



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
UNIDADE ACADÊMICA DO CABO DE SANTO AGOSTINHO
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

PEDRO HENRIQUE VALENTIM SANTOS

Análise da evolução de falta do tipo *shunt* em linhas de transmissão de energia em nível de distribuição: cálculo e modelagem de falta monofásica, bifásica e trifásica em sistema elétrico de potência

Cabo de Santo Agostinho - PE

2025

PEDRO HENRIQUE VALENTIM SANTOS

Análise da evolução de falta do tipo *shunt* em linhas de transmissão de energia em nível de distribuição: cálculo e modelagem de falta monofásica, bifásica e trifásica em sistema elétrico de potência

Monografia apresentada ao curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho, Universidade Federal Rural de Pernambuco, como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Profa. Dra. Mauren Pomalis Coelho da Silva

Cabo de Santo Agostinho - PE

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Biblioteca da UACSA, Cabo de Santo Agostinho - PE, Brasil.
Bibliotecária – Rosimeri Gomes Couto – CRB-4/1395

S237a Santos, Pedro Henrique Valentim.
Análise da evolução de falta do tipo Shunt em linhas de transmissão de energia: cálculo e modelagem de falta monofásica, bifásica e trifásica em sistema elétrico de potência. / Pedro Henrique Valentim Santos. – Cabo de Santo Agostinho, 2025.
126 f. : il.

Orientadora: Mauren Pomalis Coelho da Silva.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal Rural de Pernambuco. Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho, 2025.
Inclui referência.

1. Curto-circuito. 2. ATPDraw. 3. Simulação do sistema elétrico. 4. Falhas – sistemas elétricos. I. Silva, Mauren Pomalis Coelho da, orient. II. Título.

CDD 621.3

PEDRO HENRIQUE VALENTIM SANTOS

Análise da evolução de falta do tipo *shunt* em linhas de transmissão de energia em nível de distribuição: cálculo e modelagem de falta monofásica, bifásica e trifásica em sistema elétrico de potência

Monografia apresentada ao Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em: 07/08/2025.

BANCA EXAMINADORA

Dra. Mauren Pomalis Coelho da Silva
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Dra. Élide Fernanda Xavier Júlio
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Dr. Andres Ricardo Herrera-Orozco
Universidad Tecnológica de Pereira

Aos meus pais, pelo amor incondicional, apoio, conselhos, por sempre me dar coragem e incentivo para enfrentar as dificuldades da graduação. Ao meu irmão, pela companhia nos melhores e piores momentos da minha vida. Ao meu avô, pelo apoio desde a infância.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus pela saúde que tenho e pela vida que me foi dada.

Agradeço aos meus pais, Lenira e Nivaldo, pelo amor e esforço para que eu pudesse ter a oportunidade de ter uma educação de nível superior. Agradeço também ao meu irmão Paulo pela parceria e companhia. Também agradeço a minha namorada, Jéssica, pelo incentivo constante e paciência para que eu pudesse desenvolver este trabalho. Agradeço, também, a toda minha família.

A todos os colegas da Engenharia Elétrica e Eletrônica pela companhia e parceria ao longo da caminhada da graduação. Um agradecimento especial ao meu amigo de longa data, Helton Felipe, pela companhia em grande parte dos trabalhos em dupla e em grupo, pelas noites em claro de estudos, pelos momentos de descontração e diversão.

Agradeço também aos meus colegas de trabalho, por sempre me incentivarem a finalizar o curso, em especial ao Mário Nerys por todo apoio desde sempre.

Agradeço aos professores da Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho pelos ensinamentos transmitidos nas disciplinas, pelos conselhos e pelo suporte.

À minha orientadora, profa. Dra. Mauren Pomalis, pela paciência, dedicação, incentivo e orientação. Sem ela, este trabalho não teria sido possível.

Agradeço, também, à própria instituição de ensino da UFRPE pela estrutura e serviços.

“A ciência é sobre saber; a engenharia é sobre fazer.”

Henry Petroski.

RESUMO

Dado o cenário de constante crescimento da demanda de energia elétrica, apontado pelos órgãos que acompanham, estudam e estimam dados associados ao Sistema Elétrico de Potência (SEP), expansão da capacidade de geração de energia elétrica instalada no Brasil e avanços tecnológicos em sistemas industriais no sentido de manufatura enxuta associada a conceitos de indústria 4.0 que utilizam componentes sensíveis à Qualidade de Energia Elétrica (QEE), é de suma importância que a rede elétrica possua, mais do que nunca, confiabilidade e continuidade. Isso significa que a rede elétrica precisa estar preparada para a ocorrência de eventos extremos como o curto-circuito, que tem a capacidade de danificar redes elétricas. Neste sentido, este trabalho traz uma contextualização acerca da importância do estudo de curto-circuito em todo e qualquer sistema elétrico de potência. Realizou-se uma revisão bibliográfica dos tipos de faltas *shunt* foi abordado o método de cálculo de corrente de faltas utilizando as componentes simétricas. Em seguida, foram apresentados dois sistemas elétricos de potência, ambos sistemas testes do Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE), uma organização profissional internacional renomada na área. Os denominados sistema alimentador 4-barras e sistema alimentador 34-barras, foram modelados com a utilização do programa *ATP/ATPDraw*. Na análise do sistema de 4 barras foram feitos cálculos de curto-circuitos numéricos com o auxílio da ferramenta *Octave*, para que os resultados esperados fossem comparados com as simulações no *ATP/ATPDraw*, validando a modelagem. Em seguida, foram simulados cenários de falta ao sistema de 34 barras, com a intenção, desta vez, de analisar como a rede responderia às faltas aplicadas em diferentes barras do sistema. Por fim, foi feita uma simulação com o relé de sobrecorrente instantâneo para avaliar a sua atuação frente a uma falta próxima à barra principal do sistema. Os resultados obtidos nas simulações do sistema 4-barras com faltas foram comparados aos teóricos, validando a metodologia. Os resultados obtidos nas simulações das faltas no sistema 34-barras nos mostraram que a severidade das correntes de falta irá depender do tipo de curto-circuito, impedância de falta, da sua localização e da topologia do circuito. O ajuste do relé de sobrecorrente também se mostrou eficaz ao atuar corretamente. O trabalho contribui significativamente para a comunidade científica, pois oferece um guia de modelagem robusto e preciso para dois sistemas do IEEE. Foi concluído também que o *ATP/ATPDraw* é uma ferramenta confiável e pode auxiliar estudantes e engenheiros na modelagem, simulação e entendimento de sistemas em diversas áreas do estudo do sistema elétrico de potência.

Palavras-chave: *ATPDraw*; curto-circuitos; faltas – sistemas elétricos; simulação do sistema elétrico.

ABSTRACT

Given the scenario of constant growth in the demand for electric energy, pointed out by the entities that monitor, study, and estimate data associated with the Electric Power System (SEP), expansion of the capacity of electric power generation installed in Brazil, and technological advances in industrial systems in the sense of lean manufacturing associated with Industry 4.0 concepts that use components sensitive to Electric Power Quality (QEE), it is of utmost importance that the electric grid possesses, more than ever, reliability and continuity. This means that the electric grid needs to be prepared for the occurrence of extreme events such as the short circuit, which has the capacity to damage electric networks. In this sense, this work brings a contextualization about the importance of the study of short circuit in any and every electric power system. A bibliographic review of the types of shunt faults was carried out, and the method of calculating fault current using symmetrical components was addressed. Next, two electric power systems were presented, both test systems from the Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), a renowned international professional organization in the area. The so-called 4-bus feeder system and 34-bus feeder system were modeled using the *ATP/ATPDraw* program. In the analysis of the 4-bus system, numerical short-circuit calculations were performed with the aid of the Octave tool, so that the expected results could be compared with the simulations in *ATP/ATPDraw*, validating the modeling. Next, fault scenarios were simulated for the 34-bus system, with the intention, this time, of analyzing how the network would respond to the faults applied at different buses of the system. Finally, a simulation was performed with the instantaneous overcurrent relay to evaluate its operation in the face of a fault close to the main bus of the system. The results obtained in the simulations of the 4-bus system with faults were compared to the theoretical ones, validating the methodology. The results obtained in the fault simulations in the 34-bus system showed us that the severity of the fault currents will depend on the type of short circuit, fault impedance, its location, and the topology of the circuit. The adjustment of the overcurrent relay also proved effective by operating correctly. The work contributes significantly to the scientific community, as it offers a robust and precise modeling guide for two IEEE systems. It was also concluded that *ATP/ATPDraw* is a reliable tool and can assist students and engineers in the modeling, simulation, and understanding of systems in various areas of the study of the electric power system.

Keywords: *ATPDraw*; short-circuits; faults – electrical power system; power system simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Corrente de curto-circuito e suas componentes.	20
Figura 2 - Períodos da corrente de curto-circuito.	22
Figura 3 - Curto-circuito trifásico.	23
Figura 4 - Curto-circuito bifásico-terra.	23
Figura 5 - Curto-circuito monofásico.	24
Figura 6 - Fasores de um sistema trifásico desequilibrado.	25
Figura 7 - Fasores de sequência positiva.	25
Figura 8 - Fasores de sequência negativa.	26
Figura 9 - Fasores de sequência zero.	26
Figura 10 - Soma gráfica das componentes simétricas das figuras 5, 6 e 7 para formar o sistema original desequilibrado.	26
Figura 11 - Sistema com duas barras trifásicas com fases denotadas por abc e a'b'c'.	28
Figura 12 - Rede de sequência zero do sistema da figura 9.	29
Figura 13 - Rede de sequência positiva do sistema da figura 9.	29
Figura 14 - Rede de sequência negativa do sistema da figura 9.	29
Figura 15 - Gerador síncrono ligado em estrela aterrada por impedância ZN.	30
Figura 16 - Rede de sequência positiva do gerador síncrono.	30
Figura 17 - Rede de sequência negativa do gerador síncrono.	31
Figura 18 - Rede de sequência zero do gerador síncrono.	31
Figura 19- Redes de sequência zero para diferentes esquemas de conexões de transformadores trifásicos.	32
Figura 20 - Estrutura básica de um sistema de proteção.	34
Figura 21 - Curva de tempo inverso com ajuste da unidade instantânea.	35
Figura 22 - Curto-circuito monofásico (F-T).	37
Figura 23 - Interconexão das redes de sequência de um curto-circuito monofásico.	38
Figura 24 - Curto-circuito bifásico (F-F).	39
Figura 25 - Interconexão das redes de sequência para o curto-circuito bifásico.	40
Figura 26 - Curto-circuito bifásico-terra (F-F-T)	41
Figura 27 - Interconexão das redes de sequência para o curto-circuito bifásico-terra.	42
Figura 28 - Curto-circuito trifásico.	43
Figura 29 - Interconexão das redes de sequência para o curto-circuito trifásico.	44
Figura 30 - Parâmetros iniciais de simulação.	46
Figura 31 - Circuito equivalente de uma LT com parâmetros distribuídos.	46
Figura 32 - Circuito equivalente de uma LT curta.	47
Figura 33 - Circuitos equivalentes T de uma LT de comprimento médio.	47
Figura 34 - Circuitos equivalentes π de uma LT de comprimento médio.	48
Figura 35 - Linha de transmissão curta trifásica no <i>ATPDraw</i>	49
Figura 36 - Linha de transmissão média trifásica no <i>ATPDraw</i>	49
Figura 37 - Circuito equivalente de um gerador.	50
Figura 38 - Gerador no <i>ATPDraw</i>	50
Figura 39 - Circuito equivalente de um transformador real.	51
Figura 40 - Modelagem do transformador trifásico no <i>ATPDraw</i>	52
Figura 41 - Modelagem do transformador trifásico no <i>ATPDraw</i> - Resistência do enrolamento.	53
Figura 42 - Representação das cargas: (a): potência ativa e reativa; (b): impedância constante com resistência e reatância em série; (c): impedância constante com resistência e reatância em	

paralelo.	53
Figura 43 - Modelo para carga distribuída ao longo de uma LT.....	55
Figura 44 - Modelagem uma carga no <i>ATPDraw</i>	55
Figura 45 - Modelagem uma carga trifásica fechada em estrela no <i>ATPDraw</i>	56
Figura 46 - Modelagem uma carga trifásica fechada em triângulo no <i>ATPDraw</i>	57
Figura 47 - Representação do modelo de carga distribuída ao longo da LT no <i>ATPDraw</i>	57
Figura 48 - Modelagem regulador de tensão no <i>ATPDraw</i>	58
Figura 49 - Curto-circuito monofásico no <i>ATPDraw</i>	59
Figura 50 – Chave trifásica no <i>ATPDraw</i>	60
Figura 51 - Curto-circuito bifásico no <i>ATPDraw</i>	60
Figura 52 - Curto-circuito bifásico-terra no <i>ATPDraw</i>	61
Figura 53 - Curto-circuito trifásico-terra no <i>ATPDraw</i>	62
Figura 54 - Relé de sobrecorrente instantâneo/temporizado.	63
Figura 55 – Disjuntor de corrente alternada (52).	63
Figura 56 - O sistema alimentador teste de 4 barras do IEEE.....	64
Figura 57 - Modelagem do circuito do sistema alimentador teste de 4 barras do IEEE no <i>ATPDraw</i>	68
Figura 58 - Test Feeder de 4 barras do IEEE com falta entre a barra 2 e o primário do transformador.	70
Figura 59 - Rede de sequência positiva do sistema alimentador teste de 4 barras do IEEE.	72
Figura 60 - Rede de sequência negativa do sistema alimentador teste de 4 barras do IEEE. ..	72
Figura 61 - Rede de sequência zero do sistema alimentador teste de 4 barras do IEEE.	73
Figura 62 - Sistema alimentador teste de 4 barras do IEEE com falta monofásica.....	76
Figura 63 - Corrente de falta monofásica (A) versus tempo (s).	77
Figura 64 - Sistema alimentador teste de 4 barras do IEEE com falta bifásica.....	77
Figura 65 - Correntes de falta bifásica (A) versus tempo (s).	78
Figura 66 - Sistema alimentador teste de 4 barras do IEEE com falta bifásica-terra.	79
Figura 67 - Correntes de falta bifásica-terra (A) versus tempo (s).....	79
Figura 68 - Sistema alimentador teste de 4 barras do IEEE com falta trifásica-terra.....	80
Figura 69 - Correntes de falta trifásica-terra (A) versus tempo (s).	81
Figura 70 - O sistema alimentador teste de 34 barras do IEEE.....	83
Figura 71 - Equivalente de Thévenin do Sistema de 34 barras do IEEE.....	85
Figura 72 - Sistema de 34 barras do IEEE com faltas nas barras 800, 848 e 890.....	95
Figura 73 - Sinais de corrente de falta monofásica na barra 800.	96
Figura 74 - Sinais de corrente de falta bifásica na barra 800.	97
Figura 75 - Sinais de corrente de falta bifásica-terra na barra 800.....	98
Figura 76 - Sinais de corrente de falta trifásica-terra na barra 800.	99
Figura 77 - Sinais de corrente de falta monofásica na barra 848.	100
Figura 78 - Sinais de corrente de falta bifásica na barra 848.	101
Figura 79 - Sinais de corrente de falta bifásica-terra na barra 848.....	102
Figura 80 - Sinais de corrente de falta trifásica-terra na barra 848.	103
Figura 81 - Sinais de corrente de falta monofásica na barra 890.	104
Figura 82 - Sinais de corrente de falta bifásica na barra 890.	105
Figura 83 - Sinais de corrente de falta bifásica-terra na barra 890.....	106
Figura 84 - Sinais de corrente de falta trifásica-terra na barra 890.	107
Figura 85 – Proteção de sobrecorrente à barra 800.	108
Figura 86 - Sinais de corrente de falta trifásica-terra na barra 800 com ação do relé de sobrecorrente instantâneo.	109

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Relação entre conexão do Trafo e a defasagem dos fasores.	33
Quadro 2 - Relés de sobrecorrente da Tabela ANSI.	34
Quadro 3 - Parâmetros de entrada solicitados para a modelagem do gerador no <i>ATPDraw</i> . ..	51
Quadro 4 - Parâmetros de entrada solicitados para a modelagem do transformador no <i>ATPDraw</i>	52
Quadro 5 - Configuração das linhas de distribuição da rede de 34 barras do IEEE.....	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros de entrada para a modelagem do sistema alimentador teste de 4 barras.	66
Tabela 2 - Parâmetros de entrada para a modelagem do transformador do sistema alimentador teste de 4 barras.	67
Tabela 3 - Valores de tensão, corrente e suas fases teóricos e simulados e erros percentuais.	69
Tabela 4 - Comparação entre os valores de corrente de falta teóricos e os simulados.	82
Tabela 5 - Parâmetros de entrada para a modelagem do gerador do sistema alimentador teste de 34 barras.	84
Tabela 6 - Transformadores do sistema de 34 barras do IEEE.	85
Tabela 7 - Parâmetros de entrada para a modelagem do TRAF0 1 do sistema alimentador teste de 34 barras.	86
Tabela 8 - Parâmetros de entrada para a modelagem do TRAF0 2 do sistema alimentador teste de 34 barras.	86
Tabela 9 - Cargas concentradas do sistema de 34 barras do IEEE.	88
Tabela 10 - Cargas distribuídas do sistema de 34 barras do IEEE.	88
Tabela 11 - Banco de capacitores do sistema de 34 barras do IEEE.	89
Tabela 12 - Valores de resistência e reatância das cargas concentradas.	89
Tabela 13 - Valores de resistência e reatância das cargas distribuídas.	90
Tabela 14 - Susceptância por fase dos bancos de capacitores shunt.	90
Tabela 15 - Valores das relações de transformação do regulador trifásico de tensão 1.	91
Tabela 16 - Valores das relações de transformação do regulador trifásico de tensão 2.	91
Tabela 17 - Valores simulados dos fasores de tensão do sistema de 34 barras do IEEE.	92
Tabela 18 - Valores teóricos versus valores simulados dos fasores de tensão do sistema de 34 barras do IEEE.	93

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.2	OBJETIVOS	18
1.2.1	Gerais.....	18
1.2.2	Específicos	18
1.3	ESTRUTURA DO TCC	19
2	DEFINIÇÃO DE CURTO-CIRCUITO E COMPONENTES SIMÉTRICAS	20
2.1	CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO	20
2.1.1	Comportamento da corrente de curto-circuito.....	21
2.1.2	Curto-circuito trifásico.....	22
2.1.3	Curto-circuito bifásico	23
2.1.4	Curto-circuito monofásico	24
2.2	COMPONENTES SIMÉTRICAS	24
2.3	ELEMENTOS DO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA EM COMPONENTES SIMÉTRICAS	27
2.4	SISTEMA DE PROTEÇÃO NO SEP	33
2.4.1	Relé de sobrecorrente instantâneo (50)	34
3	MÉTODO PARA CÁLCULO DE CURTO CIRCUITO (FALTAS <i>SHUNT</i>)	36
3.1	CIRCUITO MONOFÁSICO	37
3.2	CIRCUITO BIFÁSICO	39
3.3	CURTO-CIRCUITO BIFÁSICO-TERRA.....	41
3.4	CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO	42
4	MODELAGEM DOS ELEMENTOS DO SEP NO <i>ATPDRAW</i>	45
4.1	LINHAS DE TRANSMISSÃO (LT)	46
4.1.1	Linhas de transmissão no <i>ATPDraw</i>	48
4.2	GERADORES REAIS.....	49

4.2.1 Geradores no <i>ATPDraw</i>	50
4.3 TRANSFORMADORES.....	51
4.3.1 Transformadores no <i>ATPDraw</i>	51
4.4 CARGAS.....	53
4.4.1 Cargas concentradas e distribuídas no <i>ATPDraw</i>	55
4.5 REGULADOR DE TENSÃO	57
4.5.1 Regulador de tensão no <i>ATPDraw</i>	58
4.6 FALTAS NO <i>ATPDraw</i>	59
4.6.1 Falta monofásica no <i>ATPDraw</i>	59
4.6.2 Falta bifásica no <i>ATPDraw</i>	60
4.6.3 Falta bifásica-terra no <i>ATPDraw</i>	61
4.6.4 Falta trifásica-terra no <i>ATPDraw</i>	61
4.7 RELÉ DE SOBRECORRENTE INSTANTÂNEO (50) E DISJUNTOR DE CORRENTE ALTERNADA (52) NO <i>ATPDRAW</i>	62
5 MODELAGEM DOS SISTEMAS DE ALIMENTADOR TESTE DE 4 E 34 BARRAS DO IEEE E SIMULAÇÃO DE FALTAS SHUNT.....	64
5.1 O SISTEMA <i>TEST FEEDER</i> DE 4 BARRAS DO IEEE	64
5.2 MODELAGEM DO SISTEMA ALIMENTADOR TESTE DE 4 BARRAS DO IEEE	65
5.2.1 Linhas de transmissão	65
5.2.2 Gerador	66
5.2.3 Transformador	66
5.2.4 Carga	67
5.3 SIMULAÇÃO DO CASO BASE DO SISTEMA ALIMENTADOR TESTE DE 4 BARRAS DO IEEE: COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES TEÓRICOS E SIMULADOS	68
5.4 MODELAGEM, CÁLCULO E SIMULAÇÃO DOS CENÁRIOS DE FALTAS SHUNT: COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES TEÓRICOS E SIMULADOS NO	

<i>ATPDRAW</i>	70
5.4.1 Modelagem dos cenários de falta e cálculo das correntes de curto-circuito	74
5.4.2 Modelagem dos cenários de falta e simulação no <i>ATPDraw</i>.....	76
5.4.3 Comparação entre os valores de corrente de curto-circuito calculados e simulados no <i>ATPDraw</i> e análise.....	81
5.5 ESTUDO DE CASO: APRESENTAÇÃO E MODELAGEM COMPUTACIONAL DO SISTEMA ALIMENTADOR DE TESTE DE 34 BARRAS DO IEEE.....	83
5.5.1 Gerador e equivalente de Thevénin do sistema	84
5.5.2 Transformadores	85
5.5.3 Linhas de transmissão	86
5.5.4 Cargas concentradas, distribuídas e bancos de capacitores	87
5.5.5 Reguladores de tensão	90
5.6 SIMULAÇÃO DO CASO BASE DO SISTEMA ALIMENTADOR DE TESTE DE 34 BARRAS DO IEEE: COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES TEÓRICOS E SIMULADOS	91
5.7 SIMULAÇÃO DOS CENÁRIOS DE FALTAS <i>SHUNT</i> NO SISTEMA DE 34 BARRAS DO IEEE NO <i>ATPDRAW</i>	94
5.7.1 Faltas aplicadas à barra 800	95
5.7.2 Faltas aplicadas à barra 848	99
5.7.3 Faltas aplicadas à barra 890	104
5.8 APLICAÇÃO DE RELÉ DE SOBRECORRENTE INSTANTÂNEO (50) PARA A PROTEÇÃO DO TRANSFORMADOR CONECTADO À BARRA 800	107
5.8.1 Falta trifásica-terra aplicada à barra 800 protegida.....	108
5.9 ANÁLISE DOS RESULTADOS	109
6 CONCLUSÃO.....	111
REFERÊNCIAS	113
APÊNDICE A – Cálculo de corrente de falta monofásica no <i>Octave</i>	116

APÊNDICE B – Cálculo de corrente de falta bifásica no <i>Octave</i>.....	117
APÊNDICE C – Cálculo de corrente de falta bifásica-terra no <i>Octave</i>	118
APÊNDICE D – Cálculo de corrente de falta trifásica-terra no <i>Octave</i>	120
APÊNDICE E – Leitura do valor máximo de corrente dos sinais gerados pelo <i>ATP</i>	123
APÊNDICE F – Sistema 34-barras do IEEE no <i>ATPDraw</i> Parte 1.....	123
APÊNDICE G – Sistema 34-barras do IEEE no <i>ATPDraw</i> Parte 2.....	123

1 INTRODUÇÃO

A função básica do Sistema Elétrico de Potência (SEP) é fornecer energia elétrica aos consumidores com qualidade e continuidade adequada, de acordo com os termos do Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico (CMSE), cuja função é acompanhar e avaliar permanentemente a continuidade e a segurança do suprimento eletroenergético em todo o território nacional (BRASIL, 2004). O CMSE é composto por membros das seguintes entidades: Ministério de Minas e Energia (MME), Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) e da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE). Alguns dos requisitos para o bom funcionamento do SEP são: continuidade, conformidade, flexibilidade, segurança e manutenção.

De acordo com o relatório de Previsão de Carga Global para o Planejamento Anual da Operação Energética elaborado pelo ONS, CCEE e EPE em um trabalho conjunto, espera-se que a demanda de carga aumente e a previsão de crescimento anual médio é de 3,3%, atingindo 94.157 MW até 2029 (ONS, 2024). E, para atender a essa demanda, o ONS estima que a capacidade instalada no Sistema Interligado Nacional (SIN) irá passar de 241.413 MW para 269.483 MW em 2029 (ONS, 2025).

Neste contexto, o avanço acelerado da globalização, de modo geral, cria a tendência de que a sociedade se torne cada vez mais dependente da energia elétrica. Um exemplo disso é a Indústria 4.0 que propõe e define conceitos para a integração de tecnologias digitais em indústrias, para que indicadores sejam acompanhados, muitas vezes, em tempo real, assim, tornando-as mais eficientes e produtivas (INDÚSTRIA 4.0, 2023).

Com sistemas cada vez mais eletronicamente digitais e integrados, vem o aumento da sensibilidade às perturbações, como o afundamento de tensão, que, por sua vez, pode provocar o não funcionamento ou mau funcionamento de equipamentos como Controladores Lógicos Programáveis (CLP), inversores de frequência, servomotores, etc. Ainda considerando ambientes industriais, anomalias na Qualidade da Energia Elétrica (QEE) podem levar a paradas de uma linha de produção inteira, gerando prejuízo econômico, tanto pelo produto que passou determinado tempo sem ser produzido, quanto pelo equipamento que pode ter sido danificado devido à oscilação (HIRT, 2015).

De acordo com o ONS (2025), até 2028, a extensão da rede básica de transmissão (de

230 a 800 kV) do Sistema Interligado Nacional deve chegar a 200.015 km. Dessa forma, é perceptível que devido a vasta extensão do SIN brasileiro, as linhas de transmissão são expostas a diversos tipos de falhas, sejam elas causadas por condições meteorológicas ou outros fatores. Dentre as ocorrências mais frequentes e críticas no sistema elétrico, o curto-circuito apresenta-se como o principal desafio operacional.

Dentre as ocorrências mais frequentes e críticas no sistema elétrico, o curto-circuito apresenta-se como o principal desafio operacional. Este evento se caracteriza pelo contato indevido entre condutores de diferentes fases ou entre uma ou mais fases e o terra, gerando condições indesejáveis para o sistema elétrico. A intensidade da corrente de curto-circuito dependerá de fatores como: tipo do curto-circuito, conexão dos enrolamentos dos transformadores e da distância entre o curto-circuito e a unidade geradora (GONEN, 2013).

As faltas *shunt*, também conhecida como curto-circuito podem ocorrer entre fases, entre fases e terra ou ambos. Ou seja, podem ser monofásicos-terra (F-T), bifásicos (F-F), bifásicos-terra (F-F-T), trifásicos isolados da terra (F-F-F) e trifásicos-terra (F-F-F-T) (SANTOS, 2009). A análise de curto-circuito é imprescindível para que a QEE seja mantida, pois, um estudo de curto-circuito visa (SANTOS, 2009):

- Determinação da capacidade dos equipamentos em suportar elevadas correntes de falta;
- Cálculo dos ajustes dos dispositivos de proteção contra sobrecorrente (relés e disjuntores de baixa tensão);

Segundo Kindermann (1997), o comportamento do sistema elétrico deve ser sistematicamente acompanhado. Para que a QEE seja mantida, o estudo de curto-circuito deve ser atualizado sempre que houver uma expansão, mudança de topologia, instalação de novas cargas ou unidades geradoras.

Diante do exposto, este trabalho visa a realização de um estudo de curto-circuito aplicado ao sistema de transmissão *IEEE 34 Node Test Feeder*, do *IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers)*, ou, em uma tradução literal: Alimentador de teste de 34 barras do Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos. O foco deste trabalho será aplicar os cenários de curto-circuito, anteriormente citados, em alguns pontos do sistema, calcular a corrente de curto-circuito esperada, simular o cenário de falta e obter as correntes de curto-circuito para analisar cenário de curto-circuito versus degradação da continuidade e qualidade do sistema.

As simulações serão feitas com auxílio do *software* de simulação denominado *Alternative Transients Program (ATP)* em livre tradução Programa de Transientes

Eletromagnéticos, através da sua interface de modelagem, o *ATPDraw*.

Por fim, uma simulação com uso de um relé de sobrecorrente instantâneo, que conforme a tabela *American National Standards Institute (ANSI)* recebe o código 50, será executada no sistema 34-barras.

1.2 OBJETIVOS

A seguir serão apresentados os objetivos gerais e específicos que se espera atingir com este trabalho.

1.2.1 Gerais

Analisar, através de modelagem e simulação de faltas no sistema elétrico de potência de distribuição/transmissão, a ocorrência, evolução e consequências das faltas do tipo monofásica, bifásica, bifásica-terra e trifásica-terra.

1.2.2 Específicos

- Realizar uma fundamentação teórica acerca dos tipos de faltas existentes no SEP;
- Desenvolver uma base teórica do cálculo de faltas através do método de componentes simétricas com uso das condições de contorno;
- Selecionar e estudar um sistema elétrico, de transmissão ou distribuição, disponível na literatura científica para aplicar faltas;
- Realizar a modelagem e simulação do SEP com cenário em normalidade e em anormalidade (com faltas);
- Analisar as faltas ocorridas em pontos dos sistemas elétricos escolhidos e entender a evolução da corrente de falta ao aplicar diferentes faltas *shunt* ao mesmo ponto;
- Realizar cálculos de faltas analiticamente e via *software* de acordo com o tipo, local e resistência de falta;

- Demonstrar por meio do cálculo de faltas de um SEP, como a magnitude das correntes de falta pode impactar na degradação das linhas e/ou componentes do SEP;
- Ajustar um relé de sobrecorrente instantâneo (*ANSI 50*) e simular a atuação para uma falta trifásica no *ATPDraw*;

1.3 ESTRUTURA DO TCC

- No capítulo 1, é apresentada uma introdução sobre SEP, sua função e seus dados atuais e futuros, e alguns órgãos que fiscalizam e regulamentam. Foi apresentada uma breve motivação da importância do estudo de curto-circuito. Também foram apresentados os tipos de faltas *shunt* que serão objetos de estudo neste trabalho.
- No capítulo 2, será apresentada uma base teórica acerca dos curto-circuitos mais comuns, método das componentes simétricas e a modelagem dos componentes do SEP em componentes simétricas, além de uma breve teoria sobre relé de proteção.
- No Capítulo 3 será apresentado o método para cálculo da corrente de curto-circuito (falta *shunt*) que será utilizado neste trabalho.
- O Capítulo 4 abordará os temas: modelagem de elementos do SEP e simulação os modelos utilizados para a implementação dos sistemas no *ATPDraw*.
- No Capítulo 5 encontram-se os dois sistemas estudados neste trabalho: o Sistema Alimentador teste de 4 barras do IEEE e o Sistema Alimentador teste de 34 barras do IEEE. São feitas as modelagens, simulações e validações para os dois sistemas. Os cenários de faltas *shunt* são aplicados em ambos sistemas e seus resultados são analisados e discutidos.
- No Capítulo 6 serão apresentadas as conclusões deste trabalho.

2 DEFINIÇÃO DE CURTO-CIRCUITO E COMPONENTES SIMÉTRICAS

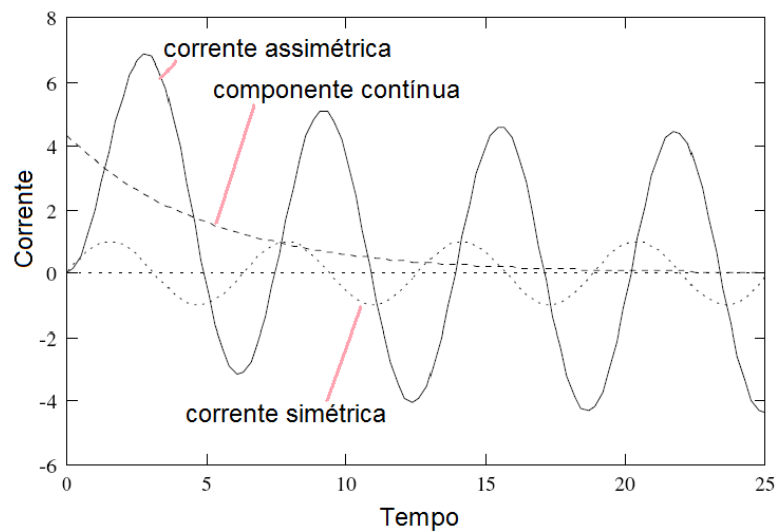
Segundo Kindermann (1997), os sistemas que mais sofrem com as faltas elétricas são os de transmissão de energia, pois são elas que levam energia para todos os lugares do país, logo, estão mais suscetíveis aos problemas que podem originar uma falta. A seguir, serão apresentados os tipos de curto-circuito. Os tipos de curtos-circuitos com maior ocorrência, de acordo com Mamede Filho (2024), são os monofásicos com uma taxa de ocorrência em torno de 70%, já os mais raros, são os curtos-circuitos trifásicos, com uma taxa de ocorrência de apenas 8%. Os bifásicos ocorrem 15% das vezes.

2.1 CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO

A corrente gerada por um curto-circuito apresenta certas características em seu sinal, a ela dá-se o nome curva envoltória de curto-circuito. A corrente alternada assimétrica $i_{assimétrica}$ é composta por uma componente alternada (simétrica), $i_{simétrica}$, e por uma componente contínua, $i_{contínua}$, conforme a equação (2.1). Na Figura 1, é mostrado o comportamento da corrente em relação ao tempo da equação (2.1).

$$i_{assimétrica}(t) = i_{simétrica}(t) + i_{contínua}(t) \quad (2.1)$$

Figura 1 - Corrente de curto-circuito e suas componentes.



Fonte: Santos, 2009.

O valor de pico assimétrico da corrente de curto-circuito é empregado geralmente para determinar a capacidade dos equipamentos em suportar os efeitos dinâmicos das correntes de falta e, em alguns casos, pode ser utilizada para especificar a corrente de ajuste de relés de sobrecorrente instantâneo (ANSI 50) (realizados os devidos ajustes) para evitar situações de falso *trip* (sinal de desligamento enviado do relé para o disjuntor), ou seja, desligamentos indesejados do sistema elétrico (IEEE, 2001). Os valores simétricos são utilizados para determinar a capacidade de interrupção de dispositivos de seccionamento (por exemplo, disjuntores), as capacidades de suportar efeitos térmicos produzidos pelas correntes de curto-circuito e para definir os ajustes de proteção contra sobrecorrente. Ambas são utilizadas para determinar capacidades e pontos de ajuste de elementos de proteção, cabe ao engenheiro o julgamento de qual irá servir para determinado propósito melhor que a outra, para que o sistema de proteção seja o mais seletivo e coordenado possível, dado as limitações econômicas do projeto.

2.1.1 Comportamento da corrente de curto-circuito

Conforme pode ser visto na Figura 2, no domínio do tempo, a corrente de curto-circuito contém três períodos, são eles: subtransitório, transitório e regime permanente. Durante os períodos subtransitórios e transitórios, a corrente de curto-circuito é chamada de assimétrica, após o decaimento causado pela componente CC da corrente de curto-circuito, a corrente total entra em regime permanente por tempo indeterminado. Por isso, ela é determinada conforme a equação (2.2).

$$i_{CC}(t) = I_M \cos(\omega t) + I_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (2.2)$$

Em que,

ω : frequência angular

I_M : Valor máximo da componente simétrica da corrente de curto-circuito

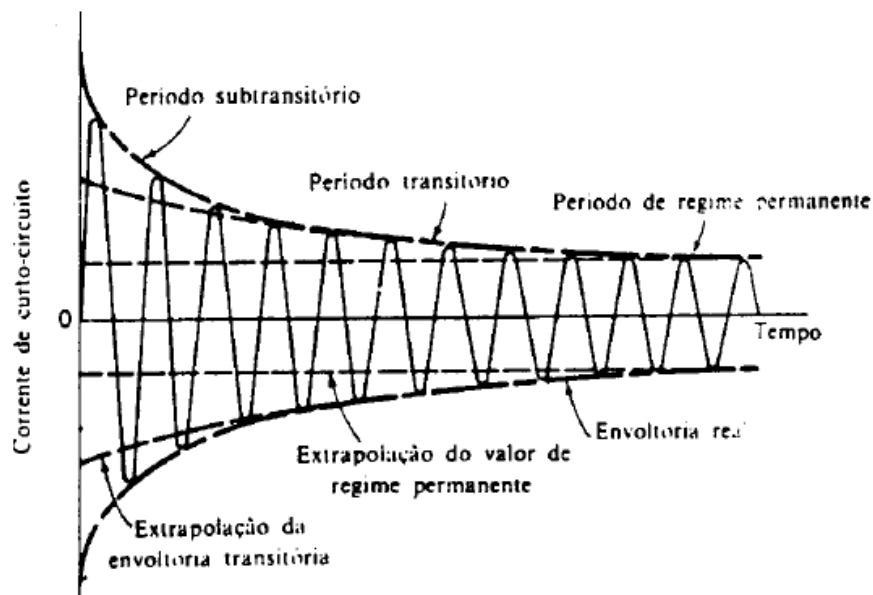
I_0 : Valor máximo da componente contínua da corrente de curto-circuito.

A componente contínua da corrente de curto-circuito cai exponencialmente com o tempo t . Em que τ depende de uma indutância, L , e de uma resistência, R , conforme a equação (2.3).

$$\tau = \frac{L}{R} \quad (2.3)$$

Os valores de L e R dependerão do local da falta e das impedâncias envolvidas na ocorrência.

Figura 2 - Períodos da corrente de curto-circuito.

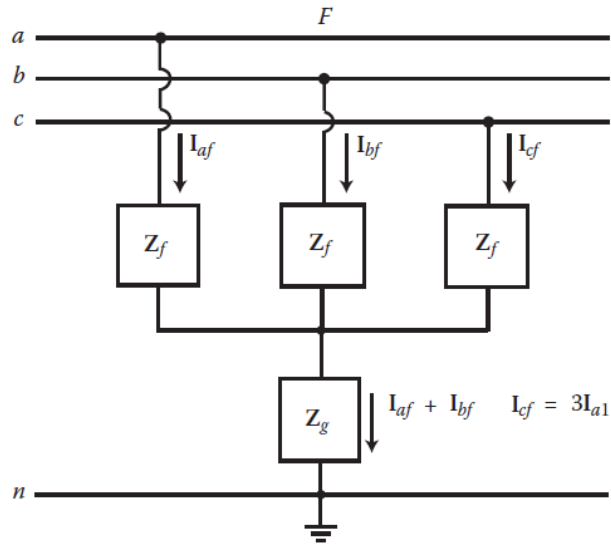


Fonte: Kindermann, 1997.

2.1.2 Curto-circuito trifásico

Na Figura 3, é mostrado o curto-circuito trifásico, em que se tem a ligação de três fases entre si ou três fases e terra. Observa-se que as fases são interligadas entre si por meio de uma impedância Z_g (impedância de fase-terra). Se não houver nenhuma impedância de falta Z_f ou Z_g , então, é um curto-circuito trifásico franco.

Figura 3 - Curto-circuito trifásico.

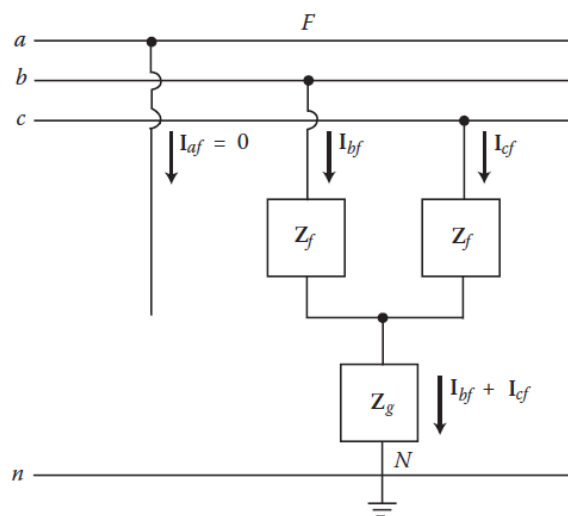


Fonte: Gonen, 2013.

2.1.3 Curto-circuito bifásico

Na Figura 4, pode-se ver o curto-circuito bifásico-terra, no caso da falta entre duas fases e terra, a impedância de falta entre as fases é denotada como Z_f . Se não houver conexão com a terra (Z_g sendo infinito), a falta é dita bifásica. As faltas bifásicas e bifásicas-terra são ditas francas se as impedâncias Z_f forem nulas.

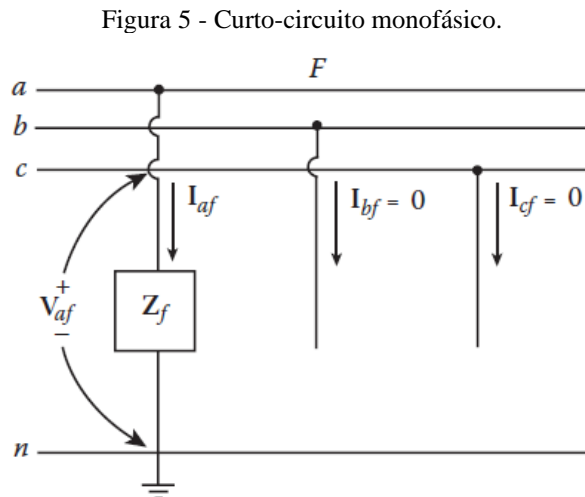
Figura 4 - Curto-circuito bifásico-terra.



Fonte: Gonen, 2013.

2.1.4 Curto-circuito monofásico

Na Figura 5, mostra-se um curto-circuito fase-terra (F-T), conhecido como curto-circuito monofásico. A impedância de falta é dada por Z_F . Se o valor de Z_F for nulo, o curto-circuito é dito como curto-circuito monofásico franco ou sólido.



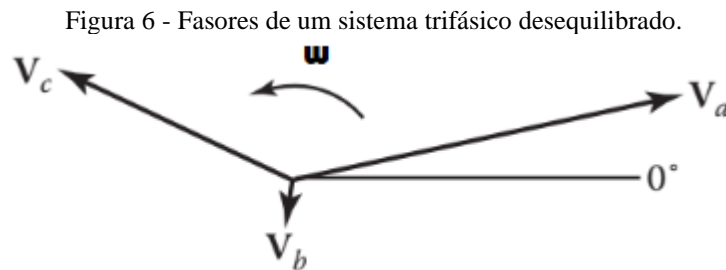
Fonte: Gonen, 2013.

2.2 COMPONENTES SIMÉTRICAS

No geral, pode-se dizer que sistemas trifásicos perfeitamente balanceados só existem na teoria. Na prática, são encontrados sistemas que são aproximadamente balanceados e por questões práticas, para analisá-los, são considerados balanceados. No entanto, existem situações que surgem, como: faltas assimétricas, cargas desbalanceadas, condutores partidos, ou mesmo condições assimétricas em máquinas rotativas que exigem uma análise um pouco mais complexa. Em um sistema trifásico desequilibrado, não é possível analisar uma única fase e definir as amplitudes e ângulo das outras fases automaticamente (defasando de 120°). Para contornar esse problema Fortescue (1918) desenvolveu um método conhecido como método das componentes simétricas ou método dos componentes simétricos que define que um sistema desbalanceado de n fasores relacionados pode ser decomposto em n sistemas balanceados de fasores chamados de componentes simétricos do sistema desbalanceado original. Trazendo para a realidade, usualmente, os sistemas trifásicos possuem as fases a , b e c e sua sequência é abc . Os sistemas de componentes simétricas oriundos do sistema trifásico desequilibrado são:

sistema de sequência-positiva (abc), sistema de sequência negativa (acb) e sistema de sequência-zero (GONEN, 2013).

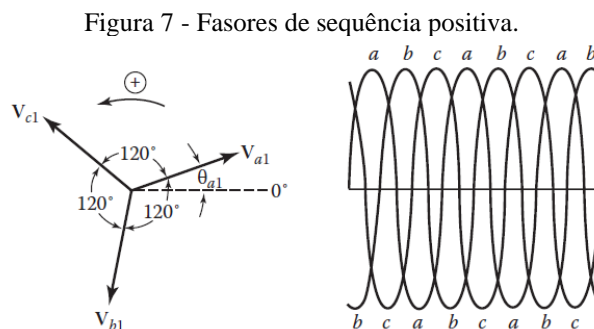
Graficamente, um sistema trifásico desequilibrado é representado conforme a Figura 6, no qual os valores dos fasores de tensão \mathbf{V}_a , \mathbf{V}_b e \mathbf{V}_c são referentes às fases a, b e c. O ângulo ou frequência angular é dado por ω .



Fonte: adaptada de Gonen, 2013.

Aplicando o método das componentes simétricas na Figura 6, chegamos aos sistemas trifásicos equilibrados das Figuras 7, 8 e 9.

Na Figura 7, mostra-se o sistema de sequência positiva (abc), com três fasores (\mathbf{V}_{a1} , \mathbf{V}_{b1} e \mathbf{V}_{c1}) de mesma amplitude e defasagem de 120° , com sentido de rotação dos fasores positivo, igualmente ao sistema original.



Fonte: Gonen, 2013.

Na Figura 8, é mostrado o sistema de sequência negativa (ACB), com três fasores (\mathbf{V}_{a2} , \mathbf{V}_{b2} e \mathbf{V}_{c2}) de mesma amplitude e defasagem de 120° , com sentido de rotação dos fasores negativo, ou seja, possui sentido inverso ao sentido original do sistema.

desequilibrado pode ser representado matricialmente como abaixo:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Em que $T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$ é a matriz de transformação de componentes simétricas para

o domínio das fases. O operador $a = 1\angle 120^\circ$.

Conseqüentemente, para se obter as componentes simétricas a partir das tensões de fase, aplica-se a matriz inversa $[T]^{-1}$, que, neste caso, multiplica a matriz das tensões de fase, conforme expressa a equação (2.5).

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Analogamente, para encontrar as componentes simétricas das correntes, I_{a0} , I_{a1} e I_{a2} , a partir do conjunto de correntes desequilibradas, tem-se:

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Em um sistema trifásico de 4 fios, a soma fasorial das correntes de linha é igual à corrente de neutro. Então,

$$I_n = I_a + I_b + I_c \quad (2.7)$$

Se compararmos a equação (2.7) com a conseqüente equação de I_{a0} a partir do desenvolvimento matemático da matriz da equação (2.6), conclui-se o seguinte resultado:

$$I_n = 3I_0 \quad (2.8)$$

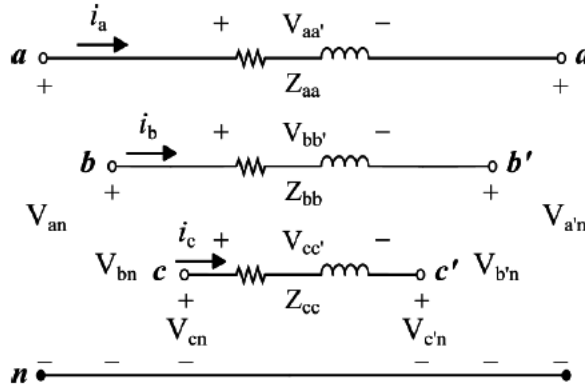
I_n só será diferente de zero se houver circuito fechado em que ela possa circular como uma corrente de retorno.

2.3 ELEMENTOS DO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA EM COMPONENTES SIMÉTRICAS

Quando está circulando em um circuito uma corrente de seqüência, a impedância que provoca, conseqüentemente, uma queda de tensão, é chamada impedância daquela determinada seqüência. Nas chamadas redes de seqüência, temos as impedâncias de seqüência positiva, impedâncias de seqüência negativa e impedâncias de seqüência zero. Esse estudo considerará

que o sistema trifásico analisado era equilibrado no momento pré-falta. Como as correntes de sequência de fase causam quedas de tensão somente em impedâncias de mesma sequência e são independentes das correntes de outras sequências, em um sistema equilibrado, assim, pode-se dizer que as correntes de sequência percorrem por meio de um circuito monofásico que é composto pelas impedâncias da mesma sequência que causa a queda de tensão. Esse circuito monofásico equivalente, formado pelas impedâncias de sequência, é chamado de rede de sequência (STEVENSON Jr, 1982). Forças eletromotrizes são incluídas na rede de sequência, para a mesma sequência que a originou. Ao final, as redes de sequência que I_{a1} , I_{a2} e I_{a0} circulam, são conectadas para representar as mais diversas situações de faltas.

Figura 11 - Sistema com duas barras trifásicas com fases denotadas por abc e a'b'c'.



Fonte: adaptada de Gonen, 2013.

No sistema da Figura 11, as impedâncias próprias de cada fase são denotadas por Z_{aa} , Z_{bb} e Z_{cc} , desta forma, no domínio das fases, o sistema é definido pela matriz da equação 2.9.

$$\begin{bmatrix} V_{an} - V_{a'n'} \\ V_{bn} - V_{b'n'} \\ V_{cn} - V_{c'n'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ba} & Z_{ca} \\ Z_{ab} & Z_{bb} & Z_{cb} \\ Z_{ac} & Z_{bc} & Z_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Na forma vetorial:

$$V_f - V_f' = Z_f \cdot I_f \quad (2.10)$$

No domínio de sequência, temos que:

$$V_s - V_s' = Z_s \cdot I_s \quad (2.11)$$

E

$$Z_s = T^{-1} \cdot Z_f \cdot T \quad (2.12)$$

Assim, a matriz de impedâncias das fases, no domínio de sequência, fica da seguinte forma:

$$Z_s = \begin{bmatrix} Z_0 & Z_{01} & Z_{02} \\ Z_{10} & Z_1 & Z_{12} \\ Z_{20} & Z_{21} & Z_2 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Se as linhas forem completamente transpostas, isto é: $Z_{aa} = Z_{bb} = Z_{cc}$

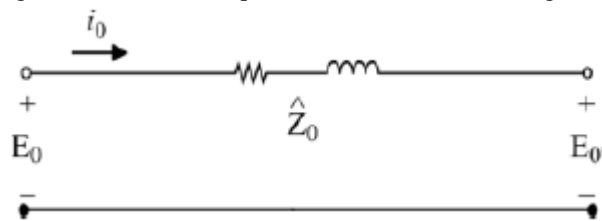
$$Z_{ab} = Z_{ac} = Z_{bc} \quad (2.14)$$

Tem-se que:

$$Z_s = \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

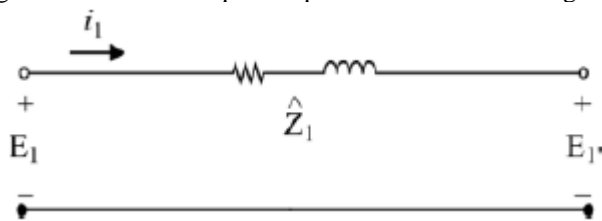
Os circuitos de sequência para o sistema da Figura 11, ficam conforme as Figuras 12, 13 e 14.

Figura 12 - Rede de sequência zero do sistema da figura 9.



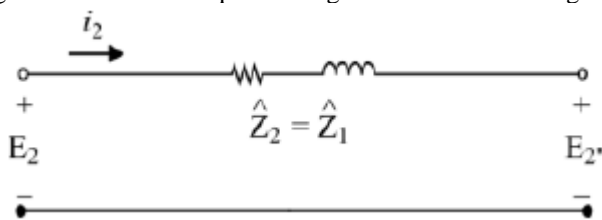
Fonte: adaptada de Gonen, 2013.

Figura 13 - Rede de sequência positiva do sistema da figura 9.



Fonte: adaptada de Gonen, 2013.

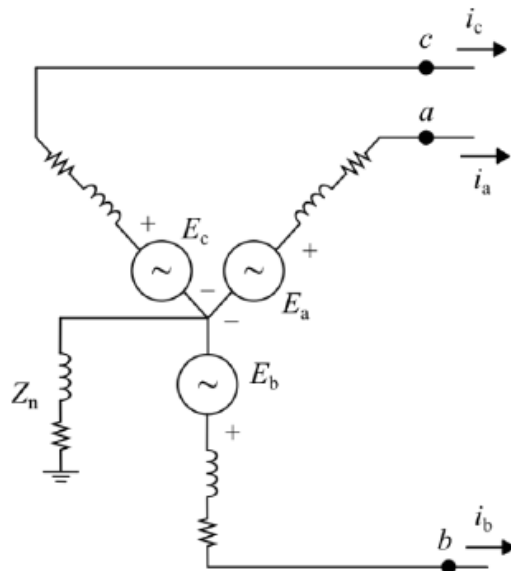
Figura 14 - Rede de sequência negativa do sistema da figura 9.



Fonte: adaptada de Gonen, 2013.

O gerador síncrono trifásico, amplamente utilizado por hidroelétricas, tem extrema relevância, logo, será feita a sua modelagem em redes de seqüência, conforme mostrado na Figura 15.

Figura 15 - Gerador síncrono ligado em estrela aterrada por impedância Z_n .

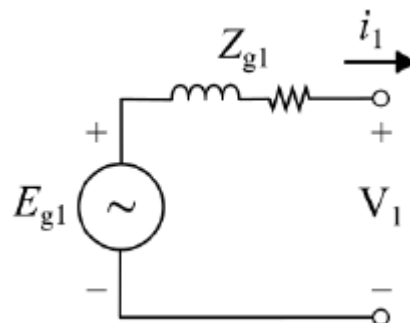


Fonte: adaptada de Gonen, 2013.

As tensões internas do gerador são: E_a , E_b e E_c .

Como os geradores síncronos, geralmente, funcionam como fontes alternadas com seqüência positiva, logo, na rede de seqüência positiva, tem-se uma fonte de tensão em série com a impedância de seqüência positiva do gerador, conforme a Figura 16.

Figura 16 - Rede de seqüência positiva do gerador síncrono.

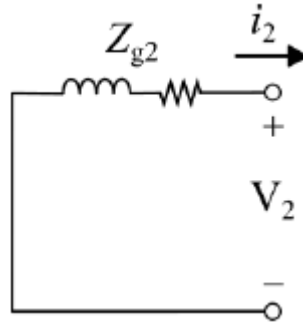


Fonte: adaptada de Gonen, 2013.

Como não há fonte de tensão com seqüência negativa, não se coloca nenhuma fonte na

rede de sequência negativa, como apresentado na Figura 17.

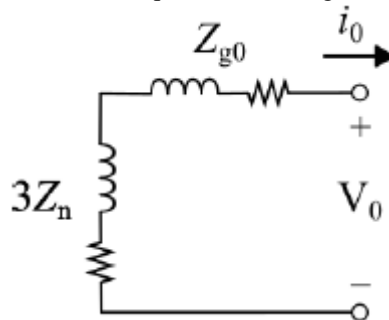
Figura 17 - Rede de sequência negativa do gerador síncrono.



Fonte: adaptada de Gonen, 2013.

Na rede de sequência zero, mostrada na Figura 18, teremos uma queda de tensão dada por $3Z_N \cdot I_0$.

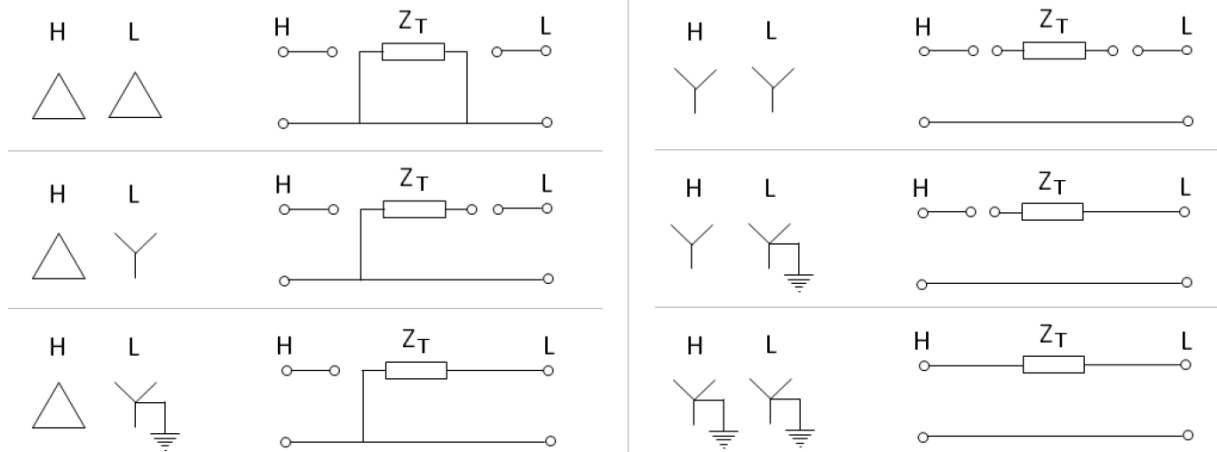
Figura 18 - Rede de sequência zero do gerador síncrono.



Fonte: adaptada de Gonen, 2013.

Para analisar as amplitudes das correntes de falta corretamente, é essencial que a rede de sequência seja considerada conforme o sistema analisado. A forma como as bobinas dos transformadores está conectada influencia diretamente no defasamento angular dos fasores de tensão e corrente nas redes de seqüências positiva (RSP) e Negativa (RSN) e, na circulação de corrente de sequência zero (RSZ), na redes de sequência zero. Os transformadores podem estar conectados em delta-delta, delta-Y, delta-Y_{aterrado}, Y-Y, Y_{aterrado}-Y e Y_{aterrado}-Y_{aterrado}. A seguir, pode-se observar a Figura 19 que relaciona as conexões dos transformadores com suas redes de sequência zero. Na Figura 19, as letras H e L referem-se ao lado de alta (*high*) e lado de baixa (*low*) do transformador, e, devido à conexão dos mesmos, é observado se a corrente percorre ou não de um lado para o outro.

Figura 19- Redes de seqüência zero para diferentes esquemas de conexões de transformadores trifásicos.



Fonte: Tales, 2013.

Na Figura 19, é possível observar que no transformador conectado em delta-delta, a sua RSZ correspondente não permite que haja corrente fluindo por meio do circuito, portanto, a corrente de seqüência zero será nula.

O mesmo acontece para todos os casos em que não houver pelo menos um dos lados do trafo conectado em estrela aterrada.

A única configuração que permite que a corrente de seqüência zero flua livremente é a $Y_{aterrado}-Y_{aterrado}$. Isso impacta diretamente na construção dos circuitos de componentes simétricas para a análise e cálculo da corrente de falta de um sistema.

Outro fator que influencia o valor da corrente de falta e cabe a sua abordagem é o efeito de defasamento entre os fasores de corrente de seqüência positiva e negativa que são transmitidos do lado de alta tensão para o lado de baixa tensão.

Na Quadro 1, pode-se ver a relação entre as conexões dos transformadores, se tem ou não corrente de seqüência zero e se haverá defasagem entre as correntes do lado do primário e secundário.

Quadro 1 - Relação entre conexão do Trafo e a defasagem dos fasores.

TIPO DE CONEXÃO	DEFASAGEM (EXISTE OU NÃO)
delta-delta	NÃO
delta-Y	SIM
delta- Y_{aterrado}	SIM
Y-Y	NÃO
Y_{aterrado} -Y	NÃO
Y_{aterrado} - Y_{aterrado}	NÃO

Fonte: Stevenson Jr, 1982.

2.4 SISTEMA DE PROTEÇÃO NO SEP

A função do sistema de proteção é provocar a remoção imediata da operação do SEP elementos que estejam submetidos a curto-circuitos, assim como elementos que estejam operando normalmente, porém, conectados à falta, interferindo na operação do SEP como um todo (FRAZÃO, 2019). Nesse contexto, é importante saber quais elementos compõem um sistema de proteção. Na Figura 20, mostra-se a estrutura básica de um sistema de proteção, que é composto pelos elementos aquisitores e condicionadores de sinais, pelos relés/SCADA (em inglês, *Supervisory Control and Data Acquisition*, em português, Controle de supervisão e aquisição de dados), que são componentes responsáveis por interpretar o sinal que chega até eles para que seja enviado um sinal para o elemento final (atuador), que são os disjuntores e fusíveis, entre outros.

Figura 20 - Estrutura básica de um sistema de proteção.



Fonte: Frazão, 2019.

Na teoria de proteção de sistemas elétricos, existem diversos relés com as mais variadas funções de proteção, algumas das mais utilizadas em linhas de transmissão estão listadas no Quadro 2.

Quadro 2 - Relés de sobrecorrente da Tabela ANSI.

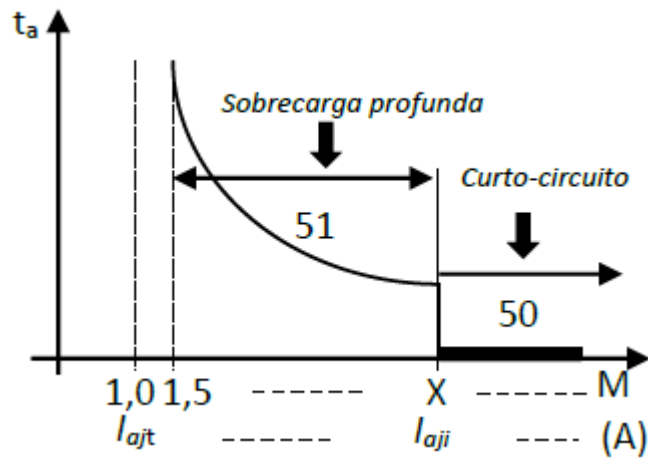
CÓDIGO ANSI	Denominação
21	Relé de distância
50	Relé de sobrecorrente instantâneo
51	Relé de sobrecorrente temporizado
67	Relé direcional de sobrecorrente

Fonte: ETL.

2.4.1 Relé de sobrecorrente instantâneo (50)

O relé de sobrecorrente instantâneo, como o próprio nome sugere, possui ação instantânea, ou seja, assim que a corrente de ajuste for sensibilizada pelo relé de sobrecorrente, o relé deverá enviar um sinal de *trip* para o atuador, que pode ser um disjuntor, para que ele abra os contatos. Uma curva de tempo inverso e o ajuste da unidade instantânea de um relé de sobrecorrente são apresentados na Figura 21.

Figura 21 - Curva de tempo inverso com ajuste da unidade instantânea.



Fonte: Aragão Filho, 2014.

Neste trabalho, será ajustado um relé de sobrecorrente de ação instantânea para proteger um transformador.

A inequação (2.16) define o limiar da corrente de ajuste da unidade temporizada que será utilizada como base para definir o ajuste da unidade instantânea Aragão Filho (2014).

$$f_{sc} \times I_{nom} \leq I_{ajt} \leq I_{ccmín} \quad (2.16)$$

Em que,

f_{sc} : fator de sobrecarga ($>1,0$);

I_{nom} : corrente nominal da LT;

$I_{ccmín}$: corrente de curto-circuito mínima previsível;

a : 1,5 para relé eletromecânico; 1,1 para relé digital.

O ajuste da unidade instantânea será selecionado, conforme a inequação (2.17).

$$I_{aji} \leq X \times I_{ajt} \quad (2.17)$$

Em que,

X = múltiplo da corrente de ajuste da unidade temporizada

X deve ser selecionado arbitrariamente.

O ajuste da unidade instantânea também pode ser selecionado conforme a inequação (2.18), para o caso em que a corrente de curto-circuito mínima já seja conhecida.

$$I_{aji} \leq I_{ccmín} \quad (2.18)$$

3 MÉTODO PARA CÁLCULO DE CURTO CIRCUITO (FALTAS *SHUNT*)

Este capítulo detalhará o passo a passo do cálculo de curto-circuito utilizado neste trabalho.

Algumas considerações devem ser feitas para que o cálculo seja simplificado, como:

- Geradores e barras estão operando com tensão de $1\angle 0^\circ$ pu.
- As capacitâncias são ignoradas, para linhas de transmissão até 80 km.
- A impedância equivalente da RSP é idêntica a equivalente da RSN.
- Considera-se que o sistema pré-falta é balanceado.

O primeiro passo é desenhar o diagrama do circuito elétrico faltoso identificando o sentido das correntes fluindo no sentido da falta.

Após isso, escreve-se as condições de contorno para relacionar as correntes e tensões conhecidas com o tipo de falta analisado.

Relacionadas as tensões e correntes, é necessário transformar as correntes e tensões para o domínio das componentes simétricas, conforme os conceitos apresentados no Capítulo 2. Nesta fase também se analisa conexão de transformadores, cargas e tipo de faltas no domínio das sequências.

Vale lembrar que o método das componentes de fase é amplamente utilizado para cálculos de curtos-circuitos em sistemas de distribuição (KERSTING; KERESTES, 2023), por descrever com maior nível de detalhamento os efeitos causados pelo desbalanceamento das cargas, linhas não transpostas entre outros fatores que dificultam a aplicação do método das componentes simétricas.

Entretanto, se os dados fornecidos por um sistema, já levarem em consideração o desbalanceamento das linhas, é mais conveniente e prático aplicar o método das componentes simétricas, porque os resultados encontrados serão semelhantes ao mesmo tempo que permite simplificação do cálculo das correntes de curto-circuito. Para faltas assimétricas, além de servir como base de normas IEC e IEEE, dessa forma, a utilização do método das componentes simétricas para ensino e cálculos normativos é considerada uma opção pertinente e válida.

Segue-se para a conexão da rede de sequência que melhor descreve a conexão do sistema original com o nó da falta.

Por fim, analisa-se as componentes de tensão para conectar os terminais da rede de

sequência restantes.

3.1 CIRCUITO MONOFÁSICO

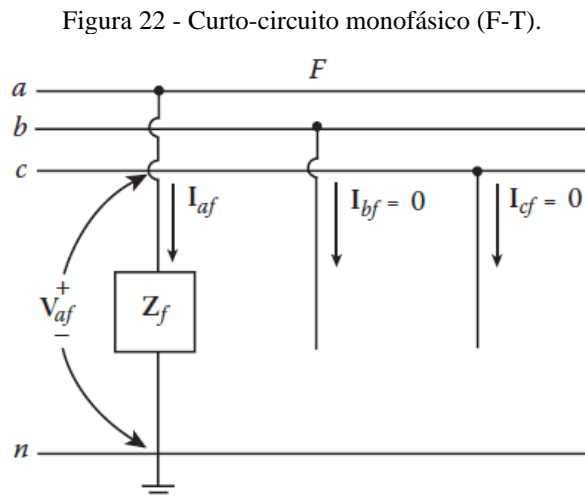
Na Figura 22, é exemplificado um curto-circuito fase-terra, em que a fase “a” está conectada ao terminal neutro (terra) por meio de uma impedância de falta Z_f .

Para esse tipo de falta as condições de contorno conhecidas são:

$$I_{bf} = I_{cf} = 0 \quad (3.1)$$

E

$$V_{af} = Z_f I_{af} \quad (3.2)$$



Fonte: Gonen, 2013.

Utilizando a equação (2.6), obtém-se:

$$\begin{bmatrix} I_{a0f} \\ I_{a1f} \\ I_{a2f} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{af} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Da equação (3.3) pode-se interpretar que as correntes em componentes simétricas para o curto-circuito monofásico são iguais, logo:

$$I_{a0f} = I_{a1f} = I_{a2f} = \frac{1}{3} I_{af} \quad (3.4)$$

De modo que,

$$V_{af} = Z_{af} I_{af} = 3 I_{af} Z_{af} \quad (3.5)$$

Da seção 2, sabe-se que,

$$V_{a0f} + V_{a1f} + V_{a2f} = V_{af} \quad (3.6)$$

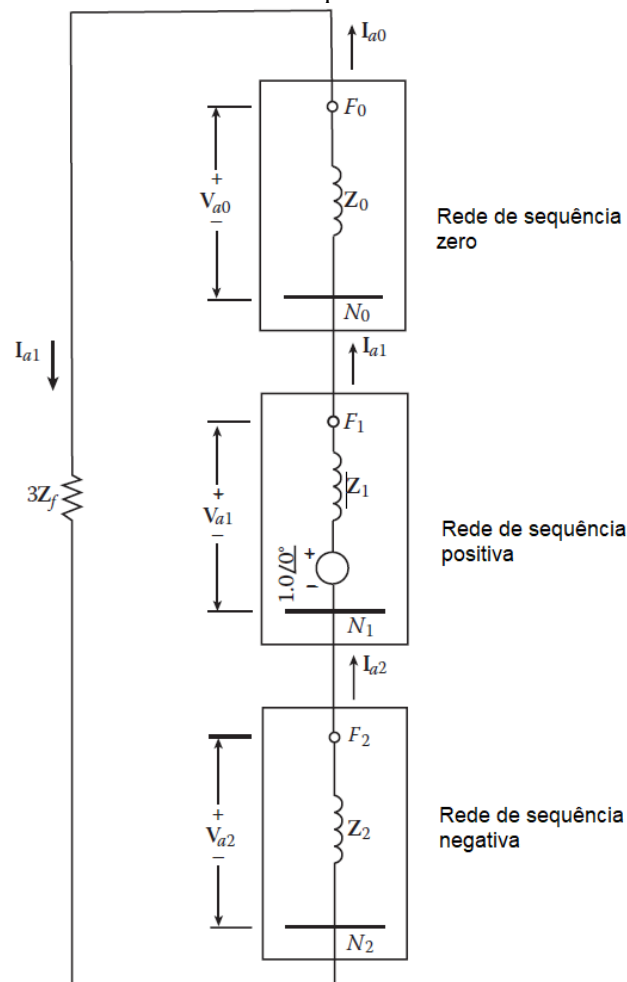
A interconexão das redes de seqüência da falta mostrada na Figura 22 em série é justificada pela equação (3.4). A adição da impedância $3Z_f$ é justificada pela equação (3.5), devido às condições de contorno (ANDERSON, 1973). Analisando a Figura 23, nota-se que a corrente de seqüência é dada por:

$$I_{a0} = I_{a1} = I_{a2} = \frac{1 \angle 0^\circ}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3Z_f} \quad (3.7)$$

E a corrente de falta é dada por:

$$I_{af} = 3I_{a1} \quad (3.8)$$

Figura 23 - Interconexão das redes de seqüência de um curto-circuito monofásico.



Fonte: Gonen, 2013.

3.2 CIRCUITO BIFÁSICO

Na Figura 24, mostra-se um circuito trifásico com uma falta entre as fases “b” e “c”, em que é denominado um curto-circuito bifásico.

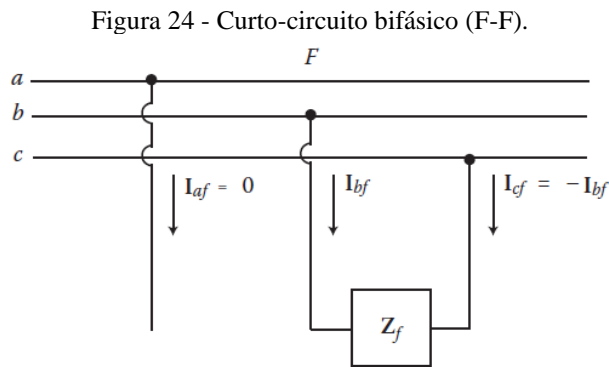
Para o circuito da Figura 24, as condições de contorno são:

$$I_{af} = 0 \quad (3.9)$$

$$I_{bf} = -I_{cf} \quad (3.10)$$

E

$$V_{bf} - V_{cf} = Z_{cf} I_{bf} \quad (3.11)$$



Fonte: Gonen, 2013.

Transformando em componentes simétricas, tem-se:

$$\begin{bmatrix} I_{a0f} \\ I_{a1f} \\ I_{a2f} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ I_{bf} \\ -I_{bf} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Da equação (3.11), colocando em componentes simétricas, tem-se:

$$Z_{cf} I_{bf} = V_{bf} - V_{cf} = V_{a0} + a^2 V_{a1} + a V_{a2} - (V_{a0} + a V_{a1} + a^2 V_{a2}) \quad (3.13)$$

$$Z_{cf} (I_{a0} + a^2 I_{a1} + a I_{b1}) = (a^2 - a) V_{a1} - (a^2 - a) V_{a2} \quad (3.14)$$

$$Z_{cf} (I_{a0} + a^2 I_{a1} + a I_{b1}) = (a^2 - a) V_{a1} - (a^2 - a) V_{a2} \quad (3.15)$$

De (3.12),

$I_{a0} = 0$ e $I_{a1} = -I_{a2}$, desta forma,

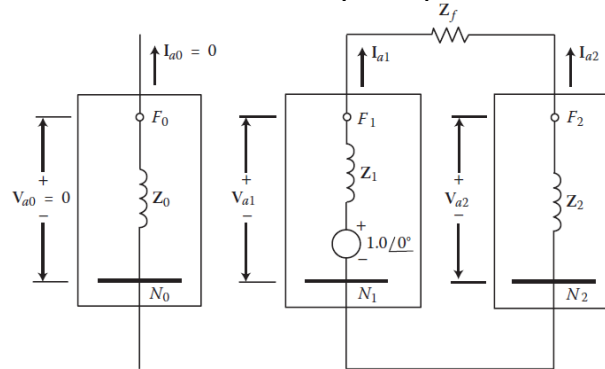
$$Z_{cf}(I_{a0} + a^2 I_{a1} + a I_{b1}) = (a^2 - a)V_{a1} - (a^2 - a)V_{a2} \quad (3.16)$$

$$Z_{cf} I_{a1} = V_{a1} - V_{a2} \quad (3.17)$$

Como $I_{a0} = 0$, a RSZ só pode ser um circuito aberto.

De (3.17) e as condições de contorno, se sabe que as redes de sequência positiva e negativa se interconectam em paralelo (ANDERSON, 1973), conforme mostrado na Figura 25.

Figura 25 - Interconexão das redes de sequência para o curto-circuito bifásico.



Fonte: Gonen, 2013.

Desta forma, para calcular as correntes de sequência positiva e negativa, utiliza-se a equação (3.18).

$$I_{a1} = -I_{a2} = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_f} \quad (3.18)$$

E para calcular a corrente de falta de cada fase, basta aplicar o valor encontrado de I_{a1} à matriz da equação (3.19).

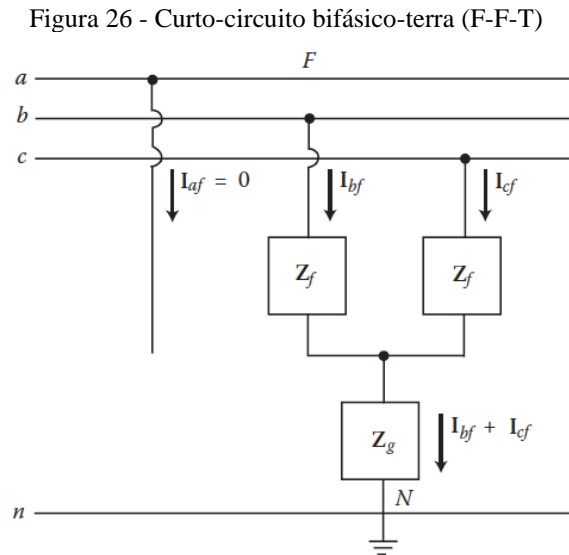
$$\begin{bmatrix} I_{af} \\ I_{bf} \\ I_{cf} \end{bmatrix} = 3 \times \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ I_{a1} \\ -I_{a1} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Também pode-se encontrar as correntes de falta utilizando a propriedade obtida através de algumas manipulações das equações desta seção, conforme a equação (3.20).

$$I_{bf} = -I_{cf} = \sqrt{3} \times I_{a1} \angle -90^\circ \quad (3.20)$$

3.3 CURTO-CIRCUITO BIFÁSICO-TERRA

Na Figura 26, é mostrado um circuito trifásico com uma falta entre as fases “b” e “c” e o terminal terra, em que é denominado um curto-circuito bifásico-terra.



Fonte: Gonen, 2013.

Analogamente aos outros tipos de falta apresentados, primeiramente se analisa o circuito faltoso e obtém-se as condições de contorno. Para esse caso, tem-se:

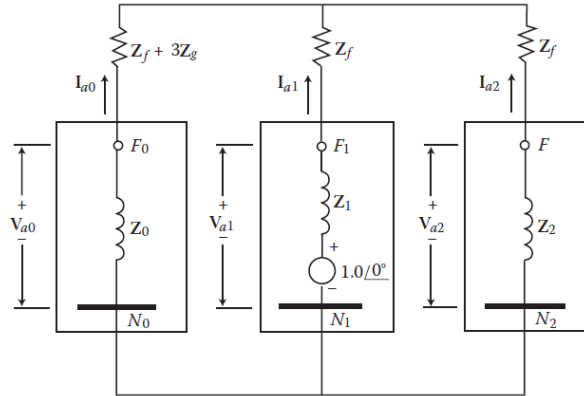
$$I_{af} = 0 \quad (3.21)$$

$$V_{bf} = (Z_f + Z_g)I_{bf} + Z_g I_{cf} \quad (3.22)$$

$$V_{cf} = (Z_f + Z_g)I_{cf} + Z_g I_{bf} \quad (3.23)$$

A interconexão das redes de sequência que representam o curto-circuito bifásico-terra é mostrada na Figura 27 (ANDERSON, 1973).

Figura 27 - Interconexão das redes de seqüência para o curto-circuito bifásico-terra.



Fonte: Gonen, 2013.

Da Figura 27, sabe-se que

$$I_{a1} = \frac{1.0 \angle 0^\circ}{(Z_1 + Z_f) + \frac{(Z_2 + Z_f)(Z_0 + Z_f + 3Z_g)}{Z_0 + Z_2 + 2Z_f + 3Z_g}} \quad (3.24)$$

As correntes de seqüência negativa e zero podem ser encontradas utilizando o divisor de corrente, conforme as equações (3.25) e (3.26).

$$I_{a2} = \frac{-(Z_0 + Z_f + 3Z_g)}{(Z_2 + Z_f) + (Z_0 + Z_f + 3Z_g)} I_{a1} \quad (3.25)$$

$$I_{a0} = \frac{-(Z_2 + Z_f)}{(Z_2 + Z_f) + (Z_0 + Z_f + 3Z_g)} I_{a1} \quad (3.26)$$

Aplicando as correntes de seqüência à matriz da equação (3.19), para encontrar as correntes de fase a partir das correntes em componentes simétricas, tem-se:

$$I_{bf} = I_{a0} + a^2 I_{a1} + a I_{a2} \quad (3.27)$$

E

$$I_{cf} = I_{a0} + a I_{a1} + a^2 I_{a2} \quad (3.28)$$

3.4 CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO

Na Figura 28, é mostrado um circuito trifásico com uma falta entre as fases “a”, “b” e “c” e o terminal terra, em que é denominado um curto-circuito trifásico. O curto-circuito trifásico é simétrico ou balanceado e pode, também, ser analisado utilizando o método das componentes simétricas.

De maneira simples, verifica-se pela Figura 28 que não existe interconexão entre as redes de seqüência, pois, elas são curto-circuitadas com a própria impedância de curto-circuito Z_F . De forma que a única rede que possui tensão é a RSP. Logo, as correntes de falta em componentes simétricas são dadas por:

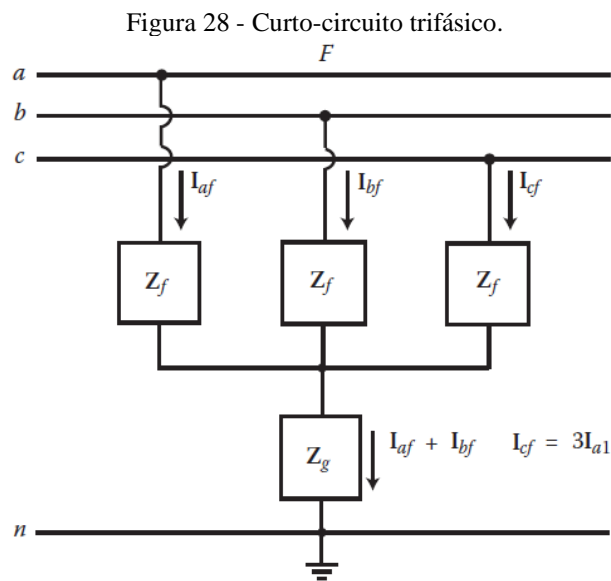
$$I_{a1} = \frac{1\angle 0^\circ}{Z_1 + Z_f} \quad (3.29)$$

$$I_{a0} = 0 \quad (3.30)$$

$$I_{a2} = 0 \quad (3.31)$$

Transformando nas componentes reais, tem-se:

$$\begin{bmatrix} I_{af} \\ I_{bf} \\ I_{cf} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ I_{a1} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.32)$$



Fonte: Gonen, 2013.

De modo que,

$$I_{af} = I_{a1} = \frac{1\angle 0^\circ}{Z_1 + Z_f} \quad (3.33)$$

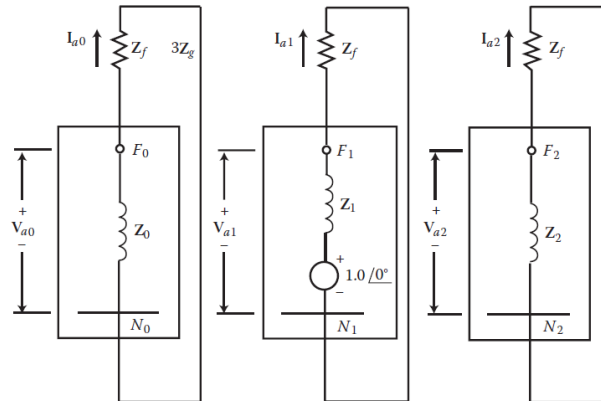
$$I_{bf} = a^2 I_{a1} = \frac{1\angle 240^\circ}{Z_1 + Z_f} \quad (3.34)$$

$$I_{cf} = a I_{a1} = \frac{1\angle 120^\circ}{Z_1 + Z_f} \quad (3.35)$$

Quanto às características das tensões, é notório pela Figura 29 que apenas a tensão da RSP não será nula.

A interconexão das redes de sequência que representam o curto-circuito bifásico-terra é mostrado na Figura 29 (ANDERSON, 1973).

Figura 29 - Interconexão das redes de sequência para o curto-circuito trifásico.



Fonte: Gonen, 2013.

$$V_{a0} = 0 \quad (3.36)$$

$$V_{a1} = Z_f I_{a1} \quad (3.37)$$

$$V_{a2} = 0 \quad (3.38)$$

De maneira análoga, encontra-se as tensões nas componentes reais do sistema.

$$\begin{bmatrix} V_{af} \\ V_{bf} \\ V_{cf} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ V_{a1} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

$$V_{af} = V_{a1} = Z_f I_{a1} \quad (3.40)$$

$$V_{bf} = a^2 V_{a1} = Z_f I_{a1} \angle 240^\circ \quad (3.41)$$

$$V_{cf} = a V_{a1} = Z_f I_{a1} \angle 120^\circ \quad (3.42)$$

4 MODELAGEM DOS ELEMENTOS DO SEP NO *ATPDRAW*

A modelagem de sistemas elétricos de potência consiste na representação matemática de componentes reais, levando em consideração suas características. Com a modelagem se torna possível simular desde sistemas simples até os mais complexos com precisão.

Com o uso de simulações pode-se verificar e prever o comportamento do sistema modelado frente a modificações de suas características e condições de operação. Com as simulações computacionais de sistemas elétricos de potência ganha-se em redução de custos já que a construção de sistemas de potência reais para teste exige um alto investimento e as simulações podem ser feitas com menor custo e são mais flexíveis. Segurança também é uma vantagem quando se compara a implementação física e virtual de sistemas dessa magnitude. Pois, sabe-se que nos sistemas elétricos de potência em cenários faltosos, as correntes podem chegar às casas dos milhares de amperes, já nas simulações, essa corrente não passaria de uma variável do sistema.

Para a realização da modelagem e simulação dos sistemas elétricos foi escolhido o programa *ATPDraw* que é um programa com interface gráfica desenvolvida para facilitar a criação de circuitos elétricos e sistemas de potência a serem simulados no *ATP (Alternative Transients Program)*. O *ATPDraw* possui os principais elementos que compõem o sistema elétrico de potência. O programa possui uma vasta biblioteca de componentes e o seu modo de utilização é bastante simples. Uma vez que o usuário seleciona o dispositivo que deseja, é necessário fornecer os parâmetros para aquele componente, a fim de que o mesmo funcione conforme o esperado. A seguir será desenvolvida uma breve descrição dos componentes do SEP e como é realizada a sua modelagem no *ATPDraw*. Os parâmetros pré-simulação estão mostrados na Figura 30, em que o passo de simulação “delta T” foi definido como 1×10^{-6} s, o período total de simulação “Tmax” como 0,1 s, e a frequência do sistema “Frequency” como 60 Hz. Os parâmetros X_{opt} e C_{opt} como 60 Hz para que as reatâncias capacitivas e indutivas possam ser definidas diretamente em Ω .

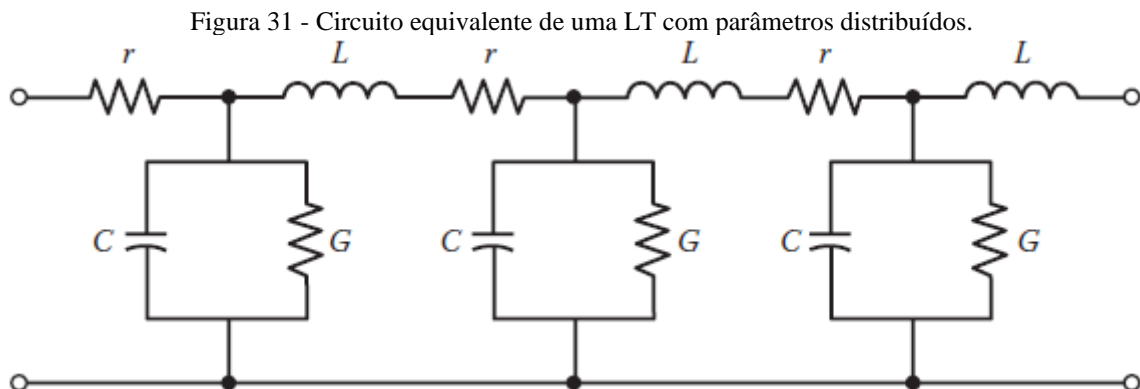
Figura 30 - Parâmetros iniciais de simulação.

delta T:	1E-6
Tmax:	0.1
Xopt:	60
Copt:	60
Epsilon:	0
Frequency:	60

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

4.1 LINHAS DE TRANSMISSÃO (LT)

Uma linha de transmissão (LT) ou cabo aéreo pode ser representado por um circuito com parâmetros distribuídos, conforme a Figura 31. Em que a resistência (r), a indutância (L), a capacitância (C) e a condutância (G) são distribuídas uniformemente ao longo da linha e as unidades são dadas por unidade de comprimento (GONEN, 2013).

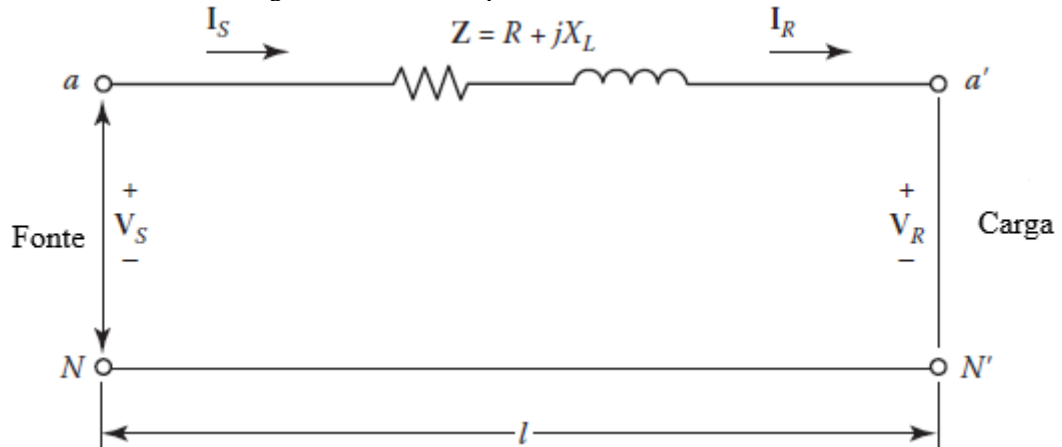


Fonte: Gonen, 2013.

Os modelos utilizados para representar as linhas de transmissão dependem fortemente do comprimento da linha de transmissão a ser representada.

As linhas de transmissão são ditas curtas se possuírem comprimento até 80 km. O modelo utilizado para representá-las é mostrado na Figura 32. Esse modelo despreza as capacitâncias por serem muito pequenas e serem quase insignificantes em termos de precisão da modelagem. Ou seja, uma linha de transmissão curta pode ser representada por uma impedância complexa que é composta pela resistência e a reatância indutiva da linha.

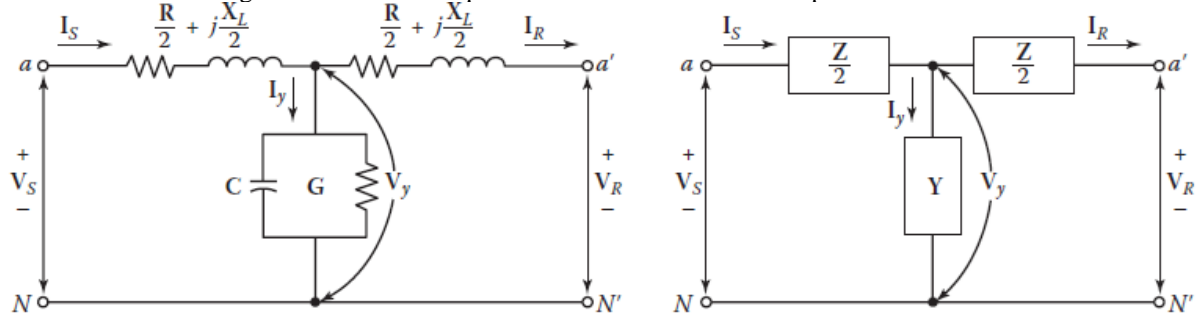
Figura 32 - Circuito equivalente de uma LT curta.



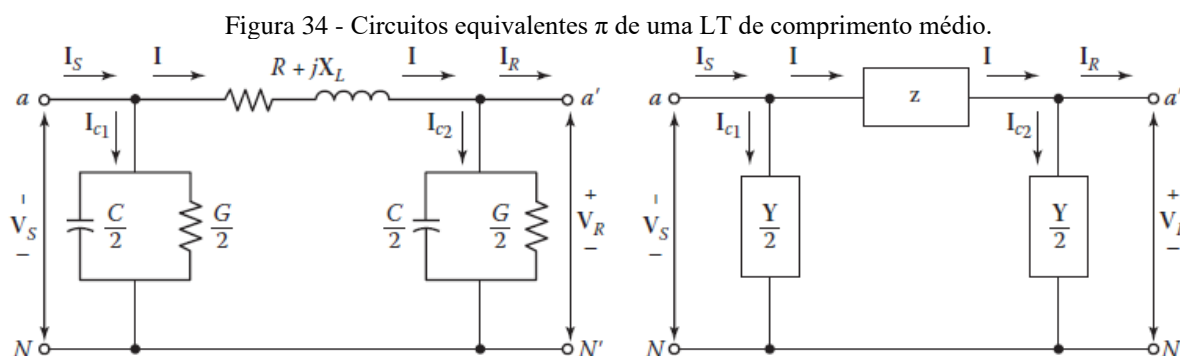
Fonte: Adaptado de Gonen, 2013.

Conforme o comprimento e o nível de tensão aumentam, o modelo de linhas curtas acaba gerando erros de amplitude e fase significantes (GONEN, 2013). Logo, a admitância *shunt* do capacitor deve ser levada em consideração. As linhas de transmissão de comprimento médio são aquelas que têm comprimento entre 80 e 240 km. Os modelos que representam as LTs de comprimento médio estão mostrados na Figura 33 e 34, onde, na Figura 33, mostra-se o modelo de circuito T, pois a admitância fica no centro do circuito, dividindo a impedância da linha pela metade para cada lado, e, na Figura 34, pode-se ver o circuito π , metade da admitância *shunt* fica no início do circuito e metade no final. Ambos os modelos representam fielmente uma LT de comprimento médio.

Figura 33 - Circuitos equivalentes T de uma LT de comprimento médio.



Fonte: Gonen, 2013.



Fonte: Gonen, 2013.

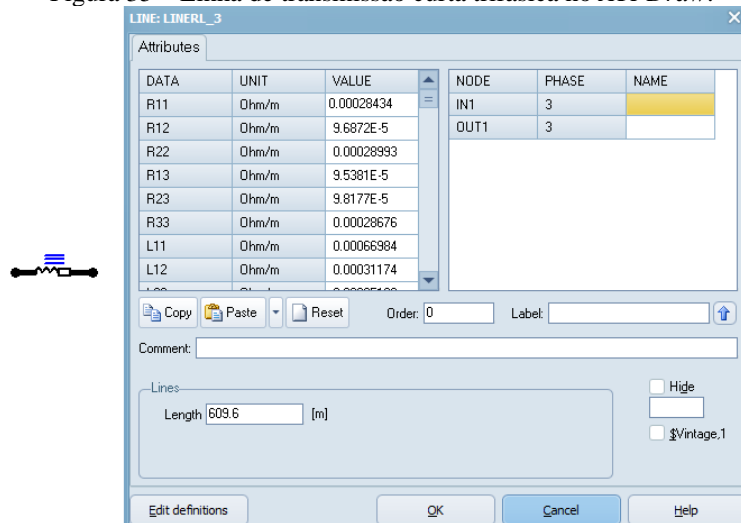
As LTs de comprimento acima de 240 km são chamadas de linhas de transmissão longas e, ao contrário dos modelos de LT curtas e médias, os parâmetros das LTs longas não são concentrados e sim, distribuídos ao longo do comprimento da linha. Sua modelagem envolve derivadas de primeiro e segundo grau. Como ela não será objeto deste estudo, a sua modelagem não será aprofundada, mas pode ser vista detalhadamente em Gonen (2013).

4.1.1 Linhas de transmissão no *ATPDraw*

No *ATPDraw*, para modelar uma LT curta no *ATPDraw*, é utilizado o componente *LINERL_3*, conforme mostrado na Figura 35. Os parâmetros a serem fornecidos são as impedâncias próprias das linhas e as mútuas dadas em Ω/m e o comprimento da linha em metro.

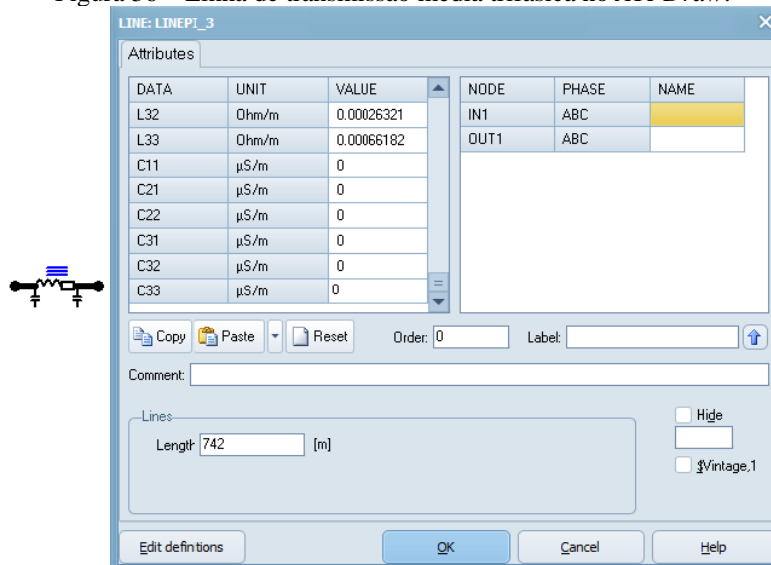
Enquanto que, para modelar uma LT média no *ATPDraw*, é utilizado o componente *LINEPI_3*, conforme mostrado na Figura 36. Os parâmetros a serem fornecidos são as impedâncias próprias das linhas e as mútuas dadas em Ω/m , as susceptâncias dadas em S/m e o comprimento da linha em metro. Se a linha média for monofásica, basta utilizar o componente *LINEPI_1*. Ele possui os mesmos parâmetros, porém, é utilizado para linhas de transmissão monofásicas.

Figura 35 – Linha de transmissão curta trifásica no ATPDraw.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Figura 36 – Linha de transmissão média trifásica no ATPDraw.

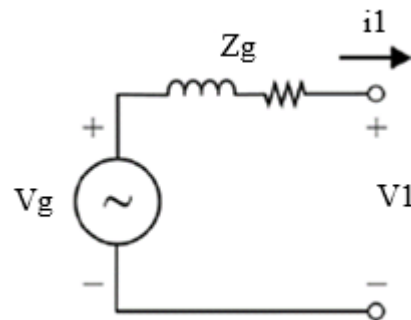


Fonte: elaborado pelo próprio autor.

4.2 GERADORES REAIS

Os geradores são, em sua essência, dispositivos que transformam uma grandeza mecânica ou eletromagnética em energia elétrica. Eles servem para alimentar eletricamente os sistemas elétricos de todas as magnitudes. Depende do ponto de vista em que está se analisando o sistema. De maneira geral, um gerador pode ser descrito como uma fonte de tensão em série com uma impedância complexa que representa suas perdas, conforme a Figura 37.

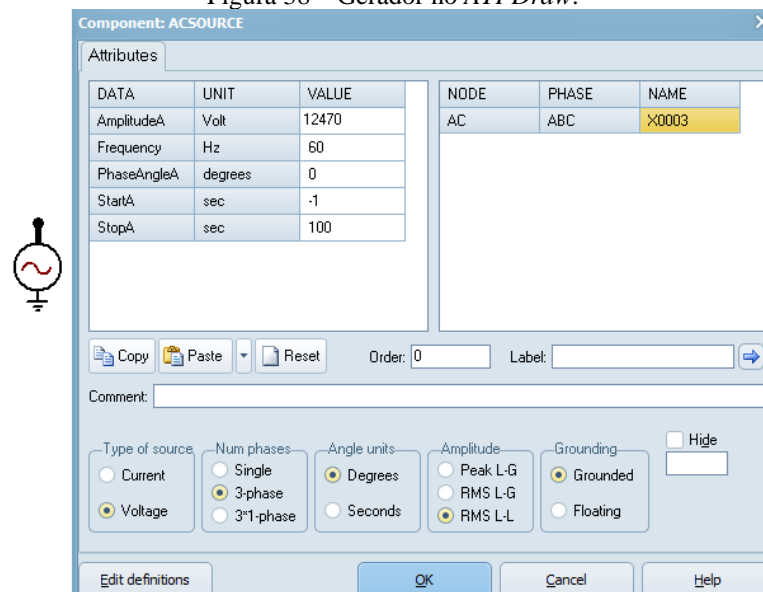
Figura 37 – Circuito equivalente de um gerador.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

4.2.1 Geradores no *ATPDraw*

No *ATPDraw*, para modelar um gerador, é utilizado o componente *ACSOURCE*, conforme mostrado na Figura 38. Os parâmetros a serem fornecidos são descritos no Quadro 3. Para simular e obter os resultados esperados, há de se ter ciência de que se for escolhido “RMS L-L”, o *ATPDraw* irá trabalhar com esse valor. Logo, os cálculos para a modelagem dos outros itens e posteriores cenários de curto-circuito devem levar essa escolha em consideração para que os valores encontrados nos cálculos sejam coerentes com o que está sendo modelado dentro do *ATPDraw*.

Figura 38 – Gerador no *ATPDraw*.

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Quadro 3 - Parâmetros de entrada solicitados para a modelagem do gerador no *ATPDraw*.

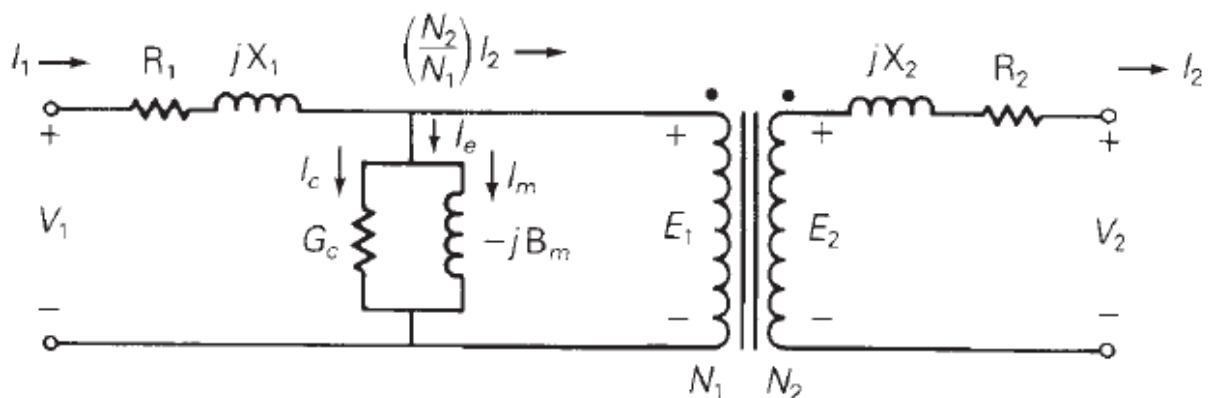
Parâmetros de entrada solicitado
Tensão (V)
Frequência (Hz)
Ângulo da fase (°)
Número de fases
Amplitude (fase ou linha e pico ou rms)
T início (s)
T fim (s)

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

4.3 TRANSFORMADORES

Diferentemente dos transformadores ideais, os transformadores reais possuem perdas no enrolamento e no núcleo. As perdas nos enrolamentos são representadas pelas resistências e reatâncias em série R_1 , R_2 , X_1 e X_2 . As perdas no núcleo são representadas pela admitância G_c e pela susceptância $-jB_m$. O circuito equivalente é mostrado na Figura 39. Nessa figura, mostra-se o circuito equivalente de um transformador trifásico, evidenciando apenas uma fase.

Figura 39 – Circuito equivalente de um transformador real.



Fonte: Glover, Sarma e Overbye, 2011.

4.3.1 Transformadores no *ATPDraw*

Para modelar um transformador com características reais dentro do *ATPDraw*, pode ser

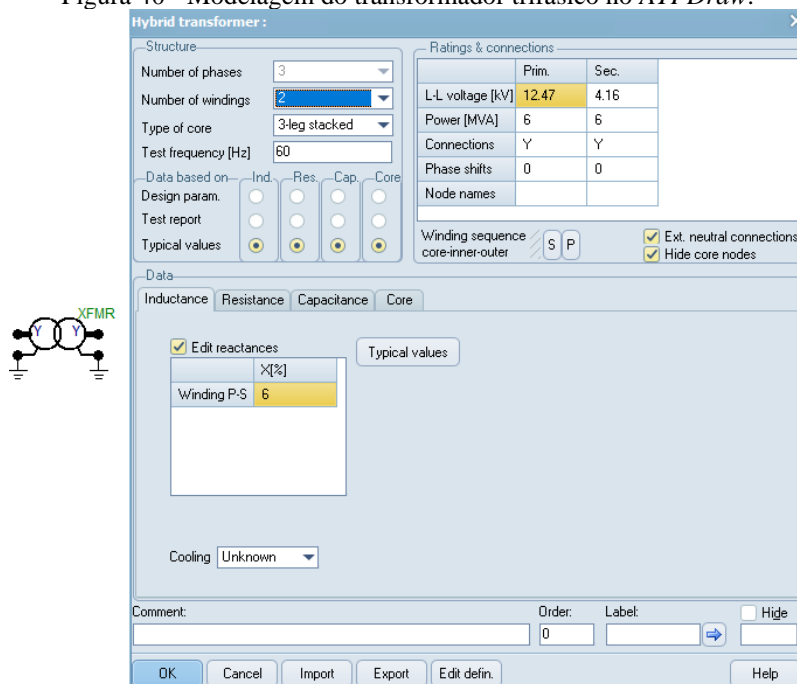
utilizado o modelo *HYBRID* mostrado na Figura 40 e Figura 41. Os parâmetros a serem fornecidos são mostrados no Quadro 4.

Quadro 4 - Parâmetros de entrada solicitados para a modelagem do transformador no *ATPDraw*.

Parâmetros de entrada solicitado
Número de enrolamentos entre as fases
Frequência (Hz)
Tensão de linha do primário e secundário (V)
Potência aparente trifásica (MVA)
Fechamento do transformador
Defasagem entre primário e secundário
Reatância e Resistência em %

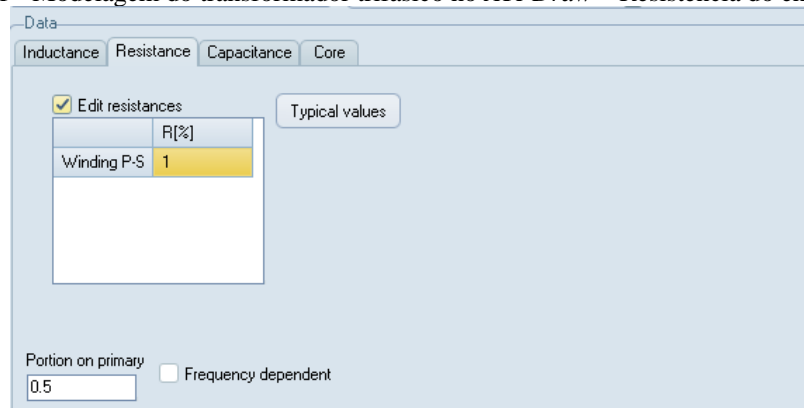
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Figura 40 - Modelagem do transformador trifásico no *ATPDraw*.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Figura 41 - Modelagem do transformador trifásico no *ATPDraw* – Resistência do enrolamento.



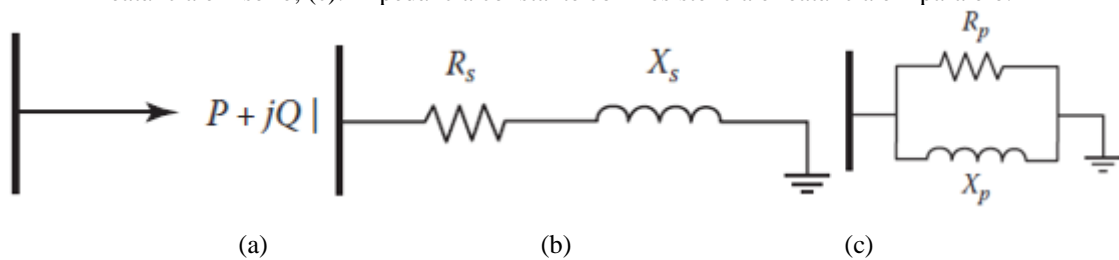
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

4.4 CARGAS

As cargas podem ter características de corrente constante, impedância constante e potência constante.

O modelo que será utilizado para representar as cargas será o modelo de impedância constante. Na Figura 42, apresentam-se três formas de modelagem utilizando a impedância constante. Se a carga for trifásica equilibrada, basta encontrar a impedância constante para uma das fases. As impedâncias das fases restantes serão iguais.

Figura 42 – Representação das cargas: (a): potência ativa e reativa; (b): impedância constante com resistência e reatância em série; (c): impedância constante com resistência e reatância em paralelo.



Fonte: Gonen, 2013.

Em termos de cálculo, existem diversas formas de modelar a impedância de uma carga. Depende do que existe como dados disponibilizados. A seguir seguem algumas formas:

Para modelar uma carga de impedância constante em termos da resistência e reatância em série Z_s , pode-se utilizar as equações (4.2) e (4.3) (GONEN, 2013):

$$Z_s = R_s + jX_s \quad (4.1)$$

$$R_s = \frac{|V|^2 \times P}{P^2 + Q^2} \quad (4.2)$$

$$X_s = \frac{|V|^2 \times Q}{P^2 + Q^2} \quad (4.3)$$

Em que,

R_s : resistência da carga em conexão série, em Ω

X_s : reatância da carga em conexão série, em Ω

Z_s : carga de impedância constante, em Ω

V : tensão de fase da carga, em V

P : potência ativa (ou média) da carga, em W

Q : potência reativa da carga, em Var

A potência aparente de uma carga ou de um sistema é dada por:

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad (4.4)$$

Para modelar uma carga de impedância constante em termos da resistência e reatância em paralelo Z_p , pode-se utilizar as equações 4.5, 4.6 e 4.7:

$$Z_p = j \frac{R_p + X_p}{R_p + X_p} \quad (4.5)$$

Em que,

$$R_p = \frac{V^2}{P} \quad (4.6)$$

$$X_p = \frac{V^2}{Q} \quad (4.7)$$

Onde

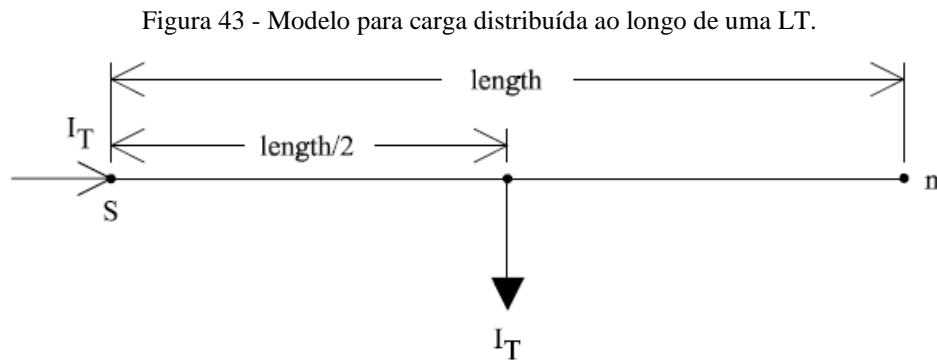
R_p = resistência da carga em paralelo, em Ω

X_p = reatância da carga em paralelo, em Ω

Z_p = carga de impedância constante, em Ω

Existem também as cargas distribuídas, que são aquelas que são posicionadas ao longo da linha de transmissão. Elas podem ser monofásicas, bifásicas ou trifásicas (KERSTING; KERESTES, 2023). Essas cargas não podem ser ignoradas no momento da modelagem, porque representam, por exemplo, casas, hospitais, indústrias etc., conseqüentemente, demandam potência ativa e reativa e, geram quedas de tensão ao longo das linhas que não podem ser ignoradas. Existem alguns modelos que representam esse tipo de carga, optou-se por utilizar o

modelo que representa a carga distribuída posicionada exatamente na metade da linha de transmissão em questão. O modelo de representação da carga distribuída ao longo da linha é mostrado na Figura 43.

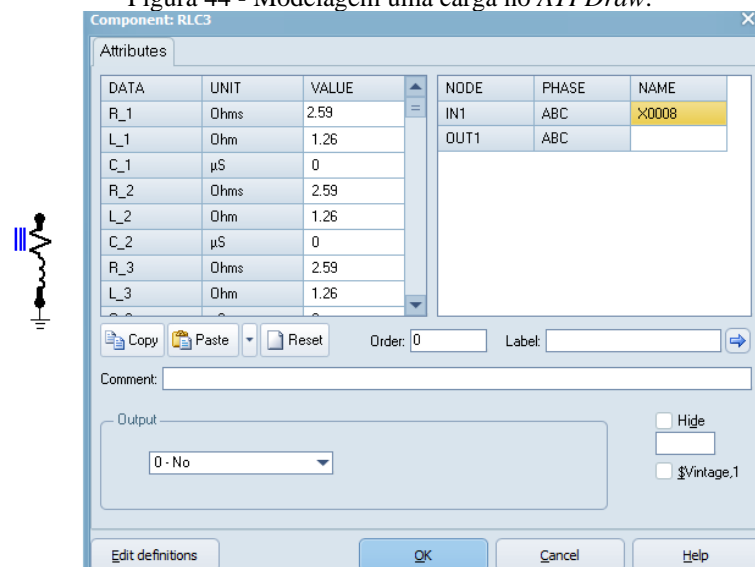


Fonte: Kersting e Kerestes, 2023.

4.4.1 Cargas concentradas e distribuídas no *ATPDraw*

As cargas concentradas no ambiente do *ATPDraw* podem ser modeladas utilizando os modelos de impedância RLC. Para cargas monofásicas, bifásicas ou trifásicas, pode ser utilizado o componente *RLC3*, conforme a Figura 44. As únicas informações de entradas solicitadas são as resistências, reatâncias indutivas e capacitivas de cada fase. Esse modelo também pode ser utilizado para modelar cargas trifásicas conectadas em Y-aterrado.

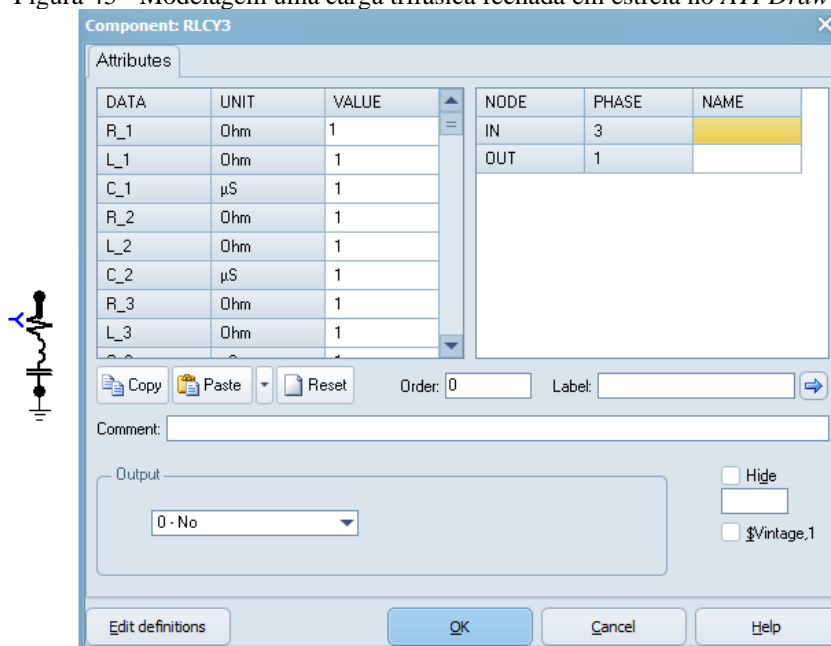
Figura 44 - Modelagem uma carga no *ATPDraw*.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

O componente específico para modelar cargas trifásicas conectadas em estrela é o *RLCY3*, conforme está na Figura 45, cujos parâmetros de entrada são, também, as impedâncias de entrada de cada fase (resistência e reatâncias indutivas e capacitivas).

Figura 45 - Modelagem uma carga trifásica fechada em estrela no *ATPDraw*.

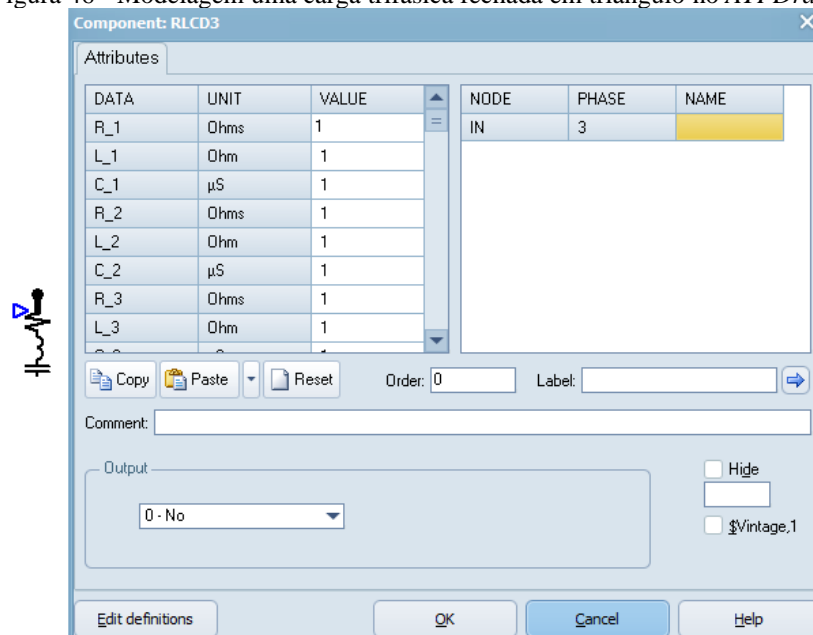


Fonte: elaborado pelo próprio autor.

O componente específico para modelar cargas trifásicas conectadas em triângulo é o *RLCD3*, conforme mostrado na Figura 46, cujos parâmetros de entrada são, também, as impedâncias de entrada de cada fase (resistência e reatâncias indutivas e capacitivas).

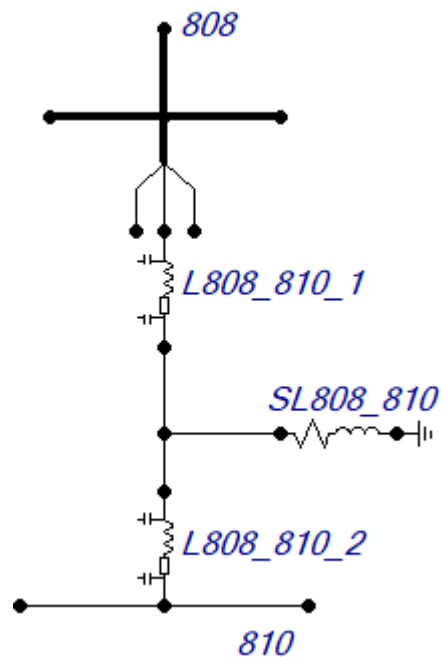
As impedâncias que representam as cargas distribuídas são calculadas da mesma forma que as concentradas: com base na potência fornecida e a tensão de fase. A Figura 47 mostra a representação de uma carga monofásica distribuída fechada como estrela-terra, representada exatamente como sugere Kersting, Kerestes (2023).

Figura 46 - Modelagem uma carga trifásica fechada em triângulo no *ATPDraw*.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Figura 47 - Representação do modelo de carga distribuída ao longo da LT no *ATPDraw*.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

4.5 REGULADOR DE TENSÃO

O regulador de tensão no SEP tem a função de corrigir variações de tensão que ocorrem

na rede devido a alterações dinâmicas nas cargas, quedas de tensão ao longo das linhas, manobras na rede ou mesmo perturbações. Desta forma, garantindo que a tensão nos terminais dos consumidores permaneça dentro das faixas especificadas pelas concessionárias. Essa regulação de tensão é realizada automaticamente por meio de relés de controle de tensão automáticos e transformadores com TAP automático (SARIMUTHU et al., 2016). Como não será desenvolvida uma análise dinâmica, em tempo real dos sistemas, não será necessário modelar um regulador de tensão que varie o nível de tensão, já que as cargas serão modeladas como impedância constante.

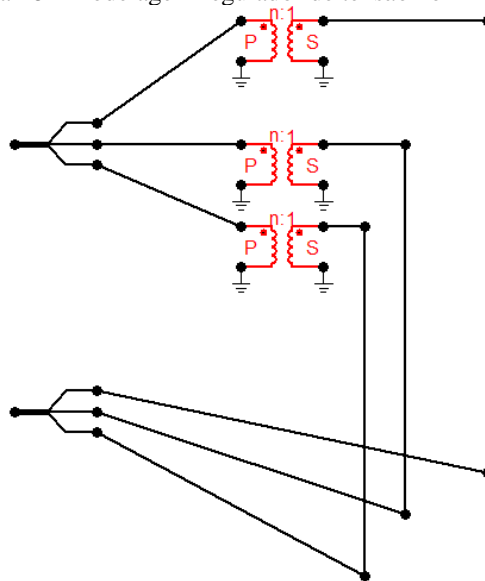
4.5.1 Regulador de tensão no ATPDraw

Conforme falado na seção 4.5, já que as cargas serão representadas por seus modelos de impedância constante, portanto, pode-se representar um regulador de tensão como na Figura 48 em que se tem 3 transformadores ideais, nos quais, basta fornecer a relação de transformação n , de acordo com o nível de tensão que se deseja ter no secundário do transformador (RODRIGUES, 2017).

A equação utilizada para calcular a relação de transformação é dada pela equação (4.8).

$$n = \frac{V_1}{V_2} \quad (4.8)$$

Figura 48 - Modelagem regulador de tensão no ATPDraw.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

4.6 FALTAS NO *ATPDraw*

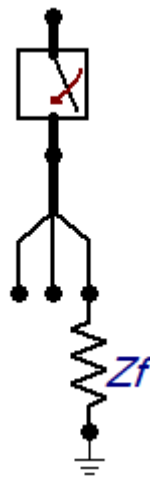
Na seção 3 deste trabalho já foram apresentados os tipos de falta *shunt* existentes e como é desenvolvida a modelagem matemática de cada uma delas. A seguir, serão apresentados os circuitos utilizados para representar os cenários de falta abordados por este trabalho

4.6.1 Falta monofásica no *ATPDraw*

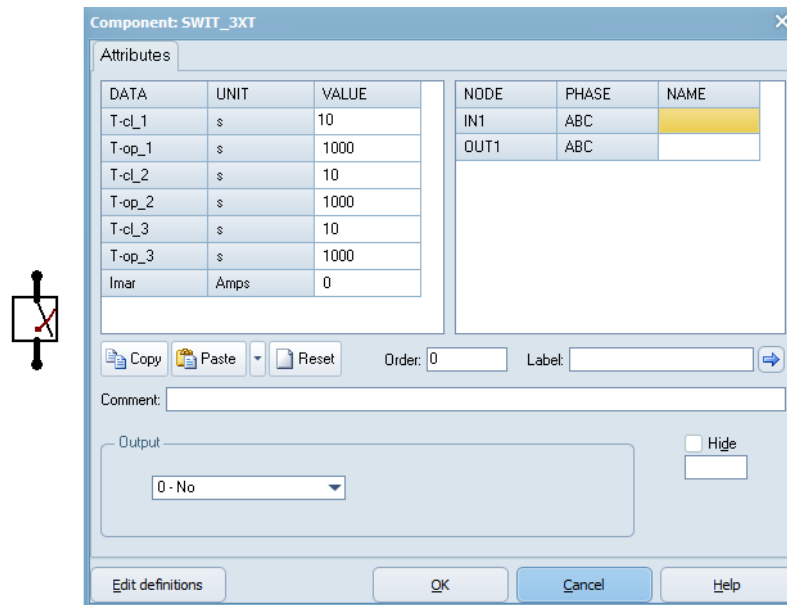
O circuito utilizado para modelar e simular um curto-circuito monofásico é mostrado na Figura 49, cujo circuito é constituído por uma chave trifásica, mostrada na Figura 50, e uma impedância de falta Z_F que terá como parâmetro seu valor de resistência em *ohm*. A impedância Z_F é conectada à fase A do circuito a ser simulado o curto-circuito, por convenção.

A chave trifásica mostrada na Figura 50 tem como parâmetros principais, para a utilização proposta neste trabalho os tempos de fechamento de cada fase ($T-cl_$) dado em segundos e o tempo de abertura ($T-op_$) também dado em segundos.

Figura 49 - Curto-circuito monofásico no *ATPDraw*.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Figura 50 – Chave trifásica no *ATPDraw*.

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

4.6.2 Falta bifásica no *ATPDraw*

O circuito utilizado para modelar e simular um curto-circuito bifásico é mostrado na Figura 51, cujo circuito é constituído por uma chave trifásica, mostrada na Figura 50, e uma impedância de falta Z_F conectada às fases B e C do circuito a ser simulado o curto-circuito, por convenção.

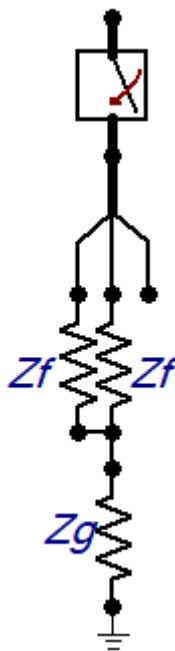
Figura 51 - Curto-circuito bifásico no *ATPDraw*.

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

4.6.3 Falta bifásica-terra no *ATPDraw*

O circuito utilizado para modelar e simular um curto-circuito bifásico-terra é mostrado na Figura 52, cujo circuito é constituído por uma chave trifásica, mostrada na Figura 50, duas impedâncias de falta Z_F , uma para cada fase, B e C, por convenção, e uma impedância Z_g que conecta às fases à terra.

Figura 52 - Curto-circuito bifásico-terra no *ATPDraw*.

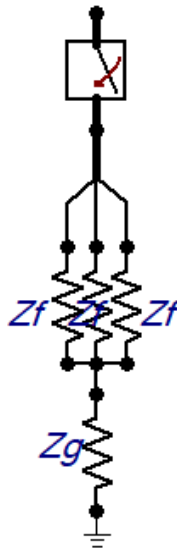


Fonte: elaborado pelo próprio autor.

4.6.4 Falta trifásica-terra no *ATPDraw*

O circuito utilizado para modelar e simular um curto-circuito trifásico-terra é mostrado na Figura 53, cujo circuito é constituído por uma chave trifásica, mostrada na Figura 50, três impedâncias de falta Z_F , uma para cada fase e uma impedância Z_g que conecta às fases à terra.

Figura 53 - Curto-circuito trifásico-terra no *ATPDraw*.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

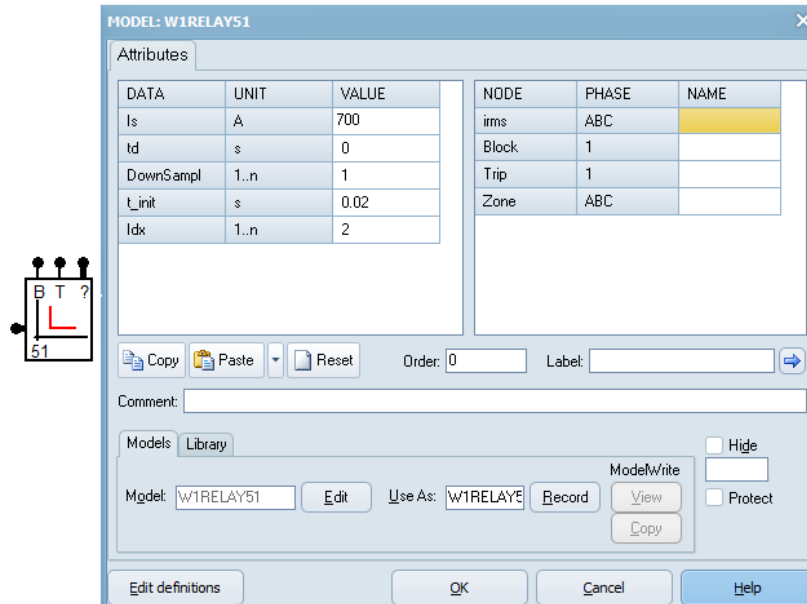
4.7 RELÉ DE SOBRECORRENTE INSTANTÂNEO (50) E DISJUNTOR DE CORRENTE ALTERNADA (52) NO *ATPDRAW*

O componente utilizado para modelar o relé de sobrecorrente instantâneo (50) no *ATPDraw* é o *WIRELAY51*, conforme exibido na Figura 54. Os parâmetros a serem preenchidos são:

I_s = Corrente de ajuste da unidade instantânea;

t_d = Tempo de atraso de acionamento;

Figura 54 - Relé de sobrecorrente instantâneo/temporizado.

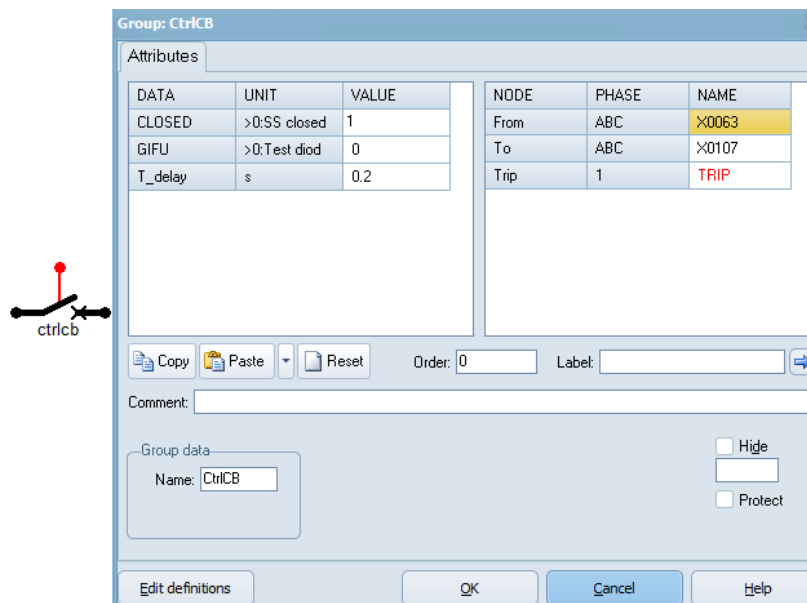


Fonte: elaborado pelo próprio autor.

O componente utilizado para modelar o disjuntor de corrente alternada trifásico (52) no *ATPDraw* é o *CtrlCB*, conforme exibido na Figura 55. Os parâmetros a serem preenchidos são:

T_{delay} = tempo de atraso para a atuação do disjuntor;

Figura 55 – Disjuntor de corrente alternada (52).



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

5 MODELAGEM DOS SISTEMAS DE ALIMENTADOR TESTE DE 4 E 34 BARRAS DO IEEE E SIMULAÇÃO DE FALTAS *SHUNT*

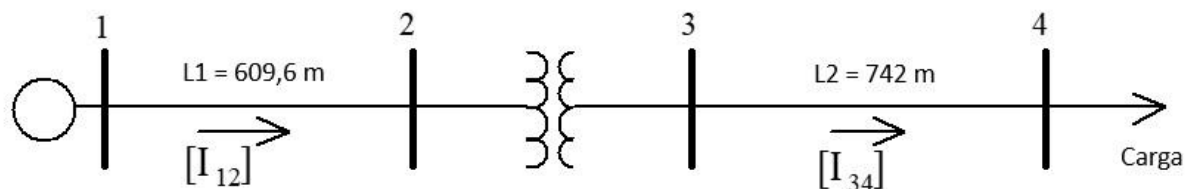
Este capítulo apresenta a modelagem dos sistemas alimentador teste de 4 e 34 barras do IEEE, começando pelo sistema menor. O sistema de 4 barras será modelado, simulado e terá seus resultados comparados com os resultados originais disponíveis em IEEE (1991). Após isso, serão desenvolvidos os cálculos teóricos para cada cenário de curto-circuito que se deseja estudar neste trabalho. Os mesmos cenários serão simulados no *ATPDraw* e terão seus resultados comparados aos resultados teóricos, dessa forma, validando os cálculos realizados assim como o *software* de simulação utilizado neste trabalho.

Para o sistema de 34 barras, será desenvolvida a modelagem e simulação do sistema modelado no *ATPDraw*. Os resultados obtidos por meio da simulação serão comparados e validados. Após isso, serão aplicados cenários de falta em alguns pontos específicos do sistema para a avaliação da evolução do nível da corrente de curto-circuito.

5.1 O SISTEMA *TEST FEEDER* DE 4 BARRAS DO IEEE

O sistema alimentador teste de 4 barras do IEEE é um sistema trifásico elaborado com o objetivo de testar e avaliar as diferentes configurações de conexões trifásicas de transformadores, sendo elevador ou abaixador. Ele foi escolhido por possuir dados validados pelo IEEE e suficientes para o cálculo de curto-circuito pelo método das componentes simétricas. Conforme a Figura 56, o sistema é composto por um gerador trifásico, dois trechos de linha interligados por um transformador trifásico e uma carga trifásica.

Figura 56 - O sistema alimentador teste de 4 barras do IEEE.



Fonte: adaptado de IEEE, 1991.

O artigo do IEEE (1991) apresenta os dados para os componentes e dados nominais a

serem considerados para as mais diversas configurações a serem simuladas. Abaixo apresentam-se os dados da configuração escolhida para essa modelagem: transformador trifásico conectado em estrela-aterrada no primário, e no secundário e carga conectada em estrela-aterrada.

- O gerador é um barramento infinito de 12,47 kV entre fases;
- Transformador: 6 MVA, 12,47/4,16 kV, R = 1%, X = 6%
- Carga trifásica equilibrada: $P_{\phi_1} = 1,8 \text{ MW}$, $fp = 0,9$ atrasado, $P_{\phi_2} = 1,8 \text{ MW}$, $fp = 0,9$ atrasado, $P_{\phi_3} = 1,8 \text{ MW}$, $fp = 0,9$ atrasado. Em que P_{ϕ_1} é a potência monofásica da carga e fp é o fator de potência da carga.
- Como a carga está ligada em estrela-aterrada, o artigo recomenda utilizar os dados de linha da configuração de 4 fios. A matriz de impedâncias das linhas é mostrada abaixo em Ω/m (no artigo original é dado em Ω/milha):

$$Z_y = \begin{bmatrix} 0,00028434 + j0,00066984 & 9,6872 \times 10^{-5} + j0,00031174 & 9,5381 \times 10^{-5} + j0,00023917 \\ 9,6872 \times 10^{-5} + j0,00031174 & 0,00028993 + j0,00065132 & 9,8177 \times 10^{-5} + j0,00026321 \\ 9,5381 \times 10^{-5} + j0,00023917 & 9,8177 \times 10^{-5} + j0,00026321 & 0,00028676 + j0,00066182 \end{bmatrix}$$

São disponibilizadas também as impedâncias de sequência da linha em Ω/milha . Mas, para facilitar a implementação no *ATPDraw* e os cálculos, faz-se a conversão para Ω/m , conforme abaixo:

$$Z_{ypos} = Z_{yneg} = 1,90 \times 10^{-4} + j3,90 \times 10^{-4} \Omega/m$$

$$Z_{yzero} = 4,81 \times 10^{-4} + j1,20 \times 10^{-3} \Omega/m$$

5.2 MODELAGEM DO SISTEMA ALIMENTADOR TESTE DE 4 BARRAS DO IEEE

Nesta seção são apresentados os dados fornecidos para modelar cada componente do sistema no *ATPDraw*.

5.2.1 Linhas de transmissão

Os segmentos de linha de transmissão do sistema em questão são curtos, de acordo com o exposto na seção 4.1.1. Portanto, as linhas foram modeladas utilizando o componente *LINERL_3*. Ambos os segmentos terão como parâmetro de entrada a matriz de impedância por

metro Z_y . O primeiro trecho tem comprimento de 609,6 m e o segundo trecho de 762 metros.

5.2.2 Gerador

O gerador foi modelado utilizando o componente *ACSOURCE*, conforme apresentado na seção 4.2.1. Os parâmetros de entrada fornecidos estão mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros de entrada para a modelagem do sistema alimentador teste de 4 barras.

Parâmetros de entrada solicitado	Parâmetros fornecidos
Tensão (V)	12470
Frequência (Hz)	60
Ângulo da fase (°)	0
Número de fases	3
Amplitude (fase ou linha e pico ou rms)	RMS L-L
T início (s)	-1
T fim (s)	100

Fonte: IEEE, 1991.

5.2.3 Transformador

A modelagem do transformador do sistema seguiu o disposto na seção 4.3.1. Foi utilizado o componente *HYBRID transformer*. Os parâmetros de entrada fornecidos são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros de entrada para a modelagem do transformador do sistema alimentador teste de 4 barras.

Parâmetros de entrada solicitado	Parâmetros fornecidos
Número de enrolamentos entre as fases	2
Frequência (Hz)	60
Tensão de linha do primário e secundário (kV)	12,47 / 4,16
Potência aparente trifásica (MVA)	6
Fechamento do transformador	Y-aterrado/Y-aterrado
Defasagem entre primário e secundário	0
Reatância (X) e Resistência (R) em %	6% e 1%

Fonte: IEEE, 1991.

5.2.4 Carga

A modelagem da carga foi desenvolvida utilizando o explícito na seção 4.4.1. Escolheu-se representar a carga com a resistência e a carga em série. As equações (4.2) e (4.3) foram utilizadas para encontrar os valores da resistência e a reatância, em que para a carga conectada em Y-aterrado:

$$\text{A tensão de fase é: } V = \frac{4,16}{\sqrt{3}} \times 10^3 = 2,40 \text{ kV}$$

$$\text{A potência ativa monofásica é: } P = 1800 \text{ kW}$$

Manipulando a equação (4.4), tem-se:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (5.1)$$

Aplicando os devidos valores a equação (5.1), tem-se:

$$Q = 871,78 \text{ kVAr}$$

Dessa forma, aplicando esses valores às Equações (4.2) e (4.3), obtém-se:

$$R_s = 2,60 \Omega$$

$$X_s = j1,26 \Omega$$

Logo,

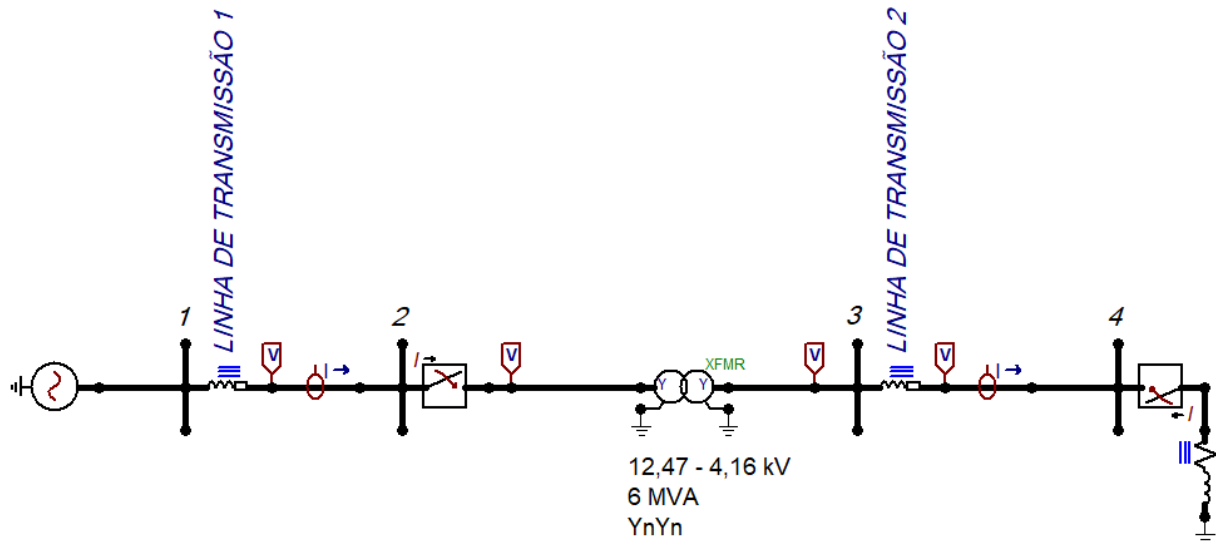
$$Z_C = Z_s = 2,60 + j1,26 \Omega$$

Em que,

Z_C : Impedância da carga por fase.

Após modelar todos os componentes do circuito, na Figura 57, é mostrado mostra como ficou no *ATPDraw*.

Figura 57 - Modelagem do circuito do sistema alimentador teste de 4 barras do IEEE no *ATPDraw*.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

5.3 SIMULAÇÃO DO CASO BASE DO SISTEMA ALIMENTADOR TESTE DE 4 BARRAS DO IEEE: COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES TEÓRICOS E SIMULADOS

Após a simulação, foram obtidos os dados mostrados na Tabela 3. Os dados teóricos foram retirados do artigo original do IEEE (1991) e os simulados, foram obtidos por meio de medidores de tensão e corrente no *ATPDraw*. A fórmula para calcular o erro percentual entre os valores teóricos e simulados se encontra abaixo na equação (5.2):

$$Erro_{absoluto\%} = \frac{|Valor_{simulado} - Valor_{teórico}|}{Valor_{teórico}} \times 100 \quad (5.2)$$

Na Tabela 3, é apresentada a configuração escolhida para o transformador, a tensão teórica e simulada em cada nó do sistema, e as correntes que fluem entre as barras 1 e 2 e, 3 e 4, assim como suas respectivas fases.

Tabela 3 - Valores de tensão, corrente e suas fases teóricos e simulados e erros percentuais.

CONEXÃO	TEÓRICOS		SIMULADO		ERRO DAS AMPLITUDES (%)	ERRO ENTRE AS FASES
	GrY-GrY	FASE	GrY-GrY	FASE		
Nó-2 V1	7107,00	-0,30	7137,08	-0,23	0,00	0,07
Nó-2 V2	7140,00	-120,30	7150,03	-120,27	0,14%	0,03
Nó-2 V3	7121,00	119,60	7143,97	119,69	0,32%	0,09
Nó-3 V1	2247,60	-3,70	2315,70	-2,89	3,03%	0,81
Nó-3 V2	2269,00	-123,50	2318,12	-122,97	2,16%	0,53
Nó-3 V3	2256,00	116,40	2315,47	117,01	2,64%	0,61
Nó-4 V1	1918,00	-9,10	2098,19	-6,11	9,39%	3,00
Nó-4 V2	2061,00	-128,30	2148,90	-126,52	4,27%	1,78
Nó-4 V3	1981,00	110,90	2127,29	112,945	7,38%	2,04
Corrente 1-2 Ia	347,90	-34,90	344,90	-32,466	0,86%	2,43
Corrente 1-2 Ib	323,70	-154,20	353,05	-152,71	9,07%	1,49
Corrente 1-2 Ic	336,80	85,00	350,49	86,678	4,06%	1,68
Corrente 3-4 Ia	1042,80	-34,90	1030,23	-32,047	1,21%	2,85
Corrente 3-4 Ib	970,20	-154,20	1055,13	-152,4	8,75%	1,80
Corrente 3-4 Ic	1009,60	85,00	1044,52	87,002	3,46%	2,00

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

O Erro Médio Absoluto de um conjunto de dados é dado pela equação (5.3).

$$Erro_{médiaoabsoluto(\%)} = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Erro_{absoluto\%i}| \right) \quad (5.3)$$

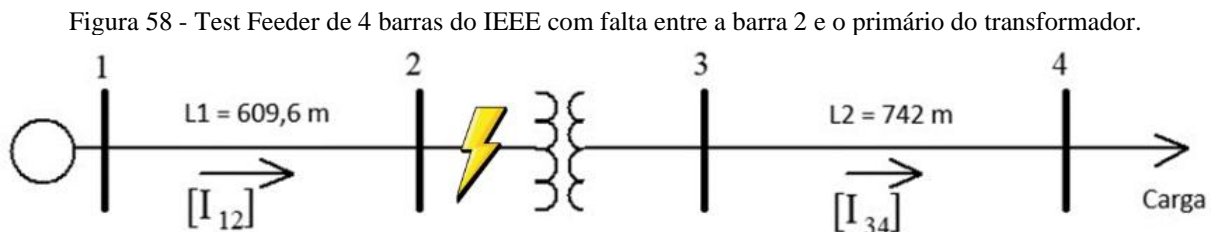
Em que:

- n : número de amostras de erro;
- $Erro_{absoluto\%i}$: o erro absoluto percentual de cada variável;

Após aplicar os valores da Tabela 3 à equação (5.3), o valor de Erro Médio Absoluto percentual encontrado para as amplitudes foi de 3,81% e, em relação às fases, não obteve-se diferença entre as fases teóricas e simuladas maior que 5°. É um erro aceitável, pois os valores não se distanciam de maneira severa do que se esperava. De maneira geral, foram valores bastante próximos aos valores esperados indicados pelo IEEE. Diante do exposto, foi validado o sistema alimentador 4-barras do IEEE modelado no *ATPDraw*.

5.4 MODELAGEM, CÁLCULO E SIMULAÇÃO DOS CENÁRIOS DE FALTAS SHUNT: COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES TEÓRICOS E SIMULADOS NO *ATPDRAW*

A modelagem e cálculo das correntes de curto-circuito para os diferentes cenários serão realizados baseados no sistema faltoso com a falta sendo ilustrada pelo raio que é mostrado na Figura 58.



Fonte: adaptado de IEEE (1991).

A fim de aplicar os métodos apresentados nos capítulos 2 e 3, ao sistema em questão, fez-se necessário calcular o valor em p.u. de todos os componentes do circuito, para que o mesmo fosse decomposto em redes de sequência. Todos os cálculos do sistema foram realizados com auxílio do *software Octave*.

Definindo as grandezas de base do sistema:

- Potência de base do sistema $S_B = 6 \text{ MVA}$ sendo a potência do transformador já que é a mesma para todo o sistema;
- A tensão de base é a tensão nominal (RMS) do gerador $V_B = 12,47 \text{ kV}$;
- Logo, a corrente de base de pico deverá ser:

$$I_B = \frac{S_B}{\sqrt{3} \times V_B} \times \sqrt{2} = 392,86 \text{ A}$$

- A impedância de base será:

$$Z_B = \frac{V_B^2}{S_B} = 25,92 \Omega$$

De acordo com os dados apresentados para as impedâncias das LTs na seção 5.1, as impedâncias de sequência serão:

- Linha de transmissão 1 (LT1):

Comprimento: 609,6 m;

Multiplicando o comprimento da LT1 pelas impedâncias de sequência por metro (Z_{ypos} , Z_{yneg} e Z_{yzero}) e as renomeando, respectivamente para $Z_{LT1,POS}$, $Z_{LT1,NEG}$ e $Z_{LT1,ZERO}$, tem-se:

$$Z_{LT1,POS} = Z_{LT1,NEG} = 0,12 + j0,24 \Omega$$

$$Z_{LT1,ZERO} = 0,29 + j0,73 \Omega$$

Os valores pu das impedâncias de sequência dessas grandezas serão:

$$Z_{LT1,POS-pu} = Z_{LT1,NEG-pu} = \frac{Z_{LT1,POS}}{Z_B} = 4,63 \times 10^{-3} + j9,26 \times 10^{-3} pu$$

$$Z_{LT1,ZERO-pu} = \frac{Z_{LT1,ZERO}}{Z_B} = 0,01 + j0,03 pu$$

- Linha de transmissão 2 (LT2):

Comprimento: 762 m;

Analogamente, os valores pu das impedâncias de sequência da LT2 são:

$$Z_{LT2,POS-pu} = Z_{LT2,NEG-pu} = 5,40 \times 10^{-3} + j0,01 pu$$

$$Z_{LT2,ZERO-pu} = 0,01 + j0,03 pu$$

O valor da impedância da carga já é conhecido. Portanto, basta dividir pelo valor da impedância de base para encontrar seu valor pu, conforme abaixo:

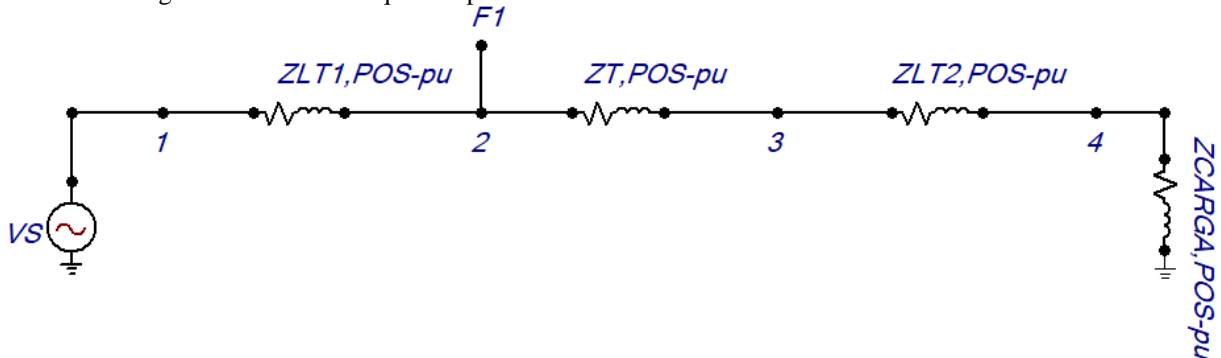
$$Z_{CARGA-pu} = \frac{Z_c}{Z_B} = 0,1 + j0,05 pu = Z_{CARGA,POS-pu} = Z_{CARGA,NEG-pu} = Z_{CARGA,ZERO-pu}$$

Quanto ao transformador, foi considerado que o valor de impedância dado pelo IEEE (1991) é igual para todas as sequências, ou seja:

$$Z_{T,POS-pu} = Z_{T,NEG-pu} = Z_{T,ZERO-pu} = 0,01 + j0,06 pu$$

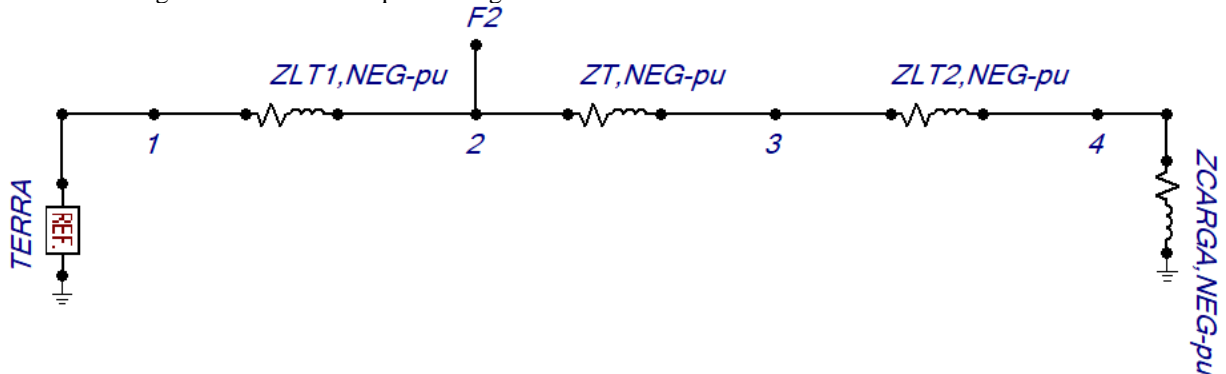
Após encontrar os valores pu de todos os componentes e levando em consideração o exposto no Capítulo 2 sobre a representação dos elementos do sistema em componentes simétricas, foram implementadas as redes de sequência positiva, negativa e zero mostradas nas Figuras 59, 60 e 61, respectivamente, para o cálculo das impedâncias equivalentes de Thévenin para cada sequência. Na Figura 59, verifica-se o gerador em série com a impedância da LT1, no nó 2 se encontra a componente de sequência positiva da falta, logo após vem a impedância do transformador em série com a impedância da LT2 e da carga. Conforme a teoria do capítulo 2 e 3, as redes de sequência negativa e zero não possuem, a menos que esse gerador não seja ou não esteja totalmente equilibrado, como mostrado nas Figura 60 e Figura 61.

Figura 59 - Rede de sequência positiva do sistema alimentador teste de 4 barras do IEEE.



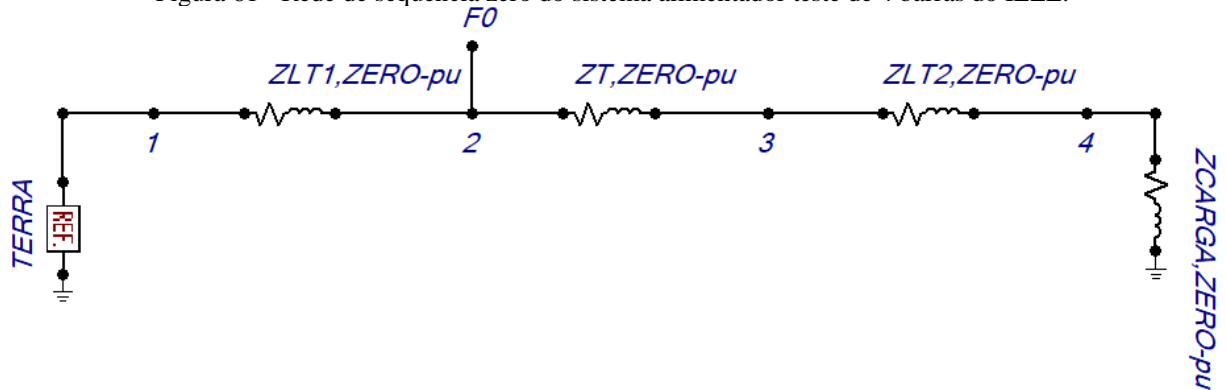
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Figura 60 - Rede de sequência negativa do sistema alimentador teste de 4 barras do IEEE.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Figura 61 - Rede de seqüência zero do sistema alimentador teste de 4 barras do IEEE.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Analisando a rede de seqüência positiva, a impedância de Thévenin é dada por:

$$Z_{th1-pu} = ((Z_{LT1,POS-pu}) \times (Z_{T,POS-pu} + Z_{LT2,POS-pu} + Z_{CARGA,POS-pu})) / (Z_{LT1,POS-pu} + Z_{T,POS-pu} + Z_{LT2,POS-pu} + Z_{CARGA,POS-pu}) \quad (5.4)$$

Aplicando os valores conhecidos à equação (5.4), tem-se que:

$$Z_{th1-pu} = 4,52 \times 10^{-3} + j8,66 \times 10^{-3} pu$$

Ao analisar a Figura 60, nota-se que a rede de seqüência negativa é igual a rede de seqüência positiva em termos da disposição das impedâncias dos elementos e, como os elementos possuem os mesmos valores de impedância, logo, a impedância de Thévenin da rede de seqüência negativa é igual a impedância de Thévenin da rede de seqüência positiva.

$$Z_{th1-pu} = Z_{th2-pu} \quad (5.5)$$

Dessa forma, pela equação (5.5), verifica-se que

$$Z_{th2-pu} = 4,52 \times 10^{-3} + j8,66 \times 10^{-3}$$

Para encontrar a impedância de Thévenin da rede de seqüência zero, com referência à Figura 61, executam-se cálculos análogos aos apresentados acima. Para a rede de seqüência zero, tem-se:

$$Z_{th0-pu} = ((Z_{LT1,ZERO-pu}) \times (Z_{T,ZERO-pu} + Z_{LT2,ZERO-pu} + Z_{CARGA,ZERO-pu})) / (Z_{LT1,ZERO-pu} + Z_{T,ZERO-pu} + Z_{LT2,ZERO-pu} + Z_{CARGA,ZERO-pu}) \quad (5.6)$$

Aplicando os devidos valores à Eq. 5.6, chega-se ao valor de:

$$Z_{th0-pu} = 0,01 + j0,02 pu$$

5.4.1 Modelagem dos cenários de falta e cálculo das correntes de curto-circuito

A tensão pré-falta considerada para o cálculo é de $V_f = 1 \angle 0^\circ pu$. A impedância de falta (Z_f) escolhida para todos os cenários de curto-circuito foi de 4Ω . Logo, $Z_{f-pu} \cong 0,31 pu$. Para os curtos-circuitos bifásico-terra e trifásico-terra a impedância de fase-terra (Z_g) escolhida foi de 2Ω , portanto, $Z_{g-pu} \cong 0,15 pu$. Os cálculos das correntes de curto-circuito foram realizados com auxílio da ferramenta matemática de programação de fonte aberta *Octave*. As rotinas utilizadas se encontram nos Apêndices A, B, C e D.

Falta monofásica

O cenário de falta monofásica foi aplicado na fase A, conforme mostrado na Figura 22 e, pelas condições de contorno, as correntes de falta das fases B e C são nulas. Na Figura 23, apresentam-se a interconexão das redes de sequência para a falta monofásica na fase A. Aplicando os valores do sistema à equação (3.8), tem-se:

$$I_{af-pu} = 6,21 \angle -4,43^\circ pu$$

Multiplicando pelo valor de corrente de base, encontra-se:

$$I_{af} = 2437,59 \angle -4,43^\circ A$$

A corrente de falta monofásica tem valor de pico de 2437,59 A.

Falta bifásica

O cenário de falta bifásica foi aplicado entre B e C, conforme mostrado na Figura 24 e, pelas condições de contorno, a corrente de falta da fase A é nula. Na Figura 25, foi apresentada a interconexão das redes de sequência para a falta bifásica aplicada entre as fases B e C. Aplicando os valores do sistema à equação (3.20), tem-se:

$$I_{bf-pu} = 10,54 \angle -96,05^\circ pu$$

$$I_{cf-pu} = 10,54 \angle 83,95^\circ pu$$

Multiplicando pelo valor de base, tem-se:

$$I_{bf} = 4141,70 \angle -96,05^\circ A$$

$$I_{cf} = 4141,70 \angle 83,95^\circ A$$

As correntes de falta nas fases B e C são idênticas em módulo, 4141,70 A, conforme

previsto pela condição de contorno da equação (3.10).

Falta bifásica-terra

O cenário de falta bifásica-terra foi aplicado entre B e C conectados à terra por meio de uma impedância Z_g , conforme apresentado na Figura 26 e, pelas condições de contorno, a corrente de falta da fase A é nula. Na Figura 27, mostra-se a interconexão das redes de sequência para a falta bifásica-terra. Aplicando os valores do sistema às equações pertinentes à rede de sequência da falta bifásica-terra, encontra-se:

$$I_{bf-pu} = 5,67 \angle -109,25^\circ pu$$

$$I_{cf-pu} = 5,66 \angle 103,04^\circ pu$$

Em termos das suas amplitudes reais em ampère, tem-se:

$$I_{bf} = 2228,30 \angle -109,25^\circ A$$

$$I_{cf} = 2224,40 \angle 103,04^\circ A$$

O efeito de distanciamento entre as amplitudes das correntes de falta na fase B e C poderia ser maior, caso a impedância de falta Z_f fosse menor.

Falta trifásica-terra

O cenário de falta trifásica-terra equilibrado foi aplicado nas três fases, conforme mostra a Figura 28 e, pelas condições de contorno, as correntes de falta são iguais em módulo e possuem defasagem de 120° entre si. É apresentada na Figura 29 a interconexão das redes de sequência para a falta trifásica-terra. Aplicando os valores do sistema às equações pertinentes à rede de sequência da falta trifásica-terra, encontram-se:

$$I_{af-pu} = 6,29 \angle -3,1203^\circ pu$$

$$I_{bf-pu} = 6,29 \angle -123,12^\circ pu$$

$$I_{cf-pu} = 6,29 \angle 116,88^\circ pu$$

Em termos das suas amplitudes reais em ampère, tem-se:

$$I_{af} = 2469,30 \angle -3,12^\circ A$$

$$I_{bf} = 2469,30 \angle -123,12^\circ A$$

$$I_{cf} = 2469,30 \angle 116,88^\circ A$$

Conforme previsto pelas equações e condições de contorno da falta trifásica, as correntes possuem o mesmo módulo com defasagem de 120° entre si.

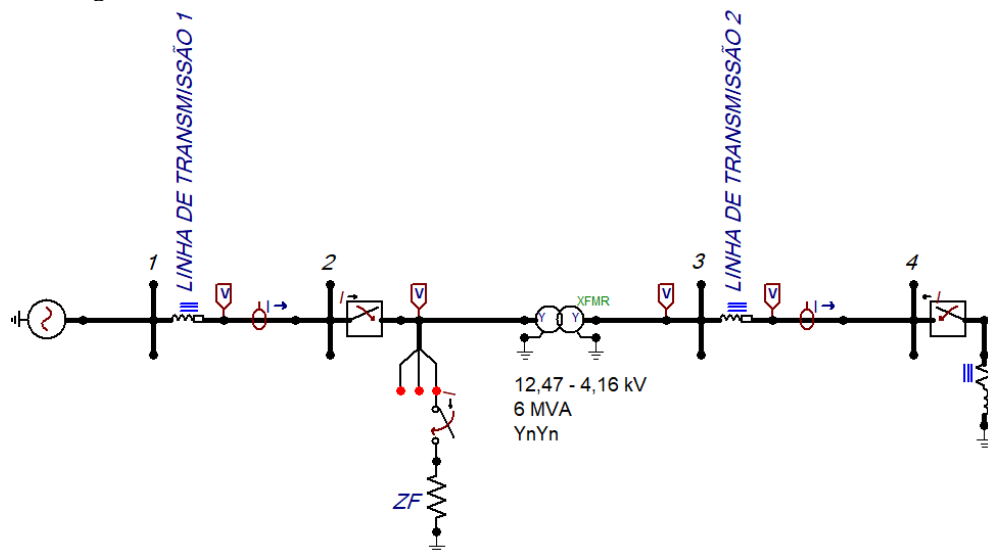
5.4.2 Modelagem dos cenários de falta e simulação no ATPDraw

Para validar os valores teóricos das correntes de curto-circuito calculadas, foram aplicados os mesmos cenários de curto-circuito ao sistema alimentador teste de 4 barras. Nas próximas seções serão apresentados os valores máximos encontrados para cada tipo de falta. A obtenção do valor máximo de cada corrente foi realizada com auxílio da ferramenta *plotXY* para salvar as amostras da variável em questão, a fim de que a leitura do valor máximo fosse obtida externamente com o software gratuito *Octave*. O código para realizar isso é bastante simples e se encontra no APÊNDICE E.

Falta monofásica

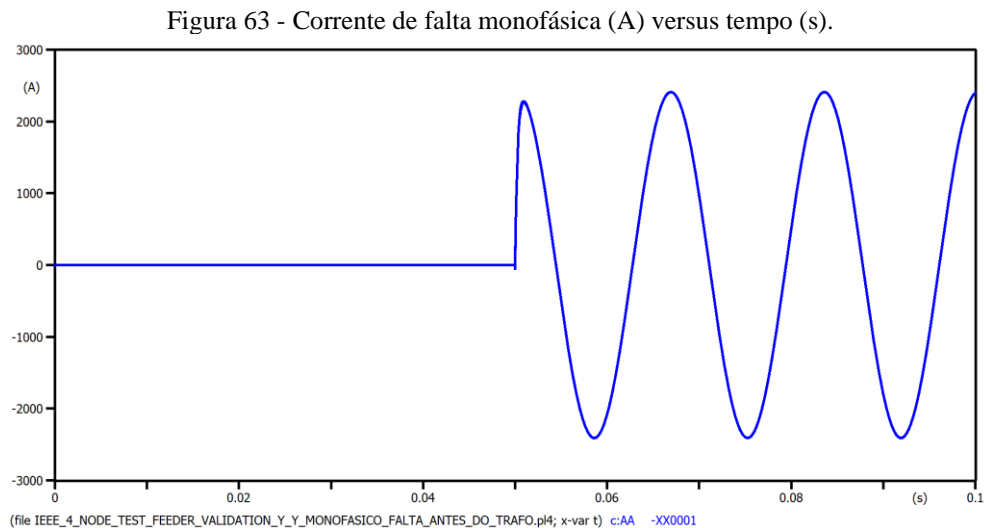
Na Figura 62, é apresentado o sistema de 4 barras com uma falta monofásica, aplicada à fase A, entre a barra 2 e o primário do transformador trifásico do sistema. A chave que conecta a impedância Z_f ao sistema fecha em 0,05 s, aplicando, dessa forma, uma falta monofásica.

Figura 62 - Sistema alimentador teste de 4 barras do IEEE com falta monofásica.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Na Figura 63, mostra-se o comportamento da corrente de falta monofásica durante o tempo de simulação. O valor dela é nulo enquanto a chave está aberta e, após 0,05 s, a chave é fechada e, então, a corrente de falta começa a ser drenada pela impedância de falta. O valor máximo da corrente de falta monofásica na fase A foi de 2409,50 A.

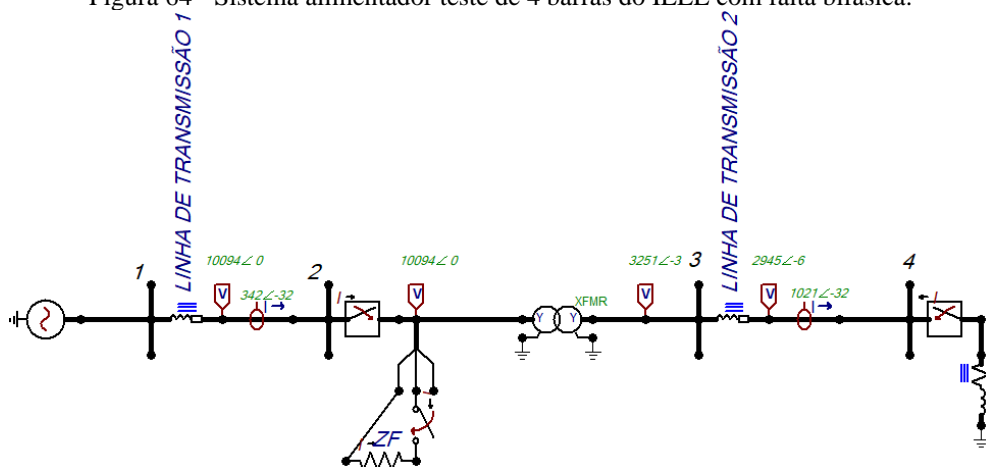


Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Falta bifásica

Na Figura 64, apresenta-se o sistema de 4 barras com uma falta bifásica, aplicada entre as fases B e C. A chave que conecta a impedância Z_f ao sistema fecha em 0,05 s, aplicando, dessa forma, uma falta bifásica.

Figura 64 - Sistema alimentador teste de 4 barras do IEEE com falta bifásica.



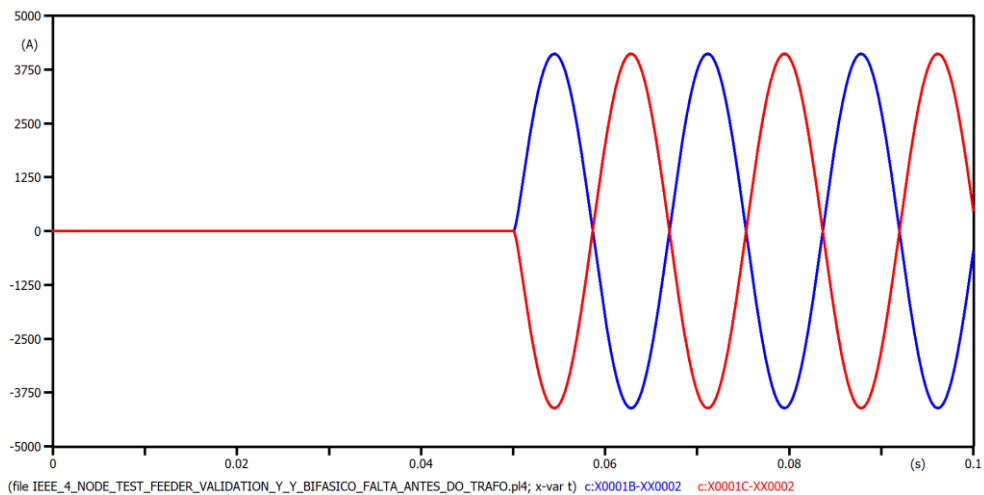
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Na Figura 65, é mostrado o comportamento das correntes de falta bifásica durante o tempo de simulação. Os valores delas são nulos enquanto a chave que conecta a falta ao sistema está aberta e, após 0,05 s, a chave é fechada e, então, as correntes de falta começam a ser drenada pela impedância de falta. Como pelas condições de contorno a corrente da fase B é igual ao valor oposto da corrente da fase C, em módulo, elas possuem valores iguais. O valor máximo da corrente de falta bifásica foi 4112 A. Ou seja, as correntes de falta são:

$$I_{bf} = 4112 \text{ A}$$

$$I_{cf} = 4112 \text{ A}$$

Figura 65 - Correntes de falta bifásica (A) versus tempo (s).

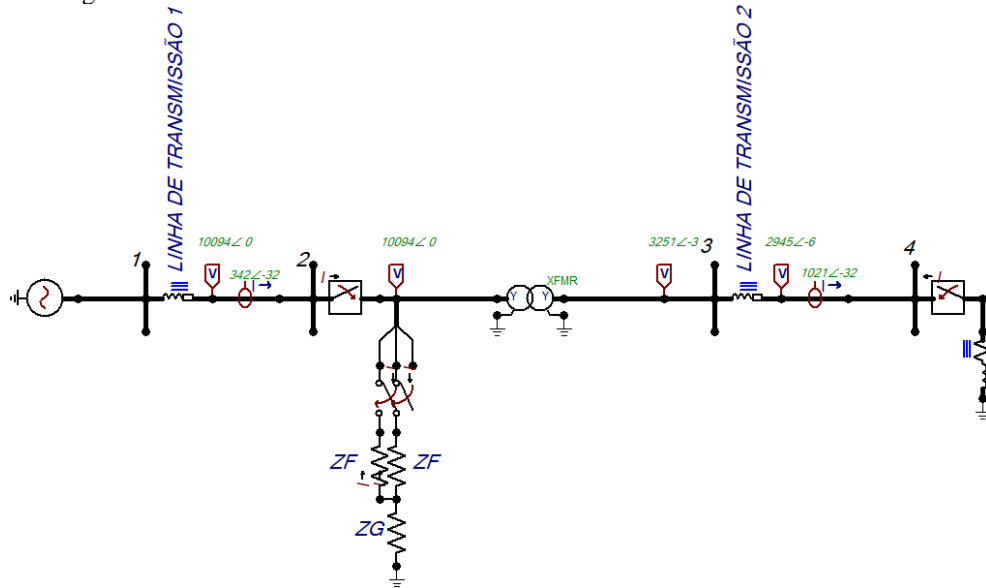


Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Falta bifásica-terra

Na Figura 66, apresenta-se o sistema de 4 barras com uma falta bifásica-terra, aplicada entre as fases B e C, conectadas por meio de duas impedâncias de falta Z_f e uma impedância Z_g que conecta as fases B e C à terra. As chaves fecham seus contatos em 0,05 s, aplicando, dessa forma, uma falta bifásica-terra.

Figura 66 - Sistema alimentador teste de 4 barras do IEEE com falta bifásica-terra.



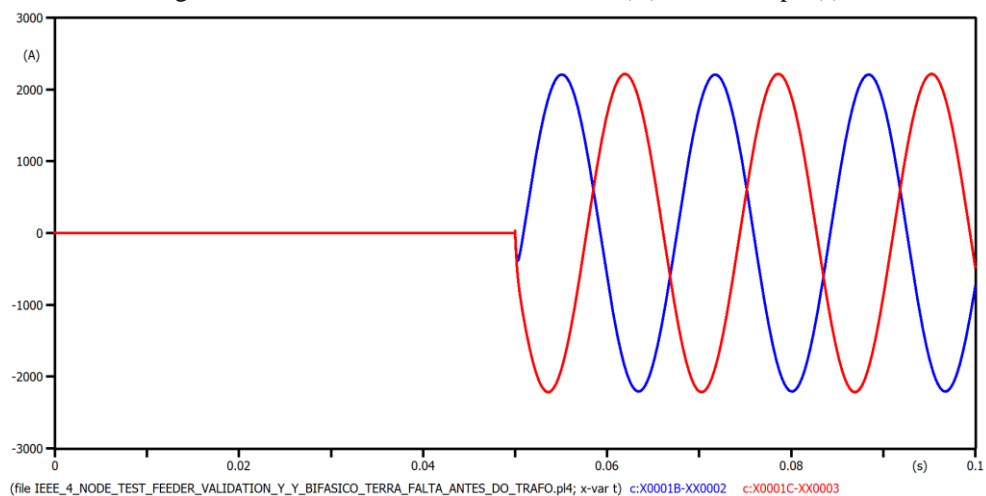
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Na Figura 67, é apresentado o comportamento das correntes de falta bifásica-terra durante o tempo de simulação. Os valores delas são nulos enquanto as chaves que conectam a falta ao sistema estão abertas e, após 0,05 s, as chaves são fechadas. Logo, as correntes de falta começam a ser drenada pelas impedâncias Z_f e a impedância Z_g . Os valores máximos para I_{bf} e I_{cf} foram:

$$I_{bf} = 2205,90 \text{ A}$$

$$I_{cf} = 2214,90 \text{ A}$$

Figura 67 - Correntes de falta bifásica-terra (A) versus tempo (s).



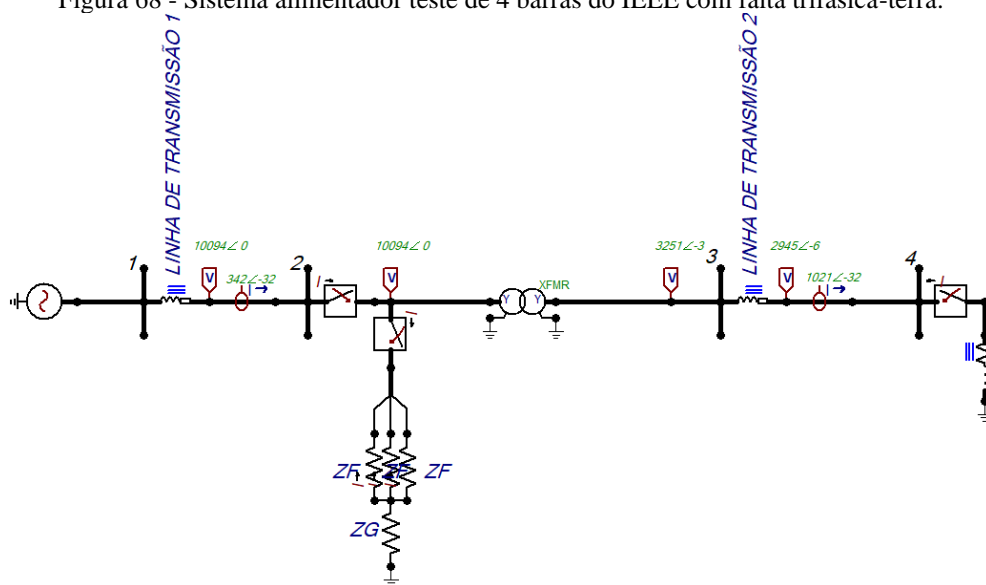
(file IEEE_4_NODE_TEST_FEEDER_VALIDATION_Y_Y_BIFASICO_TERRA_FALTA_ANTES_DO_TRAFO.pl4; x-var t) c:X0001B-XX0002 c:X0001C-XX0003

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Falta trifásica-terra

Na Figura 68, é mostrado mostra o sistema de 4 barras com uma falta trifásica-terra, aplicada entre as três fases, conectadas por meio de três impedâncias de falta Z_f e uma impedância Z_g que conecta as fases à terra. As chaves fecham seus contatos em 0,05 s, aplicando, dessa forma, uma falta trifásica-terra.

Figura 68 - Sistema alimentador teste de 4 barras do IEEE com falta trifásica-terra.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Na Figura 69, apresenta-se o comportamento das correntes de falta trifásica-terra durante o tempo de simulação. Os valores delas são nulos enquanto as chaves que conectam a falta ao sistema estão abertas e, após 0,05 s, as chaves são fechadas. Logo, as correntes de falta começam a ser drenada pelas impedâncias Z_f e a impedância Z_g .

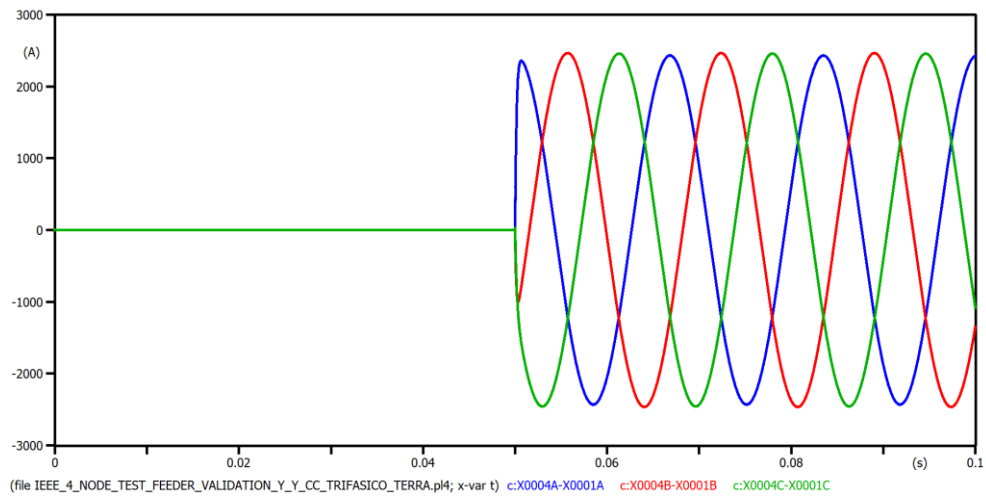
Os valores máximos das correntes de falta trifásica-terra foram:

$$I_{af} = 2430,40 \text{ A}$$

$$I_{bf} = 2464,40 \text{ A}$$

$$I_{cf} = 2456,70 \text{ A}$$

Figura 69 - Correntes de falta trifásica-terra (A) versus tempo (s).



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

5.4.3 Comparação entre os valores de corrente de curto-circuito calculados e simulados no *ATPDraw* e análise

De maneira compacta, na Tabela 4, apresentam-se os valores das correntes de falta teóricas e simuladas para cada tipo de curto-circuito aplicado ao sistema de 4 barras. Para a corrente de falta monofásica, obteve-se um erro irrisório de 1,17%. Para a falta bifásica, o erro foi ainda menor: 0,72%. Para o curto-circuito bifásico-terra, foram obtidos valores de corrente pouco maiores que um 1%. Para a falta trifásica-terra, o erro entre os valores teóricos e simulados para as três correntes foram menores que 2%. Esse resultado mostra que, de fato, a modelagem do sistema para a simulação e obtenção dos resultados para comparação com o caso base foi bastante precisa e, por isso, foi possível realizar cálculos de curto-circuito para os diferentes cenários de falta e obter resultados bastante parecidos na simulação.

Tabela 4 - Comparação entre os valores de corrente de falta teóricos e os simulados.

TIPO DE CURTO CIRCUITO	CORRENTE (A)	TEÓRICOS (A)	SIMULADO (A)	ERRO
MONOFÁSICO	Ia	2437,59	2409	1,17%
BIFÁSICO	Ib	4141,70	4111,70	0,72%
	Ic	4141,70	4111,70	0,72%
BIFÁSICO-TERRA	Ib	2228,30	2205,90	1,01%
	Ic	2224,40	2214,90	0,43%
TRIFÁSICO-TERRA	Ia	2469,30	2430,40	1,58%
	Ib	2469,30	2464,40	0,20%
	Ic	2469,30	2456,70	0,51%

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Para esse caso do sistema de 4 barras do IEEE, o objetivo principal foi modelar a rede, simular o caso base, validar a rede modelada, aplicar e calcular as faltas manualmente e simular os mesmos cenários de faltas calculados com os resultados obtidos nas simulações no *ATPDraw*. Esses objetivos foram alcançados nesta seção.

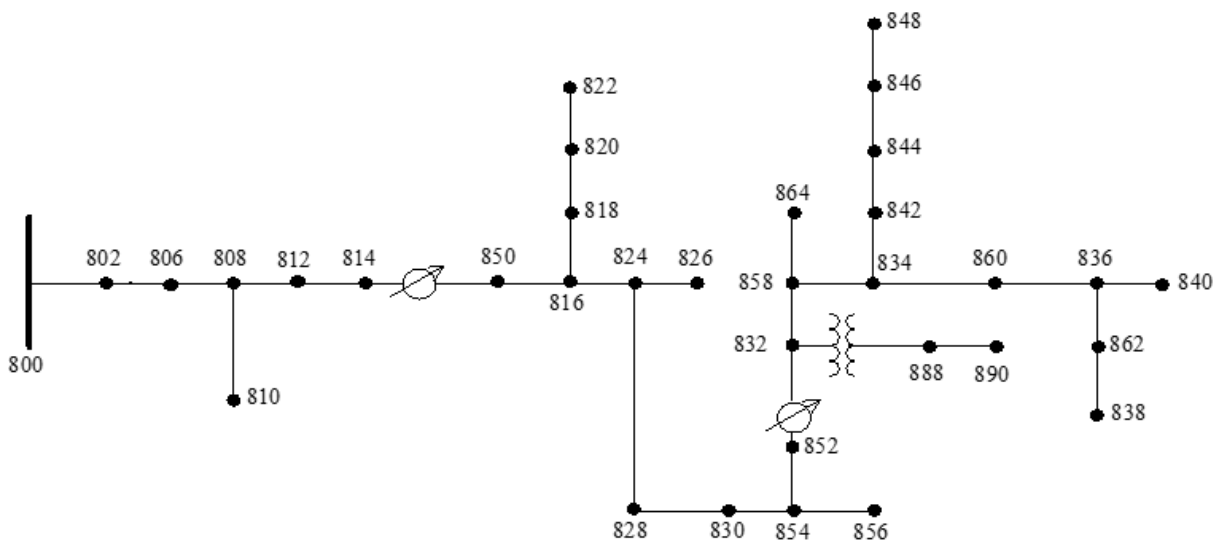
5.5 ESTUDO DE CASO: APRESENTAÇÃO E MODELAGEM COMPUTACIONAL DO SISTEMA ALIMENTADOR DE TESTE DE 34 BARRAS DO IEEE

O sistema alimentador teste de 34 barras do IEEE, conhecido como IEEE 34 Nodes Test Feeder, representa um alimentador real localizado no Arizona, Estados Unidos da América, com tensão nominal de 24,9 kV com frequência de 60 Hz.

Ele é caracterizado pelas linhas de transmissão de longa extensão e cargas distribuídas desbalanceadas ao longo da linha, também pelos dois reguladores de tensão conectados às LT, dois transformadores abaixadores, um para a barra 800 e outro para um trecho da rede de 4,16 kV, por cargas desbalanceadas e capacitores *shunt* (IEEE, 1992). Esse sistema é amplamente utilizado em pesquisas sobre sistemas de distribuição, estudos de fluxo de potência, análise de faltas e simulações de qualidade de energia, devido a sua complexidade e representação realista de redes desequilibradas. Na Figura 70, exibe-se o sistema alimentador teste de 34 barras com suas barras representadas por uma linha reta na vertical (barra 800) e por pontos pretos (todas as outras barras). Também mostra dois reguladores de tensão, um entre as barras 814 e 850 e outro entre as barras 852 e 832, assim como um transformador entre as barras 832 e 888. Alguns elementos antes da barra 800 estão suprimidos na Figura 70.

O artigo do IEEE (1992) apresenta os dados dos componentes a serem modelados e, também, dados de simulação.

Figura 70 - O sistema alimentador teste de 34 barras do IEEE.



Fonte: IEEE, 1992.

A partir dessa subseção será apresentada detalhadamente a modelagem de cada componente do sistema alimentador teste de 34 barras no *ATPDraw*.

5.5.1 Gerador e equivalente de Thevénin do sistema

O gerador foi modelado utilizando o componente *ACSOURCE*, conforme apresentado na seção 4.2.1. Os parâmetros de entrada fornecidos estão mostrados na Tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros de entrada para a modelagem do gerador do sistema alimentador teste de 34 barras.

Parâmetros de entrada solicitado	Parâmetros fornecidos
Tensão (V)	69000
Frequência (Hz)	60
Ângulo da fase (°)	30
Número de fases	3
Amplitude (fase ou linha e pico ou rms)	RMS L-L
T início (s)	-1
T fim (s)	100

Fonte: IEEE, 1992.

O sistema foi modelado por um equivalente de Thevénin a partir de uma informação adaptada de potência trifásica e monofásica de curto-circuito obtida a partir de Rodrigues (2017) e Pereira Neto (2023). As potências de curto-circuito trifásica e monofásica consideradas, foram:

- $S_{3\phi} = 360MVA$;
- $S_{1\phi} = 270MVA$;

A tensão de linha considerada para os cálculos das impedâncias de Thévenin foi a própria tensão do gerador 69 kV RMS.

Utilizando a fórmula de Kersting e Kerestes (2022) mostrada abaixo, pode-se calcular a impedância de sequência positiva e zero.

$$Z_+ = \frac{V_{ll}^2}{S_{3\phi}} \quad (5.7)$$

$$Z_0 = \frac{3 \times V_{ll}^2}{S_{1\phi}} - 2 \times Z_+ \quad (5.8)$$

Aplicando os devidos valores às equações (5.7) e (5.8), tem-se:

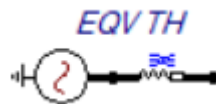
$$Z_+ = 1,15 + j13,18 \, \Omega$$

$$Z_0 = 2,31 + j26,34 \, \Omega$$

Esses valores de impedâncias obtidos foram colocados logo após o gerador, no componente *LINERL3S*, que tem como parâmetros as impedâncias de sequência positiva e zero.

Com isso, o circuito antes da barra 800 foi construído conforme mostrado na Figura 71.

Figura 71 - Equivalente de Thévenin do Sistema de 34 barras do IEEE.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

5.5.2 Transformadores

Os dados dos dois transformadores do sistema estão mostrados na Tabela 6.

Tabela 6 - Transformadores do sistema de 34 barras do IEEE.

		kVA	kV-high	kV-low	R - %	X - %
TRAFO 1	Substation:	2500	69 - D	24.9 -Gr. W	1	8
TRAFO 2	XFM -1	500	24.9 - Gr.W	4.16 - Gr. W	1,9	4,08

Fonte: IEEE, 1991.

O TRAFO 1 possui conexão em delta no primário e estrela-aterrada no secundário. Ele é conectado logo após o equivalente de Thevenin do sistema antes da barra 800.

O TRAFO 2 possui conexão em estrela-aterrada no primário e estrela-aterrada no secundário. Conforme a Figura 70 exibe, o TRAFO 2 está conectado entre as barras 832 e 888.

A modelagem dos transformadores do sistema seguiu a seção 4.3.1, em que foi utilizado o mesmo componente *HYBRID transformer* para ambos.

Os parâmetros de entrada fornecidos para modelar o TRAFO 1 e TRAFO 2, estão

mostrados nas Tabelas 7 e 8, respectivamente.

Tabela 7 - Parâmetros de entrada para a modelagem do TRAFO 1 do sistema alimentador teste de 34 barras.

Parâmetros de entrada solicitado	Parâmetros fornecidos
Número de enrolamentos entre as fases	2
Frequência (Hz)	60
Tensão de linha do primário e secundário (kV)	69 / 24,9
Potência aparente trifásica (MVA)	2,5
Fechamento do transformador	delta /Y-aterrado
Defasagem entre primário e secundário	0
Reatância (X) e Resistência (R) em %	8% e 1%

Fonte: IEEE, 1992.

Tabela 8 - Parâmetros de entrada para a modelagem do TRAFO 2 do sistema alimentador teste de 34 barras.

Parâmetros de entrada solicitado	Parâmetros fornecidos
Número de enrolamentos entre as fases	2
Frequência (Hz)	60
Tensão de linha do primário e secundário (kV)	24,9 / 4,16
Potência aparente trifásica (MVA)	0,5
Fechamento do transformador	Y-aterrado /Y-aterrado
Defasagem entre primário e secundário	0
Reatância (X) e Resistência (R) em %	4,08% e 1,9%

Fonte: IEEE, 1992.

5.5.3 Linhas de transmissão

As LTs do sistema possuem diversas configurações, elas estão mostradas no Quadro 5 abaixo:

Quadro 5 - Configuração das linhas de distribuição da rede de 34 barras do IEEE.

Tipo de configuração	Condutores presentes
300	A B C N
301	A B C N
302	A N
303	B N
304	C N

Fonte: adaptado de IEEE, 1992.

Cada configuração possui suas matrizes de impedância (dadas Ω/m) e suas susceptâncias para os capacitores (dadas em $\mu S/m$).

Algumas configurações de LT desse sistema, como a 302, 303 e 304, são monofásicas, como mostrado no Quadro 5, exibindo os condutores presentes.

Todos os segmentos de LT do sistema foram modelados utilizando o modelo *LINEPI_3* e *LINEPI_1*. O motivo da escolha é devido a todas as configurações de LT possuírem a susceptância, independentemente do comprimento da LT. Por isso, para ter uma melhor precisão na modelagem e simulação do sistema, optou-se por utilizar os componentes do modelo π .

5.5.4 Cargas concentradas, distribuídas e bancos de capacitores

As cargas concentradas e distribuídas foram modeladas da mesma maneira que no sistema de 4 barras do IEEE. Além das cargas, também foram modelados dois bancos de capacitores trifásicos.

As potências ativa e reativa por fase das cargas concentradas de cada barra estão mostradas na Tabela 9.

Tabela 9 - Cargas concentradas do sistema de 34 barras do IEEE.

<i>Node</i>	<i>Load</i>	<i>Ph-1</i>	<i>Ph-1</i>	<i>Ph-2</i>	<i>Ph-2</i>	<i>Ph-3</i>	<i>Ph-3</i>
	Model	kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr
860	Y-PQ	20	16	20	16	20	16
840	Y-I	9	7	9	7	9	7
844	Y-Z	135	105	135	105	135	105
848	D-PQ	20	16	20	16	20	16
890	D-I	150	75	150	75	150	75
830	D-Z	10	5	10	5	25	10

Fonte: IEEE, 1991.

As potências ativa e reativa por fase das cargas distribuídas de cada trecho das LTs estão mostradas na Tabela 10.

Tabela 10 - Cargas distribuídas do sistema de 34 barras do IEEE.

<i>Node</i>	<i>Node</i>	<i>Load</i>	<i>Ph-1</i>	<i>Ph-1</i>	<i>Ph-2</i>	<i>Ph-2</i>	<i>Ph-3</i>	<i>Ph-3</i>
A	B	Model	kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr
802	806	Y-PQ	0	0	30	15	25	14
808	810	Y-I	0	0	16	8	0	0
818	820	Y-Z	34	17	0	0	0	0
820	822	Y-PQ	135	70	0	0	0	0
816	824	D-I	0	0	5	2	0	0
824	826	Y-I	0	0	40	20	0	0
824	828	Y-PQ	0	0	0	0	4	2
828	830	Y-PQ	7	3	0	0	0	0
854	856	Y-PQ	0	0	4	2	0	0
832	858	D-Z	7	3	2	1	6	3
858	864	Y-PQ	2	1	0	0	0	0
858	834	D-PQ	4	2	15	8	13	7
834	860	D-Z	16	8	20	10	110	55
860	836	D-PQ	30	15	10	6	42	22
836	840	D-I	18	9	22	11	0	0
862	838	Y-PQ	0	0	28	14	0	0
842	844	Y-PQ	9	5	0	0	0	0
844	846	Y-PQ	0	0	25	12	20	11
846	848	Y-PQ	0	0	23	11	0	0

Fonte: IEEE, 1992.

As potências reativa por fase dos bancos de capacitores são mostradas na Tabela 11.

Tabela 11 - Banco de capacitores do sistema de 34 barras do IEEE.

<i>Node</i>	Fase A	Fase B	Fase C
	kVAr	kVAr	kVAr
844	100	100	100
848	150	150	150

Fonte: IEEE, 1992.

Todas as cargas e bancos de capacitores foram modelados utilizando os conceitos apresentados na seção 4.4.1, em que representa-se cada carga e banco de capacitor como uma impedância constante.

Os valores de resistência e reatância por fase das cargas concentradas são mostrados na Tabela 12.

Tabela 12 - Valores de resistência e reatância das cargas concentradas.

Node	Resistência (ohm)	Reatância (ohm)	Resistência (ohm)	Reatância (ohm)	Resistência (ohm)	Reatância (ohm)
	Fase A		Fase B		Fase C	
860	6300,91	5040,73	6300,91	5040,73	6300,91	5040,73
840	14307,92	11128,38	14307,92	11128,38	14307,92	11128,38
844	953,86	741,89	953,86	741,89	953,86	741,89
848	18902,74	15122,20	18902,74	15122,20	18902,74	15122,20
890	92,30	46,15	92,30	46,15	92,30	46,15
830	49600,80	24800,40	49600,80	24800,40	21379,66	8551,86

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Os valores de resistência e reatância por fase das cargas distribuídas são mostrados na Tabela 13.

Tabela 13 - Valores de resistência e reatância das cargas distribuídas.

		Resistência (ohm)	Reatância (ohm)	Resistência (ohm)	Reatância (ohm)	Resistência (ohm)	Reatância (ohm)
<i>Node</i>	<i>Node</i>	Fase A		Fase B		Fase C	
A	B						
802	806			5511,20	2755,60	6293,24	3524,21
808	810			10333,50	5166,75		
818	820	4862,82	2431,41				
820	822	1206,51	625,60				
816	824			106898,28	42759,31		
824	826			4133,40	2066,70		
824	828					41334,00	20667,00
828	830	24942,93	10689,83				
854	856			41334,00	20667,00		
832	858	74828,79	32069,48	248004,00	124002,00	82668,00	41334,00
858	864	82668,00	41334,00				
858	834	124002,00	62001,00	32180,45	17162,91	36973,07	19908,58
834	860	31000,50	15500,25	24800,40	12400,20	4509,16	2254,58
860	836	16533,60	8266,80	45588,97	27353,38	11583,82	6067,71
836	840	27556,00	13778,00	22545,82	11272,91		
862	838			5904,86	2952,43		
842	844	17547,45	9748,58				
844	846			6718,79	3225,02	7933,59	4363,47
846	848			7312,94	3497,49		

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Os valores de susceptância em μS por fase dos bancos de capacitores *shunt* estão na Tabela 14.

Tabela 14 - Susceptância por fase dos bancos de capacitores *shunt*.

<i>Node</i>	Susceptância (μS)	Susceptância (μS)	Susceptância (μS)
	Fase A	Fase B	Fase C
844	483,86	483,86	483,86
848	725,79	725,79	725,79

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

5.5.5 Reguladores de tensão

Os reguladores de tensão foram modelados conforme a seção 4.5.1. Os valores das relações de transformação de cada regulador de tensão estão na Tabelas 15 e 16.

Tabela 15 - Valores das relações de transformação do regulador trifásico de tensão 1.

REGULADOR DE TENSÃO 1	Fases	814-850
n1	A	0,93
n2	B	0,97
n3	C	0,97

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Tabela 16 - Valores das relações de transformação do regulador trifásico de tensão 2.

REGULADOR DE TENSÃO 2	Fases	852-832
n1	A	0,92
n2	B	0,94
n3	C	0,93

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

5.6 SIMULAÇÃO DO CASO BASE DO SISTEMA ALIMENTADOR DE TESTE DE 34 BARRAS DO IEEE: COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES TEÓRICOS E SIMULADOS

Para validar e realizar uma comparação justa da simulação do sistema modelado com os valores teóricos, a tensão do gerador foi elevada para 1,075 pu, ou seja, 74,175 kV. O ângulo da fase de 30° na modelagem do gerador é uma medida necessária para anular a defasagem gerada pelo transformador de 2,5 MVA que possui fechamento delta/estrela-aterrada. Os valores teóricos de tensão em pu e fases estão no artigo do IEEE (1991) que expõe o perfil de tensão da rede ao longo das barras. Após simular a rede de 34 barras do IEEE, obteve-se os valores indicados na Tabela 17. Para que fosse possível a visualização do sistema por completo modelado no ambiente do *ATPDraw*, foram elaborados os Apêndices F e G, separadamente, para que fosse possível adicionar imagens desse sistema ao trabalho. Onde, no Apêndice F está a parte 1 da rede e no Apêndice G está a parte 2.

Tabela 17 - Valores simulados dos fasores de tensão do sistema de 34 barras do IEEE.

BARRA	MAGNI- TUDE (pu)	ÂNGULO	MAGNI- TUDE (pu)	ÂNGULO	MAGNI- TUDE (pu)	ÂNGULO
	FASE A		FASE B		FASE C	
800	1,0497	-3,75	1,0533	-123,3	1,0602	116,59
802	1,0472	-3,83	1,0517	-123,36	1,0586	116,54
806	1,0456	-3,86	1,0507	-123,41	1,0575	116,38
808	1,0150	-4,55	1,0333	-124,19	1,0384	115,89
810			1,0331	-124,19		30
812	0,9794	-5,4	1,0141	-125,08	1,0157	115,17
814	0,9511	-6,11	0,9989	-125,8	0,9976	114,59
RG10	1,0080	-6,31	1,0218	-126,04	1,0196	114,41
850	1,0080	-6,31	1,0218	-126,04	1,0196	114,41
816	1,0076	-6,32	1,0216	-126,04	1,0193	114,4
818	1,0067	-6,33				
820	0,9836	-6,38				
822	0,9807	-6,39				
824	0,9990	-6,45	1,0124	-126,24	1,0106	114,15
826			1,0122	-126,25		
828	0,9982	-6,46	1,0117	-126,26	1,0099	114,13
830	0,9811	-6,75	0,9952	-126,65	0,9924	113,64
854	0,9807	-6,76	0,9948	-126,66	0,9920	113,63
852	0,9514	-7,29	0,9659	-127,36	0,9615	112,73
RG11	1,0200	-7,44	1,0238	-127,55	1,0248	112,48
832	1,0200	-7,44	1,0238	-127,55	1,0248	112,48
858	1,0176	-7,49	1,0214	-127,64	1,0226	112,37
834	1,0149	-7,56	1,0186	-127,75	1,0200	112,24
842	1,0149	-7,57	1,0185	-127,76	1,0200	112,23
844	1,0146	-7,59	1,0182	-127,79	1,0198	112,21
846	1,0149	-7,64	1,0182	-127,83	1,0200	112,16
848	1,0149	-7,64	1,0182	-127,84	1,0201	112,15
860	1,0145	-7,56	1,0182	-127,76	1,0196	112,24
836	1,0142	-7,56	1,0178	-127,76	1,0195	112,24
840	1,0142	-7,56	1,0177	-127,76	1,0195	112,24
862	1,0142	-7,56	1,0178	-127,76	1,0195	112,24
838			1,0176	-127,76		
864	1,0176	-7,5				
XF10	0,9869	-8,89	0,9911	-128,96	0,9911	111,1
888	0,9869	-8,89	0,9911	-128,96	0,9911	111,1
890	0,9113	-9,45	0,9224	-129,9	0,9156	110,33
856			0,9947	-126,67		

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A comparação entre os valores teóricos e simulados dos fasores de tensão são mostrados na Tabela 18.

Tabela 18 - Valores teóricos *versus* valores simulados dos fasores de tensão do sistema de 34 barras do IEEE.

BARRA	MAGNITUDE	ÂN- GULO	MAGNI- TUDE	ÂN- GULO	MAGNI- TUDE	ÂN- GULO
	FASE A		FASE B		FASE C	
	ERRO MAGNI- TUDE	ERRO ÂN- GULO	ERRO MAGNI- TUDE	ERRO ÂN- GULO	ERRO MAGNI- TUDE	ERRO ÂN- GULO
800	0,10%	-3,75	0,27%	-3,3	0,95%	-3,41
802	0,10%	-3,78	0,27%	-3,29	0,95%	-3,41
806	0,09%	-3,78	0,32%	-3,3	0,95%	-3,54
808	0,02%	-3,8	0,29%	-3,24	0,88%	-3,41
810			0,30%	-3,24		
812	0,06%	-3,83	0,32%	-3,16	0,80%	-3,42
814	0,13%	-3,85	0,34%	-3,1	0,75%	-3,42
RG10	0,12%	-4,05	0,34%	-3,34	0,75%	-3,6
850	0,13%	-4,05	0,34%	-3,34	0,75%	-3,6
816	0,13%	-4,06	0,34%	-3,33	0,75%	-3,61
818	0,13%	-4,06				
820	0,17%	-4,06				
822	0,18%	-4,06				
824	0,15%	-4,08	0,36%	-3,3	0,72%	-3,61
826			0,36%	-3,31		
828	0,15%	-4,08	0,36%	-3,31	0,72%	-3,62
830	0,20%	-4,12	0,39%	-3,26	0,67%	-3,61
854	0,20%	-4,12	0,39%	-3,26	0,67%	-3,61
852	0,28%	-4,18	0,45%	-3,18	0,57%	-3,6
RG11	0,28%	-4,33	0,45%	-3,37	0,57%	-3,85
832	0,28%	-4,33	0,45%	-3,37	0,57%	-3,85
858	0,26%	-4,32	0,44%	-3,36	0,57%	-3,85
834	0,26%	-4,32	0,43%	-3,36	0,56%	-3,85
842	0,25%	-4,32	0,43%	-3,37	0,56%	-3,86
844	0,25%	-4,32	0,43%	-3,37	0,55%	-3,85
846	0,26%	-4,32	0,42%	-3,37	0,56%	-3,85
848	0,25%	-4,32	0,43%	-3,37	0,55%	-3,85
860	0,25%	-4,32	0,42%	-3,37	0,55%	-3,85
836	0,25%	-4,33	0,42%	-3,37	0,56%	-3,85
840	0,25%	-4,33	0,42%	-3,37	0,56%	-3,85
862	0,25%	-4,33	0,42%	-3,37	0,56%	-3,85
838			0,42%	-3,37		
864	0,26%	-4,33				

XF10	0,53%	-4,26	0,76%	-3,23	0,78%	-3,72
888	0,54%	-4,25	0,76%	-3,23	0,78%	-3,72
890	1,23%	-4,26	1,37%	-3,12	1,45%	-3,65
856			0,39%	-3,26		

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

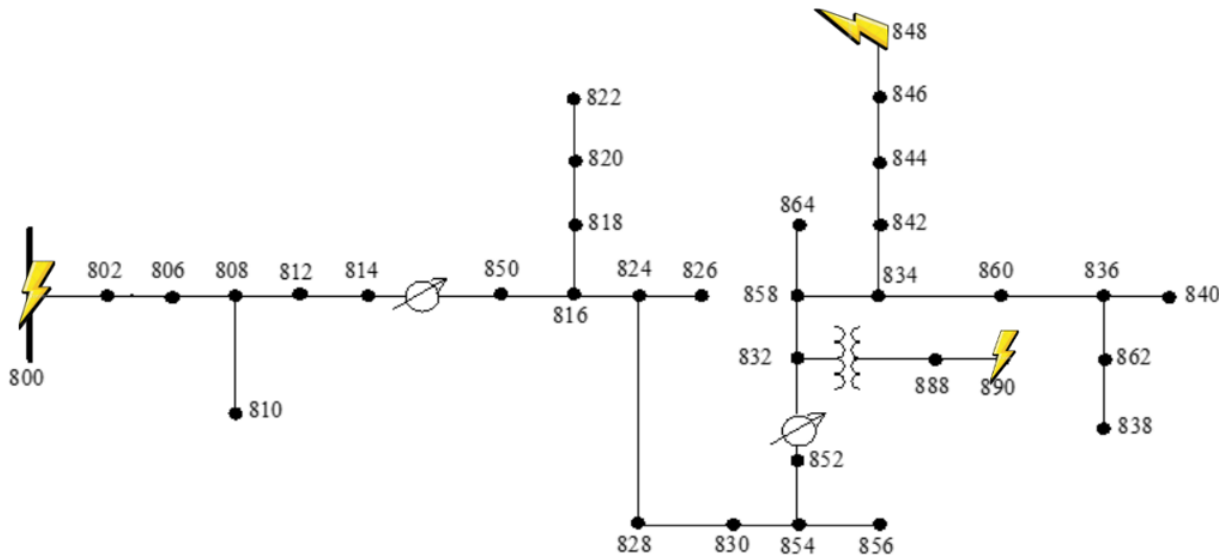
Pode-se afirmar, pelos dados explícitos na Tabela 18, que houveram pequenas divergências, quase desprezíveis, entre os valores esperados e os simulados. Para as magnitudes, o erro não chegou a 2% em nenhuma das barras do sistema. As fases, também, não tiveram diferença significativa entre os valores esperados e simulados, ficando abaixo de 5°. Como houveram divergências minúsculas, considera-se bem sucedida a validação da modelagem do sistema de 34 barras do IEEE no *ATP/ATPDraw*.

5.7 SIMULAÇÃO DOS CENÁRIOS DE FALTAS *SHUNT* NO SISTEMA DE 34 BARRAS DO IEEE NO *ATPDRAW*

Foram escolhidos três pontos para simulação das faltas shunt, são eles: barra 800 (próximo ao gerador), barra 848 (próximo a um banco de capacitores) e a barra 890 (conectada a uma carga de alta potência e baixa impedância).

Desejou-se observar como os níveis de curto-circuito variam nesses 3 pontos da rede e qual tipo de falta degrada de maneira mais severa o funcionamento do sistema. Na Figura 72, é ilustrada a rede de 34 barras, evidenciando as faltas nas barras 800, 848 e 890.

Figura 72 - Sistema de 34 barras do IEEE com faltas nas barras 800, 848 e 890.



Fonte: Adaptado de IEEE, 1992.

Os cenários de falta aplicados foram modelados utilizando o disposto na seção 4.6. O passo de simulação ΔT escolhido foi de $1,67 \times 10^{-5}$ s, isso significa que serão simuladas 1000 amostras por ciclo (para um sinal de 60 Hz). O tempo total de simulação será de 0,5 segundo. O tempo de fechamento da chave trifásica ($T-cl_{-}$) para aplicação do curto-circuito escolhido foi de 0,25 segundo.

5.7.1 Faltas aplicadas à barra 800

Para as faltas aplicadas à barra 800 os valores das impedâncias de falta foram:

- $Z_f = 4 \Omega$
- $Z_g = 2 \Omega$

Falta monofásica

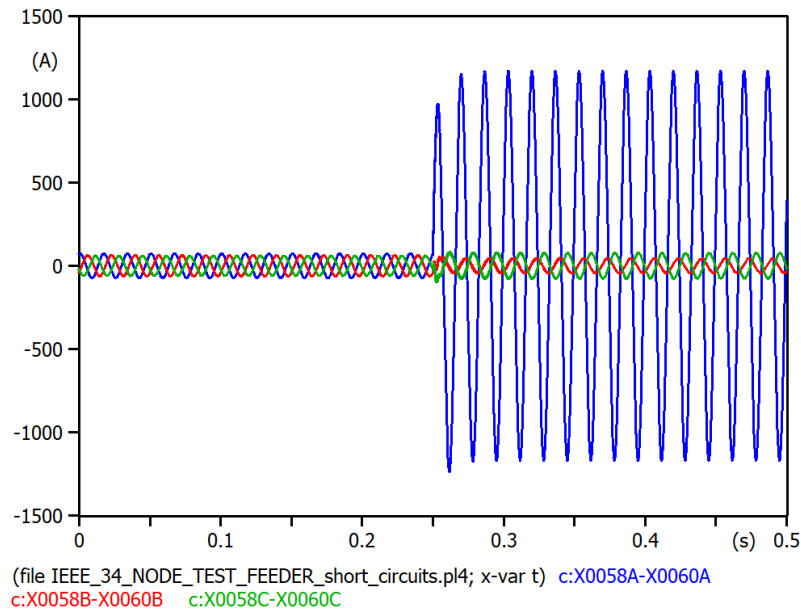
Pode-se notar, pelos sinais de corrente mostrados na Figura 73, que até o segundo 0,24 da simulação os valores das correntes nas fases A, B e C são nominais do sistema. A partir do segundo 0,25, a fase A sofre um aumento abrupto de corrente, como é de se esperar, devido ao curto-circuito monofásico aplicado ao sistema. O valor de pico da corrente da fase afetada durante o período subtransitório é mostrado abaixo.

$$I_{af} = 1168,43 \text{ A}$$

O valor do fasor de corrente em regime permanente é:

$$I_{af} = 1168,43 \angle -70,59 \text{ A}$$

Figura 73 - Sinais de corrente de falta monofásica na barra 800.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Falta bifásica

Pode-se notar, pelos sinais de corrente mostrados na Figura 74, que até o segundo 0,24 da simulação os valores das correntes nas fases A, B e C são nominais do sistema. A partir do segundo 0,25, as correntes das fases B e C sofrem um aumento abrupto em suas magnitudes, como é de se esperar, devido ao curto-circuito bifásico aplicado ao sistema. Os valores de pico das correntes das fases afetadas, durante o período subtransitório são mostrados abaixo.

$$I_{bf} = 1330,60 \text{ A}$$

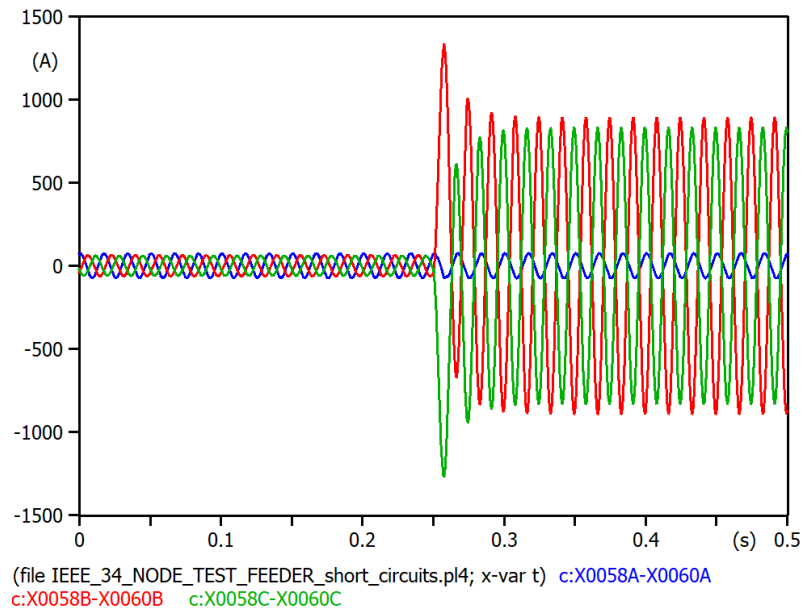
$$I_{cf} = 1265,20 \text{ A}$$

Os valores de pico dos fasores de corrente das fases afetadas pelo curto-circuito bifásico em regime permanente são:

$$I_{bf} = 888,95 \angle -168,65 \text{ A}$$

$$I_{cf} = 828,28 \text{ A} \angle -12,88 \text{ A}$$

Figura 74 - Sinais de corrente de falta bifásica na barra 800.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Falta bifásica-terra

Analogamente ao caso do curto-circuito bifásico, nota-se pela Figura 75 que partir do segundo 0,25, as correntes das fases B e C sofrem um aumento abrupto em suas magnitudes. O valor de pico das correntes das fases afetadas, durante o período subtransitório são mostrados abaixo.

$$I_{bf} = 1525,10 \text{ A}$$

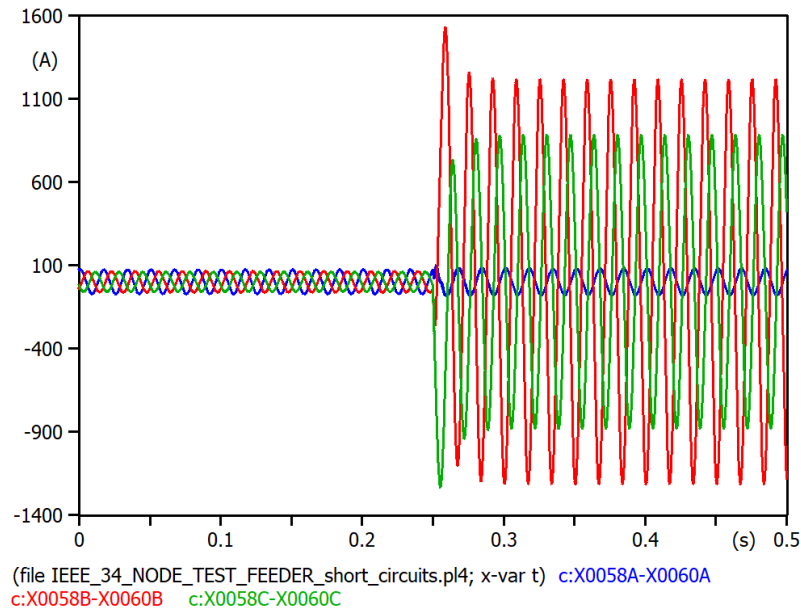
$$I_{cf} = 1232,00 \text{ A}$$

Os valores de pico dos fasores de corrente das fases afetadas pelo curto-circuito bifásico em regime permanente são:

$$I_{bf} = 1212,27 \text{ A} \angle -166,72 \text{ A}$$

$$I_{cf} = 879,26 \angle -61,03 \text{ A}$$

Figura 75 - Sinais de corrente de falta bifásica-terra na barra 800.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Falta trifásica-terra

Nota-se pela Figura 76 que partir do segundo 0,25, as correntes das três fases (A, B e C) sofrem um aumento abrupto em suas magnitudes. O valor de pico das correntes das fases afetadas durante o período subtransitório são mostrados abaixo.

$$I_{af} = 1027,30 \text{ A}$$

$$I_{bf} = 1296,90 \text{ A}$$

$$I_{cf} = 1308,10 \text{ A}$$

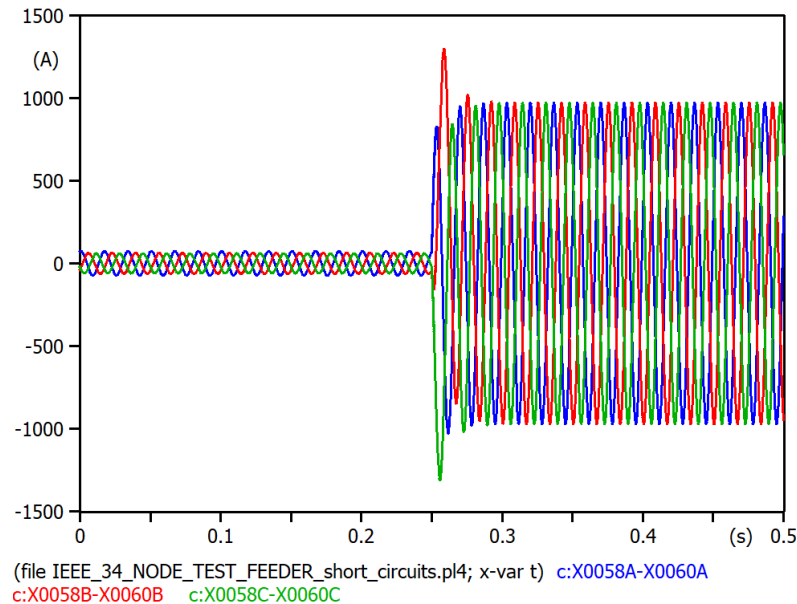
Os valores de pico dos fasores de corrente das fases afetadas pelo curto-circuito trifásico-terra em regime permanente são:

$$I_{af} = 969,26 \angle -73,05 \text{ A}$$

$$I_{bf} = 969,71 \angle 167 \text{ A}$$

$$I_{cf} = 968,99 \angle 47,01 \text{ A}$$

Figura 76 - Sinais de corrente de falta trifásica-terra na barra 800.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Análise das faltas aplicadas à barra 800

Por a barra 800 estar posicionada próxima ao gerador, o caminho até ela possui baixa impedância, o que resulta em correntes de curto-circuito altas, em relação ao nível de corrente nominal do circuito, para todos os cenários de curto-circuito. Durante o período subtransitório e no regime permanente, os maiores níveis de corrente obtidos foram no cenário de curto-circuito bifásico-terra, porém, o curto-circuito trifásico-terra continua sendo o mais severo ao sistema, uma vez que todas as fases aumentam significativamente os seus valores, o que pode exigir um sistema de proteção mais robusto para proteger os componentes do sistema dos defeitos térmicos gerados por esse nível corrente de curto-circuito.

5.7.2 Faltas aplicadas à barra 848

Devido à presença de um banco de capacitores ligado em paralelo à barra 848 e à alta impedância da carga conectada à barra 848, os valores de tensão sobre a falta não diminuiram rapidamente no momento do fechamento da chave trifásica que aplica os curtos-circuitos. A

solução parcial para essa divergência numérica foi aumentar os valores das impedâncias de falta, conforme mostrado abaixo.

$$Z_f = 15 \, \Omega$$

$$Z_g = 7,5 \, \Omega$$

Falta monofásica

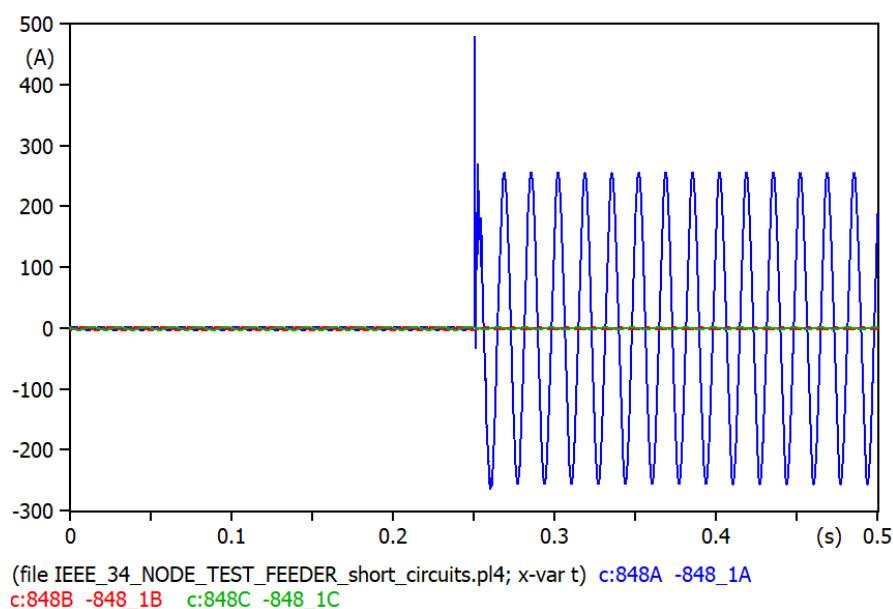
Pode-se notar, pelos sinais de corrente mostrados na Figura 77, que até o segundo 0,24 da simulação os valores das correntes nas fases A, B e C são equilibrados e pequenos, devido à carga possuir uma alta impedância. A partir do segundo 0,25, a fase A sofre um aumento abrupto de corrente, devido ao curto-circuito monofásico aplicado ao sistema. O valor de pico da corrente da fase afetada durante o período subtransitório é mostrado abaixo.

$$I_{af} = 478,48 \, \text{A}$$

O valor do fasor de corrente em regime permanente é:

$$I_{af} = 277,63 \angle -41,39^\circ \, \text{A}$$

Figura 77 - Sinais de corrente de falta monofásica na barra 848.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Falta bifásica

Pode-se notar, pelos sinais de corrente mostrados na Figura 78 que a partir do segundo 0,25, as correntes das fases B e C sofrem um aumento abrupto em suas magnitudes, como é de se esperar, devido ao curto-circuito bifásico aplicado ao sistema. O valor de pico das correntes das fases afetadas, durante o período subtransitório são mostrados abaixo.

$$I_{bf} = 223,37 \text{ A}$$

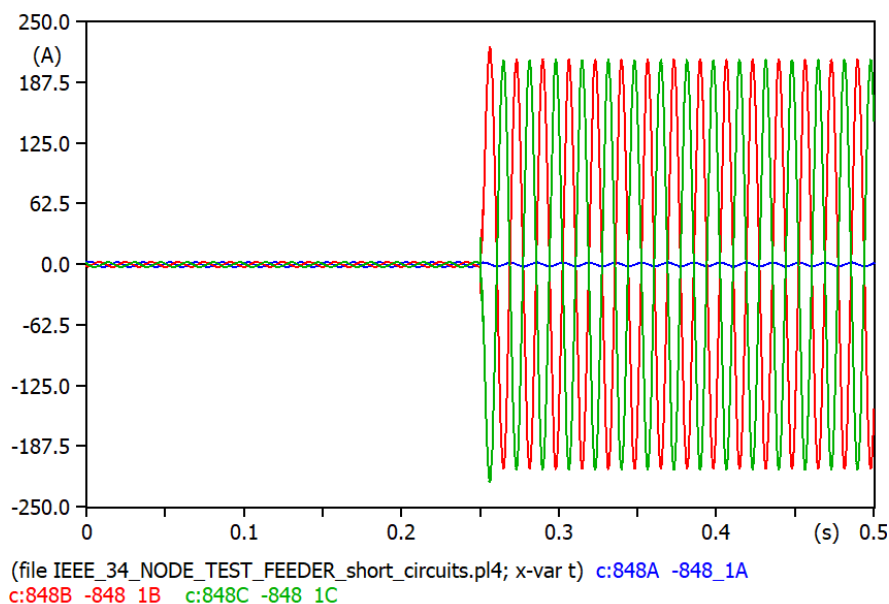
$$I_{cf} = 223,61 \text{ A}$$

Os valores de pico dos fasores de corrente das fases afetadas pelo curto-circuito bifásico em regime permanente são:

$$I_{bf} = 218,17 \angle -134,09^\circ \text{ A}$$

$$I_{cf} = 218,25 \angle 46,59^\circ \text{ A}$$

Figura 78 - Sinais de corrente de falta bifásica na barra 848.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Falta bifásica-terra

Analogamente ao caso do curto-circuito bifásico, nota-se pela Figura 79 que partir do segundo 0,25, as correntes das fases B e C sofrem um aumento abrupto em suas magnitudes. O valor de pico das correntes das fases afetadas, durante o período subtransitório são mostrados

abaixo.

$$I_{bf} = 258,63 \text{ A}$$

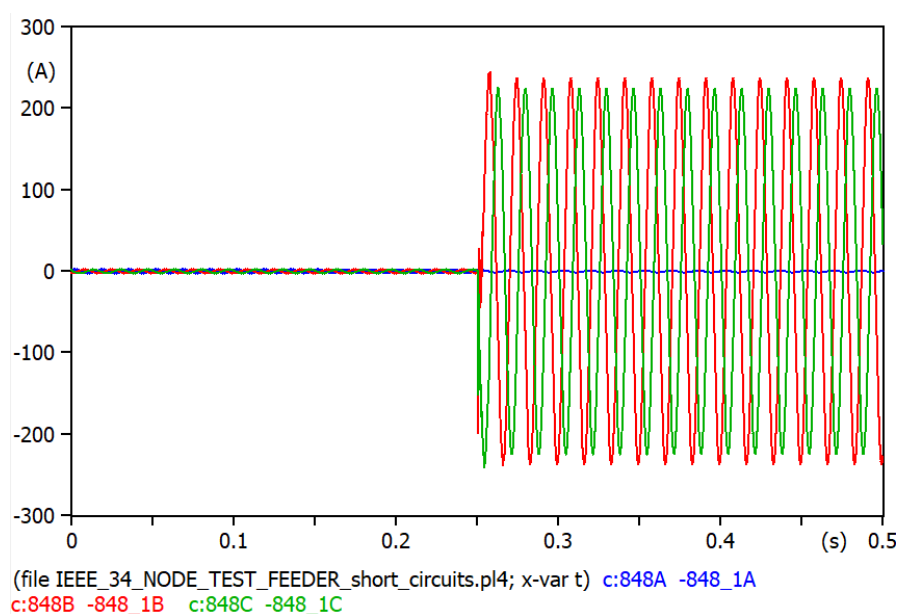
$$I_{cf} = 239,87 \text{ A}$$

Os valores de pico dos fasores de corrente das fases afetadas pelo curto-circuito bifásico-terra em regime permanente são:

$$I_{bf} = 258,77 \angle -164,72^\circ \text{ A}$$

$$I_{cf} = 239,94 \angle 85,28^\circ \text{ A}$$

Figura 79 - Sinais de corrente de falta bifásica-terra na barra 848.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Falta trifásica-terra

Nota-se pela Figura 80 que partir do segundo 0,25, as correntes das três fases (A, B e C) sofrem um aumento abrupto em suas magnitudes. O valor de pico das correntes das fases afetadas, durante o período subtransitório são mostrados abaixo.

$$I_{af} = 497,05 \text{ A}$$

$$I_{bf} = 274,98 \text{ A}$$

$$I_{cf} = 232,91 \text{ A}$$

Os valores de pico dos fasores de corrente das fases afetadas pelo curto-circuito trifásico-

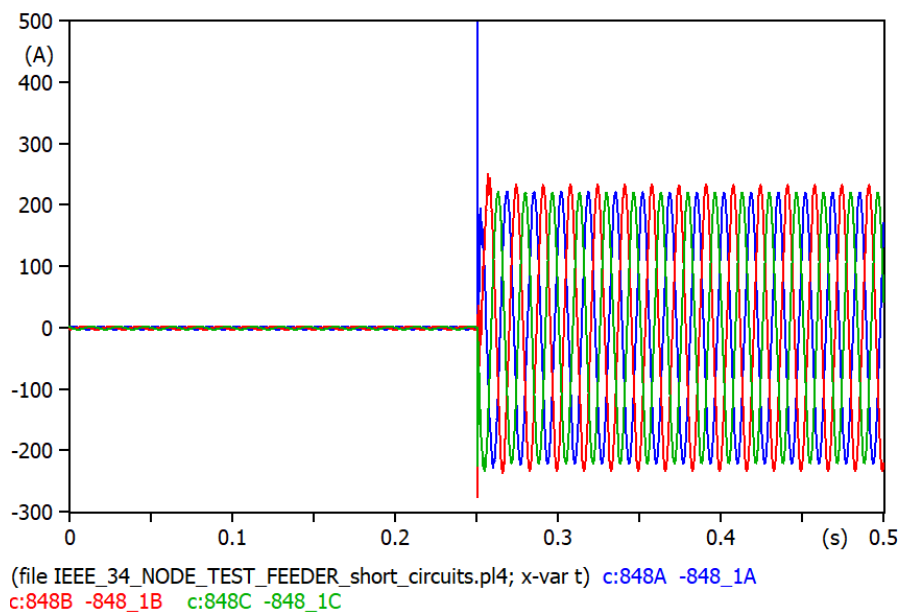
terra em regime permanente são:

$$I_{af} = 232,30 \angle -38,68^\circ \text{ A}$$

$$I_{bf} = 244,41 \angle -160,73^\circ \text{ A}$$

$$I_{cf} = 231,20 \angle 79,65^\circ \text{ A}$$

Figura 80 - Sinais de corrente de falta trifásica-terra na barra 848.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Análise das faltas aplicadas à barra 848

Como a barra 848 está conectada a uma carga de alta impedância indutiva-resistiva e um banco de capacitores, as correntes de curto-circuito apresentaram um comportamento distinto, exibindo picos exagerados durante o período subtransiente dos casos de falta monofásica e trifásica-terra. E, aproximando o gráfico, se pode notar que existem componentes harmônicas nos sinais de corrente, associada à ressonância do acoplamento da carga com impedância indutiva-resistiva e o banco de capacitores. Isso evidencia a importância de considerar os efeitos capacitivos e distorções harmônicas ao se fazer um estudo de análise de faltas em barras com elementos compensadores. A presença desses elementos pode causar a necessidade de filtros adicionais aos elementos de proteção.

Em regime permanente, a maior corrente de falta obtida foi para o caso bifásico-terra .

5.7.3 Falhas aplicadas à barra 890

Para as faltas aplicadas à barra 890 os valores das impedâncias de falta foram:

$$Z_f = 4\Omega$$

$$Z_g = 2\Omega$$

Falta monofásica

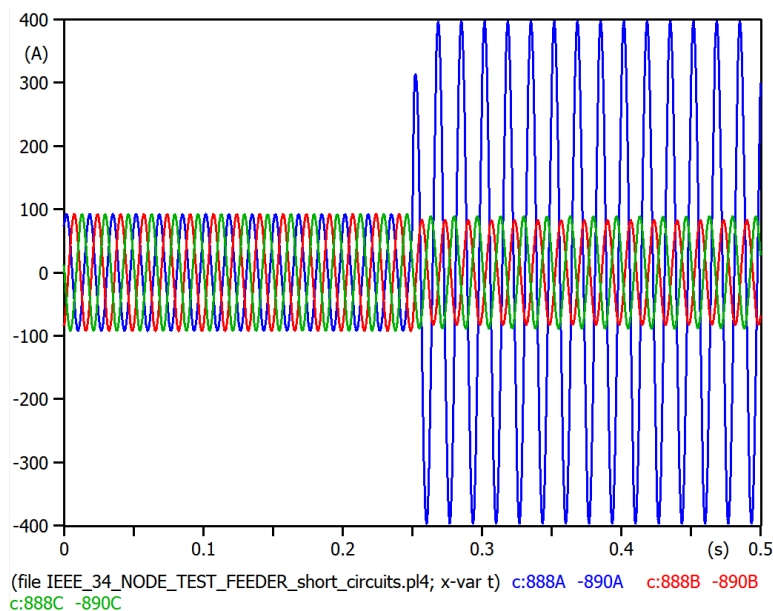
Pode-se notar, pela oscilografia de corrente mostrada na Figura 81, que até o segundo 0,24 da simulação os valores das correntes nas fases A, B e C são as nominais da carga alimentada pela barra 890. A partir do segundo 0,25, a fase A sofre um aumento abrupto de corrente, devido ao curto-circuito monofásico aplicado ao sistema. O valor de pico da corrente da fase afetada durante o período subtransitório é mostrado abaixo.

$$I_{af} = 396,48 \text{ A}$$

O valor do fasor de corrente em regime permanente é:

$$I_{af} = 397,17 \angle -39,91 \text{ A}$$

Figura 81 - Sinais de corrente de falta monofásica na barra 890.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Falta bifásica

Pode-se notar, pelos sinais de corrente mostrados na Figura 82 que a partir do segundo 0,25, as correntes das fases B e C sofrem um aumento abrupto em suas magnitudes, devido ao curto-circuito bifásico aplicado ao sistema. Os valores de pico das correntes das fases afetadas, durante o período subtransitório são mostrados abaixo.

$$I_{bf} = 429,52 \text{ A}$$

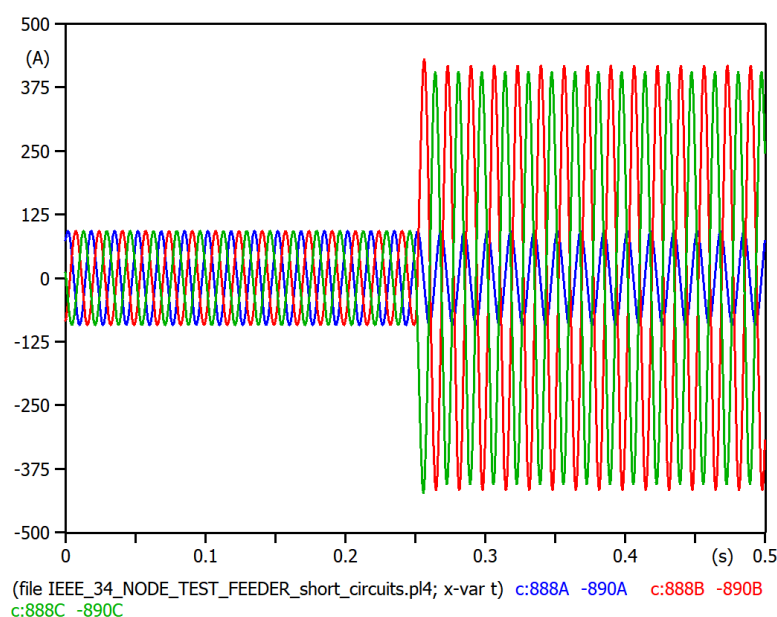
$$I_{cf} = 421,84 \text{ A}$$

Os valores de pico dos fasores de corrente das fases afetadas pelo curto-circuito bifásico em regime permanente são:

$$I_{bf} = 416,66 \angle -138,90 \text{ A}$$

$$I_{cf} = 404,98 \angle 53,72 \text{ A}$$

Figura 82 - Sinais de corrente de falta bifásica na barra 890.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Falta bifásica-terra

Analogamente ao caso do curto-circuito bifásico, nota-se pela Figura 83 que partir do segundo 0,25, as correntes das fases B e C sofrem um aumento abrupto em suas magnitudes. O valor de pico das correntes das fases afetadas, durante o período subtransitório são mostrados abaixo.

$$I_{bf} = 384,44 \text{ A}$$

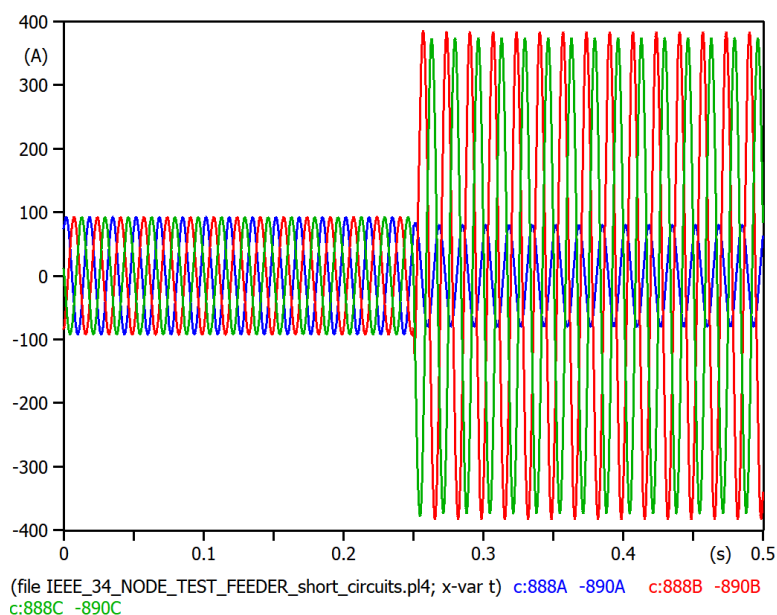
$$I_{cf} = 377,29 \text{ A}$$

Os valores de pico dos fasores de corrente das fases afetadas pelo curto-circuito bifásico-terra em regime permanente são:

$$I_{bf} = 383,25 \angle -151,80 \text{ A}$$

$$I_{cf} = 373,88 \angle 78,16 \text{ A}$$

Figura 83 - Sinais de corrente de falta bifásica-terra na barra 890.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Falta trifásica-terra

Nota-se pela Figura 84 que partir do segundo 0,25, as correntes das três fases (A, B e C) sofrem um aumento abrupto em suas magnitudes. O valor de pico das correntes das fases afetadas, durante o período subtransitório são mostrados abaixo.

$$I_{af} = 399,16 \text{ A}$$

$$I_{bf} = 409,01 \text{ A}$$

$$I_{cf} = 401,91 \text{ A}$$

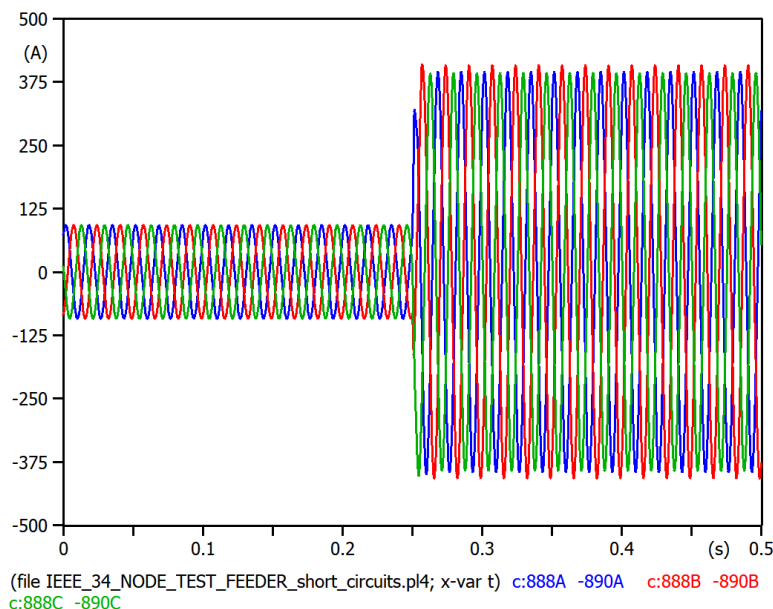
Os valores de pico dos fasores de corrente das fases afetadas pelo curto-circuito trifásico-terra em regime permanente são:

$$I_{af} = 394,74 \angle -35,12 \text{ A}$$

$$I_{bf} = 407,67 \angle -156,89 \text{ A}$$

$$I_{cf} = 392,36 \angle 83,35 \text{ A}$$

Figura 84 - Sinais de corrente de falta trifásica-terra na barra 890.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

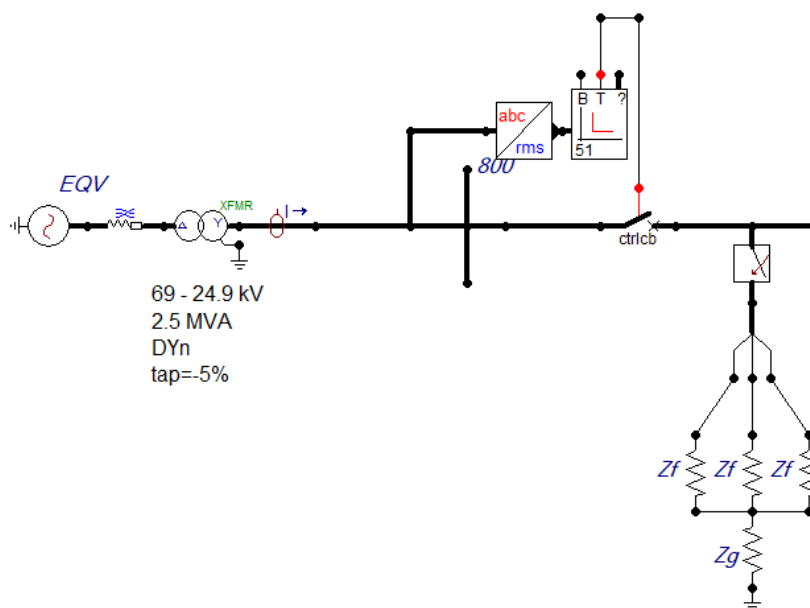
Análise das faltas aplicadas à barra 890

A barra 890 está conectada a uma carga de alta potência e baixa impedância, isso faz com que, inevitavelmente, hajam correntes de curto-circuitos altas no caminho que for aplicada a falta e, para esta barra especialmente nas faltas monofásicas e bifásicas. A proximidade da falta à carga de baixa impedância, que já recebia uma corrente alta, agravou o quadro do trecho. Segmentos da rede que possuem essa configuração merecem uma atenção especial quanto à atuação rápida e precisa do sistema de proteção.

5.8 APLICAÇÃO DE RELÉ DE SOBRECORRENTE INSTANTÂNEO (50) PARA A PROTEÇÃO DO TRANSFORMADOR CONECTADO À BARRA 800

A fim de proteger o transformador conectado à barra 800 da falta trifásica apontada na seção 5.7.1, foi modelado um relé de sobrecorrente instantâneo para enviar um sinal de trip para um disjuntor trifásico conectado à barra 800. A Figura 85 mostra um trecho da rede de 34 barras, evidenciando equivalente de Thévenin conectado ao transformador trifásico, o disjuntor trifásico e a falta trifásica-terra.

Figura 85 – Proteção de sobrecorrente à barra 800.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A simulação do curto-circuito trifásico-terra se dará da mesma forma mostrada na seção 5.7.1, porém, a partir do segundo 0,28 s, devido ao atraso inerente à operação do relé, o relé irá enviar um sinal de *trip* para o disjuntor e as correntes das fases devem ser zeradas, por ação do disjuntor.

Para setar a corrente de ajuste, utilizando a teoria apresentada na seção 2.4.1, utiliza-se a equação (2.18) para determinar a corrente de ajuste. Sabe-se que a amplitude da corrente de curto-circuito mínima trifásica no regime transitório na barra 800, pelas simulações e resultados apresentados, é 1027,30 A. Esse valor é de pico, o valor, portanto, em RMS, da corrente de ajuste da unidade instantânea será 726,41 A.

O tempo de atraso de acionamento é 0 s, para o relé de sobrecorrente instantânea.

O tempo de atraso para a atuação do disjuntor também será 0 s.

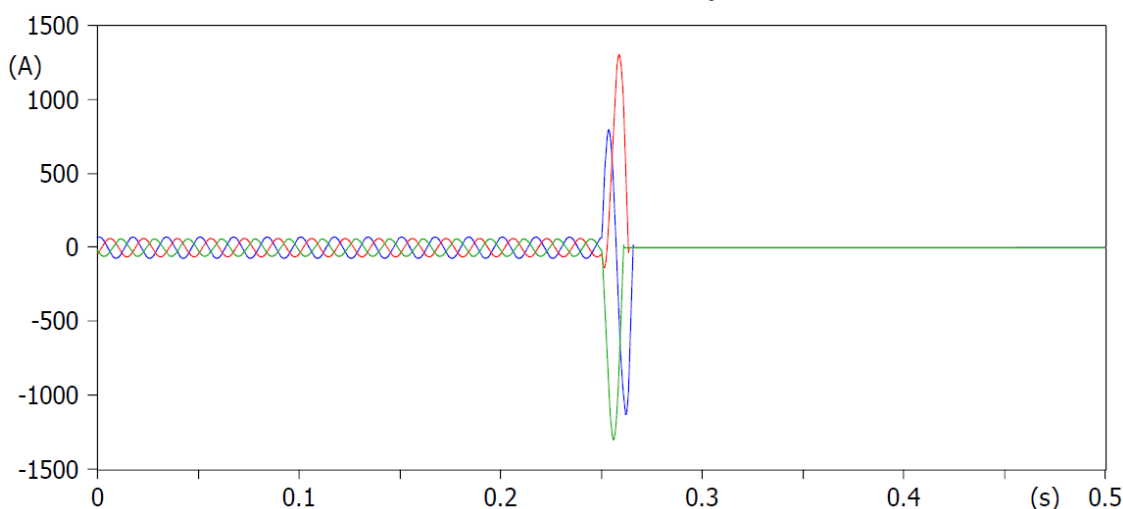
5.8.1 Falta trifásica-terra aplicada à barra 800 protegida

Com o relé de sobrecorrente instantâneo e o disjuntor trifásico ajustados, foi simulada a mesma falta trifásica-terra apresentada na seção 5.7.1 para averiguar se o relé de proteção contra sobrecorrente atuaria com os ajustes feitos.

A Figura 86 mostra os sinais de corrente das fases A, B e C medidos na barra 800, em

que é possível ver que até o segundo 0,25, as correntes fluem em seus valores nominais e, quando o curto-circuito acontece, as correntes de todas as fases se elevam para seus valores subtransitórios, ultrapassando o valor de corrente de ajuste do relé de sobrecorrente, que, conseqüentemente é sensibilizado e envia um sinal de *trip* para o disjuntor que, por sua vez, atue, abrindo os seus contatos e isolando, desta forma, a barra 800 e seus dispositivos da falha.

Figura 86 - Sinais de corrente de falta trifásica-terra na barra 800 com ação do relé de sobrecorrente instantâneo.



(file IEEE_34_NODE_TEST_FEEDER_short_circuits.pl4; x-var t) c:X0106A-X0107A c:X0106B-X0107B
c:X0106C-X0107C

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

5.9 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A partir das simulações de faltas realizadas neste capítulo, foi possível notar que, mesmo para um sistema relativamente simples, como o 4-barras, a corrente de falta do sistema pode variar significativamente, a depender de fatores, como: localização da falta no sistema e o tipo de falta. Esse fenômeno também foi retratado no sistema 34-barras, em que, quanto mais longe o ponto da falta fosse do gerador, menor a corrente gerada por essa falta seria, mas, os valores das correntes de falta, mesmo para pontos mais distantes da fonte, variam, conforme o tipo de falta que o sistema está sendo acometido. Isso se dá devido a impedância equivalente do sistema do ponto de vista da falta.

Pelos cenários de falta simulados no sistema 4-barras, notou-se pela evolução das correntes de falta que o cenário que gerou a maior magnitude foi o cenário de falta bifásica. Já

para o sistema 34-barras, a maior magnitude foi obtida no cenário de falta bifásica-terra.

Portanto, conclui-se que nem sempre o cenário de falta trifásica-terra irá gerar as maiores correntes, apesar de ser o que causa maior prejuízo para o sistema por atuar em todas as fases do sistema.

A ocorrência de faltas causará uma piora na QEE, porque, para que a eliminação da falta aconteça, parte do sistema ou o sistema inteiro deixará de ser alimentado, afetando, desta forma a continuidade do sistema. Mas é importante que a falta seja eliminada antes do reestabelecimento da continuidade de fornecimento de energia elétrica, pois, os efeitos térmicos e dinâmicos gerados pelas correntes de falta podem ser severos, se o sistema e seus componentes forem submetidos a essas condições por tempo suficiente. Por esses motivos, é essencial que o sistema de proteção possua coordenação e seletividade, desta forma, a falta será extinguida no menor tempo possível, a fim de não comprometer o sistema, seus componentes, tampouco a QEE.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo principal analisar e realizar observações, por meio da modelagem e simulação de faltas em sistemas elétrico de potência, a ocorrência, evolução e consequência das faltas, com destaque para faltas do tipo *shunt*. Foi feita a modelagem do sistema alimentador teste de 4 barras do IEEE no *ATPDraw*, com o objetivo de validar o sistema. Após isso, com o objetivo de validar o *ATPDraw* como ferramenta confiável para aplicação e análise de curto-circuito, foi feita a modelagem teórica para os cenários de falta estudados neste trabalho, aplicando o método das componentes simétricas para calcular manualmente as correntes teóricas de curto-circuito para cada cenário. Os mesmos cenários de falta foram modelados e simulados no *ATPDraw* e, os resultados obtidos foram satisfatórios, com erro menor que 2% para todos os cenários de falta, confirmando, desta forma, a robustez e precisão do programa.

Foi realizada com êxito, também, a modelagem e validação de um SEP maior e mais complexo, que é o sistema alimentador teste de 34 barras do IEEE. A diferença entre os valores teóricos, originais do artigo, e simulados ficaram abaixo dos 1% para a maioria das tensões de barra. Após isso, foram simulados diversos cenários de falta com o intuito de entender a evolução das faltas em cada barra escolhida. Esse sistema já foi previamente modelado no *ATPDraw* por outros pesquisadores e disponibilizado com o arquivo “.acp” no fórum do *ATPDraw*, porém, alguns pequenos erros de cargas foram verificados durante a modelagem e comparação com o sistema disponível no fórum, portanto, é verificada uma contribuição na modelagem do 34-barras.

Por meio das simulações de faltas aplicadas aos sistemas alimentadores teste de 4 e de 34 barras do IEEE, foi confirmado que a severidade das correntes de falta pode variar de acordo com a topologia do sistema, do tipo de falta e da impedância de falta.

Foi feito também o ajuste de um relé de sobrecorrente instantâneo (50) em conjunto com um disjuntor trifásico (52) a fim de proteger os elementos conectados a montante da barra 800 contra faltas na barra 800. A simulação mostrou-se satisfatória e correspondeu à expectativa que era o cessamento das correntes faltosas assim que o relé fosse sensibilizado pela corrente de ajuste.

Apesar dos sistemas estudados nesse trabalho serem reconhecidos mundialmente e amplamente utilizado para fins de estudos voltados para as áreas de fluxo de potência e análise,

informações específicas e claras sobre a modelagem dos sistemas, sobretudo o sistema de 34 barras são escassas.

Este trabalho contribui positivamente para a comunidade científica da Engenharia Elétrica, pois oferece um guia de modelagem robusto e preciso, podendo ser utilizado por cientistas, estudantes e profissionais de Engenharia Elétrica. Além disso, apresenta estudos comparativos para validar os casos bases e a aplicação de alguns cenários de falta para comparação com o que se esperava teoricamente. Foi comprovado que o *ATPDraw* é uma ferramenta confiável e pode auxiliar tanto estudantes quanto engenheiros na modelagem, simulação e entendimento de sistemas em diversas áreas do estudo do sistema elétrico de potência.

Como trabalho futuro, se sugere a extensão das faltas aplicadas a outros pontos que não foram explorados neste trabalho, além da coordenação de relés de sobrecorrente temporizados (51) para definir as zonas de proteção do sistema. Pode-se, ainda, explorar outras funções de proteção para auxiliar na precisão do sistema de proteção, como: distância (21) e direcional (67).

REFERÊNCIAS

- ANDERSON, Paul M. **Analysis of faulted power systems**. New York: IEEE Press, 1973.
- BRASIL. Lei nº 10.848, de 15 de março de 2004. Dispõe sobre a comercialização de energia elétrica. **Diário Oficial da União**: Brasília, DF, 15 mar. 2004.
- INDÚSTRIA 4.0: o que é, como surgiu e quais seus impactos? Recife: CESAR, 2023. Disponível em: <https://www.cesar.org.br/w/industria-4-0>. Acesso em: 29 jul. 2025.
- HIRT, Wilson Eduardo Dreissig. **Análise de curto-circuito e fundamentos de tensão em sistemas elétricos de potência**: um estudo aplicado à expansão da geração no Rio Grande do Sul. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/127658/000971132.pdf>. Acesso em: 29 jul. 2025.
- ELETRICIDADE TÉCNICA. **Tabela ANSI**. [S.l.]. Disponível em: <https://www.etltda.com.br/inf-tecnicas/tabela-ansi/5>. Acesso em: 26 jul. 2025.
- FORTESCUE, C. L. Method of symmetrical co-ordinates applied to the solution of polyphase networks. *In*: ANNUAL CONVENTION OF THE AMERICAN INSTITUTE OF ELECTRICAL ENGINEERS, 34. 1918, Atlantic City. **Anais [...]**. Disponível em: https://ia800607.us.archive.org/view_archive.php?archive=/8/items/crossref-pre-1923-scholarly-works/10.1109%252fpaiee.1917.6591996.zip&file=10.1109%252fpaiee.1918.6594104.pdf. Acesso em: 01 jul. 2025.
- FRAZÃO, Rodrigo José Albuquerque. **Proteção do sistema elétrico de potência**. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2019.
- GLOVER, J. Duncan; SARMA, Mulukutla S.; OVERBYE, Thomas J. **Power system analysis and design**. 5. ed. SI. Stamford: Cengage Learning, 2011.
- GONEN, Turan. **Modern power system analysis**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2013.
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (IEEE). IEEE 34-Node Test Feeder. **Distribution System Analysis Subcommittee**, 1992. Disponível em: <https://cmte.ieee.org/pes-testfeeders/resources/>. Acesso em: 21 jul. 2025.
Sem autoria, sem local
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (IEEE). IEEE 4-Node Test Feeder. **Distribution System Analysis Subcommittee**, 1991. Disponível em: <https://site.ieee.org/pes-testfeeders/resources/>. Acesso em: 9 jun. 2025. Sem autoria, sem local
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems**.

IEEE Std 242™-2001 (Buff Book). New York: IEEE, 2001.

ANDERSON, Paul M. **Analysis of faulted power systems**. New York: IEEE Press, 1973.

KERSTING, William H.; KERESTES, Robert J. **Distribution system modeling and analysis with MATLAB® and WindMil®**. 5. ed. Boca Raton: CRC Press, 2022.

KINDERMANN, Geraldo. **Curto-circuito**. 2. ed. Porto Alegre: Sagra Luzzatto, 1997.

MAMEDE FILHO, João. **Proteção de sistemas elétricos de potência**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2024.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Evolução da Capacidade instalada no SIN - Julho 2025/ Dezembro 2029**. [S. l.]: ONS, 2025. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>. Acesso em: 29 jul. 2025.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Previsões de carga global para o Planejamento Anual da Operação Energética PLAN 2025-2029**. [S. l.]: ONS, 2024. Disponível em: https://www.ccee.org.br/documents/80415/28965506/Apresentacao_PLAN%202025-2029_final.pdf/48497214-e0d4-0448-70ee-583efe6637fe. Acesso em: 29 jul. 2025.

PEREIRA NETO, João. **Proteção de redes de distribuição utilizando os elementos de sobrecorrente de sequência negativa**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Espírito Santo, 2023. Disponível em: https://ele.ufes.br/sites/engenhariaeletrica.ufes.br/files/field/anexo/pg_ii_-_joao_pereira_netto_-_final_-_2023.pdf.pdf. Acesso em: 29 jul. 2025.

RODRIGUES, Israel Resende Alves. **Estudo de proteção elétrica de uma microrrede baseada na rede de 34 barras do IEEE**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/server/api/core/bitstreams/9cc88d14-bab3-40d7-be51-2a2b07d1465b/content>. Acesso em: 29 jul. 2025.

SANTOS, Vanessa Malaco dos. **Estudo de caso de curto-circuito em um sistema elétrico industrial**. 2009. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009. Disponível em: https://bdta.abcd.usp.br/directbitstream/8ca52479-e4af-4212-aa81-bd63829525e3/Santos_Vanessa_Malaco_dos.... Acesso em: 29 jul. 2025.

SARIMUTHU, Charles R.; RAMACHANDARAMURTHY, Vigna K.; AGILESWARI, K. R.; MOKHLIS, Hazlie. A review on voltage control methods using on-load tap changer transformers for networks with renewable energy sources. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 62, p. 1154–1161, set. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116301265>. Acesso em: 25 jul. 2025.

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

APÊNDICE A – Cálculo de corrente de falta monofásica no *Octave*

```

clear all
close all
clc
format short
alfa = -0.5 + 0.8660254038i; %%% 1/_ 120°
Sb=6e6; % base de 6 MVA
VLL= 12.47e3; %TENSÃO LINHA-LINHA (DADA PELA REFERÊNCIA - RMS)
%DADOS
Zb2 = VLL^2/(Sb); % Impedancia de base em ohm
Zf= 4; % Impedancia de falta em ohm
Vf=1.00; % A tensão de fase "a" no ponto da falta antes da falta
Zf_pu = Zf/Zb2;
%Z1 Thevenin em pu
Z1Th = 4.52e-03 + 8.66e-03i;
%Z2 Thevenin em pu
Z2Th=Z1Th;
%Z0 Thevenin em pu
Z0Th = 0.01 + 0.02i;
%% Condições de contorno
Ibf_A = 0;
Icf_A = 0 ;
%Ia1 = Ia2 = Ia0;
%Iaf = 3Ia1;
#correntes de sequência em pu
Ia1_pu = Vf/(Z1Th + Z2Th + Z0Th + 3*Zf_pu);
Iaf_pu=3*Ia1_pu;
#corrente de fase
IB_A = Sb/(sqrt(3)*VLL)*sqrt(2);
Iaf_A = IB_A*Iaf_pu;
%tensão de sequencia em pu
Va0_pu = -Z0Th*Ia1_pu;
Va1_pu = Vf-Z1Th*Ia1_pu;
Va2_pu = -Z2Th*Ia1_pu;
%tensão de fase
Va_pu = Va1_pu + Va2_pu + Va0_pu;
Va = Va_pu*VLL;
Vb_pu = Va1_pu*alfa^2 + Va2_pu*alfa;
Vb = Vb_pu*VLL;
Vc_pu = Va1_pu*alfa + Va2_pu*alfa^2;
Vc = Vc_pu*VLL;
disp("Z0Th Z1Th Z2Th")
disp("*****")
[Z0Th Z1Th Z2Th]
disp(" ")
disp(" ")
disp(" ")
disp("Iaf_pu IB_A Iaf_A Ibf_A Icf_A")

```

```

disp("*****")
[Iaf_pu IB_A Iaf_A Ibf_A Icf_A]
disp("_____")
disp(" ")
disp(" ")
disp(" ")
disp(" ")
disp("Va_pu Va Vb_pu Vb Vc_pu Vc")
disp("*****")
[Va_pu Va Vb_pu Vb Vc_pu Vc]

```

APÊNDICE B – Cálculo de corrente de falta bifásica no *Octave*

```

clear all;
close all;
clc;
format short
alfa = -0.5 + 0.8660254038i;
Sb=6e6; % base de 6 MVA
VLL= 12.47e3; %TENSÃO LINHA-LINHA (DADA PELA REFERÊNCIA - RMS)
Zb2 = VLL^2/(Sb); % Impedancia de base em ohm
Zf= 4; % Impedancia de falta em ohm
Vf=1; %A tensão de fase "a" no ponto da falta antes da falta
Zf_pu = Zf/Zb2;

%Z1 Thevenin em pu
Z1Th = 4.52e-03 + 8.66e-03i;

%Z2 Thevenin em pu
Z2Th=Z1Th;

%Z0 Thevenin em pu
Z0Th = 0.01 + 0.02i;

%% Condições de contorno
Iaf_A = 0;
%Ibf_A = -Icf_A;
%Ia0 = 0;
%Ia1 = -Ia2;
%correntes de sequencia e de falta
Ia1_pu=Vf/(Z1Th+Z2Th+Zf_pu);
Ia2_pu= -Ia1_pu;
Iaf_pu = 0;
Iaf_A = 0;
Ibf_pu = sqrt(3)*Ia1_pu*(-i);
IB_A = (Sb*sqrt(2))/(sqrt(3)*VLL);
Ibf_A = Ibf_pu*IB_A;
Icf_pu = -Ibf_pu;

```

```

Icf_A = -Ibf_A;
%tensão de sequencia
Va1_pu = Vf-Ia1_pu*Zf_pu;
Va2_pu = -Z2Th*Ia2_pu;

%tensão de fase

Va_pu = Va1_pu + Va2_pu;
Va = Va_pu*VLL;
Vb_pu = Va1_pu*alfa^2 + Va2_pu*alfa;
Vb = Vb_pu*VLL;
Vc_pu = Va1_pu*alfa + Va2_pu*alfa^2;
Vc = Vc_pu*VLL;

disp("Z0th Z1th Z2th")
disp("*****")
[Z0Th Z1Th Z2Th]
disp(" ")
disp(" ")
disp(" ")
disp("IB_A Iaf_pu Iaf_A Ibf_pu Ibf_A Icf_pu Icf_A")
disp("*****")
[IB_A Iaf_pu Iaf_A Ibf_pu Ibf_A Icf_pu Icf_A]
disp("_____")
disp(" ")
disp(" ")
disp(" ")
disp("Va_pu Va Vb_pu Vb Vc_pu Vc")
disp("*****")
[Va_pu Va Vb_pu Vb Vc_pu Vc]

```

APÊNDICE C – Cálculo de corrente de falta bifásica-terra no *Octave*

```

clear all;
close all;
clc;
format short

alfa = -0.5 + 0.8660254038i;
Sb=6e6; % base de 6 MVA
VLL= 12.47e3; %TENSÃO LINHA-LINHA (DADA PELA REFERÊNCIA - RMS)

%Dados

Zb2 = VLL^2/(Sb); % Impedancia de base em ohm
Zf = 4; % Impedancia de falta em ohm
Vf = 1; % A tensão de fase "a" no ponto da falta antes da falta
Zf_pu = Zf/Zb2;

```

```

Zg = 2;% Impedancia de aterramento em ohm
Zf_pu = Zf/Zb2;
Zg_pu = Zg/Zb2;

%Z1 Thevenin em pu
Z1th = 4.52e-03 + 8.66e-03i;

%Z2 Thevenin em pu
Z2th = Z1th;

%Z0 Thevenin em pu
Z0th = 0.01 + 0.02i;

%% Condições de contorno

Iaf_pu = 0;
Iaf = 0;
%Vbf = (Zf+Zg)Ibf + Zg*Icf;
%Vcf = (Zf+Zg)Icf + Zg*Ibf;

%CORRENTES DE FALTA

Ia1_pu = Vf/((Z1th+Zf_pu+((Z2th+Zf_pu)*(Z0th+Zf_pu+3*Zg_pu))/((Z2th+Zf_pu)+(Z0th+Zf_pu+3*Zg_pu))));

Ia2_pu = -((Z0th+Zf_pu+3*Zg_pu)/((Z2th+Zf_pu)+(Z0th+Zf_pu+3*Zg_pu)))*Ia1_pu;

Ia0_pu = -(Ia1_pu+Ia2_pu);

%Ia = Ia0 + Ia1 + Ia2;
%Ib = Ia0 + (alfa^2)*Ia1 + alfa*Ia2;
%Ic = Ia0 + alfa*Ia1 + (alfa^2)*Ia2;

Ibf_pu = Ia0_pu + (alfa^2)*Ia1_pu + alfa*Ia2_pu;
Ibf_pu_mag = abs(Ibf_pu)
Ibf_pu_ang = rad2deg(angle(Ibf_pu))

IB_A = (Sb*sqrt(2))/(sqrt(3)*VLL);%corrente de base do primário

Ibf_A = Ibf_pu*IB_A;
Ibf_A_mag = abs(Ibf_A)
Ibf_A_ang = rad2deg(angle(Ibf_A))

Icf_pu = Ia0_pu + alfa*Ia1_pu + (alfa^2)*Ia2_pu;;
Icf_pu_mag = abs(Icf_pu)
Icf_pu_ang = rad2deg(angle(Icf_pu))

```

```

Icf_A = Icf_pu*IB_A;
Icf_A_mag = abs(Icf_A)
Icf_A_ang = rad2deg(angle(Icf_A))

%tensão de sequencia
Va1_pu = Vf-Ia1_pu*Zf_pu;
Va2_pu = -Z2th*Ia2_pu;
Va0_pu = -Z0th*Ia0_pu;

%tensão de fase

Va_pu = Va0_pu + Va1_pu + Va2_pu;
Va = Va_pu*VLL;

Vb_pu = Va0_pu + Va1_pu*alfa^2 + Va2_pu*alfa;
Vb = Vb_pu*VLL;

Vc_pu = Va0_pu + Va1_pu*alfa + Va2_pu*alfa^2;
Vc = Vc_pu*VLL;

disp("Z0th Z1th Z2th")
disp("*****")
[Z0th Z1th Z2th]
disp(" ")
disp(" ")
disp(" ")
disp("IB_A Iaf_pu Iaf Ibf_pu Ibf_A Icf_pu Icf_A")
disp("*****")
[IB_A Iaf_pu Iaf Ibf_pu Ibf_A Icf_pu Icf_A]
disp("_____")
disp(" ")
disp(" ")
disp(" ")
disp("Va_pu Va Vb_pu Vb Vc_pu Vc")
disp("*****")
[Va_pu Va Vb_pu Vb Vc_pu Vc]

```

APÊNDICE D – Cálculo de corrente de falta trifásica-terra no *Octave*

```

clear all;
close all;
clc;
format short

alfa = -0.5 + 0.8660254038i;

```

```

%Dados do sistema

Sb = 6e6; % base de 6 MVA
VLL= 12.47e3; %TENSÃO LINHA-LINHA (DADA PELA REFERÊNCIA - RMS)

%Data
Zb2 = VLL^2/(Sb); % Impedancia de base em ohm
Zf = 4; % Impedancia de falta em ohm
Zg = 2;% Impedancia de aterramento em ohm
Vf=1; %A tensão de fase "a" no ponto da falta antes da falta pu
Zf_pu = Zf/Zb2;
Zg_pu = Zg/Zb2;

%Z1 Thevenin em pu
Z1th = 4.52e-03 + 8.66e-03i;

%Z2 Thevenin em pu
Z2th = Z1th;

%Z0 Thevenin em pu
Z0th = 0.01 + 0.02i;

%% Condições de contorno

%Ia0 = 0;
%Ia2 = 0;

%CORRENTES DE FALTA

Ia1_pu = Vf/(Z1th+Zf_pu);

Ia2_pu = 0;

Ia0_pu = 0;

%Ia = Ia0 + Ia1 + Ia2;
%Ib = Ia0 + (alfa^2)*Ia1 + alfa*Ia2;
%Ic = Ia0 + alfa*Ia1 + (alfa^2)*Ia2;

Iaf_pu = Ia1_pu;
Iaf_pu_mag = abs(Iaf_pu)
Iaf_pu_ang = rad2deg(angle(Iaf_pu))

Ibf_pu = (alfa^2)*Ia1_pu;
Ibf_pu_mag = abs(Ibf_pu)
Ibf_pu_ang = rad2deg(angle(Ibf_pu))

```

```

Icf_pu = alfa*Ia1_pu;
Icf_pu_mag = abs(Icf_pu)
Icf_pu_ang = rad2deg(angle(Icf_pu))

IB_A = (Sb*sqrt(2))/((sqrt(3)*VLL));%corrente de base do primário

Iaf_A = Iaf_pu*IB_A;
Iaf_A_mag = abs(Iaf_A)
Iaf_A_ang = rad2deg(angle(Iaf_A))

Ibf_A =Ibf_pu*IB_A;
Ibf_A_mag = abs(Ibf_A)
Ibf_A_ang = rad2deg(angle(Ibf_A))

Icf_A = Icf_pu*IB_A;
Icf_A_mag = abs(Icf_A)
Icf_A_ang = rad2deg(angle(Icf_A))

%tensão de sequencia
Va1_pu = Ia1_pu*Zf_pu;
Va2_pu = 0;
Va0_pu = 0;

%tensão de fase

Va_pu = Va1_pu;
Va = Va_pu*VLL;

Vb_pu = Va1_pu*alfa^2;
Vb = Vb_pu*VLL;

Vc_pu = Va1_pu*alfa;
Vc = Vc_pu*VLL;

disp("Z0th Z1th Z2th")
disp("*****")
[Z0th Z1th Z2th]
disp(" ")
disp(" ")
disp(" ")
disp("Iaf_pu Ibf_pu Icf_pu IB_A Iaf_A Ibf_A Icf_A")
disp("*****")
[Iaf_pu Ibf_pu Icf_pu IB_A Iaf_A Ibf_A Icf_A]
disp("_____")
disp(" ")
disp(" ")
disp(" ")

```

```

disp("Va_pu Va Vb_pu Vb Vc_pu Vc")
disp("*****")
[Va_pu Va Vb_pu Vb Vc_pu Vc]

```

APÊNDICE E – Leitura do valor máximo de corrente dos sinais gerados pelo ATP

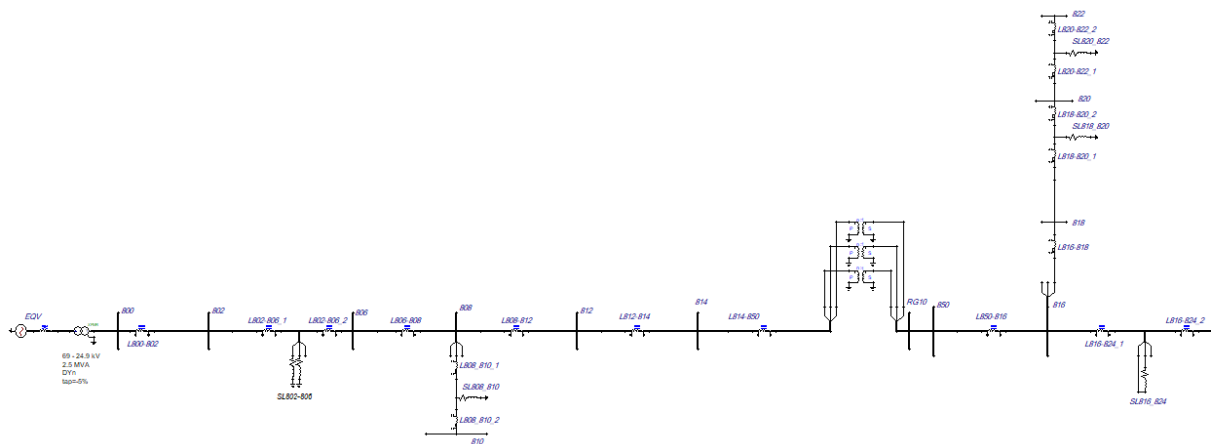
```

clear all
close all
clc
format short
%% Importando sinais de corrente do ATP

load 'corrente_de_CC_monofasico.mat'
Icc_m_a = iAaXx0001;
valor_max_Icc_m = max(abs(Icc_m_a))

```

APÊNDICE F – Sistema 34-barras do IEEE no ATPDraw Parte 1



APÊNDICE G – Sistema 34-barras do IEEE no ATPDraw Parte 2

