

# EQUILÍBRIO DE TENSÃO EM UMA REDE REAL DE DISTRIBUIÇÃO PRIMÁRIA DE ENERGIA ELÉTRICA

Andressa T. Diefenthäler, Luís F. Sauthier, Airam T. Z. R. Sausen, Paulo S. Sausen e Maurício de Campos  
Departamento de Ciências Exatas e Engenharias  
Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul  
Ijuí, Rio Grande do Sul  
E-mail: andressa\_td@hotmail.com

**Resumo**—Neste artigo é apresentada uma análise do equilíbrio de tensão em um ponto da rede trifásica real de distribuição primária de energia elétrica. Para o estudo, é utilizado um amplo conjunto de dados disponibilizado por uma concessionária da região noroeste do estado do Rio Grande do Sul. O cálculo do fator de desequilíbrio de tensão é realizado aplicando três diferentes métodos, sendo eles: IEEE, NEMA e CIGRÉ. A partir da análise dos resultados, é possível observar que o segmento analisado é equilibrado, e que os métodos NEMA e CIGRÉ apresentam resultados semelhantes. O estudo do desequilíbrio de tensão é importante para a análise da qualidade da energia elétrica, além de fornecer informações sobre os sistemas elétricos de potência, necessárias para a modelagem matemática e para o planejamento dos mesmos.

**Palavras-chave** – fator de desequilíbrio de tensão, qualidade da energia elétrica, sistema trifásico.

## I. INTRODUÇÃO

Os Sistemas Elétricos de Potência (SEPs) envolvem os processos de geração, transmissão, distribuição e consumo de energia elétrica, estando continuamente expostos a problemas e falhas que prejudicam o fornecimento de energia com qualidade e segurança. Nesse contexto, nos últimos anos há um aumento nas pesquisas que têm como objetivo conhecer, assegurar ou até mesmo melhorar os padrões de qualidade necessários ao pleno funcionamento dos SEPs. Essas pesquisas estão relacionadas principalmente ao termo Qualidade da Energia Elétrica (QEE), que pode ser entendido como o conjunto de fatores que afetam e/ou comprometem o fornecimento de energia [1], [2].

O estudo da QEE baseia-se no cálculo e na análise de indicadores relacionados aos distúrbios da rede, que se manifestam principalmente como deformidades na forma de onda da tensão e/ou corrente em um SEP. Os indicadores referem-se à qualidade do serviço, que está relacionada à continuidade do fornecimento de energia ou à frequência de interrupções; e à qualidade do produto, que está relacionada principalmente aos fenômenos eletromagnéticos, tais como transitórios, variação de tensão de curta e longa duração, distorções na forma de

onda, flutuação ou oscilação de tensão, variação na frequência e desequilíbrio de tensão [2], [3], [4].

Mundialmente, órgãos reguladores das concessionárias de distribuição de energia elétrica estabelecem alguns parâmetros relacionados à QEE. No Brasil, quanto ao sistema elétrico trifásico, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), através dos Procedimentos de Distribuição (PRODIST) [3], estabelece, dentre outros índices, um limite máximo aceitável relacionado ao desequilíbrio de tensão entre as fases do sistema. De modo geral, para que um sistema elétrico seja considerado equilibrado, é necessário que as tensões das três fases apresentem mesma amplitude (valor eficaz) e/ou estejam defasadas entre si em 120 graus [5], [6].

O desequilíbrio de tensão entre as fases pode ser ocasionado por elementos relacionados à estrutura da rede elétrica ou à carga conectada, e impacta diretamente na confiabilidade e na vida útil dos equipamentos, além de provocar perdas no sistema [5], [7]. Nos últimos anos, as tendências da Geração Distribuída (GD) e de transformação dos sistemas elétricos em *Smart Grids* (i.e. Redes Inteligentes), têm ampliado os desafios para a operação dos SEPs [1]. A conexão de fontes de GD monofásicas no sistema de distribuição deve observar a divisão de potências injetadas em cada fase, já que pode ocasionar uma elevação da tensão. Assim, a natureza da carga, como ela está conectada à rede, e os níveis de tensão e corrente que cada fase consome de acordo com a curva típica de carga diária, também são fatores importantes para o equilíbrio de sistemas trifásicos [8].

Para a análise do desequilíbrio de tensão é utilizado o cálculo do Fator de Desequilíbrio de Tensão (FDT), denominado de fator  $K$  (medido em porcentagem). Esse fator é importante para analisar e verificar se em um determinado ponto ou segmento da rede elétrica as tensões estão equilibradas e, a partir disso, possibilita a tomada de decisões relacionadas à operação do sistema [3]. Além disso, no atual contexto da GD e das *Smart Grids*, a modelagem matemática de SEPs mostra-se fundamental, sendo que, para a escolha de modelos adequados, é necessário conhecer as configurações da Linha de Transmissão (LT) aérea, o que inclui a condição de equilíbrio de tensão entre as fases.

Nesse contexto, esse artigo tem como objetivo realizar uma análise do equilíbrio de tensão em um sistema trifásico, considerando um ponto da rede real de distribuição primária de energia elétrica. A partir do estudo proposto, são aplicados e comparados três métodos para o cálculo do FDT (fator  $K$ ), sendo eles: IEEE, NEMA e CIGRÉ. Os dados utilizados nesse estudo se referem às tensões de linha e de fase medidas em um ponto da rede real de média tensão, os quais são disponibilizados pelo Departamento Municipal de Energia Elétrica de Ijuí (DEMEI), uma concessionária da região noroeste do estado do Rio Grande do Sul.

O restante desse artigo está organizado como segue. Na Seção II são apresentados os principais métodos utilizados para o cálculo do FDT (fator  $K$ ). Na Seção III é descrita a metodologia da pesquisa. Os resultados obtidos e as discussões são abordados na Seção IV. Na Seção V são apresentadas as conclusões.

## II. DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO EM SISTEMAS TRIFÁSICOS

O desequilíbrio de tensão em sistemas elétricos trifásicos é definido quando as tensões das três fases são distintas, ou a defasagem angular entre elas é diferente de 120 graus [3], [5], [6]. Há diversos fatores que podem provocar esse tipo de desequilíbrio, tais como: interrupções, sobretensões, descargas atmosféricas, curtos-circuitos, transitórios, distribuição irregular de cargas monofásicas/bifásicas entre as fases, cargas não lineares, fraudes, etc. Dentre as principais consequências da alimentação trifásica desequilibrada destacam-se a degradação da potência útil e o comprometimento do desempenho de equipamentos elétricos (principalmente de motores e geradores), e as perdas elétricas do sistema, que contribuem para o desperdício de energia [2], [5], [7].

Informações acerca do equilíbrio de uma rede elétrica são fundamentais para a operação de sistemas com GD e para a modelagem matemática das redes, principalmente no contexto das *Smart Grids*, pois auxiliam na definição de parâmetros e modelos, assim como na identificação da necessidade ou não de uma modelagem e análise multifásica do sistema. De modo geral, não é possível eliminar completamente o desequilíbrio em sistemas de distribuição, principalmente devido às variações no comportamento e demanda da carga, à distribuição desigual de cargas entre as fases, e à assimetria inerente ao próprio SEP [9].

Por outro lado, órgãos reguladores, como a ANEEL, definem limites máximos aceitáveis para esses desequilíbrios, os quais devem ser cumpridos pelas concessionárias, de modo a atender a demanda com segurança e qualidade. Diante disso, torna-se importante o cálculo do FDT em diferentes pontos da rede, o qual quantifica o nível de desequilíbrio de tensão em um SEP trifásico, possibilitando conhecer seu estado e até mesmo diagnosticar falhas, que são aspectos fundamentais para o planejamento e a operação desses sistemas [3], [5].

Quanto aos limites máximos aceitáveis para o FDT, o nível recomendado é de que o fator  $K$  seja igual ou inferior a 2% para redes com tensão nominal entre 1kV e 230kV [3]. O

estabelecimento desse limite é resultado de uma análise que considera os fornecedores de energia elétrica e os fabricantes dos equipamentos, considerando, portanto, os custos para a adequação de uma rede com menor desequilíbrio e, por outro lado, a garantia do desempenho operacional de diferentes equipamentos. Esse limite máximo do FDT deve ser adotado para o planejamento do sistema elétrico em termos de QEE [2].

A literatura técnica destaca cinco métodos principais para o cálculo do fator  $K$ , sendo eles: IEEE-1 [10], IEEE-2 [11], NEMA [12], CIGRÉ [13] e Componentes Simétricas [3]. O método das Componentes Simétricas (também chamado de "verdadeira definição") expressa a relação entre a componente da tensão de sequência negativa e a componente positiva, em porcentagem, sendo um dos métodos mais recomendados por considerar a configuração real do sistema (i.e. magnitude e ângulo) [6]. Entretanto, alguns equipamentos de medição utilizados na rede elétrica não disponibilizam os valores dos ângulos dos fasores de tensão, necessários ao cálculo do fator  $K$  a partir deste método, assim, outros métodos alternativos foram desenvolvidos, os quais consideram apenas as amplitudes das tensões trifásicas [5], [9].

O método IEEE-2 [11] foi proposto em 1986, sendo que, nos últimos anos, o IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) propõe o método de cálculo IEEE-1 [10] como padrão, considerando as medidas das tensões de fase. O método NEMA [12] é semelhante ao método anterior, mas considera as tensões de linha para o cálculo do fator  $K$  [6]. Já o método CIGRÉ é considerado muito semelhante ao método das Componentes Simétricas, utiliza o módulo das tensões de linha e também é recomendado por diferentes órgãos reguladores do sistema de distribuição a nível mundial, pois apesar de ser simples, quantifica o FDT de modo acurado [2], [6].

Diante disso, nesse artigo, para a análise do equilíbrio de tensão em um ponto considerado, são utilizados os métodos IEEE-1, NEMA e CIGRÉ, para que seja possível comparar o FDT a partir da aplicação de três metodologias com características distintas, recomendadas pela literatura técnica. As equações correspondentes a cada método são apresentadas a seguir.

### A. IEEE

Atualmente, o IEEE define um método para o cálculo do fator  $K$  considerando as tensões de fase do sistema [10], o qual é definido por:

$$K(\%) = \frac{\max[|V_a - V_m|, |V_b - V_m|, |V_c - V_m|]}{|V_m|} \cdot 100, \quad (1)$$

onde:  $K(\%)$  é o fator de desequilíbrio,  $V_a$ ,  $V_b$  e  $V_c$  são as tensões de fase, e  $V_m$  é o valor médio, definido por:

$$V_m = \frac{V_a + V_b + V_c}{3}. \quad (2)$$

Esse método considera apenas o módulo das tensões de fase, e o limite máximo para a análise do desequilíbrio de tensão no sistema é estabelecido em 2% [4], [10].

### B. NEMA

O método conhecido como NEMA (*National Electrical Manufacturers Association*) [12] analisa o desvio das tensões de linha (diferentemente do método IEEE), em relação ao seu valor médio. O fator  $K$  é dado por:

$$K(\%) = \frac{\Delta V}{V_m} \cdot 100, \quad (3)$$

onde:  $\Delta V$  é o máximo desvio das tensões de linha em relação ao valor médio, e  $V_m$  é o valor médio, definidos por:

$$\Delta V = \max[|V_{ab} - V_m|, |V_{bc} - V_m|, |V_{ca} - V_m|], \quad (4)$$

$$V_m = \frac{V_{ab} + V_{bc} + V_{ca}}{3}, \quad (5)$$

onde:  $V_{ab}$ ,  $V_{bc}$  e  $V_{ca}$  são as tensões de linha.

O método NEMA é recomendado pela norma ANSI (*American National Standards Institute*), a qual determina que os sistemas elétricos sejam projetados e operados de modo a limitar o máximo desequilíbrio de tensão em 3% pelo método NEMA [6], [9], [12].

### C. CIGRÉ

O método CIGRÉ (proposto pelo *Conseil International des Grands Réseaux Électriques*) [14] é um dos mais utilizados e recomendados por órgãos reguladores do SEP, por considerar a configuração real do sistema e utilizar o valor dos módulos das tensões de linha [3], [13]. O fator  $K$  é dado por:

$$K(\%) = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \cdot 100, \quad (6)$$

onde:

$$\beta = \frac{|V_{ab}|^4 + |V_{bc}|^4 + |V_{ca}|^4}{(|V_{ab}|^2 + |V_{bc}|^2 + |V_{ca}|^2)^2}. \quad (7)$$

Assim como o método das Componentes Simétricas, o método CIGRÉ fornece resultados rigorosos, sendo esperado um valor de  $K$  igual ou inferior a 2% [6].

## III. METODOLOGIA

Nesse artigo são utilizados os métodos IEEE, NEMA e CIGRÉ para o cálculo e análise do equilíbrio de tensão em um ponto da rede trifásica de distribuição de energia elétrica de uma concessionária do noroeste do estado do Rio Grande do Sul. Para isso, é utilizado um amplo conjunto de dados medidos diretamente do sistema elétrico real e disponibilizados pela concessionária de distribuição. Estes dados se referem à tensão de fase e de linha (em  $kV$ ) em um ponto da LT de média tensão, localizado na saída de um dos alimentadores da rede (antes da primeira carga).

A escolha desse ponto é justificada pela necessidade de conhecer as características do segmento, visto que, como trabalho futuro, objetiva-se realizar a modelagem matemática do mesmo. Desse modo, para a escolha de um modelo matemático de LT adequado, é necessário compreender a respeito do equilíbrio do sistema trifásico, o que também possibilita determinar a utilidade de uma modelagem monofásica ou multifásica da rede.

O conjunto de dados obtidos se refere à medição da tensão de linha e de fase ( $kV$ ) ao longo de uma semana do mês de Outubro de 2016 (i.e. sete dias: de 24/10 a 31/10). As medições são realizadas a cada cinco minutos, totalizando um conjunto de 2016 dados. Na Tabela I é apresentada uma amostra dos dados coletados, de acordo com a data e o horário do dia.

Considerando esse amplo conjunto de dados, os métodos para o cálculo do FDT são aplicados para cada um dos horários medidos, resultando em 2016 valores para o fator  $K$ , para cada método. Para a análise dos resultados, isto é, para o estudo do equilíbrio do sistema trifásico no ponto considerado, são observados os valores mínimo e máximo, e calculada a média dos valores do fator  $K$  obtidos através de cada um dos métodos. Como ferramenta de apoio computacional é utilizado o *software* de representação algébrica e numérica *Matlab* (*student license*).

## IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos procedimentos metodológicos apresentados, os fatores  $K$  são calculados considerando os métodos IEEE, NEMA e CIGRÉ, para cada medição de tensão obtida da rede real. As equações correspondentes a cada método são implementadas no *Matlab*, de modo a facilitar os cálculos envolvendo vetores, cada um com 2016 dados. Para a análise dos resultados, são considerados os valores mínimo e máximo, assim como a média dos valores do fator  $K$  calculado a partir dos três métodos utilizados.

Na Tabela II os resultados são apresentados, sendo possível observar que o valor mínimo para o FDT é obtido no cálculo do fator  $K$  através do método NEMA, o qual é de 0,0389%. O valor máximo calculado é de 1,9906%, a partir do método IEEE. Quanto às médias, que representam o desequilíbrio real do segmento estudado, são obtidos os valores para o fator

Tabela I  
DADOS DE TENSÃO ( $kV$ ) MEDIDOS NA REDE REAL.

Data	Hora	$V_a$	$V_b$	$V_c$	$V_{ab}$	$V_{bc}$	$V_{ca}$
24/10	08:55	12,93	12,96	12,89	22,42	22,39	22,36
24/10	09:00	12,95	12,98	12,90	22,45	22,42	22,39
24/10	09:05	12,93	12,96	12,88	22,42	22,38	22,35
...	...	...	...	...	...	...	...
31/10	08:40	12,76	12,83	12,75	22,16	22,15	22,10
31/10	08:45	12,76	12,81	12,74	22,15	22,13	22,09
31/10	08:50	12,85	12,90	12,84	22,30	22,29	22,25

Tabela II  
RESULTADOS DOS MÉTODOS PARA O FATOR  $K$ .

Método	Mínimo (%)	Máximo (%)	Média (%)
IEEE	0,0778	1,9906	0,4383
NEMA	0,0389	0,9978	0,2196
CIGRÉ	0,0408	0,9995	0,2279

$K$  de 0,4383% pelo método IEEE, de 0,2196% através do método NEMA e de 0,2279% a partir do método CIGRÉ, considerado como um dos testes mais rigorosos recomendados pela literatura [2].

Diante disso, é possível evidenciar que, considerando os métodos IEEE, NEMA e CIGRÉ, os valores máximo e médio de  $K$  são todos inferiores a 2%, o que permite concluir que no segmento de rede estudado, no qual os dados foram coletados, as tensões de fase são equilibradas. Esse resultado reflete a realidade do trecho analisado, visto que se refere a um segmento da rede elétrica de média tensão, localizado antes da primeira carga e, de modo geral, o sistema elétrico de alimentação deve ser equilibrado.

Além da análise do equilíbrio de tensão no segmento, os estudos realizados permitem uma análise comparativa dos métodos para o cálculo do fator  $K$ . Assim, os resultados obtidos são representados graficamente na Fig. 1, a qual apresenta os 2016 ( $n$ ) valores calculados para o fator  $K$ , representando o desequilíbrio obtido através dos métodos IEEE, NEMA e CIGRÉ.

A partir da Fig. 1 é possível verificar os resultados apresentados na Tabela II, os quais permitem concluir que, no ponto analisado, o sistema trifásico é equilibrado. Além disso, pode-se observar o comportamento gráfico do FDT, o qual apresenta tendência semelhante para os três métodos, entretanto, com amplitudes distintas. Assim, evidencia-se a semelhança entre os resultados obtidos pelos métodos NEMA e CIGRÉ, a qual se deve, possivelmente, ao fato de ambos utilizarem as tensões de linha no cálculo do fator  $K$ , representando a configuração

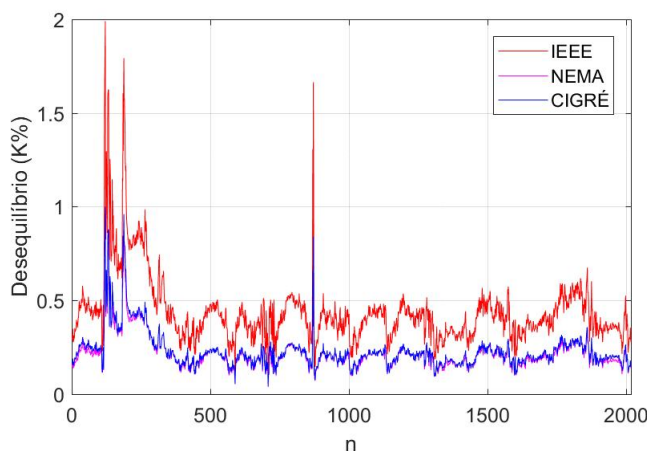


Figura 1. Comparativo dos resultados obtidos para o fator  $K$ .

real do sistema de forma mais acurada, conforme indica a literatura [5].

Já o método IEEE, que utiliza as tensões de fase no cálculo do FDT, apesar de possibilitar a mesma análise dos resultados que os outros dois métodos (i.e., de que o sistema é equilibrado), resulta em índices mais elevados para o fator  $K$ , conforme também é verificado em outras pesquisas [5], [15]. De acordo com a literatura, os métodos IEEE, NEMA e CIGRÉ podem ser inadequados para a quantificação do fator  $K$  quando há alterações angulares relevantes, assim como altos índices de desequilíbrio de tensão, sendo recomendado, nestes casos, a utilização do método das Componentes Simétricas [16].

## V. CONCLUSÕES

Nesse artigo é apresentado um estudo acerca do equilíbrio de tensões de um sistema trifásico, em um ponto da rede real de distribuição primária de energia elétrica. A partir dos resultados obtidos pelo cálculo do FDT (fator  $K$ ) através dos métodos IEEE, NEMA e CIGRÉ, é possível concluir que o sistema é equilibrado, visto que, em todos os casos, o fator  $K$  é inferior a 2%. Além disso, pode-se observar as semelhanças entre os resultados dos métodos NEMA e CIGRÉ, pois utilizam as tensões de linha no cálculo e, assim, representam de modo acurado o sistema real.

Os resultados obtidos nesse artigo são fundamentais para a caracterização do segmento de rede, principalmente para a realização de estudos futuros relacionados à modelagem matemática da LT. Entretanto, é importante salientar que o segmento analisado é de média tensão e, assim, para a análise de outros segmentos da rede, são necessários novos estudos relacionados ao equilíbrio de tensão, de modo a possibilitar o planejamento e a operação adequada do sistema elétrico trifásico, garantindo o fornecimento de energia com segurança e qualidade.

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de financiamento 001, e contou com apoio financeiro da FAPERGS a partir do Edital 02/2017 - PqG (17/2551-0001 204-6).

## REFERÊNCIAS

- [1] M. Bollen, et al., "Consequences of smart grids for power quality: Overview of the results from CIGRE joint working group C4.24/CIREC," *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe*, 2017.
- [2] P. H. O. Rezende, and M. I. Samesima, "Efeitos do desequilíbrio de tensões de suprimentos nos motores de indução trifásico", *Revista Horizonte Científico*, vol. 6, n. 2, 2012.
- [3] ANEEL, "Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST: Módulo 8, rev. 10 - Qualidade da Energia Elétrica," Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2018.
- [4] IEEE, "IEEE 1159-2009: Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality," *IEEE*, 2009.

- [5] M. A. Oliveira, A. d. Filho, and M. G. Pinto, "Análise da Sensibilidade do Desequilíbrio de Tensão Frente às Variações nos Ângulos e Magnitudes das Tensões", *Congreso Internacional de Distribución Eléctrica*, Buenos Aires, Argentina, 2006.
- [6] A. K. Singh, G. K. Singh, and R. Mitra, "Some Observations on Definitions of Voltage Unbalance", *39th North American Power Symposium*, 2007.
- [7] J. Starosta, "Desequilíbrio (desbalanceamento) de tensão", *Revista O Setor Elétrico*, ed. 73, 2012.
- [8] A. Gawlak, "Impact of microgeneration in a low-voltage network on the quality parameters of electrical energy," *18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering*, 2017.
- [9] V. Gosbell, S. Perera, and V. Smith, "Voltage Unbalance," Technical Note no. 06, Integral Energy Power Quality Centre, University of Wollongong, Oct. 2002.
- [10] IEEE, "112-2017: IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators," *IEEE*, Feb. 2018.
- [11] IEEE, "IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronics Terms, IEEE Std. 100-1996", *IEEE*, 1996.
- [12] ANSI, "NEMA MG 1-2016 - Motors and Generators," *National Electrical Manufacturers Association*, 2016.
- [13] CIGRE, "A New Simple and Effective Approximate Formulation for the Determination of Three-Phase Unbalances by Voltmeter Method," *Conseil International des Grands Réseaux Électriques*, 1986.
- [14] G. Beaulieu, et al., "Power Quality Indices and Objectives Ongoing Activities in CIGRE WG 36-07," *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, 2002.
- [15] M. H. J. Bollen, "Definitions of Voltage Unbalance," *IEEE Power Engineering Review*, p. 49-50, nov. 2002.
- [16] P. Pillay, and M. Manyage, "Definitions of voltage unbalance," *IEEE Power Engineering Review*, vol. 5, pp. 50-51, May 2001.