

CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DO DESLOCAMENTO DE NEUTRO EM SISTEMAS TRIFÁSICOS VIA GERADORES DE FUNÇÃO E COMPONENTES DISCRETOS

Gabriel O. Ramalho (IFPB, Campus João Pessoa), Maria Thereza G. N. Roque (IFPB, Campus João Pessoa), Gilvan V. A. Júnior (IFPB, Campus João Pessoa)

E-mails: oliveira.ramalho@academico.ifpb.edu.br, maria.thereza@academico.ifpb.edu.br, gilvan.andrade@ifpb.edu.br.

Área de conhecimento (Tabela CNPq): 3.04.03.00-6 Circuitos Elétricos, Magnéticos e Eletrônicos.

Palavras-chave: impedância; circuitos elétricos; laboratório; simulação; tensão; cargas.

1. Introdução

Segundo Teodoro (2005), as maiores causas de desequilíbrio de tensão ocorrem devido à distribuição irregular das cargas por fase, sendo provocada através das constantes inserções e/ou retiradas de cargas. As cargas instaladas nos sistemas elétricos consomem energia ativa e/ou reativa, outro fator que impulsiona a verificação dos desequilíbrios, exigindo que eles sejam dimensionados, organizados e gerenciados de modo a adequarem e manterem a simetria das formas de tensão e corrente no domínio do tempo.

Nos sistemas trifásicos desequilibrados, são diversas as consequências observadas, nas quais impactam diretamente sobre o seu desempenho, tais como: aumento das perdas nas linhas, aquecimento, oscilações e vibrações em máquinas elétricas, além do deslocamento de neutro em cargas monofásicas em relação à referência de neutro do sistema (Teixeira, s.d.).

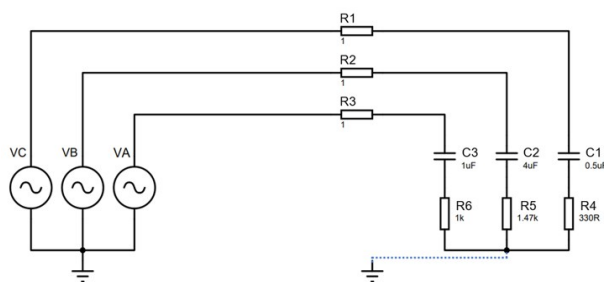
Com base no exposto, o deslocamento de neutro é um efeito característico aparente em sistemas desequilibrados de médio e grande porte. No contexto de circuitos elétricos, o acesso a esse tipo de sistema não é simples, visto o risco elevado à segurança, pois comumente se trabalha com altos níveis de tensão e corrente. Contudo, considerando válida a correlação entre teoria e prática, na qual independe do tamanho aparente do sistema em análise, o presente trabalho propõe o estudo em laboratório de um circuito trifásico desequilibrado utilizando-se de geradores de função sincronizados e conectados na configuração estrela-aterrada e componentes discretos RC visando a caracterização experimental da tensão de deslocamento de neutro. A abordagem favorece a validação desse efeito, ainda que em escala menor, demonstrando a operacionalidade de sistemas elétricos trifásicos em desequilíbrio de modo simples e eficiente.

2. Materiais e métodos

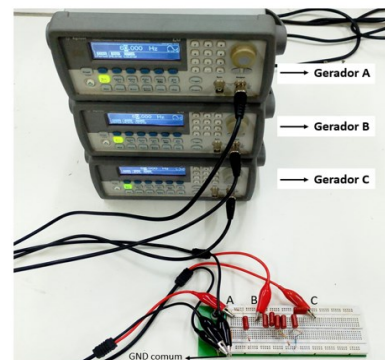
2.1 Modelagem do circuito elétrico

Foi montado em laboratório um circuito elétrico trifásico a partir de três fontes geradoras de função modelo Agilent Technologies® 33210A, resistores e capacitores, cujo diagrama esquemático é representado pela Figura 1(a). A Figura 1(b) mostra a identificação dos equipamentos e o circuito montado na prática.

Figura 1 – (a) Esquemático do circuito trifásico com destaque ao efeito do deslocamento de neutro. (b) Circuito prático montado em laboratório.



(a)



(b)

Fonte: Autores (2025).

É importante ressaltar que os geradores de função devem estar em sincronismo, processo feito a partir do uso da função *sync* nos próprios equipamentos, viabilizando a simulação prática de um sistema trifásico com defasamento real de 120° entre os sinais de tensão.

Na configuração apresentada, tem-se um circuito presumidamente desequilibrado, visto que as impedâncias equivalentes para cada fase resultam em valores distintos em módulo e ângulo. A impedância equivalente por fase é determinada conforme a Equação 1.

$$\dot{Z}_{eq} = \sqrt{R_{eq}^2 + \frac{1}{4\pi^2 f^2 C_{eq}^2}} \angle -\text{tg}^{-1}\left(\frac{1}{2\pi f C_{eq} R_{eq}}\right) \quad (1)$$

em que R_{eq} é a resistência série equivalente da fase em Ω , f é a frequência industrial constante definida em 60 Hz e C_{eq} é a capacitância equivalente da fase em F.

2.2 Deslocamento do neutro

O desequilíbrio em um sistema elétrico é a condição em que as três fases apresentam valores de tensão em módulo e/ou defasagem angular entre fases diferentes de 120° elétricos (Teixeira, s.d.). Nessa situação, quando o neutro não compartilha a mesma referência de terra do lado fonte, surge uma tensão sobre o ponto comum de conexão do lado carga (ponto de neutro), denominada de tensão de deslocamento de neutro. A Equação 2 calcula o fasor de tensão de deslocamento de neutro (Jinglu; Xin; Chunyan, 2006).

$$\dot{V}_{0n} = \frac{\dot{V}_A \dot{Z}_A^{-1} + \dot{V}_B \dot{Z}_B^{-1} + \dot{V}_C \dot{Z}_C^{-1}}{\dot{Z}_A^{-1} + \dot{Z}_B^{-1} + \dot{Z}_C^{-1}} \quad (2)$$

em que $\dot{V}_{\{A,B,C\}}$ são os fasores de tensão por fase com módulos em V e $\dot{Z}_{\{A,B,C\}}$ são os fasores de impedância por fase com módulos em Ω .

3. Resultados e discussão

Com base nos componentes adotados no circuito experimental, foi possível determinar os valores de tensão e impedância por linha do circuito, os quais foram calculados. A Tabela 1 mostra os valores resultantes por fase.

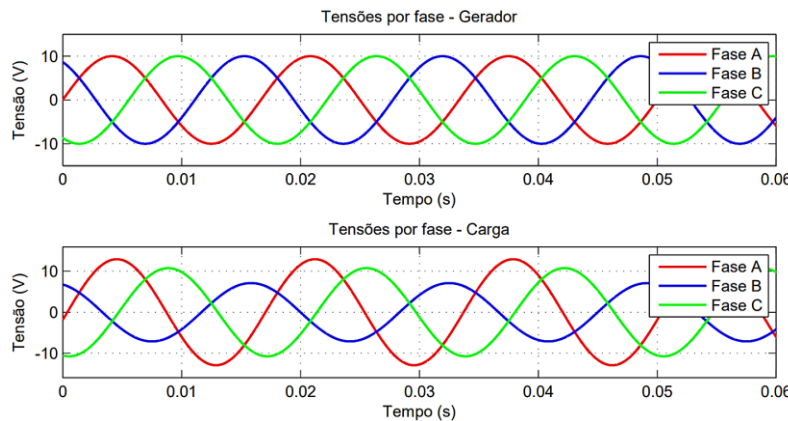
Tabela 1 – Valores de tensão e impedância por fase.

Fase	\dot{V} (V)	R_{eq} (Ω)	C_{eq} (F)	\dot{Z}_{eq} (Ω)
A	$10\angle 0^\circ$	319	$0,531\mu$	$5005,62\angle -86,35^\circ$
B	$10\angle 120^\circ$	1467	$4,199\mu$	$1597,23\angle -23,3^\circ$
C	$10\angle -120^\circ$	989	$1,036\mu$	$2744,78\angle -68,88^\circ$

Fonte: Autores (2025).

Utilizando o *software* MATLAB®, dado o equacionamento do circuito, simulam-se as formas de onda de tensão de saída do gerador trifásico, representado pelos geradores de função em sincronismo, além dos gráficos de tensão sobre a carga, conforme mostra a Figura 2, a qual promove a visualização do desequilíbrio entre fases desse sistema.

Figura 2 – Simulação das formas de onda de tensão dos geradores e sobre a carga trifásica.



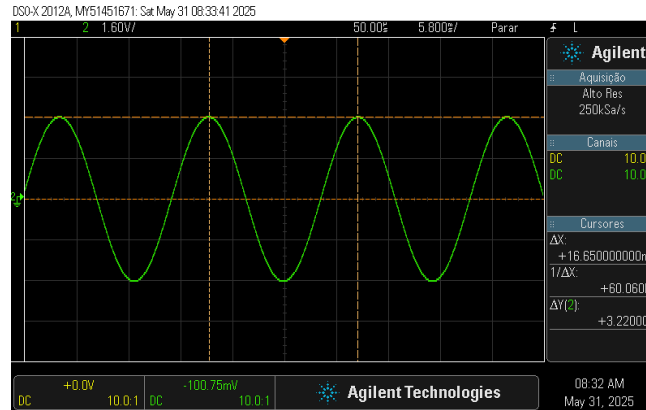
Fonte: Autores (2025).

A partir dos parâmetros admitidos de tensão dos geradores de função e dos valores calculados de impedância equivalente por fase, obtém-se o valor teórico da tensão de deslocamento de neutro, sendo calculado pela Equação 3.

$$\dot{V}_{0n} = \frac{\dot{V}_A \dot{Z}_A^{-1} + \dot{V}_B \dot{Z}_B^{-1} + \dot{V}_C \dot{Z}_C^{-1}}{\dot{Z}_A^{-1} + \dot{Z}_B^{-1} + \dot{Z}_C^{-1}} \Rightarrow \dot{V}_{0n} = \frac{0,0039\angle 131,94^\circ}{0,0011\angle 47,58^\circ} \Rightarrow \dot{V}_{0n} = 3,55\angle 84,36^\circ \text{ V} \quad (3)$$

Com o uso de um osciloscópio digital de bancada, modelo Agilent Technologies® DSO-X 2012A, foi possível caracterizar experimentalmente a forma de onda da tensão de deslocamento de neutro, medida entre o ponto de conexão comum da carga trifásica e o terra do sistema, cujo resultado é visualizado pela Figura 3.

Figura 3 – Sinal de tensão de deslocamento de neutro obtido através de osciloscópio.



Fonte: Autores (2025).

Em referência ao valor de tensão observado e medido, foi possível determinar o erro percentual associado, em que se compara o valor teórico esperado e o valor obtido durante a experimentação do circuito em bancada, calculado pela Equação 4.

$$e(\%) = \frac{|\dot{V}_{0n\text{medido}} - \dot{V}_{0n\text{teórico}}|}{\dot{V}_{0n\text{teórico}}} \times 100\% \Rightarrow e(\%) = \frac{|3,22 - 3,55|}{3,55} \times 100\% \Rightarrow e(\%) \cong 9,30\% \quad (4)$$

O valor de erro percentual destaca a proximidade da teoria e prática, cuja diferença notada se dá pelos fatores externos ao processo de medição, sendo limitações do experimento, tais como a impedância do cabo da ponteira de prova, impedâncias intrínsecas ao comprimento dos fios usados como *jumpers*, ou ainda valores reais de tensão de pico e fase dos geradores.

A Tabela 2 reflete um comparativo geral entre os valores teórico esperado e prático obtido no experimento, evidenciando as diferenças de módulo da tensão da tensão de deslocamento de neutro (valor de pico).

Tabela 2 – Comparação entre os valores teórico e prático da tensão de deslocamento de neutro.

Tipo de medição	$ \dot{V}_{0n} $ (V)	Erro (%)
Teórica	3,55	$\cong 9,30$
Prática	3,22	

Fonte: Autores (2025).

5. Considerações finais

Neste trabalho é demonstrada, em bancada, a correlação entre o desequilíbrio de fase e o efeito da tensão de deslocamento de neutro de um sistema trifásico desequilibrado de cargas RC simples e de fácil acesso. Mesmo havendo limitações intrínsecas ao experimento, como uso de fios, geradores reais ou ainda a própria impedância da ponteira de prova, foi observado um valor de tensão de deslocamento de neutro próximo ao valor teórico, com erro percentual associado de aproximadamente 9,30%, permitindo a validação desse efeito no sistema analisado, bem como a comprovação do alinhamento entre a teoria e a prática de circuitos elétricos. De modo complementar, no tocante à viabilidade de reproduções de sistemas elétricos na prática em bancada, sugere-se a inclusão de outros tipos de componentes e configurações, tais como indutores, banco de capacitores, conjunto de cargas trifásicas, analisadores de consumo e de qualidade da energia, dentre outros, promovendo a manutenção dos principais resultados para o desenvolvimento de estudos e análises sobre os sistemas trifásicos de potência.

Referências

JINGLU, L.; XIN, W.; CHUNYAN, S. Discussion on abnormal rise of displacement voltage of neutral point in compensation electric network and its control measures. **International Conference on Power System Technology**. Chongqing, China, p. 1 – 4, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICPST.2006.321700>.

TEIXEIRA, M. D. **Tópicos em Qualidade de Energia - Desequilíbrio de tensão e corrente**. Material de aula (apresentação em slides) – Universidade Federal do Paraná - Departamento de Engenharia Elétrica, Curitiba, Paraná, s.d. Disponível em: <https://www.eletrica.ufpr.br/p/medeia/professores/mateus:te991_-_desequilibrio_de_tensao.pdf>. Acesso em: 15 maio 2025.

TEODORO, R. G. **Metodologia para compensação de desequilíbrio em redes elétricas**. 2005. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Mestrado em Engenharia Elétrica, Ilha Solteira, São Paulo, 2005. Disponível em: <https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/pos-graduacao/I41-dissertacao_ricardo_gouveia_tedoro.pdf>. Acesso em: 15 maio 2025.