

# Impacto da Modelagem Balanceada de Redes de Distribuição Desequilibradas na Análise de Curto-Circuito Simétrico e Assimétrico

Bruno P. Rosa. Tatiana M. L. Assis

*Programa de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro,  
COPPE/UFRJ, Cidade Universitária, Rio de Janeiro, RJ, Brasil  
E-mails: brunopestana@poli.ufrj.br, tatiana@dee.ufrj.br*

---

**Abstract:** In recent years, distributed generation and renewable energy sources have been gaining strength and are developing quickly. Despite the many benefits, a relevant point is the impact of these new energy sources on the protection systems concerning relay settings and fault currents level. The most usual method for fault analysis is based on the symmetrical components theory, assuming that the pre-fault system is perfectly balanced. Particularly in distribution systems, this approximation can generate errors that compromise the results and, consequently, the correct operation and designing of the protection system. Seen in these terms, the use of phase components based methods, which allow an unbalanced modelling of the network, gains relevance in the current context. This paper evaluates the impact of the balanced modelling of unbalanced distribution feeders in the calculation of fault currents. From simulations with the IEEE 4 bus and IEEE 34 bus systems, the errors associated to the use of symmetrical components-based and phase components-based methods are quantified, showing the importance of an accurate representation of the system's unbalance.

**Resumo:** Nos últimos anos, a geração distribuída e as fontes de energias renováveis vêm ganhando força e se desenvolvendo rapidamente. Apesar dos diversos benefícios, um ponto relevante é o impacto dessas novas fontes nos sistemas de proteção no que diz respeito aos ajustes dos relés e ao cálculo das correntes de curto-circuito. O método atualmente mais utilizado para cálculo de correntes de curto-circuito se baseia na teoria dos componentes simétricos, partindo da premissa que o sistema pré-falta é perfeitamente balanceado. Especialmente em sistemas de distribuição, essa aproximação pode gerar erros que comprometem o resultado das análises e, conseqüentemente, o correto funcionamento e projeto do sistema de proteção. Nesse sentido, o uso de métodos baseados em componentes de fase, que permitem a modelagem desbalanceada da rede, ganha relevância no contexto atual. Este artigo avalia o impacto da modelagem balanceada de redes de distribuição desequilibradas no cálculo das correntes de curto-circuito. A partir de simulações com os sistemas IEEE 4 barras e IEEE 34 barras, são quantificados os erros associados ao uso dos métodos baseados em componentes simétricos e componentes de fase, mostrando a importância da representação precisa do desbalanço do sistema.

*Keywords:* Fault analysis; symmetrical components; phase coordinates; distribution feeders.

*Palavras-chaves:* Cálculo de curto-circuito; componentes simétricos; componentes de fase; redes de distribuição.

---

## 1. INTRODUÇÃO

Com o objetivo de alavancar as fontes renováveis de energia, descentralizando e diversificando a matriz energética brasileira, a Geração Distribuída (GD) vem ganhando força nos últimos anos. Medidas governamentais, como o PROINFA e as Resoluções Normativas nº 482/2012 e 687/2015 da ANEEL, que regulamenta o sistema de compensação de energia elétrica no Brasil, impulsionam ainda mais o aumento da GD.

Apesar dos diversos benefícios trazidos pela GD, sua presença na rede de distribuição acarreta problemas a serem enfrentados (Lopes, 2002; Ackermann, 2002). Um dos problemas mais evidentes é o possível impacto nas correntes de curto-circuito, que dependem especialmente da tecnologia

de geração adotada. Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs), por exemplo, que utilizam máquinas síncronas convencionais, têm contribuição mais evidente para as correntes de curto-circuito. Por outro lado, a contribuição de geradores conectados à rede por conversores eletrônicos dependerá da filosofia de controle adotada (Nimpitiwan, 2007; Su, 2014).

Dessa forma, redes elétricas com a presença de geração distribuída representam um novo paradigma para as empresas distribuidoras de energia, uma vez que a mudança das correntes de falta pode impactar o dimensionamento e os ajustes do sistema de proteção.

O método mais largamente utilizado para o cálculo de curto-circuito advém da teoria de componentes simétricos e

considera o sistema pré-falta perfeitamente equilibrado. Dependendo do grau de desbalanço do sistema, essa aproximação é válida e gera erros insignificantes, como ocorre nos sistemas de transmissão. Por outro lado, a adoção dessa premissa em redes severamente desbalanceadas, como é o caso de algumas redes de distribuição, pode comprometer os resultados. As redes de distribuição podem conter trechos trifásicos desbalanceados, mas também trechos monofásicos ou bifásicos (Castellanos, 2008; Teng, 2005). Junta-se a isso, a possibilidade da existência de GDs também conectadas a apenas uma ou duas fases do sistema.

O cálculo das correntes de curto-circuito em redes desbalanceadas pode ser feito de forma mais precisa utilizando a modelagem em componentes de fase. Entretanto, por ser mais trabalhosa, essa técnica é menos explorada.

Apesar de não ser um problema novo e de ser reconhecido que a modelagem de redes desbalanceadas por meio de componentes simétricos gera erros, falta na literatura uma quantificação desses erros, analisando em que casos são mais significativos, e o quão significativos são.

Esse artigo tem como objetivo avaliar o impacto do desequilíbrio de sistemas de distribuição no cálculo de correntes de curto-circuito, comparando o resultado obtido por meio da modelagem do sistema em componentes simétricos e em componentes de fase. A Seção 2 traz uma breve revisão dos fundamentos teóricos do cálculo de curto-circuito através do método de componentes simétricos e de componentes de fase. Na Seção 3, a metodologia de comparação utilizada é descrita e os sistemas teste adotados são apresentados. Os resultados obtidos são discutidos na Seção 4 e a Seção 5 mostra as conclusões do trabalho.

## 2. CÁLCULO DO CURTO-CIRCUITO

A determinação das correntes de curto-circuito é fundamental para o dimensionamento de disjuntores e ajuste do sistema de proteção. Seu cálculo pode ser feito a partir da modelagem do sistema em componentes simétricos ou componentes de fase, conforme resumido nas seções seguintes.

### 2.1 Curto-Circuito via Componentes Simétricos

O cálculo das correntes de curto-circuito baseado na teoria dos componentes simétricos traz uma série de vantagens desde que a rede, na sua condição pré-falta, possa ser considerada perfeitamente equilibrada. Nesse caso, o método dos componentes simétricos é muito útil para a análise de defeitos simétricos e assimétricos e permite, de forma relativamente simples, a determinação das correntes e das tensões em todas as partes do sistema durante a ocorrência da falta (Stevenson, 1974).

O algoritmo comumente usado pode ser resumido nos seguintes passos:

1. Calcular as condições pré-falta do sistema;

2. A partir da topologia do sistema, obter as matrizes de admitância nodal ( $Y_{barra}$ ) de sequência positiva, negativa e zero e, a partir delas, encontrar as respectivas matrizes de impedância de barra ( $Z_{barra}$ );
3. A partir das impedâncias equivalentes de Thévenin obtidas das matrizes  $Z_{barra}$ , calcular as correntes de curto-circuito;
4. Aplicar o teorema da superposição para calcular as condições de defeito nas redes de sequência positiva, negativa e zero;
5. Obter matricialmente os valores de tensão e corrente em componentes de fase.

Esse método considera que o sistema pré-falta é perfeitamente equilibrado, o que faz com que a matriz de impedâncias de uma linha ou carga  $Z_{12}$  seja uma matriz diagonal (Saadat, 1999). Isso resulta no desacoplamento entre as sequências, permitindo considerá-las individualmente, facilitando muito o cálculo do curto-circuito.

Em sistemas de transmissão, o erro cometido com a premissa de equilíbrio é, normalmente, irrelevante, especialmente por conta da transposição das linhas de transmissão. Por outro lado, nas redes de distribuição, o desequilíbrio é, geralmente, significativo. Nesses casos, um método que garante maior precisão é o cálculo do curto-circuito via componentes de fase.

### 2.2 Curto-Circuito via Componentes de Fase

Quando os desequilíbrios presentes em um sistema de distribuição são considerados, como linhas não transpostas e cargas desequilibradas, a modelagem via componentes simétricos perde sua vantagem, sendo mais conveniente realizar o cálculo diretamente por meio de componentes de fase.

Existem diversas formas propostas para esse cálculo. Laughton (1969), Kersting (1990) e Berman (1998) propuseram métodos baseados na matriz de impedância trifásica. Chen (1992) utiliza a trifatorização da matriz de impedância de barras. Teng (2005) propôs um método de análise sistemática para sistemas de distribuição radiais desequilibrados.

O método utilizado nesse trabalho é descrito detalhadamente por Dash (1972) e consiste em representar matricialmente os elementos de um sistema trifásico (Fig. 1) em componentes de fase, seguindo a forma geral (1).

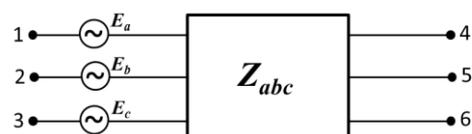


Fig. 1 Elemento geral de um sistema trifásico

$$V_{abc} = E_{abc} + Z_{abc} I_{abc} \quad (1)$$

sendo  $V_{abc}$  o vetor das quedas de tensão por fase ( $V_1-V_4$ ), ( $V_2-V_5$ ) e ( $V_3-V_6$ ),  $E_{abc}$  o vetor das tensões por fase na fonte equivalente,  $I_{abc}$  o vetor das correntes de fase entre os nós 1 e 4, 2 e 5, 3 e 6, e  $Z_{abc}$  é a matriz que representa a rede trifásica mutualmente acoplada.

As tensões de fase são expressas em termos de suas componentes simétricas (zero, positiva e negativa) por (2).

$$V_{abc} = TV_{012} \quad (2)$$

sendo

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

e

$$a = -0,5 + j \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (4)$$

$$a^2 = -0,5 - j \frac{\sqrt{3}}{2}$$

A mesma transformação também relaciona as correntes de fase com suas componentes simétricas.

Para a impedância a transformação é dada por (5).

$$Z_{abc} = \frac{1}{3} TZ_{012}T^* \quad (5)$$

sendo

$$T^* = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (6)$$

A partir daí, os diversos componentes de um sistema de energia elétrica podem ser representados por componentes de fase, e as soluções podem ser obtidas por meio de álgebra matricial.

### 3. METODOLOGIA

Essa seção descreve a metodologia utilizada na análise de sistemas de distribuição desbalanceados. Primeiramente, são apresentados os sistemas teste adotados.

#### 3.1 Sistemas Teste

Inicialmente, é avaliado um sistema de distribuição de pequeno porte, conforme mostra a Fig. 2. Trata-se do Sistema IEEE 4 barras, que contém cargas e linhas desbalanceadas e dois níveis de tensão: 12,47 kV (lado da fonte) e 24,9 kV (lado da rede). Os dados detalhados do sistema podem ser obtidos em Kersting (2001).

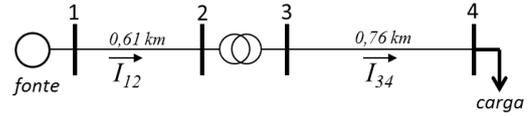


Fig. 2 Diagrama unifilar do sistema teste IEEE 4 barras

Em seguida, foi estudado um sistema baseado em um de distribuição real localizado no Arizona, com tensão nominal de 24,9 kV. Trata-se do sistema IEEE 34 barras, cujo diagrama unifilar está ilustrado na Fig. 3. Esse sistema é caracterizado por ser relativamente longo (93,6 km), com carregamento leve e ter cargas desbalanceadas. Esse sistema possui cinco diferentes configurações de linha, sendo todas desbalanceadas, e três delas monofásicas. Além disso, existe um transformador para reduzir a tensão para 4,16 kV para uma parte do alimentador. Os dados detalhados do sistema podem ser obtidos em Kersting (2001).

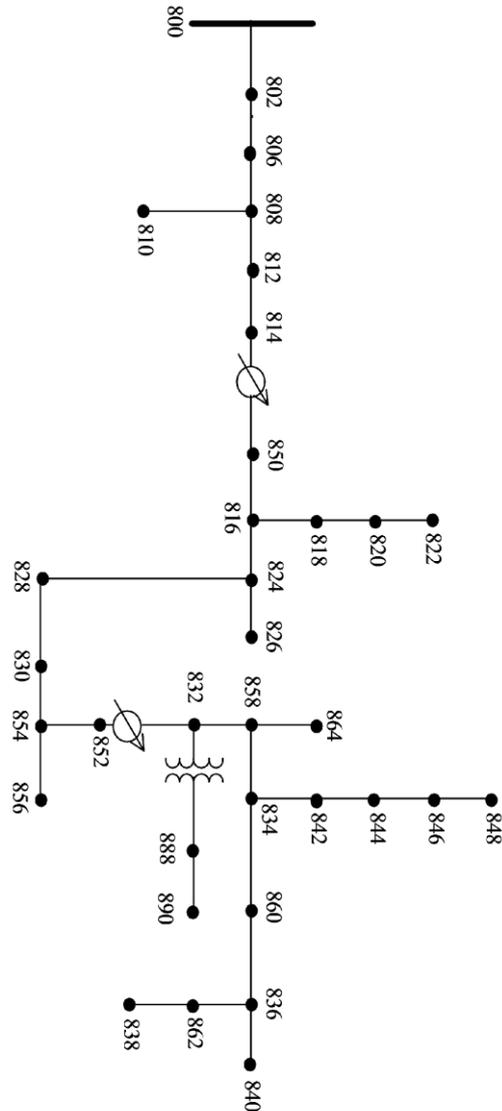


Fig. 3 Diagrama unifilar do sistema teste IEEE 34 barras

### 3.2 Metodologia de Comparação

A metodologia de comparação consiste em cinco etapas principais:

1. Cálculo das tensões e correntes de curto-circuito para a rede desbalanceada via componentes de fase;
2. Determinação dos parâmetros da rede equilibrada aproximada;
3. Determinação da carga equilibrada aproximada;
4. Cálculo das tensões e correntes de curto-circuito para a rede equilibrada aproximada via componentes simétricos;
5. Comparação dos valores obtidos nas etapas 1 e 4 com análise dos erros.

A Etapa 2 consiste em uma aproximação, onde a rede desbalanceada é transformada em uma rede equilibrada aproximada de forma a viabilizar o cálculo do curto-circuito via componentes simétricos. Nessa aproximação (Kersting, 2002; Glover, 2008) se propõe modificar a matriz de impedância  $Z_{abc}$  de uma linha assimétrica como se fosse uma linha perfeitamente transposta, onde suas impedâncias próprias são iguais entre si, assim como as mútuas.

O método consiste em aproximar a impedância própria como a média das impedâncias próprias das três fases, assim como aproximar a impedância mútua como a média das impedâncias mútuas entre as fases. Dessa forma, partindo de (7),

$$Z_{abc} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ca} \\ Z_{ab} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{bc} & Z_{cc} \end{bmatrix} \quad (7)$$

sendo os valores da diagonal as impedâncias próprias das fases a, b e c ( $Z_{aa}$ ,  $Z_{bb}$  e  $Z_{cc}$ , respectivamente); e os valores fora da diagonal as impedâncias mútuas entre as fases a-b, b-c e c-a ( $Z_{ab}$ ,  $Z_{bc}$  e  $Z_{ca}$ , respectivamente), faz-se as aproximações (8) e (9),

$$Z_P = \frac{1}{3}(Z_{aa} + Z_{bb} + Z_{cc}) \quad (8)$$

$$Z_M = \frac{1}{3}(Z_{ab} + Z_{bc} + Z_{ca}) \quad (9)$$

obtendo-se (10),

$$\bar{Z}^{abc} = \begin{bmatrix} Z_P & Z_M & Z_M \\ Z_M & Z_P & Z_M \\ Z_M & Z_M & Z_P \end{bmatrix} \quad (10)$$

sendo  $Z_P$  e  $Z_M$  as impedâncias própria e mútua da rede equilibrada aproximada.

A aplicação da transformação em componentes simétricos em (5) garante a obtenção de uma matriz  $Z_{012}$  diagonal,

viabilizando a análise do curto-circuito por meio da teoria de componentes simétricos (Etapa 4). Na Etapa 3, um processo similar é feito a fim de tornar as cargas perfeitamente equilibradas, dividindo igualmente a carga total de cada barra entre as fases.

Um exemplo de como essa aproximação foi feita pode ser visto para a matriz de impedâncias da Tabela 1, que corresponde a um dos trechos do alimentador do sistema IEEE 34 barras. Nota-se que a matriz original (desequilibrada) é utilizada no cálculo das correntes de curto-circuito por meio das componentes de fase, enquanto que a matriz aproximada (equilibrada) é utilizada no cálculo por meio dos componentes simétricos.

**Tabela 1. Matriz de Impedâncias**

<b>Matriz de impedâncias desequilibrada</b>					
Z (R+jX) em ohms/milha					
Fase a		Fase b		Fase c	
1,3368	1,3343	0,2101	0,5779	0,2130	0,5015
		1,3238	1,3569	0,2066	0,4591
				1,3294	1,3471
<b>Aproximação como matriz equilibrada</b>					
Z (R+jX) em ohms/milha					
Fase a		Fase b		Fase c	
1,3300	1,3461	0,2099	0,5128	0,2099	0,5128
		1,3300	1,3461	0,2099	0,5128
				1,3300	1,3461
<b>Matriz de componentes simétricos resultante</b>					
Z (R+jX) em ohms/milha					
Sequência (0)		Sequência (+)		Sequência (-)	
1,7498	2,3717	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
		1,1201	0,8333	0,0000	0,0000
				1,1201	0,8333

Em (11) são ilustrados os cálculos para a obtenção das componentes próprias e mútuas da rede aproximada para o exemplo da Tabela 1, onde todos os valores indicados estão em  $\Omega$ /milha.

$$\left\{ \begin{array}{l} R_P = \frac{1}{3}(1,3368 + 1,3238 + 1,3294) = 1,3300 \\ X_P = \frac{1}{3}(1,3343 + 1,3569 + 1,3471) = 1,3461 \\ Z_P = 1,3300 + j1,3461 \\ R_M = \frac{1}{3}(0,2101 + 0,2066 + 0,2130) = 0,2099 \\ X_M = \frac{1}{3}(0,5779 + 0,4591 + 0,5015) = 0,5128 \\ Z_M = 0,2099 + j0,5128 \end{array} \right. \quad (11)$$

## 4. RESULTADOS

O programa utilizado para realizar a simulação do curto-circuito foi o Simulight (Taranto, 2012). Essa ferramenta, desenvolvida em C++, tem como foco principal a análise de redes elétricas com geração distribuída, sendo possível a modelagem equilibrada e desequilibrada da rede.

#### 4.1 Sistema IEEE 4 Barras

Primeiramente foram estudados quatro tipos de curto-circuito franco para o sistema IEEE 4 barras: fase-terra, fase-fase, fase-fase-terra e trifásico.

Na Fig. 4 são apresentados, para o curto-circuito fase-terra, o erro máximo e médio da tensão de fase de curto-circuito e o erro máximo e médio da corrente de curto-circuito, respectivamente. Os erros foram calculados da seguinte forma: foi aplicado um curto-circuito em cada uma das barras do sistema (Fig. 2) e foi computado o erro absoluto máximo e médio de todas as tensões e correntes calculadas das três fases. Acima do erro absoluto máximo, entre parênteses, é mostrado o valor percentual do erro, usando como referência os valores obtidos via componentes de fase (valor exato).

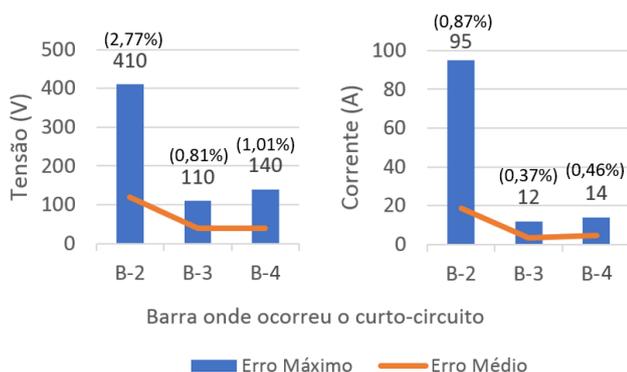


Fig. 4 Erro na tensão e corrente para curto-circuito monofásico – Sistema IEEE 4 barras

As Fig. 5, 6 e 7 representam o mesmo gráfico, mas para os defeitos bifásico-terra, bifásico e trifásico, respectivamente. A partir dos gráficos, é possível perceber que, para todos os tipos de defeito, o erro aumenta quando o ponto de defeito está mais próximo da fonte.

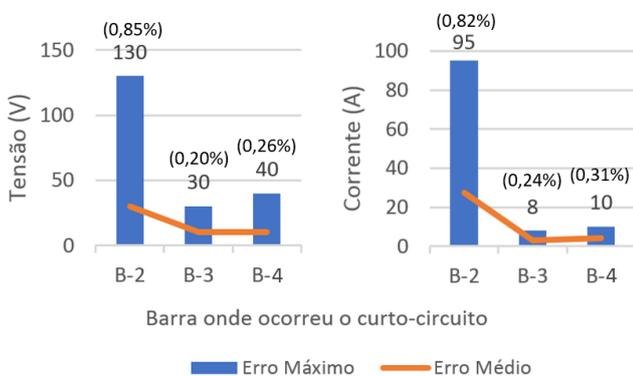


Fig. 5 Erro na tensão e corrente para curto-circuito bifásico-terra – Sistema IEEE 4 barras

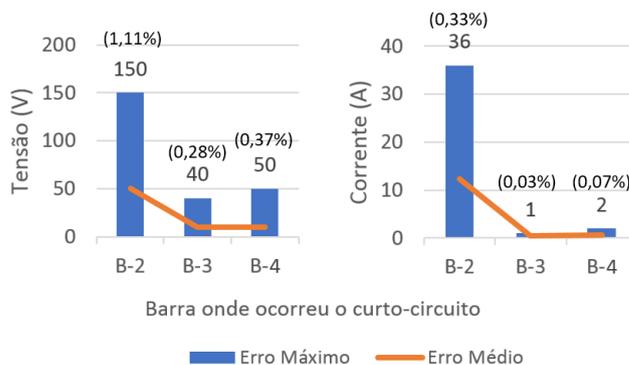


Fig. 6 Erro na tensão e corrente para curto-circuito bifásico – Sistema IEEE 4 barras

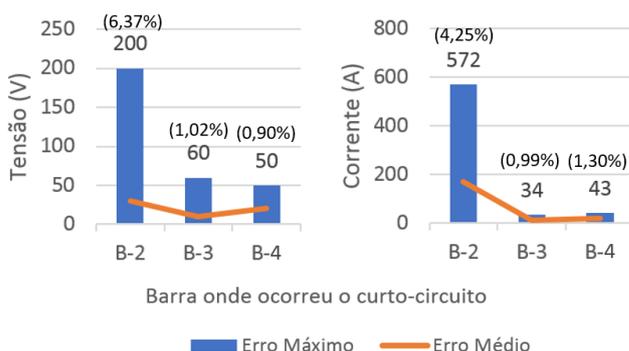


Fig. 7 Erro na tensão e corrente para curto-circuito trifásico – Sistema IEEE 4 barras

#### 4.2 Sistema IEEE 34 Barras

As análises foram estendidas para o sistema IEEE 34 barras. Assim como no sistema IEEE 4 barras, os resultados mostram que, quanto mais afastada da fonte estiver a barra que sofre o curto-circuito, menor será o erro gerado pela aproximação do sistema como sendo perfeitamente equilibrado. Para curtos-circuitos nas barras mais distantes da fonte (a partir da barra 832), o erro médio e o erro máximo para a tensão de falta variaram conforme a Tabela 2.

Tabela 2. Erro na tensão de curto-circuito para barras mais distantes da fonte

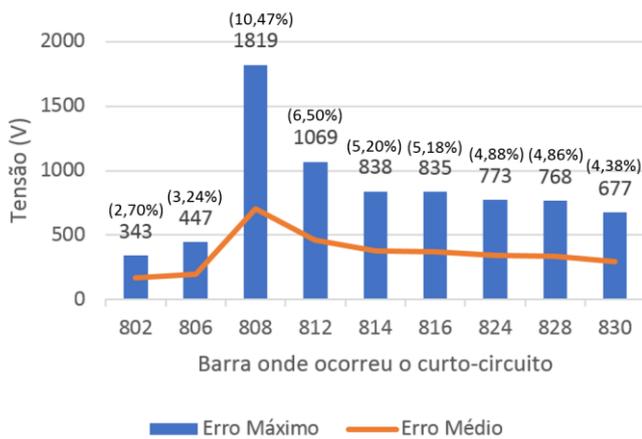
Tipo de Defeito	Erro Máximo (V)	Erro Médio (V)
Monofásico	575 a 600	250 a 260
Bifásico-terra	650 a 690	200 a 210
Bifásico	925 a 960	365 a 385
Trifásico	450 a 480	70 a 75

Já a corrente de falta apresentou erros máximo e médio para barras distantes da fonte segundo a Tabela 3.

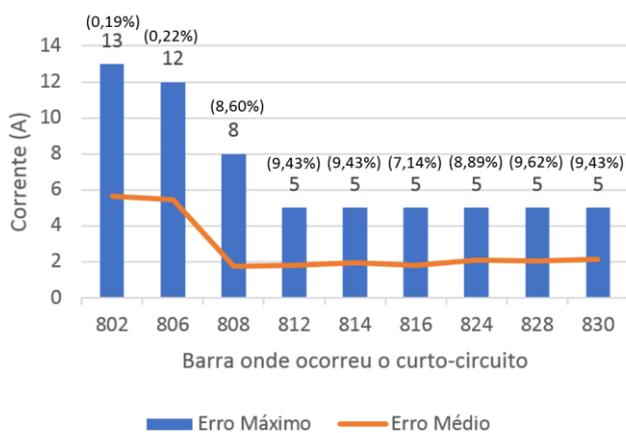
**Tabela 3. Erro na corrente de curto-circuito para barras distantes da fonte**

Tipo de Defeito	Erro Máximo (A)	Erro Médio (A)
Monofásico	5	1,5 a 1,6
Bifásico-terra	10	1,7 a 1,8
Bifásico	9	2,1 a 2,3
Trifásico	12	2,4 a 3

Os erros indicados nas Tabelas 2 e 3 são relativamente baixos. No entanto, à medida que o defeito se aproxima da fonte, esses números aumentam rapidamente. Nas Fig. 8 e 9 estão apresentados o erro máximo e médio da tensão de fase de curto-circuito e o erro máximo e médio da corrente de curto-circuito, respectivamente, assim como o erro relativo representado pelo erro máximo. Esses gráficos seguem o mesmo modelo dos apresentados para o sistema IEEE 4 barras.

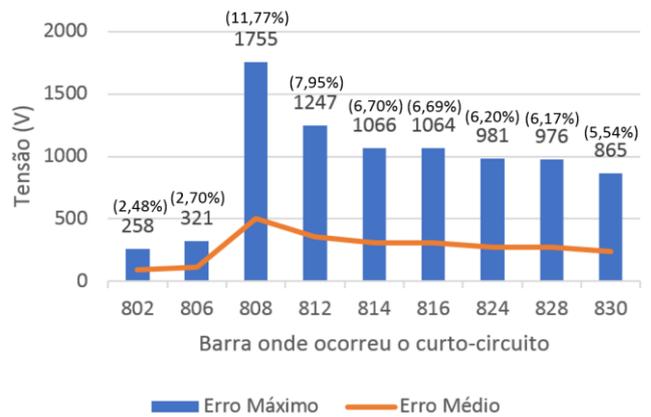


**Fig. 8 Erro na tensão para curto-circuito monofásico – Sistema IEEE 34 barras**

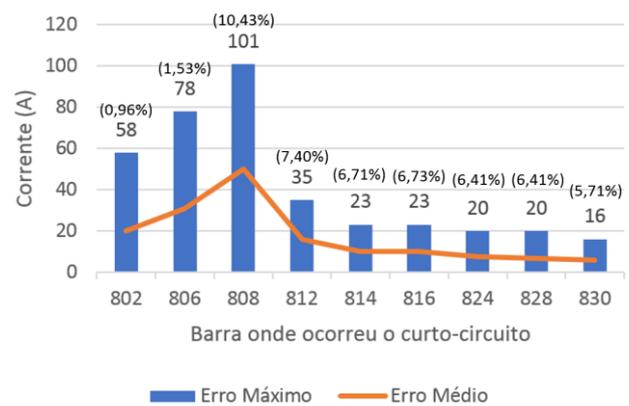


**Fig. 9 Erro na corrente para curto-circuito monofásico – Sistema IEEE 34 barras**

Nota-se um erro significativo no cálculo do curto-circuito na barra 808, que se justifica pelo fato do trecho 808-810 (Fig. 3) ser de natureza monofásica. Nas Fig. 10 e 11 o mesmo resultado é exibido para um curto-circuito bifásico-terra.

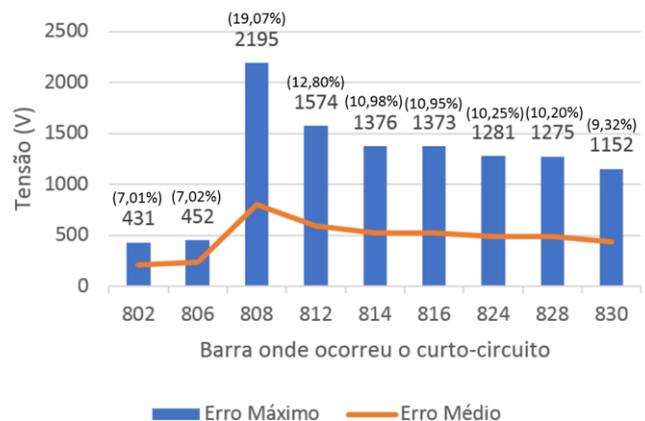


**Fig. 10 Erro na tensão para curto-circuito bifásico-terra – Sistema IEEE 34 barras**



**Fig. 11 Erro na corrente para curto-circuito bifásico-terra – Sistema IEEE 34 barras**

Para o curto-circuito bifásico, os resultados são mostrados nas Fig. 12 e 13. Por fim, nas Fig. 14 e 15 têm-se os resultados para o defeito trifásico.



**Fig. 12 Erro na tensão para curto-circuito bifásico – Sistema IEEE 34 barras**

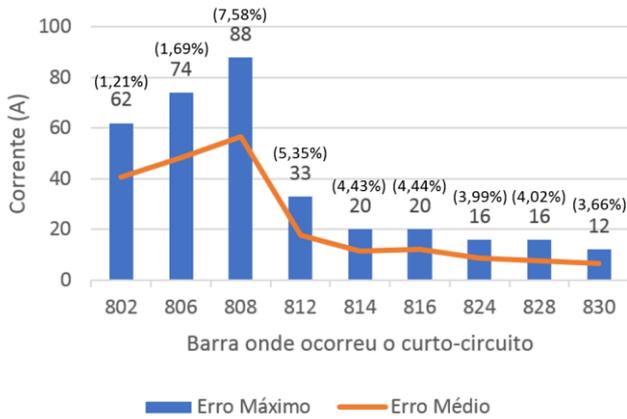


Fig. 13 Erro na corrente para curto-circuito bifásico – Sistema IEEE 34 barras

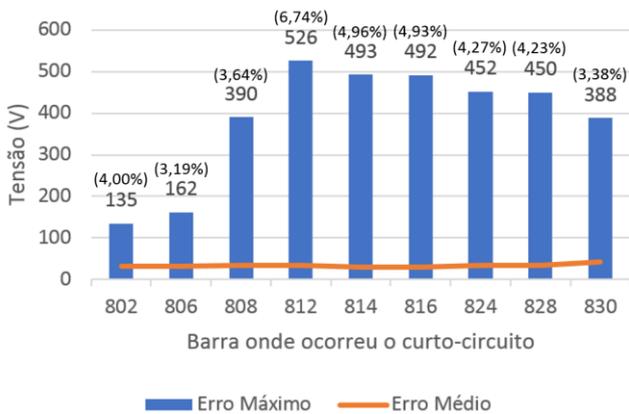


Fig. 14 Erro na tensão para curto-circuito trifásico – Sistema IEEE 34 barras

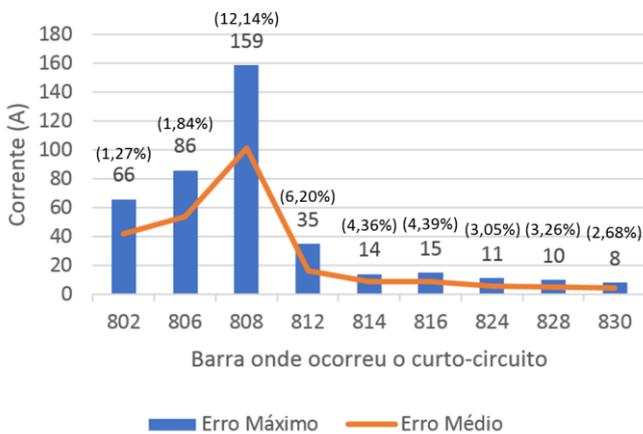


Fig. 15 Erro na corrente para curto-circuito trifásico – Sistema IEEE 34 barras

É importante ressaltar que esses resultados foram obtidos para curtos-circuitos aplicados apenas em barras trifásicas do sistema IEEE 34 barras. Para defeitos aplicados em barras de trechos monofásicos, os erros foram consideravelmente maiores, como ilustram as Fig. 16 e 17. Os gráficos seguem o mesmo modelo já apresentado.

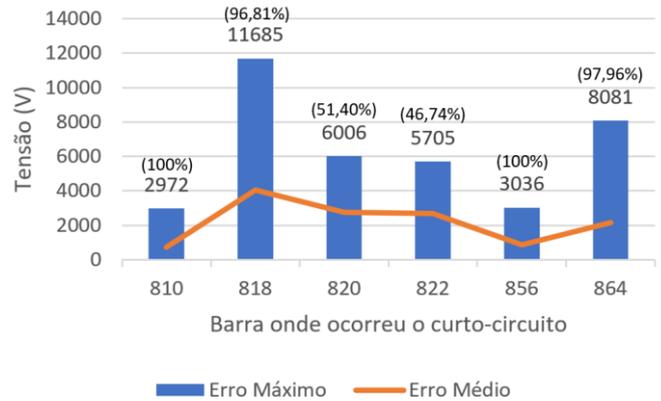


Fig. 16 Erro na tensão para curto-circuito monofásico em trecho monofásico – Sistema IEEE 34 barras

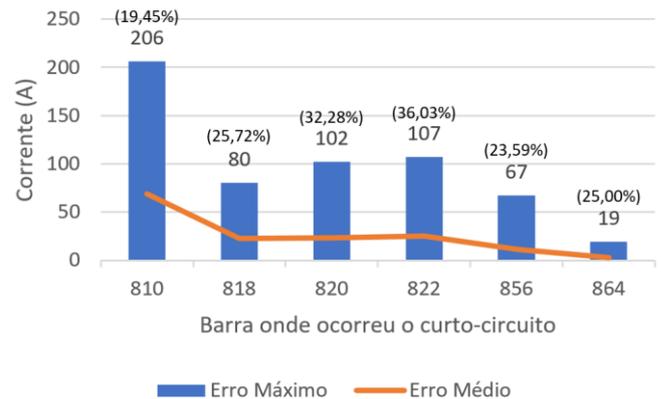


Fig. 17 Erro na corrente para curto-circuito monofásico em trecho monofásico – Sistema IEEE 34 barras

## 5. CONCLUSÕES

Com o aumento da geração distribuída, o cálculo do curto-circuito em redes de distribuição torna-se ainda mais relevante para as concessionárias no que diz respeito ao planejamento e operação dos sistemas de proteção.

Apesar de ser reconhecido que o cálculo de curto-circuito em redes de distribuição por meio da teoria de componentes simétricos apresenta erros, tradicionalmente é com base nesse método que as análises são realizadas, considerando a condição pré-falta perfeitamente balanceada.

Por outro lado, a literatura não dispõe de uma avaliação quantitativa a respeito desses erros, tornando difícil a determinação de quais casos a aproximação é aceitável ou não.

Nesse trabalho, o método baseado em componentes simétricos foi comparado com o método baseado em componentes de fase, considerando uma rede de distribuição desbalanceada. No caso do método que utiliza os componentes simétricos, a rede desbalanceada foi substituída por uma rede equilibrada aproximada.

Os resultados mostraram a importância da modelagem desbalanceada da rede no cálculo das tensões e correntes de curto-circuito. A aproximação de uma rede desequilibrada por um equivalente perfeitamente simétrico pode produzir resultados bastante imprecisos.

No caso do sistema IEEE 34 barras, que se baseia em uma rede de distribuição real, os erros no cálculo da tensão de falta, para um defeito no trecho trifásico da rede, chegaram a aproximadamente 10% para os curtos-circuitos monofásico e bifásico-terra, 20% para o bifásico e 7% para o trifásico. Já os erros da corrente de curto-circuito, para um defeito no trecho trifásico da rede, chegaram a aproximadamente 10% para o curto-circuito monofásico e bifásico-terra, 8% para o bifásico e 12% para o trifásico.

Analisando defeitos aplicados nos trechos monofásicos, o erro da tensão de curto-circuito chegou a até 100%, enquanto o erro da corrente de curto-circuito chegou a valores entre 20% e 40%.

É importante enfatizar que os erros nos valores de correntes provenientes da aproximação da rede podem levar a diferentes problemas associados ao planejamento dos sistemas de proteção. Entre eles, estão os ajustes inadequados de relés de sobrecorrente, o mau dimensionamento de disjuntores e a indicação indevida de equipamentos superados. Por outro lado, os erros nos valores de tensão podem levar a conclusões equivocadas a respeito da qualidade de energia no tocante aos afundamentos de tensão de curta duração.

#### AGRADECIMENTOS

Esse trabalho foi parcialmente financiado pelo INERGE, CNPq, FAPERJ, FAPEMIG e pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) Finance Code 001.

#### REFERÊNCIAS

- Ackermann, T. and Knyazkin, V. (2002). Interaction between Distributed Generation and the Distribution Network: Operation Aspects. Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific. *IEEE/PES*, Vol. 2, pp. 1357-1362.
- Berman, A. and Xu, W. (1998). Analysis of Faulted Power Systems by Phase Coordinates. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 13, No. 2, pp. 587-595.
- Castellanos, F. and Dillah, R. (2008). Short Circuit Analysis in the Phase Domain for Distribution Networks, 2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America.
- Chen, T. H; Chen, M. S; Lee, W. J; Kotas, P. and Olinda, P. V. (1992). Distribution System Short Circuit Analysis - a Rigid Approach. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 7, No. 1, pp. 444-450.
- Dash, P. K. (1972). Analysis of Power System Faults by Phase Impedance Matrix Method: I – General Fault Analysis. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-91, No. 2, pp. 592-600.
- Glover, J. D; Sarma, M. S. and Overbye, T. J. (2008). *Power System Analysis and Design*. Thomson, Toronto – Ontario.
- Kersting, W. H. and Phillips, W. H. (1990). Distribution System Short Circuit Analysis. Proceedings of the 25th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Vol. 1, pp. 310-315.
- Kersting, W. H. (2001). Radial Distribution Test Feeders. 2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings, Vol. 2, pp. 908-912.
- Kersting, W. H. (2002). *Distribution System Modeling and Analysis*. CRC Press, Boca Raton – Florida.
- Laughton, M. A. (1969). Analysis of unbalanced polyphase networks by the method of phase co-ordinates. Part 2: Fault Analysis. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, Vol. 116, No. 5, pp. 857-865.
- Lopes, J. A. P. (2002). Integration of Dispersed Generation on Distribution Networks – Impact Studies. 2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings, Vol. 1, pp. 323-328.
- Nimpitiwan, N; Heydt, G. T; Ayyinar, R. and Suryanarayanan, S. (2007). Fault Current Contribution from Synchronous Machine and Inverter Based Distributed Generators. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 22, No. 1, pp. 634-641.
- Saadat, H. (1999). *Power System Analysis*. McGraw-Hill, New York – New York.
- Taranto, G. N; Marinho, J. M. T; Falcao, D. M; Assis, T. M. L; Escalante, S. L; Rodriguez, J. I. R. and Pontes, C. E. V. (2012). Simulador de Redes de Distribuição Ativas com Modelagem Monofásica/Trifásica. XII Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, Rio de Janeiro. Anais do XII SEPOPE, 2012.
- Stevenson, W. D. (1974). *Elementos de Análise de Sistemas de Potência*. McGraw-Hill, São Paulo – SP.
- Su, C; Liu, Z; Chen, Z. and Hu, Y. (2014). Short Circuit Analysis of Distribution System with Integration of DG. 2014 International Conference on Power System Technology, pp. 2921-2926.
- Teng, J. H. (2005). Systematic Short-Circuit Analysis Method for Unbalanced Distribution Systems. *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 152, No. 4, pp. 549-555.