

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA - CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

CAMYLLA BIGHETTI PEREIRA GARBIN

**ANÁLISE DE CURTO-CIRCUITO EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO ATRAVÉS
DA MATRIZ DE IMPEDÂNCIA NODAL E DO OpenDSS**

Ilha Solteira – SP
2026

CAMYLLA BIGHETTI PEREIRA GARBIN

**ANÁLISE DE CURTO-CIRCUITO EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO
ATRAVÉS DA MATRIZ DE IMPEDÂNCIA NODAL E DO OpenDSS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de Engenharia de
Ilha Solteira – UNESP como parte dos
requisitos para obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Elétrica.

Orientador:
Jonatas Boas Leite

Ilha Solteira – SP
2026

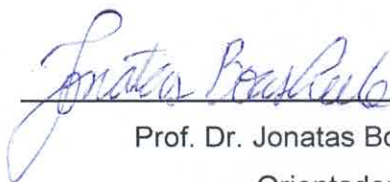
FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

- G213a Garbin, Camylla Bighetti Pereira.
- Análise de curto-circuito em sistemas de distribuição através da matriz de impedância nodal e do OpenDSS / Camylla Bighetti Pereira Garbin. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2026
- 46 f. : il.
- Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, 2026
- Orientador: Jonatas Boas Leite
- Inclui bibliografia
1. Análise de curto-circuito. 2. Sistemas de distribuição de energia elétrica. 3. Matriz de impedância nodal. 4. OpenDSS. 5. Fluxo de potência. 6. Redes inteligentes.

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Aos três dias do mês de julho do ano de dois mil e vinte e seis, a discente **Camylla Bighetti Pereira Garbin**, matriculada sob o nº 182055213, tendo como banca examinadora o seu orientador, o Prof. Dr. Jonatas Boas Leite, o Doutorando Vagner Antonio de Moraes da Cruz e o Mestrando Sergie Josue Peña Cruz, apresentou o Trabalho de Graduação intitulado "Análise de Curto-Circuito em Sistemas de Distribuição através da Matriz de Impedância Nodal e do OpenDSS", obtendo a nota 10,0 (DEZ) e conceito APROVADO.



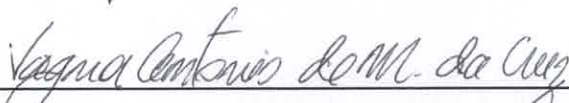
Prof. Dr. Jonatas Boas Leite

- Orientador -



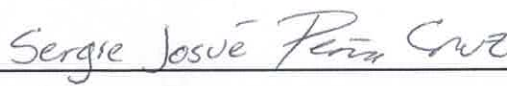
Camylla Bighetti Pereira Garbin

- Discente -



Doutorando Vagner Antonio de Moraes da
Cruz

- Membro da Banca -



Mestrando Sergie Josue Peña Cruz

- Membro da Banca -

AGRADECIMENTOS

A minha trajetória na Universidade só foi possível graças às pessoas que caminharam comigo ao longo de todo esse percurso.

Agradeço primeiramente aos meus pais, Nataly e Flávio, pela vida dedicada a mim e ao meu irmão, Flávio Filho. Obrigada por todo amor, colo, carinho e apoio incondicional. Isso tudo não seria possível sem vocês.

Aos meus avós, Julieta e Spencer, pela imensurável confiança depositada em mim e por sempre me incentivarem a buscar meu futuro através dos estudos. Vocês também são responsáveis por eu ter chegado até aqui.

Ao meu companheiro, Manuel, pelo cuidado, pela inspiração e força para seguir em frente. Obrigada por estar ao meu lado em todos os momentos, sejam eles felizes ou desafiadores. Sou sortuda por compartilhar a vida com você.

Agradeço aos meus amigos e amigas que me acompanharam nessa jornada, especialmente Nadia, Bruno, Cézar, Alessandro e Giovanna. Obrigada por todas as risadas, lágrimas, conversas e lanches compartilhados. Sou grata por termos sido o apoio uns dos outros e por dividirmos tantos momentos importantes dessa fase de nossas vidas. Levo vocês em meu coração.

À Equipe Fênix Racing, que foi a minha 2ª casa durante grande parte da minha trajetória na UNESP. Agradeço por terem confiado a mim a responsabilidade de liderá-los. A equipe transformou minha vida e levarei comigo para sempre as experiências vividas e as pessoas que estavam ao meu lado fazendo acontecer.

Ao Prof.º Jonas, pela atenção, encorajamento e por todo o conhecimento compartilhado.

Por fim, agradeço àqueles que lutam pela existência e fortalecimento da Universidade Pública, bem como a todos que a mantêm viva e em funcionamento. Que a força e coragem nunca se percam.

“Quem não se movimenta, não sente as correntes que o prendem.”

- Rosa Luxemburgo

RESUMO

Com a transição dos sistemas elétricos para as redes inteligentes (*smart grids*) e redes ativas de distribuição, a teoria clássica das componentes simétricas perde a sua validade e eficácia do ponto de vista computacional. Isto acontece porque os desequilíbrios severos, a falta de transposição dos cabos e as segmentações monofásicas criam acoplamentos mútuos fortes entre as fases, exigindo métodos mais complexos, dependentes das fases. O objetivo central desse trabalho é a implementação e validação do método da matriz de impedância nodal para o cálculo de correntes de curto-circuito nestas redes de distribuição de energia elétrica. Para garantir o rigor da metodologia proposta, o simulador OpenDSS foi adotado como padrão de referência e base de calibração para a avaliação comparativa. O algoritmo principal foi desenvolvido em C# e calcula, numa primeira fase, o fluxo de potência através do método de varredura (com formulação de soma de potência) expandido para o domínio das fases. Em seguida, o cálculo analítico do curto-circuito é executado diretamente com o auxílio da matriz de impedância nodal. O desempenho e a precisão do algoritmo foram testados através da simulação em redes de 25, 135 e 1074 barras. A comparação entre os resultados gerados pelo algoritmo criado e os dados de referência do OpenDSS demonstrou que os erros percentuais para as grandezas de tensão e de corrente elétrica se mantiveram em escalas muito reduzidas.

Palavras-chave: análise de curto-circuito; sistemas de distribuição de energia elétrica; matriz de impedância nodal; OpenDSS; fluxo de potência; redes inteligentes.

ABSTRACT

With the transition of electrical systems toward smart grids and active distribution networks, classical symmetrical component theory loses its validity and computational effectiveness. This occurs because severe imbalances, the absence of cable transposition, and single-phase segments create strong mutual coupling between phases, necessitating more complex, phase-dependent methods. The primary objective of this work is to implement and validate the nodal impedance matrix method for calculating short-circuit currents in these electric power distribution networks. To ensure the rigor of the proposal, the OpenDSS simulator was adopted as the reference standard and baseline methodology for comparative assessment. The main algorithm was developed in C#; in the first stage, it calculates power flow using a sweep method (based on power summation formulation) extended to the phase domain. Subsequently, the analytical short-circuit calculation is performed directly using the nodal impedance matrix. The algorithm's performance and accuracy were tested through simulations on 25-bus, 135-bus, and 1074-bus networks. A comparison between the results generated by the developed algorithm and the OpenDSS reference data demonstrated that the percentage errors for voltage and current magnitudes remained very low.

Keywords: short-circuit analysis; electric power distribution systems; nodal impedance matrix; OpenDSS; power flow; smart grids.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Algoritmo de Solução no OpenDSS	22
Figura 2	<i>Script Modo Direct ou Snapshot</i>	25
Figura 3	Fluxograma Metodologia Via OpenDSS	25
Figura 4	Fluxograma Metodologia Via Matriz Zbarra	26
Figura 5	Modo FaultStudy Fase A (25 Barras)	27
Figura 6	Modo FaultStudy Fase B (25 Barras)	28
Figura 7	Modo FaultStudy Fase C (25 Barras)	28
Figura 8	Falta Específica OpenDSS Fase A (Barra 12)	29
Figura 9	Falta Específica OpenDSS Fase B (Barra 12)	29
Figura 10	Falta Específica OpenDSS Fase C (Barra 12)	30
Figura 11	CC Impedância Nodal Fase A (Barra 12)	30
Figura 12	CC Impedância Nodal Fase B (Barra 12)	31
Figura 13	CC Impedância Nodal Fase C (Barra 12)	31
Figura 14	Erro Percentual (Tensão)	32
Figura 15	Erro Percentual (Corrente)	32
Figura 16	Valores Comparativos entre B0 e B12	33
Figura 17	Fluxo de Potência Fase A (135 Barras)	33
Figura 18	Fluxo de Potência Fase B (135 Barras)	34
Figura 19	Fluxo de Potência Fase C (135 Barras)	34
Figura 20	Falta Específica OpenDSS Fase A (Barra 102)	35
Figura 21	Falta Específica OpenDSS Fase B (Barra 102)	35
Figura 22	Falta Específica OpenDSS Fase C (Barra 102)	36
Figura 23	CC Impedância Nodal Fase A (Barra 102)	36
Figura 24	CC Impedância Nodal Fase B (Barra 102)	37
Figura 25	CC Impedância Nodal Fase C (Barra 102)	37
Figura 26	Erro Percentual (Tensão)	38
Figura 27	Erro Percentual (Corrente)	38

Figura 28	Valores Comparativos entre B0 e B102	39
Figura 29	Fluxo de Potência Fase A (1074 Barras)	39
Figura 30	Fluxo de Potência Fase B (1074 Barras)	40
Figura 31	Fluxo de Potência Fase C (1074 Barras)	40
Figura 32	Falta Específica OpenDSS Fase A (Barra 858)	41
Figura 33	Falta Específica OpenDSS Fase B (Barra 858)	41
Figura 34	Falta Específica OpenDSS Fase C (Barra 858)	41
Figura 35	CC Impedância Nodal Fase A (Barra 858)	42
Figura 36	CC Impedância Nodal Fase B (Barra 858)	42
Figura 37	CC Impedância Nodal Fase C (Barra 858)	43
Figura 38	Erro Percentual (Tensão)	43
Figura 39	Erro Percentual (Corrente)	44
Figura 40	Valores Comparativos em B0 e B858	44

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO	13
1.2 OBJETIVOS	13
1.2.1 Objetivos Específicos	14
1.3 ESTRUTURA DO TEXTO	14
2 REVISÃO DA LITERATURA	16
3 METODOLOGIA	18
3.1 FLUXO DE POTÊNCIA	18
3.1.1 Método de Varredura com Formulação de Soma de Potência	18
3.2 CÁLCULO DE CC USANDO A MATRIZ DE IMPEDÂNCIA NODAL	19
3.3 MODELO OpenDSS	21
3.3.1 Cálculo de Fluxo de Potência pelo OpenDSS	21
3.3.2 Cálculo do Curto-Circuito pelo OpenDSS	23
3.4 SCRIPT OpenDSS PARA CURTO-CIRCUITO	24
3.4.1 Modo Direct ou Snapshot	24
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
4.1 Análise do Sistema de 25 Barras	27
4.2 Análise Comparativa do Sistema de 135 Barras	33
4.3 Análise Comparativa do Sistema de 1074 Barras	39
5 CONCLUSÃO	46
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47

1 INTRODUÇÃO

Os Sistemas Elétricos de Potência (SEP) constituem uma das infraestruturas de engenharia mais complexas e importantes da sociedade moderna, sendo um conjunto de instalações direcionada para a geração, transmissão, distribuição e consumo de energia elétrica. Tradicionalmente estruturados sob uma ótica verticalizada e unidirecional, esses sistemas foram projetados para que “pacotes” de energia fossem gerados em grandes usinas centralizadas, transmitidos em alta tensão e distribuídos de forma puramente radial até os consumidores finais (Kagan; Oliveira; Robba, 2010). Atualmente, tais sistemas passam por uma transição tecnológica, impulsionada pelas *Smart Grids* (Redes Inteligentes). Conforme estabelecido no planejamento moderno de sistemas de energia, a evolução dessas redes fundamenta-se no emprego massivo de sensoriamento avançado, processamento embarcado e sistemas de comunicação digital. Tal infraestrutura tecnológica visa tornar as redes de eletricidade altamente observáveis, controláveis e automatizadas, integrando de forma inteligente as ações de todos os usuários conectados a ela com o intuito de garantir a eles que o abastecimento de energia elétrica seja econômico, estável e, acima de tudo, seguro (Sato; Freitas, 2014). Nesse cenário, a automação avançada das redes de distribuição de energia elétrica tem se tornado uma questão de relevante interesse para o setor elétrico. A modernização e o desenvolvimento desse conceito de automação exigem a definição de novas metodologias e ferramentas computacionais capazes de suportar a simulação das redes de distribuição em tempo real, operando de forma conjunta com técnicas de *Hardware-in-the-Loop* (HIL) para proporcionar a redução dos tempos de projeto e viabilizar testes com baixo custo.

A simulação híbrida, ou co-simulação, constitui-se pela combinação de duas, ou mais, ferramentas computacionais para montar um ambiente multi-modelo de simulação digital com objetivo de reduzir o tempo de processamento e manter a precisão dos resultados (Plumier, 2016). Em (Theodoro et al., 2018), por exemplo, propõe-se uma metodologia para realizar simulação híbrida de sistemas elétricos usando os softwares OpenDSS e MATLAB. A diferença entre um simulador HIL e os softwares de simulação clássica está na capacidade dos simuladores HIL de produzir e medir sinais que podem interagir com um dispositivo externo, normalmente, em teste.

1.1 JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO

Os simuladores em tempo real são, de forma geral, ótimas ferramentas para a análise, projeto, controle, proteção e operação do sistema de energia elétrica. Uma característica comum dos simuladores digitais em tempo real é a sua capacidade de processamento paralelo para simular transitórios magnéticos em grandes redes de eletricidade. O desenvolvimento dessas plataformas permite realizar uma variedade de testes práticos em dispositivos elétricos físicos, tais como relés digitais de proteção e sistemas de controle. Contudo, o uso dessa técnica ainda é bastante limitado devido ao alto custo destes simuladores.

Como alternativa técnica viável, surge a simulação híbrida, ou co-simulação. Esta abordagem constitui-se pela combinação de duas ou mais ferramentas computacionais de forma a estruturar um ambiente de simulação digital, com objetivo de reduzir o tempo de processamento global e manter a precisão dos resultados (Plumier et al., 2016). Na literatura técnica, diferentes abordagens validam essa prática, em (Theodoro et al., 2018), por exemplo, propõe-se uma metodologia para realizar a simulação híbrida de sistemas elétricos integrando os softwares OpenDSS e MATLAB. Na mesma linha de desenvolvimento, (Montenegro et al., 2012) também utiliza o software OpenDSS com o propósito específico de estruturar um simulador HIL. A diferença fundamental entre um simulador HIL e os softwares de simulação clássica reside na capacidade intrínseca dos simuladores HIL de produzir e medir sinais físicos reais que podem interagir diretamente com um dispositivo externo, normalmente o equipamento sob teste.

Nesse contexto, a motivação reside em consolidar um algoritmo matemático robusto em C# baseado na matriz de impedância nodal que seja robusto. Com o intuito de garantir rigor metodológico, adota-se o software OpenDSS como ferramenta de comparativa. O OpenDSS atua como um simulador de domínio do tempo em regime permanente utilizando uma matriz de admitância nodal que representa individualmente cada elemento da rede, sejam eles linhas, cargas ou transformadores.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal do trabalho é a implementação e validação do método da matriz de impedância nodal para o cálculo de correntes de curto-circuito (CC) em

redes de distribuição de energia elétrica. Para viabilizar a validação da metodologia proposta, faz-se necessário o confronto com parâmetros sólidos de referência. De tal forma, utiliza-se o *Open Distribution System Simulator* (OpenDSS), software amplamente adotado no setor elétrico para a análise de sistemas de distribuição, que atuará como uma base de calibração e padrão de referência, possibilitando uma avaliação comparativa a partir da simulação de diferentes sistemas de teste.

1.2.1 Objetivos Específicos

- Utilizar sistemas de teste no software OpenDSS, com parâmetros modelados em arquivos .dss;
- Execução do algoritmo em C# para cálculo de fluxo de potência e curto-circuito;
- Extrair e analisar parâmetros de tensão e corrente (magnitude e ângulo de fase) pré-falta e pós-falta;
- Análise comparativa entre os resultados numéricos e gráficos gerados pelo algoritmo em C# e os dados de referência obtidos via OpenDSS, quantificando e discutindo os erros percentuais para grandezas de tensão e corrente.

1.3 ESTRUTURA DO TEXTO

No Capítulo 1, contextualiza-se a transição tecnológica pela qual passam os sistemas elétricos de potência em direção às redes inteligentes (*smart grids*) e redes ativas de distribuição, ressaltando o papel da automação avançada e da co-simulação para reduzir custos e tempos de projeto. A partir disso, justifica-se a consolidação de um algoritmo próprio e robusto em C#, definindo como objetivo principal a implementação e validação do método da matriz de impedância nodal para o cálculo de correntes de curto-circuito em sistemas de distribuição, utilizando o software de referência OpenDSS como padrão para a realização da análise comparativa.

O Capítulo 2 aborda a evolução histórica das redes de distribuição, que deixaram de ser puramente passivas e radiais com fluxo unidirecional para se tornarem redes ativas de distribuição caracterizadas pela presença de geração dispersa e fluxos bidirecionais. Adicionalmente, discute-se as limitações do método das componentes simétricas frente aos severos desequilíbrios, falta de transposição

de cabos e fortes acoplamentos mútuos característicos dessas redes modernas, o que fundamenta a necessidade de se adotar modelagens diretas no domínio das fases e o uso da matriz de impedância nodal para mapear o sistema de forma exata.

No Capítulo 3, detalha-se a formulação matemática e os procedimentos computacionais empregados no trabalho, dividindo-os no cálculo de fluxo de potência em regime permanente (estado de pré-falta) e no cálculo analítico de curto-circuito subsequente. O algoritmo utiliza o método de varredura com formulação de soma de potência expandido para o domínio das fases, enquanto as modelagens de referência do OpenDSS são analisadas a partir das injeções de correntes nodais iterativas e de scripts específicos configurados em modos de simulação como FaultStudy, Direct ou Snapshot.

O Capítulo 4, de resultados e discussão, destina-se à apresentação das simulações numéricas e das análises comparativas realizadas em três sistemas de teste de complexidades crescentes: as redes de 25 barras, 135 barras e 1074 barras. Para cada um desses cenários, são confrontados de forma minuciosa os parâmetros gráficos e numéricos de tensão e de corrente elétrica (tanto em magnitudes quanto em ângulos de fase) gerados pelo programa desenvolvido em C# em relação aos dados consolidados obtidos pelo simulador OpenDSS, quantificando e discutindo os erros percentuais obtidos.

O Capítulo 5, final, encerra o trabalho, sintetizando as principais contribuições da pesquisa e confirmando que os objetivos propostos foram atingidos com sucesso através da validação das ferramentas computacionais implementadas. Discute-se o comportamento das métricas avaliadas, destaca-se a precisão e a estabilidade do algoritmo em C# baseado na matriz de impedância nodal por apresentar desvios percentuais mínimos frente ao padrão, e apontam-se perspectivas ou direcionamentos para trabalhos futuros na área de automação e proteção de sistemas de distribuição.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Os Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica (SDEEs) foram historicamente projetados para operar de forma passiva, apresentando uma topologia de rede radial onde o fluxo de potência ativa e reativa se desloca exclusivamente de maneira unidirecional, partindo da subestação a montante em direção aos pontos de consumo (Kagan; Oliveira; Robba, 2010). Por este aspecto, o planejamento, a regulação e a coordenação de dispositivos de proteção (como relés, religadores e fusíveis) fundamentavam-se na previsibilidade das correntes de carga e de curto-circuito, cujas magnitudes decresciam à medida que o ponto de falta se afastava da fonte equivalente da subestação (Sato; Freitas, 2014). Contudo, a evolução em direção às *Smart Grids* fez com que essa dinâmica operacional fosse alterada, transformando os circuitos em Redes Ativas de Distribuição (RAD). Sob a ótica operativa, a presença de geradores dispersos introduz fluxos bidirecionais de potência e altera o perfil de tensões ao longo dos alimentadores (Reiz, 2019).

No que tange a modelagem de curtos-circuitos em sistemas desequilibrados, a ferramenta analítica padrão utilizada para o cálculo de faltas assimétricas é o Método das Componentes Simétricas, que se fundamenta na transformação de um sistema trifásico desequilibrado em três sistemas equilibrados na sequência: positiva, negativa e zero (Grainger; Stevenson, 1997). Embora o método seja eficaz, do ponto de vista computacional para sistemas de transmissão equilibrados, a teoria de componentes simétricas perde sua validade e eficácia quando aplicada a redes de distribuição ativas (redes elétricas de distribuição que integram GDs e sistemas de armazenamento, permitindo o fluxo bidirecional de energia) e desequilibradas.

A falta de transposição dos cabos e as segmentações monofásicas criam um acoplamento mútuo forte entre as fases. Nesses circuitos, a matriz de impedância de sequência não é puramente diagonal, exibindo termos fora da diagonal principal que representam a interferência mútua entre as sequências (Reiz; Leite, 2019).

Para contornar essa problemática, a alternativa mais robusta é a modelagem direta em Coordenadas de Fase (ABC). A qual todos os componentes da rede (geradores, transformadores, linhas, cargas) passam a ser representados por suas matrizes primitivas trifásicas. Tal modelo é capaz de calcular com exatidão a relação entre as fases que apresentam curto-circuito e as fases que não. A determinação dos parâmetros fasoriais de tensão e corrente pós-falta passam a depender da

organização da matriz de impedância nodal (Z_{BARRA}), cujos nós representam cada fase de cada barra do circuito. Assim sendo, para um sistema desequilibrado contendo N barras, a matriz Z_{BARRA} resultante assume uma dimensão de $3N \times 3N$, mapeando todas as auto impedâncias e impedâncias mútuas do sistema (Reiz, 2019).

O *Open Distributed System Simulator* (OpenDSS) é uma ferramenta computacional de código aberto desenvolvida originalmente pela *Electrotek Concepts* e, desde 2008, mantida e continuamente atualizada pelo *Electric Power Research Institute* (EPRI). Diferentemente dos simuladores tradicionais focados em sistemas de transmissão, que operam sob a premissa de redes equilibradas e utilizam representações monofásicas equivalentes, o OpenDSS foi projetado especificamente para a análise de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica (SDEEs). Esses sistemas são nativamente caracterizados por severos desequilíbrios de carga entre as fases, forte acoplamento mútuo entre condutores e ramais bifásicos ou monofásicos ao longo da topologia (Dugan, 2022).

3 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento das atividades englobadas no presente trabalho, fez-se necessário a compreensão do conceito de fluxo de potência e curto-circuito, além do método utilizado para obtenção. Acrescentando também o método utilizado pelo software OpenDSS e seus respectivos scripts capazes de gerar os dados de saída para realização da análise comparativa.

3.1 FLUXO DE POTÊNCIA

Dentro do universo de Sistema de Distribuição de Energia Elétrica, a determinação das condições de controle, operação e supervisão de sistemas elétricos se dá a partir do estudo de fluxo de potência. A sua aplicação prática visa mapear as condições elétricas da rede diante de um cenário fixo de carga e geração, calculando os fluxos de potência ativa e reativa nos ramos, as perdas nas linhas e o perfil de tensões em todas as barras do circuito (Sato; Freitas, 2014).

O principal objetivo do seu cálculo e aplicação no presente trabalho, é a determinação do estado de regime permanente do sistema elétrico antes da ocorrência de qualquer distúrbio na rede, ou também chamado de estado de pré-falta, fornecendo magnitude e fase de tensão que irá alimentar o cálculo de curto-circuito.

3.1.1 Método de Varredura com Formulação de Soma de Potência

A solução do problema de fluxo de potência em um SDEE radial, usando o Método de Soma de Potência (MSP), consiste em resolver para cada trecho da rede, uma equação de 4º grau em termos de tensão nodal. A expansão do MSP consiste em incluir o acoplamento magnético entre as fases da rede de distribuição trifásica (Blanco; Leite, 2025).

Para cumprir o propósito em redes de distribuição trifásicas, adotou-se o Método de Varredura com Formulação de Soma de Potência (MSP) expandido para o domínio das fases (Blanco; Leite, 2025). As variáveis e parâmetros associados às fases são agrupados em vetores coluna e matrizes quadradas de dimensão 3x3.

O processo iterativo baseia-se na aplicação de duas etapas de varredura, a Varredura Reversa e Direta. A Varredura Reversa (*Backward Sweep*), realizada a

partir dos nós terminais em direção ao nó raiz (subestação), são calculados os fluxos de potência equivalentes e as perdas de potências nas linhas por meio das equações (01) e (02), respectivamente.

$$\bar{S}_i^{EQ} = \bar{S}_i + M_i \left(\bar{S}^{EQ} + \bar{S}^L \right) \quad (01)$$

$$\bar{S}_i^L = \Delta[(IV_i)^2]^{-1} \bar{Z}_i \left(\bar{I} \bar{S}_i^{EQ} \right) \left(\bar{S}_i^{EQ} \right)^* \quad (02)$$

Já na Varredura Direta (*Forward Sweep*), que parte do nó raiz em sentido jusante da rede, as tensões nodais são atualizadas através de uma solução de (03).

$$(IV_i)^3 V_i + (IV_i)^2 A + B = 0 \quad (03)$$

Sendo:

$$A = 2\Delta \Re \left\{ \bar{Z}_i \left(\bar{S}_i^{EQ} \right)^* \right\} - (IV_{i-1})V_{i-1} \quad (04)$$

$$B = \bar{Z}_i \left(\bar{Z}_i^* \right)^T \left(\bar{I} \bar{S}_i^{EQ} \right) \left(\bar{S}_i^{EQ} \right)^* \quad (05)$$

De forma geral, os dados de entrada de um algoritmo de cálculo de fluxo de potência correspondem às potências complexas nas barras e a matriz de impedância das linhas de distribuição, tendo como saída a tensão nas barras e a corrente que flui pelas linhas.

3.2 CÁLCULO DE CC USANDO A MATRIZ DE IMPEDÂNCIA NODAL

O curto-circuito proveniente do evento de falta é um fenômeno caracterizado pela elevada corrente elétrica em um circuito com impedância quase sempre desprezível. O evento pode ser temporário ou permanente, onde o primeiro caso ocorre quando a rede sofre uma falta por um breve período e a proteção atua de forma automática sobre os religadores de maneira a corrigir o problema encontrado. A falta torna-se permanente se a proteção atuar repetitivamente em um número determinado de vezes e a falha persistir, então os dispositivos de proteção atuam isolando a área sob falta do restante da rede, sendo necessário o deslocamento de uma equipe

técnica ao local da falta para efetuar a manutenção corretiva no sistema (Trujillo, 2017).

O cálculo analítico do curto-circuito executa-se de forma acoplada ao resultado obtido na etapa de fluxo de potência. Como os sistemas em análise operam sob condições trifásicas e assimétricas, a modelagem contorna o uso de componentes simétricas e é resolvida de forma direta no domínio das fases (Reiz, 2019).

O método utilizado para cálculo das correntes de curto-circuito é da matriz de impedância nodal, Z_{BARRA} (Reiz; Leite, 2019). A matriz de barra, matriz de impedância ou matriz de CC, pode ser construída elemento a elemento com o auxílio de um algoritmo simples, capaz de inserir um elemento por vez na representação do sistema. A dimensão da matriz depende inicialmente do número de fases e barras do sistema em questão. Os elementos da diagonal principal dessa matriz contêm a impedância equivalente de todas as barras em relação a barra de referência, enquanto os elementos fora da diagonal principal correspondem a impedância de transferência entre cada barra do sistema (Sato; Freitas, 2014).

Em (07) é possível observar que Z_{tr} representa a impedância do transformador da subestação, Z_{ij}^B trata-se da impedância de barra, correspondente ao equivalente de Thevenin da barra, se i e j forem iguais, ou a impedância de transferência, se i e j forem distintos. Já a impedância do ramo que é representada por Z_{ij}^l . Todas as impedâncias indicadas na matriz são submatrizes de dimensão igual à 3, já que se referem a um sistema trifásico.

$$Z_{BARRA} = \begin{bmatrix} Z_{tr} & Z_{11}^B & Z_{11}^B & Z_{11}^B & Z_{11}^B & Z_{11}^B \\ Z_{11}^B & Z_{11}^B + Z_{12}^l & Z_{22}^B & Z_{22}^B & Z_{22}^B & Z_{22}^B \\ Z_{11}^B & Z_{22}^B & Z_{22}^B + Z_{23}^l & Z_{22}^B & Z_{22}^B & Z_{22}^B \\ Z_{11}^B & Z_{22}^B & Z_{22}^B & Z_{22}^B + Z_{24}^l & Z_{44}^B & Z_{44}^B \\ Z_{11}^B & Z_{22}^B & Z_{22}^B & Z_{44}^B & Z_{44}^B + Z_{45}^l & Z_{44}^B \\ Z_{11}^B & Z_{22}^B & Z_{22}^B & Z_{44}^B & Z_{44}^B & Z_{44}^B + Z_{46}^l \end{bmatrix} \quad (06)$$

A matriz indicada em (06) é construída elemento a elemento, submatriz por submatriz, para cada nova barra considerada no modelo ocorre o processo de construção das submatrizes de transferência e da submatriz de barra da diagonal principal, ambas relacionadas com a nova barra.

Após a determinação da matriz de impedância de barra, o cálculo da corrente de curto-circuito pode ser realizado utilizando a teoria das componentes simétricas em conjunto com a matriz de impedância nodal, porque a submatriz da barra de falta é a própria impedância de Thévenin do nó com falta em relação à barra de referência.

As tensões do sistema podem ser atualizadas substituindo o resultado da expressão (07) em (08), onde ΔV_i refere-se à variação de tensão na i -ésima barra, Z_{if}^B trata-se da impedância de transferência da barra i em relação à barra em falta f , J_f representa a corrente de curto-circuito obtida com o auxílio da teoria das componentes simétricas, enquanto $V_i(F)$ e $V_i(0)$ referem-se respectivamente a tensão pré-falta, obtida através do cálculo de fluxo de potência, e pós-falta da i -ésima barra. Finalmente, as novas correntes do sistema são obtidas com uso da expressão (09) em que Z_{ij}^L é a matriz de impedância da linha.

$$\Delta V_i = Z_{if}^B J_f \quad (07)$$

$$V_i(F) = V_i(0) + \Delta V_i \quad (08)$$

$$I_j = Z_{ij}^{L-1} (V_i(F) - V_j(F)) \quad (09)$$

3.3 MODELO OpenDSS

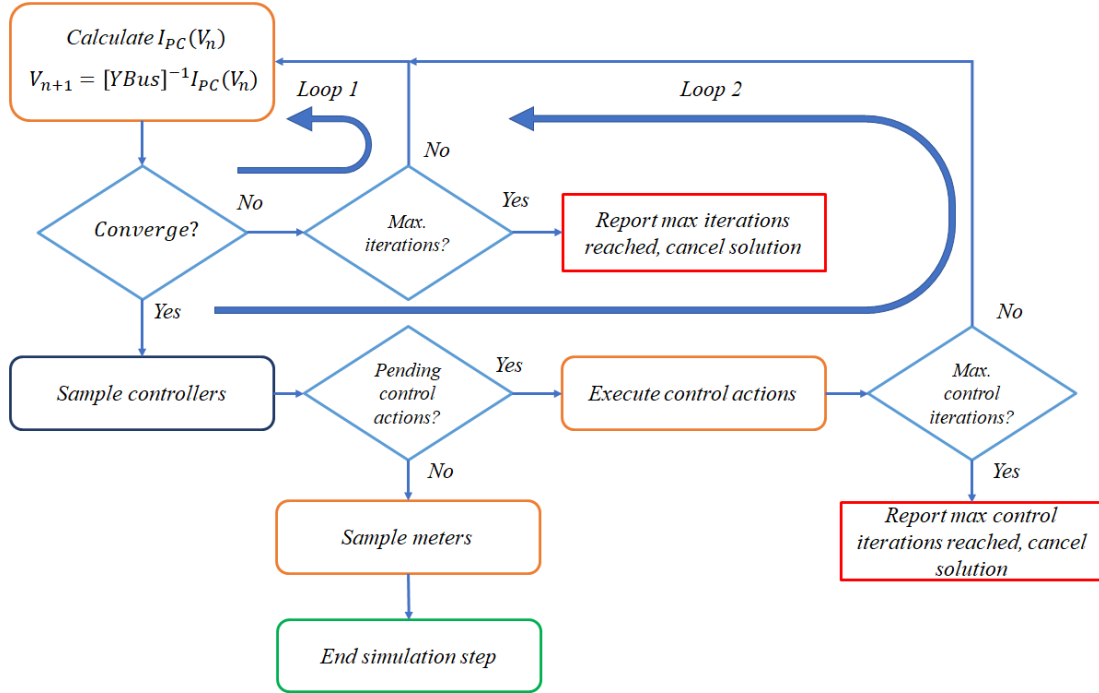
A validação dos resultados provenientes dos *scripts* em C#, pode ser realizada de forma comparativa com os modelos equivalentes resultantes do software OpenDSS. A modelagem no simulador foi estruturada para refletir as impedâncias primitivas 3x3, parâmetros de linha e desequilíbrios de carga inseridos no algoritmo próprio, servindo como gabarito para análise comparativa de erros.

3.3.1 Cálculo de Fluxo de Potência pelo OpenDSS

O mecanismo de simulação do OpenDSS executa a resolução do fluxo de potência em regime permanente através do método de Injeção de Correntes (DUGAN, 2022), estruturado por um processo de dupla camada iterativa como ilustrado na Figura 1. Diferentemente do algoritmo em C#, que sequencialmente realiza varreduras locais, o simulador consolida a topologia desequilibrada multifásica da rede em uma

única Matriz de Admitância Nodal Global (Y_{BARRA}) de dimensão $3N \times 3N$, sendo N o número de nós do sistema (EPRI, 2024).

Figura 1 – Algoritmo de Solução no OpenDSS



Fonte: EPRI (2024).

Embora o solucionador disponha de formulações baseadas no Método de Newton-Raphson e no Método de Injeção de Corrente Não-Linear (NCIM), adotou-se para fins de validação neste trabalho o Método Normal (*Floating-Point Iterative*), mapeado pelo Loop 1 do fluxograma. Baseando-se no princípio do método iterativo de ponto fixo, a matriz Y_{BARRA} do sistema é construída e fatorada uma única vez no início do processo (EPRI, 2024). A partir dessa matriz base estável, as cargas e geradores são tratados como injeções de correntes não-lineares de compensação que variam em função da tensão.

A cada iteração n do Loop 1, a corrente equivalente injetada em cada nó do sistema, denominada por $I_{inj}(V_n)$, é calculada pela equação (10).

$$I_{inj}(V_n) = \left(\frac{S_L}{V_n} \right)^* - Y_{shunt} \cdot V_n \quad (10)$$

O $I_{inj}(V_n)$ pode ser definido como vetor coluna de correntes nodais injetadas associadas aos elementos de potência constante na iteração n . S_L representa o vetor de potência completa ativa e reativa especificada para as cargas ou geradores do sistema. Já o Y_{shunt} é definido como o vetor que contém as tensões complexas nodais calculadas e seria a submatriz que computa as admitâncias em paralelo conectadas diretamente aos nós, cujas correntes fluem em direção à referência (terra).

Com o vetor de correntes de compensação atualizado, o perfil global de tensões elétricas da rede de distribuição para o passo subsequente é determinado simultaneamente pela equação (11).

$$V_{n+1} = [Y_{BARRA}]^{-1} \cdot I_{inj}(V_n) \quad (11)$$

O qual V_{n+1} representa o vetor atualizado com os novos módulos e ângulos de tensão fasoriais para todas as fases do circuito. A convergência do fluxo de potência (Loop 1) é verificada através do erro entre o vetor de correntes calculado na iteração atual e o da iteração anterior. Assim que o balanço elétrico converge, o algoritmo avança para a amostragem dos controladores do sistema. Se houver ações de controle pendentes (p.ex. chaveamento de capacitores), estas são disparadas no Loop 2, modificando os parâmetros físicos da rede e forçando o solucionador a reexecutar o fluxo de potência. A simulação é finalizada quando ambos os laços convergirem de forma estável, fornecendo o perfil de tensões de pré-falta.

3.3.2 Cálculo do Curto-Circuito pelo OpenDSS

Enquanto a análise de fluxo de potência se ocupa na determinação do estado elétrico da rede em condições normais de operação, a simulação de regime de falta visa mapear o comportamento do sistema ao enfrentar distúrbios severos.

O OpenDSS utiliza um mecanismo de operação do circuito diretamente no domínio das fases (abc), permitindo dispensar simplificações das componentes simétricas, tornando o simulador apto a solucionar assimetrias e faltas de natureza diversa.

O CC é introduzido no simulador através do acoplamento em paralelo de uma matriz de admitância de falta (Y_F) contendo condutâncias e susceptâncias de contato

diretamente nos nós e fases envolvidos no defeito (EPRI, 2024). Utilizando a representação equivalente de Norton para modelar as fontes de alimentação e as malhas ativas do sistema, o estado de tensões remanescentes durante o período de falta é resolvido através da equação matricial (12) de injeção de correntes.

$$I_{sc} = [Y_{sc} + Y_F] \cdot V_{cc} \quad (12)$$

Sendo I_{sc} o vetor coluna que representa a injeção de correntes equivalentes de CC das fontes do circuito no ponto de conexão. Representando a submatriz de admitância equivalente a partir dos nós envolvidos na falta, tem-se Y_{sc} . Além disso, Y_F é a matriz de admitância da falta, estruturada de acordo com as impedâncias de arco e o tipo de CC configurado, seja ele fase-terra, fase-fase, dupla-fase-terra ou trifásico. Há também V_{cc} , vetor que contém as tensões complexas remanescentes de curto-circuito calculadas para todas as fases e nós da rede.

Os perfis de tensão e corrente resultantes desta formulação simultânea do OpenDSS são extraídos e adotados como o gabarito elétrico de referência para este trabalho. Esses dados servem para validar a exatidão e a convergência do algoritmo alternativo em C#, o qual soluciona as mesmas condições de falta.

3.4 SCRIPT OpenDSS PARA CURTO-CIRCUITO

A utilização das duas principais formas de simulação da corrente de curto-circuito depende do objetivo que é almejado. A primeira forma seria obter os níveis de CC em todas as barras de uma só vez, já a segunda utiliza da aplicação de uma falta específica (curto-circuito) em um ponto da rede e analisar o impacto gerado.

3.4.1 Modo Direct ou Snapshot

Este método é utilizado para simular um curto-circuito em um local específico tornando possível visualizar o perfil de afundamento da tensão elétrica nas barras vizinhas ou testar a atuação de relés e fusíveis. Assim, a falta é tratada como um elemento físico acoplado à rede.

Figura 2 – Script Modo Direct ou Snapshot

```

var circ = engine.ActiveCircuit;
circ.Solution.Mode = (int)SolveModes.dssSnapShot;
circ.Solution.LoadMult = 1.0;

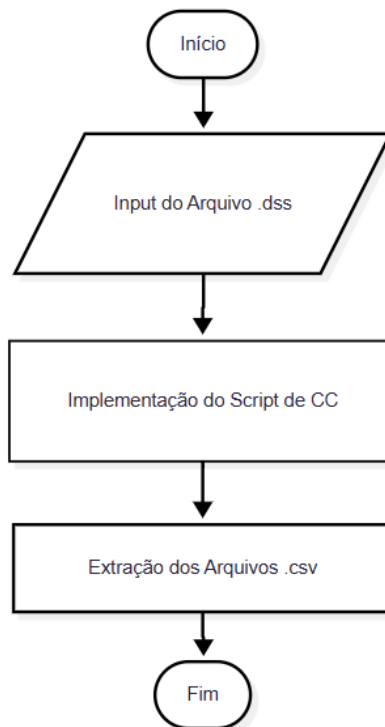
engine.Text.Command = "New Fault.Falta1 Bus1=B858 Phases=3 r=0.001";

ComT.Restart();
circ.Solution.Solve(); //calculo com curto ativo

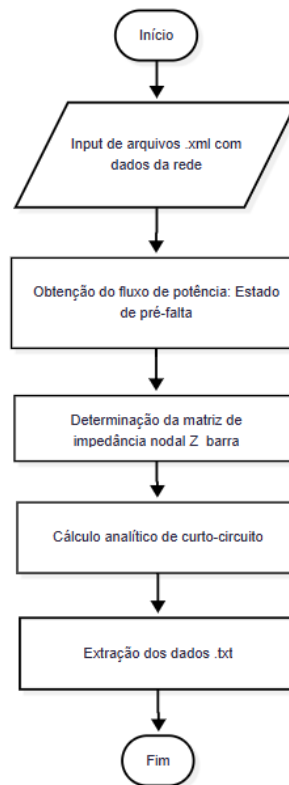
```

Fonte: Autora.

De forma geral, para obtenção dos valores de referência via OpenDSS e os valores à serem validados via Matriz de Impedância Nodal, a metodologia seguida para cada um dos casos pode ser reconhecida através dos fluxogramas presentes nas Figuras 3 e 4.

Figura 3 – Fluxograma Metodologia Via OpenDSS

Fonte: Autora.

Figura 4 – Fluxograma Metodologia Via Matriz Zbarra

Fonte: Autora.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os processos metodológicos empregados para resolução das problemáticas envolvendo fluxo de potência e CC foram implementados tanto pelo método do OpenDSS quanto pela linguagem C#. Para fins comparativos, ambos os métodos foram executados para redes de distribuição em sistemas de 25-, 135- e 1074- barras.

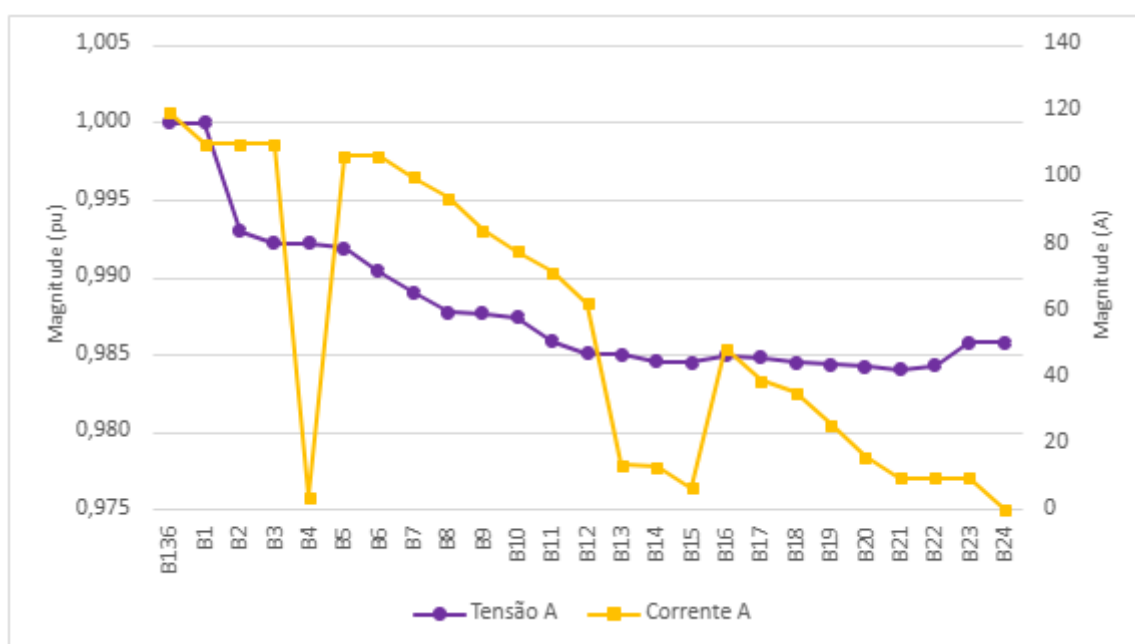
A seguir algumas análises gráficas do fluxo de potência, de magnitude de tensão e corrente elétrica são apresentadas comparativamente associadas aos respectivos erros percentuais.

4.1 Análise do Sistema de 25 Barras

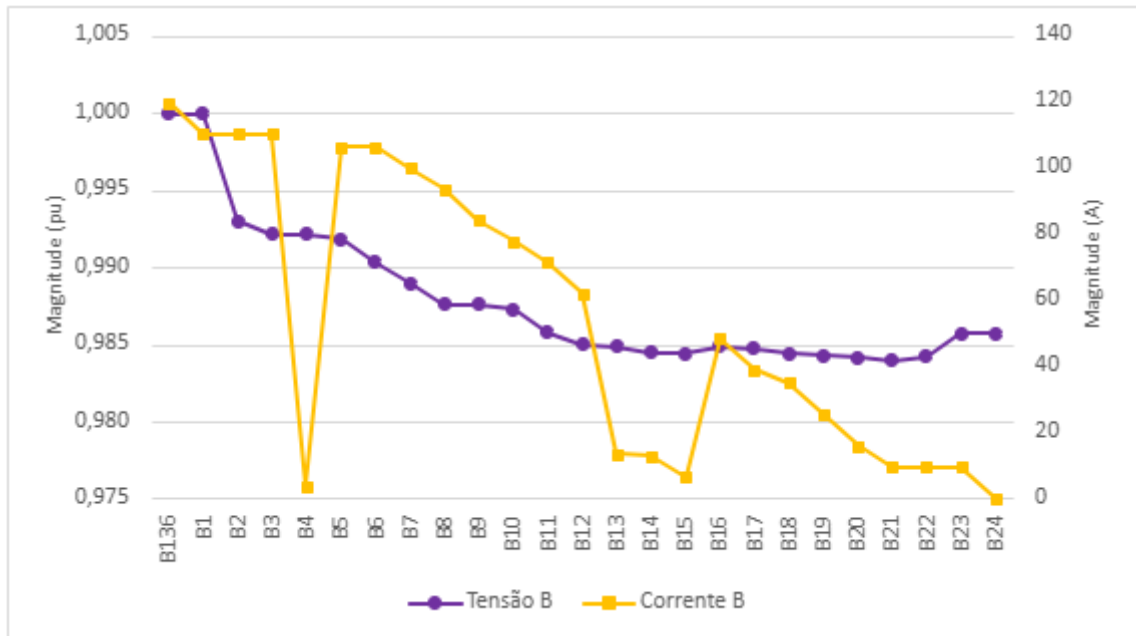
Os perfis de fluxo de potência exibem tensões nodais em regime permanente para as fases A, B e C antes da aplicação de qualquer distúrbio. É possível notar que o perfil de tensão decresce à medida que se afasta da subestação (B0), existindo o comportamento físico que decorre da queda de tensão ao longo dos condutores, provocada pela passagem das correntes de carga.

Nas Figuras 5, 6 e 7 observa-se as curvas distintas das 3 fases, refletindo a assimetria das cargas e a característica de desequilíbrio do sistema de distribuição.

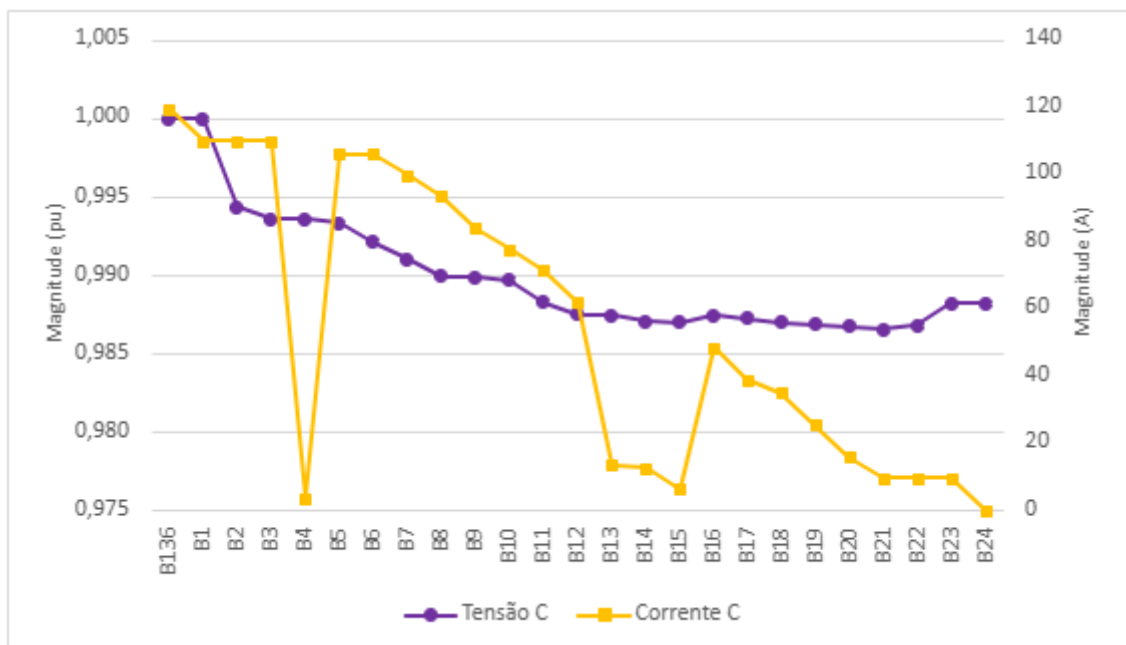
Figura 5 – Fluxo de Potência Fase A (25 Barras)



Fonte: Autora.

Figura 6 – Fluxo de Potência Fase B (25 Barras)

Fonte: Autora.

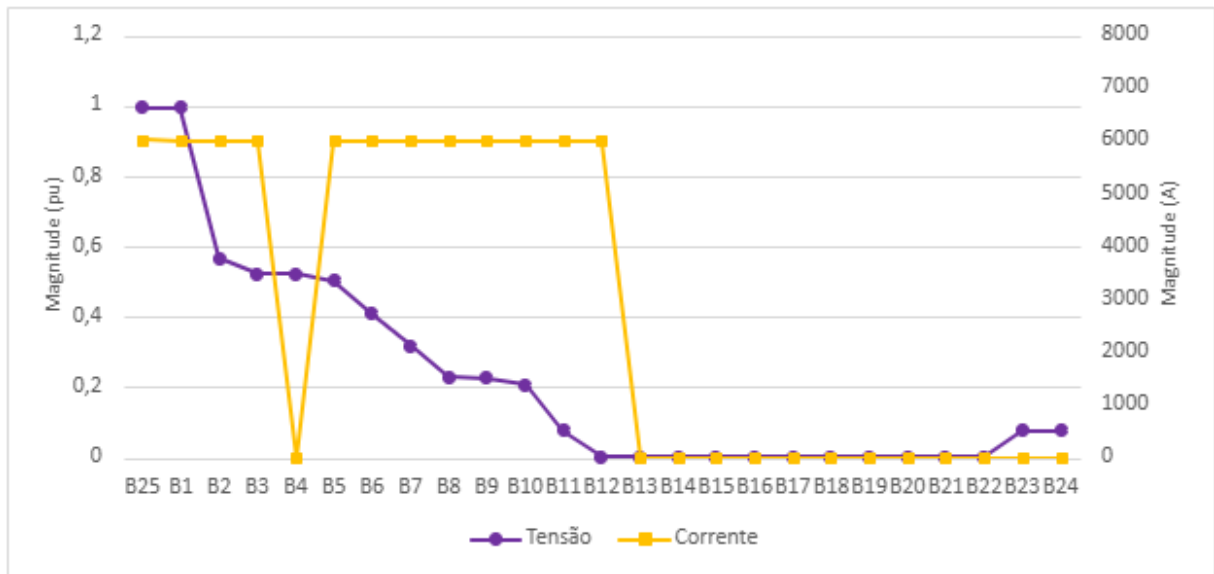
Figura 7 – Fluxo de Potência Fase C (25 Barras)

Fonte: Autora.

Para o obter os perfis de magnitude de tensão e corrente em curto-circuito utilizando o método de falta específica do OpenDSS, ou Snapshot, foi aplicada uma falta na Barra 12 para análise dos sistemas de 25 barras.

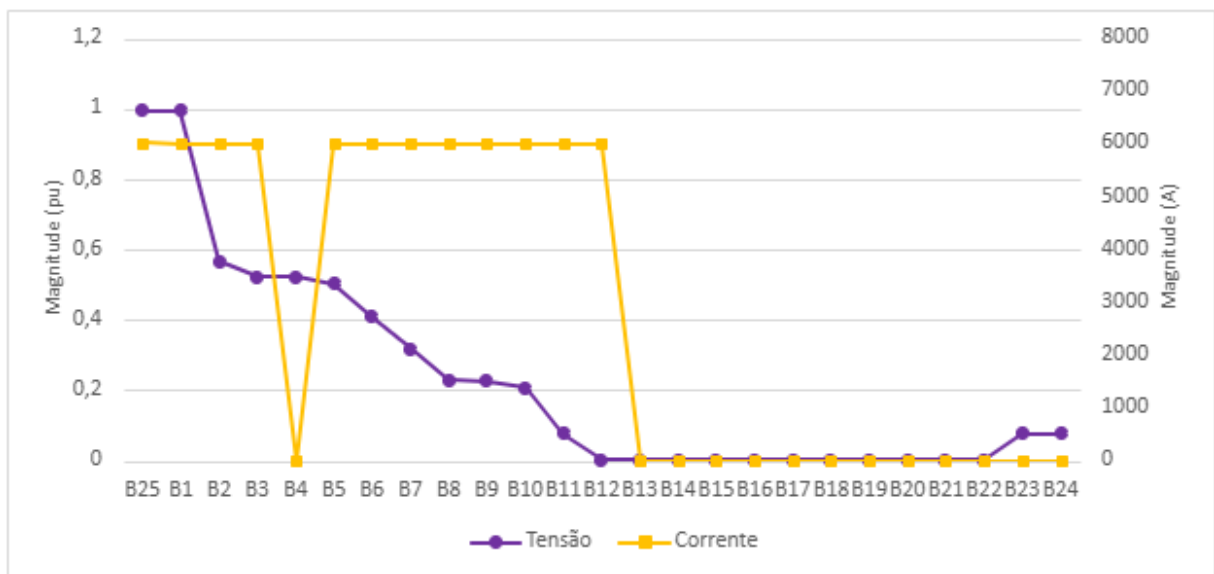
Nas Figura 8, 9 e 10 é possível observar a magnitude de tensão e corrente elétrica ao aplicar o curto-circuito em B12 pelo modo *Snapshot*.

Figura 8 – Falta Específica OpenDSS Fase A (Barra 12)

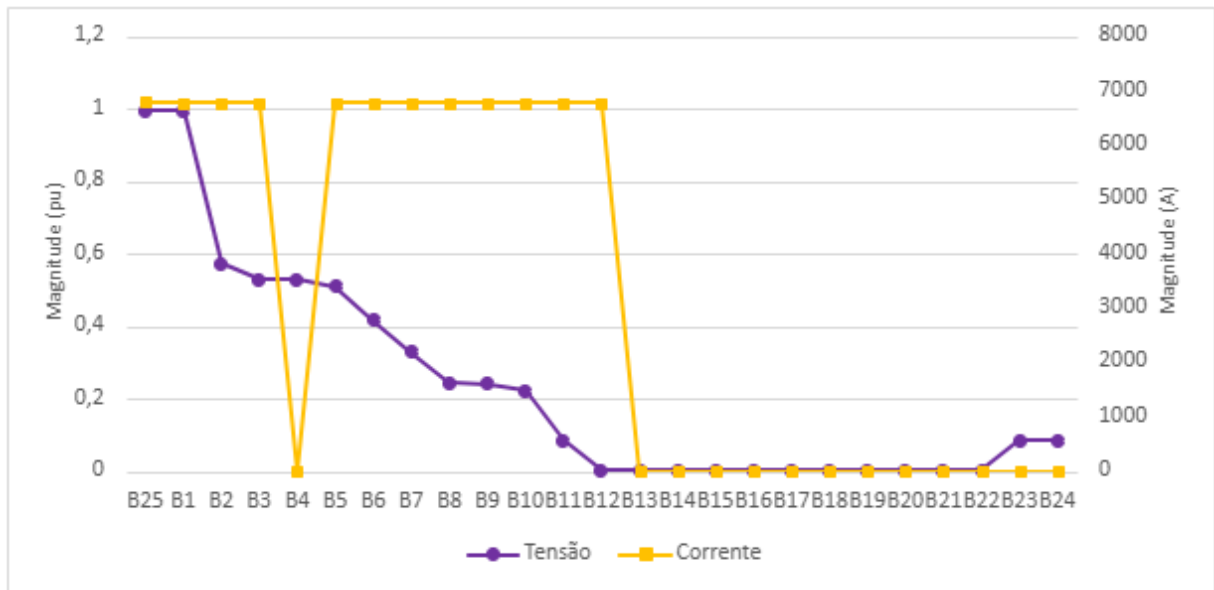


Fonte: Autora.

Figura 9 – Falta Específica OpenDSS Fase B (Barra 12)



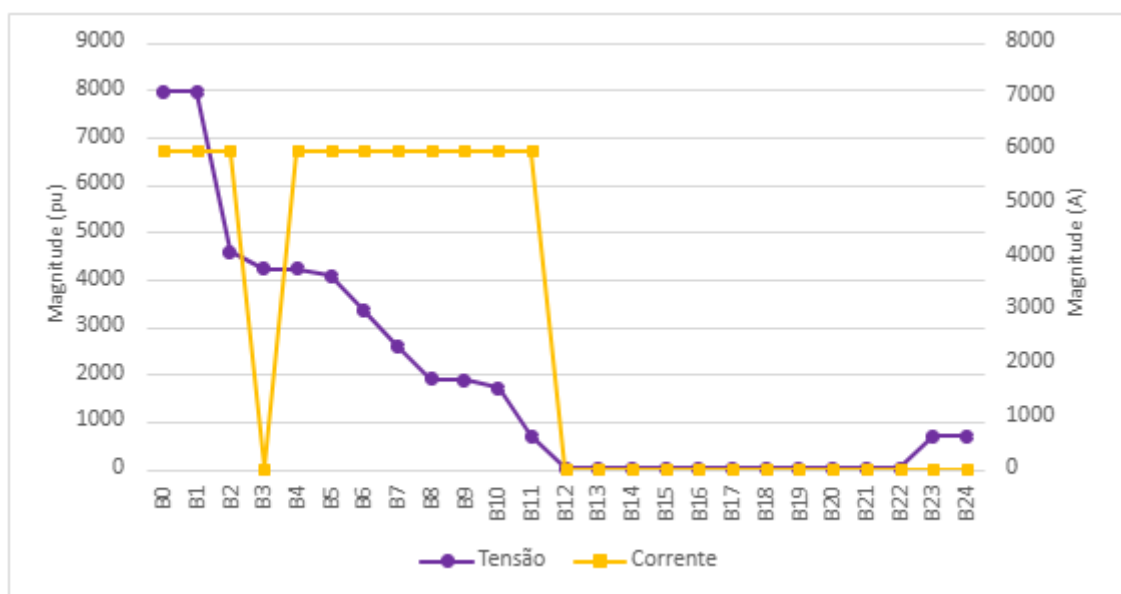
Fonte: Autora.

Figura 10 – Falta Específica OpenDSS Fase C (Barra 12)

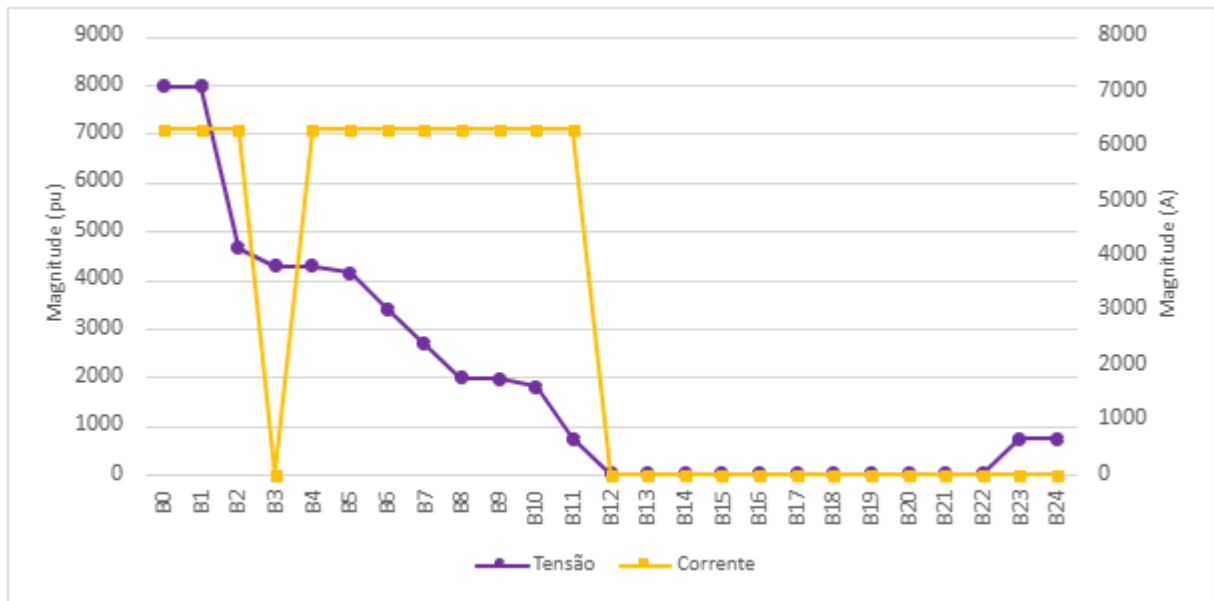
Fonte: Autora.

Já nas Figura 11, 12 e 13 observa-se os perfis ao aplicar o curto-circuito na mesma barra, porém pelo método da matriz de impedância nodal.

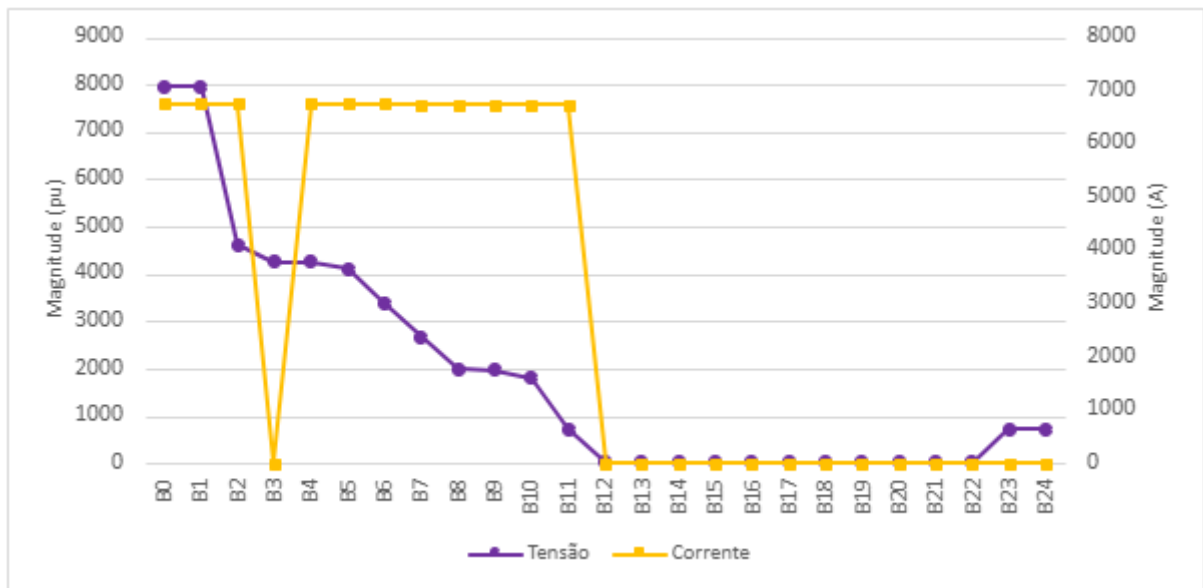
Os gráficos comparativos demonstram o colapso da tensão na B12 e a forma como as barras vizinhas acompanham a redução, já que compartilham do mesmo caminho até a fonte.

Figura 11 – CC Impedância Nodal Fase A (Barra 12)

Fonte: Autora.

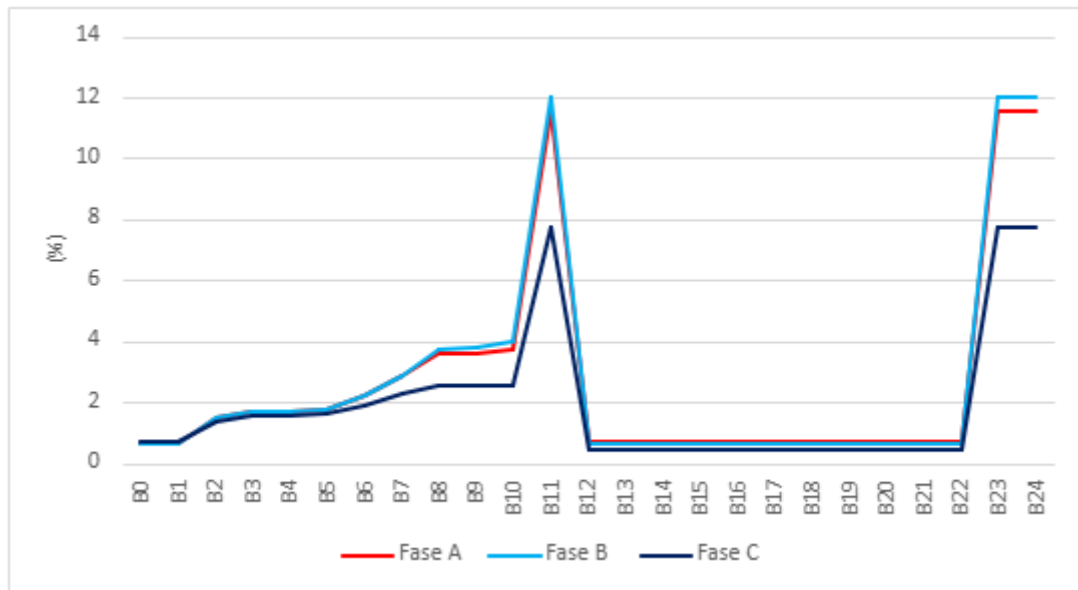
Figura 12 – CC Impedância Nodal Fase B (Barra 12)

Fonte: Autora.

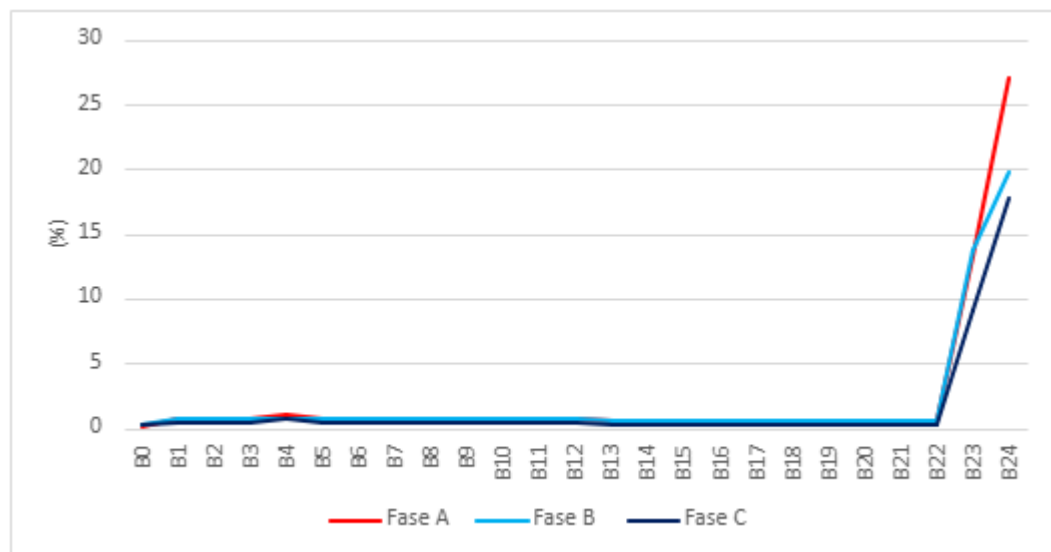
Figura 13 – CC Impedância Nodal Fase C (Barra 12)

Fonte: Autora.

As Figuras 14 e 15 apresentam os erros percentuais entre as 3 fases de magnitude de tensão e corrente elétrica. A partir do confronto dos valores torna-se possível avaliar que os desvios se mantiveram em escalas muito pequenas, comprovando o rigor do sistema de resolução desenvolvido anteriormente. A divergência vista entre algumas fases, como na Fase C, são completamente comuns e é resultado do desequilíbrio entre elas.

Figura 14 – Erro Percentual (Tensão)

Fonte: Autora.

Figura 15 – Erro Percentual (Corrente)

Fonte: Autora.

Ressaltando que os máximos valores percentuais, de magnitude de tensão e corrente, equivalem a um valor absoluto. Essas informações podem ser visualizadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Comparativo Valores Máximos (25 barras)

Grandeza	Barra	OpenDSS	Zbarra	Diferença (%)
Tensão (pu)	B11	616,551	687,692	11,53
Corrente (A)	B24	0,000787	0,001	27,03

Fonte: Autora.

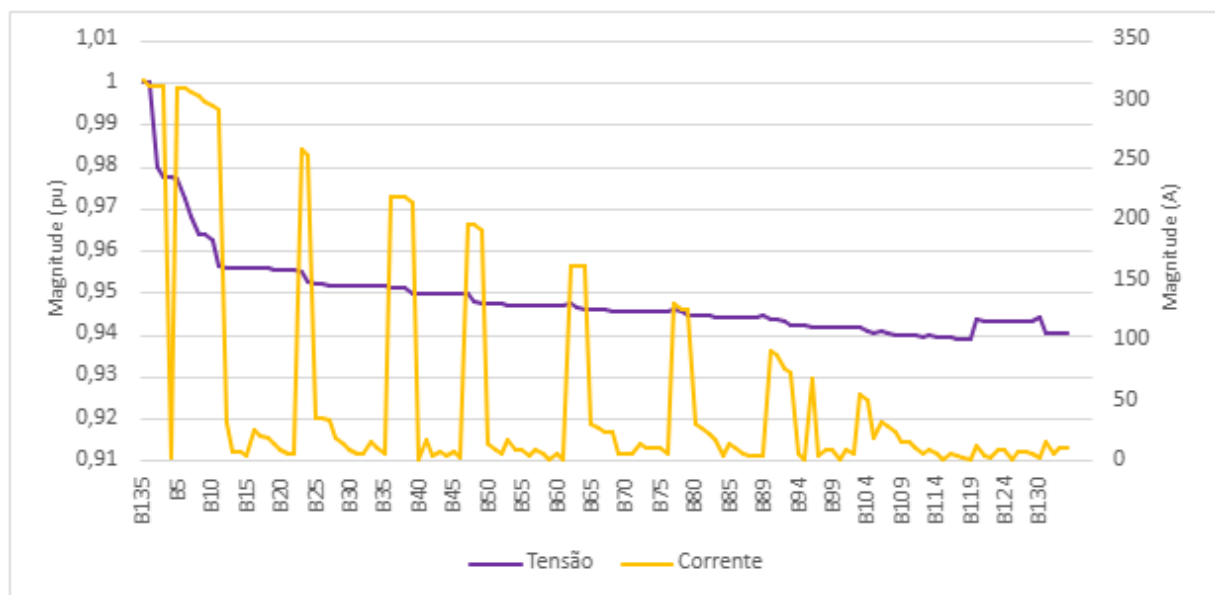
Figura 16 – Valores Comparativos entre B0 e B12

BUS	OpenDSS - Falta Específica						Matriz de Impedância Nodal					
	Magnitude de Tensão (V)			Magnitude de Corrente (A)			Magnitude de Tensão (V)			Magnitude de Corrente (A)		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
B0	7918,04	7918,73	7911,2	6022,1	6357,2	6787,22	7967,434	7967,434	7967,434	6031,385	6369,429	6807,217
B12	6,00137	6,33561	6,76605	6001,41	6335,65	6766,1	5,960392	6,294849	6,738154	5960,434	6294,893	6738,202

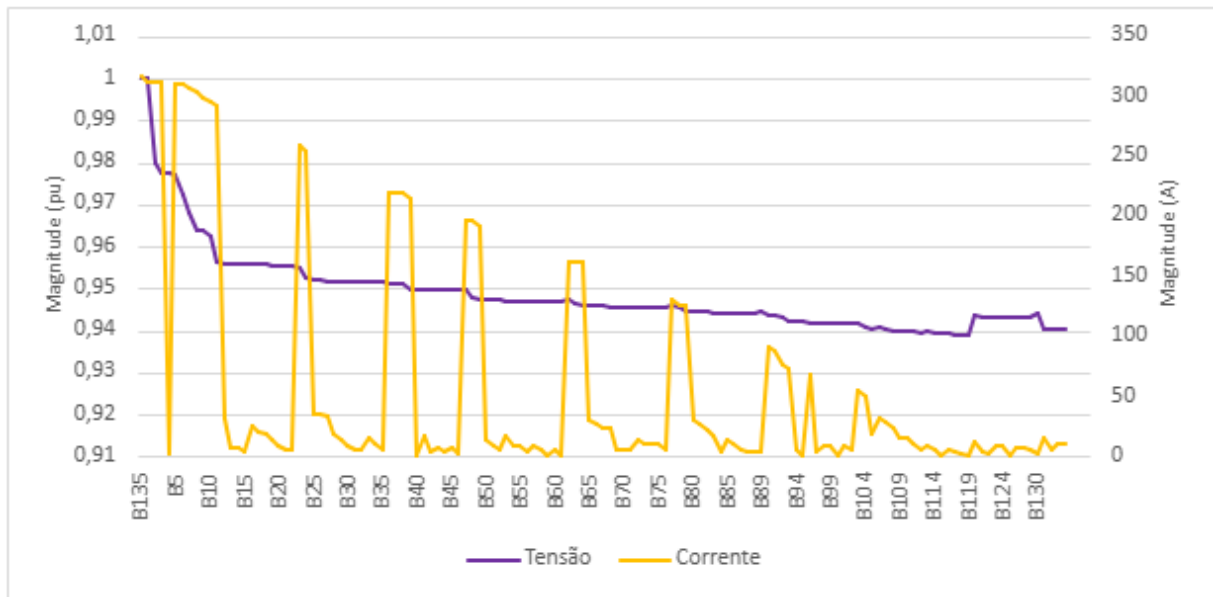
Fonte: Autora.

4.2 Análise Comparativa do Sistema de 135 Barras

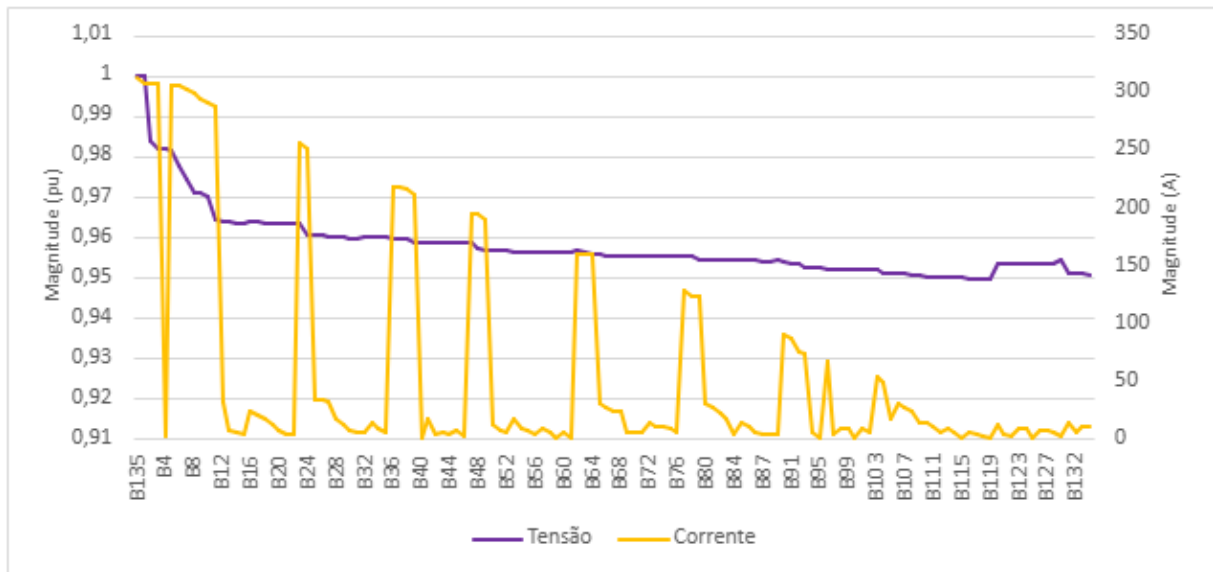
No sistema de 135 barras, o perfil de fluxo de potência mostra ramificações um pouco mais complexas. Assim como visto no sistema anterior, a queda de tensão observada ao longo dos condutores segue ocorrendo, mas com a adição de alguns degraus e variações entre as fases. Essas divergências podem ocorrer em decorrência de uma extensão maior das próprias linhas, da sua topologia e do acentuado desequilíbrio na distribuição de cargas ao longo das ramificações.

Figura 17 – Fluxo de Potência Fase A (135 Barras)

Fonte: Autora.

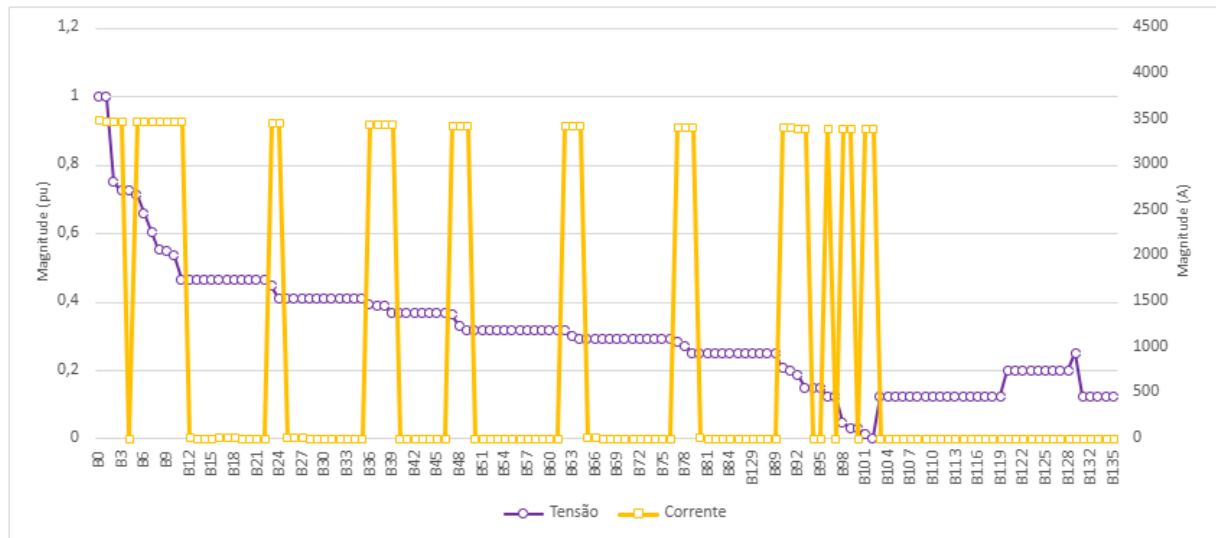
Figura 18 – Fluxo de Potência Fase B (135 Barras)

Fonte: Autora.

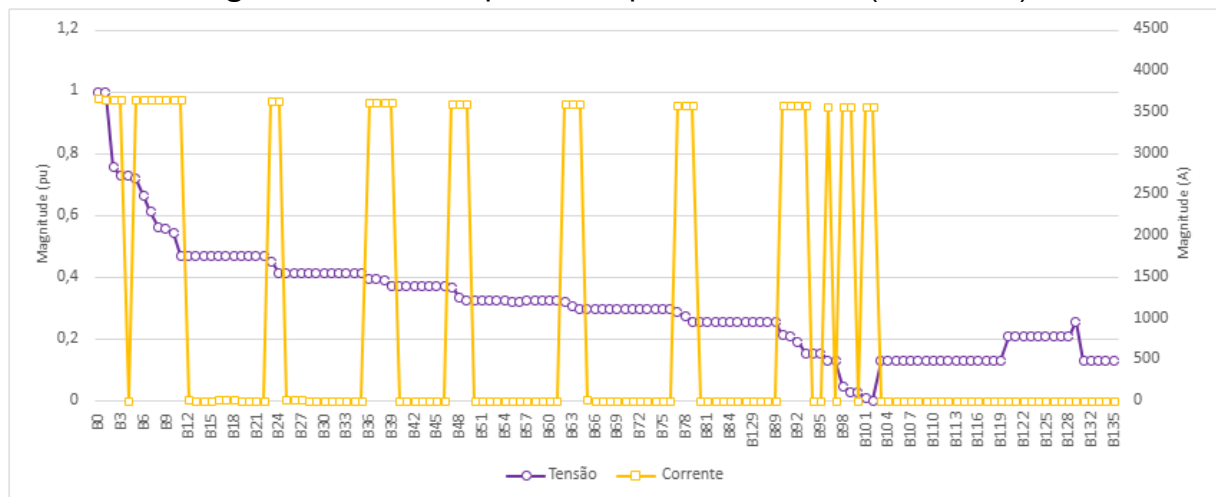
Figura 19 – Fluxo de Potência Fase C (135 Barras)

Fonte: Autora.

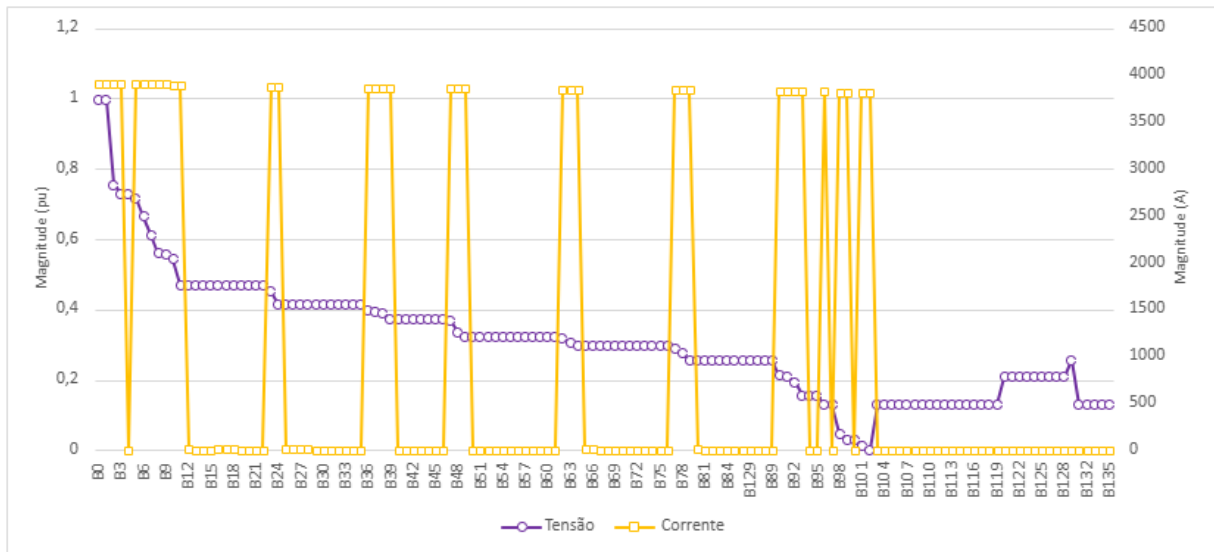
Para o obter os perfis de magnitude de tensão e corrente em curto-circuito utilizando o método de falta específica do OpenDSS, ou Snapshot, foi aplicada uma falta na Barra 102 para o caso dos sistemas de 135 barras.

Figura 20 - Falta Específica OpenDSS Fase A (Barra 102)

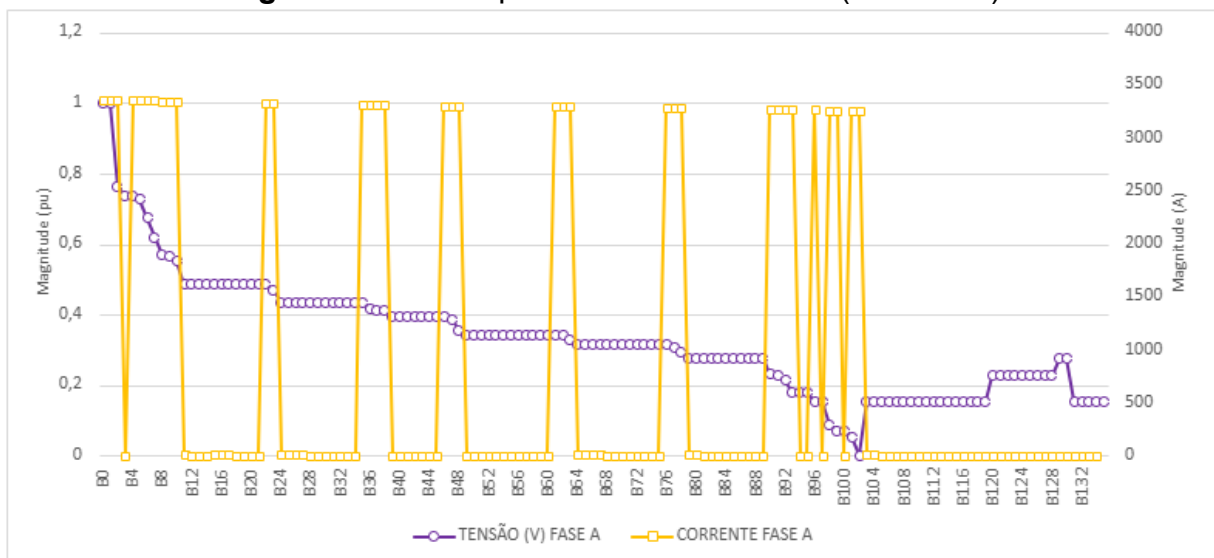
Fonte: Autora.

Figura 21 - Falta Específica OpenDSS Fase B (Barra 102)

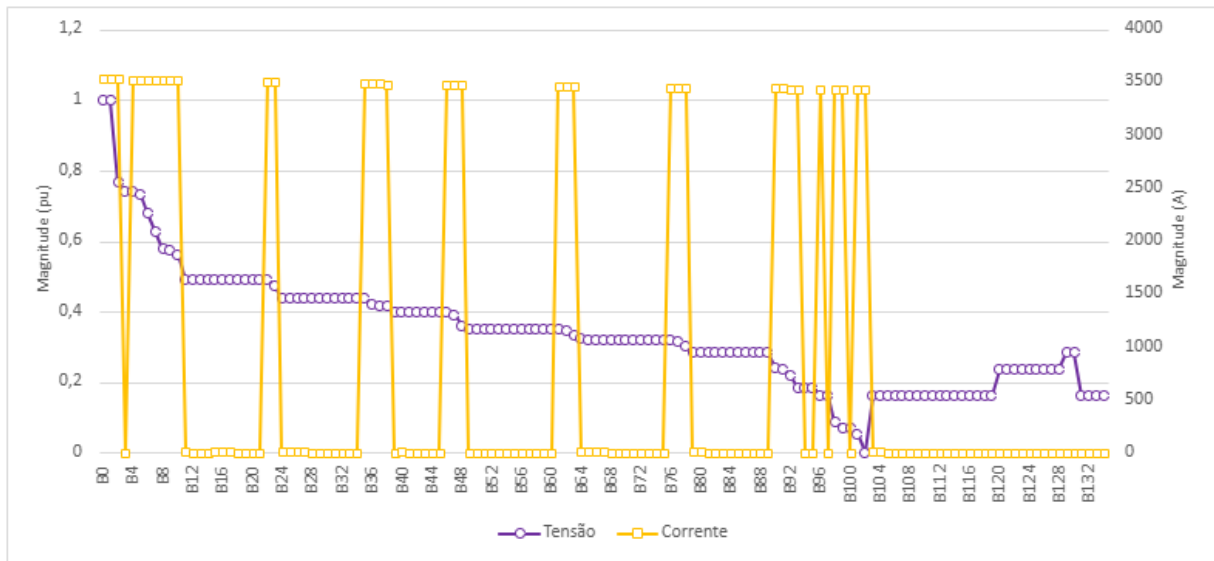
Fonte: Autora.

Figura 22 - Falta Específica OpenDSS Fase C (Barra 102)

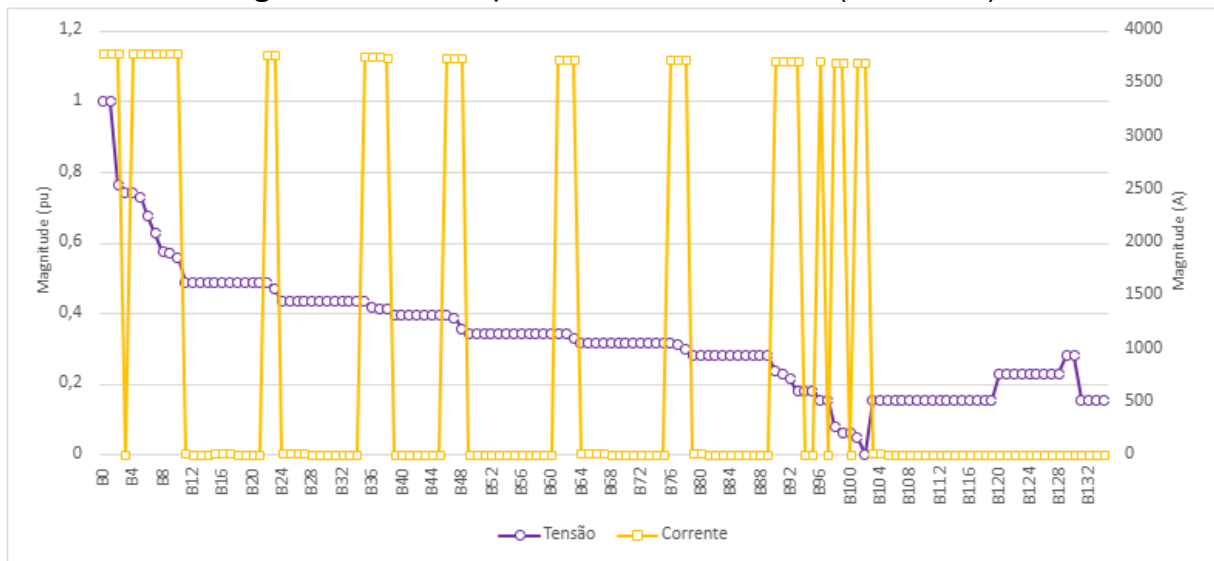
Fonte: Autora.

Figura 23 – CC Impedância Nodal Fase A (Barra 102)

Fonte: Autora.

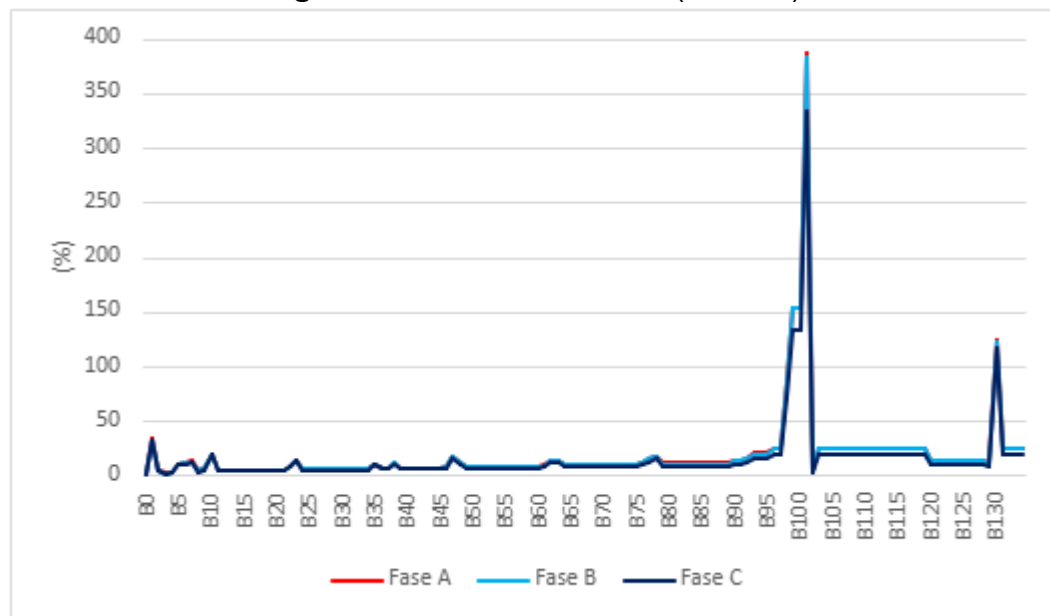
Figura 24 – CC Impedância Nodal Fase B (Barra 102)

Fonte: Autora.

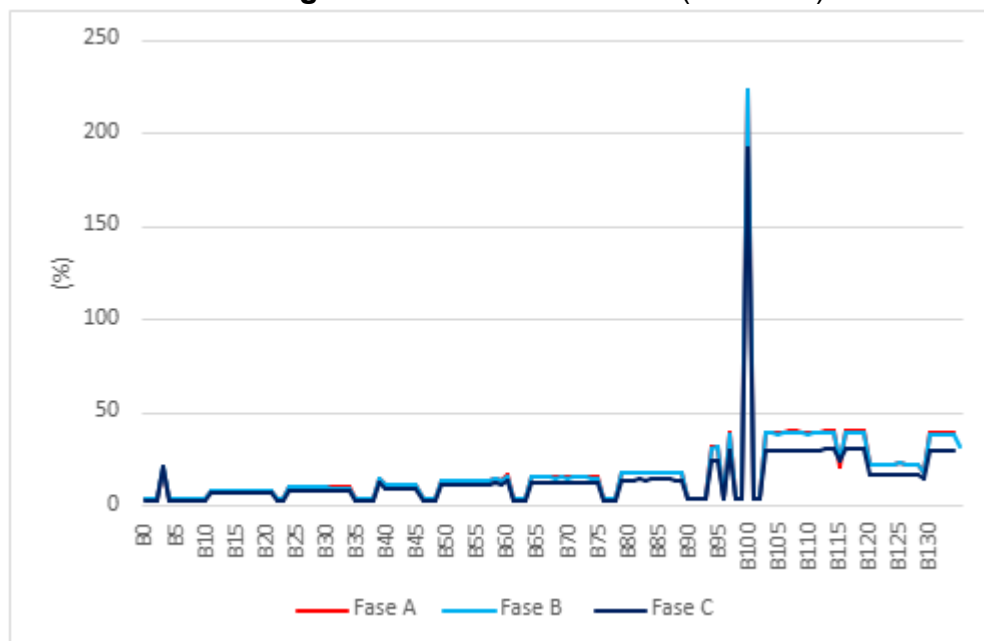
Figura 25 – CC Impedância Nodal Fase C (Barra 102)

Fonte: Autora.

Torna-se, portanto, possível realizar a análise de erro percentual dos métodos de cálculo de curto-circuito em barras específicas, assim como pode ser visto nas Figuras 26 e 27. A comparação exibe como ambos os métodos convergem para perfis muito similares, possuindo variações pontuais nos desvios que podem ser justificadas com os dados, mostrando que valores extremamente pequenos quando comparados entre si geram erros percentuais muito altos. Como 0,05285 e 0,010938 ao serem confrontados apresentam 383,18% de desvio.

Figura 26 – Erro Percentual (Tensão)

Fonte: Autora.

Figura 27 – Erro Percentual (Corrente)

Fonte: Autora.

Tabela 2 – Comparativo Valores Máximos (135 barras)

Grandeza	Barra	OpenDSS	Zbarra	Diferença (%)
Tensão (pu)	B101	0,011192	0,054481	386,78
Corrente (A)	B100	0,027012	0,087208	222,85

Fonte: Autora.

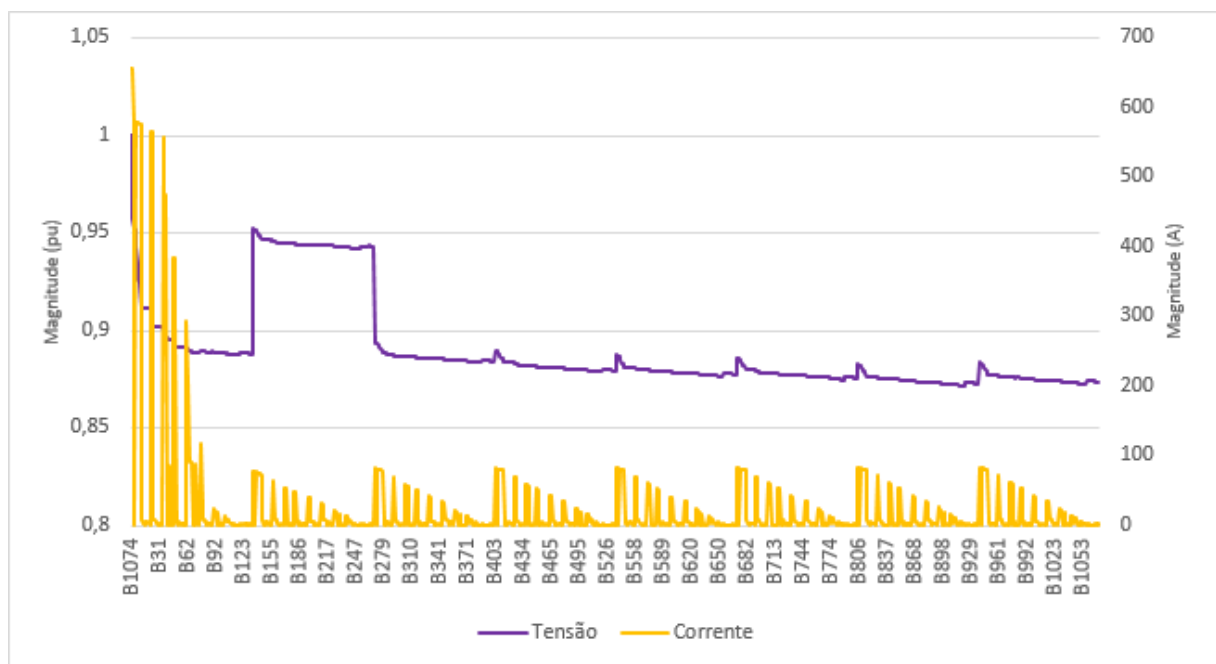
Figura 28 – Valores Comparativos entre B0 e B102

BUS	OpenDSS - Falta Específica						Matriz de Impedância Nodal					
	Magnitude de Tensão (V)			Magnitude de Corrente (A)			Magnitude de Tensão (V)			Magnitude de Corrente (A)		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
B0	0,99648	0,99655	0,99601	3483,32	3656,08	3908,1	1	1	1	3358,125	3528,543	3789,91
B102	0,000426	0,000447	0,000479	3395,89	3565,31	3819,01	0,000409	0,00043	0,000464	3262,395	3428,291	3694,903

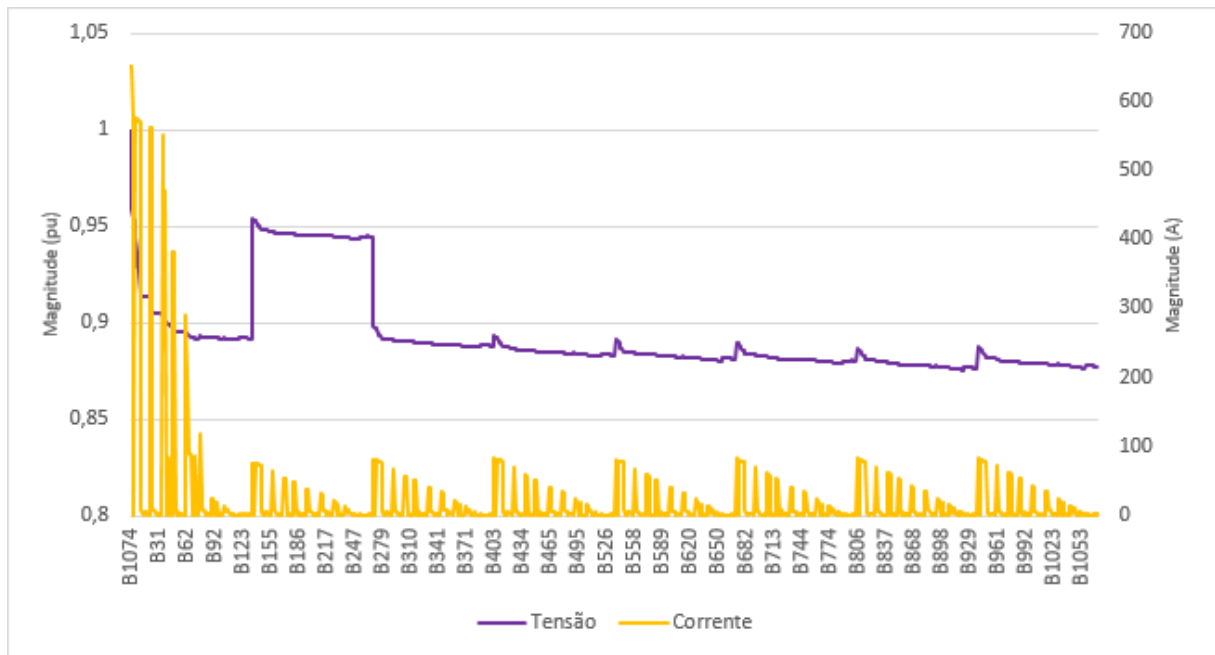
Fonte: Autora.

4.3 Análise Comparativa do Sistema de 1074 Barras

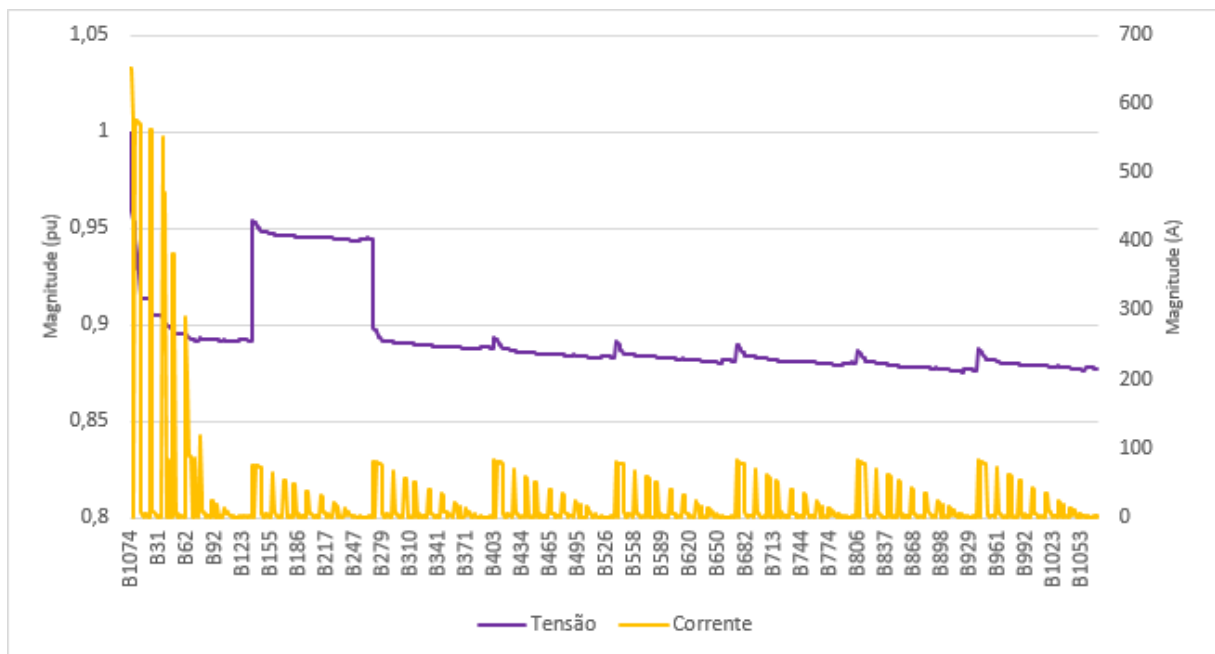
Assim como nos outros sistemas, as Figuras 29, 30 e 31 exibem o comportamento das 3 fases do fluxo de potência para sistemas de 1074 barras. Devido sua vasta extensão, o perfil mostra uma alta dispersão de pontos nodais, evidenciando uma queda de tensão compassada em pontos específicos do sistema.

Figura 29 – Fluxo de Potência Fase A (1074 Barras)

Fonte: Autora.

Figura 30 – Fluxo de Potência Fase B (1074 Barras)

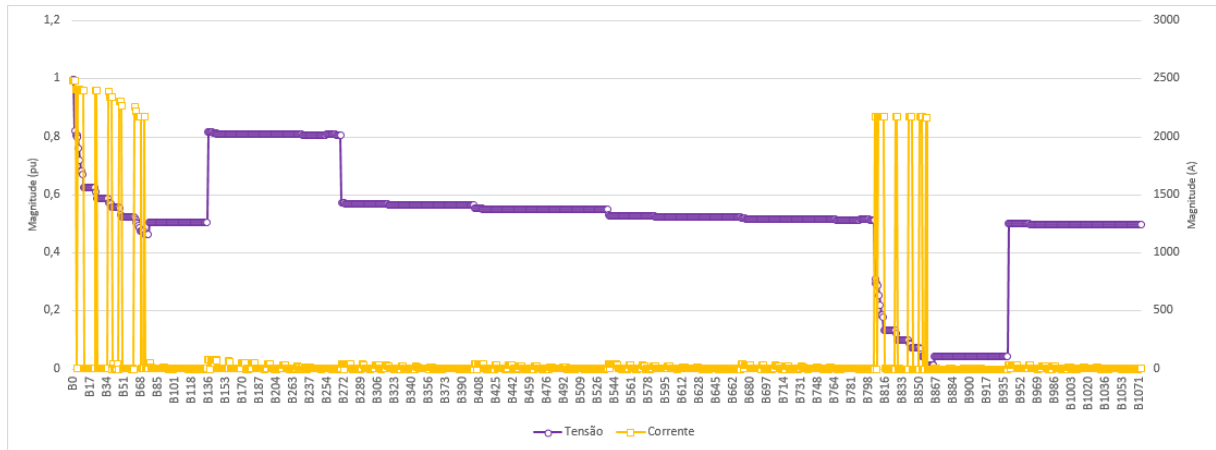
Fonte: Autora.

Figura 31 – Fluxo de Potência Fase C (1074 Barras)

Fonte: Autora.

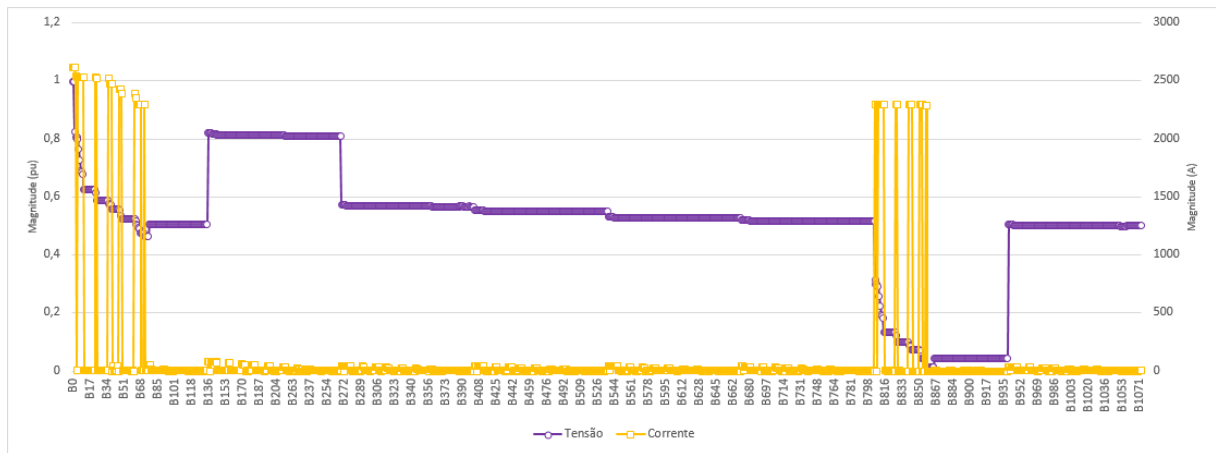
De maneira semelhante aos sistemas anteriores, foi aplicada uma falta na Barra 858 para o caso dos sistemas de 1074 barras. Observa-se o afundamento de tensão na região da barra 858, onde foi aplicada a falta.

Figura 32 - Falta Específica OpenDSS Fase A (Barra 858)



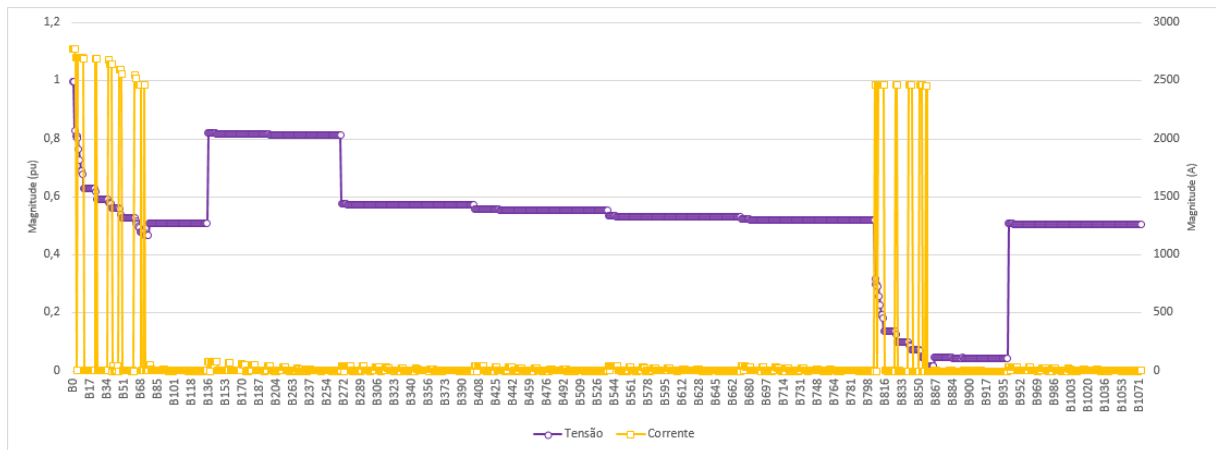
Fonte: Autora.

Figura 33 – Falta Específica OpenDSS Fase B (Barra 858)



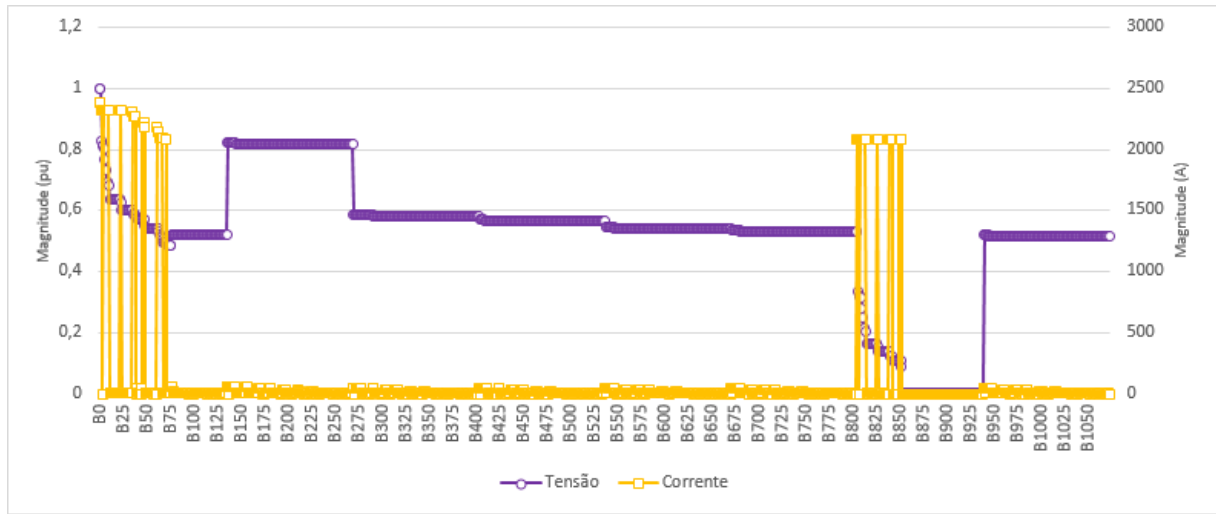
Fonte: Autora.

Figura 34 – Falta Específica OpenDSS Fase C (Barra 858)



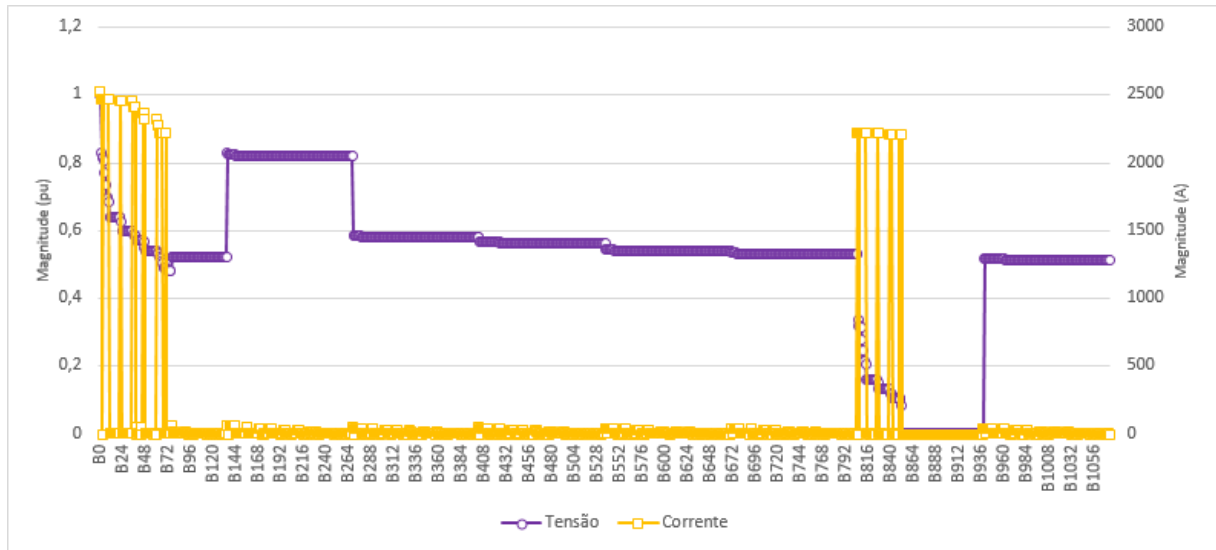
Fonte: Autora.

Figura 35 – CC Impedância Nodal Fase A (Barra 858)

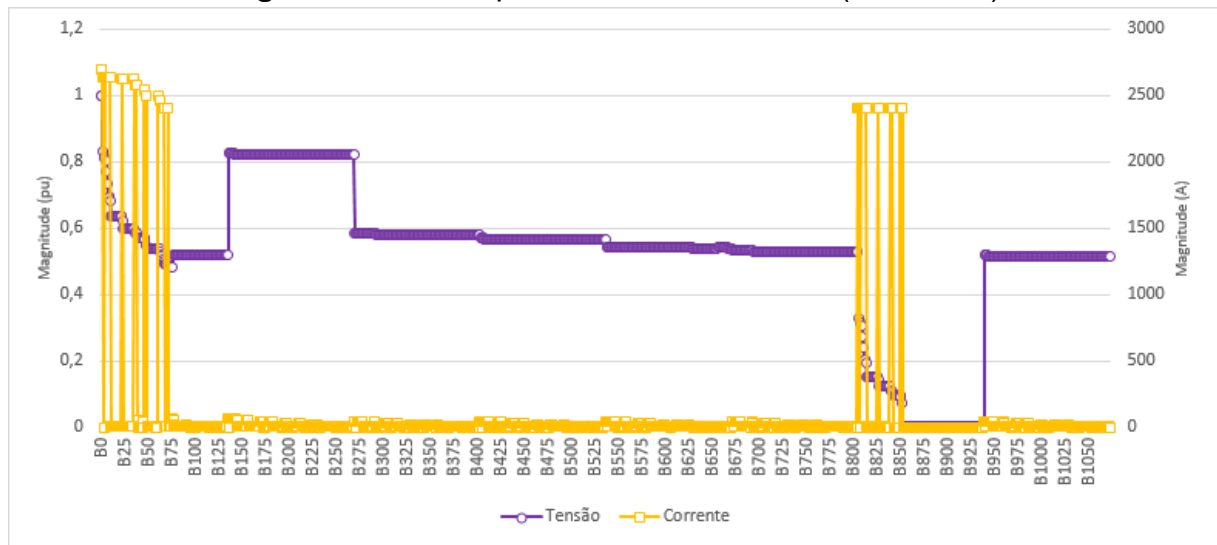


Fonte: Autora.

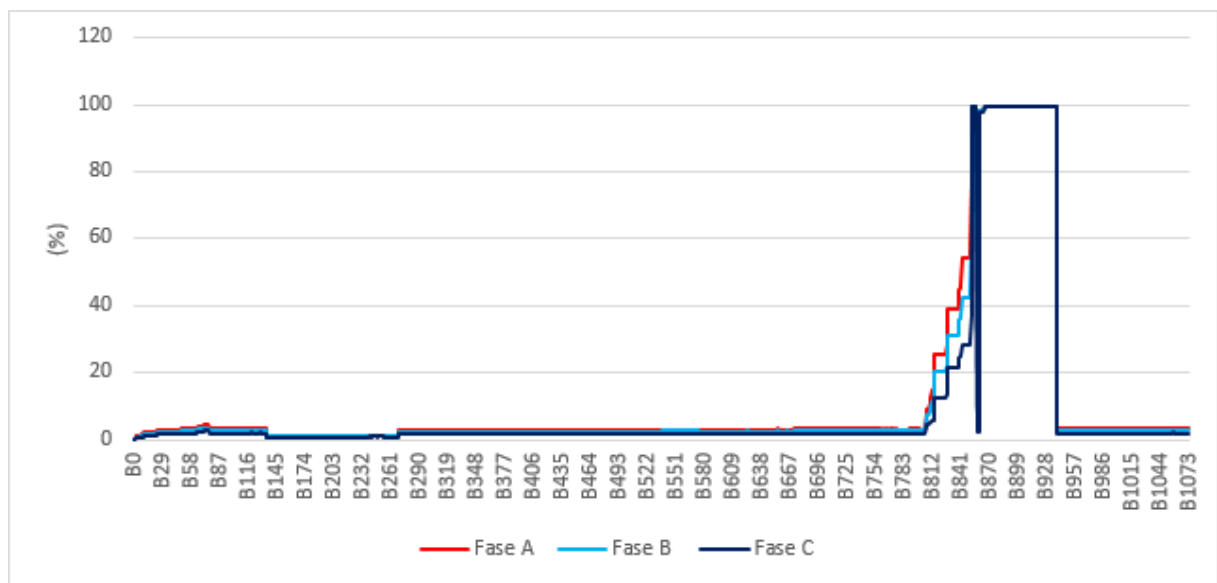
Figura 36 – CC Impedância Nodal Fase B (Barra 858)



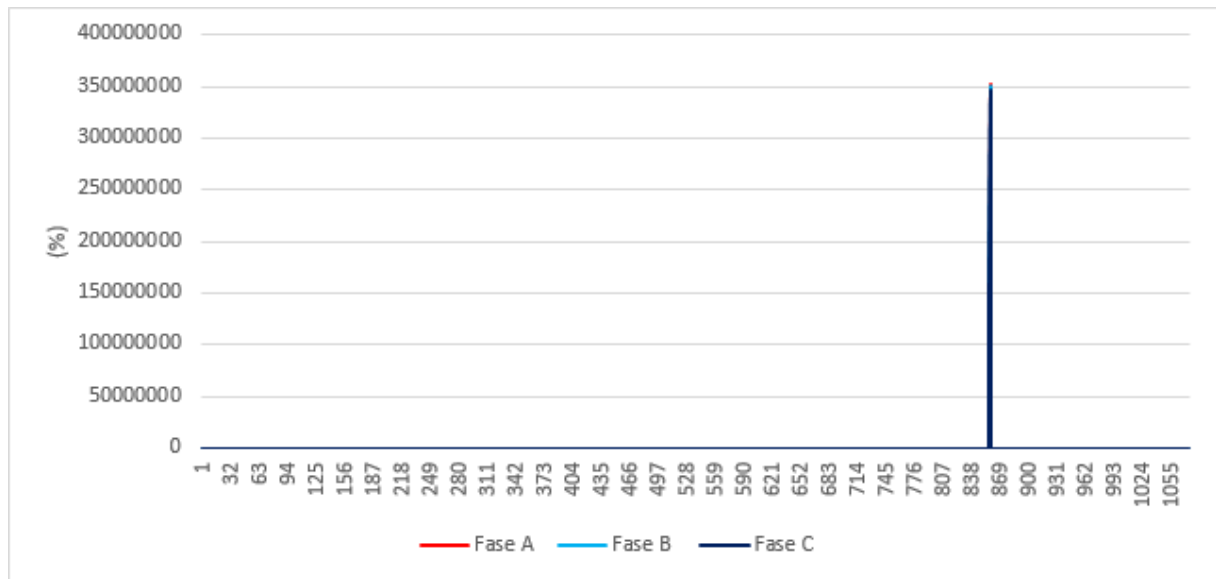
Fonte: Autora.

Figura 37 – CC Impedância Nodal Fase C (Barra 858)

Fonte: Autora.

Figura 38 – Erro Percentual (Tensão)

Fonte: Autora.

Figura 39 – Erro Percentual (Corrente)

Fonte: Autora.

Tabela 3 – Comparativo Valores Máximos (1074 barras)

Grandeza	Barra	OpenDSS	Zbarra	Diferença (%)
Tensão (pu)	B854	0,041828	0,000261	99,37507
Corrente (A)	B857	2169,57	0,00615	352685527,5

Fonte: Autora.

Da mesma forma, na Figura 40 é possível observar as magnitudes de tensão e corrente tanto para o método da falta específica pelo OpenDSS quanto pelo Método da Matriz de Impedância Nodal. Os valores evidenciados referem-se à B0, subestação e à barra onde foi aplicado o CC, para esse caso a B858.

Figura 40 – Valores Comparativos em B0 e B858

BUS	OpenDSS - Falta Específica						Matriz de Impedância Nodal					
	Magnitude de Tensão (V)			Magnitude de Corrente (A)			Magnitude de Tensão (V)			Magnitude de Corrente (A)		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
B0	0,99916	0,99918	0,99906	2481,86	2614,61	2775,72	1	1	1	2384,015	2530,072	2698,221
B858	0,000272	0,000288	0,000309	0,000318	0,000336	0,000361	0,000261	0,000278	0,000302	0,000308	0,000327	0,000355

Fonte: Autora.

Mesmo diante de valores elevados de erro percentual, é possível consolidar a comparação entre os métodos, trazendo novamente em evidência os valores pequenos que ao serem confrontados entre si, geram altos valores de desvio.

Além disso, vale observar os valores e gráficos de erros percentuais de forma mais reflexiva, visto que seus altos valores se devem também por problemas decorrentes da extração e tratamento dos dados. É possível observar na Tabela 1 um compilado dos erros percentuais médios apresentados por cada sistema de barra.

Tabela 4 – Valores Percentuais Médios

Sistema (Barras)	Erro Médio Tensão (%)	Erro Médio Corrente (%)
25	2,4050	1,8131
135	20,6785	29,417
1074	11,3695	465682,49

Fonte: Autora.

5 CONCLUSÃO

No presente trabalho foi desenvolvida uma metodologia para análise de curtos-circuitos em SDEEs utilizando o método de matriz de impedância nodal e o *software Open Distributed System Simulator*, utilizado como uma ferramenta de validação com o intuito de confrontar os resultados obtidos em faltas localizadas especificamente no modo *Snapshot*.

A representação das redes de distribuição foi validada por meio de testes computacionais nos sistemas de 25, 135 e 1074 barras. Constatou-se os impactos diretos que a topologia de linha acaba possuindo para os resultados gerais da rede, além dos seus respectivos desequilíbrios e ramificações laterais extensas, que atuam como limitadores naturais das correntes à medida que o ponto de falta se afasta da subestação.

A análise comparativa entre o método aplicado em C# e o do OpenDSS revelou convergência gráfica fiel. Mesmo que em alguns cenários foram registrados picos de erro percentual, vale pontuar que tais desvios não indicam divergência entre os métodos, mas decorrem de limitações de arredondamento e, portanto, da própria natureza matemática do cálculo do erro percentual absoluto. Em alguns nós, onde as grandezas assumem valores infinitesimais, variações na ordem de milésimos geram valores altíssimos de desvio, mesmo que a diferença absoluta em pu, Volts ou Ampere seja quase nula na prática.

A metodologia proposta expressou estabilidade computacional e precisão para sistemas de grandeza variado, como apresentados neste trabalho. Portanto, consolida-se como uma ferramenta viável e eficiente com fins de estudo de proteção, coordenação de dispositivos e operação em conjunturas modernas que englobem redes inteligentes de distribuição de energia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BLANCO, J. A.; LEITE, J. B. **Método de Varredura com Formulação de Soma de Potência expandido para o domínio das fases**. Ilha Solteira: UNESP, 2025.

DUGAN, R. C. **Open Distributed System Simulator (OpenDSS)**. Reference Guide. Palo Alto: Electric Power Research Institute (EPRI), 2022.

ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE (EPRI). **OpenDSS: Open Distributed System Simulator User's Manual**. Palo Alto: EPRI, 2024.

GRAINGER, J. J.; STEVENSON, W. D. **Power System Analysis**. McGraw-Hill, 1997.

REIZ, C. e LEITE, J.B. **Short-Circuit Calculation in Unbalanced Three-Phase Power Distribution Systems with Distributed Generation**. In: 2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference – Latin America (ISGT Latin America), 2019.

SATO, F.; FREITAS, W. **Análise de Curto-Circuito e Princípios de Proteção em Sistemas de Energia Elétrica**. 1a ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

SOUZA, M. **Desenvolvimento de um algoritmo eficiente de cálculo de fluxo de potência em redes de distribuição de energia elétrica usando recursão e programação paralela**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2023.

TRUJILLO, K. R. B. **Modelos simplificados de geradores distribuídos para estudos de cálculo de curto-circuito**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Estadual de Campinas – SP, 2017.

LABORATÓRIO DE PLANEJAMENTO DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA (LaPSEE). **Distribution System Testing – 135 buses**. Ilha Solteira: FEIS/UNESP, 2026. Disponível em:

https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/lapsee/system_135_3ph_distribution_feeder.rar. Acesso em: 19 fev. 2026.

LABORATÓRIO DE PLANEJAMENTO DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA (LaPSEE). **Distribution System Testing – 1074 buses**. Ilha Solteira: FEIS/UNESP, 2026. Disponível em:

https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/lapsee807/system_1074_distribution_feeder.rar. Acesso em: 19 fev. 2026.