



XXII SNTPEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA

AB/XXX/YY
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO - 10

GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GDS

IDENTIFICAÇÃO DO CONJUNTO DE TENSÕES O QUAL IMPLICA NA MÁXIMA CORRENTE ATRAVÉS DE UM REATOR DE NEUTRO MEDIANTE UM DETERMINADO FATOR DE DESEQUILÍBRIO

Leonardo M. N. de Mattos(*)
POTÊNCIA ENGENHARIA

Aniela Maria Peixoto Mendes
ELETOBRAS ELETRONORTE

João Ferreira de Lima Filho
POTÊNCIA ENGENHARIA

RESUMO

As normas vigentes preconizam como aceitável um fator de desequilíbrio de tensão – fator K – menor ou igual à 2%. Entretanto, o cálculo desse fator não se relaciona diretamente com o conjunto de tensões fase-terra de maneira unívoca. Assim, infinitos conjuntos de tensões podem estar relacionados a um mesmo fator K.

Os objetivos deste informe técnico são apresentar os resultados das investigações relativas aos conjuntos de tensões fase-terra que implicam na máxima e na mínima corrente fluindo através do reator de neutro, para utilização no dimensionamento da suportabilidade de corrente em regime permanente de tais equipamentos.

PALAVRAS-CHAVE

Reator de Neutro, Desequilíbrio de Tensão, Fator K, Suportabilidade em Regime Permanente, Computação Paralela

1.0 - INTRODUÇÃO

Define-se desequilíbrio de tensão no sistema elétrico trifásico como uma condição na qual as fases apresentam tensões com módulos distintos entre si, ou defasagem angular diferente de 120° elétricos, ou ainda as duas condições simultaneamente (1). O desequilíbrio de tensão é principalmente ocasionado quando da conexão de cargas monofásicas e/ou cargas trifásicas que não estejam operando de maneira balanceada. Um sistema perfeitamente equilibrado dificilmente acontece na prática (2).

A quantificação do desequilíbrio anteriormente definido é feita através do fator K, também conhecido por fator de desequilíbrio de tensão. Na literatura corrente são mais comumente empregados quatro métodos para a obtenção do fator K (3), sendo eles: Componentes Simétricas, IEEE, CIGRÉ e NEMA.

Tanto nos Procedimentos de Distribuição – PRODIST (4), quanto nos Procedimentos de Rede (5), normatiza-se como aceitável um fator K menor ou igual à 2%. O problema, já suscitado pela literatura especializada em Qualidade de Energia, é que o cálculo desse fator não se relaciona com os dados de entrada (conjuntos de tensões fase-terra) de maneira unívoca. Portanto, infinitos conjuntos de tensões podem estar relacionados a um mesmo fator K. E para um mesmo fator K, distintos conjuntos de tensões fase-terra, apresentados por uma determinada malha, podem implicar em diferentes modos de funcionamento dos equipamentos trifásicos à ela conectados.

Os reatores de aterramento de neutro são equipamentos conectados no ponto comum dos reatores de derivação. Objetivam a limitação da corrente de neutro em momentos de solicitações transitórias, como por exemplo, a energização de linhas, de transformadores, surtos, dentre outros eventos. Ademais, são utilizados para a redução da corrente de arco secundário no religamento e também para afastamento das condições de ressonância para

(*) SCLRN 708 - Bloco A – Entrada 39 – Sala 102 – Asa Norte – CEP 70.740-551 Brasília, DF – Brasil
Tel: (+55 61) 9115-3287 – Email: leonardo@mattos.eng.br

tensões induzidas em circuitos paralelos.

Durante o estudo de dimensionamento da suportabilidade de corrente, em regime permanente, através dos reatores de neutro associados aos reatores em derivação das linhas que compõem a interligação Manaus – Boa Vista 500 kV, procurou-se atender aos valores de fator de desequilíbrio estipulados nas normas vigentes. Contudo, ao longo de tais análises surgiu a interessante dúvida acerca de qual seria o conjunto de tensões, o qual produziria um fator K igual à 2%, que maximizaria a corrente que fluiria através dos reatores de neutro em estudo.

Tendo-se em mente que, em geral, as fases das tensões variam pouco, e que a magnitude das correntes que fluem pelo reator de neutro, em regime, são diretamente proporcionais ao módulo da tensão de sequência zero, estudou-se então como a variação dos módulos das tensões fase-terra (defasadas de 120° elétricos entre si) implicariam no módulo da tensão de sequência zero.

Desta maneira, fez-se um estudo para uma enorme quantidade de conjuntos de tensões fase-terra, varrendo todo o espaço de soluções possíveis, para as faixas de tensão de 0,95 à 1,05 pu e 1,00 à 1,10 pu, considerando uma precisão arbitrária e aplicando os métodos Componentes Simétricas, IEEE e CIGRÉ. Durante esses estudos, investigaram-se os conjuntos de tensões fase-terra que resultaram na máxima e na mínima tensão de sequência zero para fatores K de 0,2 à 3,0%, em passos de 0,2%.

A partir dos dados supracitados, foi possível sistematizar o comportamento da tensão de sequência zero, em relação à variação dos fatores K, possibilitando uma análise prática da máxima e/ou mínima corrente que fluirá por um determinado reator de neutro, para um desejado grau de desequilíbrio de tensão. De tal sorte, propõe-se, mediante tais resultados, três metodologias distintas para o dimensionamento do módulo da referida corrente. Além disso, obtiveram-se tabelas contendo tensões fase-terra que podem ser utilizadas em estudos envolvendo desequilíbrio de tensão.

Para a realização dessas tarefas, foi desenvolvida uma aplicação em linguagem C otimizada para ambientes paralelos de alta *performance*. Os resultados providos pela aplicação foram validados com a modelagem do mesmo sistema em estudo, no software *Alternative Transients Program* (ATP).

2.0 - DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Maximizar o módulo da corrente que flui pelo reator de neutro, $|I_n|$, é equivalente à maximização do módulo da tensão $|V_n|$, no ponto comum dos reatores de fase, conforme apresentado no circuito da Figura 2.1.

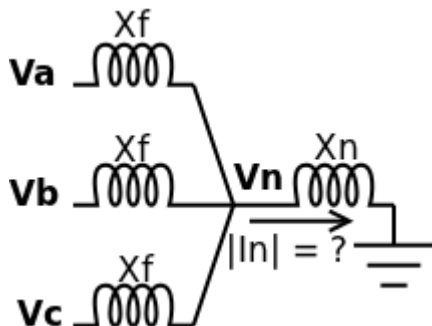


Figura 2.1 - Diagrama do problema em estudo.

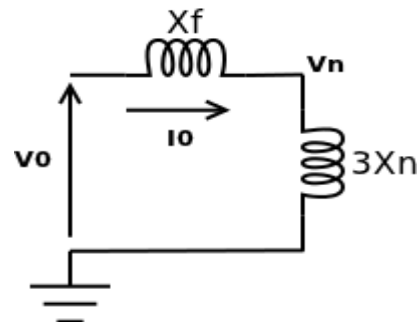


Figura 2.2 - Circuito de sequência zero do problema em estudo.

Por sua vez, $|V_n|$ relaciona-se de maneira direta com o módulo da tensão de sequência zero, $|V_0|$. Logo, o problema da maximização de $|I_n|$ é equivalente ao problema da maximização de $|V_0|$. A abordagem do problema pelo domínio de sequência é mais simples quando comparada à abordagem pelo domínio de fases, haja vista que o circuito a ser analisado é de apenas uma malha, como ilustrado na Figura 2.2.

Portanto, no presente trabalho buscou-se o conjunto de módulos de tensões fase-terra em pu, $|V_a|$, $|V_b|$, $|V_c|$, igualmente defasados de 120° elétricos entre si, que retorna o maior $|V_0|$ e que esteja vinculado aos fatores K, calculados pelos métodos citados no Item 1.0, dentro de determinados critérios de precisão, erros estipulados e de faixas de tensão, os quais serão detalhados no item subsequente. Na Tabela 2.1 apresenta-se a definição matemática dos métodos utilizados para o cálculo do fator K (3).

Após identificação do conjunto $|V_a|$, $|V_b|$, $|V_c|$ que resulta no maior $|V_0|$, para um determinado fator K, a corrente que flui pelo neutro pode ser facilmente calculada tanto pelas tensões fase-terra, quanto pela tensão de sequência zero, pela Equação (1).

$$|In_{maxpu}| = \frac{3|V0|}{|Z0|} = \frac{|Va + Vb + Vc|}{Xf + 3Xn} \quad (1)$$

Tabela 2.1 - Métodos de cálculo para o fator K: Componentes Simétricas, IEEE e CIGRÉ .

Método de Cálculo	Equação
Componentes Simétricas	$K\% = \frac{ V_2 }{ V_1 } \times 100$
IEEE	$K\% = \frac{3(V_{m\acute{a}x} - V_{m\acute{i}n})}{ V_{ab} + V_{bc} + V_{ca} } \times 100$
CIGRÉ	$K\% = \frac{\sqrt{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}}{\sqrt{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \times 100$ $\beta = \frac{ V_{ab} ^4 + V_{bc} ^4 + V_{ca} ^4}{(V_{ab} ^2 + V_{bc} ^2 + V_{ca} ^2)^2}$

O problema da minimização de $|In|$ é análogo ao da maximização, diferenciando-se apenas na função objetivo. Em vez de se buscar o conjunto de tensões fase-terra que resulte no maior $|V0|$, pesquisa-se aquele do qual se obtenha o menor $|V0|$.

2.1 DETALHES DA ABORDAGEM MATEMÁTICA E COMPUTACIONAL

Primeiramente, criou-se um vetor de tensões, V_k , dentro das faixas operativas normais admissíveis em regime permanente (6), a saber, 0,95 à 1,05 pu e 1,00 à 1,10 pu com precisão de 10^{-4} . Portanto, tais vetores possuem cardinalidade 1001.

Devido à grande cardinalidade de V_k , para criar o espaço de soluções a ser pesquisado, utilizou-se o conceito de *multisets* (7). Tal abordagem foi utilizada a fim de se evitar a busca em um espaço de soluções cúbico, passando para um espaço do tipo piramidal, reduzindo, assim, o número de cálculos e recursos computacionais necessários em 2/3. Os espaços de soluções para as duas faixas de tensão ora propostas são apresentados nas Figuras 2.3 e 2.4:

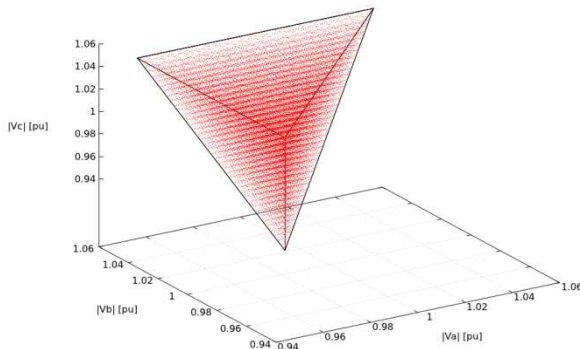


Figura 2.3 - Espaço de soluções pesquisado para a faixa de tensão de 0,95 à 1,05 pu.

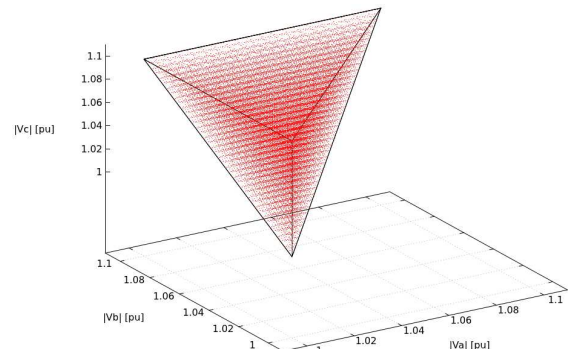


Figura 2.4 - Espaço de soluções pesquisado para a faixa de tensão de 1,00 à 1,10 pu.

Os cálculos para $|V0|$, e, por extensão, para $|In|$, são equivalentes para uma dada sequência (subconjunto do espaço de soluções) de tensões fase-terra e as permutações associadas à essa sequência. Por exemplo, dada uma sequência de tensões fase-terra $\{Va, Vb, Vc\} = \{1,05 \angle 0^\circ, 1,04 \angle -120^\circ, 1,06 \angle 120^\circ\}$ pu, e uma outra, permutando-se somente os módulos das tensões da sequência anterior, neste caso, $\{Va, Vb, Vc\}' = \{1,04 \angle 0^\circ, 1,06 \angle -120^\circ, 1,05 \angle 120^\circ\}$ pu, percebe-se que ambas apresentam os mesmos $|V0|$. Sendo assim, implicam num mesmo $|In|$. Por tal fato, considerou-se o espaço de soluções formado por *multisets* de V_k tomados de 3 em 3 e não pela permutação desse vetor.

De tal sorte, o tamanho dos espaços de soluções, em quantidades de sequências, pode ser determinado pela seguinte relação binomial:

$$\binom{n+k-1}{k} = \binom{1001+3-1}{3} = 167668501 \quad (2)$$

Para cada uma dessas seqüências, calculou-se $|V_0|$ e o fator K relacionado, utilizando-se os métodos Componentes Simétricas, IEEE e CIGRÉ. Então, fez-se a classificação dos maiores e menores valores de $|V_0|$ para os três métodos de cálculo, dentro da faixa dos valores de K desejados, de 0,2 à 3,0 %, em passos de 0,2 %. Os valores de K calculados, quando comparados com os previamente definidos, foram considerados válidos caso apresentassem um erro menor que $\pm 5 \times 10^{-4}$.

Para realizar tais tarefas, desenvolveu-se uma aplicação de propósito específico em linguagem C, com o compilador da Intel, fazendo uso da API para programas paralelos em sistemas de memória compartilhada OpenMP (8) (9) e também da biblioteca numérica livre GSL (10). Processou-se esse programa num notebook com processador i7-2860QM, 8 gb de ram e executando Ubuntu GNU/Linux 11.10 (11).

A melhora de *performance* devido ao fato da aplicação ser paralela é evidenciada pela Figura 2.5. Vê-se por essa figura que há uma substancial diminuição no tempo de processamento com o aumento do número de núcleos em operação. Para cada aumento, houve uma diminuição no tempo total computacional da ordem de 10%.

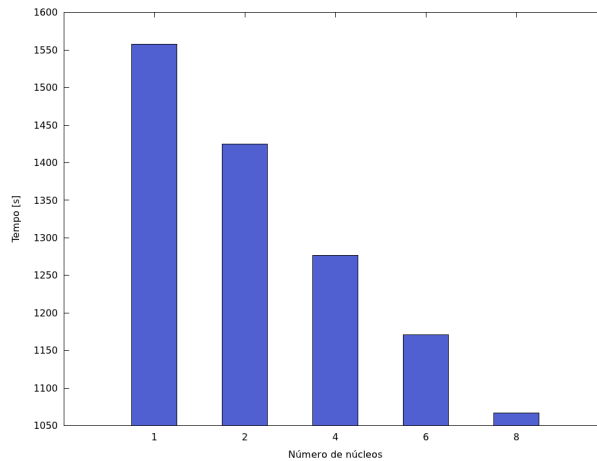


Figura 2.5 - Comparação do tempo de processamento x número de núcleos.

3.0 - RESULTADOS E ANÁLISES

Apresentam-se nas Figuras 3.1 e 3.2 os resultados das simulações descritas no Item 2.0:

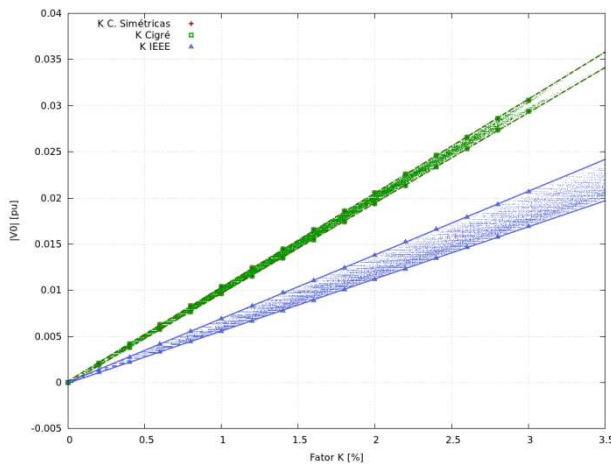


Figura 3.1 – Módulo da tensão de seqüência zero x Fator K para a faixa de tensão de 0,95 à 1,05 pu.

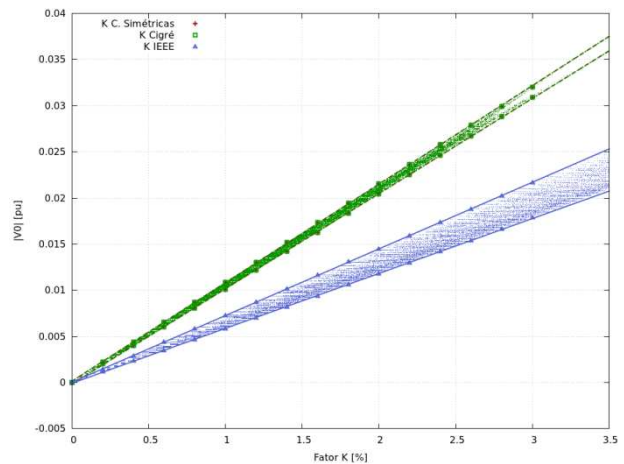


Figura 3.2 – Módulo da tensão de seqüência zero x Fator K para a faixa de tensão de 1,00 à 1,10 pu.

Nas figuras acima destacam-se os pontos dos fatores K de interesse, os pontos de máximos e mínimos de cada método. Por eles foram traçadas retas que determinam os lugares geométricos dos máximos e mínimos $|V_0|$. Além disso, entre as referidas retas, apresenta-se uma quantidade reduzida dos demais $|V_0|$ obtidos por cada método.

Verifica-se que os métodos Componentes Simétricas e CIGRÉ exibem resultados muito semelhantes entre si e distintos daqueles obtidos pelo método IEEE. Pela inclinação das curvas, vê-se que os métodos Componentes Simétricas e CIGRÉ mostram-se mais conservadores, pois para um dado fator K, apresentaram maiores valores de

$|V_0|$, o que acarretará em um maior dimensionamento na corrente de regime permanente que flui pelo reator de neutro em estudo.

Nota-se ainda, pelas Figuras 3.1 e 3.2, que o espaço formado pelas soluções do método IEEE, apresenta uma variabilidade maior em valores de K, para a mesma faixa de tensão, ultrapassando valores de 3,5 %. Já os demais métodos concentram-se na região para $K < 3,0$ %.

Na Tabela 3.1, apresentam-se os parâmetros das retas correspondentes aos lugares geométricos dos valores de máximos e mínimos $|V_0|$, para cada um dos métodos em análise:

Tabela 3.1 – Parâmetros das retas dos lugares geométricos dos máximos e mínimos $|V_0|$ obtidos com os métodos em análise.

	Faixa de tensão 0,95 à 1,05 pu		Faixa de tensão 1,00 à 1,10 pu	
	a	b	a	b
V0KCSMin(k)	0,00979461	-0,000137103	0,01031240	-0,000147846
V0KCSMax(k)	0,01019100	0,000145500	0,01067540	0,000151882
V0KCigreMin(k)	0,00979471	-0,000137309	0,01031260	-0,000148213
V0KCigreMax(k)	0,01019160	0,000144176	0,01067580	0,000151007
V0KIEEEMin(k)	0,00564897	-6,88309E-05	0,00594835	-7,5654E-05
V0KIEEEMax(k)	0,00689700	3,78750E-05	0,00722082	4,1713E-05

Como pode ser visto pela Tabela 3.1, pelos coeficientes angulares das retas, e visualmente confirmado pelas Figuras 3.1 e 3.2, o método do IEEE apresenta um maior afastamento entre os valores máximos e mínimos de $|V_0|$. Portanto, ao utilizar-se um conjunto aleatório de tensões que resulte em um dado K calculado por este método, há uma maior probabilidade de se estar distante dos valores extremos.

Com os dados apresentados na Tabela 3.1, é possível calcular $|V_0|$ para valores de K diferentes dos pesquisados no presente artigo, com uma razoável aproximação, utilizando a equação (3):

$$|V_0|_{\text{método}}(K\%) = aK + b \quad (3)$$

E por fim, as Tabelas 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5 mostram os conjuntos de tensões fase-terra, as quais resultaram nos maiores e menores $|V_0|$, para cada faixa de tensão proposta e cada faixa de valores de K de interesse.

Tabela 3.2 - Conjuntos de tensões fase-terra que implicam na MAIOR tensão de sequência zero para a faixa de tensão de 0,95 à 1,05 pu.

K [%]	Componentes Simétricas				CIGRÉ				IEEE			
	$ V_0 $ [pu]	$ V_a $ [pu]	$ V_b $ [pu]	$ V_c $ [pu]	$ V_0 $ [pu]	$ V_a $ [pu]	$ V_b $ [pu]	$ V_c $ [pu]	$ V_0 $ [pu]	$ V_a $ [pu]	$ V_b $ [pu]	$ V_c $ [pu]
0,2	0,0021	1,0436	1,0498	1,0500	0,0021	1,0437	1,0500	1,0500	0,0014	1,0449	1,0491	1,0491
0,4	0,0042	1,0370	1,0493	1,0498	0,0042	1,0370	1,0493	1,0498	0,0028	1,0300	1,0383	1,0383
0,6	0,0063	1,0311	1,0498	1,0500	0,0063	1,0305	1,0487	1,0498	0,0042	1,0315	1,0440	1,0440
0,8	0,0083	1,0247	1,0494	1,0500	0,0083	1,0246	1,0492	1,0500	0,0056	1,0306	1,0473	1,0473
1	0,0104	1,0187	1,0498	1,0500	0,0104	1,0187	1,0498	1,0500	0,0070	1,0288	1,0497	1,0497
1,2	0,0125	1,0123	1,0494	1,0499	0,0125	1,0123	1,0494	1,0499	0,0083	1,0226	1,0476	1,0476
1,4	0,0145	1,0064	1,0498	1,0500	0,0145	1,0064	1,0498	1,0500	0,0097	1,0206	1,0498	1,0498
1,6	0,0165	1,0001	1,0494	1,0500	0,0165	1,0000	1,0492	1,0500	0,0111	1,0154	1,0487	1,0487
1,8	0,0186	0,9941	1,0496	1,0500	0,0186	0,9941	1,0496	1,0500	0,0125	1,0105	1,0479	1,0479
2	0,0206	0,9878	1,0492	1,0499	0,0206	0,9878	1,0491	1,0500	0,0138	1,0061	1,0476	1,0476
2,2	0,0226	0,9819	1,0494	1,0500	0,0226	0,9819	1,0494	1,0500	0,0152	1,0041	1,0498	1,0498
2,4	0,0246	0,9757	1,0490	1,0500	0,0246	0,9757	1,0490	1,0500	0,0166	0,9999	1,0497	1,0497
2,6	0,0266	0,9698	1,0492	1,0500	0,0266	0,9697	1,0491	1,0499	0,0180	0,9959	1,0498	1,0498
2,8	0,0286	0,9641	1,0498	1,0500	0,0286	0,9641	1,0498	1,0500	0,0193	0,9919	1,0499	1,0499
3	0,0306	0,9582	1,0499	1,0500	0,0306	0,9582	1,0499	1,0500	0,0207	0,9865	1,0485	1,0485

Tabela 3.3 - Conjuntos de tensões fase-terra que implicam na MENOR tensão de sequência zero para a faixa de tensão de 0,95 à 1,05 pu.

K [%]	Componentes Simétricas				CIGRÉ				IEEE			
	V0 [pu]	Va [pu]	Vb [pu]	Vc [pu]	V0 [pu]	Va [pu]	Vb [pu]	Vc [pu]	V0 [pu]	Va [pu]	Vb [pu]	Vc [pu]
0,2	0,0019	0,9500	0,9500	0,9557	0,0019	0,9501	0,9513	0,9563	0,0011	0,9501	0,9520	0,9539
0,4	0,0038	0,9502	0,9519	0,9624	0,0038	0,9502	0,9519	0,9624	0,0022	0,9587	0,9625	0,9664
0,6	0,0057	0,9500	0,9500	0,9672	0,0057	0,9500	0,9500	0,9672	0,0033	0,9523	0,9581	0,9638
0,8	0,0077	0,9501	0,9518	0,9739	0,0077	0,9501	0,9518	0,9739	0,0044	0,9549	0,9626	0,9703
1	0,0096	0,9505	0,9505	0,9793	0,0096	0,9505	0,9505	0,9793	0,0055	0,9501	0,9597	0,9693
1,2	0,0115	0,9500	0,9518	0,9855	0,0115	0,9500	0,9518	0,9855	0,0067	0,9508	0,9623	0,9739
1,4	0,0135	0,9505	0,9505	0,9910	0,0135	0,9505	0,9505	0,9910	0,0078	0,9505	0,9640	0,9775
1,6	0,0155	0,9502	0,9503	0,9966	0,0155	0,9502	0,9503	0,9966	0,0089	0,9502	0,9656	0,9811
1,8	0,0174	0,9502	0,9503	1,0025	0,0174	0,9502	0,9503	1,0025	0,0101	0,9500	0,9663	0,9848
2	0,0194	0,9507	0,9507	1,0089	0,0194	0,9507	0,9507	1,0089	0,0112	0,9504	0,9698	0,9892
2,2	0,0214	0,9500	0,9500	1,0141	0,0214	0,9500	0,9500	1,0141	0,0123	0,9500	0,9698	0,9927
2,4	0,0234	0,9504	0,9504	1,0205	0,0234	0,9504	0,9504	1,0205	0,0135	0,9500	0,9727	0,9967
2,6	0,0254	0,9501	0,9501	1,0262	0,0254	0,9501	0,9501	1,0262	0,0146	0,9500	0,9748	1,0007
2,8	0,0274	0,9500	0,9500	1,0321	0,0274	0,9500	0,9500	1,0321	0,0158	0,9500	0,9763	1,0047
3	0,0294	0,9501	0,9502	1,0383	0,0294	0,9501	0,9502	1,0383	0,0170	0,9500	0,9774	1,0087

Tabela 3.4 - Conjuntos de tensões fase-terra que implicam na MAIOR tensão de sequência zero para a faixa de tensão de 1,00 à 1,10 pu.

K [%]	Componentes Simétricas				CIGRÉ				IEEE			
	V0 [pu]	Va [pu]	Vb [pu]	Vc [pu]	V0 [pu]	Va [pu]	Vb [pu]	Vc [pu]	V0 [pu]	Va [pu]	Vb [pu]	Vc [pu]
0,2	0,0022	1,0933	1,0998	1,1000	0,0022	1,0930	1,0991	1,1000	0,0015	1,0940	1,0984	1,0984
0,4	0,0044	1,0866	1,0995	1,1000	0,0044	1,0866	1,0995	1,1000	0,0029	1,0797	1,0884	1,0884
0,6	0,0066	1,0795	1,0985	1,0998	0,0066	1,0795	1,0986	1,0997	0,0044	1,0810	1,0941	1,0941
0,8	0,0087	1,0737	1,0998	1,1000	0,0087	1,0734	1,0994	1,0998	0,0058	1,0802	1,0977	1,0977
1	0,0109	1,0667	1,0987	1,1000	0,0109	1,0667	1,0987	1,1000	0,0073	1,0781	1,1000	1,1000
1,2	0,0130	1,0602	1,0986	1,1000	0,0130	1,0602	1,0986	1,1000	0,0087	1,0716	1,0978	1,0978
1,4	0,0152	1,0540	1,0991	1,1000	0,0152	1,0540	1,0991	1,1000	0,0102	1,0660	1,0965	1,0965
1,6	0,0173	1,0475	1,0990	1,0999	0,0173	1,0475	1,0989	1,1000	0,0116	1,0644	1,0993	1,0993
1,8	0,0195	1,0414	1,0995	1,1000	0,0195	1,0414	1,0996	1,0999	0,0131	1,0593	1,0985	1,0985
2	0,0216	1,0350	1,0994	1,1000	0,0216	1,0350	1,0994	1,1000	0,0145	1,0550	1,0985	1,0985
2,2	0,0237	1,0284	1,0988	1,1000	0,0237	1,0284	1,0988	1,1000	0,0159	1,0502	1,0980	1,0980
2,4	0,0258	1,0226	1,0999	1,1000	0,0258	1,0225	1,0998	1,0999	0,0174	1,0464	1,0985	1,0985
2,6	0,0279	1,0159	1,0991	1,0999	0,0279	1,0159	1,0990	1,1000	0,0188	1,0421	1,0985	1,0985
2,8	0,0300	1,0097	1,0991	1,1000	0,0300	1,0097	1,0991	1,1000	0,0202	1,0381	1,0988	1,0988
3	0,0320	1,0036	1,0994	1,1000	0,0320	1,0036	1,0994	1,1000	0,0217	1,0343	1,0993	1,0993

Tabela 3.5 - Conjuntos de tensões fase-terra que implicam na MENOR tensão de sequência zero para a faixa de tensão de 1,00 à 1,10 pu.

K [%]	Componentes Simétricas				CIGRÉ				IEEE			
	V0 [pu]	Va [pu]	Vb [pu]	Vc [pu]	V0 [pu]	Va [pu]	Vb [pu]	Vc [pu]	V0 [pu]	Va [pu]	Vb [pu]	Vc [pu]
0,2	0,0020	1,0003	1,0003	1,0063	0,0020	1,0003	1,0003	1,0063	0,0012	1,0000	1,0020	1,0040
0,4	0,0040	1,0000	1,0012	1,0126	0,0040	1,0000	1,0017	1,0128	0,0023	1,0074	1,0114	1,0155
0,6	0,0060	1,0003	1,0003	1,0184	0,0060	1,0003	1,0003	1,0184	0,0035	1,0021	1,0082	1,0142
0,8	0,0081	1,0000	1,0000	1,0242	0,0081	1,0000	1,0000	1,0242	0,0047	1,0050	1,0131	1,0212
1	0,0101	1,0003	1,0003	1,0306	0,0101	1,0003	1,0003	1,0306	0,0058	1,0003	1,0104	1,0205
1,2	0,0122	1,0000	1,0001	1,0365	0,0122	1,0000	1,0001	1,0365	0,0070	1,0000	1,0121	1,0243
1,4	0,0142	1,0003	1,0003	1,0429	0,0142	1,0003	1,0003	1,0429	0,0082	1,0001	1,0143	1,0285
1,6	0,0163	1,0001	1,0001	1,0489	0,0163	1,0001	1,0001	1,0489	0,0094	1,0000	1,0155	1,0325

1,8	0,0183	1,0000	1,0000	1,0550	0,0183	1,0000	1,0000	1,0550	0,0106	1,0010	1,0193	1,0377
2	0,0204	1,0002	1,0003	1,0615	0,0204	1,0002	1,0003	1,0615	0,0118	1,0000	1,0200	1,0408
2,2	0,0225	1,0003	1,0003	1,0678	0,0225	1,0003	1,0003	1,0678	0,0130	1,0002	1,0227	1,0452
2,4	0,0246	1,0003	1,0003	1,0741	0,0246	1,0003	1,0003	1,0741	0,0142	1,0002	1,0248	1,0494
2,6	0,0267	1,0003	1,0003	1,0804	0,0267	1,0003	1,0003	1,0804	0,0154	1,0003	1,0270	1,0537
2,8	0,0288	1,0002	1,0003	1,0867	0,0288	1,0002	1,0003	1,0867	0,0166	1,0000	1,0285	1,0576
3	0,0309	1,0003	1,0003	1,0931	0,0309	1,0003	1,0003	1,0931	0,0178	1,0000	1,0292	1,0618

Por conseguinte, a partir dos dados apresentados, o corrente informe técnico propõe que $|I_n|$ seja dimensionado, em regime permanente, no que tange à contribuição do desequilíbrio de tensão, por meio de três distintas metodologias:

- **Metodologia 1:** Por meio de simulação computacional, utilizando os conjuntos de tensões fase-terra para os fatores K pesquisados, apresentados nas Tabelas 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5.
- **Metodologia 2:** Por meio de cálculo, utilizando $|V_0|$ para os fatores K pesquisados, presente nas Tabelas 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5 em conjunto com a Equação (1).
- **Metodologia 3:** Para fatores K que não estejam entre os pesquisados, pode-se utilizar a Equação (3) para calcular $|V_0|$, em seguida aplicar a Equação (1).

A título de exemplo, para o estudo da máxima $|I_n|$, considere-se o reator de fase motivador desse IT, o qual será conectado à LT 500 kV Equador - Boa Vista, sendo sua potência 136 Mvar/500 kV, que corresponde à uma reatância $X_f = 1838,24 \Omega$. Admitindo-se um fator de aterramento (X_0/X_1) usual de 1,7 para o dimensionamento do reator de neutro, obtém-se uma reatância $X_n = 428,92 \Omega$. O fato da tensão nominal do sistema onde este equipamento entrará em operação ser 500 kV, implica no uso da faixa de tensão normal de 1,00 à 1,10 pu.

Para a Metodologia 1, modelou-se o circuito da Figura 2.1 no ATP e aplicaram-se os valores do conjunto de tensões referente a um fator $K = 2,0 \%$, correspondente ao método das Componentes Simétricas (Tabela 3.4). Para a Metodologia 2, utilizaram-se os dados da mesma tabela. Já para a Metodologia 3, usaram-se os parâmetros da reta $V_0KCS_{Max}(k)$, faixa de tensão 1,00 à 1,10 pu, da Tabela 3.1. Os resultados obtidos estão expostos na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Validação dos cálculos e comparação entre as três metodologias sugeridas para dimensionamento da suportabilidade da corrente de regime permanente de um reator de neutro.

	$ V_0 $ [Vp]	$ V_n $ [Vp]	$ I_n $ [Ap]
Metodologia 1	-	3625,5550	8,4528
Metodologia 2	8818,1631	-	8.4654
Metodologia 3	8778,4332	-	8.4273

Pela Tabela 3.6, confirma-se a validade das três metodologias propostas para dimensionamento das correntes, em regime permanente, que fluirão por um reator de neutro, referente a um fator de desequilíbrio de tensão K determinado, haja vista que os resultados referentes a $|I_n|$ são praticamente os mesmos, diferindo apenas a partir da segunda casa decimal.

Cabe ressaltar que os máximos valores de $|I_n|$ calculados pelas metodologias presentes neste artigo, devem ser considerados como um valor mínimo no dimensionamento da suportabilidade das correntes que fluem por um reator de neutro, uma vez que outros fenômenos podem contribuir para um aumento dessa corrente em regime permanente, como, por exemplo, harmônicas com características de triplas, desbalanço das reatâncias do reator em derivação associado ao reator de neutro, dentre outros.

Apesar do presente artigo ser focado em reatores de neutro, os resultados obtidos são bastante genéricos. Por exemplo, os dados apresentados nas Tabelas 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5 podem ser utilizados em diversos estudos de desequilíbrio de tensão. E, para quaisquer elementos, conectados em estrela-aterrada, que possam ser representados por impedâncias balanceadas entre si e sem acoplamentos mútuos, é possível calcular as máximas e mínimas correntes, resultantes de um dado desequilíbrio de tensão, que irão fluir pelo neutro, fazendo uso das metodologias ora apresentadas.

4.0 - CONCLUSÕES

Considerando as análises realizadas no presente informe técnico, os principais resultados obtidos são:

- Os lugares geométricos dos módulos de valores máximos e mínimos da tensão de sequência zero, $|V_0|$, e, por extensão, o módulo da corrente a fluir pelo reator de neutro, $|I_n|$, apresentam uma relação aproximadamente linear com o fator K.

- Os métodos Componentes Simétricas e CIGRÉ apresentam resultados muito semelhantes entre si e distintos daqueles obtidos pelo método IEEE.
- Pela inclinação das curvas “[V0] versus Fator K”, ilustradas nas Figuras 3.1 e 3.2, vê-se que os métodos Componentes Simétricas e CIGRÉ apresentam resultados mais conservadores quando comparados com o método do IEEE, pois para um dado fator K, resultam em maiores valores de [V0], o que acarretará em um maior dimensionamento na corrente de regime permanente que flui pelo reator de neutro em estudo.
- Foram propostas três metodologias distintas para a obtenção dos módulos das correntes máximas e mínimas através de um reator de neutro, para um dado desequilíbrio de tensão:
 - Por meio de simulação, utilizando os conjuntos de tensões fase-terra para os fatores K pesquisados, apresentados nas Tabelas 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5;
 - Por meio de cálculo, utilizando os módulos da tensão de sequência zero para os fatores K pesquisados, presentes nas Tabelas 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5 em conjunto com a Equação (1).
 - Para fatores K que não estejam entre os pesquisados, sugeriu-se utilizar a Equação (3) para o cálculo do módulo da tensão de sequência zero, utilizando-se em seguida a Equação (1).
- As metodologias de obtenção/cálculo supracitadas mostraram-se válidas.
- Os máximos valores do módulo da corrente de neutro calculados pelas metodologias propostas neste artigo podem ser considerados como valor mínimo no dimensionamento da suportabilidade das correntes que fluem por um reator de neutro, uma vez que outros fenômenos podem contribuir para um aumento dessa corrente em regime permanente, como, por exemplo, harmônicas com características de triplas, desbalanço das reatâncias do reator em derivação associado ao reator de neutro, dentre outros.
- Por fim, apesar do presente artigo ser focado em reatores de neutro, os dados apresentados podem ser utilizados em diversos estudos de desequilíbrio de tensão. E, fazendo-se uso das metodologias aqui propostas, é possível calcular as máximas e mínimas correntes em regime permanente, de um sistema com tensões desequilibradas, que irão fluir pelo neutro de qualquer elemento que possa ser representado por impedâncias balanceadas entre si e sem acoplamentos mútuos, conectado em estrela-aterrada.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. *Indicadores de qualidade de energia elétrica - frequência e tensão*. **ONS**. 2010. Procedimentos de Rede. Vol. Submódulo 25.6.
2. **Dugan, Roger C, McGranaghan, Mark F e Beaty, H Wayne**. *Electrical power systems quality*. s.l. : McGraw-Hill New York, 1996. Vol. 2.
3. **Ferreira Filho, Anésio de Leles**. *Análise do comportamento do fator de desequilíbrio frente a variação da amplitude e do ângulo da tensão*. 2008. Ph.D. dissertation.
4. *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional*. **ANEEL**. 2012. PRODIST. Vol. Módulo 8.
5. *Gerenciamento dos indicadores de desempenho da rede básica e dos barramentos dos transformadores de fronteira, e de seus componentes*. **ONS**. 2010. Procedimentos de Rede. Vol. Submódulo 2.8.
6. *Diretrizes e Critérios para Estudos Elétricos*. **ONS**. 2011. Procedimentos de Rede. Submódulo 23.3.
7. **Wikipedia**. Multiset --- Wikipedia, The Free Encyclopedia. *Multiset --- Wikipedia, The Free Encyclopedia*. 2013. [Online; accessed 24-April-2013].
8. —. OpenMP --- Wikipedia, The Free Encyclopedia. *OpenMP --- Wikipedia, The Free Encyclopedia*. 2013. [Online; accessed 24-April-2013].
9. **Pacheco, Peter**. *An introduction to parallel programming*. s.l. : Morgan Kaufmann, 2011.
10. *The GNU Scientific Library Reference Manual, 2007*. **Galassi, Mark, et al., et al.** 2007, URL <http://www.gnu.org/software/gsl>. ISBN, Vol. 954161734, p. 35.
11. **Wikipedia**. Ubuntu (operating system) --- Wikipedia, The Free Encyclopedia. *Ubuntu (operating system) --- Wikipedia, The Free Encyclopedia*. 2013. [Online; accessed 3-May-2013].

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Leonardo M. N. de Mattos; Nascido no Rio de Janeiro em 22 de julho de 1987; Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade de Brasília (2012); Atualmente atua na área de estudos para operação de sistemas elétricos na empresa Potência Engenharia. Áreas de interesse: Sistemas elétricos de potência, transitórios eletromagnéticos, computação de alta performance.



Aniela Maria Peixoto Mendes; Nascida em Brasília em 28 de agosto de 1981; Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade de Brasília (2006); Atualmente é engenheira de operação na área de Estudos Elétricos da Operação de Sistema da Eletrobras Eletronorte, desenvolvendo atividades de estudos de sistemas de transmissão, em regime permanente, transitórios eletromecânicos e eletromagnéticos.



João Ferreira de Lima Filho, Nascido em Pernambuco em 6 de janeiro de 1950; Possui graduação Engenharia Elétrica pela Escola Politécnica de Pernambuco (1973); Possui pós-graduação em Sistemas de Potência pela COPPE-UFRJ (1979). Atualmente é sócio-proprietário da Potência Engenharia. Áreas de interesse: Sistemas elétricos de potência, estudos de regime, curto-circuito, estabilidade, transitórios eletromagnéticos.