



CENTRO UNIVERSITÁRIO DE BRASÍLIA – UNICEUB

FACULDADE DE TECNOLOGIA E CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS – FATECS

CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

NÁDILA OSANA NEREU GOMES

**ANÁLISE DE FALTAS SIMULTÂNEAS NO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA
DE 57 BARRAS ATRAVÉS DO SOFTWARE ANAFAS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Brasília

2018

NÁDILA OSANA NEREU GOMES

**ANÁLISE DE FALTAS SIMULTÂNEAS NO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA
DE 57 BARRAS ATRAVÉS DO SOFTWARE ANAFAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Banca Examinadora do curso de Engenharia Elétrica da FATECS – Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas – no Centro Universitário de Brasília como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. MSc. Luciano Henrique Duque

Brasília

2018

NÁDILA OSANA NEREU GOMES

**ANÁLISE DE FALTAS SIMULTÂNEAS NO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA
DE 57 BARRAS ATRAVÉS DO SOFTWARE ANAFAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Banca examinadora do curso de Engenharia Elétrica da FATECS – Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas – no Centro Universitário de Brasília como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. MSc. Luciano Henrique Duque

Brasília, 11 de Dezembro de 2018

BANCA EXAMINADORA

Prof. MSc. Luciano Henrique Duque
Orientador

Prof. MSc. Nilo Sérgio Soares Ribeiro

Prof. MSc. Alcinéia Silva de Aguiar

Dedico este trabalho aos meus pais, José Arribamar e Antonia Aurizete, e meu irmão, Ricardo, que foram os principais responsáveis pelo meu sucesso. Amo vocês.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pois graças ao intermédio Dele consegui a bolsa integral para o curso dos meus sonhos. Agradeço aos meus pais, Antonia e José, por entenderem os meus momentos de estresse nos últimos meses e por sempre me ajudarem desde o meu primeiro dia de aula até a apresentação desta monografia. Agradeço ao meu irmão, Ricardo, por fornecer seu computador para que eu pudesse redigir este trabalho e por sempre me incentivar a continuar seguindo meus objetivos mesmo com as adversidades no caminho.

Agradeço aos meus amigos e colegas de classe por proporcionarem momentos de descontração e alegria ao longo do curso.

Agradeço a todos meus professores pelo conhecimento teórico e experiências profissionais transmitidas. Um agradecimento especial aos professores: Kleber Xavier, Luís Cláudio, Luciano Duque, Nilo Sérgio e William Malvezzi. Graças ao incentivo do professor Kleber Xavier realizei um curso técnico, onde conheci minha paixão pela eletricidade, ao professor Luís Cláudio que é o exemplo de amor e dedicação a profissão, aos professores Luciano Duque e Nilo Sérgio por todas orientações e contribuições neste trabalho e ao professor William Malvezzi pelas conversas, incentivos e sugestões.

“Devemos admitir com humildade que, ao passo que os números são puramente produtos de nossas mentes, o espaço tem uma realidade fora de nossas mentes, de modo que não podemos descrever completamente suas propriedades a priori.”

Carl Friedrich Gauss

RESUMO

Este trabalho apresenta a análise do comportamento das grandezas elétricas de tensão e corrente de curto-circuito ao longo das barras dos sistemas de 10 e 57 barras, sistemas obtidos a partir dos estudos de caso gerados pelo Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE). Todo estudo será realizado com o auxílio da ferramenta computacional chamada Análise de Falhas Simultâneas (ANAFAS), através de estudos individuais e macro. As análises serão realizadas através dos cálculos de erros relativos dos dados fornecidas por relatórios do ANAFAS, obedecendo as relações matemáticas descritas no referencial teórico, e empiricamente por meio da observação do comportamento das variáveis no diagrama unifilar dos sistemas. Os dados dos relatórios serão inseridos numa planilha Excel programada exclusivamente para este fim. Dessa forma, será possível observar os fatores de influências de curtos-circuitos como a distância do ponto de falta e a conexão das bobinas dos transformadores, assim como as características de cada tipo de falta.

Palavras-chave: ANAFAS, Sistema Elétrico de Potência, Curto-circuito, ensão de curto-circuito, Corrente de curto-circuito.

ABSTRACT

This paper presents the analysis of the behavior of the electric quantities of short-circuit voltage and short-circuit current along the buses of the 10-bus system and the 57-bus system, systems obtained from the case studies generated by Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). All the analysis will be carried out with the software called Simultaneous Fault Analysis (ANAFAS), through individual studies and macro studies. The analyzes will be performed by calculating relative errors of the data provided by ANAFAS reports, following the mathematical descriptions described in the theoretical framework and empirically by observing the behavior of the variables in the single-line diagram of the systems. The report data will be inserted into an Excel spreadsheet programmed exclusively for this purpose. In this way, it will be possible to observe the factors of influences of short circuits like the distance of the fault point and the connection of the coils of the transformers, as well as the characteristics of each type of fault.

Keywords: ANAFAS, Electrical Power System, Short Circuit, Short Circuit Voltage, Short Circuit Current.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1: Mapa do Sistema Interligado Nacional.....	20
Figura 1-2: Fluxograma do trabalho	25
Figura 2-1: Diagrama superposição das correntes do SEP com e sem carga	35
Figura 2-2: Representação de um sistema-exemplo de 5 barras.....	36
Figura 2-3: Representação de um sistema-exemplo de 5 barras considerando hipóteses simplificadoras 1, 2, 3 e 4	37
Figura 2-4: Representação de um sistema-exemplo de 5 barras considerando hipóteses simplificadoras 2, 3 e 4	38
Figura 2-5: Curto-circuito trifásico	40
Figura 2-6: Circuito trifásico com envolvimento de sequência positiva	41
Figura 2-7: Sistema de fasores unitários.....	43
Figura 2-8: Sistema desequilibrado.....	43
Figura 2-9: Componentes de sequências positiva, negativa e zero	44
Figura 2-10: Curto-circuito monofásico	46
Figura 2-11: Conexão dos diagramas de sequências no curto-circuito monofásico..	47
Figura 2-12: Curto-circuito bifásico.....	49
Figura 2-13: Conexão dos diagramas de sequências positiva e negativa no curto bifásico	50
Figura 2-14: Curto-circuito bifásico com terra.....	51
Figura 2-15: Diagrama de sequência do curto-circuito bifásico com terra.....	53
Figura 2-16: Ensaio de curto-circuito de sequência zero do transformador	54
Figura 2-17: Ensaio de curto-circuito do transformador estrela-aterrada	55
Figura 2-18: Circuito equivalente do transformador estrela-aterrada	56
Figura 2-19: Ensaio de curto-circuito do transformador estrela-aterrada e delta.....	57
Figura 2-20: Circuito equivalente do transformador estrela-aterrada e delta	57

Figura 3-1: Diagrama unifilar do Sistema-10 representado no ANAFAS.....	60
Figura 3-2: Diagrama unifilar do Sistema-57	61
Figura 4-1: Interface do <i>dashboard</i> de representação da tensão e corrente de curto-circuito das barras do Sistema-10	67
Figura 4-2: Simulação de falta monofásica no barramento 15 do Sistema-10	75
Figura 4-3: Simulação de falta monofásica no barramento 49 do Sistema-57	96
Figura 4-4: Simulação de falta monofásica no barramento 53 do Sistema-57	97
Figura 4-5: Simulação de falta bifásica no barramento 26 do Sistema-57	98
Figura 4-6: Simulação de falta bifásica no barramento 26 do Sistema-57 com transformadores alterados.....	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1: Frequência de ocorrências de curtos-circuitos.....	29
Tabela 2-2: Correntes de curto-circuito monofásicas e trifásicas.....	30
Tabela 2-3: Principais causas de curtos-circuitos no SEP	31
Tabela 3-1: Valores de Resistência R1(%) e Reatância X1(%) das linhas de transmissão do Sistema-10.....	62
Tabela 3-2: Valores de Resistência R1(%) e Reatância X1(%) das linhas de transmissão do Sistema-57.....	63
Tabela 3-3: Dados dos transformadores do Sistema-57	65
Tabela 4-1: Erros relativos das tensões e correntes de falta monofásica no Sistema-10	69
Tabela 4-2: Erros relativos das tensões e correntes de falta bifásica no Sistema-10	71
Tabela 4-3: Erros relativos das tensões e correntes de falta bifásica com terra no Sistema-10	73
Tabela 4-4: Erros relativos das tensões e correntes de falta monofásica no Sistema-57	77
Tabela 4-5: Erros relativos das tensões e correntes de falta bifásica no Sistema-57	83
Tabela 4-6: Erros relativos das tensões e correntes de falta bifásica terra no Sistema-57	90

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação (1).....	34
Equação (2).....	39
Equação (3).....	39
Equação (4).....	39
Equação (5).....	40
Equação (6).....	41
Equação (7).....	41
Equação (8).....	43
Equação (9).....	43
Equação (10).....	43
Equação (11).....	44
Equação (12).....	44
Equação (13).....	44
Equação (14).....	44
Equação (15).....	44
Equação (16).....	44
Equação (17).....	44
Equação (18).....	45
Equação (19).....	45
Equação (20).....	45
Equação (21).....	45
Equação (22).....	45
Equação (23).....	45
Equação (24).....	45

Equação (25).....	45
Equação (26).....	45
Equação (27).....	46
Equação (28).....	46
Equação (29).....	46
Equação (30).....	47
Equação (31).....	47
Equação (32).....	47
Equação (33).....	47
Equação (34).....	48
Equação (35).....	48
Equação (36).....	48
Equação (37).....	48
Equação (38).....	48
Equação (39).....	48
Equação (40).....	49
Equação (41).....	49
Equação (42).....	49
Equação (43).....	50
Equação (44).....	50
Equação (45).....	50
Equação (46).....	50
Equação (47).....	51
Equação (48).....	51
Equação (49).....	51
Equação (50).....	51

Equação (51).....	51
Equação (52).....	52
Equação (53).....	52
Equação (54).....	52
Equação (55).....	52
Equação (56).....	52
Equação (57).....	52
Equação (58).....	52
Equação (59).....	52
Equação (60).....	53
Equação (61).....	53
Equação (62).....	53
Equação (63).....	53
Equação (64).....	54
Equação (65).....	54
Equação (66).....	54
Equação (67).....	55
Equação (68).....	56
Equação (69).....	57
Equação (70).....	57

LISTA DE ABREVIATURAS SIGLAS

ANAFAS	Análise de Falhas Simultâneas
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
E_1	Tensão de sequência positiva
e_1	Tensão de sequência positiva, em pu
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
I_{0p}	Corrente de sequência zero do enrolamento primário
I_{0s}	Corrente de sequência zero do enrolamento secundário
i_0	Corrente de sequência zero, em pu
i_1	Corrente de sequência positiva, em pu
i_2	Corrente de sequência negativa, em pu
$i_{1\phi}$	Corrente de curto-circuito monofásico, em pu
$i_{2\phi}$	Corrente de curto-circuito bifásico, em pu
$i_{3\phi}$	Corrente de curto-circuito trifásico, em pu
i_a	Corrente da fase A, em pu
i_b	Corrente da fase B, em pu
i_c	Corrente da fase C, em pu
LT	Linha de Transmissão
MME	Ministério de Minas e Energia
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SIN	Sistema Interligado Nacional
v_0	Tensão de sequência zero, em pu
v_1	Tensão de sequência positiva, em pu
v_2	Tensão de sequência negativa, em pu

v_a	Tensão da fase A, em pu
v_b	Tensão da fase B, em pu
v_c	Tensão da fase C, em pu
X_0	Fasor genérico X de sequência zero
X_1	Fasor genérico X de sequência positiva
X_2	Fasor genérico X de sequência negativa
Z_0	Impedância equivalente de sequência zero
Z_1	Impedância equivalente de sequência positiva
Z_2	Impedância equivalente de sequência negativa
z_0	Impedância equivalente de sequência zero, em pu
z_1	Impedância equivalente de sequência positiva, em pu
z_2	Impedância equivalente de sequência negativa, em pu
z_g	Impedância de falta ligada à terra, em pu
z_f	Impedância de falta, em pu

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Objetivos do trabalho.....	23
1.1.1	Objetivo geral	23
1.1.2	Objetivo específico	24
1.2	Metodologia.....	24
1.3	Motivação	26
1.4	Resultados Esperados	26
1.5	Trabalhos Correlatados	27
1.6	Estrutura do Trabalho.....	28
2	REFERENCIAL TEÓRICO	29
2.1	Curtos-Circuitos no Sistema Elétrico de Potência	29
2.1.1	Causas dos curtos-circuitos na rede elétrica.....	31
2.1.2	As consequências dos curtos-circuitos.....	32
2.1.3	Curto-Circuito Permanente e Temporário.....	33
2.1.4	Condições anormais de operação	33
2.1.5	Razões para simular curtos-circuitos.....	34
2.1.6	Cargas em curtos-circuitos.....	34
2.2	Análise de curto-circuito equilibrado.....	35
2.2.1	Modelagem da Rede	36
2.2.2	Cálculo matricial das correntes de curto-circuito: Matriz Zbarra	38
2.2.3	Curto-circuito trifásico.....	40
2.3	Análise de curtos-circuitos desequilibrados.....	41
2.3.1	Transformação das Componentes Simétricas (TCS)	42
2.3.2	Curto-circuito monofásico.....	46

2.3.3	Curto-circuito bifásico sem terra.....	48
2.3.4	Curto-circuito bifásico com terra.....	51
2.4	Impedância de Sequência Zero do Transformador	54
2.4.1	Impedância de Sequência Zero do Transformador Estrela-Aterrada em ambas conexões	55
2.4.2	Impedância de Sequência Zero do Transformador Estrela-Aterrada e Delta.....	56
3	MODELAGEM COMPUTACIONAL	58
3.1	O software ANAFAS.....	58
3.2	Principais ferramentas utilizadas no ANAFAS.....	58
3.3	Modelagem do Sistema-10 e Sistema-57.....	59
3.4	Dados do Sistema-10.....	61
3.5	Dados do Sistema-57.....	62
4	ANÁLISE DOS CURTOS-CIRCUITOS NOS SISTEMAS	67
4.1	Estudos de casos de curto-circuito no Sistema-10.....	67
4.1.1	Tensões e correntes de curto-circuito do Sistema-10	67
4.1.2	Resultados das análises das tensões e correntes de curto-circuito do Sistema-10.....	68
4.1.3	Realização de três pontos de falta no Sistema-10	74
4.1.4	Resultados das análises dos três pontos de falta no Sistema-10	76
4.2	Estudos de casos de curto-circuito no Sistema-57.....	76
4.2.1	Tensões e correntes de curto-circuito do Sistema-57	76
4.2.2	Resultados das análises das tensões e correntes de curto-circuito do Sistema-57.....	77
4.2.3	Realização de três pontos de falta no Sistema-57	96
4.2.1	Resultados das análises dos três pontos de falta no Sistema-57	96
5	CONCLUSÃO	99

5.1	Trabalhos Futuros	100
	BIBLIOGRAFIA	101
	Anexo A	103
	Anexo B	109

1 INTRODUÇÃO

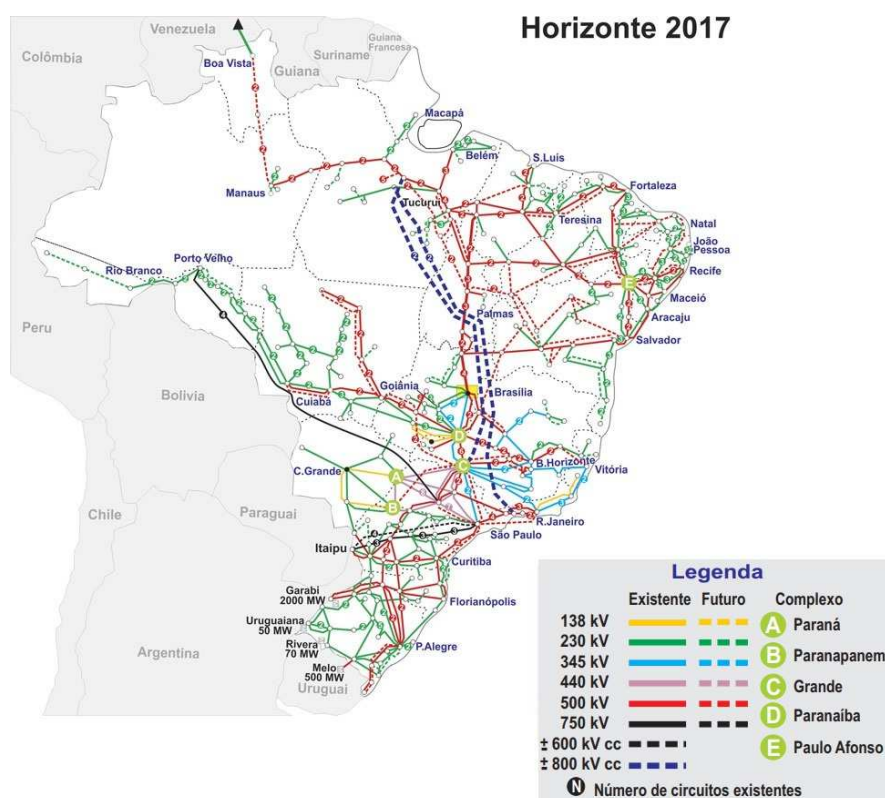
A chave para o progresso industrial, básico para a melhoria contínua no padrão de vida da população no geral, é o desenvolvimento de fontes de energia. Um dos desafios enfrentados atualmente é descobrir novas fontes de energia, converter a energia de uma forma para outra e usá-la sem criar poluição. O sistema elétrico de potência é um dos meios que convertem e transportam energia (STEVENSON, 1986).

Um sistema de potência consiste em três divisões principais: geração, transmissão e distribuição. A transmissão é o elo de ligação entre a geração e a distribuição e conduz a energia a outros sistemas de potência através de interconexões. O sistema de distribuição liga todas as cargas individuais às linhas de transmissão nas subestações que realizam transformações de tensão e funções de chaveamento (STEVENSON, 1986).

Há cerca de 80 anos, a energia gerada em uma usina era transmitida e distribuída diretamente para o centro consumidor pois o sistema operava isoladamente. Entretanto, com o aumento da demanda de energia elétrica ao longo dos anos, foi necessário conectar os sistemas isolados formando uma única rede elétrica, o Sistema Interligado, que fornece uma maior confiabilidade no fornecimento de energia (SATO e FREITAS, 2015).

No Brasil, o sistema interligado iniciou-se no final da década de 1950 e é chamado de Sistema Interligado Nacional (SIN). Apesar de apresentar maior complexidade de planejamento e operação e propagar perturbações para outras partes da rede, ele proporciona muitas vantagens, tais como: grande número de unidades geradoras, menor necessidade de capacidade de reserva para emergências e permuta de energia entre regiões com diferentes sazonalidades (SATO e FREITAS, 2015). A Figura 1-1 apresenta o atual mapa eletrogeográfico do SIN, considerando o horizonte 2017:

Figura 1-1: Mapa do Sistema Interligado Nacional



Fonte: (ONS, 2017)

Até meados da década de 80, haviam dois grandes sistemas interligados no Brasil: um na região Sul/Sudeste/Centro-Oeste e outro na Região Norte/Nordeste. Hoje em dia, as duas macrorregiões estão interligadas por linhas de transmissão operando em 500 kV, representadas pelas linhas em vermelho na Figura 1-1, que transportam juntas milhares de MW. São conhecidas como “linhões” pelas comunidades mais ao interior do Brasil. Segundo o MME, em julho de 2017 haviam 136.027 km de Linhas de Transmissão instaladas no Sistema Elétrico Brasileiro.

Como exemplo de grandes linhas de conexão de regiões pode-se citar a interligação Norte-Sul com linhas de transmissão que partem de uma subestação em Imperatriz, no Maranhão, atravessam o estado de Tocantins e chegam a Brasília. Durante o período de cheias na região Norte/Nordeste, é produzida nas usinas o máximo de energia (especialmente na usina de Tucuruí, no Pará) e exportada para a região Sudeste, onde ficam os grandes reservatórios do país acumulando água. Durante o período de seca, o fluxo se inverte (SATO e FREITAS, 2015).

Os sistemas interligados devem ser projetados e operados para fornecer energia com o máximo de qualidade e no menor custo possível, atendendo ao critério de Modicidade Tarifária (ANEEL, 2017).

A continuidade de energia fornecida pelo sistema pode ser proporcionada através de melhorias no projeto, previsão de uma margem de capacidade de reserva e planejamento de circuitos alternativos para o suprimento. O sistema é subdividido em zonas para prover flexibilidade operativa e garantir a minimização das interrupções (SATO e FREITAS, 2015).

O planejamento da operação, o aperfeiçoamento e a expansão de um sistema de potência exigem estudos de previsão de carga, fluxo de potências, cálculo de níveis de curto-circuito, projeto de proteção contra descargas atmosféricas e surtos de chaveamento e contra curtos-circuitos e estudos de estabilidade do sistema. Para a operação eficiente de um sistema, é importante determinar como a potência total gerada em função da demanda em cada instante deve ser distribuída entre as várias unidades de cada usina (STEVENSON, 1986).

Um sistema elétrico exige grandes investimentos de longa duração e, tanto sua operação quanto sua manutenção requerem um elevado investimento e, por essa razão, é necessário operá-lo dentro dos limites máximos admissíveis para maximizar o retorno dos gastos (SATO e FREITAS, 2015).

O curto-circuito (ou falta) nos componentes do sistema elétrico é uma das ocorrências de maior impacto no fornecimento de energia elétrica pois impõe mudanças bruscas e violentas na sua operação normal. O curto-circuito no sistema elétrico consiste em um fluxo de elevada potência envolvendo uma liberação localizada de considerável quantidade de energia, podendo ocasionar danos físicos de grandes proporções nas instalações elétricas e equipamentos (em especial nos enrolamentos dos geradores e transformadores) (SATO e FREITAS, 2015).

Ainda se referindo a ocorrência de curto-circuito, um outro perigo consiste em colocar em risco a vida dos trabalhadores que estejam nas proximidades de tais equipamentos durante a ocorrência de curtos-circuitos. Em sistemas interligados, o risco de ocorrência é elevado, aumentando também a repercussão em uma área considerável do sistema podendo ocasionar apagões e, como acima citado, danos físicos em equipamentos com conseqüente impacto na receita das empresas.

A maioria das faltas em linhas de transmissão em Alta Tensão é causada por descargas atmosféricas, que resultam no centelhamento dos isoladores, ou *backflashover* da literatura americana. Faltas entre duas fases não envolvendo a terra são menos comuns. Quando ocorrida no sistema elétrico, a forma mais usual e comum de extinguir correntes de curto-circuito é pela atuação dos disjuntores. A abertura de disjuntores, para isolar a porção da linha em falta do resto do sistema, interrompe a circulação de corrente no caminho ionizado para a desionização. Após cerca de 20 ciclos para desionização e restabelecimento físico das câmaras de extinção de arco, os disjuntores geralmente podem ser religados sem que se estabeleça o arco novamente, condição conhecida como reacendimento. As faltas permanentes são causadas por linhas caídas ao solo, por ruptura de uma cadeia de isoladores, por danos permanentes em torres e por falhas de para-raios ou por ação de vândalos (STEVENSON, 1986).

Cerca de 80% das faltas em LT são entre uma fase e terra, que ocorrem devido ao centelhamento de apenas uma fase da linha para a torre e daí para a terra. As faltas que envolvem as três fases, chamadas de falta trifásica, ocorrem em cerca de 5% dos casos. Outros tipos de faltas são: entre duas fases (não envolvem a terra) e faltas entre duas fases e terra. Todas as faltas descritas acima, exceto a falta trifásica, são assimétricas, ou seja, causam um desequilíbrio entre as fases (STEVENSON, 1986).

Dada a severidade dos impactos impostos pela circulação de correntes de curto-circuito nos sistemas elétricos, e sabendo que existem fenômenos tanto elétricos quanto mecânicos associados ao fluxo de correntes, torna-se tarefa clara entender o comportamento das variáveis envolvidas e elementos que compõem o sistema elétrico quando da circulação de correntes de curto-circuito.

A determinação de correntes de curto-circuito é realizada tanto por meio de cálculos manuais, quando se trata de análise de pequenas instalações, ou por meio do uso de programas computacionais especializados para tal fim.

A utilização de tais programas se justifica quando se tem interesse em determinar as correntes de curtos-circuitos em sistemas elétricos muito grandes, o que seria impraticável de ser realizado de forma manual.

Neste sentido, o presente trabalho se propõe a apresentar uma metodologia de estudo de correntes de curto-circuito em um sistema elétrico padrão utilizando para isso o programa ANAFAS – Análise de Falhas Simultâneas, desenvolvido pelo Centro de Pesquisas em Energia Elétrica – CEPEL, uma empresa do grupo Eletrobrás.

O Sistema teste principal a ser analisado, ao qual daqui em diante será chamado de Sistema-57, possui as seguintes características: 57 barras, 63 linhas de transmissão, 16 transformadores e 7 geradores.

Não há necessidade em ter cargas no sistema porque, conforme será mostrado no referencial teórico, as correntes provenientes das cargas são desprezadas durante os estudos de curto-circuito.

O Sistema-57, sistema sugerido pelo co-orientador desta monografia Nilo Sérgio, foi escolhido por se tratar de um sistema de tamanho e proporções adequadas ao trabalho proposto. Será realizada a análise do nível de curto-circuito em todas as 57 barras presentes para todas as 4 tipos de falta, quais sejam: monofásica, bifásica, bifásica-terra e trifásica.

No item 1.2 será descrito com mais detalhes os estudos realizados e as maneiras de realizar as análises dos resultados.

1.1 Objetivos do trabalho

Neste tópico serão apresentados o objetivo principal do trabalho e os respectivos objetivos específicos.

1.1.1 Objetivo geral

Demonstrar a metodologia e as análises realizadas após simulações de faltas simultâneas em um Sistema Elétrico de Potência de 57 barras, enfatizando o comportamento das principais variáveis de curto-circuito ao longo do sistema.

1.1.2 *Objetivo específico*

- **Apresentar a modelagem computacional dos sistemas testes de 10 e 57 barras no software ANAFAS** incluindo seus elementos de rede elétrica para estudos de curto-circuito.
- **Realizar estudos de níveis de curto-circuito** das barras no diagrama unifilar do sistema proposto, organizando as informações relevantes em planilhas no Microsoft Excel.
- **Apontar o comportamento da tensão e corrente de curto-circuito** dos sistemas através de uma planilha “inteligente”, também chamada de *dashboard*, elaborada no Microsoft Excel com os estudos macros realizados no ANAFAS.
- **Tornar-se um referencial de estudos de curtos-circuitos** para futuros estudantes e profissionais que desejem realizar simulações no ANAFAS e tenham curiosidade em conhecer o comportamento da tensão e corrente ao longo de um curto-circuito no SEP.

1.2 **Metodologia**

O procedimento utilizado neste trabalho é do tipo qualitativo, ou seja, busca apresentar os resultados através de percepções e análises das faltas simultâneas originadas a partir de diferentes tipos de curto-circuito no Sistema-57. Também serão utilizadas análises empíricas das grandezas elétricas durante os estudos individuais dos dois sistemas.

Considerando o que foi descrito, as técnicas empregadas visam atingir os objetivos específicos e para tal, o projeto é dividido nas seguintes partes:

1ª Etapa: Na revisão bibliográfica estuda-se uma introdução de SEP, onde é falado a respeito das configurações do sistema elétrico e assuntos referentes aos curtos-circuitos, tais como: definição, causas, consequências, classificação de faltas, condições anormais de operação, razões para realizar simulações de faltas simultâneas e descrição do comportamento matemático das principais variáveis envolvidas, tensão e corrente elétrica, com o objetivo de viabilizar a manipulação da interface gráfica proporcionada pelo ANAFAS através da explicação matemática das ocorrências de faltas nos sistemas.

2ª Etapa: Realizar estudos em um sistema de menor proporção, o sistema de 10 barras denominado de Sistema-10, para comprovar a similaridade entre os dois sistemas, através do que é descrito pelas equações ao longo da revisão bibliográfica e dos relatórios de estudos de curto-circuito emitidos pelo ANAFAS.

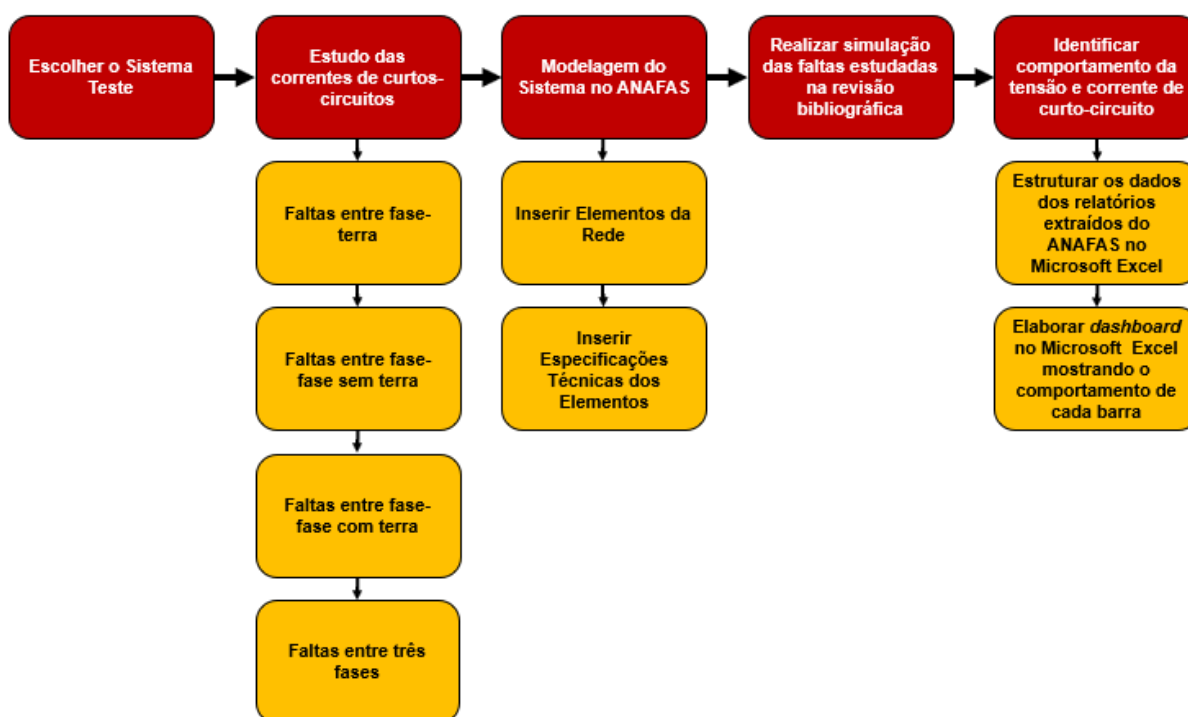
3ª Etapa: Realizar a modelagem computacional de um sistema de 10 e 57 barras no software ANAFAS para possibilitar a análise dos impactos na rede. Na modelagem os seguintes elementos da rede estão presentes: Geradores, Transformadores e Linhas de Transmissão, e suas especificações técnicas de acordo com a orientação do professor co-orientador.

4ª Etapa: Realizar o estudos individuais e macro dos níveis de curtos-circuitos.

5ª Etapa: Extrair os resultados das simulações, estruturá-los em uma planilha no Microsoft Excel e analisar comportamento das tensões e correntes de curto-circuito ao longo dos dois sistemas.

A Figura 1-2 mostra o fluxograma de realização do trabalho resumindo suas etapas.

Figura 1-2: Fluxograma do trabalho



Como representado na Figura 1-2, primeiramente é necessário escolher o sistema teste ao qual serão realizadas as análises, etapa realizada com sucesso nos primeiros dias de realização deste trabalho. Depois, é feito o estudo das correntes de curtos-circuitos, através da revisão bibliográfica, onde é citado os tipos de curto-circuito e seu comportamento matemático. Após a realização do estudo dos conteúdos propostos, é inserido e configurado os elementos do Sistema-10 e Sistema-57 no ANAFAS e feito simulações referentes a estudos níveis de curtos-circuitos, dentre eles a análise da magnitude da corrente de falta em todas as barras e, com base no resultado dos relatórios destas simulações, é falado a respeito do comportamento das principais variáveis envolvidas no SEP: tensão e corrente. Um outro estudo realizado é a análise do comportamento de tensão e corrente ao ocorrer uma falta em uma barra do SEP pelo diagrama unifilar.

1.3 Motivação

Com o avanço da tecnologia no decorrer das últimas décadas, a energia elétrica tornou-se um item tão essencial quanto a água para a vida do ser humano, está presente em quase todos os pontos do planeta e é um dos pilares responsáveis pelo desenvolvimento dos países influenciando diretamente a vida de pessoas de todo o mundo. Por essa razão, estudos referentes a Sistemas Elétricos de Potência se fazem necessários para que sempre haja novidades e descobertas neste segmento com o objetivo de garantir sempre uma energia contínua e de qualidade, caso contrário, qualquer impacto presente na rede de energia irá refletir na vida de milhares pessoas.

1.4 Resultados Esperados

Anseia-se por entregar análises do comportamento das variáveis de corrente e tensão ao longo de curtos-circuitos no Sistema-10 e Sistema-57 de acordo com as simulações realizadas no ANAFAS juntamente com um *dashboard* feito no Microsoft Excel para ajudar na visualização destas análises.

1.5 Trabalhos Correlatados

Existem diversas publicações acadêmicas ao qual realizaram análises no Sistema Elétrico de Potência ou utilizaram o software ANAFAS para realizar análises de curtos-circuitos. Quais sejam:

Em 2018, Welington Marcelino de Oliveira apresentou um trabalho de conclusão de curso ao qual apresenta análise das compensações série e paralela em Sistemas Elétricos de Potência com fontes simétricas e cargas equilibradas, através do software ATPDraw. O autor concluiu que a instalação de bancos de capacitores retira a necessidade da construção de novas linhas de transmissão paralelas e auxilia no controle sistêmico, mas como possuem componentes caros, deve-se ter uma maior preocupação em regimes transitórios e em faltas externas e internas a sua linha (OLIVEIRA, 2018).

Em 2015, Wilson Eduardo Dreissig Hirt apresentou o projeto de diplomação onde apresenta um estudo de influência, no nível de afundamentos de tensão causados por curtos-circuitos, da expansão da geração elétrica no estado do Rio Grande do Sul. Utilizando como metodologia a simulação de faltas via ANAFAS, observou-se uma melhora do desempenho do sistema elétrico do Rio Grande do Sul frente à expansão da geração, principalmente com a integração dos novos parques eólicos (HIRT, 2015).

Também em 2015, Tahigo Alves dos Santos apresentou uma monografia cujo objetivo foi mostrar as fundamentações teóricas dos estudos sobre faltas nos Sistemas Elétricos de Potência, bem como análise das contribuições da rede elétrica no distúrbio, visando dimensionar uma proteção diferencial e de sobrecorrente. O autor baseou-se na unidade geradora 3 da usina hidrelétrica de Coaracy-Nunes, localizada no estado do Amapá. Os resultados demonstraram que a contribuição do sistema Amapá sob o ponto de falta influencia diretamente nos ajustes de proteção (SANTOS, 2015).

1.6 Estrutura do Trabalho

O desenvolvimento do trabalho é dividido em capítulos, aos quais serão descritos a seguir: O capítulo 1 é composto pela introdução aos assuntos tratados, objetivos gerais e específicos do trabalho, metodologia utilizada para realizar o projeto, motivação, resultados esperados e trabalhos correlatados. O capítulo 2 é o referencial teórico usado para a execução do trabalho. O capítulo 3 é a descrição do programa ANAFAS e representação da modelagem computacional da rede elétrica para estudos de curto-circuito. O capítulo 4 é a análise computacional e resultados das faltas simultâneas. E, por fim, o capítulo 5 relata as conclusões.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A seguir, serão apresentadas todas as referências teóricas que serviram de base para as análises do Sistema-10 e Sistema-57.

2.1 Curtos-Circuitos no Sistema Elétrico de Potência

As perturbações mais comuns e severas no SEP são provenientes de curto-circuito, a qual acontecem devido a ruptura de isolamento entre fases (curto-circuito bifásico ou trifásico) ou entre fase e terra (curto-circuito monofásico). A amplitude da corrente de curto circuito depende de vários fatores: tipo de curto-circuito, capacidade de geração do sistema, topologia da rede elétrica, tipo de aterramento do neutro dos equipamentos e entre outros.

A Tabela 2-1 mostra os tipos de corrente de curto-circuito e a frequência com que ocorrem.

Tabela 2-1: Frequência de ocorrências de curtos-circuitos

Curto-Circuito	Frequência (%)
Trifásico	06
Bifásico	15
Bifásico-Terra	16
Monofásico	63

Fonte: (KINDERMANN, 1997)

A Tabela 2-1 mostra que o curto-circuito trifásico é o menos frequente e que o curto-circuito monofásico é o mais frequente devido a própria natureza física do sistema.

A Tabela 2-2 abaixo mostra as correntes de curtos-circuitos monofásicos e trifásicos em barras de algumas subestações brasileiras nos anos de 2008 a 2010:

Tabela 2-2: Correntes de curto-circuito monofásicas e trifásicas

Subestação	kV	Empresa	Monofásico (kA)			Trifásico (kA)		
			2008	2009	2010	2008	2009	2010
Joiram	69	CHESF	4,7	4,7	4,7	14,4	14,7	20,4
Conselheiro Pena	138	CEMIG	12,8	12,8	12,9	9,9	9,9	9,9
Volta Redonda	138	LIGHT	15,6	15,6	15,7	24,5	24,5	24,6
Guarulhos	345	FURNAS	8,9	9,8	9,9	13,1	15,8	15,8

Fonte: (SATO e FREITAS, 2015)

A Tabela 2-2 mostra que as correntes de curto-circuito sofreram um aumento significativo ao longo dos anos, ou seja, a rede sofreu expansão e, conseqüentemente, inserção de novos elementos resultando em um maior fluxo de potência.

Os estudos de curto-circuito do SIN são de responsabilidade da ONS. Todos os passos desta tarefa são apresentados em submódulos no Módulo 11, chamado de Proteção e Controle. Tais documentos de caráter normativo definem os procedimentos e requisitos necessários na realização das atividades de planejamento da operação eletroenergética, administração da transmissão, programação e operação em tempo real do âmbito do SIN (ONS, 2016).

O componente que mais sofre desligamento forçado é a linha de transmissão, apresentado uma frequência de 64,7% em relação aos outros componentes do sistema. Tal percentual expressivo é justificado devido ao grande comprimento da linha, que percorre vários trajetos hostis e é submetida a ações de fenômenos naturais (descargas atmosféricas, temporais, ventos), condições ambientais adversas (queimadas, poluições) e ações humanas inapropriadas. As ações por fenômenos naturais e condições ambientais adversas representam 45% dos desligamentos forçados causados por curto-circuito nas linhas de transmissão. O

percentual aumenta para 80% quando trata-se das linhas de subtransmissão (69 kV e 34,5 kV) (CPFL, 1996).

2.1.1 Causas dos curtos-circuitos na rede elétrica

O SEP está constantemente exposto as condições mais diversas e imprevisíveis e a falha aparecerá em pontos aleatórios do sistema. As principais falhas e causas são descritas na Tabela 2-3.

Tabela 2-3: Principais causas de curtos-circuitos no SEP

Natureza do Problema	Definição do Problema	Motivos
Isolação	As tensões nos condutores do sistema são elevadas, sendo assim, rupturas a terra ou entre cabos poderão ocorrer.	<ul style="list-style-type: none"> • Desenho inadequado da isolação dos equipamentos, estrutura ou isoladores; • Material inadequado ou de má qualidade; • Problemas de fabricação; • Envelhecimento do material.
Mecânica	Oriundos da natureza e que provocam ação mecânica no SEP.	<ul style="list-style-type: none"> • Vento; • Neve; • Contaminação; • Árvores, etc.
Elétrica	Problemas elétricos intrínsecos da natureza ou devido a operação do sistema.	<ul style="list-style-type: none"> • Descargas atmosféricas (diretas ou indiretas); • Surtos de chaveamento (manobra); • Sobretensão do sistema.
Térmica	Aquecimento de cabos e equipamentos diminuindo vida útil e prejudicando a isolação	<ul style="list-style-type: none"> • Sobrecorrentes em consequência da sobrecarga no sistema;

		<ul style="list-style-type: none"> • Sobretensão dinâmica no sistema.
Manutenção	Oriundo de falha humana ao realizar manutenção no SEP.	<ul style="list-style-type: none"> • Substituição inadequada de peças e equipamentos; • Pessoal não treinado e qualificado; • Peças de reposição inadequadas; • Inspeção na rede não adequada.
Outra Natureza	Problemas ao qual não se classificam nas descrições anteriores.	<ul style="list-style-type: none"> • Vandalismo; • Acidentes de qualquer natureza (queimadas, inundações, desmoronamentos, etc).

Fonte: Adaptado de (KINDERMANN, 1997)

2.1.2 As consequências dos curtos-circuitos

As correntes de curto-circuito que fluem através de vários equipamentos do SEP geram efeitos térmicos nos condutores e equipamentos devido ao aquecimento e dissipação de potência, conforme descreve a Lei de Joule. No entanto, como a duração dos curtos-circuitos é curta, a perda de calor dos condutores durante o curto-circuito é geralmente muito baixa (TLEIS, 2008).

Entretanto, a queda de tensão que ocorre no instante do curto-circuito provoca graves transtornos aos consumidores considerando que algumas cargas são sensíveis às quedas de tensão, como por exemplo: sistemas de iluminação, computacional e de controle (SATO e FREITAS, 2015).

2.1.3 Curto-Circuito Permanente e Temporário

Os curtos-circuitos podem ser do tipo permanentes ou temporários (fortuito).

Os curtos-circuitos permanentes são do tipo irreversíveis espontaneamente, necessitando de conserto na rede para restabelecer o sistema. Após a abertura do disjuntor, a equipe de manutenção deverá deslocar-se até o local do defeito e, somente após o conserto, o sistema será restabelecido (KINDERMANN, 1997).

Os curtos-circuitos temporários são aqueles que ocorrem sem haver defeito na rede, após a atuação da proteção o sistema pode ser restabelecido sem problemas. São oriundos de várias causas, tais como: contaminação do isolador pela poeira e poluição, umidade, galhos de árvores, pássaros e entre outros (KINDERMANN, 1997).

2.1.4 Condições anormais de operação

É descrito, logo abaixo, as condições anormais de operação no SEP e suas características (SATO e FREITAS, 2015):

a. Sobrecarga em equipamentos: causada pela passagem de um fluxo de corrente acima do valor de corrente nominal do equipamento. Consequentemente, a sobrecarga frequente acelera a deterioração da isolação dos equipamentos.

b. Subfrequência e Sobrefrequência: causadas pelo súbito desequilíbrio entre geração e carga.

c. Sobretensão: causada pela súbita retirada da carga no sistema. Neste caso, as tensões nos terminais dos geradores atingem valores elevados que podem comprometer as isolações dos enrolamentos. Em sistemas de extra-alta tensão, podem surgir através do efeito capacitivo das linhas de transmissão.

2.1.5 Razões para simular curtos-circuitos

A simulação de curtos-circuitos é imprescindível tanto no planejamento como na operação de sistemas de potência.

O conhecimento prévio dos valores de curtos-circuitos em uma rede elétrica é necessário para estudos e análises de alguns problemas, quais sejam (SATO e FREITAS, 2015):

- determinação da capacidade de interrupção dos equipamentos de chaveamento;
- determinação das capacidades térmica e dinâmica dos equipamentos;
- cálculos de ajustes dos relés de proteção;
- seleção de reatores limitadores de corrente;
- cálculo do esforço mecânico nos elementos estruturais das instalações elétricas;
- cálculos da malha de aterramento.

2.1.6 Cargas em curtos-circuitos

Um SEP real está sempre operando com carga. Em um mesmo ponto do sistema elétrico, fazendo-se a superposição das correntes de carga com a corrente de curto-circuito do sistema sem carga, obtém-se a corrente verdadeira de curto-circuito do sistema elétrico com carga. A expressão (1) elucida bem a superposição.

$$\begin{aligned} I_{\text{verdadeira do sistema com carga sob defeito}} \\ = I_{\text{carga sem defeito}} + I_{\text{defeito sem carga}} \end{aligned} \quad (1)$$

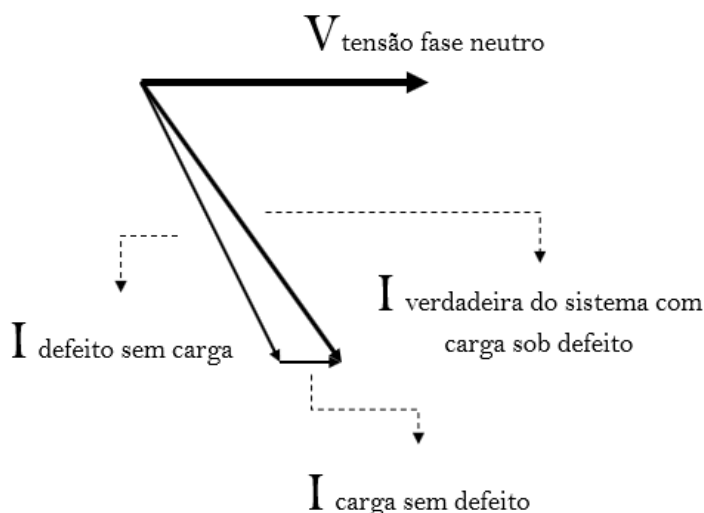
As correntes de carga são limitadas pela impedância das cargas, sendo assim, seus valores são pequenos. Conseqüentemente, a defasagem de tensão de fase-neutro e a corrente da carga é muito pequena.

Por outro lado, as correntes de curto-circuito são limitadas pelos parâmetros do sistema, que têm valores pequenos e indutivos. Conseqüentemente,

as correntes de curto-circuito são grandes e com defasagem também elevada em relação à tensão fase-neutro.

O diagrama fasorial da superposição está na Figura 2-1.

Figura 2-1: Diagrama superposição das correntes do SEP com e sem carga



Fonte: (KINDERMANN, 1997)

Não há muita diferença nos módulos da corrente verdadeira e da corrente de curto-circuito do sistema sem carga. A contribuição da corrente de carga é muito pequena e por essa razão ela é comumente desprezada nos cálculos de curto-circuito.

2.2 Análise de curto-circuito equilibrado

Um sistema trifásico equilibrado consiste em tensões e correntes em completa simetria, ou seja, as tensões e correntes são compostas por três fasores de módulos iguais defasados entre si de 120° elétricos. Isso permite que toda a análise do sistema trifásico equilibrado seja feita baseada apenas em uma fase. O conhecimento da corrente e tensão de uma fase possibilita saber as variáveis correspondentes nas outras duas fases (SATO e FREITAS, 2015).

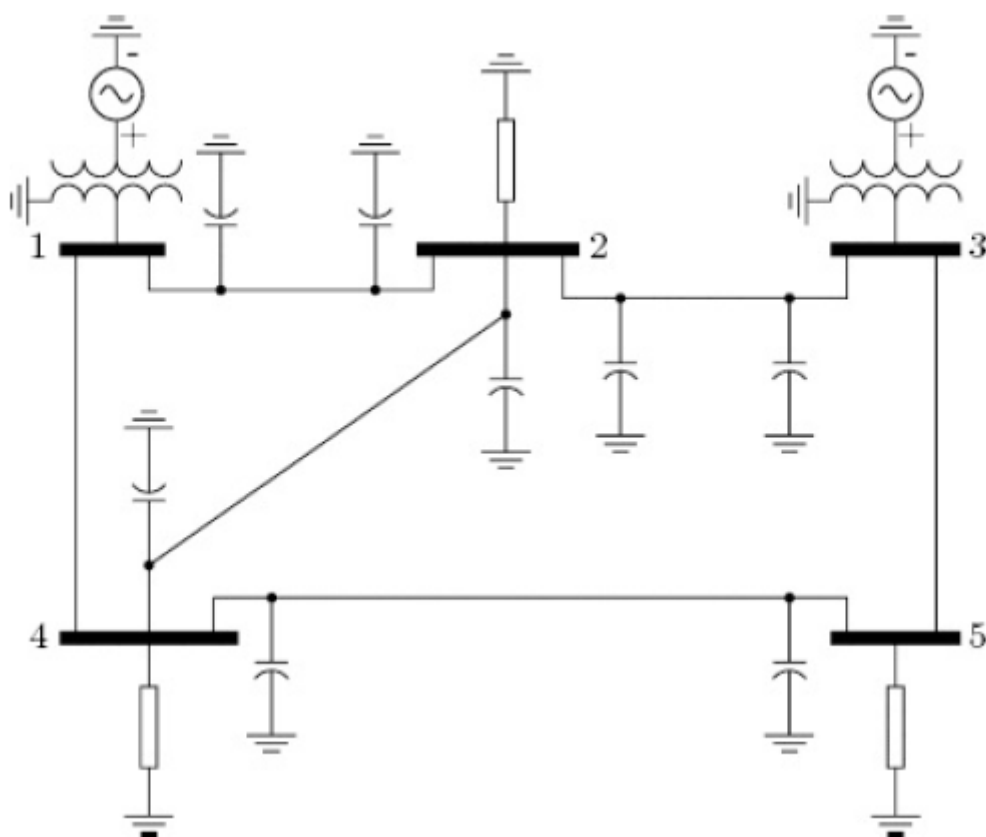
As análises realizadas a partir deste tópico terão os parâmetros elétricos sendo considerados em valores por unidade (pu) quando representados por letras minúsculas. Na simulação de correntes de curtos-circuitos são adotadas algumas simplificações com a finalidade de facilitar os cálculos (SATO, 1976). São elas:

1. Considerar todas as máquinas síncronas do sistema operando com a tensão $1\angle 0^\circ$ pu;
2. Os parâmetros shunt das linhas são ignorados;
3. As cargas são ignoradas;
4. Considerar todos os transformadores do sistema operando no *tape* (derivação) nominal;
5. Considerar rede de sequência negativa idêntica a rede de sequência positiva.

2.2.1 Modelagem da Rede

Um sistema-exemplo de 5 barras é representado na Figura 2-2

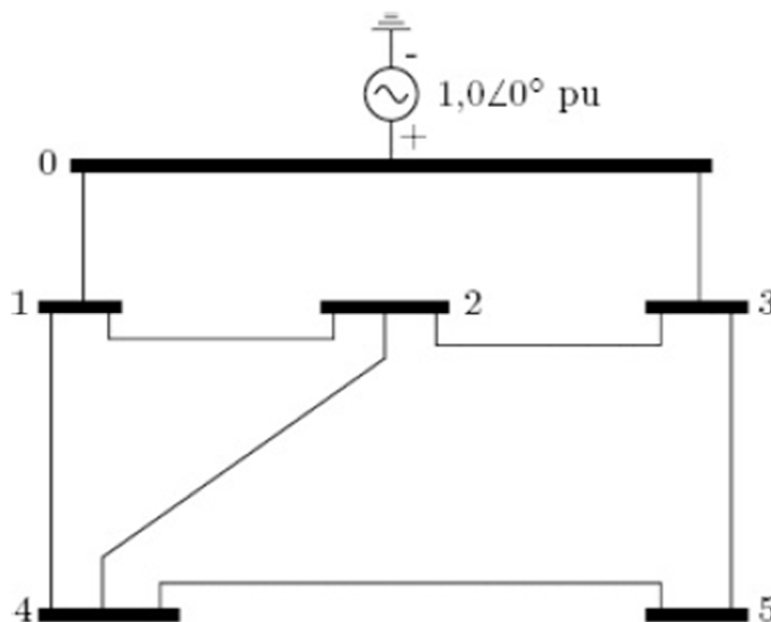
Figura 2-2: Representação de um sistema-exemplo de 5 barras



Fonte: (SATO e FREITAS, 2015)

Quando são consideradas as hipóteses simplificadoras de 1 a 4, o sistema elétrico está operando em vazio. O sistema simplificado é mostrado na Figura 2-3 (SATO, 1976).

Figura 2-3: Representação de um sistema-exemplo de 5 barras considerando hipóteses simplificadoras 1, 2, 3 e 4

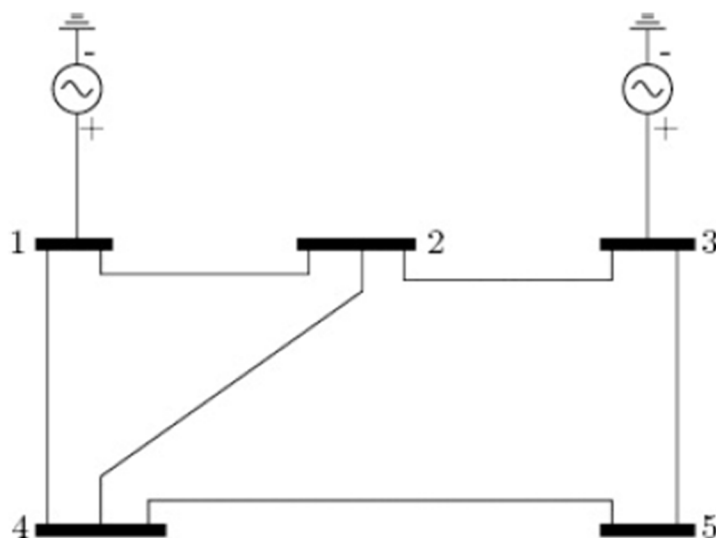


Fonte: (SATO e FREITAS, 2015)

O uso de $1,0 \text{ pu}$ de tensão atrás da reatância interna da máquina é explicada pelo teorema de *Helmholtz-Thévenin*, onde é dito que a tensão de circuito aberto antes da falta no ponto da falta é de aproximadamente $1,0 \text{ pu}$ e, portanto, pode ser tomada como esse valor (BROWN, 1977).

Quando apenas as hipóteses simplificadoras de 2 a 4 são levadas em conta, tem-se a simplificação representada na Figura 2-4 (SATO, 1976).

Figura 2-4: Representação de um sistema-exemplo de 5 barras considerando hipóteses simplificadoras 2, 3 e 4



Fonte: (SATO e FREITAS, 2015)

2.2.2 Cálculo matricial das correntes de curto-circuito: Matriz Z_{barra}

Considera-se o circuito elétrico em condições de curto-circuito como um sistema alimentado por várias fontes com uma única carga ligada ao sistema no nó sujeito a falta. Ao longo dos anos, surgiram vários métodos de cálculo de curto-circuito, alguns podendo ser realizados com simples operações aritméticas desde que as tensões das barras tenham sido determinadas para uma condição de falta particular. O método de estudos de curto-circuito pelo procedimento iterativo de *Gauss-Siedel* é pouco conveniente, tendo em vista que uma análise completa de um sistema com mil barras pode exigir aproximadamente vinte e três mil condições de falta, cada uma necessitando ser resolvida por um procedimento iterativo completamente diferente. Por essa razão, a análise de sistemas elétricos muito grandes é realizada de maneira mais eficiente usando a matriz de impedância chamada de matriz Z_{barra} (BROWN, 1977).

A matriz Z_{barra} possui as impedâncias de todas as barras do sistema, ou seja, as impedâncias de cada barra com relação a uma barra de referência (escolhida aleatoriamente) e a impedância de transferência entre cada barra com relação a barra de referência. A impedância de transferência é determinada calculando a tensão em

cada uma das outras barras do sistema, com relação a referência, quando uma barra em particular recebe uma injeção de corrente de uma unidade (BROWN, 1977).

A equação matricial que relaciona a matriz Z_{barra} , as correntes injetadas nas barras e às tensões das barras é: $[Z][I] = [e]$. (BROWN, 1977)

Logo foi percebido que, se a matriz Z_{barra} usasse como barra de referência a barra comum atrás das reatâncias transitórias do gerador, a análise completa do circuito poderia ser facilmente realizada com pouca computação adicional. Como já dito nas hipóteses simplificadoras, um circuito em condições de falta pode ser considerado tendo somente uma corrente nodal. Sendo assim, a equação matricial pode ser escrita como (BROWN, 1977):

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & \dots & Z_{1k} & \dots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & \dots & Z_{2k} & \dots & Z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{k1} & Z_{k2} & Z_{k3} & \dots & Z_{kk} & \dots & Z_{kn} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & Z_{n3} & Z_{21} & Z_{nk} & \dots & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ I_k \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_3 \\ \vdots \\ e_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

Onde o circuito possui apenas uma única corrente I_k aplicada na barra k, barra a qual está sujeita a condição de curto-circuito, o elemento Z_{kk} é a impedância equivalente de Thevenin vista da barra k e os elementos fora da diagonal Z_{ik} são impedâncias de transferência entre as outras barras e a barra k (BROWN, 1977).

Dessa forma, a corrente de falta trifásica total é dada como:

$$I_k = \frac{1}{Z_{kk}} \quad (3)$$

A tensão com relação a referência na barra p para um curto-circuito na barra k é dada como:

$$E_p = Z_{pk} \frac{1}{Z_{kk}} \quad (4)$$

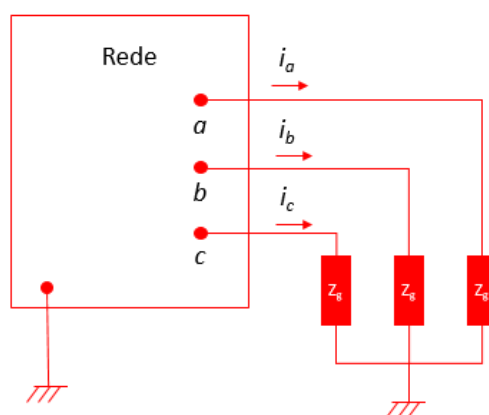
A corrente que vai da barra "p" para a barra "q" pela linha p-q, cuja impedância é $Z_{linha p-q}$, é:

$$I_{p-q} = \frac{Z_{qk} - Z_{pk}}{Z_{linhap-q}} \frac{1}{Z_{kk}} \quad (5)$$

2.2.3 Curto-circuito trifásico

A Figura 2-5 abaixo representa um curto-circuito trifásico no SEP.

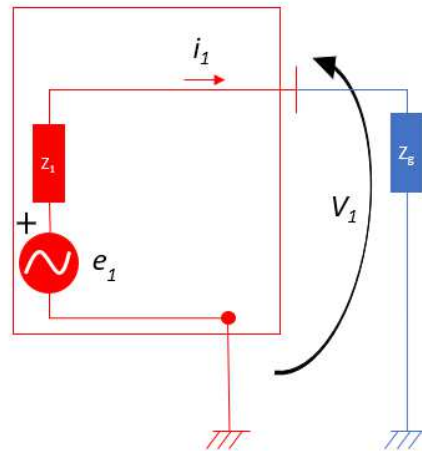
Figura 2-5: Curto-circuito trifásico



Fonte: Da autora

A Figura 2-5 representa uma rede trifásica equilibrada. Na falta trifásica, considerando impedâncias de falta Z_g iguais nas três fases, é semelhante ao caso de uma carga equilibrada ligada em estrela aterrada ou não, com envolvimento apenas da sequência positiva, resultando no circuito equivalente de sequência positiva na Figura 2-6:

Figura 2-6: Circuito trifásico com envolvimento de sequência positiva



Fonte: Da autora

Como as condições são equilibradas, conclui-se que o curto trifásico pode ser aterrado ou isolado, sendo indiferente a presença ou não do aterramento do centro estrela, com correntes idênticas de fase em ambos os casos, resultado na soma $i_a + i_b + i_c = 0$ no ponto N de neutro. Tem-se que:

$$i_1 = \frac{e_1}{Z_1 + Z_g} \quad (6)$$

É comum desprezar a impedância de falta Z_g , com exceção de alguns casos especiais para calibragem de proteções, resultando em um cálculo levemente conservativo com $Z_g = 0$. Assim, tem-se como corrente de curto-circuito trifásica:

$$i_{3\phi} = \frac{e_1}{Z_1} \quad (7)$$

2.3 Análise de curtos-circuitos desequilibrados

No sistema trifásico desequilibrado é necessário tratar as diferentes fases individualmente, o que torna os cálculos mais trabalhosos se comparado com o sistema trifásico equilibrado (SATO e FREITAS, 2015).

Há um método que simplifica consideravelmente a resolução de tal problema, principalmente em sistemas operando com alguns tipos de desequilíbrios como curtos-circuitos monofásico, bifásico ou bifásico-terra. Trata-se do Método das

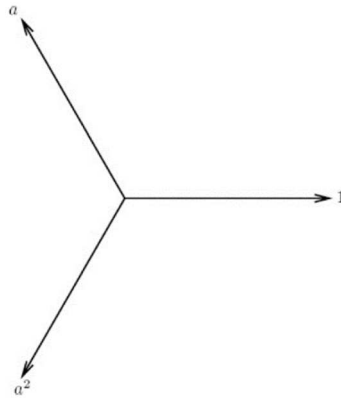
Componentes Simétricas, desenvolvido por *Charles Le-Geyt Fortescue* durante a sua pesquisa relacionada com eletrificação ferroviária, no final de 1913, quando deparou com problemas de operação de motores de indução sob condições desequilibradas. A aplicação prática deste método para análise de curto-circuito em sistemas de potência foi desenvolvida por *C. F. Wagner e R. D. Evans*, entre 1920 e 1930 e com *W. A. Lewis* adicionando simplificações valiosas em 1933 (SATO e FREITAS, 2015).

Este método pode ser resumido como: “*Um sistema trifásico desequilibrado pode ser decomposto em três sistemas equilibrados e esta decomposição é única.*” Estes sistemas decompostos são denominados sequências positiva, negativa e zero (SATO e FREITAS, 2015):

- a. Componente de sequência positiva: constituída por três fasores de módulos iguais e defasados entre si de 120° , tendo a mesma sequência de fases do sistema original.
- b. Componente de sequência negativa: constituída por três fasores de módulos iguais e defasados entre si de 120° , tendo a sequência de fases inversa do sistema original.
- c. Componente de sequência zero: constituída por três fasores de módulos iguais e em fase.

2.3.1 Transformação das Componentes Simétricas (TCS)

Inicialmente é necessário introduzir o conceito de operador de fase, designado por α . A multiplicação de um fasor pelo operador α significa submetê-lo a uma rotação de 120° , se o mesmo fasor for multiplicado por α^2 , uma rotação de 240° será realizada, se o fasor for multiplicado por α^3 , a rotação será de 360° , ou seja, o fasor voltará a posição original. Se um fasor de módulo unitário for multiplicado sucessivamente por α , α^2 e α^3 , tem-se um sistema de fasores unitários conforme Figura 2-7.

Figura 2-7: Sistema de fasores unitários

Fonte: (SATO e FREITAS, 2015)

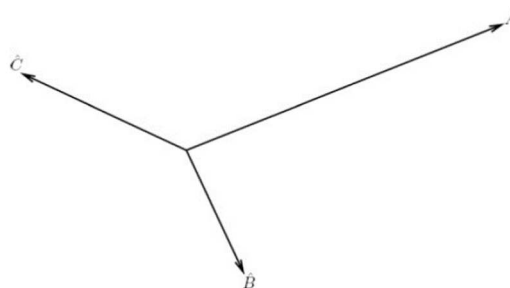
Os operadores podem ser representados como números complexos, nas formas exponenciais e retangular, como mostrado a seguir:

$$\alpha = e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (8)$$

$$\alpha^2 = e^{j240^\circ} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (9)$$

$$\alpha^3 = e^{j360^\circ} = 1 \quad (10)$$

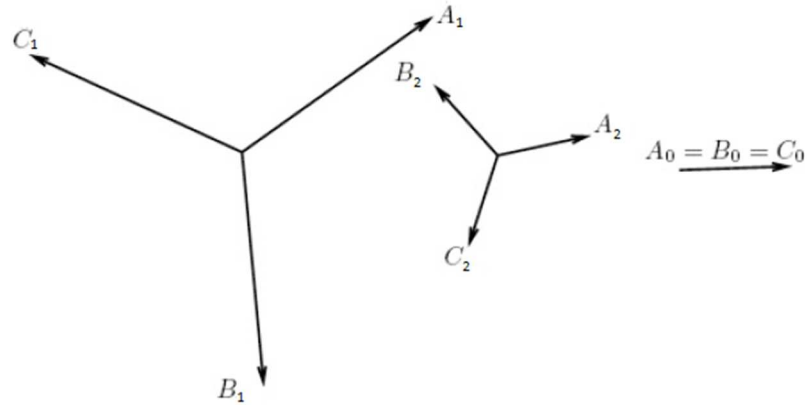
Considerando a transformação de sistema desequilibrado, conforme representado na Figura 2-8, em três sistemas equilibrados, sejam os fasores A, B e C representado correntes ou tensões do sistema original.

Figura 2-8: Sistema desequilibrado

Fonte: (SATO e FREITAS, 2015)

A aplicação do método consiste em decompor os fasores originais, obtendo as componentes de sequência positiva (1), negativa (2) e zero (0), conforme Figura 2-9.

Figura 2-9: Componentes de seqüências positiva, negativa e zero



Fonte: Adaptado de (SATO e FREITAS, 2015)

As três equações que traduzem esse método, são:

$$A = A_1 + A_2 + A_0 \quad (11)$$

$$B = B_1 + B_2 + B_0 \quad (12)$$

$$C = C_1 + C_2 + C_0 \quad (13)$$

Tal sistema de equações apresenta nove incógnitas, o que permite infinitas soluções. Para que o sistema tenha uma única solução, é necessário reduzir o número de incógnitas para três, o que é possível através das equações de equivalência dadas a seguir:

$$B_1 = \alpha^2 A_1 \quad (14)$$

$$C_1 = \alpha A_1 \quad (15)$$

$$B_2 = \alpha A_2 \quad (16)$$

$$C_2 = \alpha^2 A_2 \quad (17)$$

$$A_0 = B_0 = C_0 \quad (18)$$

Substituindo as equações (14), (15), (16), (17) e (18) nas equações (11), (12) e (13), tem-se:

$$A = A_1 + A_2 + A_0 \quad (19)$$

$$B = \alpha^2 A_1 + \alpha A_2 + B_0 \quad (20)$$

$$C = \alpha A_1 + \alpha^2 A_2 + C_0 \quad (21)$$

É importante observar que as componentes de sequências são referidas à fase A. Na forma matricial, é descrita em (22):

$$\begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_0 \\ A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} \leftrightarrow \bar{P} = [T]\bar{S} \quad (22)$$

A matriz [T] é chamada de matriz de transformação de componentes simétricas. A inversão da equação resulta nas formas matriciais abaixo:

$$\bar{S} = [T^{-1}]\bar{P} \rightarrow [T^{-1}] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} A_0 \\ A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} \quad (23)$$

Ou no sistema de equações abaixo, denominadas equações de análise:

$$A_0 = \frac{1}{3}(A + B + C) \quad (24)$$

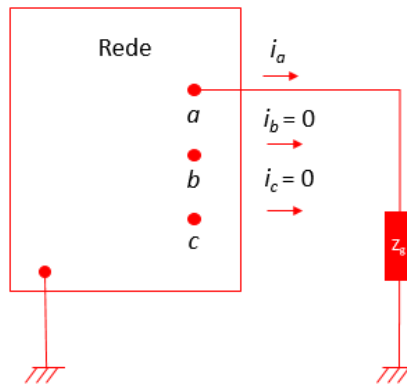
$$A_1 = \frac{1}{3}(A + \alpha B + \alpha^2 C) \quad (25)$$

$$A_2 = \frac{1}{3}(A + \alpha^2 B + \alpha C) \quad (26)$$

2.3.2 Curto-circuito monofásico

Considera-se o curto-circuito monofásico ocorrendo por meio de uma impedância Z_g conforme descrito na Figura 2-10.

Figura 2-10: Curto-circuito monofásico



Fonte: Da autora.

As condições de contorno em um nó genérico, para curto através de uma impedância, são:

- Condição 1: $i_b = i_c = 0$
- Condição 2: $v_a = Z_g i_a$

Tais condições de contorno serão utilizadas na obtenção dos modelos em componentes simétricas. Considerando a Condição 1:

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} i_0 \\ i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} i_a \\ i_a \\ i_a \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$i_0 = i_1 = i_2 = \frac{1}{3} i_a \rightarrow i_a = 3i_0 \quad (28)$$

Considerando a Condição 2 e a equação (28), tem-se:

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_0 \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} v_0 \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (29)$$

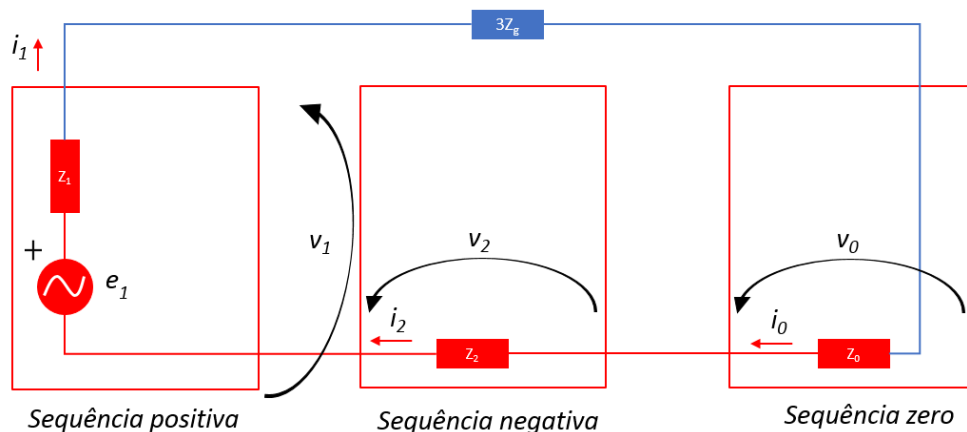
$$v_0 + v_1 + v_2 = v_a \quad (30)$$

$$v_a = 3z_g i_0 = z_g i_a \quad (31)$$

As equações acima mostram que os três diagramas são iguais e a tensão de fase “a” é nula caso $Z_g = 0$.

Os resultados das equações (28) e (30) mostram que as variáveis estão apresentando comportamento de elementos em série: correntes iguais e soma das tensões igual a 0. Por essa razão, pode-se propor a conexão em série dos diagramas de impedâncias de sequência positiva, de sequência negativa e de sequência zero, conforme Figura 2-11.

Figura 2-11: Conexão dos diagramas de seqüências no curto-circuito monofásico



Fonte: Da autora

Ao observar a Figura 2-11 obtém-se a equação:

$$i_0 = \frac{e_1}{z_1 + z_2 + z_0 + 3z_g} \quad (32)$$

No caso de curto franco, ou seja, curto-circuito sem impedância entre fase e terra, adota-se $Z_g = 0$ e a dedução das equações passa a ser mais imediata, pois conforme equação (28) e equação (32), tem-se:

$$i_0 = i_1 = i_2 = \frac{e_1}{z_1 + z_2 + z_0} \quad (33)$$

De acordo com a equação (28), encontra-se:

$$i_a = \frac{3e_1}{z_1 + z_2 + z_0} \quad (34)$$

Sendo assim, a corrente de curto-circuito monofásico é:

$$i_{1\phi} = \frac{3e_1}{z_1 + z_2 + z_0} \quad (35)$$

Para obter as tensões nos diagramas de sequência, é necessário realizar divisor de tensão no circuito descrito na Figura 2-11:

$$v_0 = \frac{-z_0}{z_1 + z_2 + z_0} e_1 \quad (36)$$

$$v_2 = \frac{-z_2}{z_1 + z_2 + z_0} e_1 \quad (37)$$

Os sinais negativos foram usados por motivo de conversão permitindo que v_1 seja positivo. Sabendo que $v_0 + v_2 + v_1 = 0$, obtém-se:

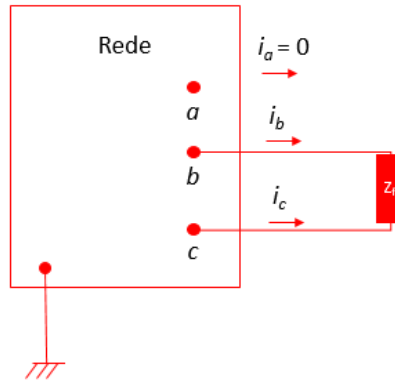
$$v_1 = \frac{(z_0 + z_2)e_1}{z_1 + z_2 + z_0} \quad (38)$$

Em componentes de fase, obtém-se os fasores das tensões v_b e v_c :

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -z_0 \\ z_2 + z_0 \\ -z_2 \end{bmatrix} \frac{e_1}{z_1 + z_2 + z_0} \quad (39)$$

2.3.3 Curto-circuito bifásico sem terra

A Figura 2-12 representa o curto-circuito bifásico através de uma impedância:

Figura 2-12: Curto-circuito bifásico

Fonte: Da autora

Aplicando as equações de análise das correntes, considerando as condições de contorno:

- Condição 1: $i_a = 0$
- Condição 2: $i_b = -i_c$
- Condição 3: $v_b - v_c = z_f i_b$

Considerando a Condição 1 e 2 acima:

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ i_b \\ -i_b \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 0 \\ i_b(\alpha - \alpha^2) \\ i_b(\alpha^2 - \alpha) \end{bmatrix} \quad (40)$$

Considerando a Condição 3 e as componentes simétricas descritas no item 2.3.1:

$$(v_0 + \alpha^2 v_1 + \alpha v_2) - (v_0 + \alpha v_1 + \alpha^2 v_2) = z_f (i_0 + \alpha^2 i_1 + \alpha i_2) \quad (41)$$

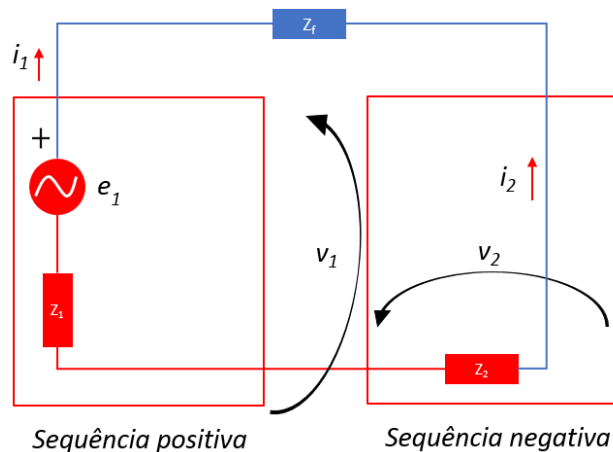
$$v_1(\alpha^2 - \alpha) + v_2(\alpha - \alpha^2) = z_f i_1(\alpha^2 - \alpha) \quad (42)$$

Com a análise da matriz descrita em (40) e equação (42), tem-se as seguintes conclusões:

- $i_2 = -i_1$
- Não existe componente de sequência zero no curto-circuito bifásico.

De acordo com a equação (42), a soma de tensões igualadas a uma equação e a igualdade das correntes mostrada em (40) descrevem o comportamento de elementos interligados em série, sendo assim, obtém-se o circuito da Figura 2-13 em componentes simétricas para o cálculo do curto bifásico.

Figura 2-13: Conexão dos diagramas de sequências positiva e negativa no curto bifásico



Fonte: Da autora

Calculando a corrente no circuito:

$$i_1 = \frac{e_1}{z_1 + z_2 + z_f} \quad (43)$$

Calculando as correntes nas fases b e c:

$$i_b = \alpha^2 i_1 + \alpha i_2 = (\alpha^2 - \alpha) i_1 = -j\sqrt{3} i_1 \quad (44)$$

$$i_c = \alpha i_1 + \alpha^2 i_2 = (\alpha - \alpha^2) i_1 = j\sqrt{3} i_1 \quad (45)$$

Para o cálculo da tensão na fase a, escreve-se a tensão de sequência positiva, obtida pela realização de um divisor de tensão e análise da Figura 2-13:

$$v_1 = \frac{e_1(z_2 + z_f)}{z_1 + z_2 + z_f} \quad (46)$$

Esta tensão também pode ser obtida pelo cálculo da queda de tensão no diagrama de sequência positiva:

$$v_1 = e_1 - z_1 i_1 \quad (47)$$

Assim como:

$$v_2 = -z_2 i_2 \quad (48)$$

$$v_2 = z_2 i_1 \quad (49)$$

A tensão na fase a é dada por: $v_a = v_1 + v_2$, já que $v_0 = 0$. Isso resulta em $v_a = e_1$ para $z_f = 0$. Tem-se:

$$i_1 = \frac{e_1}{z_1 + z_2} \quad (50)$$

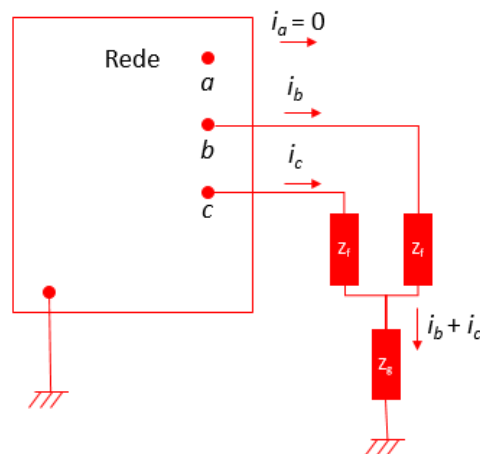
Calculando as correntes em componentes de fase, adotando $z_f = 0$:

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{e_1}{z_1 + z_2} \\ -\frac{e_1}{z_1 + z_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ (\alpha^2 - \alpha) \frac{e_1}{z_1 + z_2} \\ (\alpha - \alpha^2) \frac{e_1}{z_1 + z_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -j\sqrt{3} \frac{e_1}{z_1 + z_2} \\ j\sqrt{3} \frac{e_1}{z_1 + z_2} \end{bmatrix} \quad (51)$$

2.3.4 Curto-circuito bifásico com terra

A Figura 2-14 representa um curto circuito dupla-fase-terra:

Figura 2-14: Curto-circuito bifásico com terra



Fonte: Da autora

Considerando as seguintes condições de contorno:

- Condição 1: $i_a = 0$
- Condição 2: $v_b = z_f i_b + z_g (i_b + i_c)$
- Condição 3: $v_c = z_f i_c + z_g (i_b + i_c)$

Sugerindo a conexão dos três diagramas de sequências em um mesmo ponto, de tal forma que a soma das correntes seja nula.

Considerando a Condição 1, tem-se:

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} \quad (52)$$

$$i_a = 0 = i_0 + i_1 + i_2 \quad (53)$$

$$i_a + i_b + i_c = i_1(\alpha^2 + \alpha + 1) + i_2(\alpha^2 + \alpha + 1) + 3i_0 \quad (54)$$

Ressalta-se que $\alpha^2 + \alpha = -1$ e considerando a Condição 1:

$$i_b + i_c = 3i_0 \quad (55)$$

Reescrevendo as equações de tensões das Condições 2 e 3 em componentes simétricas:

$$v_b = v_0 + \alpha^2 v_1 + \alpha v_2 = z_f (i_0 + \alpha^2 i_1 + \alpha i_2) + 3z_g i_0 \quad (56)$$

$$v_c = v_0 + \alpha v_1 + \alpha^2 v_2 = z_f (i_0 + \alpha i_1 + \alpha^2 i_2) + 3z_g i_0 \quad (57)$$

Subtraindo a equação (57) pela equação (56):

$$(\alpha - \alpha^2)(v_1 - z_f i_1) = (\alpha - \alpha^2)(v_2 - z_f i_2) \rightarrow v_1 - z_f i_1 = v_2 - z_f i_2 \quad (58)$$

Da equação (56), isolando os termos de sequência zero:

$$v_0 - i_0(z_f + 3z_g) = -\alpha^2(v_1 - z_f i_1) - \alpha(v_2 - z_f i_2) \quad (59)$$

Considerando o resultado da equação (58):

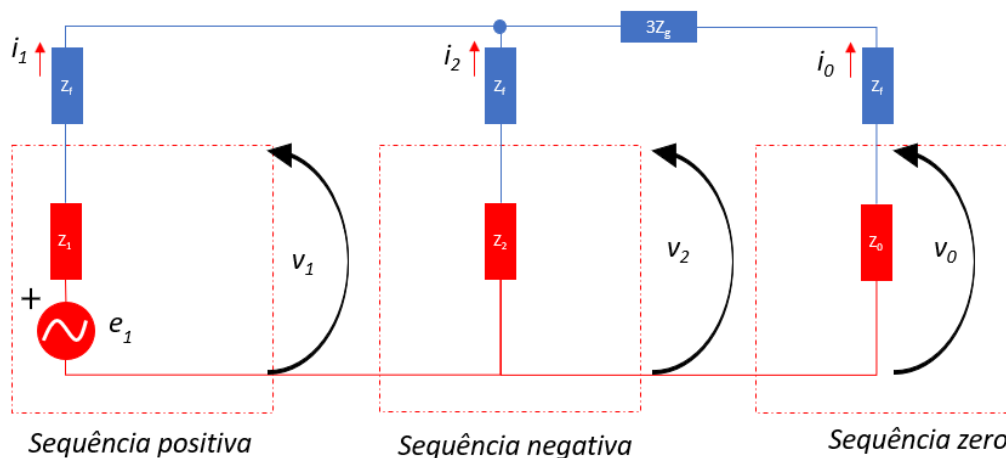
$$v_0 - i_0(z_f + 3z_g) = (-\alpha^2 - \alpha)(v_1 - z_f i_1) \quad (60)$$

Sabendo que $(-\alpha^2 - \alpha) = 1$ e considerando a equação (58):

$$v_0 - i_0(z_f + 3z_g) = v_1 - z_f i_1 = v_2 - z_f i_2 \quad (61)$$

A expressão (53) e (61) descrevem comportamento de elementos ligados em paralelo, com soma de correntes iguais a 0 e igualdade entre tensões, resultando no diagrama da Figura 2-15.

Figura 2-15: Diagrama de seqüência do curto-circuito bifásico com terra



Fonte: Da autora

Analisando a Figura 2-15, a corrente de seqüência positiva é dada por:,

$$i_1 = \frac{e_1}{z_1 + z_f + (z_0 + 3z_g + z_f) // (z_f + z_2)} \quad (62)$$

Considerando a partir daqui que $z_g = 0$ e $z_f = 0$, a corrente de seqüência positiva é obtida pela expressão:

$$i_1 = \frac{e_1}{z_1 + z_0 // z_2} \quad (63)$$

As correntes i_2 e i_0 são extraídas pelo divisor de corrente:

$$i_2 = -i_1 \frac{z_0}{(z_0 + z_2)} \quad (64)$$

$$i_0 = -i_1 \frac{z_2}{(z_0 + z_2)} \quad (65)$$

Considerando que $z_g = 0$ e $z_f = 0$ na equação (61) e levando em conta a matriz descrita em (22), tem-se:

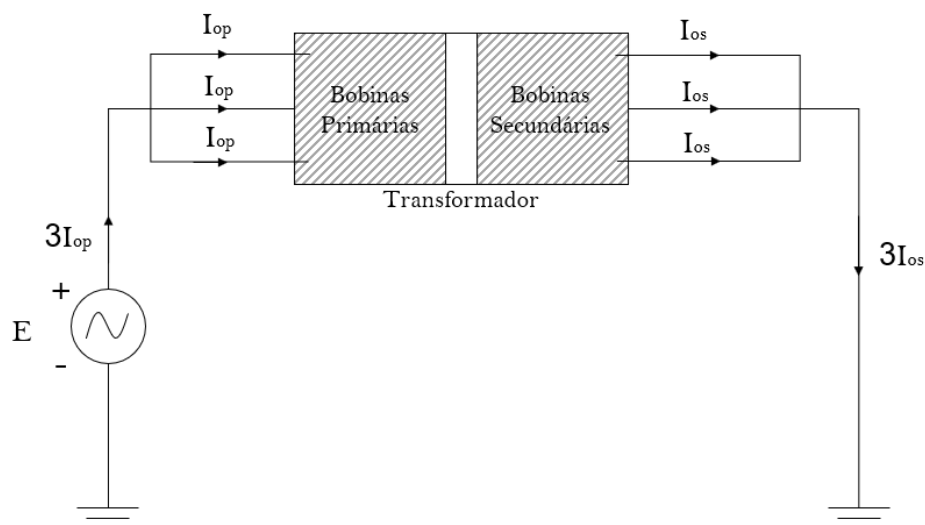
$$v_0 = v_1 = v_2 = \frac{1}{3} v_a \quad (66)$$

Conseqüentemente, $v_b = 0$ e $v_c = 0$.

2.4 Impedância de Sequência Zero do Transformador

Por definição, as correntes de sequência zero nas três fases são iguais, conforme também pode ser observado na equação (18), as mesmas só poderão existir se houver possibilidade de retorno (terra). A impedância de sequência zero é obtida através do teste de curto-circuito simulando as condições de sequência zero. O ensaio em qualquer transformador é realizado de acordo com a Figura 2-16.

Figura 2-16: Ensaio de curto-circuito de sequência zero do transformador



Fonte: Adaptado de (KINDERMANN, 1997)

A impedância, por fase, de sequência zero será dada pela expressão:

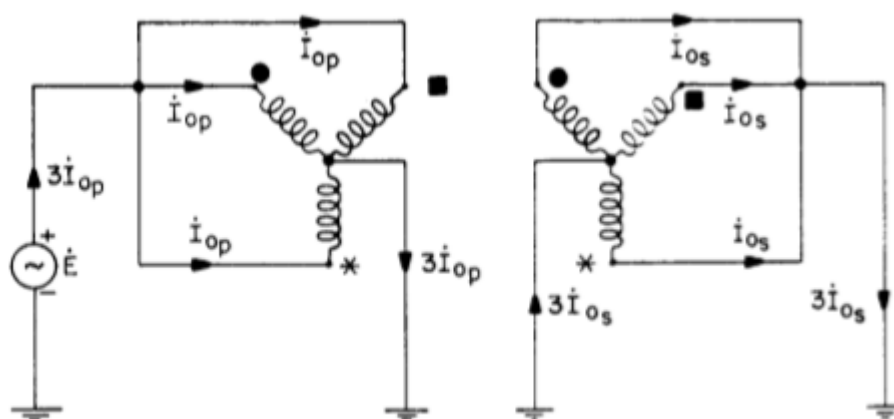
$$Z_0 = \frac{E}{I_{0p}} \quad (67)$$

A corrente do lado primário não é a mesma do lado secundário, devido as bobinas primárias e secundárias estarem separadas. A impedância vai depender do tipo de conexão das bobinas primária e secundária. A seguir serão descritas as impedâncias de sequência zero das conexões estrela-aterrada e estrela-terra e delta, aos quais são conexões dos transformadores presentes no Sistema-10 e Sistema-57.

2.4.1 Impedância de Sequência Zero do Transformador Estrela-Atterrada em ambas conexões

O banco trifásico, formado por transformadores monofásicos do tipo núcleo envolvido ou envolvente tem o mesmo comportamento do transformador trifásico de núcleo envolvente, quando analisado em relação a corrente de sequência zero. O ensaio de curto é mostrado na Figura 2-17.

Figura 2-17: Ensaio de curto-circuito do transformador estrela-aterrada



Fonte: (KINDERMANN, 1997)

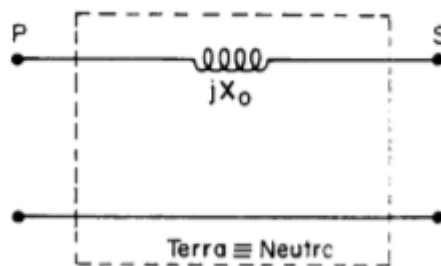
Observa-se que as correntes nas bobinas primárias têm seus reflexos de correntes nas bobinas secundárias, ou seja, só pode passar corrente em um enrolamento se houver a possibilidade de passar corrente no respectivo enrolamento do acoplamento magnético.

A impedância, por fase, de sequência zero é dada por:

$$Z_0 = \frac{E}{I_{0p}} = Z_1 = Z_2 \quad (68)$$

O circuito equivalente, por fase, da sequência zero de um sistema Y equivalente é mostrado na Figura 2-18.

Figura 2-18: Circuito equivalente do transformador estrela-aterrada

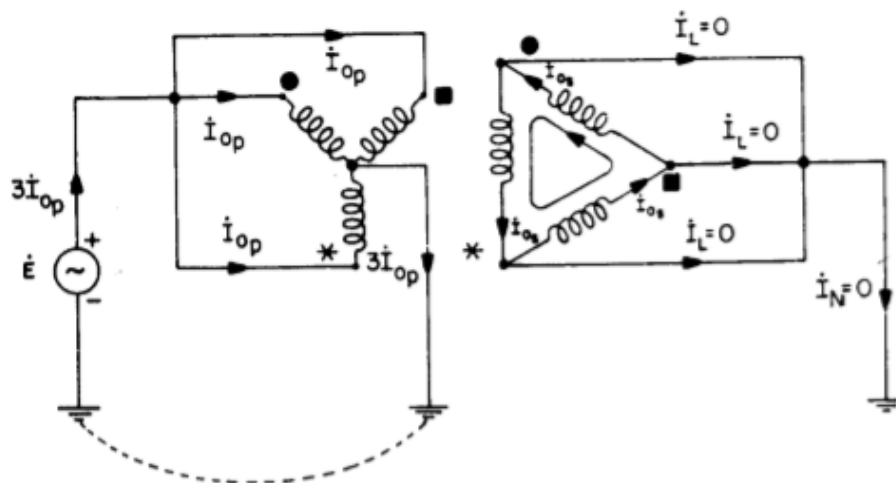


Fonte: (KINDERMANN, 1997)

2.4.2 Impedância de Sequência Zero do Transformador Estrela-Aterrada e Delta

O ensaio de curto é descrito na Figura 2-19. As correntes de sequência zero do primário obrigam as correntes de sequência zero do secundário a circularem dentro do Delta, ou seja, o reflexo das correntes do primário está confinado no Delta. As correntes de linha que emanam no Delta são nulas. Sendo assim, as correntes de sequência zero não passam para o sistema conectado no lado Delta do transformador. Dessa forma, este tipo de transformador tem duas impedâncias para a sequência zero, que dependem do lado em que está vindo a corrente de sequência zero.

Figura 2-19: Ensaio de curto-circuito do transformador estrela-aterrada e delta



Fonte: (KINDERMANN, 1997)

Para o lado Y é dada como:

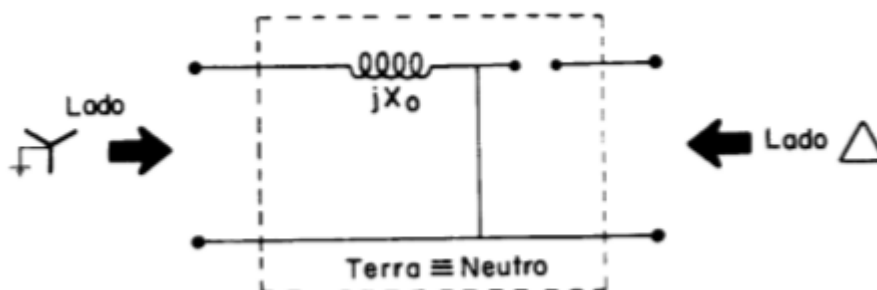
$$Z_{0Y} = \frac{E}{I_{op}} = Z_1 = Z_2 \quad (69)$$

Para o lado Delta, como não há caminho de retorno, a impedância é infinita, portanto não há corrente.

$$Z_{0\Delta} = \infty \quad (70)$$

O circuito equivalente, por fase, para a sequência zero do transformador é mostrado na Figura 2-20.

Figura 2-20: Circuito equivalente do transformador estrela-aterrada e delta



Fonte: (KINDERMANN, 1997)

3 MODELAGEM COMPUTACIONAL

A seguir, serão apresentadas informações referentes a manipulação do programa ANAFAS para realização da modelagem dos Sistema-10 e Sistema-57 e estudos de curto-circuito.

3.1 O software ANAFAS

O ANAFAS é uma ferramenta destinada a análise de faltas em sistemas elétricos de qualquer porte, permitindo a modelagem fiel do sistema e a simulação de diversos tipos de defeito. No caso da versão acadêmica, versão utilizada para realizar o presente trabalho, há a limitação de 120 barras para a realização dos estudos de casos.

Trata-se de uma ferramenta complacente, ao qual permite a execução de estudos individuais, onde o usuário define cada caso; e de estudos macro, onde os casos são gerados automaticamente pelo ANAFAS. Neste trabalho, ambos foram utilizados com solução orientada a ponto-de-falta cujo relatório de resultados apresenta as tensões e correntes de falta e de contribuição.

3.2 Principais ferramentas utilizadas no ANAFAS

Gerenciador de Dados: permite consulta e edição de dados elétricos por meio de tabelas organizadas por tipo de equipamento.

Relatório de dados do sistema: o ANAFAS fornece diversos relatórios de dados, que podem ser consultados interativamente ou gravados em arquivos. O relatório mais utilizado trata-se do relatório de níveis de curto-circuito.

Estudo macro: Cada caso consiste de uma única falta, aplicada sobre uma barra ou num ponto intermediário de um circuito (do tipo linha) e que pode ser associada a uma contingência simples, dupla ou tripla. Os estudos são gerados pelo ANAFAS através da combinação de tipos de curto-circuito, pontos-de-falta e contingências, definidas pelo usuário.

Estudo individual: Cada caso consiste de uma ou mais faltas simultâneas, especificadas diretamente pelo usuário.

Níveis de curto-circuito: Indica os níveis de curto-circuito de cada barra simultaneamente no diagrama unifilar. Opcionalmente, pode-se visualizar também as contribuições de primeira vizinhança que seriam obtidas com o curto em cada barra.

3.3 Modelagem do Sistema-10 e Sistema-57

O Sistema-57 foi disponibilizado pelo professor Nilo Sérgio. Tal sistema é baseado no caso teste do Sistema de Potência de 57 barras disponibilizado pelo IEEE. No sistema enviado pelo professor Nilo havia apenas informações de sequência positiva ou os valores de sequência zero eram iguais aos valores de sequência positiva. Por esta razão, foi necessário atualizar os valores de resistência de sequência zero $R_0\%$ e reatância de sequência zero $X_0\%$ do sistema. Através do gerenciador de dados do ANAFAS, em Linhas de Transmissão, para as linhas de 138 kV foi inserido o valor de 2,5048 para a resistência e 3,8501 para a reatância; nas demais linhas tem-se o valor de 3,6704 para resistência e 4,1197 para reatância. Os valores citados foram sugeridos pelo professor.

Devido ao tamanho do Sistema-57, uma das dificuldades apresentadas trata-se de conseguir uma imagem do diagrama unifilar de todo sistema no ANAFAS com boa resolução, considerando que, ao diminuir o zoom no software, o desenho do diagrama unifilar perde resolução ficando impossível distinguir e ler os dados apresentados no sistema.

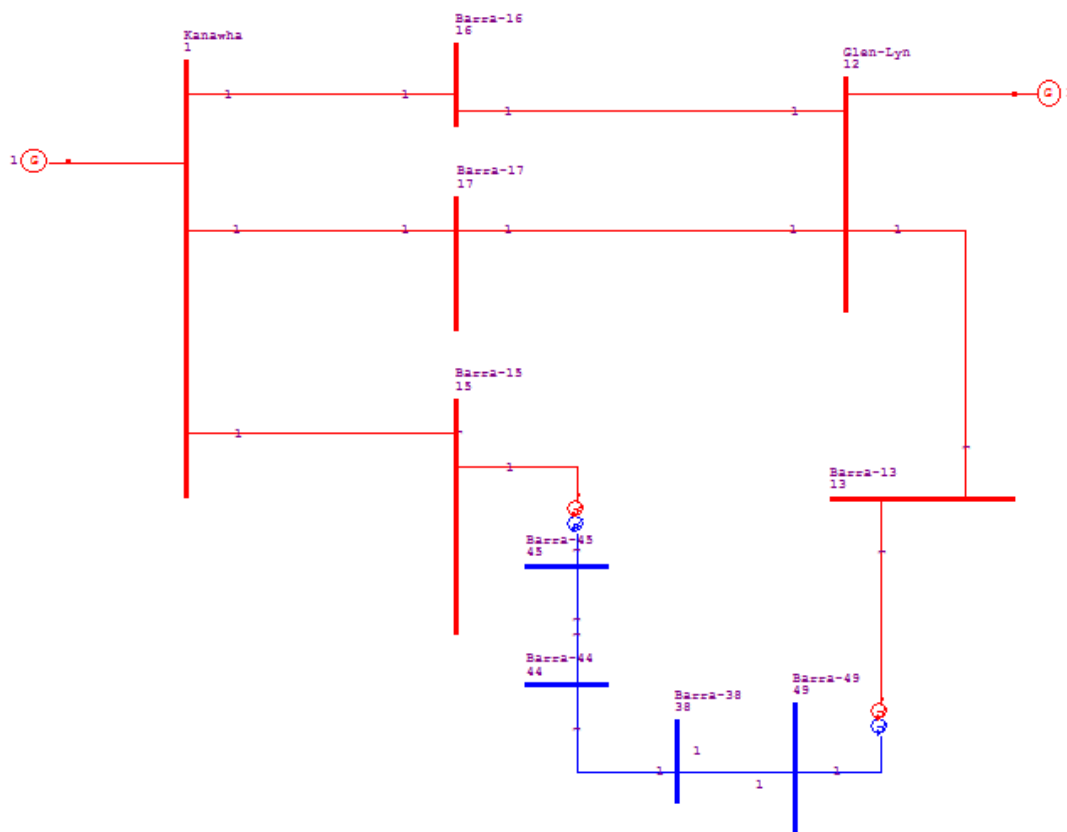
Para tornar possível a análise e visualização dos dados para estudos curtos-circuitos, primeiramente as mesmas análises realizadas no Sistema-57 serão realizadas em um sistema de 10 barras, chamado de Sistema-10.

O Sistema-10 trata-se de uma redução do Sistema-57, ao qual foi necessário remover algumas barras, linhas de transmissão, geradores e transformadores até chegar as seguintes 10 barras e suas conexões: 1, 12, 13, 15, 16, 17, 38, 44, 45 e 49. Além dessas barras, também permaneceram: Dois transformadores, um transformador abaixador que está entre as barras 15 e 45, e

outro transformador elevador que está entre as barras 49 e 13; dois geradores, um conectado a barra 1 e outro conectado a barra 12.

A Figura 3-1 mostra o diagrama unifilar do Sistema-10 de acordo com as descrições acima.

Figura 3-1: Diagrama unifilar do Sistema-10 representado no ANAFAS

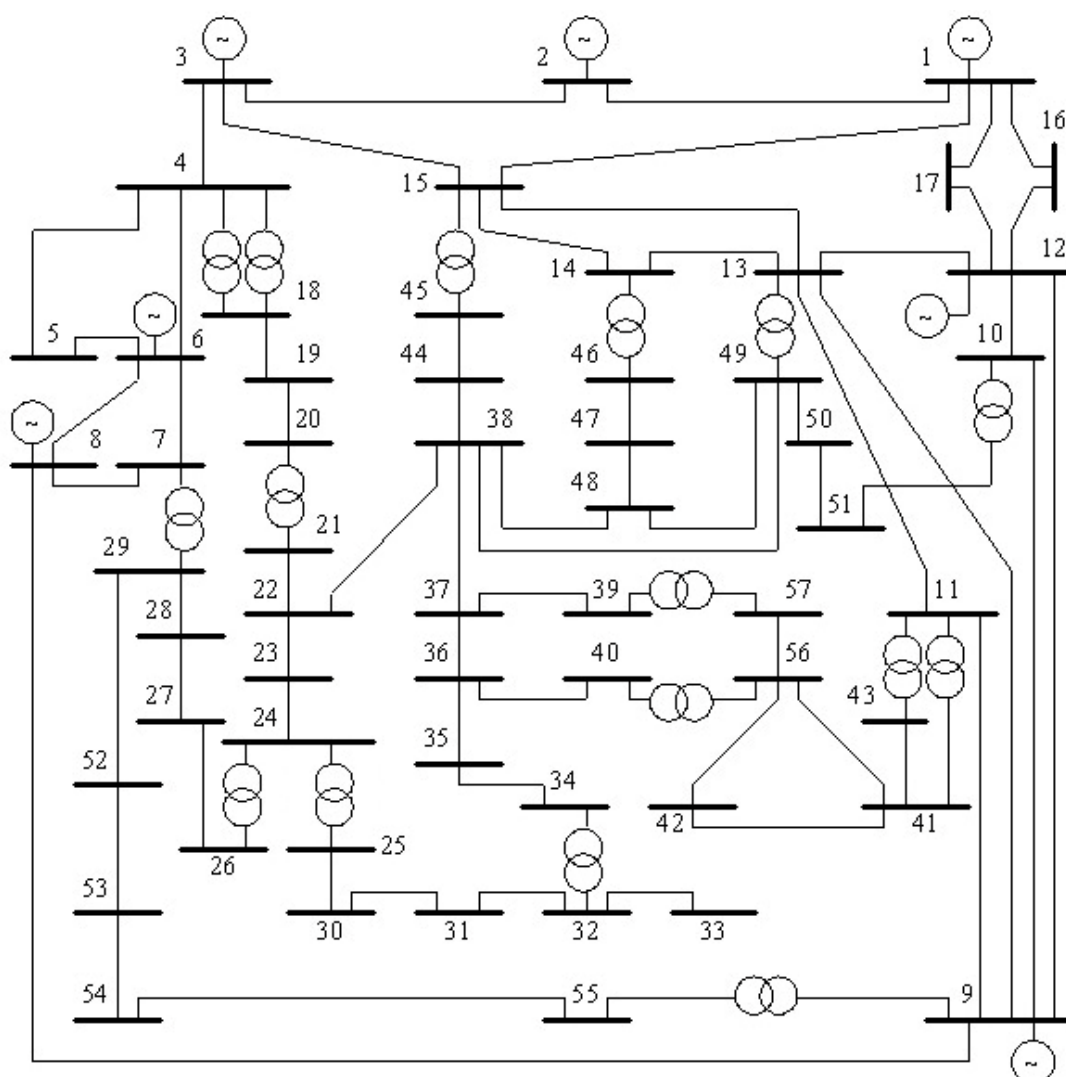


Fonte: Da autora

Na Figura 3-1, a área em vermelho representa as partes do sistema com tensão nominal de 138 kV por fase e a área em azul representa as partes do sistema com 69 kV por fase.

A Figura 3-2 abaixo representa o diagrama unifilar do Sistema-57, onde é possível visualizar todos os elementos do sistema.

Figura 3-2: Diagrama unifilar do Sistema-57



Fonte: Adaptado de (M.B.Хохлов, 2008)

3.4 Dados do Sistema-10

O Sistema-10 possui as seguintes quantidades de equipamentos: 10 barras, 9 linhas de transmissão, 2 transformadores e 2 geradores.

Com relação as barras, todas elas encontram-se no estado operativo ligado, capacidade de interrupção de 50 kA, módulo de tensão igual a $1 pu$ e ângulo de tensão de 0° . As barras 1, 12, 13, 15, 16 e 17 possuem base de tensão igual a 138 kV; as barras 38, 44, 45 e 49 possuem base de tensão igual a 69 kV.

Com relação as linhas de transmissão, os valores da resistência de sequência positiva R1(%) e da reatância de sequência positiva X1(%) das linhas estão escritos na Tabela 3-1.

Tabela 3-1: Valores de Resistência R1(%) e Reatância X1(%) das linhas de transmissão do Sistema-10

Barra de	Barra Para	Resistência R1(%)	Reatância X1(%)
1	15	1,78	9,88
1	16	4,54	2,06
1	17	2,38	1,08
12	13	1,78	5,80
12	16	0,18	8,13
12	17	3,97	1,79
38	44	2,89	5,85
38	49	11,50	17,70
44	45	6,24	12,42

Fonte: ANAFAS

Os valores da resistência e reatância de sequência zero das linhas foram citados no primeiro parágrafo do tópico 3.3.

Com respeito aos transformadores, os valores de reatância positiva X1(%) são de 1,91 para o transformador elevador e de 10,42 para o transformador abaixador. O tipo de conexão do enrolamento primário e secundário de ambos os transformadores é estrela aterrada.

Com referência aos geradores, ambos possuem resistência de sequência positiva R1(%) e de sequência zero R0(%) igual a 0,01, reatância subtransitória X''d(%) de 0,25 e reatância de sequência zero X0(%) de 0,3 para o gerador ligado a barra 1 e de 0,03 para o gerador ligado a barra 12. A capacidade de interrupção de ambos geradores é de 50 kA.

3.5 Dados do Sistema-57

O Sistema-57 possui as seguintes quantidades de equipamentos: 57 barras, 63 linhas de transmissão, 16 transformadores e 7 geradores.

Em relação as barras, todas elas encontram-se no estado operativo ligado, capacidade de interrupção de 50 kA, módulo de tensão igual a 1 pu e ângulo de tensão de 0°. As barras 1 a 16 possuem base de tensão igual a 138 kV; as barras 21 a 24, 34 a 40 e 44 a 51 possuem base de tensão igual a 69 kV; as barras 18 a 20, 26 a 29 e 52 a 57 possuem base de tensão igual a 34,5 kV; as barras 30 a 33 possuem base de tensão igual a 13,8 kV.

Com relação as linhas de transmissão, os valores da resistência de sequência positiva R1(%) e da reatância de sequência positiva X1(%) das linhas estão escritos na Tabela 3-2.

Tabela 3-2: Valores de Resistência R1(%) e Reatância X1(%) das linhas de transmissão do Sistema-57

Barra De	Barra Para	Resistência (R1%)	Reatância (X1%)
1	2	0,83	2,8
1	15	1,78	9,88
1	16	4,54	2,06
1	17	2,38	1,08
2	3	2,98	0,85
3	4	1,12	3,66
3	15	1,62	0,53
4	5	6,25	1,32
4	6	0,43	1,48
5	6	3,02	6,41
6	7	0,2	1,02
6	8	3,39	1,73
7	8	1,39	7,12
8	9	0,99	5,05
9	10	3,69	16,79
9	11	2,58	8,48
9	12	6,48	2,95
9	13	4,81	1,58
10	12	2,77	12,62
11	13	2,23	7,32
12	13	1,78	5,8

12	16	0,18	8,13
12	17	3,97	1,79
13	14	1,32	4,34
13	15	2,69	8,69
14	15	1,71	5,47
18	19	4,61	6,85
19	20	2,83	4,34
21	22	7,36	1,17
22	23	0,99	1,52
22	38	1,92	2,95
23	24	1,66	2,56
25	30	13,5	20,2
26	27	16,5	25,4
27	28	61,8	95,4
28	29	4,18	5,87
29	52	144,2	18,7
30	31	32,6	49,7
31	32	50,7	75,5
32	33	3,92	3,6
34	35	5,2	7,8
35	36	4,3	5,37
36	37	2,9	3,66
36	40	3	4,66
37	38	6,51	10,09
37	39	2,39	3,79
38	44	2,89	5,85
38	48	3,12	4,82
38	49	11,5	17,7
41	42	20,7	35,2
41	43	0	41,2
44	45	6,24	12,42
46	47	2,3	6,8
47	48	1,82	2,33
48	49	8,34	12,9
49	50	8,01	12,8

50	51	13,86	22
52	53	7,62	9,84
53	54	18,78	23,2
54	55	17,32	22,65
56	41	55,3	54,9
56	42	21,25	35,4
57	56	17,4	26

Fonte: ANAFAS

Os valores da resistência e reatância de sequência zero das linhas foram citados no primeiro parágrafo do tópico 3.3

Com respeito aos transformadores, os valores de reatância positiva X1(%) e tipos de conexão do enrolamento primário e secundário estão relacionados na Tabela 3-3.

Tabela 3-3: Dados dos transformadores do Sistema-57

Primário	Secundário	Reatância (X1%)	Tipo de Conexão do Primário	Tipo de Conexão do Secundário
4	18	5,55	Estrela Aterrado	Delta
7	29	6,48	Estrela Aterrado	Delta
9	55	12,05	Estrela Aterrado	Delta
10	51	7,12	Estrela Aterrado	Estrela Aterrado
11	41	7,49	Estrela Aterrado	Estrela Aterrado
11	43	1,53	Estrela Aterrado	Estrela Aterrado
13	49	1,91	Estrela Aterrado	Estrela Aterrado
15	45	10,42	Estrela Aterrado	Estrela Aterrado
21	20	77,67	Estrela Aterrado	Delta
24	25	118,2	Estrela Aterrado	Delta
24	26	4,73	Estrela Aterrado	Delta
4	18	43	Estrela Aterrado	Delta
34	32	95,3	Estrela Aterrado	Delta
14	46	7,35	Estrela Aterrado	Estrela Aterrado
39	57	135,5	Estrela Aterrado	Estrela Aterrado
40	56	119,5	Estrela Aterrado	Estrela Aterrado

Fonte: ANAFAS

Com referência aos geradores, todos possuem resistência de sequência positiva $R1(\%)$ e de sequência zero $R0(\%)$ igual a 0,01, reatância subtransitória $X''d(\%)$ de 0,25 e reatância de sequência zero $X0(\%)$ de 0,3, exceto o gerador ligado a barra 12 que possui $X0(\%)$ de 0,03. A capacidade de interrupção de todos os geradores é de 50 kA.

4 ANÁLISE DOS CURTOS-CIRCUITOS NOS SISTEMAS

Neste capítulo, serão apresentadas as análises e resultados dos estudos de curto-circuito dos Sistema-10 e Sistema-57.

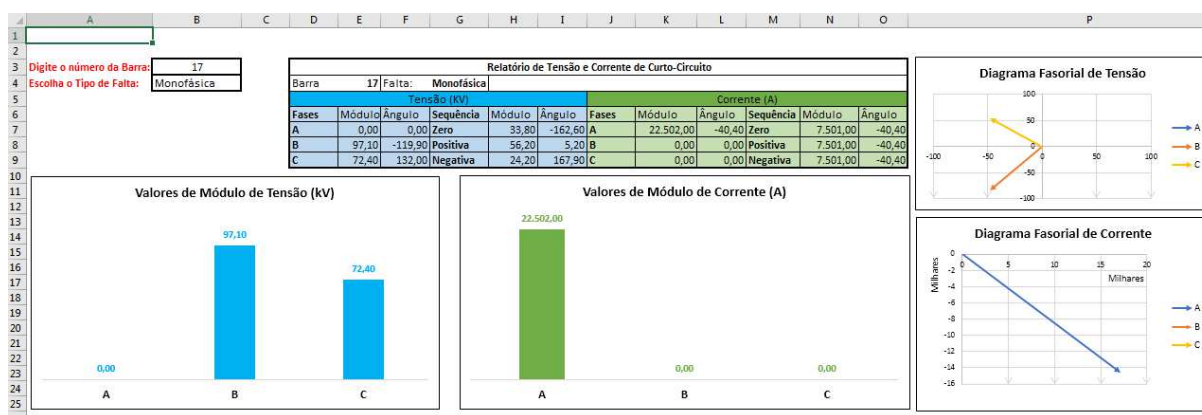
4.1 Estudos de casos de curto-circuito no Sistema-10

Com o auxílio dos estudos macro e individual e dos relatórios obtidos a partir destes estudos, foi possível observar os comportamentos de tensão e corrente descritos nos itens subsequentes.

4.1.1 Tensões e correntes de curto-circuito do Sistema-10

Para otimizar a análise das tensões e correntes de curto-circuito no Sistema-10, foi criada um *dashboard* no Microsoft Excel utilizando macros. A interface do *dashboard* é representada na Figura 4-1.

Figura 4-1: Interface do *dashboard* de representação da tensão e corrente de curto-circuito das barras do Sistema-10



Fonte: Da autora

Os dados de tensões e correntes de falta de cada barra foram obtidos a partir do relatório gerado no estudo macro do ANAFAS.

Na Figura 4-1, ao clicar na célula B3, irá aparecer uma lista com os números das barras existentes no sistema. Após escolher uma barra, é necessário escolher o

tipo de falta desejada. Para realizar este procedimento é necessário clicar na célula B4 e escolher entre as opções: Monofásica, Bifásica, Bifásica-Terra e Trifásica. Ao realizar os dois procedimentos, os gráficos de coluna que representam o módulo da tensão e corrente nas fases A, B e C e os diagramas fasoriais irão mudar instantaneamente de acordo os dados inseridos nas células citadas. Além das informações dos gráficos, é possível também obter os valores de módulo e ângulo de sequência positiva, negativa e zero e os ângulos de fase na tabela localizada sobre os gráficos de coluna. A Figura 4-1 informa os dados referentes a falta monofásica na barra 17.

Dashboards são painéis que mostram métricas e indicadores importantes para alcançar objetivos e metas traçadas de forma visual, facilitando a compreensão das informações geradas. Existem diversos tipos de geração de informação, mas o formato visual ganha muitos pontos quando se trata de entender como estão indo resultados, possibilitando que qualquer pessoa consiga consumir a informação (NASCIMENTO, 2017).

4.1.2 Resultados das análises das tensões e correntes de curto-circuito do Sistema-10

A partir da análise dos valores obtidos através do *dashboard*, foi possível comprovar as relações descritas no Capítulo 2 e calcular os erros relativos de acordo com os tipos de falta descritas a seguir. Devido a alta complexidade dos sistemas, nenhum cálculo manual foi realizado, conseqüentemente, todos os valores apresentados são provenientes dos resultados dos relatórios do ANAFAS. Ao fim de cada tipo de curto-circuito é mostrado os resultados do cálculo de erro relativo.

Falta Monofásica: ligação entre a fase A e o terra. O curto monofásico é caracterizado pelas seguintes afirmações entre as grandezas elétricas de tensão e corrente de falta:

- Afirmação I: A tensão na fase A e as correntes da fase B e C são nulas, obedecendo a equação (31) e a condição 1 do item 2.3.2, respectivamente;
- Afirmação II: As correntes de sequência são todas iguais e são o triplo da corrente da fase A, de acordo com a equação (28). Nesse ponto, as

barras apresentaram erro relativo entre 0% e 2,9%, conforme Tabela 4-1;

- Afirmação III: A soma das tensões de sequência são iguais a zero, de acordo com a equação (30). Nesse ponto, as barras apresentaram erro relativo entre 0% e 0,2%, conforme Tabela 4-1.

Os resultados do relatório de tensão e corrente de falta monofásica das 10 barras estão descritos no Anexo A.

Os cálculos de erros relativos de acordo com as três afirmações descritas são mostrados na Tabela 4-1.

Tabela 4-1: Erros relativos das tensões e correntes de falta monofásica no Sistema-

10

Tipo de falta	Barra	Afirmação	Valor Calculado	Valor ANAFAS	Erro Relativo
Monofásica	1	I	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	1	II	54.692,00	54.692,00	0,00%
Monofásica	1	III	54,60	54,60	0,00%
Monofásica	12	I	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	12	II	81.825,33	81.825,00	0,00%
Monofásica	12	III	42,27	42,20	0,16%
Monofásica	13	I	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	13	II	2.622,67	2.623,00	-0,01%
Monofásica	13	III	51,20	51,20	0,01%
Monofásica	15	I	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	15	II	1.886,67	1.887,00	-0,02%
Monofásica	15	III	48,25	48,30	-0,10%
Monofásica	16	I	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	16	II	4.326,33	4.326,00	0,01%
Monofásica	16	III	49,58	49,50	0,15%
Monofásica	17	I	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	17	II	7.500,67	7.501,00	0,00%
Monofásica	17	III	56,14	56,20	-0,10%
Monofásica	38	I	0,00	0,00	0,00%

Monofásica	38	II	11,67	12,00	-2,86%
Monofásica	38	III	39,79	39,70	0,23%
Monofásica	44	I	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	44	II	11,67	12,00	-2,86%
Monofásica	44	III	39,79	39,70	0,23%
Monofásica	45	I	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	45	II	11,67	12,00	-2,86%
Monofásica	45	III	39,78	39,80	-0,04%
Monofásica	49	I	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	49	II	11,67	12,00	-2,86%
Monofásica	49	III	39,80	39,80	0,00%

Fonte: Da autora

Falta Bifásica: ligação entre as fases B e C. O curto bifásico é caracterizado pelas seguintes afirmações entre as grandezas elétricas de tensão e corrente de falta:

- Afirmação I: A corrente de fase A e corrente e tensão de sequência zero são nulas, de acordo com a condição 1 do item 2.3.3, equação (40) e (41), respectivamente;
- Afirmação II: O módulo da corrente de fase B possui sinal inverso em relação a corrente de fase C, de acordo com a condição 2 do item 2.3.3;
- Afirmação III: A tensão da fase A é igual a soma das tensões de sequência positiva e negativa, tendo em vista que não há componente de sequência zero quando a falta não envolve o terra. Nesse ponto, as barras apresentaram erro relativo entre 0% e 0,1%, conforme Tabela 4-2;
- Afirmação IV: A corrente de fase B possui módulo igual a raiz de três multiplicado pela corrente de sequência positiva, de acordo com a equação (44). Nesse ponto, as barras apresentaram erro relativo entre 0% e 0,1%, conforme Tabela 4-2.

Os resultados do relatório de tensão e corrente de falta bifásica das 10 barras estão descritos Anexo A.

Os cálculos de erros relativos de acordo com as quatro afirmações descritas são mostrados na Tabela 4-2.

Tabela 4-2: Erros relativos das tensões e correntes de falta bifásica no Sistema-10

Tipo de falta	Barra	Afirmção	Valor Calculado	Valor ANAFAS	Erro Relativo
Bifásica	1	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	1	II	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	1	III	79,60	79,70	-0,13%
Bifásica	1	IV	150.726,53	150.727,00	0,00%
Bifásica	12	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	12	II	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	12	III	79,60	79,70	-0,13%
Bifásica	12	IV	150.726,53	150.727,00	0,00%
Bifásica	13	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	13	II	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	13	III	79,60	79,70	-0,13%
Bifásica	13	IV	6.325,45	6.325,00	0,01%
Bifásica	15	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	15	II	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	15	III	79,60	79,70	-0,13%
Bifásica	15	IV	4.127,48	4.128,00	-0,01%
Bifásica	16	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	16	II	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	16	III	79,60	79,70	-0,13%
Bifásica	16	IV	9.896,94	9.897,00	0,00%
Bifásica	17	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	17	II	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	17	III	79,60	79,70	-0,13%
Bifásica	17	IV	21.345,79	21.347,00	-0,01%
Bifásica	38	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	38	II	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	38	III	39,80	39,80	0,00%
Bifásica	38	IV	4.283,36	4.283,00	0,01%
Bifásica	44	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	44	II	0,00	0,00	0,00%

Bifásica	44	III	39,80	39,80	0,00%
Bifásica	44	IV	4.151,73	4.152,00	-0,01%
Bifásica	45	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	45	II	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	45	III	39,80	39,80	0,00%
Bifásica	45	IV	4.906,90	4.907,00	0,00%
Bifásica	49	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	49	II	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	49	III	39,80	39,80	0,00%
Bifásica	49	IV	10.066,68	10.067,00	0,00%

Fonte: Da autora

Falta Bifásica com terra: as fases B e C estão ligadas entre si e unidas ao terra. O curto bifásico-terra é caracterizado pelas seguintes afirmações entre as grandezas elétricas de tensão e corrente de falta:

- Afirmação I: A corrente de fase A e as tensões de fase B e C são nulas, de acordo com a condição 1 do item 2.3.4 e Figura 2-14, respectivamente;
- Afirmação II: Os módulos das tensões de sequência são iguais entre si e possuem um terço do valor da tensão da fase A, de acordo com a equação (66). Nesse ponto, as barras apresentaram erro relativo entre 0% e 0,15%, conforme Tabela 4-3;
- Afirmação III: A soma dos fasores de corrente de fase B e C é igual ao triplo do fasor de corrente de sequência zero, de acordo com a equação (55). Nesse ponto, as barras apresentaram erro relativo entre 0% e 11,82%, conforme Tabela 4-3.

Os resultados do relatório de tensão e corrente de falta bifásica com terra das 10 barras estão descritos no Anexo A.

Os cálculos de erros relativos de acordo com as três afirmações descritas são mostrados na Tabela 4-3.

Tabela 4-3: Erros relativos das tensões e correntes de falta bifásica com terra no Sistema-10

Tipo de falta	Barra	Afirmação	Valor	Valor	Erro
			Calculado	ANAFAS	Relativo
Bifásica Terra	1	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	1	II	84,00	84,00	0,00%
Bifásica Terra	1	III	155.245,61	155.187,00	0,04%
Bifásica Terra	12	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	12	II	24,90	24,90	0,00%
Bifásica Terra	12	III	416.082,20	415.983,00	0,02%
Bifásica Terra	13	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	13	II	74,40	74,50	-0,13%
Bifásica Terra	13	III	8.455,23	8.460,00	-0,06%
Bifásica Terra	15	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	15	II	63,60	63,60	0,00%
Bifásica Terra	15	III	6.898,37	6.897,00	0,02%
Bifásica Terra	16	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	16	II	67,50	67,60	-0,15%
Bifásica Terra	16	III	14.985,82	14.988,00	-0,01%
Bifásica Terra	17	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	17	II	90,30	90,30	0,00%
Bifásica Terra	17	III	20.044,12	20.025,00	0,10%
Bifásica Terra	38	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	38	II	59,70	59,70	0,00%
Bifásica Terra	38	III	16,51	18,00	-9,05%
Bifásica Terra	44	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	44	II	59,70	59,70	0,00%
Bifásica Terra	44	III	16,10	18,00	-11,82%
Bifásica Terra	45	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	45	II	59,70	59,70	0,00%
Bifásica Terra	45	III	17,27	18,00	-4,20%
Bifásica Terra	49	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	49	II	59,70	59,70	0,00%

Bifásica Terra	49	III	19,74	18,00	8,82%
----------------	----	-----	-------	-------	-------

Fonte: Da autora

Falta Trifásica: as fases A, B e C estão ligadas entre si. O curto trifásico é caracterizado pelas seguintes afirmações entre as grandezas elétricas de tensão e corrente de falta:

- Todas as tensões de fase e de sequência são nulas;
- As correntes de sequência zero e negativa são nulas;
- Consequentemente, a corrente de fase A é igual a corrente de sequência positiva;
- A soma dos fasores das correntes de fase é igual a zero, de acordo com a análise da Figura 2-5 e do que é explicado no item 2.2.3.

Os resultados do relatório de tensão e corrente de falta trifásica das 10 barras estão descritos no Anexo A.

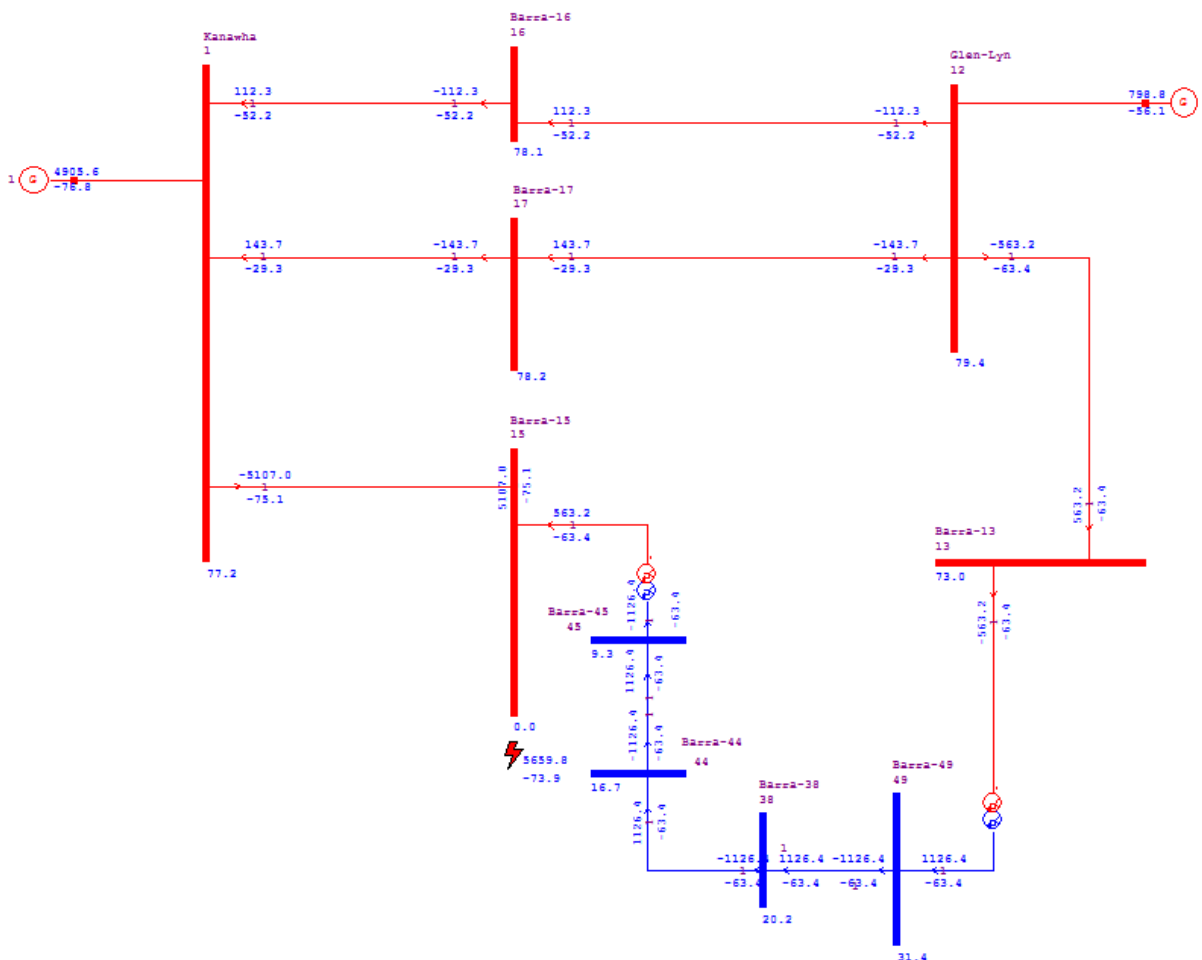
Os cálculos de erros relativos de acordo com as quatro afirmações descritas foram todos de 0%, por isso é dispensável a apresentação da tabela de erros relativos.

4.1.3 Realização de três pontos de falta no Sistema-10

O objetivo deste tópico é realizar um estudo com uma visão geral do sistema estudado se comparado com o tópico 4.1.2. Para isso, foram realizados estudos individuais de faltas nas barras 15, 17 e 49 com todos os tipos de falta. As barras foram escolhidas com o objetivo de serem pontos de falta afastados um do outro para possibilitar a análise de comportamentos repetitivos das grandezas de tensão e corrente mesmo em pontos distintos do sistema durante uma falta.

Um dos resultados do estudo individual pode ser visualizado na Figura 4-2.

Figura 4-2: Simulação de falta monofásica no barramento 15 do Sistema-10



Fonte: Da autora.

A Figura 4-2 representa uma falha monofásica na barra 15 cujo os valores de corrente e tensão são referentes a fase A. Observa-se que o curto-circuito na ferramenta ANAFAS é representado por um raio vermelho. Os módulos de corrente estão na unidade ampere e localizados acima das linhas de transmissão, enquanto que o ângulo da corrente está abaixo das linhas de transmissão na unidade grau. Os módulos de tensões nas barras estão em kV e estão localizadas logo abaixo da barra. A corrente de curto-circuito da barra 15 e seu ângulo estão localizados ao lado direito da representação do raio vermelho.

4.1.4 Resultados das análises dos três pontos de falta no Sistema-10

Observando os módulos de tensão e corrente e sentido da corrente na Figura 4-2, é possível relatar três comportamentos:

- As correntes diminuem conforme se distanciam do ponto de falta;
- As tensões das barras aumentam em direção ao gerador do sistema conforme se distanciam do ponto de falta;
- Quando a falta envolve o terra (monofásica, bifásica com terra e trifásica), a corrente tende a percorrer a partir do gerador de menor valor de corrente, no caso de mais de um gerador do sistema, para o ponto de falta que é onde está localizado o terra. Isso ocorre por se tratar do caminho de menor impedância.

Os demais resultados estão inseridos no Anexo B para evitar a poluição do acúmulo de imagens dos resultados ao decorrer deste tópico.

4.2 Estudos de casos de curto-circuito no Sistema-57

Com o auxílio dos estudos macros e individuais descritos no tópico 4.1 e dos relatórios obtidos a partir dos estudos realizados no Sistema-57, foi possível constatar comportamentos semelhantes de tensão e corrente descritos nos itens 4.1.2 e 4.1.4, conforme será descrito nos tópicos subsequentes.

4.2.1 Tensões e correntes de curto-circuito do Sistema-57

Para otimizar a análise das tensões e correntes de curto-circuito no Sistema-57, foi utilizado o mesmo *dashboard* no Microsoft Excel descrito no tópico 4.1.1. Assim como no Sistema-10, os dados de tensões e correntes de falta de cada barra foram obtidos a partir do relatório gerado no estudo macro do ANAFAS.

4.2.2 Resultados das análises das tensões e correntes de curto-circuito do Sistema-57

A partir da análise dos valores obtidos através do *dashboard* foi possível comprovar comportamentos similares aos descritos no item 4.1.2, conforme será mostrado a seguir. Assim como feito anteriormente, ao fim de cada tipo de curto-circuito são mostrados os resultados do cálculo de erro relativo.

Falta Monofásica: ligação entre a fase A e o terra. O curto monofásico é caracterizado pelas três afirmações descritas em 4.1.2. Os resultados dos cálculos de erro relativo de acordo com as três afirmações são mostrados na Tabela 4-4.

Tabela 4-4: Erros relativos das tensões e correntes de falta monofásica no Sistema-

57

Tipo de falta	Barra	Afirmação	Valor Calculado	Valor ANAFAS	Erro Relativo
Monofásica	1	I	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	1	II	59.663,00	59.663,00	0,00%
Monofásica	1	III	54,70	54,70	0,00%
Monofásica	2	I	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	2	II	58.025,67	58.026,00	0,00%
Monofásica	2	III	54,79	54,80	-0,01%
Monofásica	3	I	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	3	II	58.635,67	58.636,00	0,00%
Monofásica	3	III	54,79	54,70	0,16%
Monofásica	4	I	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	4	II	9.901,00	9.901,00	0,00%
Monofásica	4	III	58,21	58,20	0,02%
Monofásica	5	I	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	5	II	3.899,00	3.899,00	0,00%
Monofásica	5	III	50,56	50,50	0,12%
Monofásica	6	I	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	6	II	58.103,33	58.103,00	0,00%
Monofásica	6	III	54,70	54,70	0,00%

Monofásica	7	I	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	7	II	9.292,67	9.293,00	0,00%
Monofásica	7	III	61,12	61,10	0,03%
Monofásica	8	I	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	8	II	58.482,33	58.482,00	0,00%
Monofásica	8	III	54,50	54,60	-0,18%
Monofásica	9	I	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	9	II	59.136,33	59.136,00	0,00%
Monofásica	9	III	54,09	54,10	-0,01%
Monofásica	10	I	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	10	II	2.717,33	2.717,00	0,01%
Monofásica	10	III	45,75	45,80	-0,11%
Monofásica	11	I	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	11	II	3.536,33	3.536,00	0,01%
Monofásica	11	III	49,00	49,00	0,00%
Monofásica	12	I	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	12	II	85.604,67	85.605,00	0,00%
Monofásica	12	III	42,40	42,30	0,23%
Monofásica	13	I	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	13	II	8.387,00	8.387,00	0,00%
Monofásica	13	III	51,27	51,20	0,13%
Monofásica	14	I	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	14	II	4.246,33	4.246,00	0,01%
Monofásica	14	III	53,51	53,40	0,21%
Monofásica	15	I	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	15	II	9.832,67	9.833,00	0,00%
Monofásica	15	III	54,80	54,80	-0,01%
Monofásica	16	I	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	16	II	4.330,33	4.330,00	0,01%
Monofásica	16	III	49,58	49,50	0,15%
Monofásica	17	I	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	17	II	7.515,67	7.516,00	0,00%
Monofásica	17	III	56,20	56,20	0,00%

Monofásica	18	I	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	18	II	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	18	III	19,90	19,90	0,00%
Monofásica	19	I	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	19	II	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	19	III	19,90	19,90	0,00%
Monofásica	20	I	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	20	II	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	20	III	19,90	19,90	0,00%
Monofásica	21	I	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	21	II	52,00	52,00	0,00%
Monofásica	21	III	39,50	39,50	0,00%
Monofásica	22	I	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	22	II	52,33	52,00	0,64%
Monofásica	22	III	39,59	39,60	-0,03%
Monofásica	23	I	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	23	II	52,33	52,00	0,64%
Monofásica	23	III	39,59	39,60	-0,03%
Monofásica	24	I	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	24	II	52,00	52,00	0,00%
Monofásica	24	III	39,49	39,50	-0,03%
Monofásica	25	I	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	25	II	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	25	III	8,00	8,00	0,00%
Monofásica	26	I	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	26	II	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	26	III	19,90	19,90	0,00%
Monofásica	27	I	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	27	II	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	27	III	19,90	19,90	0,00%
Monofásica	28	I	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	28	II	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	28	III	19,90	19,90	0,00%

Monofásica	29	I	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	29	II	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	29	III	19,90	19,90	0,00%
Monofásica	30	I	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	30	II	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	30	III	8,00	8,00	0,00%
Monofásica	31	I	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	31	II	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	31	III	8,00	8,00	0,00%
Monofásica	32	I	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	32	II	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	32	III	8,00	8,00	0,00%
Monofásica	33	I	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	33	II	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	33	III	8,00	8,00	0,00%
Monofásica	34	I	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	34	II	50,67	51,00	-0,66%
Monofásica	34	III	38,98	39,00	-0,06%
Monofásica	35	I	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	35	II	51,00	51,00	0,00%
Monofásica	35	III	39,18	39,20	-0,04%
Monofásica	36	I	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	36	II	51,67	52,00	-0,65%
Monofásica	36	III	39,38	39,40	-0,05%
Monofásica	37	I	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	37	II	52,00	52,00	0,00%
Monofásica	37	III	39,48	39,40	0,21%
Monofásica	38	I	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	38	II	52,67	53,00	-0,63%
Monofásica	38	III	39,69	39,70	-0,03%
Monofásica	39	I	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	39	II	51,67	52,00	-0,65%
Monofásica	39	III	39,38	39,40	-0,05%

Monofásica	40	I	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	40	II	51,33	51,00	0,65%
Monofásica	40	III	39,28	39,30	-0,06%
Monofásica	41	I	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	41	II	42,33	42,00	0,79%
Monofásica	41	III	19,88	19,90	-0,10%
Monofásica	42	I	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	42	II	42,00	42,00	0,00%
Monofásica	42	III	19,79	19,80	-0,06%
Monofásica	43	I	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	43	II	42,33	42,00	0,79%
Monofásica	43	III	19,90	19,90	0,00%
Monofásica	44	I	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	44	II	52,33	52,00	0,64%
Monofásica	44	III	39,59	39,60	-0,03%
Monofásica	45	I	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	45	II	52,33	52,00	0,64%
Monofásica	45	III	39,67	39,70	-0,08%
Monofásica	46	I	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	46	II	52,33	52,00	0,64%
Monofásica	46	III	39,67	39,70	-0,06%
Monofásica	47	I	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	47	II	52,33	52,00	0,64%
Monofásica	47	III	39,69	39,70	-0,03%
Monofásica	48	I	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	48	II	52,67	53,00	-0,63%
Monofásica	48	III	39,69	39,70	-0,03%
Monofásica	49	I	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	49	II	53,00	53,00	0,00%
Monofásica	49	III	39,79	39,80	-0,02%
Monofásica	50	I	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	50	II	52,00	52,00	0,00%
Monofásica	50	III	39,49	39,50	-0,03%

Monofásica	51	I	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	51	II	52,33	52,00	0,64%
Monofásica	51	III	39,65	39,60	0,13%
Monofásica	52	I	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	52	II	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	52	III	19,90	19,90	0,00%
Monofásica	53	I	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	53	II	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	53	III	19,90	19,90	0,00%
Monofásica	54	I	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	54	II	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	54	III	19,90	19,90	0,00%
Monofásica	55	I	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	55	II	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	55	III	19,90	19,90	0,00%
Monofásica	56	I	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	56	II	42,00	42,00	0,00%
Monofásica	56	III	19,79	19,80	-0,07%
Monofásica	57	I	0,00	0,00	0,00%
Monofásica	57	II	41,67	42,00	-0,80%
Monofásica	57	III	19,78	19,70	0,40%

Fonte: Da autora

É visto que os erros relativos descritos na Tabela 4-4 não ultrapassam o valor de 0,8%, dessa forma, pode-se afirmar que o Sistema-57 apresenta comportamento das grandezas elétricas de tensão e corrente de falta semelhante ao Sistema-10.

Falta Bifásica: ligação entre as fases B e C. O curto bifásico é caracterizado pelas quatro afirmações descritas no item 4.1.2.

Na falta bifásica foi constatado um comportamento atípico no Sistema-57. As barras 18, 26 a 29 e 54 a 55 apresentaram tensão de sequência zero. Conseqüentemente, as afirmações I e III para falta bifásica no Sistema-10, não são verdadeiras no Sistema-57. Apesar disso, a seguinte relação é obedecida pelo

sistema: a soma de todas as tensões de sequência é igual a tensão de fase A, comportamento que é descrito na matriz descrita em (22). Considerando as afirmações II e IV, a última mencionada, denominada de III-S57 (afirmação III para o Sistema-57), e a afirmação I-S57, onde somente a corrente de sequência zero e de fase A são nulas, tem-se erros abaixo de 0,5%, conforme são mostrados na Tabela 4-5.

Tabela 4-5: Erros relativos das tensões e correntes de falta bifásica no Sistema-57

Tipo de falta	Barra	Afirmação	Valor Calculado	Valor ANAFAS	Erro Relativo
Bifásica	1	I-57	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	1	II	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	1	III-57	79,60	79,70	-0,13%
Bifásica	1	IV	164.669,53	164.670,00	0,00%
Bifásica	2	I-57	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	2	II	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	2	III-57	79,60	79,70	-0,13%
Bifásica	2	IV	160.822,65	160.822,00	0,00%
Bifásica	3	I-57	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	3	II	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	3	III-57	79,60	79,70	-0,13%
Bifásica	3	IV	162.116,49	162.116,00	0,00%
Bifásica	4	I-57	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	4	II	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	4	III-57	79,60	79,70	-0,13%
Bifásica	4	IV	31.620,32	31.620,00	0,00%
Bifásica	5	I-57	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	5	II	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	5	III-57	79,60	79,70	-0,13%
Bifásica	5	IV	9.191,99	9.192,00	0,00%
Bifásica	6	I-57	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	6	II	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	6	III-57	79,60	79,70	-0,13%
Bifásica	6	IV	160.805,33	160.806,00	0,00%

Bifásica	7	I-57	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	7	II	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	7	III-57	79,60	79,70	-0,13%
Bifásica	7	IV	33.608,71	33.609,00	0,00%
Bifásica	8	I-57	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	8	II	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	8	III-57	79,60	79,70	-0,13%
Bifásica	8	IV	160.633,86	160.634,00	0,00%
Bifásica	9	I-57	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	9	II	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	9	III-57	79,60	79,70	-0,13%
Bifásica	9	IV	159.317,50	159.317,00	0,00%
Bifásica	10	I-57	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	10	II	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	10	III-57	79,60	79,70	-0,13%
Bifásica	10	IV	5.516,58	5.517,00	-0,01%
Bifásica	11	I-57	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	11	II	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	11	III-57	79,60	79,70	-0,13%
Bifásica	11	IV	7.941,45	7.941,00	0,01%
Bifásica	12	I-57	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	12	II	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	12	III-57	79,60	79,70	-0,13%
Bifásica	12	IV	158.089,47	158.090,00	0,00%
Bifásica	13	I-57	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	13	II	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	13	III-57	79,60	79,70	-0,13%
Bifásica	13	IV	20.323,88	20.323,00	0,00%
Bifásica	14	I-57	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	14	II	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	14	III-57	79,60	79,70	-0,13%
Bifásica	14	IV	11.159,60	11.160,00	0,00%
Bifásica	15	I-57	0,00	0,00	0,00%

Bifásica	15	II	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	15	III-57	79,60	79,70	-0,13%
Bifásica	15	IV	26.987,08	26.986,00	0,00%
Bifásica	16	I-57	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	16	II	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	16	III-57	79,60	79,70	-0,13%
Bifásica	16	IV	9.903,87	9.903,00	0,01%
Bifásica	17	I-57	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	17	II	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	17	III-57	79,60	79,70	-0,13%
Bifásica	17	IV	21.376,97	21.377,00	0,00%
Bifásica	18	I-57	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	18	II	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	18	III-57	30,00	29,90	0,33%
Bifásica	18	IV	25.435,17	25.436,00	0,00%
Bifásica	19	I-57	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	19	II	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	19	III-57	20,00	19,90	0,50%
Bifásica	19	IV	12.018,70	12.019,00	0,00%
Bifásica	20	I-57	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	20	II	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	20	III-57	20,00	19,90	0,50%
Bifásica	20	IV	9.240,49	9.241,00	-0,01%
Bifásica	21	I-57	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	21	II	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	21	III-57	39,80	39,80	0,00%
Bifásica	21	IV	5.031,61	5.032,00	-0,01%
Bifásica	22	I-57	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	22	II	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	22	III-57	39,80	39,80	0,00%
Bifásica	22	IV	7.570,79	7.570,00	0,01%
Bifásica	23	I-57	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	23	II	0,00	0,00	0,00%

Bifásica	23	III-57	39,80	39,80	0,00%
Bifásica	23	IV	6.517,71	6.519,00	-0,02%
Bifásica	24	I-57	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	24	II	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	24	III-57	39,80	39,80	0,00%
Bifásica	24	IV	5.326,06	5.326,00	0,00%
Bifásica	25	I-57	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	25	II	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	25	III-57	8,00	8,00	0,00%
Bifásica	25	IV	3.845,15	3.845,00	0,00%
Bifásica	26	I-57	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	26	II	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	26	III-57	30,00	29,90	0,33%
Bifásica	26	IV	8.474,92	8.475,00	0,00%
Bifásica	27	I-57	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	27	II	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	27	III-57	30,00	29,90	0,33%
Bifásica	27	IV	4.082,44	4.082,00	0,01%
Bifásica	28	I-57	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	28	II	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	28	III-57	30,00	29,90	0,33%
Bifásica	28	IV	11.175,19	11.174,00	0,01%
Bifásica	29	I-57	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	29	II	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	29	III-57	30,00	29,90	0,33%
Bifásica	29	IV	20.256,33	20.257,00	0,00%
Bifásica	30	I-57	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	30	II	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	30	III-57	8,00	8,00	0,00%
Bifásica	30	IV	3.594,01	3.593,00	0,03%
Bifásica	31	I-57	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	31	II	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	31	III-57	8,00	8,00	0,00%

Bifásica	31	IV	3.349,79	3.350,00	-0,01%
Bifásica	32	I-57	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	32	II	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	32	III-57	8,00	8,00	0,00%
Bifásica	32	IV	3.936,95	3.937,00	0,00%
Bifásica	33	I-57	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	33	II	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	33	III-57	8,00	8,00	0,00%
Bifásica	33	IV	3.756,82	3.756,00	0,02%
Bifásica	34	I-57	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	34	II	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	34	III-57	39,80	39,80	0,00%
Bifásica	34	IV	2.094,05	2.094,00	0,00%
Bifásica	35	I-57	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	35	II	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	35	III-57	39,80	39,80	0,00%
Bifásica	35	IV	2.747,03	2.747,00	0,00%
Bifásica	36	I-57	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	36	II	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	36	III-57	39,80	39,80	0,00%
Bifásica	36	IV	3.599,20	3.598,00	0,03%
Bifásica	37	I-57	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	37	II	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	37	III-57	39,80	39,80	0,00%
Bifásica	37	IV	4.382,09	4.381,00	0,02%
Bifásica	38	I-57	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	38	II	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	38	III-57	39,80	39,80	0,00%
Bifásica	38	IV	10.381,91	10.381,00	0,01%
Bifásica	39	I-57	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	39	II	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	39	III-57	39,80	39,80	0,00%
Bifásica	39	IV	3.548,97	3.549,00	0,00%

Bifásica	40	I-57	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	40	II	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	40	III-57	39,80	39,80	0,00%
Bifásica	40	IV	2.960,07	2.961,00	-0,03%
Bifásica	41	I-57	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	41	II	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	41	III-57	20,00	19,90	0,50%
Bifásica	41	IV	14.277,29	14.278,00	0,00%
Bifásica	42	I-57	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	42	II	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	42	III-57	20,00	19,90	0,50%
Bifásica	42	IV	4.214,08	4.214,00	0,00%
Bifásica	43	I-57	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	43	II	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	43	III-57	20,00	19,90	0,50%
Bifásica	43	IV	24.260,84	24.261,00	0,00%
Bifásica	44	I-57	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	44	II	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	44	III-57	39,80	39,80	0,00%
Bifásica	44	IV	7.498,05	7.499,00	-0,01%
Bifásica	45	I-57	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	45	II	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	45	III-57	39,80	39,80	0,00%
Bifásica	45	IV	8.601,36	8.601,00	0,00%
Bifásica	46	I-57	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	46	II	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	46	III-57	39,80	39,80	0,00%
Bifásica	46	IV	9.839,78	9.839,00	0,01%
Bifásica	47	I-57	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	47	II	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	47	III-57	39,80	39,80	0,00%
Bifásica	47	IV	9.256,08	9.256,00	0,00%
Bifásica	48	I-57	0,00	0,00	0,00%

Bifásica	48	II	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	48	III-57	39,80	39,80	0,00%
Bifásica	48	IV	10.506,62	10.507,00	0,00%
Bifásica	49	I-57	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	49	II	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	49	III-57	39,80	39,80	0,00%
Bifásica	49	IV	23.722,17	23.722,00	0,00%
Bifásica	50	I-57	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	50	II	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	50	III-57	39,80	39,80	0,00%
Bifásica	50	IV	5.772,93	5.773,00	0,00%
Bifásica	51	I-57	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	51	II	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	51	III-57	39,80	39,80	0,00%
Bifásica	51	IV	6.491,73	6.491,00	0,01%
Bifásica	52	I-57	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	52	II	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	52	III-57	20,00	19,90	0,50%
Bifásica	52	IV	2.568,63	2.569,00	-0,01%
Bifásica	53	I-57	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	53	II	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	53	III-57	20,00	19,90	0,50%
Bifásica	53	IV	2.850,96	2.851,00	0,00%
Bifásica	54	I-57	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	54	II	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	54	III-57	30,00	29,90	0,33%
Bifásica	54	IV	4.324,93	4.324,00	0,02%
Bifásica	55	I-57	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	55	II	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	55	III-57	30,00	29,90	0,33%
Bifásica	55	IV	12.105,30	12.105,00	0,00%
Bifásica	56	I-57	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	56	II	0,00	0,00	0,00%

Bifásica	56	III-57	20,00	19,90	0,50%
Bifásica	56	IV	4.394,21	4.394,00	0,00%
Bifásica	57	I-57	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	57	II	0,00	0,00	0,00%
Bifásica	57	III-57	20,00	19,90	0,50%
Bifásica	57	IV	2.852,69	2.853,00	-0,01%

Fonte: Da autora

Sabe-se que em faltas bifásicas não há componentes de sequência zero devido a ausência do terra. Entretanto, nos casos de redes grandes e não simétricas é possível que um determinado tipo de curto-circuito apresente características de outro tipo de curto.

Falta Bifásica com terra: as fases B e C estão ligadas entre si e unidas ao terra. O curto bifásico-terra é caracterizado pelas três afirmações descritas no item 4.1.2. Os resultados dos cálculos de acordo com as três afirmações são mostrados na Tabela 4-6.

Tabela 4-6: Erros relativos das tensões e correntes de falta bifásica terra no Sistema-57

Tipo de falta	Barra	Afirmação	Valor	Valor	Erro
			Calculado	ANAFAS	Relativo
Bifásica Terra	1	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	1	II	84,00	84,10	-0,12%
Bifásica Terra	1	III	169.221,31	169.065,00	0,09%
Bifásica Terra	2	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	2	II	84,30	84,40	-0,12%
Bifásica Terra	2	III	163.889,47	163.800,00	0,05%
Bifásica Terra	3	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	3	II	84,30	84,20	0,12%
Bifásica Terra	3	III	165.657,56	165.870,00	-0,13%
Bifásica Terra	4	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	4	II	93,00	93,00	0,00%
Bifásica Terra	4	III	24.900,00	24.861,00	0,16%
Bifásica Terra	5	I	0,00	0,00	0,00%

Bifásica Terra	5	II	72,00	72,00	0,00%
Bifásica Terra	5	III	12.946,67	12.939,00	0,06%
Bifásica Terra	6	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	6	II	84,30	84,30	0,00%
Bifásica Terra	6	III	164.230,82	164.247,00	-0,01%
Bifásica Terra	7	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	7	II	98,70	98,70	0,00%
Bifásica Terra	7	III	21.403,55	21.405,00	-0,01%
Bifásica Terra	8	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	8	II	83,70	83,80	-0,12%
Bifásica Terra	8	III	166.511,06	166.440,00	0,04%
Bifásica Terra	9	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	9	II	82,50	82,40	0,12%
Bifásica Terra	9	III	171.517,15	171.291,00	0,13%
Bifásica Terra	10	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	10	II	50,70	50,60	0,20%
Bifásica Terra	10	III	11.259,52	11.253,00	0,06%
Bifásica Terra	11	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	11	II	66,00	65,90	0,15%
Bifásica Terra	11	III	12.523,51	12.528,00	-0,04%
Bifásica Terra	12	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	12	II	25,50	25,50	0,00%
Bifásica Terra	12	III	432.654,29	432.651,00	0,00%
Bifásica Terra	13	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	13	II	73,50	73,60	-0,14%
Bifásica Terra	13	III	27.113,41	27.105,00	0,03%
Bifásica Terra	14	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	14	II	80,70	80,80	-0,12%
Bifásica Terra	14	III	12.591,23	12.576,00	0,12%
Bifásica Terra	15	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	15	II	85,80	85,70	0,12%
Bifásica Terra	15	III	27.623,35	27.618,00	0,02%
Bifásica Terra	16	I	0,00	0,00	0,00%

Bifásica Terra	16	II	67,50	67,50	0,00%
Bifásica Terra	16	III	14.998,76	15.006,00	-0,05%
Bifásica Terra	17	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	17	II	90,30	90,30	0,00%
Bifásica Terra	17	III	20.052,57	20.067,00	-0,07%
Bifásica Terra	18	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	18	II	30,00	29,90	0,33%
Bifásica Terra	18	III	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	19	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	19	II	30,00	29,90	0,33%
Bifásica Terra	19	III	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	20	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	20	II	30,00	29,90	0,33%
Bifásica Terra	20	III	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	21	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	21	II	59,40	59,50	-0,17%
Bifásica Terra	21	III	79,07	78,00	1,35%
Bifásica Terra	22	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	22	II	59,70	59,60	0,17%
Bifásica Terra	22	III	83,13	78,00	6,17%
Bifásica Terra	23	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	23	II	59,70	59,60	0,17%
Bifásica Terra	23	III	72,03	78,00	-8,29%
Bifásica Terra	24	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	24	II	59,40	59,50	-0,17%
Bifásica Terra	24	III	77,85	78,00	-0,20%
Bifásica Terra	25	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	25	II	12,00	12,00	0,00%
Bifásica Terra	25	III	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	26	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	26	II	30,00	29,90	0,33%
Bifásica Terra	26	III	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	27	I	0,00	0,00	0,00%

Bifásica Terra	27	II	30,00	29,90	0,33%
Bifásica Terra	27	III	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	28	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	28	II	30,00	29,90	0,33%
Bifásica Terra	28	III	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	29	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	29	II	30,00	29,90	0,33%
Bifásica Terra	29	III	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	30	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	30	II	12,00	12,00	0,00%
Bifásica Terra	30	III	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	31	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	31	II	12,00	12,00	0,00%
Bifásica Terra	31	III	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	32	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	32	II	12,00	12,00	0,00%
Bifásica Terra	32	III	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	33	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	33	II	12,00	12,00	0,00%
Bifásica Terra	33	III	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	34	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	34	II	59,10	59,10	0,00%
Bifásica Terra	34	III	79,08	78,00	1,36%
Bifásica Terra	35	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	35	II	59,40	59,30	0,17%
Bifásica Terra	35	III	78,79	78,00	1,00%
Bifásica Terra	36	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	36	II	59,40	59,40	0,00%
Bifásica Terra	36	III	78,24	78,00	0,30%
Bifásica Terra	37	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	37	II	59,40	59,50	-0,17%
Bifásica Terra	37	III	79,85	78,00	2,32%
Bifásica Terra	38	I	0,00	0,00	0,00%

Bifásica Terra	38	II	59,70	59,60	0,17%
Bifásica Terra	38	III	94,53	81,00	14,32%
Bifásica Terra	39	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	39	II	59,40	59,40	0,00%
Bifásica Terra	39	III	77,54	78,00	-0,60%
Bifásica Terra	40	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	40	II	59,40	59,30	0,17%
Bifásica Terra	40	III	80,58	78,00	3,20%
Bifásica Terra	41	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	41	II	29,70	29,80	-0,34%
Bifásica Terra	41	III	62,67	63,00	-0,52%
Bifásica Terra	42	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	42	II	29,70	29,80	-0,34%
Bifásica Terra	42	III	62,82	63,00	-0,29%
Bifásica Terra	43	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	43	II	30,00	29,90	0,33%
Bifásica Terra	43	III	53,68	63,00	-17,35%
Bifásica Terra	44	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	44	II	59,70	59,60	0,17%
Bifásica Terra	44	III	83,71	78,00	6,82%
Bifásica Terra	45	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	45	II	59,70	59,60	0,17%
Bifásica Terra	45	III	73,86	78,00	-5,61%
Bifásica Terra	46	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	46	II	59,70	59,60	0,17%
Bifásica Terra	46	III	78,99	78,00	1,26%
Bifásica Terra	47	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	47	II	59,70	59,60	0,17%
Bifásica Terra	47	III	70,42	78,00	-10,76%
Bifásica Terra	48	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	48	II	59,70	59,60	0,17%
Bifásica Terra	48	III	77,82	78,00	-0,23%
Bifásica Terra	49	I	0,00	0,00	0,00%

Bifásica Terra	49	II	59,70	59,70	0,00%
Bifásica Terra	49	III	89,14	81,00	9,13%
Bifásica Terra	50	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	50	II	59,40	59,50	-0,17%
Bifásica Terra	50	III	74,50	78,00	-4,70%
Bifásica Terra	51	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	51	II	59,70	59,60	0,17%
Bifásica Terra	51	III	79,90	78,00	2,38%
Bifásica Terra	52	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	52	II	30,00	29,90	0,33%
Bifásica Terra	52	III	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	53	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	53	II	30,00	29,90	0,33%
Bifásica Terra	53	III	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	54	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	54	II	30,00	29,90	0,33%
Bifásica Terra	54	III	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	55	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	55	II	30,00	29,90	0,33%
Bifásica Terra	55	III	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	56	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	56	II	29,70	29,80	-0,34%
Bifásica Terra	56	III	58,41	63,00	-7,86%
Bifásica Terra	57	I	0,00	0,00	0,00%
Bifásica Terra	57	II	29,70	29,70	0,00%
Bifásica Terra	57	III	64,04	63,00	1,62%

Fonte: Da autora

É visto que os erros relativos descritos na Tabela 4-6 não ultrapassam o valor de 17,35%, onde os maiores valores de erro pertencem a afirmação III.

Falta Trifásica: as fases A, B e C estão ligadas entre si. O curto trifásico é caracterizado pelas quatro afirmações descritas no item 4.1.2. Assim como no Sistema-10, os cálculos de erros relativos de acordo com as quatro afirmações

descritas foram todos de 0%, por isso é dispensável a apresentação da tabela de erros relativos.

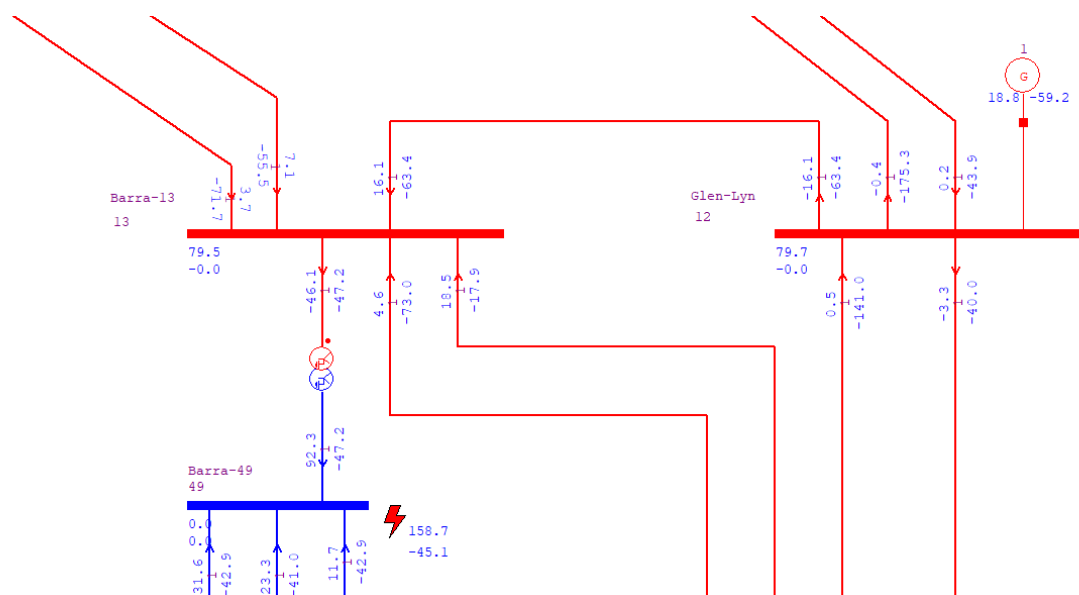
4.2.3 Realização de três pontos de falta no Sistema-57

Assim como no tópico 4.1.3, o objetivo deste tópico é realizar um estudo com uma visão geral do Sistema-57. Para isso, foram realizados estudos individuais de faltas nas barras 26, 49 e 53, com todos os tipos de falta, utilizando o mesmo critério de escolha de barra citado em 4.1.3. Devido as grandes proporções do Sistema-57, a área de estudo será delimitada a aproximadamente duas barras adjacentes do ponto de falta.

4.2.1 Resultados das análises dos três pontos de falta no Sistema-57

A Figura 4-3 mostra a simulação de uma falta monofásica na barra 49 e os dados de tensão e corrente da fase A.

Figura 4-3: Simulação de falta monofásica no barramento 49 do Sistema-57



Fonte: Da autora

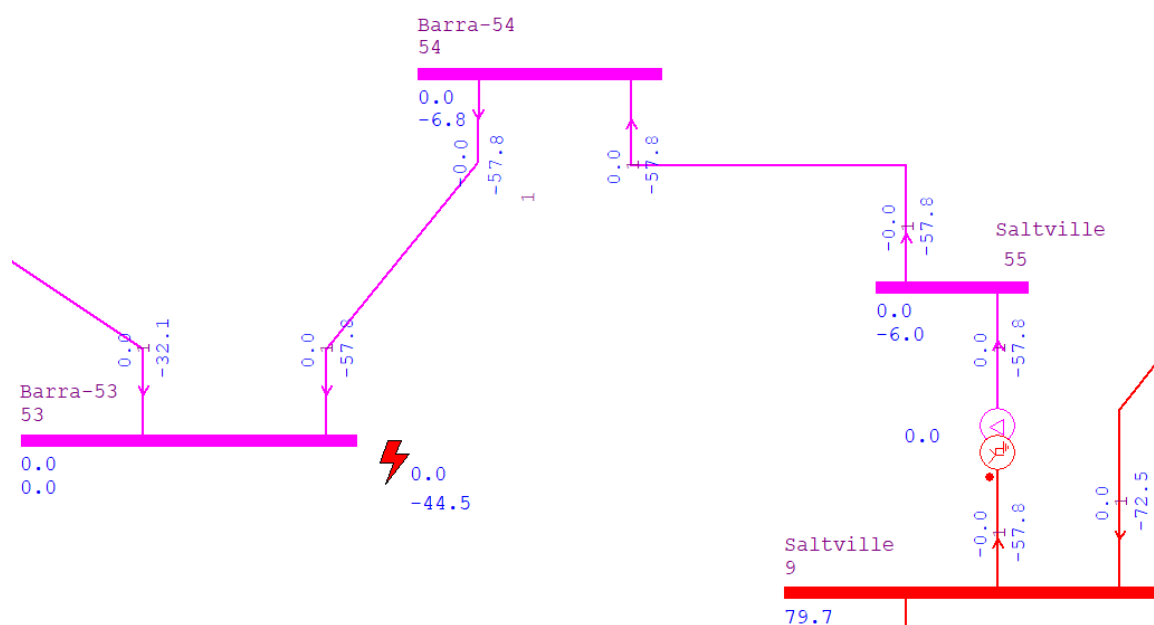
Como pode ser observado, os mesmos comportamentos descritos no Sistema-10 é repetido, quais sejam: a corrente diminui conforme se distancia do ponto

de falta, a tensão aumenta conforme se aproxima do gerador e, quando a falta envolve o terra, a corrente percorre a partir do gerador até o ponto de falta.

Foi observado, com o auxílio dos relatórios de dados de curto-circuito, que todas as barras localizadas no lado da ligação em delta do transformador apresentaram corrente de curto-circuito monofásico nula na barra que sofre a falta. Tal fato é explicado devido impedância da conexão em delta do transformador ser infinita, conforme é explicado no item 2.4.2.

A Figura 4-4 mostra a simulação de uma falta monofásica na barra 53 e os dados de corrente e tensão referentes a fase A.

Figura 4-4: Simulação de falta monofásica no barramento 53 do Sistema-57

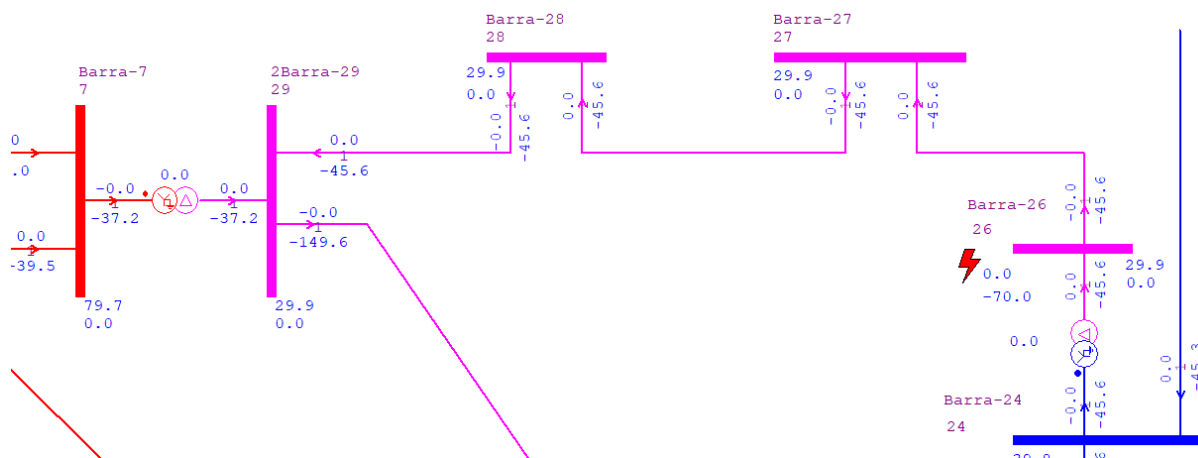


Fonte: Da autora

Como pode ser observado, as correntes de curto-circuito monofásico ao longo de todas as barras pertencentes a conexão delta do transformador são nulas.

É explicado em (RIBEIRO e MENDES, 2008) que a conexão Estrela Aterrada e Delta dos transformadores exerce grande influência na tensão de sequência zero de curtos-circuitos que não envolvem o terra, ou seja, faltas bifásicas. A Figura 4-5 mostra a simulação de uma falta bifásica na barra 26 e os dados de corrente e tensão de sequência zero.

Figura 4-5: Simulação de falta bifásica no barramento 26 do Sistema-57

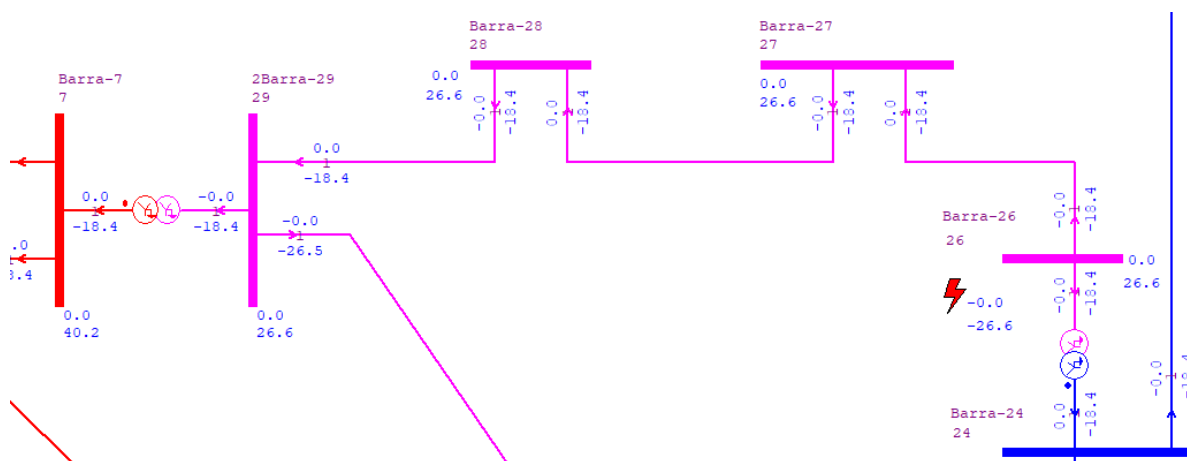


Fonte: Da autora

Como pode ser observado, devido a ausência do terra no tipo de falta não deveria existir componente de sequência zero. Entretanto, devido a influência das ligações dos transformadores, o circuito apresenta tensões de sequência zero.

Para comprovar a influência dessa conexão de transformador empiricamente, é feita a mesma simulação mas, dessa vez, utilizando transformadores com ligação estrela aterrada nos enrolamentos primários e secundários. O resultado da simulação é visto na Figura 4-6 e como pode ser observado não há componente de sequência zero na falta bifásica, conforme o esperado.

Figura 4-6: Simulação de falta bifásica no barramento 26 do Sistema-57 com transformadores alterados



Fonte: Da autora

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram apresentados os comportamentos das variáveis de tensão e corrente de curto-circuito em dois sistemas elétricos de potência relacionando os quatro tipos de falta ao longo de todas as barras dos sistemas com o auxílio da ferramenta computacional ANAFAS. Também foram apresentados os erros relativos referentes as relações descritas no Capítulo 2. Por fim, foram realizados estudos de curto-circuito em três pontos diferentes dos sistemas com o intuito de demonstrar o comportamento das barras adjacentes aos pontos de falta.

Com relação aos erros relativos apresentados nos itens 4.1.2 e 4.2.2, em ambos os sistemas a falta trifásica obedece todos os comportamentos descritos por meio de afirmações, apresentando erros nulos. Na falta monofásica, os erros relativos apresentados no Sistema-10 apresentam o valor de até 2,9% enquanto que no Sistema-57 apresentam o valor de até 0,8%. Na falta bifásica-terra, os erros relativos chegaram até 11,82% no Sistema-10 e 17,35% no Sistema-57, em ambos os maiores valores de erro pertenciam a Afirmação III, sendo assim, os sistemas tiveram comportamento semelhantes na falta bifásica com terra entretanto apresentaram valores de erro elevados. Na falta bifásica, comportamentos diferentes entre os sistemas com relação a tensão foram constatados, o Sistema-57 apresentou tensão de sequência zero, um comportamento atípico para esse tipo de curto-circuito que surgiu devido ligação dos enrolamentos dos transformadores. Por essa razão, as primeiras e terceira afirmações foram adaptadas para o Sistema-57. Depois dessa alteração, foi constatado erros relativos de até 0,1% no Sistema-10 e de 0,5% no Sistema-57. Os elevados valores de erros relativos são objetos de estudo futuro devido a falta de tempo hábil na realização deste trabalho.

Em relação aos três diferentes pontos de falta no Sistema-10, foram observados três comportamentos nas barras adjacentes aos pontos: diminuição da corrente conforme o aumento da distância do ponto de falta, tensões nas barras aumentavam conforme se aproximavam do gerador do sistema e quando a falta possuía terra, a corrente tendia a percorrer a partir do gerador de menor valor de corrente para o ponto de falta.

Com relação aos três diferentes pontos de falta no Sistema-57, foi observado, além dos três comportamentos descritos acima, que no curto-circuito

monofásico as barras ligadas ao lado Delta do transformador apresentaram correntes de fase A nulas na barra que sofreu a falta. Tal fato ocorre devido a impedância da ligação Delta ser infinita.

Por conseguinte, os objetivos propostos foram atingidos e o presente trabalho permitiu o estudo do comportamento da tensão e corrente de curto-circuito dos sistemas de potência propostos através da modelagem computacional, realização dos estudos de curto-circuito e percepções e análises das faltas simultâneas originadas a partir de diferentes tipos de falta.

5.1 Trabalhos Futuros

Por fim, abaixo são descritas sugestões para aperfeiçoamento dos estudos de faltas simultâneas:

- Realizar simulação de faltas nas linhas de transmissão;
- Realizar estudos da influência do comprimento das linhas de transmissão;
- Aumentar o número de pontos de falta;
- Analisar e constatar os motivos dos elevados valores de erros das faltas monofásica e bifásica-terra.

BIBLIOGRAFIA

- ANEEL. **Entendendo a Tarifa**, 2017. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/conteudo-educativo/-/asset_publisher/vE6ahPFxsWHt/content/texto-explicativo/654800?inheritRedirect=false>. Acesso em: 10 Junho 2018.
- BROWN, H. E. **Grandes sistemas elétricos: métodos matriciais**. Rio de Janeiro: LTC, 1977.
- COMPANY, W. E. **Electrical Transmission and Distribution Reference Book**. Pennsylvania: Central Station Engineers of the Westinghouse, 1964.
- CPFL. **Análise Estatística das Atuações das Proteções de Linhas de Transmissão em 1995**. [S.l.]. 1996. (Relatório OSPP-002/96).
- HIRT, W. E. D. **Análise de curto-circuito e fundamentos de tensão em sistemas elétricas de potência: Um estudo aplicado à expansão da geração no Rio Grande do Sul**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2015.
- KINDERMANN, G. **Curto-Circuito**. 2ª. ed. Porto Alegre: Sagra Luzzatto, 1997.
- MME. Secretária de Energia Elétrica - Minas e Energia. **Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro**, 2017. Disponível em: <www.mme.gov.br/10584/0fc4a73f-36c6-4d4e-8959-7890711d4fb0>. Acesso em: 10 Junho 2018.
- NASCIMENTO, R. Marketing por dados. **O que é dashboard?**, 19 Maio 2017. Disponível em: <<http://marketingpordados.com/analise-de-dados/o-que-e-dashboard-%F0%9F%93%8A/>>. Acesso em: 13 Novembro 2018.
- OLIVEIRA, W. M. D. **Análise do desempenho de compensações fixas em sistemas elétricos de potência com ênfase nos bancos de capacitores série**. Centro Universitário de Brasília. Brasília. 2018.
- ONS. **Estudos de Curto-circuito Período 2008-2011**, v. 2, 2009. ISSN ONS - 3/061/2009.
- ONS. **Procedimentos de Rede**, 2016. Disponível em: <<http://ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/procedimentos-de-rede/vigentes>>. Acesso em: 20 Junho 2018.

ONS. Mapas. **Sistema de Transmissão**, 2017. Disponível em: <<http://ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/mapas>>. Acesso em: 2018 Novembro 08.

RIBEIRO, N.; MENDES, W. XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica. **Influência das Conexões dos Transformadores de Potência na Propagação dos Afundamentos de Tensão pelo Sistema Elétrico**, Olinda, 2008. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/242618160_INFLUENCIA_DAS_CONEXOES_DOS_TRANSFORMADORES_DE_POTENCIA_NA_PROPAGACAO_DOS_AFUNDAMENTOS_DE_TENSAO_PELO_SISTEMA_ELETRICO>. Acesso em: 06 Novembro 2018.

SANTOS, T. A. D. **Estudo da proteção diferencial e de sobrecorrente da usina hidrelétrica de Coaracy-Nunes**. Universidade de Brasília. Brasília. 2015.

SATO, F. **Análise de curto-circuito em sistemas elétricos de potência**. Universidade Estadual de Campinas. São Paulo. 1976.

SATO, F.; FREITAS, W. **Análise de curto-circuito e princípios de proteção em sistemas de energia elétrica**. 1ª. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

SIQUEIRA, V. **Tutorial sobre o software de Análise de Falhas**. Universidade de Brasília. Brasília. 2017.

STEVENSON, W. D. **Elementos de análise do sistemas de potência**. 2ª. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

TLEIS, N. T. **Power Systems: Modelling and Fault Analysis**. Chennai: Elsevier, 2008.

ZANETTA, L. C. **Fundamentos de sistemas elétricos de potência**. 1ª. ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2005.

М.В.Хохлов, П. The Department of Energy. **Casos Testes** (Traduzido do Russo: Тестовые схемы), 2008. Disponível em: <http://energy.komisc.ru/dev/test_cases>. Acesso em: 10 Setembro 2018.

Anexo A

As tabelas a seguir mostram os resultados dos estudos macros realizados nas barras do Sistema-10.

A.1 Relatórios de Tensão e Corrente de curto-circuito monofásico do Sistema-10

Relatório de Tensão e Corrente de Curto-Circuito											
Barra	1		Falta:	Monofásica							
Tensão (KV)						Corrente (A)					
Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo	Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo
A	0,00	0,00	Zero	29,60	-179,60	A	164.076,00	-85,80	Zero	54.692,00	-85,80
B	82,30	-122,60	Positiva	54,60	0,10	B	0,00	0,00	Positiva	54.692,00	-85,80
C	81,80	122,90	Negativa	25,00	179,70	C	0,00	0,00	Negativa	54.692,00	-85,80

Relatório de Tensão e Corrente de Curto-Circuito											
Barra	12		Falta:	Monofásica							
Tensão (KV)						Corrente (A)					
Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo	Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo
A	0,00	0,00	Zero	4,90	166,80	A	245.476,00	-84,70	Zero	81.825,00	-84,70
B	67,70	-96,10	Positiva	42,20	-0,80	B	0,00	0,00	Positiva	81.825,00	-84,70
C	71,00	95,80	Negativa	37,50	-179,10	C	0,00	0,00	Negativa	81.825,00	-84,70

Relatório de Tensão e Corrente de Curto-Circuito											
Barra	13		Falta:	Monofásica							
Tensão (KV)						Corrente (A)					
Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo	Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo
A	0,00	0,00	Zero	23,10	168,60	A	7.868,00	-68,50	Zero	2.623,00	-68,50
B	70,80	-118,60	Positiva	51,20	-2,60	B	0,00	0,00	Positiva	2.623,00	-68,50
C	83,10	114,10	Negativa	28,60	-175,40	C	0,00	0,00	Negativa	2.623,00	-68,50

Relatório de Tensão e Corrente de Curto-Circuito											
Barra	15		Falta:	Monofásica							
Tensão (KV)						Corrente (A)					
Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo	Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo
A	0,00	0,00	Zero	17,40	164,70	A	5.660,00	-73,90	Zero	1.887,00	-73,90
B	67,00	-112,10	Positiva	48,30	-2,70	B	0,00	0,00	Positiva	1.887,00	-73,90
C	80,00	108,30	Negativa	31,50	-175,80	C	0,00	0,00	Negativa	1.887,00	-73,90

Relatório de Tensão e Corrente de Curto-Circuito											
Barra	16		Falta:	Monofásica							
Tensão (KV)						Corrente (A)					
Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo	Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo
A	0,00	0,00	Zero	19,50	-173,70	A	12.979,00	-51,60	Zero	4.326,00	-51,60
B	77,80	-111,90	Positiva	49,50	1,20	B	0,00	0,00	Positiva	4.326,00	-51,60
C	71,90	113,80	Negativa	30,20	178,00	C	0,00	0,00	Negativa	4.326,00	-51,60

Relatório de Tensão e Corrente de Curto-Circuito											
Barra	17		Falta: Monofásica								
Tensão (KV)						Corrente (A)					
Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo	Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo
A	0,00	0,00	Zero	33,80	-162,60	A	22.502,00	-40,40	Zero	7.501,00	-40,40
B	97,10	-119,90	Positiva	56,20	5,20	B	0,00	0,00	Positiva	7.501,00	-40,40
C	72,40	132,00	Negativa	24,20	167,90	C	0,00	0,00	Negativa	7.501,00	-40,40

Relatório de Tensão e Corrente de Curto-Circuito											
Barra	38		Falta: Monofásica								
Tensão (KV)						Corrente (A)					
Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo	Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo
A	0,00	0,00	Zero	39,70	179,90	A	35,00	-45,10	Zero	12,00	-45,10
B	68,70	-150,00	Positiva	39,70	-0,10	B	0,00	0,00	Positiva	12,00	-45,10
C	68,80	149,80	Negativa	0,10	-157,60	C	0,00	0,00	Negativa	12,00	-45,10

Relatório de Tensão e Corrente de Curto-Circuito											
Barra	44		Falta: Monofásica								
Tensão (KV)						Corrente (A)					
Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo	Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo
A	0,00	0,00	Zero	39,70	179,90	A	35,00	-45,10	Zero	12,00	-45,10
B	68,70	-150,00	Positiva	39,70	-0,10	B	0,00	0,00	Positiva	12,00	-45,10
C	68,80	149,80	Negativa	0,10	-155,40	C	0,00	0,00	Negativa	12,00	-45,10

Relatório de Tensão e Corrente de Curto-Circuito											
Barra	45		Falta: Monofásica								
Tensão (KV)						Corrente (A)					
Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo	Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo
A	0,00	0,00	Zero	39,70	179,90	A	35,00	-45,10	Zero	12,00	-45,10
B	68,80	-150,00	Positiva	39,80	-0,10	B	0,00	0,00	Positiva	12,00	-45,10
C	68,90	149,80	Negativa	0,10	-146,60	C	0,00	0,00	Negativa	12,00	-45,10

Relatório de Tensão e Corrente de Curto-Circuito											
Barra	49		Falta: Monofásica								
Tensão (KV)						Corrente (A)					
Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo	Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo
A	0,00	0,00	Zero	39,80	179,90	A	35,00	-45,10	Zero	12,00	-45,10
B	68,90	-150,00	Positiva	39,80	0,00	B	0,00	0,00	Positiva	12,00	-45,10
C	68,90	149,90	Negativa	0,00	0,00	C	0,00	0,00	Negativa	12,00	-45,10

A.2 Relatórios de Tensão e Corrente de curto-circuito bifásico do Sistema-10

Relatório de Tensão e Corrente de Curto-Circuito											
Barra	1		Falta: Bifásica								
Tensão (KV)						Corrente (A)					
Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo	Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo
A	79,70	0,00	Zero	0,00	0,00	A	0,00	0,00	Zero	0,00	0,00
B	39,80	180,00	Positiva	39,80	0,00	B	150.727,00	-175,60	Positiva	87.022,00	-85,60
C	39,80	180,00	Negativa	39,80	0,00	C	-150.727,00	-175,60	Negativa	-87.022,00	-85,60

Relatório de Tensão e Corrente de Curto-Circuito											
Barra	12		Falta: Bifásica								
Tensão (KV)						Corrente (A)					
Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo	Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo
A	79,70	0,00	Zero	0,00	0,00	A	0,00	0,00	Zero	0,00	0,00
B	39,80	180,00	Positiva	39,80	0,00	B	150.727,00	-175,60	Positiva	87.022,00	-85,60
C	39,80	180,00	Negativa	39,80	0,00	C	-150.727,00	-175,60	Negativa	-87.022,00	-85,60

Relatório de Tensão e Corrente de Curto-Circuito											
Barra	13		Falta: Bifásica								
Tensão (KV)						Corrente (A)					
Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo	Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo
A	79,70	0,00	Zero	0,00	0,00	A	0,00	0,00	Zero	0,00	0,00
B	39,80	-180,00	Positiva	39,80	0,00	B	6.325,00	-163,00	Positiva	3.652,00	-73,00
C	39,80	-180,00	Negativa	39,80	0,00	C	-6.325,00	-163,00	Negativa	-3.652,00	-73,00

Relatório de Tensão e Corrente de Curto-Circuito											
Barra	15		Falta: Bifásica								
Tensão (KV)						Corrente (A)					
Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo	Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo
A	79,70	0,00	Zero	0,00	0,00	A	0,00	0,00	Zero	0,00	0,00
B	39,80	-180,00	Positiva	39,80	0,00	B	4.128,00	-168,10	Positiva	2.383,00	-78,10
C	39,80	-180,00	Negativa	39,80	0,00	C	-4.128,00	-168,10	Negativa	-2.383,00	-78,10

Relatório de Tensão e Corrente de Curto-Circuito											
Barra	16		Falta: Bifásica								
Tensão (KV)						Corrente (A)					
Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo	Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo
A	79,70	0,00	Zero	0,00	0,00	A	0,00	0,00	Zero	0,00	0,00
B	39,80	180,00	Positiva	39,80	0,00	B	9.897,00	-139,60	Positiva	5.714,00	-49,60
C	39,80	180,00	Negativa	39,80	0,00	C	-9.897,00	-139,60	Negativa	-5.714,00	-49,60

Relatório de Tensão e Corrente de Curto-Circuito											
Barra	17		Falta: Bifásica								
Tensão (KV)						Corrente (A)					
Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo	Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo
A	79,70	0,00	Zero	0,00	0,00	A	0,00	0,00	Zero	0,00	0,00
B	39,80	-180,00	Positiva	39,80	0,00	B	21.347,00	-118,30	Positiva	12.324,00	-28,30
C	39,80	-180,00	Negativa	39,80	0,00	C	-21.347,00	-118,30	Negativa	-12.324,00	-28,30

Relatório de Tensão e Corrente de Curto-Circuito											
Barra	38		Falta: Bifásica								
Tensão (KV)						Corrente (A)					
Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo	Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo
A	39,80	0,00	Zero	0,00	0,00	A	0,00	0,00	Zero	0,00	0,00
B	19,90	180,00	Positiva	19,90	0,00	B	4.283,00	-157,50	Positiva	2.473,00	-67,50
C	19,90	180,00	Negativa	19,90	0,00	C	-4.283,00	-157,50	Negativa	-2.473,00	-67,50

Relatório de Tensão e Corrente de Curto-Circuito											
Barra	44		Falta: Bifásica								
Tensão (KV)						Corrente (A)					
Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo	Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo
A	39,80	0,00	Zero	0,00	0,00	A	0,00	0,00	Zero	0,00	0,00
B	19,90	-180,00	Positiva	19,90	0,00	B	4.152,00	-159,70	Positiva	2.397,00	-69,70
C	19,90	-180,00	Negativa	19,90	0,00	C	-4.152,00	-159,70	Negativa	-2.397,00	-69,70

Relatório de Tensão e Corrente de Curto-Circuito											
Barra	45		Falta: Bifásica								
Tensão (KV)						Corrente (A)					
Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo	Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo
A	39,80	0,00	Zero	0,00	0,00	A	0,00	0,00	Zero	0,00	0,00
B	19,90	-180,00	Positiva	19,90	0,00	B	4.907,00	-168,60	Positiva	2.833,00	-78,60
C	19,90	-180,00	Negativa	19,90	0,00	C	-4.907,00	-168,60	Negativa	-2.833,00	-78,60

Relatório de Tensão e Corrente de Curto-Circuito											
Barra	49		Falta: Bifásica								
Tensão (KV)						Corrente (A)					
Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo	Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo
A	39,80	0,00	Zero	0,00	0,00	A	0,00	0,00	Zero	0,00	0,00
B	19,90	180,00	Positiva	19,90	0,00	B	10.067,00	-166,20	Positiva	5.812,00	-76,20
C	19,90	180,00	Negativa	19,90	0,00	C	-10.067,00	-166,20	Negativa	-5.812,00	-76,20

A.3 Relatórios de Tensão e Corrente de curto-circuito bifásico-terra do Sistema-10

Relatório de Tensão e Corrente de Curto-Circuito											
Barra	1		Falta: Bifásica Terra								
Tensão (KV)						Corrente (A)					
Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo	Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo
A	84,00	0,20	Zero	28,00	0,20	A	0,00	0,00	Zero	-51.729,00	-86,10
B	0,00	0,00	Positiva	28,00	0,20	B	-168.942,00	-22,90	Positiva	112.886,00	-85,70
C	0,00	0,00	Negativa	28,00	0,20	C	-170.108,00	-148,40	Negativa	-61.159,00	-85,40

Relatório de Tensão e Corrente de Curto-Circuito											
Barra	12		Falta: Bifásica Terra								
Tensão (KV)						Corrente (A)					
Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo	Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo
A	24,90	-11,20	Zero	8,30	-11,20	A	0,00	0,00	Zero	-138.661,00	-82,70
B	0,00	0,00	Positiva	8,30	-11,20	B	-262.984,00	-47,80	Positiva	156.303,00	-84,30
C	0,00	0,00	Negativa	8,30	-11,20	C	-250.593,00	-119,60	Negativa	-18.126,00	-96,80

Relatório de Tensão e Corrente de Curto-Circuito											
Barra	13		Falta: Bifásica Terra								
Tensão (KV)						Corrente (A)					
Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo	Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo
A	74,50	-6,10	Zero	24,80	-6,10	A	0,00	0,00	Zero	-2.820,00	-63,20
B	0,00	0,00	Positiva	24,80	-6,10	B	-8.190,00	-13,60	Positiva	5.047,00	-70,30
C	0,00	0,00	Negativa	24,80	-6,10	C	-6.980,00	-126,40	Negativa	-2.276,00	-79,10

Relatório de Tensão e Corrente de Curto-Circuito											
Barra	15		Falta: Bifásica Terra								
Tensão (KV)						Corrente (A)					
Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo	Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo
A	63,60	-9,30	Zero	21,20	-9,30	A	0,00	0,00	Zero	-2.299,00	-67,90
B	0,00	0,00	Positiva	21,20	-9,30	B	-5.831,00	-23,70	Positiva	3.521,00	-74,80
C	0,00	0,00	Negativa	21,20	-9,30	C	-4.886,00	-124,10	Negativa	-1.269,00	-87,40

Relatório de Tensão e Corrente de Curto-Circuito											
Barra	16		Falta: Bifásica Terra								
Tensão (KV)						Corrente (A)					
Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo	Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo
A	67,60	3,60	Zero	22,50	3,60	A	0,00	0,00	Zero	-4.996,00	-54,20
B	0,00	0,00	Positiva	22,50	3,60	B	11.917,00	-178,40	Positiva	8.206,00	-51,00
C	0,00	0,00	Negativa	22,50	3,60	C	-12.893,00	-104,20	Negativa	-3.231,00	-45,90

Relatório de Tensão e Corrente de Curto-Circuito											
Barra	17		Falta: Bifásica Terra								
Tensão (KV)						Corrente (A)					
Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo	Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo
A	90,30	7,70	Zero	30,10	7,70	A	0,00	0,00	Zero	-6.675,00	-50,20
B	0,00	0,00	Positiva	30,10	7,70	B	19.921,00	-146,20	Positiva	15.472,00	-32,90
C	0,00	0,00	Negativa	30,10	7,70	C	-26.740,00	-98,00	Negativa	-9.310,00	-20,70

Relatório de Tensão e Corrente de Curto-Circuito											
Barra	38		Falta: Bifásica Terra								
Tensão (KV)						Corrente (A)					
Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo	Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo
A	59,70	0,00	Zero	19,90	0,00	A	0,00	0,00	Zero	-6,00	-45,00
B	0,00	0,00	Positiva	19,90	0,00	B	4.286,00	-157,60	Positiva	2.475,00	-67,50
C	0,00	0,00	Negativa	19,90	0,00	C	-4.279,00	-157,40	Negativa	-2.470,00	-67,50

Relatório de Tensão e Corrente de Curto-Circuito											
Barra	44		Falta: Bifásica Terra								
Tensão (KV)						Corrente (A)					
Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo	Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo
A	59,70	0,00	Zero	19,90	0,00	A	0,00	0,00	Zero	-6,00	-45,00
B	0,00	0,00	Positiva	19,90	0,00	B	4.156,00	-159,80	Positiva	2.400,00	-69,70
C	0,00	0,00	Negativa	19,90	0,00	C	-4.149,00	-159,60	Negativa	-2.395,00	-69,70

Relatório de Tensão e Corrente de Curto-Circuito											
Barra	45		Falta: Bifásica Terra								
Tensão (KV)						Corrente (A)					
Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo	Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo
A	59,70	0,00	Zero	19,90	0,00	A	0,00	0,00	Zero	6,00	-45,00
B	0,00	0,00	Positiva	19,90	0,00	B	4.917,00	-168,60	Positiva	2.835,00	-78,50
C	0,00	0,00	Negativa	19,90	0,00	C	-4.902,00	-168,50	Negativa	-2.830,00	-78,60

Relatório de Tensão e Corrente de Curto-Circuito											
Barra	49		Falta: Bifásica Terra								
Tensão (KV)						Corrente (A)					
Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo	Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo
A	59,70	0,00	Zero	19,90	0,00	A	0,00	0,00	Zero	-6,00	-45,00
B	0,00	0,00	Positiva	19,90	0,00	B	10.072,00	-166,30	Positiva	5.815,00	-76,20
C	0,00	0,00	Negativa	19,90	0,00	C	-10.063,00	-166,20	Negativa	-5.810,00	-76,20

A.4 Relatórios de Tensão e Corrente de curto-circuito trifásico do Sistema-10

Relatório de Tensão e Corrente de Curto-Circuito											
Barra	1		Falta: Trifásica								
Tensão (KV)						Corrente (A)					
Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo	Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo
A	0,00	0,00	Zero	0,00	0,00	A	174.044,00	-85,60	Zero	0,00	0,00
B	0,00	0,00	Positiva	0,00	0,00	B	-174.044,00	-25,60	Positiva	174.044,00	-85,60
C	0,00	0,00	Negativa	0,00	0,00	C	-174.044,00	-145,60	Negativa	0,00	0,00

Relatório de Tensão e Corrente de Curto-Circuito											
Barra	12		Falta: Trifásica								
Tensão (KV)						Corrente (A)					
Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo	Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo
A	0,00	0,00	Zero	0,00	0,00	A	174.044,00	-85,60	Zero	0,00	0,00
B	0,00	0,00	Positiva	0,00	0,00	B	-174.044,00	-25,60	Positiva	174.044,00	-85,60
C	0,00	0,00	Negativa	0,00	0,00	C	-174.044,00	-145,60	Negativa	0,00	0,00

Relatório de Tensão e Corrente de Curto-Circuito											
Barra	13		Falta: Trifásica								
Tensão (KV)						Corrente (A)					
Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo	Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo
A	0,00	0,00	Zero	0,00	0,00	A	7.304,00	-73,00	Zero	0,00	0,00
B	0,00	0,00	Positiva	0,00	0,00	B	-7.304,00	-13,00	Positiva	7.304,00	-73,00
C	0,00	0,00	Negativa	0,00	0,00	C	-7.304,00	-133,00	Negativa	0,00	0,00

Relatório de Tensão e Corrente de Curto-Circuito											
Barra	15		Falta: Trifásica								
Tensão (KV)						Corrente (A)					
Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo	Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo
A	0,00	0,00	Zero	0,00	0,00	A	4.767,00	-78,10	Zero	0,00	0,00
B	0,00	0,00	Positiva	0,00	0,00	B	-4.767,00	-18,10	Positiva	4.767,00	-78,10
C	0,00	0,00	Negativa	0,00	0,00	C	-4.767,00	-138,10	Negativa	0,00	0,00

Relatório de Tensão e Corrente de Curto-Circuito											
Barra	16		Falta: Trifásica								
Tensão (KV)						Corrente (A)					
Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo	Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo
A	0,00	0,00	Zero	0,00	0,00	A	11.428,00	-49,60	Zero	0,00	0,00
B	0,00	0,00	Positiva	0,00	0,00	B	11.428,00	-169,60	Positiva	11.428,00	-49,60
C	0,00	0,00	Negativa	0,00	0,00	C	-11.428,00	-109,60	Negativa	0,00	0,00

Relatório de Tensão e Corrente de Curto-Circuito											
Barra	17		Falta: Trifásica								
Tensão (KV)						Corrente (A)					
Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo	Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo
A	0,00	0,00	Zero	0,00	0,00	A	24.649,00	-28,30	Zero	0,00	0,00
B	0,00	0,00	Positiva	0,00	0,00	B	24.649,00	-148,30	Positiva	24.649,00	-28,30
C	0,00	0,00	Negativa	0,00	0,00	C	-24.649,00	-88,30	Negativa	0,00	0,00

Relatório de Tensão e Corrente de Curto-Circuito											
Barra	38		Falta: Trifásica								
Tensão (KV)						Corrente (A)					
Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo	Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo
A	0,00	0,00	Zero	0,00	0,00	A	4.945,00	-67,50	Zero	0,00	0,00
B	0,00	0,00	Positiva	0,00	0,00	B	-4.945,00	-7,50	Positiva	4.945,00	-67,50
C	0,00	0,00	Negativa	0,00	0,00	C	-4.945,00	-127,50	Negativa	0,00	0,00

Relatório de Tensão e Corrente de Curto-Circuito											
Barra	44		Falta: Trifásica								
Tensão (KV)						Corrente (A)					
Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo	Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo
A	0,00	0,00	Zero	0,00	0,00	A	4.795,00	-69,70	Zero	0,00	0,00
B	0,00	0,00	Positiva	0,00	0,00	B	-4.795,00	-9,70	Positiva	4.795,00	-69,70
C	0,00	0,00	Negativa	0,00	0,00	C	-4.795,00	-129,70	Negativa	0,00	0,00

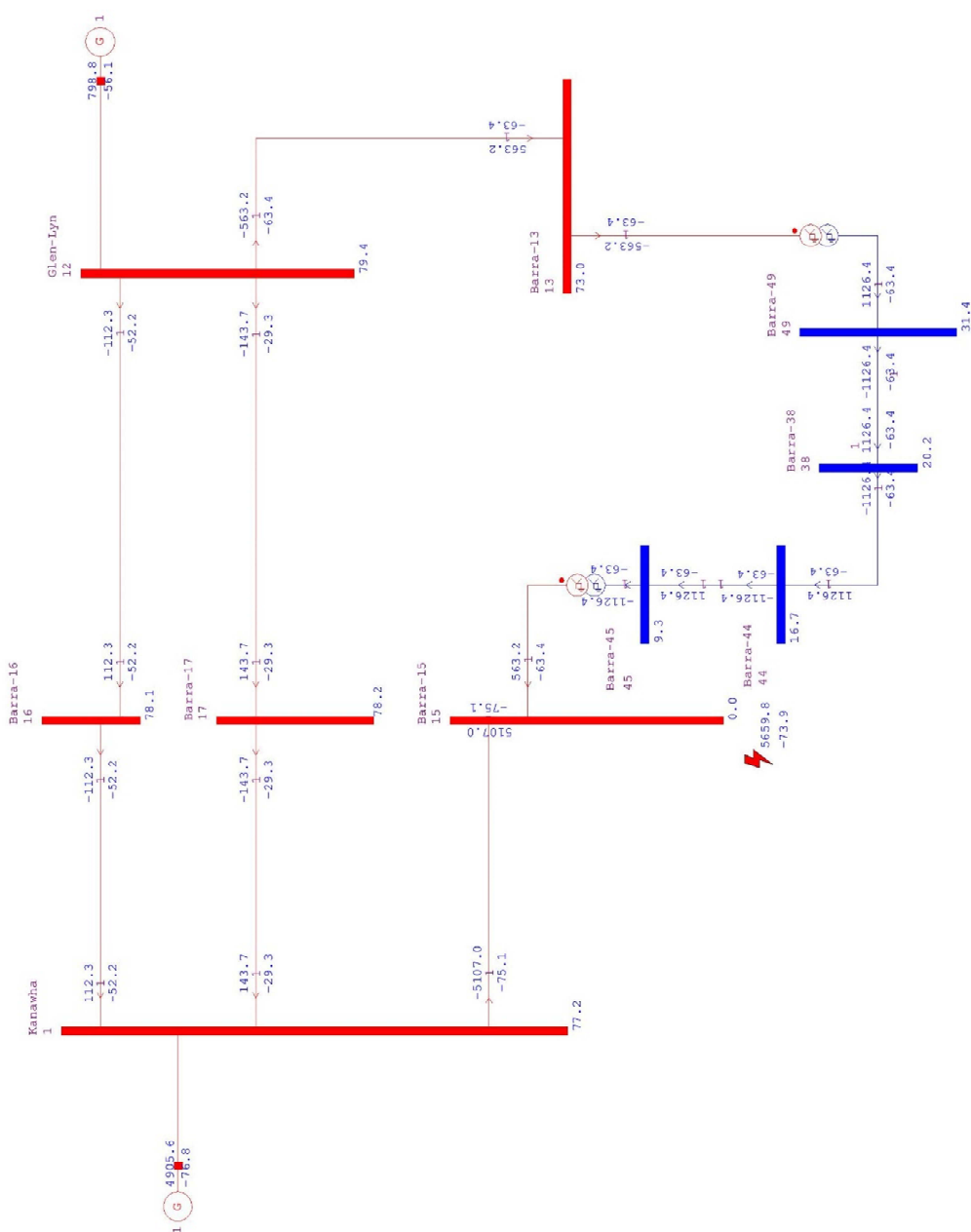
Relatório de Tensão e Corrente de Curto-Circuito											
Barra	45		Falta: Trifásica								
Tensão (KV)						Corrente (A)					
Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo	Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo
A	0,00	0,00	Zero	0,00	0,00	A	5.666,00	-78,60	Zero	0,00	0,00
B	0,00	0,00	Positiva	0,00	0,00	B	-5.666,00	-18,60	Positiva	5.666,00	-78,60
C	0,00	0,00	Negativa	0,00	0,00	C	-5.666,00	-138,60	Negativa	0,00	0,00

Relatório de Tensão e Corrente de Curto-Circuito											
Barra	49		Falta: Trifásica								
Tensão (KV)						Corrente (A)					
Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo	Fases	Módulo	Ângulo	Sequência	Módulo	Ângulo
A	0,00	0,00	Zero	0,00	0,00	A	11.625,00	-76,20	Zero	0,00	0,00
B	0,00	0,00	Positiva	0,00	0,00	B	-11.625,00	-16,20	Positiva	11.625,00	-76,20
C	0,00	0,00	Negativa	0,00	0,00	C	-11.625,00	-136,20	Negativa	0,00	0,00

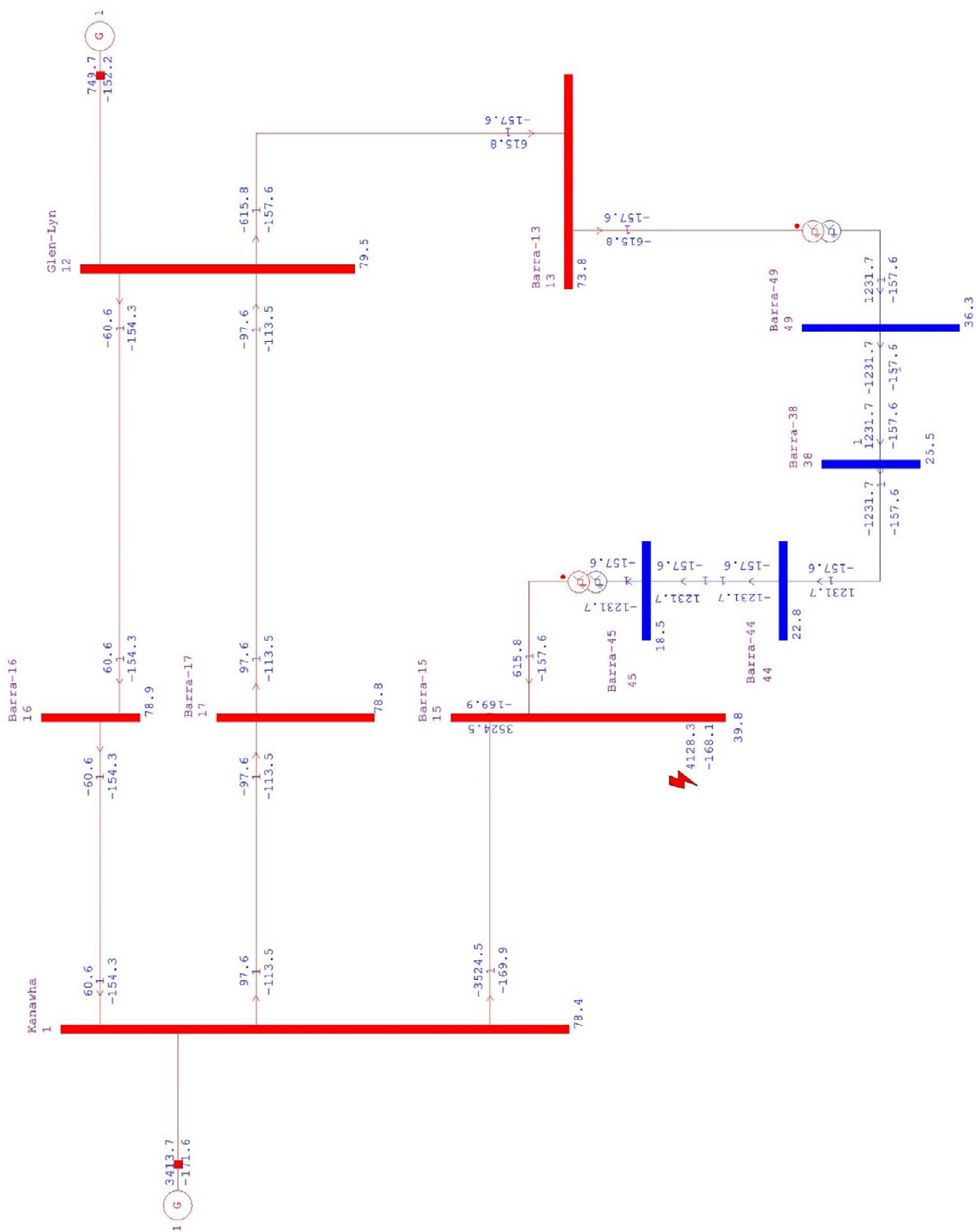
Anexo B

As figuras a seguir mostram todos resultados dos estudos individuais realizados em três barras no Sistema-10. Os diagramas unifilares são referentes aos resultados da fase A para as faltas monofásicas e trifásicas e referentes a fase B para as faltas bifásicas e bifásicas com terra.

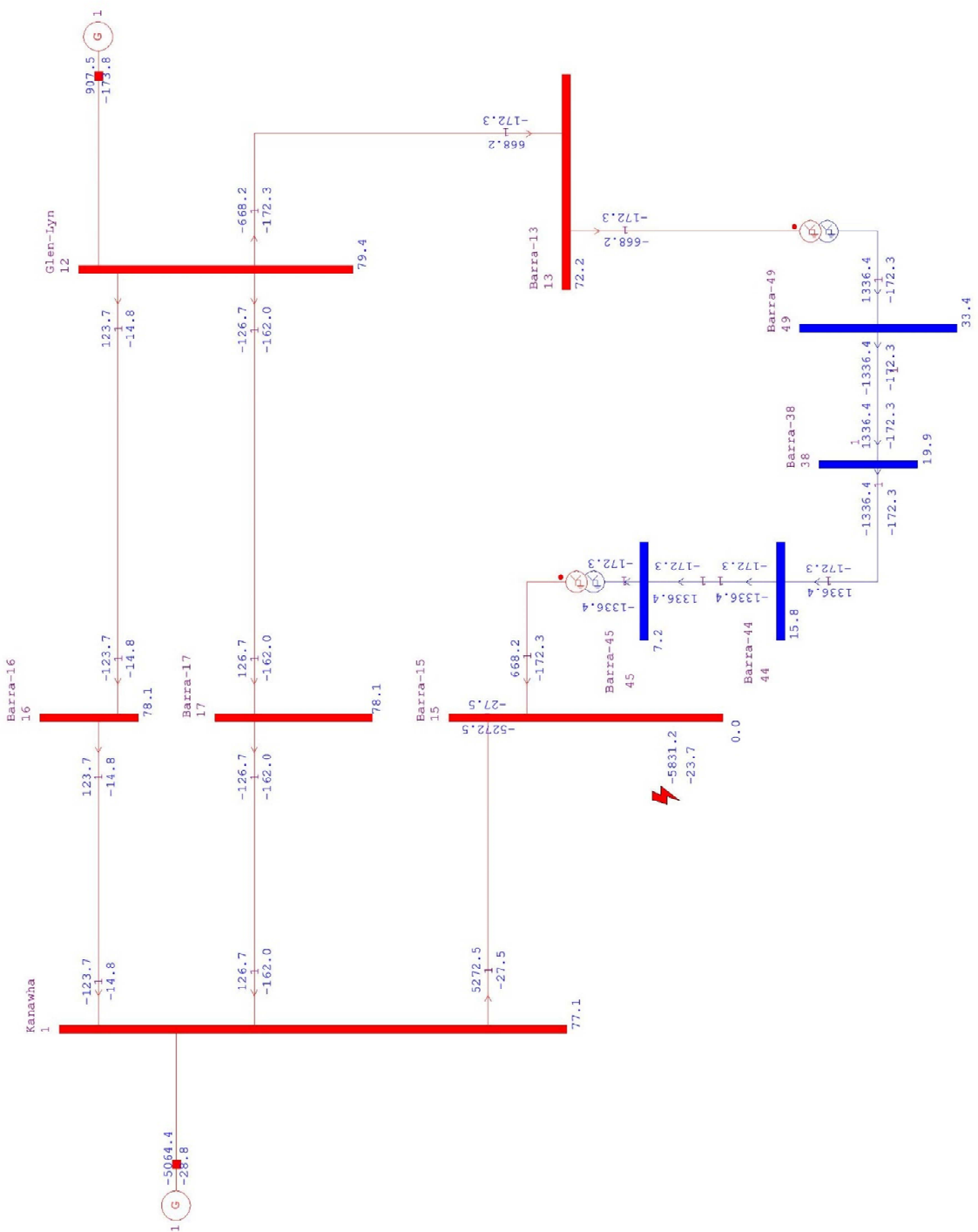
B.1 Barra 15: Falta Monofásica



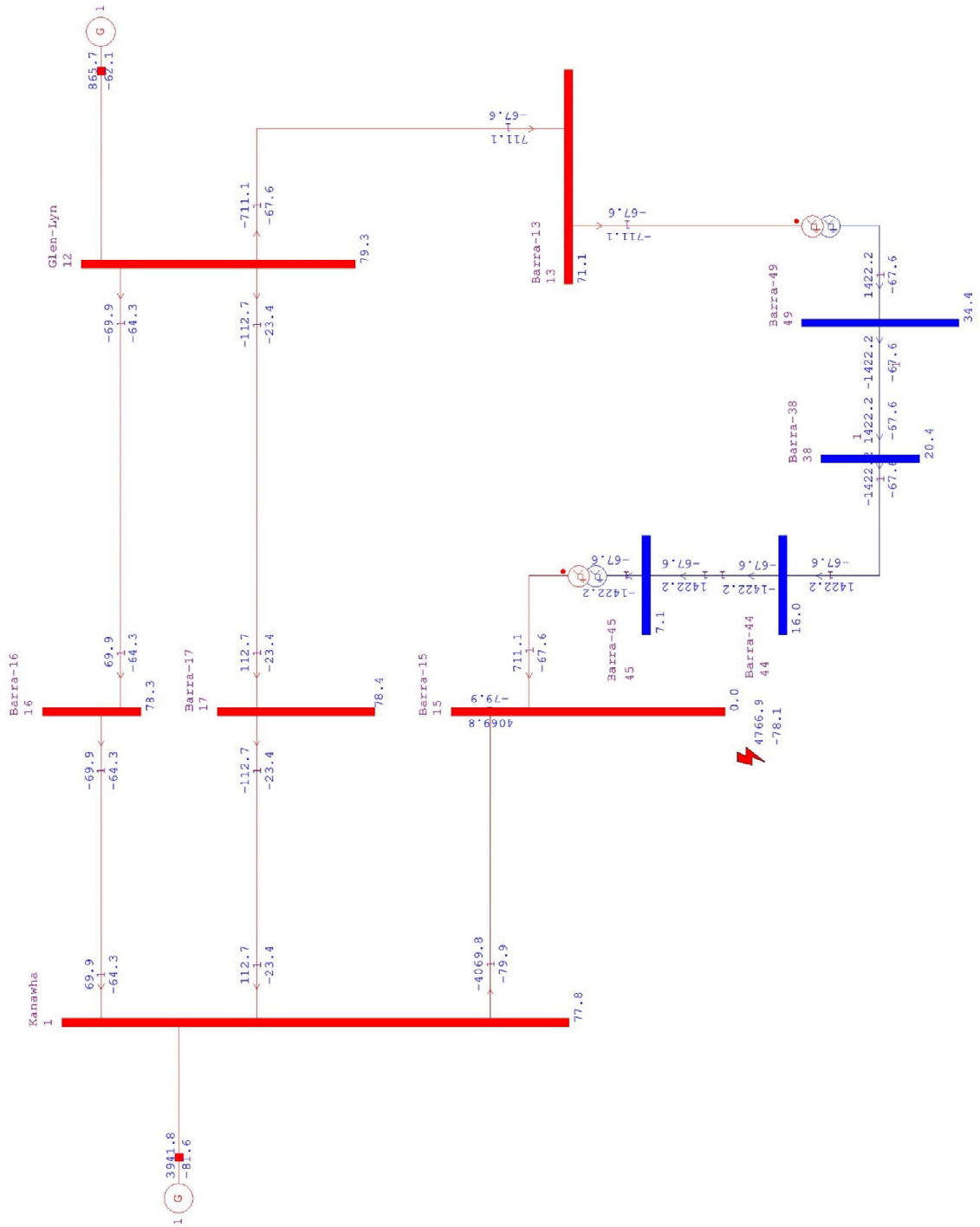
B.2 Barra 15: Falta Bifásica



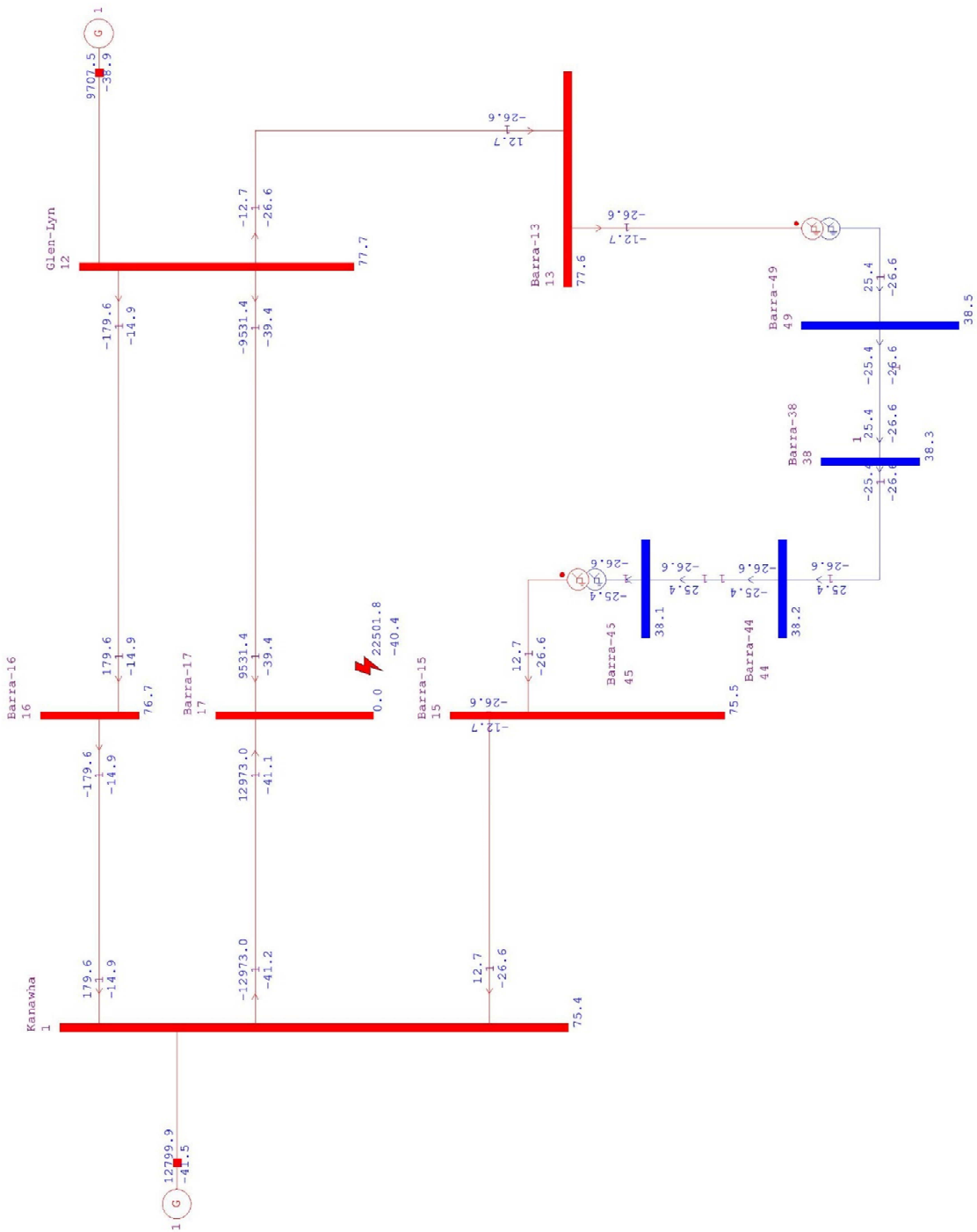
B.3 Barra 15: Falta Bifásica-Terra



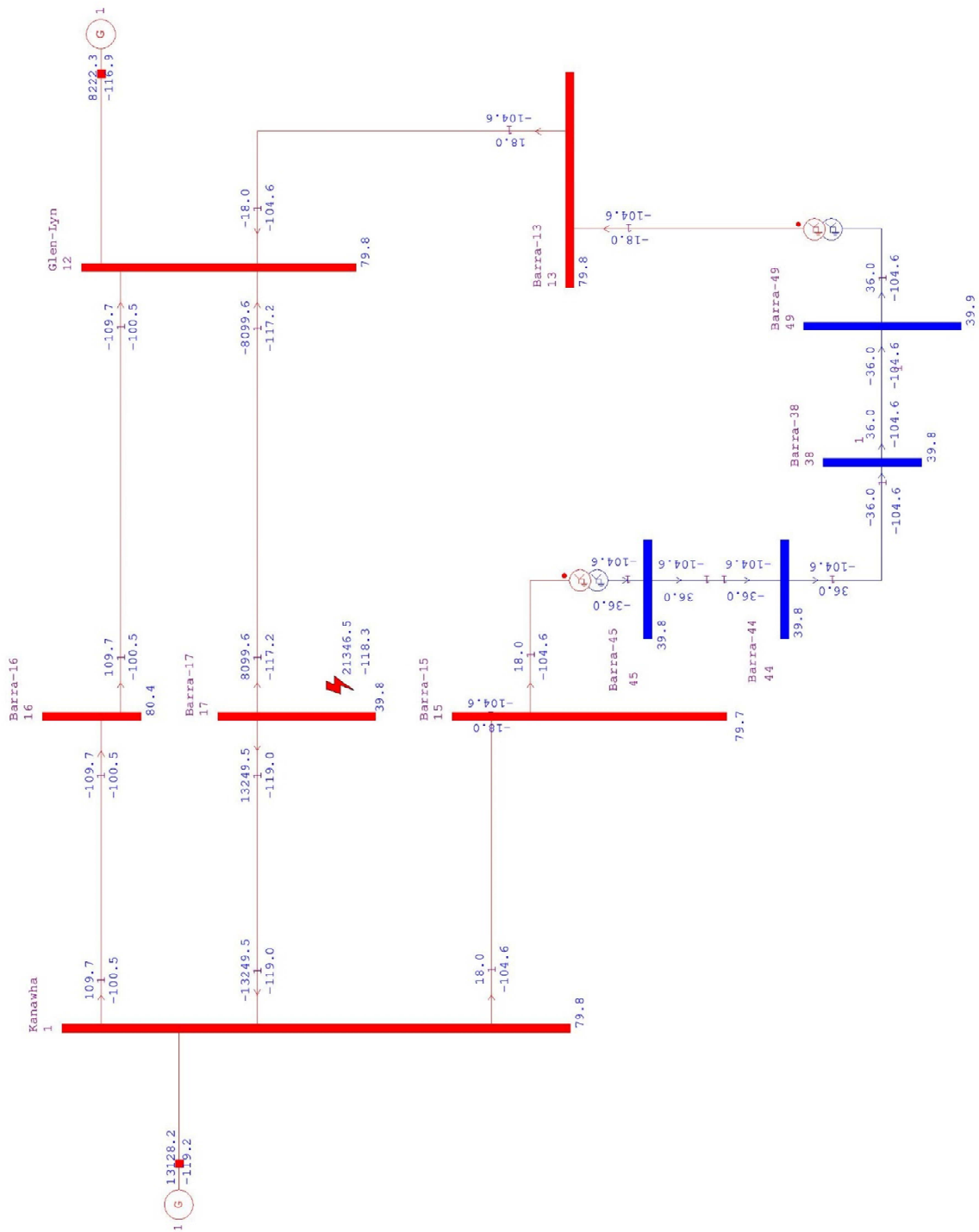
B.4 Barra 15: Falta Trifásica



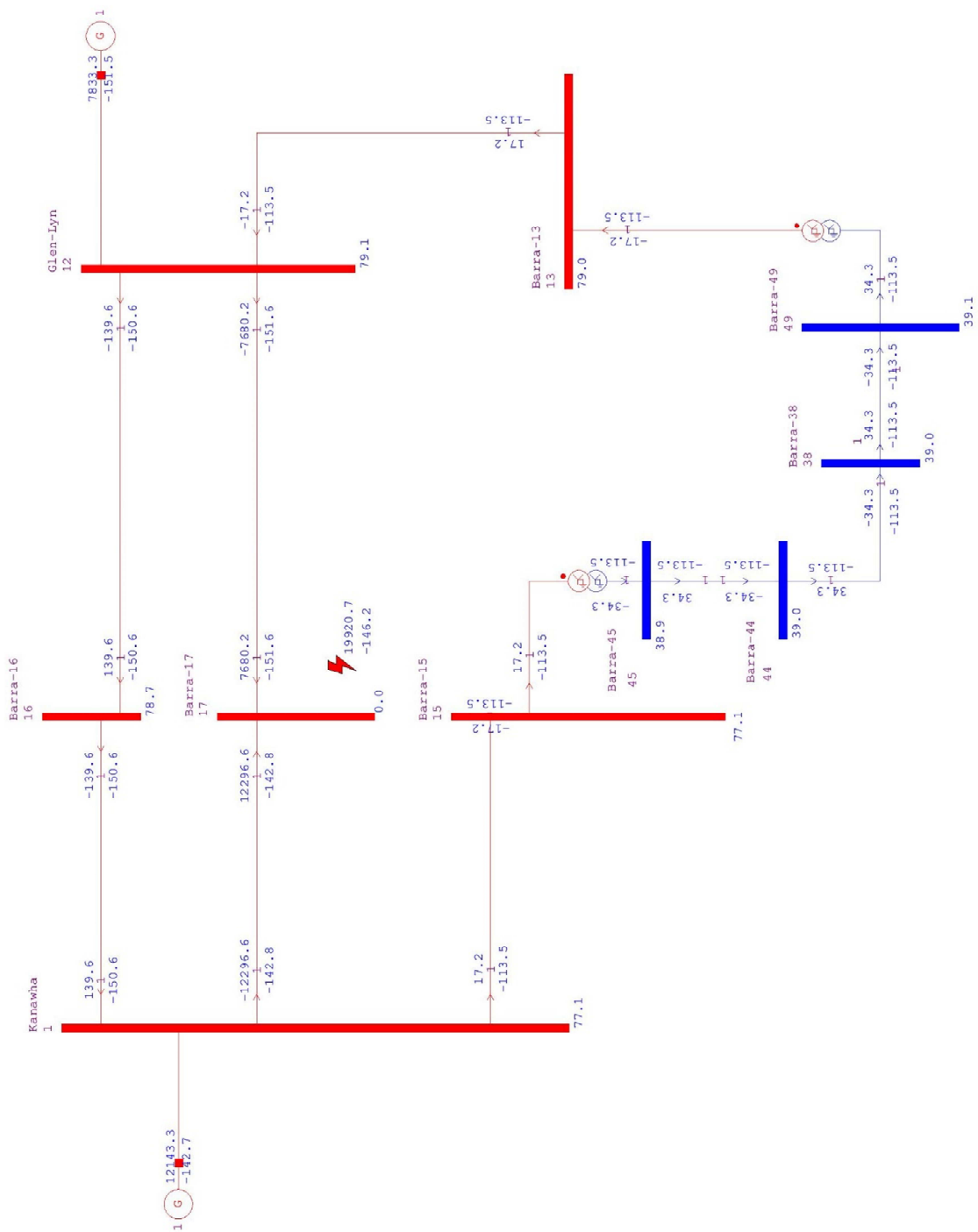
B.5 Barra 17: Falta Monofásica



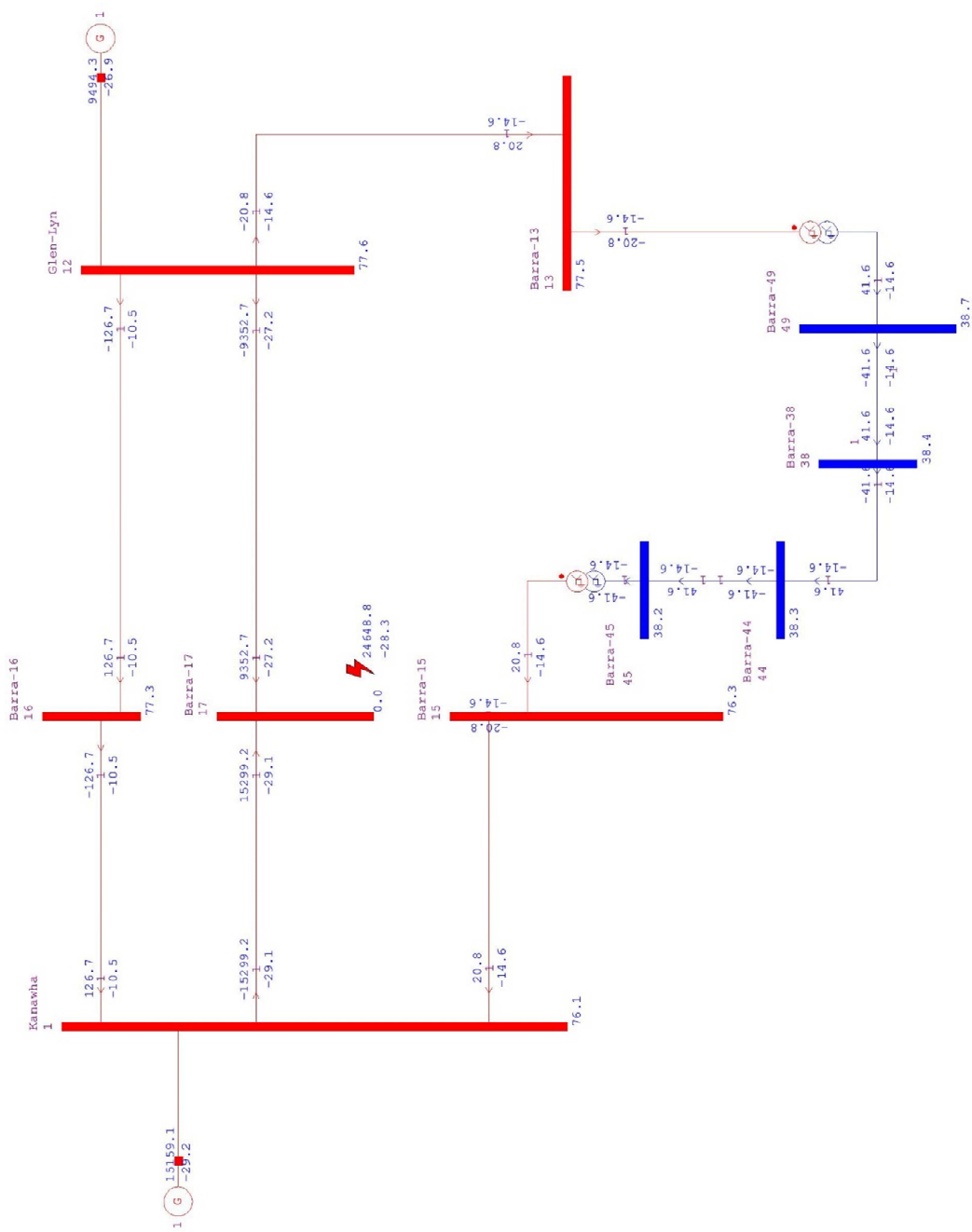
B.6 Barra 17: Falta Bifásica



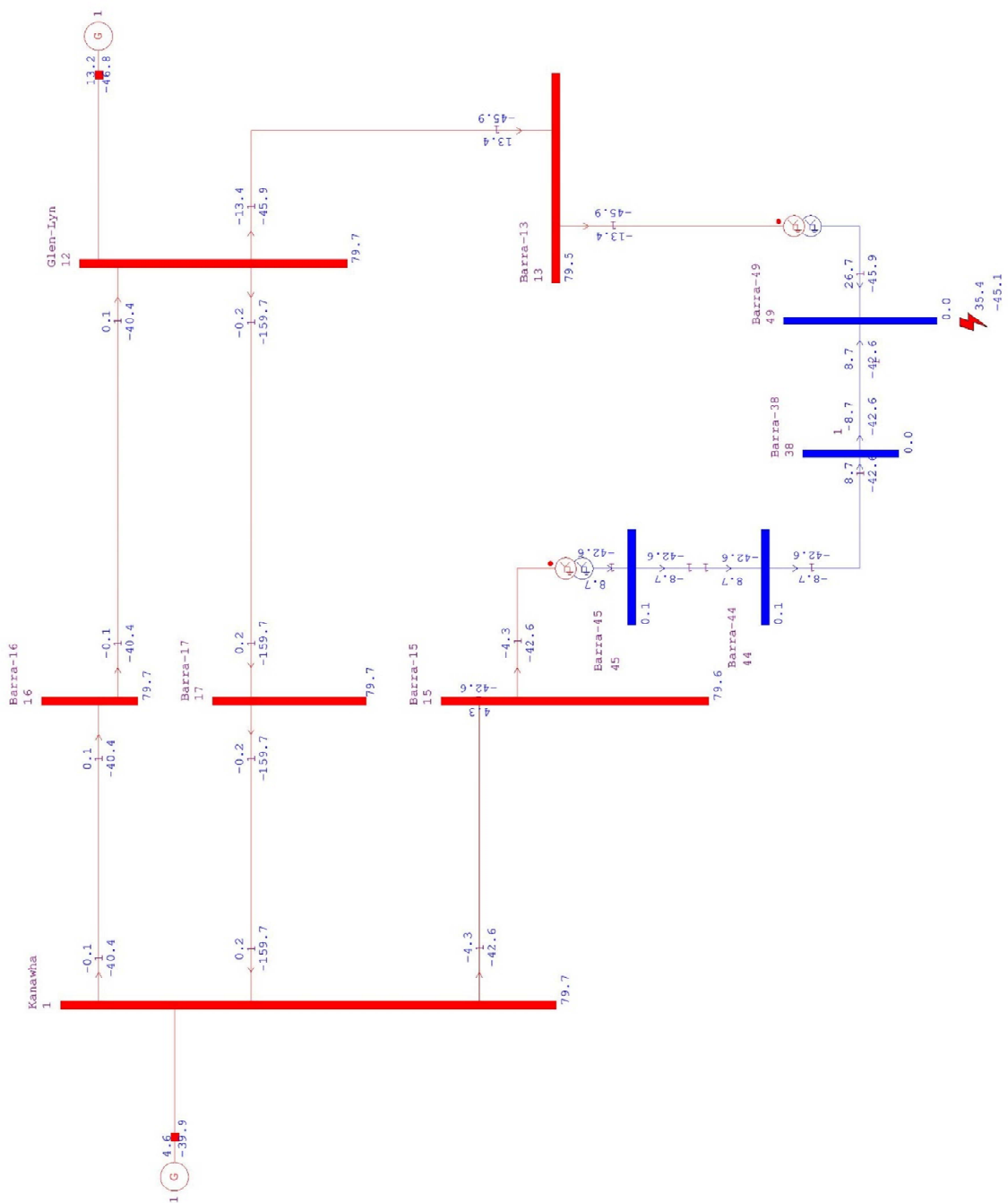
B.7 Barra 17: Falta Bifásica-Terra



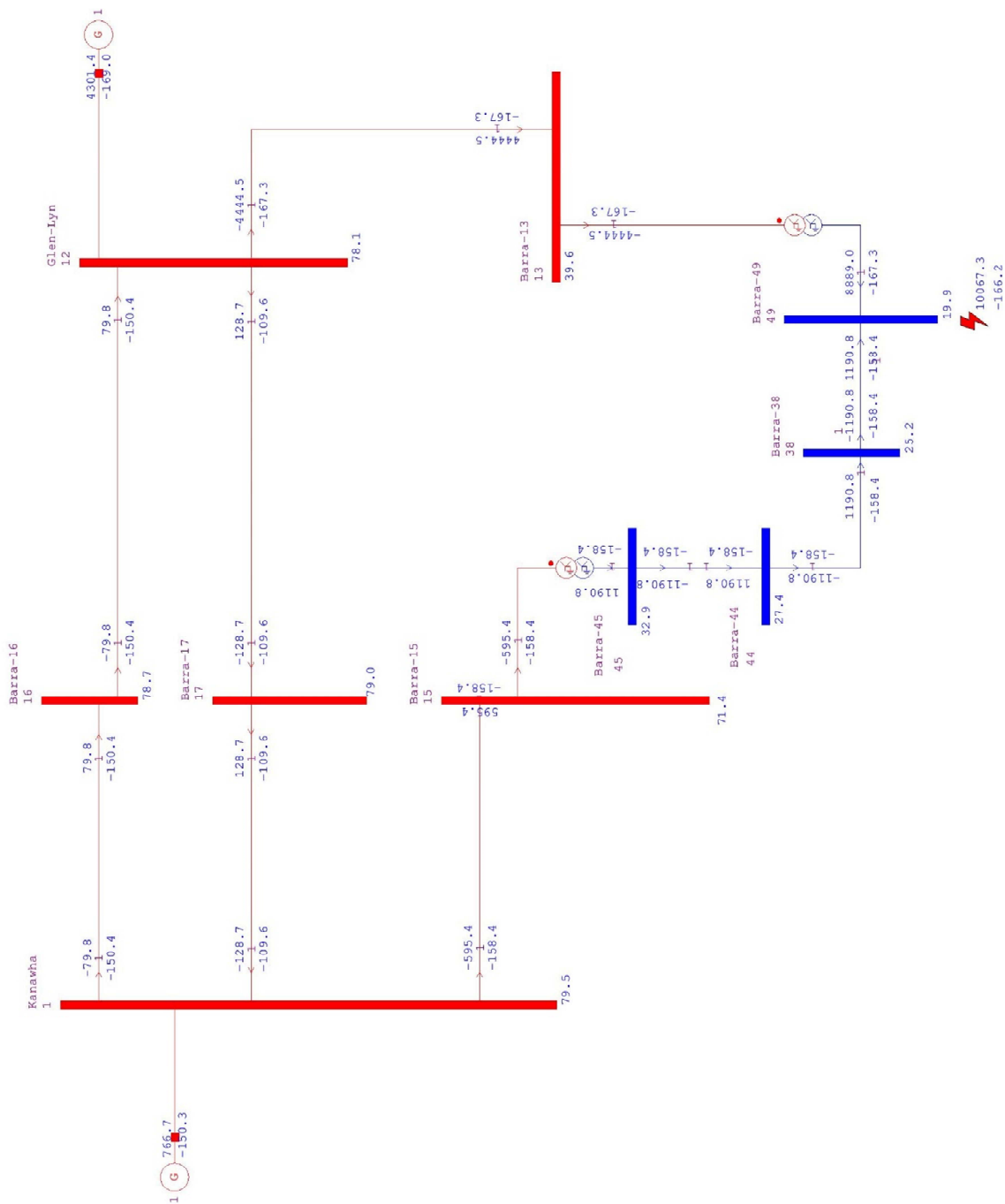
B.8 Barra 17: Falta Trifásica



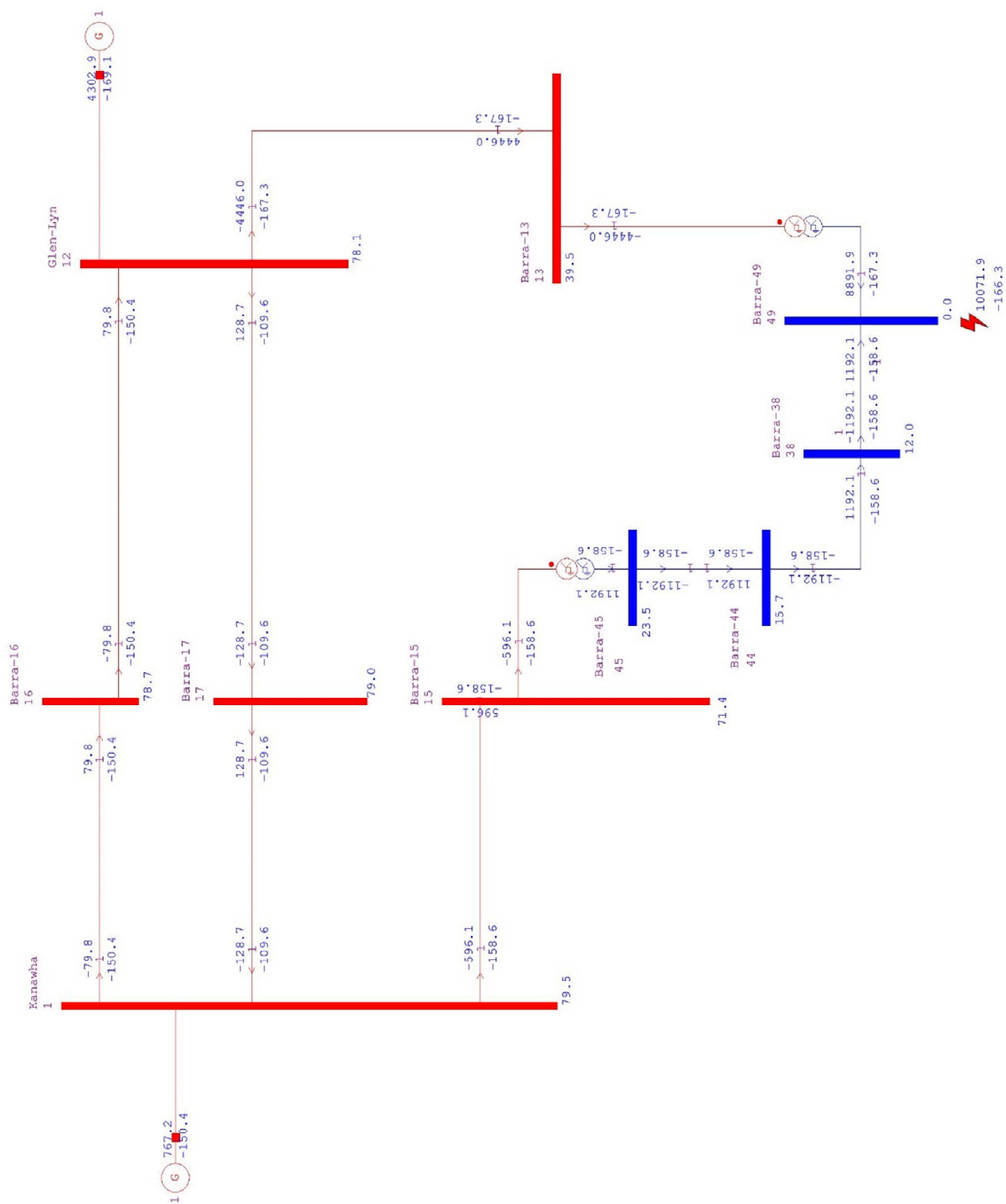
B.9 Barra 49: Falta Monofásica



B.10 Barra 49: Falta Bifásica



B.11 Barra 49: Falta Bifásica-Terra



B.12 Barra 49: Falta Trifásica

