

Metodologia para Análise de Desequilíbrios de Tensão: Comparativos entre os Índices do IEEE, IEC, CIGRÉ e NEMA

Ana C.Fonseca, Anilton R. Junior, Diego M. Pereira, Pedro M. L. Alcamim, Aurélio L. M. Coelho e José E. L. de Almeida

Universidade Federal de Itajubá – Campus Itabira

anacfonseca@unifei.edu.br, anilton.rjr.unifei@gmail.com, diegowfs2@gmail.com, pedromoreira@unifei.edu.br

aurelio.coelho@unifei.edu.br, j.eugenio@unifei.edu.br,

Resumo — A análise da qualidade da energia elétrica é importante para garantir a operação do sistema. O desequilíbrio de tensão pode causar distúrbios prejudiciais ao sistema. Assim, as normas do *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE), *International Electrotechnical Commission* (IEC), *National Electrical Manufacturers Association* (NEMA) e *Conseil International des Grands Réseaux Electriques* (CIGRÉ) definem métodos de cálculos de índices para garantir níveis de tensão não prejudiciais ao sistema. Nesse contexto, este trabalho apresenta um protótipo físico e um supervisor virtual para cálculo dos índices de desequilíbrio de tensão. Testes práticos e fundamentos teóricos são confrontados para análise dos índices a fim de se obter a sensibilidade dos índices. As principais discussões e conclusões acerca da importância dos indicadores implementados e suas relações para cada cenário analisado são apresentados.

Palavras Chave – Qualidade da energia, Desequilíbrio de tensão, IEEE, IEC, NEMA, CIGRÉ.

I. INTRODUÇÃO

Com o passar do tempo, as cargas utilizadas tem mudado suas características de forma significativa, principalmente com o advento da eletrônica de potência. Esta característica tem provocado impactos na qualidade da energia elétrica transmitida e fornecida.

Dessa forma, os estudos referentes à qualidade da energia elétrica têm se expandido com o tempo no que se refere a normatizações, quantificações, identificações de causa e efeito, e redução das consequências dos fenômenos associados à qualidade da energia elétrica. No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e o Operador Nacional do Sistema (ONS), junto com universidades, centro de pesquisas e fabricantes de equipamentos, têm buscado tratar essas questões, na maioria das vezes, baseados nas normas internacionais já estabelecidas. Como exemplo, têm-se os seguintes órgãos internacionais: *International Electrotechnical Commission* (IEC), *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE), *National Electrical Manufacturers Association* (NEMA) e *International Council on Large Electric Systems* (CIGRÉ) [1].

Dentre os diversos problemas associados à qualidade da energia elétrica, destacam-se: os harmônicos de tensão e corrente, o efeito da ressonância, a flutuação de tensão, os afundamentos e as elevações de tensão. Com relação às tensões, as mesmas podem sofrer desequilíbrios de magnitude e ângulo de fase que pode comprometer a operação dos ativos do sistema expostos às mesmas, como definido em [1]-[5].

A referência [3] diz que o desequilíbrio de tensão se trata de uma diferença entre os valores de módulos das tensões que de forma ideal devem ser idênticos e/ou uma diferença entre a defasagem (ângulo) de duas fases para o sistema trifásico, que idealmente devem ser $\pm 120^\circ$.

Têm-se relatado na literatura [1] que os desequilíbrios de tensão podem causar: perdas excessivas, sobreaquecimentos, estresse do isolamento, redução de vida útil e má operação de motores e transformadores, acionamento indevido de sistemas de proteção e contadores, e circulação de correntes harmônicas. Tais efeitos podem causar paradas de processos produtivos, queima de equipamentos elétricos e desligamentos de sistemas elétricos, que podem gerar problemas operacionais e financeiros aos diversos segmentos da sociedade.

Nesse contexto, torna-se importante definir indicadores que possibilitem identificar desequilíbrios que venham causar problemas nos sistemas elétricos. Atualmente, existem diversos indicadores de desequilíbrios elétricos, sendo os mais comuns: o fator de desequilíbrio de tensão baseado nas componentes simétricas da IEC; o fator de desequilíbrio de tensão da NEMA; o fator de desequilíbrio de tensão do CIGRÉ; e o fator de desequilíbrio de tensão do IEEE [1], [3], [6], [7].

A partir da temática supracitada, este trabalho apresenta um ferramental para cálculo, teste e supervisão dos fatores de desequilíbrio de tensão baseados nos padrões IEC, NEMA, CIGRÉ e IEEE.

II. MÉTODOS PARA CÁLCULO DO FATOR DE DESEQUILÍBRIO

A. Método de medida de desequilíbrio da IEC

A IEC é uma organização internacional, criada na Suíça em 1906, que visa padronizar procedimentos e tecnologias das áreas de elétrica, eletrônicas e afins, conforme apresentado em [8].

As referências [2]-[5] apresentam detalhes sobre o cálculo do fator de desequilíbrio de tensão baseado na IEC. Segundo a mesma, o grau de desequilíbrio de tensão é mensurado através da relação entre as tensões de sequência negativa e positiva, podendo ser calculado por (1):

$$VUF(\%) = \frac{|\dot{V}_-|}{|\dot{V}_+|} \times 100 \quad (1)$$

onde:

- $VUF(\%)$ é o fator de desequilíbrio em porcentagem;
- $|\dot{V}_-|$ é o módulo da tensão de sequência negativa;
- $|\dot{V}_+|$ é o módulo da tensão de sequência positiva.

A IEC define uma faixa limite como adequado para um fator de desequilíbrio menor que 2% [2]-[5].

B. Método de medida de desequilíbrio da NEMA

A NEMA foi criada em 1926 nos Estados Unidos e visa padronizar procedimentos e as tecnologias relacionadas as áreas de elétrica, eletrônicas e afins [9].

No caso dos desequilíbrios de tensão, a NEMA define que o grau de desequilíbrio de tensão é a relação entre o máximo desvio da média das tensões de linha e a média das tensões de linha. Podendo ser calculado por (2) [6]:

$$VUF(\%) = \frac{|V_{\max}| - |V_{\text{média}}|}{|V_{\text{média}}|} \times 100 \quad (2)$$

onde:

- $VUF(\%)$ é o fator de desequilíbrio em porcentagem;
- $|V_{\max}|$ é o módulo da máxima tensão de linha;
- $|V_{\text{média}}|$ é o módulo da média das tensões de linha.

Sendo definido como limite adequado um fator de desequilíbrio de tensão menor que 5%. Pois segundo NEMA é recomendado a aplicação de um coeficiente de redução de potência (*derating*) do motor de indução quando operando sob desequilíbrio de tensão de até 5% [6].

C. Método de medida de desequilíbrio do CIGRÉ

O CIGRÉ foi criado em 1921 na França como um Conselho que visa padronizar procedimentos e as tecnologias relacionadas ao planejamento e operação de grandes sistemas elétricos [10].

No caso dos desequilíbrios de tensão, o CIGRÉ define que o grau de desequilíbrio de tensão é a relação normalizada entre as tensões de linhas, podendo ser calculado por (3) [2]-[3]:

$$VUF(\%) = \frac{1 - \sqrt{3-6\beta}}{1 + \sqrt{3-6\beta}} \times 100 \quad (3)$$

$$\text{Tendo } \beta = \frac{|V_{ab}|^4 + |V_{bc}|^4 + |V_{ca}|^4}{(|V_{ab}|^2 + |V_{bc}|^2 + |V_{ca}|^2)^2}$$

onde:

- $VUF(\%)$ = Fator de desequilíbrio em porcentagem;
- $|V_{ab}|$ = Módulo da tensão de linha “ab”;
- $|V_{bc}|$ = Módulo da tensão de linha “bc”;
- $|V_{ca}|$ = Módulo da tensão de linha “ca”;

Vale salientar que o CIGRÉ define como limite adequado um fator de desequilíbrio de tensão menor que 2% [2]-[3].

D. Método de Medida de desequilíbrio do IEEE

O IEEE foi criado em 1963 nos Estados Unidos e visa proporcionar conhecimentos nas áreas de elétrica, eletrônica, computação e afins [11].

No caso dos desequilíbrios de tensão, o IEEE define que o grau de desequilíbrio de tensão é a relação entre a máxima amplitude das tensões de fase e a média das tensões de fase, podendo ser calculado por (4) [7].

$$VUF(\%) = \frac{3(|V_{\max}| - |V_{\min}|)}{|V_{AN}| + |V_{BN}| + |V_{CN}|} \times 100 \quad (4)$$

onde:

- $VUF(\%)$ = Fator de desequilíbrio em porcentagem;
- $|V_{\max}|$ = Módulo da máxima tensão de fase;
- $|V_{\min}|$ = Módulo da mínima tensão de fase;
- $|V_{AN}|$ = Módulo da tensão de fase “AN”;
- $|V_{BN}|$ = Módulo da tensão de fase “BN”;
- $|V_{CN}|$ = Módulo da tensão de fase “CN”.

O IEEE define que um limite adequado é um fator de desequilíbrio menor que 2,5%. Define também um desequilíbrio de ângulo entre $\pm 2,5\%$ e $\pm 6\%$ para a defasagem angular entre as fases [7].

III. METODOLOGIA

Inicialmente foram realizados cálculos teóricos conforme as equações apresentadas na seção I. Na sequência ensaios práticos foram realizados para obtenção dos fatores de desequilíbrio. Para isso, utilizaram-se os seguintes componentes e equipamentos:

- Mala de teste CMC 256 *plus* da OMICRON;
- *Software Test Universe 3.00* da OMICRON;
- NI ESB-6212 da *National Instruments*;
- Sensor *Hall* de tensão;
- *Software LabView* da *National Instruments*.

Na prática, fez-se a montagem utilizando o Sensor *Hall* de tensão, a placa de aquisição NI USB-6212 da *National Instruments* e a mala de testes CMC 256 *plus* da OMICRON.

Com a mala de testes e o sensor *hall* alimentados pela rede, conectou-se o sensor *hall* a uma das saídas trifásicas da

mala de testes. Verificou-se que o sensor *hall* de tensão possuía uma relação de transformação de 1:86,43 na fase A, 1:87,75 na fase B e 1:87,37 na fase C, obtidos experimentalmente.

A saída do sensor *hall* foi conectada na placa de aquisição NIESB-6212 da *National Instruments*, que envia (via cabo *usb*) o sinal de tensão para o *Software LabView* da *National Instruments*.

Os sinais de tensão foram programados e injetados pela mala de teste CMC 256 *plus* da OMICRON para reproduzir diferentes cenários de desequilíbrios reais de tensão.

Através do *Software LabView* da *National Instruments* fez-se a leitura e condicionamento dos dados, como ilustrado no fluxograma apresentado na Fig. 1, de modo que seja apresentado o valor de cada índice referente aos casos de desequilíbrio de tensão, como apresentados pela Fig. 2.

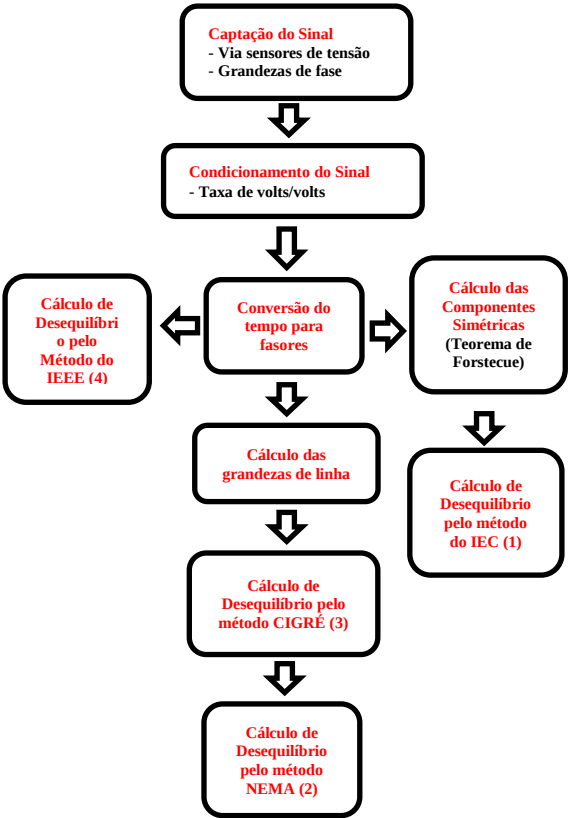


Fig. 1. Condicionamento de sinais
Fonte: Próprios autores.

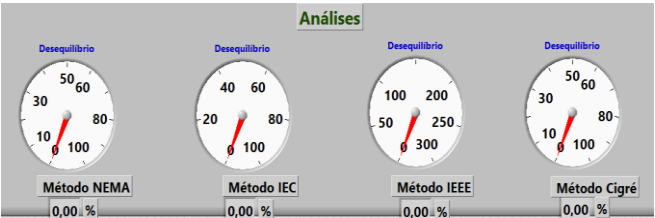


Fig. 2. Índices de desequilíbrio de tensão.
Fonte: Próprios autores.

A partir desse sistema, os ensaios foram divididos em sete etapas:

- Tensões Equilibradas;

- Desequilíbrio de módulo de uma fase;
- Desequilíbrio de módulo de duas fases;
- Desequilíbrio de ângulo de uma fase;
- Desequilíbrio de ângulo de duas fases;
- Desequilíbrio de módulo e ângulo de uma fase;
- Falta de uma fase;

Para análise fez-se necessário a comparação dos resultados obtidos na prática com os resultados obtidos na teoria (calculados em (1), (2), (3), (4)). Tendo também o objetivo de realizar a comparação dos índices da IEC, da NEMA, do CIGRÉ e do IEEE.

Os percentuais de desequilíbrios entre as fases dos oito casos serão apresentados na seção III.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O primeiro teste realizado foi com a injeção de tensões equilibradas (módulo e ângulo) para que se pudesse avaliar a medição de desequilíbrio realizado por cada indicador e pelo sistema implementado.

Como as tensões são equilibradas, por meio da teoria constatou-se que os índices de desequilíbrio foram zeros em todos os métodos, conforme apresentado na Tabela I.

Índices	Índices Calculados	Índices Medidos	Variação (+/-)
NEMA	0%	0,498%	0,498%
IEC	0%	0,295%	0,295%
IEEE	0%	0,724%	0,724%
CIGRÉ	0%	0,735%	0,735%

Avaliando os resultados encontrados e mostrados na Tabela I, percebe-se que os valores medidos estão bem próximos à zero, valor este coincidente e esperado pelo cálculo de todos os índices. Ressaltando-se que os valores apresentados são devidos erros associados aos equipamentos utilizados. Observa-se também que todas as medidas apresentaram uma variação inferior a 1%, o que pode ser aceitável devido aos erros inerentes de medições e da instrumentação utilizada e que, como poderá ser constatado mais a frente, não compromete a comparação entre os métodos.

A. Desequilíbrios de módulos monofásico e bifásico

O segundo conjunto de testes realizados foram desequilíbrios de módulos (Mód.), as quais estão apresentadas na Tabela II.

Nos casos monofásicos, na primeira situação o desequilíbrio de módulo aplicado foi de 3%, isto é, o módulo da fase A estava com seu valor de módulo 3% menor que das duas outras fases (B e C).

Nos casos bifásicos, na primeira situação o desequilíbrio de módulo foi de 1.4% e 3.7%, isto é, os módulos dessas fases (A e B, respectivamente) estavam com seus valores de módulos menores do que o da fase C.

Assim, os casos de desequilíbrios de módulos em apenas

uma fase do sistema consistiram em manter duas fases (B e C) em 0% (127 V), e variar a fase A em 3% (123,20 V), em 14,5% (108,60 V) e em 28% (91,40 V). Já o caso de desequilíbrio de módulo em duas fases, consistiu em manter uma fase (C) em 0% (127 V), e variar as duas fases (A e B) em 1,4% e 3,7% (125,20 V e 122,36 V), em 6,1% e 17% (119,3 V e 105,36 V), e em 13,5% e 32,8% (109,80 V e 85,36 V), respectivamente. Para todos esses casos, os ângulos (Âng.) foram mantidos defasados em $\pm 120^\circ$.

TABELA II. MÓDULOS DE TENSÕES DESEQUILBRADAS, MEDIDAS E CALCULADAS.

		Mód.	Âng.	Mód.	Âng.	Mód.	Âng.
A→C		3,0%	0,0%	14,5%	0,0%	28%	0,0%
B→C		0,0%	0,0%	0,00%	0,0%	0,0%	0,0%
Desequilíbrio entre fases (monofásico)	Índices	Índices Calculados		Índices Medidos		Variação (+/-)	
		1,00%		1,155%		0,155%	
	NEMA	5,01%		4,742%		0,268%	
		10,0%		9,293%		0,707%	
		1,01%		1,172%		0,162%	
	CÌGRÉ	5,01%		4,839%		0,171%	
		10,00%		9,558%		0,442%	
		3,02%		2,581%		0,439%	
	IEEE	15,22%		14,840%		0,160%	
		30,92%		30,744%		0,176%	
		1,01%		0,718%		0,292%	
	IEC	5,07%		4,798%		0,272%	
		10,30%		10,073%		0,227%	

		Mód.	Âng.	Mód.	Âng.	Mód.	Âng.
A→C		1,4%	0,0%	6,1%	0,0%	13,5%	0,0%
B→C		3,7%	0,0%	17%	0,0%	32,8%	0,0%
Desequilíbrio entre fases (bifásico)	Índices	Índices Calculados		Índices Medidos		Variação (+/-)	
		1,00%		0,795%		0,205%	
	NEMA	5,00%		5,696%		0,696%	
		10,00%		10,302%		0,302%	
		1,08%		0,924%		0,156%	
	CÌGRÉ	5,40%		6,092%		0,692%	
		11,25%		11,272%		0,022%	
		3,72%		1,478%		0,272%	
	IEEE	18,46%		18,179%		0,281%	
		38,78%		38,610%		0,170%	
		1,08%		1,263%		0,183%	
	IEC	5,40%		5,562%		0,162%	
		11,20%		11,441%		0,241%	

Nos casos dos desequilíbrios de módulos observa-se que para os quatro índices os valores medidos e os calculados se aproximaram. Nenhum erro foi acima de 1%, sendo assim um bom sistema para análise de casos de desequilíbrios de módulo, seguindo as normas da IEC, NEMA, CIGRÉ e IEEE, pois os valores medidos apresentaram boa precisão em

relação aos valores calculados.

Observando os percentuais de desequilíbrios reais nos módulos das tensões e comparando com os percentuais apresentados nos índices é possível observar que o índice do IEEE apresenta grande proximidade ao desequilíbrio percentual aplicada à tensão, já que, nos casos monofásicos anteriores, os índices apresentaram valores de 3,02%, 15,22% e 30,92% para os casos de desequilíbrios percentuais reais nos módulos das tensões de 3%, 14,5% e 28%, respectivamente. Essa característica é observada tanto nos casos monofásicos como nos bifásicos.

Assim, tem-se que o índice do IEEE está relacionado com a variação percentual aplicada à tensão dos módulos das tensões, sendo possível ter noção da variação aplicada à tensão pela observação do índice.

É importante observar, por meio dos resultados obtidos, que o índice do IEEE apresenta maior sensibilidade, ou seja, possui um índice mais rígido que os outros índices, pois apresenta valores maiores em situações iguais aos outros métodos. Sendo assim, para adotar o índice do IEEE é necessário possuir um sistema com maior precisão, simetria e sem grandes distúrbios para cumprir os 2,5% estipulado pela norma.

B. Desequilíbrios de ângulo monofásico e bifásico

O terceiro conjunto de testes realizados foram desequilíbrios de ângulo (Âng.), os quais estão apresentadas na Tabela III.

Nos casos monofásicos, na primeira situação o desequilíbrio de ângulo aplicado foi de 1,7%, isto é, o ângulo da fase A estava com seu valor de ângulo 1,7% menor que a defasagem 120° em relação à fase C.

Nos casos bifásicos, na primeira situação o desequilíbrio de ângulo foi de 0,75% e -1%, isto é, os ângulos dessas fases (A e B, respectivamente), estavam com seus valores menores do que a defasagem de $\pm 120^\circ$ em relação a fase C.

Assim, os casos de desequilíbrios de ângulos em apenas uma fase do sistema consistiram em manter duas fases simétricas (B e C) em 0% (-120° e 120°), e variar a fase A em 1,7% (2°), em 8,5% ($10,2^\circ$) e em 17,3% ($20,80^\circ$). Em seguida, o caso de desequilíbrio de ângulo em duas fases, consistiu em manter uma fase (C) em 0% (120°), e variar as duas fases (A e B) em 0,75% e -1% ($0,9^\circ$ e $-121,2^\circ$), em 12,17% e 8,17% ($14,6^\circ$ e $-110,20^\circ$), e em 12,92% e 17,83% ($15,5^\circ$ e $-98,60^\circ$), respectivamente. Para todos esses casos, os módulos se mantiveram em 127 V.

Nos casos dos desequilíbrios de ângulo é possível observar na Tabela III que para os três índices (IEC, NEMA e CIGRÉ), os valores medidos e calculados se aproximaram. Nenhum erro foi acima de 1%, configurando assim um bom sistema para análise de casos de desequilíbrios de ângulo, seguindo as normas da IEC, NEMA e CIGRÉ, já que os valores medidos apresentaram boa precisão em relação aos valores calculados. Já o índice IEEE, não se mostrou um bom indicador para desequilíbrios de ângulos, uma vez que seu índice não é sensível a variação de ângulo, como

constatado tanto nos cálculos como nas medidas. Ressalta-se aqui que o IEEE especifica na norma uma variação de ângulo entre $\pm 2,5\%$ e $\pm 6\%$, conforme apresentado na seção I.

TABELA III. ÂNGULOS DAS TENSÕES DESEQUILBRADAS, MEDIDAS E CALCULADAS

		Mód.	Âng.	Mód.	Âng.	Mód.	Âng.
		A→C	B→C	A→C	B→C	A→C	B→C
Desequilíbrio entre fases (monofásico)	Índices	Índices Calculados	Índices Medidos	Variação (+/-)			
		1,00%	1,464%	0,464%			
	NEMA	5,01%	5,060%	0,050%			
		9,98%	9,644%	0,336%			
		1,16%	1,470%	0,31%			
	CIGRÉ	5,95%	6,044%	0,094%			
		12,21%	11,604%	0,606%			
		0,00%	0,655%	0,655%			
	IEEE	0,00%	0,700%	0,700%			
		0,00%	0,734%	0,734%			
		1,16%	1,051%	0,109%			
	IEC	5,85%	5,806%	0,044%			
		11,40%	12,132%	0,732%			
Desequilíbrio entre fases (bifásico)		Mód.	Âng.	Mód.	Âng.	Mód.	Âng.
	A→C	0,0%	0,75%	0,0%	12,17%	0,0%	12,92%
	B→C	0,0%	-1,0%	0,0%	08,17%	0,0%	17,83%
	Índices	Índices Calculados	Índices Medidos	Variação (+/-)			
		1,05%	0,668%	0,382%			
	NEMA	5,00%	4,652%	0,348%			
		10,02%	9,231%	0,789%			
		1,06%	0,966%	0,094%			
	CIGRÉ	7,76%	7,058%	0,702%			
		10,76%	10,014%	0,746%			
		0,00%	0,758%	0,758%			
	IEEE	0,00%	0,691%	0,691%			
		0,00%	0,753%	0,753%			
		1,06%	1,193%	0,133%			
	IEC	7,58%	7,423%	0,157%			
		10,74%	10,38%	0,360%			

C. Desequilíbrios de módulo e ângulo de uma fase

O quarto conjunto de testes realizados foram desequilíbrios de módulo (Mód.) e ângulo (Âng), os quais estão apresentados na Tabela IV.

Neste conjunto de testes, o primeiro caso analisado é um desequilíbrio de módulo de 2,99% e de 0,67% para ângulo, isto é, o módulo da fase A estava com seu valor de módulo 2,99% menor que das duas outras fases (fases B e C). Já o ângulo da fase A estava com seu valor de 0,67% fora da simetria em relação à fase C. Sendo assim os casos de desequilíbrios de módulos e ângulos em apenas uma fase do sistema consistiu em manter, em relação ao ângulo, duas fases simétricas (B e C) em 0% (-120° e 120°), e variar a fase

A em 0,67% (0,8°), em 17% (20,40°) e em 6,92% (8,30°). Com relação ao módulo, consistiu em manter as outras duas fases (B e C) em 0% (127 V), e variar a fase A em 2,99% (123,20 V), em 25,20% (95 V) e em 27,56% (92 V). Em todos os casos, foi realizada a primeira variação de módulo simultaneamente com a primeira variação de ângulo e assim sucessivamente.

TABELA IV. DESEQUILÍBRIOS DE MÓDULO E ÂNGULO, MEDIDAS E CALCULADAS

		Mód.	Âng.	Mód.	Âng.	Mód.	Âng.
		A→C	B→C	A→C	B→C	A→C	B→C
Desequilíbrio entre fases (monofásico)	Índices	Índices Calculados	Índices Medidos	Variação (+/-)			
		1,01%	0,419%	0,591%			
	NEMA	10,00%	10,145%	0,145%			
		10,00%	9,714%	0,286%			
		1,11%	0,666%	0,444%			
	CIGRÉ	14,62%	14,377%	0,243%			
		11,10%	10,628%	0,472%			
		3,02%	2,522%	0,498%			
	IEEE	27,51%	27,21%	0,300%			
		30,35%	30,11%	0,240%			
		1,11%	0,744%	0,366%			
	IEC	14,23%	14,901%	0,671%			
		11,09%	10,822%	0,268%			

Nos casos dos desequilíbrios de módulo e ângulo é possível observar que para os quatro índices medidos e calculados os valores se aproximaram, sendo que nenhum erro foi acima de 1%, configurando assim um bom sistema para análise de casos de desequilíbrios de módulo e ângulo, já que os valores medidos apresentaram boa precisão em relação aos valores calculados.

Observa-se que os indicadores da IEC, NEMA e CIGRÉ apresentaram elevação dos índices quando combinado módulo e ângulo e comparado com a variação apenas do módulo (conforme apresentados na Tabela II). Ressalta-se que, para o primeiro caso do desequilíbrio do módulo e ângulo, o valor de variação do módulo foi igual ao valor de variação do módulo do primeiro caso dos desequilíbrios de módulo. Então, percebe-se que no indicador do IEEE não houve variação, não mostrando eficácia para variação de ângulo.

D. Desequilíbrios de falta monofásica

Esse item propõe-se a analisar os índices de desequilíbrio (apesar dos mesmos serem mais aplicados em regime permanente) para o caso de falta de fase, uma vez que esse evento é típico na indústria e que alguns motores podem continuar a funcionar nessa condição, mas de forma prejudicial a seus isolamentos. Com esse propósito, foi realizado um teste que simula uma falta monofásica. A escolha desta condição foi feita para que se pudesse avaliar a medição de desequilíbrio em situações extremas. Os resultados obtidos para o teste são apresentados na Tabela V.

TABELA V. DESEQUILÍBRIO POR FALTA MONOFÁSICA

Índices	Índices Calculados	Índices Medidos	Varição (+/-)
NEMA	39,230%	39,5230%	0,290%
CIGRÉ	50,000%	50,5900%	0,590%
IEEE	150,00%	147,718%	2,282%
IEC	50,000%	50,6240%	0,624%

Pelos dados apresentados na Tabela V, tem-se a noção da modicidade no caso do desequilíbrio NEMA que apresentou 39,23% para o desequilíbrio de um falta. E o exagero no caso do método IEEE, que apresentou desequilíbrio de 150% para o caso de falta monofásica.

Na Tabela V os valores apresentados foram bastante próximos ao esperado, sendo que o cálculo do método IEEE obteve uma variação de 2,282% entre o teórico e o medido.

A falta de uma fase em alguns casos pode ser problemática e danosa, e uma análise mais detalha nos valores registrados pelos índices torna-se relevante, pois as ocorrências desses sinistros são prejudiciais para o sistema e equipamentos elétricos.

Os Motores de indução trifásicos (MITs) são exemplos de cargas que sofrem com a falta de fase. E sendo um equipamento de grande importância no setor elétrico, torna-se uma grande preocupação as ocorrências de faltas de fase.

V. CONCLUSÃO

A análise de desequilíbrio é fundamental para garantir níveis de tensões adequadas para os equipamentos e ao sistema conectado ao mesmo.

De forma geral, com relação aos testes realizados observou-se que os índices da IEC, NEMA e CIGRÉ apresentaram boa relação de tolerância para distúrbio nos sistemas elétricos, uma vez que as respectivas normas permitem desequilíbrios aplicados à tensão entre as fases de até 3%, valores esses obtidos nos casos de distúrbios reais abaixo de 5%. Já o método do IEEE prevê a utilização de dois indicadores para avaliar a qualidade da energia para desequilíbrios de fase. O indicador do IEEE se apresenta como um índice mais severo, ou seja, com menor tolerância.

No Brasil, a utilização do método do IEEE para a verificação da qualidade da energia elétrica não é muito adequada, pois suas características não compactuam com a realidade e as particularidades do sistema elétrico brasileiro, uma vez que os níveis de desequilíbrio do sistema real em operação ultrapassam os critérios do IEEE. Assim, ao se utilizar o método para cálculo do fator de desequilíbrio do IEEE, o sistema elétrico brasileiro estaria operando fora dos valores definidos em norma, uma vez que o desequilíbrio real do sistema estaria maior que o valor permitido pelo IEEE.

O índice da NEMA é o indicador com a menor sensibilidade a variações, pois apresenta os menores valores quando comparado aos outros indicadores e, dessa forma, permitindo distúrbios mais severos.

Os índices da IEC e do CIGRÉ se apresentam de forma mais satisfatória, uma vez que não são muitos severos e nem amenos em seus valores, sendo indicadores mais adequados.

Os quatro indicadores de desequilíbrio de tensão possuem particularidades e aplicações se tornando utilizáveis em situações específicas.

Atualmente, o indicador de desequilíbrio de tensão mais utilizado é o IEC devido ao pioneirismo na área, mas principalmente por utilizar o *Teorema de Fortescue* em seu método de análise. No Brasil, o método da IEC também é o mais utilizado e para fins de comparação com o mesmo aplica-se o método do CIGRÉ [1]-[5].

VI. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) pelos recursos concedidos para elaboração desta pesquisa.

VII. REFERÊNCIAS

- [1] LELES, A. F. F. (200). Análise do Comportamento do Fator de Desequilíbrio Frente a Variação da Amplitude e do Ângulo da Tensão. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGENE.DM-024/08, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 112p.
- [2] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil) (ANEEL). Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. Brasília, 2010.
- [3] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil) (ANEEL); Superintendência de Regulação dos Serviços de Distribuição (Brasil) (SRD). Revisão da Regulamentação sobre a Qualidade do Produto no Sistema de Distribuição de Energia Elétrica: Documento Anexo à Nota Técnica nº 0029/2011-SRD/ANEEL, de 30/06/2011. Brasília, 2011.
- [4] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (Brasil) (ONS). Submódulo 2.2: Padrões de Desempenho da Rede Básica. Brasília, 2002.
- [5] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (Brasil) (ONS). Submódulo 2.8: Gerenciamento dos indicadores de desempenho da rede básica e dos barramentos dos transformadores de fronteira, e de seus componentes. Brasília, 2011.
- [6] NATIONAL ELECTRICAL MANUFACTURERS ASSOCIATION (ESTADOS UNIDOS) (NEMA). NEMA MG-1: Motors and Generators. Washington, 2009.
- [7] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (ESTADOS UNIDOS) (IEEE). IEEE Recommended Practice for Emergency and Standby Power Systems for Industrial and Commercial Applications. Piscataway, 2001. ISBN 1-55937-598-1.
- [8] INTERNATIONAL ELETROTECHNICAL COMMISSION (IEC). About the IEC. Disponível em: <<http://www.iec.ch/about/?ref=menu>>, Acessado em 13 de Novembro de 2016.
- [9] NATIONAL ELECTRICAL MANUFACTURERS ASSOCIATION (NEMA). About the National Electrical Manufacturers Association. Disponível em: <<http://www.nema.org/About/pages/default.aspx>>, Acessado em 13 de Novembro de 2016.
- [10] INTERNATIONAL COUNCIL ON LARGE ELECTRIC SYSTEMS (CIGRÉ). Aim. Disponível em: <<http://www.cigre.org/What-is-CIGRE/Aim>>, Acessado em 13 de Novembro de 2016.
- [11] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (IEEE). About IEEE. Disponível em: <<https://www.ieee.org/about/index.html>>, Acessado em 13 de Novembro de 2016.