema e orientação. V.G.M.S atuou na redação, pesquisa, desenvolvimento e estudo do programa. Todos os autores contribuíram com a revisão do trabalho e aprovaram a versão submetida.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo - Câmpus Votuporanga pela oportunidade, por meio do programa PIBIFSP; ao Grupo de Pesquisa em Automação e Inovação (GPAI) pelo apoio técnico.

REFERÊNCIAS

- ANDERSON, Paul M.; FOUAD, Aziz A. **Power System Control and Stability**. 2ª. ed, IEEE, Wiley-Interscience, USA, 2003.
- CANOSSA, Jaine Henrique. **Um Programa Interativo para Estudos de Fluxo de Potência**. 2007.
- GRAINGER, J. J.; STEVENSON, W. D. **Power System Analysis**. New York: McGraw-Hill, 1994.
- KUNDUR, P. **Power System Stability and Control**. New York: McGraw-Hill, 1994.
- MONTICELLI, Alcir José; GARCIA, Ariovaldo. **Introdução a sistemas de energia elétrica**. Ed Unicamp, 1999.
- MONTICELLI, A. J. **Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica**. 2ª. ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1983.
- MOURA, Ailson P. de; MOURA, Adriano Aron F. de; ROCHA, Ednardo P. da. **Análise de fluxo de carga em sistemas de potência**. Artliber editora, v. 1, 2018.
- SAUER, Peter W.; PAI, M. A. **Power system dynamics and stability**. Urbana, IL: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2006.