

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

MATHEUS TAVARES TOLEDO

MODELAGEM DE UMA REDE ELÉTRICA DE ALTA TENSÃO NO PS SIMUL

CORNÉLIO PROCÓPIO

2025

MATHEUS TAVARES TOLEDO

MODELAGEM DE UMA REDE ELÉTRICA DE ALTA TENSÃO NO PS SIMUL

Modeling of a high voltage power network in ps simul

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Silvio Aparecido de Souza

CORNÉLIO PROCÓPIO

2025



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio
Departamento Acadêmico de Elétrica
Engenharia Elétrica



FOLHA DE APROVAÇÃO

Matheus Tavares Toledo

Modelagem de uma Rede Elétrica de Alta Tensão no PS SIMUL

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 07:00hs do dia 28/08/2025 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O(A) candidato(a) foi arguido(a) pela Banca Avaliadora composta pelos professores(as) abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Prof(a). Dr(a). Silvio Aparecido de Souza - Presidente (Orientador(a))

Prof(a). Dr(a). Murilo da Silva - (Membro)

Prof(a). Dr(a). Edson Aparecido Rozas Theodoro - (Membro)

A folha de aprovação assinada encontra-se na coordenação do curso.

Dedico este trabalho aos meus pais e
amigos, que sempre me apoiaram e
incentivaram.

AGRADECIMENTOS

Certamente estes parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase de minha vida. Portanto, desde já peço desculpas àquelas que não estão presentes entre essas palavras, mas elas podem estar certas de que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão.

Agradeço primeiramente aos meus pais, que sempre me mostraram que o estudo pode sim mudar a realidade de um indivíduo, mesmo não sendo o caminho mais fácil.

Aos meus amigos, que estiveram comigo nos momentos de alegria e de dificuldade durante toda a trajetória na universidade

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Silvio, pela sabedoria com que me guiou nesta trajetória, e por todos os conselhos profissionais e de vida que me foram repassados.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

Sucesso é o acúmulo de pequenos
esforços repetidos dia a dia.
(COLLIER, Robert, 1931)

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo modelar parte de um sistema elétrico de potência de alta tensão por meio do *software* PS SIMUL, com a finalidade de comparar os valores de curto-circuito nas barras de interesse com aqueles obtidos no programa ANAFAS, desenvolvido pelo CEPEL considerando-o como um *benchmark* e referência na comparação. A pesquisa abrange a análise do sistema elétrico a ser representado, com a coleta de parâmetros de todos os componentes, como linhas de transmissão, transformadores, fontes geradoras, entre outros. O *software* PS SIMUL foi escolhido por ser utilizado em ensaios práticos em redes de proteção, permitindo aplicar diferentes tipos de curto-circuito em um sistema elétrico modelado. O sistema modelado está localizado nos estados de São Paulo e Paraná, abrangendo linhas de transmissão de 230 kV e 88 kV, com extensões entre 50 km e 100 km. A realização do estudo de curto-circuito permite a elaboração e parametrização de um esquema de proteção eficiente, bem como a especificação de equipamentos compatíveis em subestações e instalações da rede, contribuindo para a segurança operacional e a continuidade do fornecimento de energia elétrica. A comparação dos resultados nos dois *softwares* resultou em taxas de erro entre 0,01% e 41,1%, onde os maiores níveis de erros foram resultantes na modelagem dos curtos-circuitos com envolvimento de mais de uma fase, necessitando de um maior detalhamento e entendimento dos componentes presentes no sistema para obtenção de erros menores.

Palavras-chave: modelagem; sistema elétrico de potência; curto-circuito; proteção; energia elétrica.

ABSTRACT

This work aims to model part of a high-voltage power system using the PS SIMUL software, with the purpose of comparing the short-circuit values at the buses of interest with those calculated by the ANAFAS program, developed by CEPEL, which is considered a benchmark and reference for validation. The research encompasses the analysis of the power system to be represented, including the collection of parameters for all components, such as transmission lines, transformers, and generating sources. The PS SIMUL software was chosen due to its application in practical testing of protection networks, allowing the simulation of different types of short-circuits in modeled systems. The modeled system is located in the states of São Paulo and Paraná, comprising transmission lines of 230 kV and 88 kV, with lengths ranging from 50 km to 100 km. Performing the short-circuit study enables the design and parameterization of efficient protection schemes, as well as the specification of suitable equipment for substations and network facilities, contributing to operational safety and continuity of electricity supply. The comparison of results between the two software tools showed error rates ranging from 0.01% to 41.1%. The highest deviations were observed in short-circuits involving more than one phase, highlighting the need for greater detail and understanding of the system components in order to achieve more accurate results.

Keywords: modeling; electric power system; short-circuit; protection; electric energy.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Previsão da extensão do sistema de transmissão para 2027	18
Figura 2 - Representação de um Sistema Elétrico de Potência	21
Figura 3 - Bloco de transformadores.....	28
Figura 4 - Entrada de dados de um transformador trifásico	29
Figura 5 - Bloco de linhas e cabos.....	29
Figura 6 - Entrada de dados do bloco de linhas e cabos.....	30
Figura 7 - Bloco de fontes	30
Figura 8 - Entrada de dados da fonte	31
Figura 9 - Entrada de dados da chave	32
Figura 10 - Entrada de dados dos transformadores de corrente e potencial	32
Figura 11 - Simulação de um circuito trifásico com chaveamento da geração .	33
Figura 12 - Sinal de tensão da fonte trifásica	33
Figura 13 - Sinal de tensão no secundário do transformador.....	34
Figura 14 - Caso 3Q 2018 – “Setembro médio”	36
Figura 15 - Sistema modelado no PS SIMUL	40
Figura 16 - Modelagem de um curto-circuito monofásico na barra da SE Assis 230kV pelo PS SIMUL.....	42
Figura 17 - Modelagem de um curto-circuito bifásico com a terra na barra da SE Assis 230kV pelo PS SIMUL	45
Figura 18 - Modelagem de um curto-circuito bifásico na barra da SE Assis 230kV pelo PS SIMUL.....	48
Figura 19 - Modelagem de um curto-circuito trifásico na barra da SE Assis 230kV pelo PS SIMUL.....	50
Figura 20 - Tensão pré-falta em regime permanente na barra da SE Assis 230 kv no PS SIMUL	93
Figura 21 - Tensão pré-falta em regime permanente na barra da SE Chavantes 230 kv no PS SIMUL	93
Figura 22 - Tensão pré-falta em regime permanente na barra da SE Figueira 230 kv no PS SIMUL	93
Figura 23 - Tensão pré-falta em regime permanente na barra da SE Botucatu 230 kv no PS SIMUL	93
Figura 24 - Tensão pré-falta em regime permanente na barra da SE Piraju 230 kv no PS SIMUL	94
Figura 25 - Tensão pré-falta em regime permanente na barra da SE Salto Grande 88 kv no PS SIMUL.....	94
Figura 26 - Tensão pré-falta em regime permanente na barra da SE Chavantes 88 kv no PS SIMUL	94
Figura 27 - Parâmetros de configuração inseridos nas linhas de transmissão	96
Figura 28 - Impedância de sequência inseridas no bloco de linhas de transmissão	96

Figura 29 - Bloco de linha de transmissão mútuas	97
Figura 30 - Impedâncias mútua de sequência inseridas no bloco de linhas de transmissão	98
Figura 31 - Bloco do transformador trifásico real de três enrolamentos	99
Figura 32 - Impedâncias do transformador trifásico real de três enrolamentos	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de impedância de sequência das linhas de transmissão	37
Tabela 2 – Valores de impedância mútua das linhas de transmissão	37
Tabela 3 – Valores de impedância de sequência das linhas de transmissão equivalentes.....	38
Tabela 4 – Equivalentes das fontes de geração	38
Tabela 5 – Características dos transformadores de potência.....	39
Tabela 6 – Corrente de curto-circuito total monofásico na barra da SE Assis 230kV pelo ANAFAS.....	42
Tabela 7 – Correntes de contribuição ao curto-circuito monofásico na barra da SE Assis 230kV pelo ANAFAS	43
Tabela 8 – Corrente de curto-circuito total monofásico na barra da SE Assis 230kV pelo PS SIMUL.....	43
Tabela 9 – Correntes de contribuição curto-circuito monofásico na barra da SE Assis 230kV pelo PS SIMUL	43
Tabela 10 – Erro relativo entre as correntes de curto-circuito monofásico na barra SE Assis 230kV.....	44
Tabela 11 – Erro relativo entre as correntes de contribuição ao curto-circuito monofásico na barra da SE Assis 230kV	44
Tabela 12 – Corrente de curto-circuito total bifásicos com a terra na barra da SE Assis 230kV pelo ANAFAS	45
Tabela 13 – Correntes de contribuição ao curto-circuito bifásico com a terra na barra da SE Assis 230kV pelo ANAFAS	46
Tabela 14 – Corrente de curto-circuito total bifásicos com a terra na barra da SE Assis 230kV pelo PS SIMUL	46
Tabela 15 – Correntes de contribuição ao curto-circuito bifásico com a terra na barra da SE Assis 230kV pelo PS SIMUL	46
Tabela 16 – Erro relativo entre as correntes de curto-circuito total bifásico com a terra na barra da SE Assis 230kV	47
Tabela 17 – Erro relativo entre as correntes de contribuição ao curto-circuito bifásico com a terra na barra da SE Assis 230kV	47
Tabela 18 – Corrente de curto-circuito total bifásico na barra da SE Assis 230kV pelo ANAFAS	48
Tabela 19 – Correntes de contribuição ao curto-circuito bifásico na barra da SE Assis 230kV pelo ANAFAS	48
Tabela 20 – Corrente de curto-circuito total bifásico na barra da SE Assis 230kV pelo PS SIMUL	49
Tabela 21 – Correntes de contribuição ao curto-circuito bifásico na barra da SE Assis 230kV pelo PS SIMUL	49
Tabela 22 – Erro relativo entre as correntes de curto-circuito total bifásico na barra da SE Assis 230kV.....	49
Tabela 23 – Erro relativo entre as correntes de contribuição ao curto-circuito bifásico na barra da SE Assis 230kV	50

Tabela 24 - Corrente de curto-circuito total trifásico na barra da SE Assis 230kV pelo ANAFAS	51
Tabela 25 - Correntes de contribuição ao curto-circuito trifásico na barra da SE Assis 230kV pelo ANAFAS	51
Tabela 26 - Corrente de curto-circuito total trifásico na barra da SE Assis 230kV pelo PS SIMUL	51
Tabela 27 - Correntes de contribuição ao curto-circuito trifásico na barra da SE Assis 230kV pelo PS SIMUL	52
Tabela 28 - Erro relativo entre as correntes de curto-circuito total trifásico na barra da SE Assis 230kV.....	52
Tabela 29 - Erro relativo entre as correntes de contribuição ao curto-circuito trifásico na barra da SE Assis 230kV.....	52
Tabela 30 – Corrente de curto-circuito total monofásico na barra da SE Chavantes 230kV pelo ANAFAS.....	53
Tabela 31 – Correntes de contribuição ao curto-circuito monofásico na barra da SE Chavantes 230kV pelo ANAFAS.....	53
Tabela 32 – Corrente de curto-circuito total monofásico na barra da SE Chavantes 230kV pelo PS SIMUL.....	54
Tabela 33 – Correntes de contribuição curto-circuito monofásico na barra da SE Chavantes 230kV pelo PS SIMUL	54
Tabela 34 – Erro relativo entre as correntes de curto-circuito monofásico na barra SE Chavantes 230kV	54
Tabela 35 – Erro relativo entre as correntes de contribuição ao curto-circuito monofásico na barra da SE Chavantes 230kV	55
Tabela 36 – Corrente de curto-circuito total bifásicos com a terra na barra da SE Chavantes 230kV pelo ANAFAS	55
Tabela 37 – Correntes de contribuição ao curto-circuito bifásico com a terra na barra da SE Chavantes 230kV pelo ANAFAS	56
Tabela 38 – Corrente de curto-circuito total bifásicos com a terra na barra da SE Chavantes 230kV pelo PS SIMUL	56
Tabela 39 – Correntes de contribuição ao curto-circuito bifásico com a terra na barra da SE Chavantes 230kV pelo PS SIMUL	56
Tabela 40 – Erro relativo entre as correntes de curto-circuito total bifásico com a terra na barra da SE Chavantes 230kV	57
Tabela 41 – Erro relativo entre as correntes de contribuição ao curto-circuito bifásico com a terra na barra da SE Chavantes 230kV	57
Tabela 42 – Corrente de curto-circuito total bifásico na barra da SE Chavantes 230kV pelo ANAFAS	58
Tabela 43 – Correntes de contribuição ao curto-circuito bifásico na barra da SE Chavantes 230kV pelo ANAFAS.....	58
Tabela 44 – Corrente de curto-circuito total bifásico na barra da SE Chavantes 230kV pelo PS SIMUL	58
Tabela 45 – Correntes de contribuição ao curto-circuito bifásico na barra da SE Chavantes 230kV pelo PS SIMUL.....	58

Tabela 46 – Erro relativo entre as correntes de curto-circuito total bifásico na barra da SE Chavantes 230kV	59
Tabela 47 – Erro relativo entre as correntes de contribuição ao curto-circuito bifásico na barra da SE Chavantes 230kV	59
Tabela 48 - Corrente de curto-circuito total trifásico na barra da SE Chavantes 230kV pelo ANAFAS.....	60
Tabela 49 - Correntes de contribuição ao curto-circuito trifásico na barra da SE Chavantes 230kV pelo ANAFAS.....	60
Tabela 50 - Corrente de curto-circuito total trifásico na barra da SE Chavantes 230kV pelo PS SIMUL.....	60
Tabela 51 - Correntes de contribuição ao curto-circuito trifásico na barra da SE Chavantes 230kV pelo PS SIMUL.....	60
Tabela 52 - Erro relativo entre as correntes de curto-circuito total trifásico na barra da SE Chavantes 230kV	61
Tabela 53 - Erro relativo entre as correntes de contribuição ao curto-circuito trifásico na barra da SE Chavantes 230kV	61
Tabela 54 – Corrente de curto-circuito total monofásico na barra da SE Botucatu 230kV pelo ANAFAS	62
Tabela 55 – Correntes de contribuição ao curto-circuito monofásico na barra da SE Botucatu 230kV pelo ANAFAS	62
Tabela 56 – Corrente de curto-circuito total monofásico na barra da SE Botucatu 230kV pelo PS SIMUL	62
Tabela 57 – Correntes de contribuição curto-circuito monofásico na barra da SE Botucatu 230kV pelo PS SIMUL.....	63
Tabela 58 – Erro relativo entre as correntes de curto-circuito monofásico na barra SE Botucatu 230kV	63
Tabela 59 – Erro relativo entre as correntes de contribuição ao curto-circuito monofásico na barra da SE Botucatu 230kV	63
Tabela 60 – Corrente de curto-circuito total bifásicos com a terra na barra da SE Botucatu 230kV pelo ANAFAS.....	64
Tabela 61 – Correntes de contribuição ao curto-circuito bifásico com a terra na barra da SE Botucatu 230kV pelo ANAFAS	64
Tabela 62 – Corrente de curto-circuito total bifásicos com a terra na barra da SE Botucatu 230kV pelo PS SIMUL.....	64
Tabela 63 – Correntes de contribuição ao curto-circuito bifásico com a terra na barra da SE Botucatu 230kV pelo PS SIMUL	65
Tabela 64 – Erro relativo entre as correntes de curto-circuito total bifásico com a terra na barra da SE Botucatu 230kV.....	65
Tabela 65 – Erro relativo entre as correntes de contribuição ao curto-circuito bifásico com a terra na barra da SE Botucatu 230kV	65
Tabela 66 – Corrente de curto-circuito total bifásico na barra da SE Botucatu 230kV pelo ANAFAS	66
Tabela 67 – Correntes de contribuição ao curto-circuito bifásico na barra da SE Botucatu 230kV pelo ANAFAS	66

Tabela 68 – Corrente de curto-circuito total bifásico na barra da SE Botucatu 230kV pelo PS SIMUL	66
Tabela 69 – Correntes de contribuição ao curto-circuito bifásico na barra da SE Botucatu 230kV pelo PS SIMUL	67
Tabela 70 – Erro relativo entre as correntes de curto-circuito total bifásico na barra da SE Botucatu 230kV	67
Tabela 71 – Erro relativo entre as correntes de contribuição ao curto-circuito bifásico na barra da SE Botucatu 230kV	67
Tabela 72 - Corrente de curto-circuito total trifásico na barra da SE Botucatu 230kV pelo ANAFAS.....	68
Tabela 73 - Correntes de contribuição ao curto-circuito trifásico na barra da SE Botucatu 230kV pelo ANAFAS	68
Tabela 74 - Corrente de curto-circuito total trifásico na barra da SE Botucatu 230kV pelo PS SIMUL.....	68
Tabela 75 - Correntes de contribuição ao curto-circuito trifásico na barra da SE Botucatu 230kV pelo PS SIMUL	69
Tabela 76 - Erro relativo entre as correntes de curto-circuito total trifásico na barra da SE Botucatu 230kV.....	69
Tabela 77 - Erro relativo entre as correntes de contribuição ao curto-circuito trifásico na barra da SE Botucatu 230kV.....	69
Tabela 78 – Corrente de curto-circuito total monofásico na barra da SE Piraju 230kV pelo ANAFAS.....	70
Tabela 79 – Correntes de contribuição ao curto-circuito monofásico na barra da SE Piraju 230kV pelo ANAFAS.....	70
Tabela 80 – Corrente de curto-circuito total monofásico na barra da SE Piraju 230kV pelo PS SIMUL.....	71
Tabela 81 – Correntes de contribuição curto-circuito monofásico na barra da SE Piraju 230kV pelo PS SIMUL	71
Tabela 82 – Erro relativo entre as correntes de curto-circuito monofásico na barra SE Piraju 230kV	71
Tabela 83 – Erro relativo entre as correntes de contribuição ao curto-circuito monofásico na barra da SE Piraju 230kV	72
Tabela 84 – Corrente de curto-circuito total bifásicos com a terra na barra da SE Piraju 230kV pelo ANAFAS	72
Tabela 85 – Correntes de contribuição ao curto-circuito bifásico com a terra na barra da SE Piraju 230kV pelo ANAFAS.....	73
Tabela 86 – Corrente de curto-circuito total bifásicos com a terra na barra da SE Piraju 230kV pelo PS SIMUL	73
Tabela 87 – Correntes de contribuição ao curto-circuito bifásico com a terra na barra da SE Piraju 230kV pelo PS SIMUL	73
Tabela 88 – Erro relativo entre as correntes de curto-circuito total bifásico com a terra na barra da SE Piraju 230kV.....	74
Tabela 89 – Erro relativo entre as correntes de contribuição ao curto-circuito bifásico com a terra na barra da SE Piraju 230kV	74

Tabela 90 – Corrente de curto-circuito total bifásico na barra da SE Piraju 230kV pelo ANAFAS	74
Tabela 91 – Correntes de contribuição ao curto-circuito bifásico na barra da SE Piraju 230kV pelo ANAFAS.....	75
Tabela 92 – Corrente de curto-circuito total bifásico na barra da SE Piraju 230kV pelo PS SIMUL	75
Tabela 93 – Correntes de contribuição ao curto-circuito bifásico na barra da SE Piraju 230kV pelo PS SIMUL.....	75
Tabela 94 – Erro relativo entre as correntes de curto-circuito total bifásico na barra da SE Piraju 230kV	76
Tabela 95 – Erro relativo entre as correntes de contribuição ao curto-circuito bifásico na barra da SE Piraju 230kV.....	76
Tabela 96 - Corrente de curto-circuito total trifásico na barra da SE Piraju 230kV pelo ANAFAS.....	76
Tabela 97 - Correntes de contribuição ao curto-circuito trifásico na barra da SE Piraju 230kV pelo ANAFAS.....	77
Tabela 98 - Corrente de curto-circuito total trifásico na barra da SE Piraju 230kV pelo PS SIMUL.....	77
Tabela 99 - Correntes de contribuição ao curto-circuito trifásico na barra da SE Piraju 230kV pelo PS SIMUL.....	77
Tabela 100 - Erro relativo entre as correntes de curto-circuito total trifásico na barra da SE Piraju 230kV	78
Tabela 101 - Erro relativo entre as correntes de contribuição ao curto-circuito trifásico na barra da SE Piraju 230kV	78
Tabela 102 – Corrente de curto-circuito total monofásico na barra da SE Figueira 230kV pelo ANAFAS.....	79
Tabela 103 – Correntes de contribuição ao curto-circuito monofásico na barra da SE Figueira 230kV pelo ANAFAS.....	79
Tabela 104 – Corrente de curto-circuito total monofásico na barra da SE Figueira 230kV pelo PS SIMUL.....	80
Tabela 105 – Correntes de contribuição curto-circuito monofásico na barra da SE Figueira 230kV pelo PS SIMUL	80
Tabela 106 – Erro relativo entre as correntes de curto-circuito monofásico na barra SE Figueira 230kV	80
Tabela 107 – Erro relativo entre as correntes de contribuição ao curto-circuito monofásico na barra da SE Figueira 230kV	81
Tabela 108 – Corrente de curto-circuito total bifásicos com a terra na barra da SE Figueira 230kV pelo ANAFAS	81
Tabela 109 – Correntes de contribuição ao curto-circuito bifásico com a terra na barra da SE Figueira 230kV pelo ANAFAS.....	82
Tabela 110 – Corrente de curto-circuito total bifásicos com a terra na barra da SE Figueira 230kV pelo PS SIMUL	82
Tabela 111 – Correntes de contribuição ao curto-circuito bifásico com a terra na barra da SE Figueira 230kV pelo PS SIMUL.....	82

Tabela 112 – Erro relativo entre as correntes de curto-circuito total bifásico com a terra na barra da SE Figueira 230kV.....	83
Tabela 113 – Erro relativo entre as correntes de contribuição ao curto-circuito bifásico com a terra na barra da SE Figueira 230kV	83
Tabela 114 – Corrente de curto-circuito total bifásico na barra da SE Figueira 230kV pelo ANAFAS	83
Tabela 115 – Correntes de contribuição ao curto-circuito bifásico na barra da SE Figueira 230kV pelo ANAFAS	84
Tabela 116 – Corrente de curto-circuito total bifásico na barra da SE Figueira 230kV pelo PS SIMUL	84
Tabela 117 – Correntes de contribuição ao curto-circuito bifásico na barra da SE Figueira 230kV pelo PS SIMUL	84
Tabela 118 – Erro relativo entre as correntes de curto-circuito total bifásico na barra da SE Figueira 230kV	85
Tabela 119 – Erro relativo entre as correntes de contribuição ao curto-circuito bifásico na barra da SE Figueira 230kV.....	85
Tabela 120 - Corrente de curto-circuito total trifásico na barra da SE Figueira 230kV pelo ANAFAS.....	85
Tabela 121 - Correntes de contribuição ao curto-circuito trifásico na barra da SE Figueira 230kV pelo ANAFAS	86
Tabela 122 - Corrente de curto-circuito total trifásico na barra da SE Figueira 230kV pelo PS SIMUL.....	86
Tabela 123 - Correntes de contribuição ao curto-circuito trifásico na barra da SE Figueira 230kV pelo PS SIMUL	86
Tabela 124 - Erro relativo entre as correntes de curto-circuito total trifásico na barra da SE Figueira 230kV	87
Tabela 125 - Erro relativo entre as correntes de contribuição ao curto-circuito trifásico na barra da SE Figueira 230kV	87

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Objetivos	21
1.1.1	Objetivos gerais	20
1.1.2	Objetivos específicos	20
2	SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA	21
2.1	Geração	21
2.2	Transmissão	21
2.3	Distribuição	21
2.4	Curto-circuito	24
2.4.1	Componentes Simétricas	25
2.5	Modelagem de um sistema elétrico de potência	26
2.6	PS SIMUL	28
3	DESENVOLVIMENTO	35
3.1	Sistema Elétrico	35
3.2	Linhas de transmissão	36
3.3	Fontes de geração	38
3.4	Transformadores	39
3.5	Sistema modelado no PS SIMUL	39
4	RESULTADOS	41
4.1	Curto-circuito na barra da SE Assis 230kv	41
4.1.1	Curto-circuito Monofásico na barra da SE Assis 230kV	41
4.1.2	Curto-circuito Bifásico Terra na barra da SE Assis 230kV	44
4.1.3	Curto-circuito Bifásico na barra da SE Assis 230kV	47
4.1.4	Curto-circuito Trifásico na barra da SE Assis 230kV	50
4.2	Curto-circuito na barra da SE Chavantes 230kv	53
4.2.1	Curto-circuito Monofásico na barra da SE Chavantes 230kV	53
4.2.2	Curto-circuito Bifásico Terra na barra da SE Chavantes 230kV	55
4.2.3	Curto-circuito Bifásico na barra da SE Chavantes 230kV	57
4.2.4	Curto-circuito Trifásico na barra da SE Chavantes 230kV	59
4.3	Curto-circuito na barra da SE Botucatu 230kv	61
4.3.1	Curto-circuito Monofásico na barra da SE Botucatu 230kV	62
4.3.2	Curto-circuito Bifásico Terra na barra da SE Botucatu 230kV	64
4.3.3	Curto-circuito Bifásico na barra da SE Botucatu 230kV	66
4.3.4	Curto-circuito Trifásico na barra da SE Botucatu 230kV	68
4.4	Curto-circuito na barra da SE Piraju 230kv	70
4.4.1	Curto-circuito Monofásico na barra da SE Piraju 230kV	71
4.4.2	Curto-circuito Bifásico Terra na barra da SE Piraju 230kV	72
4.4.3	Curto-circuito Bifásico na barra da SE Piraju 230kV	74

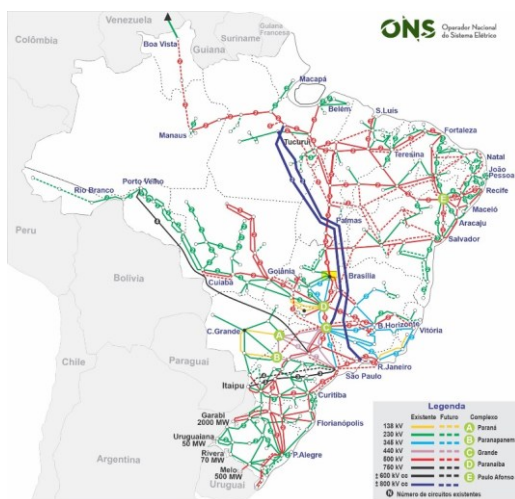
4.4.4	Curto-circuito Trifásico na barra da SE Piraju 230kV	76
4.5	Curto-circuito na barra da SE Figueira 230kv	79
4.5.1	Curto-circuito Monofásico na barra da SE Figueira 230kV	79
4.5.2	Curto-circuito Bifásico Terra na barra da SE Figueira 230kV	81
4.5.3	Curto-circuito Bifásico na barra da SE Figueira 230kV	83
4.5.4	Curto-circuito Trifásico na barra da SE Figueira 230kV	85
5	CONCLUSÃO	88
	REFERÊNCIAS	89
	ANEXO A - Tensões nas barras no período pré-falta em regime permanente	92
	ANEXO B - Blocos dos componentes utilizados na simulação	95

1 INTRODUÇÃO

A transformação da energia elétrica em outras formas de energia, como a luminosa, mecânica, térmica e sonora, levou a humanidade a sua dependência a tal ponto que o termo energia elétrica é considerado vital para o desenvolvimento de qualquer nação (BICHELS, 2018) e a partir da exploração desse fenômeno, o ser humano foi capaz de gerar, transmitir e distribuir por todos os territórios (VASCONCELOS, 2023). O setor elétrico brasileiro pode ser agrupado em grandes segmentos, sejam eles o de geração que abrange todas as atividades de produção de energia, o de transmissão que é responsável pela interligação das fontes geradoras com os locais de distribuição e o de distribuição, que se encarrega do transporte final dessa energia até os consumidores finais (FERREIRA, 2006). Através desses conceitos denominamos como Sistema Elétrico de Potência (SEP), todas as instalações e equipamentos destinados à geração, transmissão e distribuição de energia elétrica (BICHELS, 2018).

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) o Brasil dispõe de uma capacidade geradora instalada de mais de 150 GW, predominantemente de fonte hidrelétrica (EMPRESA DE PESQUISAS ENERGÉTICAS, 2024). Para que ocorra a transmissão dessa energia gerada o Brasil possui o que chamamos de Sistema Interligado Nacional (SIN) com quatro subsistemas interligados, Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e Norte (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, 2024). A Figura 1 mostra uma previsão futura segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) para o SIN até 2027.

Figura 1 – Previsão da extensão do sistema de transmissão para 2027



Fonte: Operador Nacional do Sistema Elétrico (2024)

Segundo dados da ONS o Brasil possuía em 2022 aproximadamente 179.311 km de linhas de transmissão em operação, com uma previsão de crescimento para 216.759 km até o ano de 2027, visando o aumento da demanda e da flexibilidade do sistema (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO,2024).

Todo sistema elétrico está sujeito a perturbações, sejam elas instabilidade de tensão, instabilidade de frequência, sobrecargas e curto-circuito, que podem levar a um estado crítico de operação (FRAZÃO,2019), e na maioria das vezes são causadas por fenômenos naturais, falhas em materiais e equipamentos e falhas humanas (SILVA,2020). A falha mais comum em um sistema elétrico de potência é o curto-circuito, o qual produz uma corrente elétrica elevada que circula por todos os elementos conectados, levando a distúrbios de tensão por todo o sistema, podendo ocasionar danos irreparáveis as instalações. Os curtos-circuitos podem ser caracterizados entre as três fases, duas fases quaisquer envolvendo a terra ou não, e entre uma fase e a terra (MAMEDE, 2011).

Visto sua importância, a proteção desses sistemas atua com dois grandes objetivos, sendo o primeiro que é promover o desligamento de um elemento do sistema caso ele sofra um curto-circuito ou opere de modo anormal e, indicar a localização e o tipo de defeito visando manutenção rápida e possibilitando analisar se a proteção foi eficaz (CAMINHA, 1977). O principal componente do sistema de proteção é o relé que recebe a medição de diferentes grandezas do sistema e guardar essas informações para que possa ser analisada a falta e feita a localização da mesma (OLIVEIRA *et al.*, 2022).

Os estudos de proteção de sistemas elétricos têm como objetivo diminuir custos de manutenção, reduzir tempo de inatividade, e perda de renda devido a desligamentos. Porém, o estudo desses sistemas é dependente de modelagem computacionais, sendo hoje inviável qualquer tipo de estudo em sistemas elétricos de médio e grande porte sem o auxílio de programas computacionais (PEQUENO, 2010), como o ANAFAS para análise de curto-circuito do CEPEL (Centro de Pesquisa de Energia Elétrica).

A modelagem de sistemas elétricos de potência é fundamental para obter dados próximos da realidade do valor das correntes de curto-circuito, podendo assim atender diversos objetivos importantes, como o dimensionamento de equipamentos, ajuste de proteções e na estabilidade do sistema elétrico (SILVEIRA *et al.*,2010). Portanto, nesse trabalho propõe-se realizar a modelagem de parte de um sistema

elétrico de potência através do *software* PS SIMUL da CONPROVE, comparando os valores de curto-circuito nas barras de interesse com os obtidos no programa ANAFAS do CEPEL.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivos Gerais

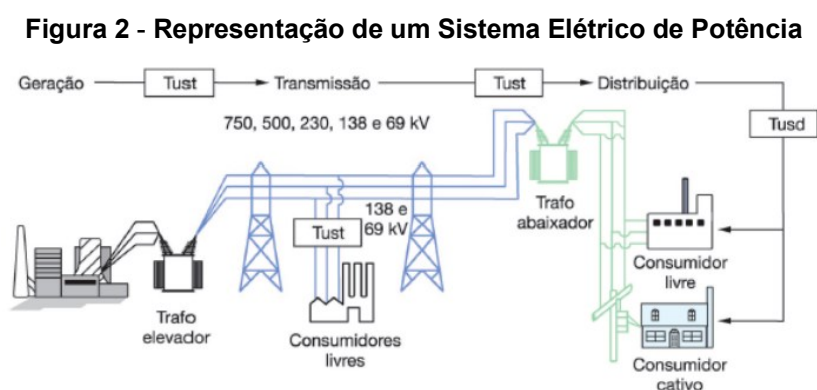
Realizar a modelagem de parte de um sistema elétrico de potência de alta tensão através do *software* PS SIMUL da CONPROVE e comparar os valores de curto-circuito nas barras de interesse com os obtidos no programa ANAFAS da CEPEL.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Averiguar os dados necessários para a modelagem de um sistema elétrico de potência;
- Modelar um sistema elétrico de potência de alta tensão em *softwares* computacionais e entender suas diferenças;
- Aplicar faltas em parte de um sistema elétrico de potência de alta tensão e analisar os resultados obtidos;
- Comparar os valores de curto-circuito obtidos no programa PS SIMUL com os valores obtidos no programa ANAFAS.

2 SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

Definimos como Sistema Elétrico de Potência o conjunto de todos os equipamentos e instalações destinados à geração, transmissão e distribuição de energia elétrica (BICHELS, 2018). A Figura 2 exemplifica resumidamente um Sistema Elétrico de Potência.



Fonte: ENERGIA ELÉTRICA - Geração, Transmissão e Sistemas Interligados (PINTO,2018)

2.1 Geração

A geração de energia elétrica brasileira atingiu a marca de 200 GW (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2024) sendo gerada em usinas de diversos tipos, como hidrelétricas, termelétricas, nucleares, eólicas e solares, de grande, médio e pequeno porte, nos mais diversos locais do país (BICHELS, 2018). O Brasil possui um dos maiores potenciais energéticos do planeta, com aproximadamente 8,5 milhões de quilômetros quadrados de extensão e mais de 7 mil quilômetros de litoral, além de um clima favorável a geração de energia elétrica (OLIVERIA *et al.*,2021), dispondo de um dos maiores potenciais hídricos do mundo, destacando-se a Bacia Amazônica, Bacia do São Francisco, Bacia do Tocantins e a Bacia do Paraná (KAGAN, 2000).

Para que as cargas sejam atendidas as usinas devem gerar a potência requerida de forma instantânea, fazendo com que todas as gerações contribuam para o suprimento de carga. A operação de todas as usinas é feita pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico, que através do despacho de carga determina quais usinas devem operar, horário e período, além de garantir a continuidade do serviço em função das condições de operação do sistema devido a capacidade das linhas de transmissão e dos equipamentos (BICHELS, 2018).

2.2 Transmissão

O sistema de transmissão é o responsável pela interligação da geração até as distribuidoras, além de interligar subsistemas (SILVEIRA *et al.*,2022). Com o aumento da demanda energética devido ao crescimento das cargas, foi necessário buscar grandes potenciais de geração cada vez mais distante das cargas, levando a necessidade de linhas de transmissão cada vez mais longas e com tensões mais elevadas, formando um grande Sistema Elétrico de Potência (BICHELS, 2018).

Uma linha de transmissão é formada basicamente por condutores, torres, cabos para raios e isoladores, e seu circuito pode ser simples, duplo ou múltiplo (PINTO, 2018). O sistema de transmissão brasileiro é denominado de rede básica e é constituído por linhas de transmissão aéreas de 230 kV até 750 kV em corrente alternada, e até 800 kV em corrente contínua, formando um sistema malhado, ligado a cada usina ou subestação, tendo em eventuais pontos sistemas radiais. Na distribuição tem-se linhas de 138 kV e 34,5 kV saindo das redes básicas e conectando-se as subestações de carga que abaixam as tensões em alimentadores de 13,8 kV formando um sistema malhado ou radial (BICHELS, 2018). As linhas de transmissão podem ser classificadas pelo seu nível de tensão, sendo A1 com tensão igual ou superior a 230 kV, A2 com tensão de 88 kV a 138 kV, A3 com tensão de 69 kV, A4 com tensão de 2,3 kV a 25 kV. Outra classificação é por seu comprimento, sendo as linhas de transmissão maiores que 249 km classificadas como longas, entre 80 km e 249 km classificadas como médias, e menores que 80 km classificadas como curtas. Os níveis de tensão padronizados no Brasil são de 750 kV, 500 kV, 230 kV, 138 kV e 69 kV para a transmissão e 138 kV, 69 kV e 34,5 kV para subtransmissão (PINTO, 2018).

Subestações são necessárias para interligar as diversas usinas, linhas de transmissão, subtransmissão e redes de distribuição (BICHELS, 2018), e são utilizadas para elevar a tensão nas centras geradoras, ou rebaixar a tensão para os consumidores por meio de transformadores, além de abrigar os equipamentos do sistema de proteção e medição, e dispositivos de manobra (ANEEL, 2024). Ao se elevar a tensão para transmiti-la, diminui-se a corrente elétrica, possibilitando utilizar cabos menores e reduzindo-se, portanto, as perdas elétricas (ANEEL,2024). A capacidade de transformação de uma subestação é determinada pela posição dela

no sistema e a necessidade das cargas, utilizando transformadores trifásicos, monofásicos ou banco de transformadores (BICHELS, 2018).

Ainda que utilizada em menor escala no Brasil, outra forma de transmissão de energia elétrica é a em corrente contínua, onde o comprimento da linha não é limitado por parâmetros capacitivos ou indutivos, possuindo perdas inferiores ao sistema de transmissão em corrente alternada (SILVEIRA *et al.*, 2022). O Brasil é um dos pioneiros nesse meio, tendo em operação a linha de transmissão em corrente contínua de 600 kV, saindo da Usina de Itaipu em Foz do Iguaçu no Paraná e percorrendo uma distância de 810 km até a cidade de Ibiúna no estado de São Paulo, transportando uma potência de 6.000 MW (KAGAN, 2000).

2.3 Distribuição

O sistema de distribuição tem por objetivo levar a energia do ponto de conexão com o sistema de transmissão até as unidades consumidoras. Se assemelha ao sistema de transmissão com fios condutores, transformadores, equipamentos de medição e proteção, porém opera com níveis de tensão menores, e mais ramificados (SILVEIRA *et al.*, 2022). O sistema de distribuição pode ser subdividido em um sistema de subtransmissão, cuja função é captar a energia elétrica vinda do sistema de transmissão que opera em alta e extra altas tensões e transferi-la as subestações de distribuição, distribuindo a energia elétrica através de linhas trifásicas operando em tensões menores, de 138 kV ou 69 kV usualmente, ou 34,5 kV usado em alguns lugares, limitando-se em algumas dezenas de MW até 150 MW de potência (KAGAN, 2000). Uma rede de distribuição pode ser classificada também em sistema de distribuição primária e secundária, ao qual o termo primária ou secundária se refere ao nível de tensão de operação. O sistema de distribuição primário é alimentado pelo sistema de subtransmissão, onde as subestações de distribuição (SEs) são responsáveis pela transformação da tensão em nível de subtransmissão para um nível usualmente de 13,8 kV, destinando a distribuição de energia a consumidores de grande porte, como indústrias, centros comerciais e prédios. Alimentado pelo sistema de distribuição primário, o sistema de distribuição secundário opera em níveis de tensão menores, normalmente em 220/127 V ou 380/220 V, levando energia elétrica a consumidores ligados nesse nível de tensão (OLIVEIRA *et al.*, 2021).

2.4 Curto-Circuito

Operando em regime permanente com as cargas sendo supridas pela geração, com correntes e tensões trifásicas e simétricas (BICHELS, 2018), o sistema elétrico de potência está sujeito a ocorrências capazes de alterar seu estado normal de operação, alterando os níveis de tensão, corrente, frequência e potência, provocando restrições de operação e colocando em risco a integridade dos equipamentos e das instalações (SATO, 2015). Essas ocorrências podem ser de diferentes naturezas, como problemas na isolação de equipamentos, ações do vento, árvores, descargas atmosféricas, surtos de chaveamento, sobretensão, aquecimento de cabos, falta de manutenção nos equipamentos, vandalismo, queimadas, catástrofes ambientais, entre muitas outras ocorrências que podem afetar a integridade do sistema elétrico (KINDERMANN, 1997).

A falha mais comum ocasionada por essas ocorrências é o curto-circuito, capaz de elevar a corrente nos elementos envolvidos, causando alterações nos níveis de tensão do sistema (SILVEIRA et al., 2022), e a magnitude da corrente está associada a diferentes fatores, como o tipo de curto-circuito, capacidade do sistema de geração, topologia da rede elétrica, entre outros (SATO, 2015). Na ocorrência de curto-circuito, inicialmente surge um transitório eletromagnético de curta duração que provoca grandes oscilações de corrente e tensão, levando o sistema a um novo regime permanente com correntes e tensões estáveis de acordo com o tipo de curto-circuito (BICHELS, 2018). Podemos classificar os diferentes tipos de curto-circuito como trifásico, bifásico envolvendo fase e fase, trifásico à terra, bifásico à terra, e monofásico (BICHELS, 2018), onde o com maior ocorrência é o monofásico, chegando a 70% das ocorrências. No estudo de curto-circuito o mais analisado é o curto-circuito trifásico, que apesar de representar apenas 5% das ocorrências, é o mais severo entre eles. O setor mais vulnerável à falha é a linha de transmissão, em cerca de 89% das incidências, devido ao seu imenso tamanho, passando por terrenos e climas distintos (KINDERMANN, 1997). Podemos classificar os curtos-circuitos em permanentes, onde o curto-circuito permanece na rede, necessitando de manutenção na rede e levando ao deslocamento de equipes até o ponto de defeito, para que haja o reestabelecimento da operação. O curto-circuito temporário é o curto-circuito causado comumente pela ruptura do dielétrico, ionizando o ar e formando um arco elétrico, que é mantido até que o sistema de proteção da rede atue, eliminando o arco

elétrico e fazendo com que a rede possa operar de forma normal após seu religamento (KINDERMANN, 1997). Ao ocorrer um curto-circuito perde-se o equilíbrio entre a carga e a geração, e a tensão no local de defeito pode cair a zero, fazendo com que o sistema entenda como a ligação de uma carga infinita e impedância muito pequena, levando a todas as correntes do sistema fluírem para o ponto de defeito (BICHELS, 2018).

Devido à alta corrente de curto-circuito, o aquecimento de cabos e equipamentos pode ocasionar danos as instalações elétricas e equipamentos conectados. Em um SEP equilibrado, carga e geração estão sempre em equilíbrio, porém ao se eliminar uma falta, pode haver o desequilíbrio entre geração e carga, levando a condições anormais de operação, como sub ou sobretensões, sub ou sobre frequências, e sobrecargas no sistema, levando a instabilidade do sistema elétrico de potência (SATO, 2015).

2.4.1 Componentes simétricas

Os curtos-circuitos em sistemas elétricos podem gerar um desbalanceamento, dificultando a análise e as simulações de faltas. Em 1915, o físico e engenheiro Maurice Leblanc estudou a decomposição das correntes trifásicas desequilibradas em três grupos produzidos por três campos magnéticos, um girando em uma direção, um girando em uma direção oposta, e um estático, possibilitando que o engenheiro eletricitista americano Fortescue formulasse uma ferramenta analítica, que permitiria decompor qualquer sistema desequilibrado em três sistemas trifásicos balanceados, denominados de sequência positiva, negativa e zero (SATO, 2015).

Podemos chamar de $\dot{a}$ o operador rotacional que ao ser aplicado a um fasor, gira-o em 120° no mesmo sentido da rotação indicada pela velocidade angular da sequência positiva, conforme mostrado na equação 1 (KINDERMANN, 1997).

$$\dot{a} = 1 \angle 120^\circ \quad (1)$$

De forma matricial, podemos definir a transformação para componentes simétricas conforme a equação 2, onde se mostra a transformação para componentes simétricas do fasor de tensão de um sistema trifásico (KINDERMANN, 1997).

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \dot{a}^2 & \dot{a} \\ 1 & \dot{a} & \dot{a}^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \dot{V}_{a0} \\ \dot{V}_{a1} \\ \dot{V}_{a2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Onde temos todas as tensões em função da fase “a”, sendo $\dot{V}_{a0}$ a componente de tensão de sequência zero, $\dot{V}_{a1}$ a componente de tensão de sequência positiva e $\dot{V}_{a2}$ a componente de tensão de sequência negativa. Em um sistema desbalanceado, realizamos o inverso da equação 2, conforme a equação 3. Do mesmo modo, podemos modelar a corrente de um sistema trifásico em componentes simétricas (KINDERMANN, 1997).

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{a0} \\ \dot{V}_{a1} \\ \dot{V}_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \dot{a}^2 & \dot{a} \\ 1 & \dot{a} & \dot{a}^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

2.5 Modelagem de um Sistema Elétrico de Potência

A fim de minimizar os efeitos causados pelas correntes de circuito no sistema, é imprescindível estimar seus valores, permitindo que os equipamentos e a proteção sejam corretamente dimensionados. Para que isso seja possível, são necessários os dados do sistema elétrico de potência, que devido a sua extensão se torna impraticável obter soluções de forma manual, devido à grande extensão e complexidade do sistema. Portanto, faz-se necessário o uso de *softwares* para executar qualquer tipo de análise no sistema elétrico (KINDERMANN, 1997).

Na modelagem de uma linha de transmissão são consideradas as características da linha, como a resistência e a indutância, que formam a impedância série da linha, e a capacitância e condutância, que formam a admitância em paralelo entre fases ou entre fases e terra (BICHELS, 2018). A resistência é diretamente ligada ao material do condutor usado, a indutância do campo magnético originado pela circulação de corrente na linha, a capacitância devido à existência de cargas elétricas entre o condutor e o solo, e a condutância que surge devido a falhas no isolamento dos componentes, mas que na maioria das vezes, pode ser ignorada na modelagem (SATO, 2015). Alguns modelos são empregados na modelagem de uma linha de transmissão, como o de parâmetros distribuídos, e os modelos de parâmetros concentrados π e T. Outro modelo empregado é o modelo com parâmetros simplificados longitudinais e são considerados somente os parâmetros série (SATO, 2015).

No estudo de curto-circuito é necessário conhecer as impedâncias de sequência da linha de transmissão, e devido à dificuldade de efetuar ensaios para estimar seus parâmetros, é levado em consideração as características do condutor

utilizado e da disposição geográfica nas torres de transmissão (KINDERMANN, 1997). A impedância de sequência positiva de uma linha de transmissão se trata da impedância normal da linha, que para se manter equilibrada, é construída com os mesmos condutores, igualmente espaçados entre si, e transpostos entre si, de modo a compensar os desequilíbrios dos campos magnéticos entre as fases, cabo de cobertura, ferragens e o solo abaixo da linha de transmissão. Por ser tratar de um elemento estático, a impedância de sequência positiva e negativa é a mesma, devido ao fato de a sequência de fase de energização e o seu funcionamento ser igual para ambas as sequências. (KINDERMANN, 1997).

Na sequência zero da linha de transmissão, as correntes de cada condutor são iguais e estão em fase, porém elas são obrigadas a retornar por um caminho diferente do que o próprio condutor da linha, retornando pelo cabo de cobertura, pelo solo diretamente abaixo do percurso da linha, e pelo solo entre o menor caminho entre o ponto de defeito e a subestação. Essa diferença em relação as impedâncias de sequência positiva e negativa, torna a impedância de sequência zero difícil de ser calculada de forma analítica, portanto pode ser estimada como uma função entre a resistividade média do solo, da altura média da linha, da frequência elétrica do sistema e da característica do condutor (KINDERMANN, 1997).

Com o objetivo de se obter as correntes de curto-circuito no local da falta, é necessário o circuito equivalente de Thévenin no ponto de defeito do sistema elétrico, sendo necessários os parâmetros do gerador como a tensão terminal e as impedâncias de sequência, e as impedâncias de sequência da linha de transmissão (BICHELS, 2018).

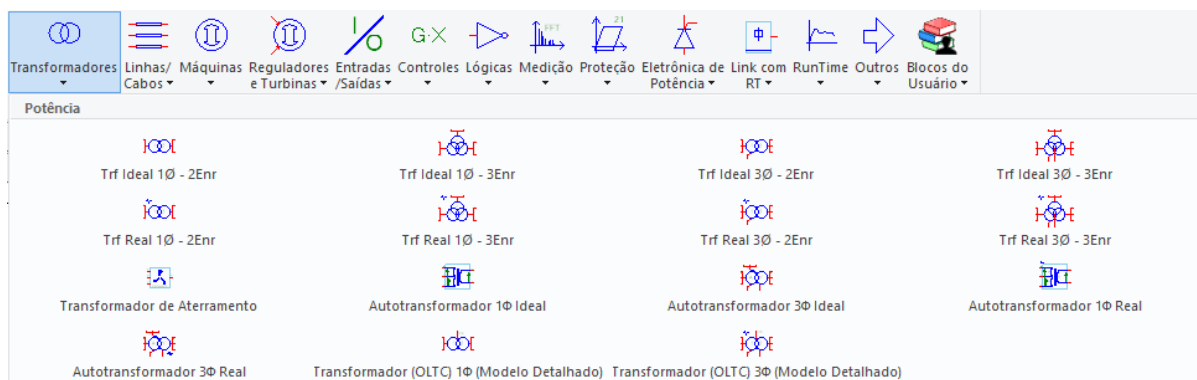
Através do estudo de curto-circuito, é possível ajustar de forma correta os relés de proteção, realizar a seleção dos fusíveis, dimensionar os disjuntores, verificar a capacidade dos cabos, transformadores, chaves, cabos para-raios, barramentos e calcular as sobretensões que ocorrerão no sistema (BICHELS, 2018), garantindo, portanto, a segurança e a eficiência da operação e a confiabilidade no atendimento aos consumidores (BICHELS, 2018).

2.6 PS SIMUL

Lançado em 2014 pela empresa CONPROVE, o *software* PS SIMUL possui a finalidade de modelar diferentes componentes dos sistemas elétricos, e simular transitórios eletromagnéticos e eletromecânicos. Sua biblioteca de componentes possui mais de 400 blocos divididos entre elementos passivos, elementos não lineares, fontes, chaves/faltas, acoplamentos, transformadores, linhas/cabos, máquinas, reguladores e turbinas, entradas e saídas com hardwares externos, controles, lógicas, medição, proteção, eletrônica de potência, link com runtime, runtime, entre outros blocos. Vários desses blocos já vem com equacionamentos e funções carregadas, facilitando seu uso e se tornando rápida as análises (PS SIMUL, 2023). Neste trabalho serão usados alguns destes blocos citados acima, e descritos posteriormente.

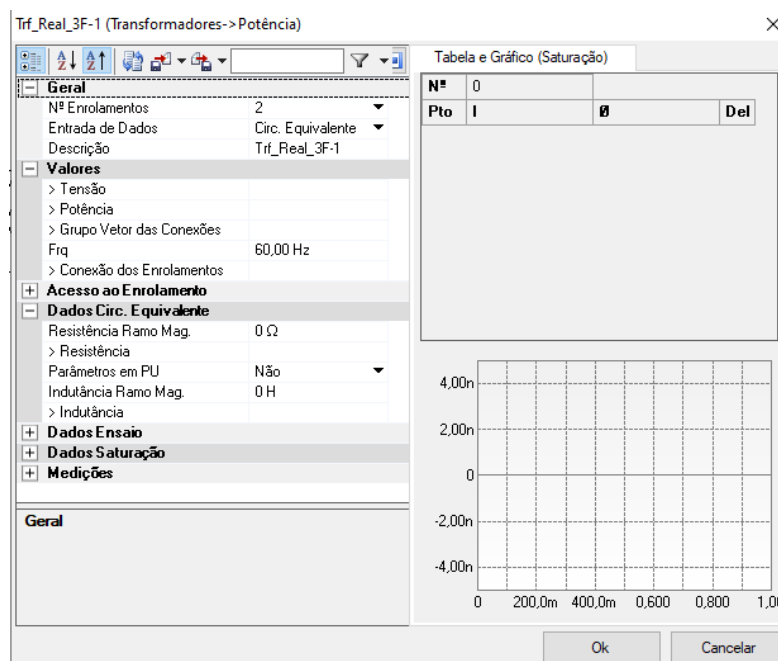
O bloco de transformadores disponibiliza modelos reais e ideais de transformadores de 2 a 5 enrolamentos, com possibilidade de acesso aos enrolamentos, possibilitando, portando, o estudo de curto entre espiras. A entrada de dados do bloco é realizada através de seu circuito equivalente ou dados de ensaios práticos realizados (PS SIMUL, 2023). A Figura 3 mostra o bloco de transformadores disponível no *software* e a Figura 4 mostra os dados de entrada necessários para configuração do componente.

Figura 3 - Bloco de Transformadores



Fonte: PS SIMUL (CONPROVE INDÚSTRIA & COMÉRCIO LTDA, 2022)

Figura 4 - Entrada de dados de um transformador trifásico

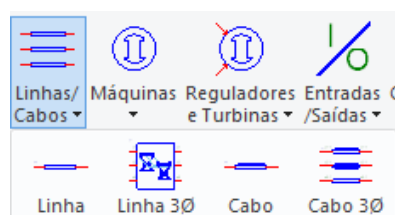


Fonte: PS SIMUL (CONPROVE INDÚSTRIA & COMÉRCIO LTDA, 2022)

Na Figura 4, observa-se que podemos alterar as configurações do componente, como a quantidade de enrolamentos, definir qual vai ser a entrada de dados, a tensão aplicada no primário e no secundário, a potência do transformador, a frequência de operação e o tipo de conexão dos enrolamentos (triângulo ou estrela). No caso de modelagem de um transformador real, é permitida a entrada de valores das impedâncias do circuito equivalente ou dados obtidos através de ensaios.

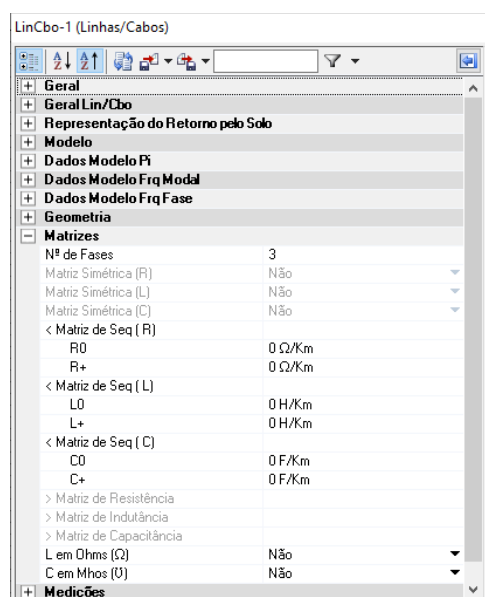
O bloco de linhas e cabos possibilita ao usuário a modelagem de linhas nos modelos já mencionados, como o modelo π , parâmetros distribuídos, entre outros, e modelos dependentes da frequência no domínio modal ou das fases. Sua entrada de dados pode ser feita através de geometria, matrizes de impedâncias ou matrizes de sequência (PS SIMUL, 2023). A Figura 5 mostra o bloco de linhas e cabos, e a Figura 6 a entrada de dados.

Figura 5 - Bloco de linhas e cabos



Fonte: PS SIMUL (CONPROVE INDÚSTRIA & COMÉRCIO LTDA, 2022)

Figura 6 - Entrada de dados do bloco linhas e cabos

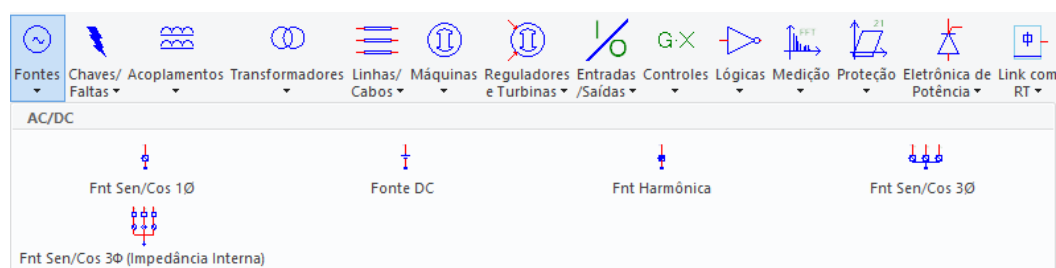


Fonte: PS SIMUL (CONPROVE INDÚSTRIA & COMÉRCIO LTDA, 2022)

A Figura 6 mostra os dados necessários para a modelagem da linha de transmissão, onde na aba geral é possível alterar o bloco que será usado, linha ou cabo, na aba Geral Lin/Cbo é possível escolher se a linha é transposta, o modelo que será usado parâmetros distribuídos, a frequência de operação, se a entrada de dados será do tipo geometria, matriz RLC, ou matriz de sequência. Na aba Matrizes é necessário definir o número de fases da linha, e os valores de impedância de sequência, como resistência de sequência positiva e zero, indutância de sequência positiva e zero, e capacitância de sequência positiva e zero, de acordo com as características da linha de transmissão.

O gerador é modelado como uma fonte, portanto, através do bloco de fontes, pode-se escolher os diferentes tipos de fontes disponíveis, conforme a Figura 7 mostra.

Figura 7 - Bloco de Fontes



Fonte: PS SIMUL (CONPROVE INDÚSTRIA & COMÉRCIO LTDA, 2022)

No estudo é usado uma fonte de tensão alternada trifásica e sua entrada de dados é feita através dos dados de tensão, frequência e defasagem entre as fases, conforme mostra a Figura 8.

Figura 8 - Entrada de dados da fonte

Fnt_Sen-1 (Fontes->AC/DC)

Geral

Tipo Geração	Seno
Tipo	V
Nº Fases	3
> Entradas Externas	
Descrição	Fnt_Sen-1
Aterrada	Sim

Valores

Tempo Inicial	-∞ s
Tempo Final	+∞ s
Offset	0 V
Módulo RMS	100,0 V
Frequência	60,00 Hz
Ângulo	0 °

Medições

Fonte: PS SIMUL (CONPROVE INDÚSTRIA & COMÉRCIO LTDA, 2022)

As faltas são modeladas através de chaves, disponíveis no conjunto de blocos Chaves/Faltas, e sua entrada de dados é feita conforme a Figura 9. A chave pode ser configurada de acordo com o estudo proposto, onde é possível determinar o tempo de abertura e quais fases serão abertas.

Figura 9 - Entrada de dados da chave

Chv_Tempo-1 (Chaves/Faltas-> Geral)

Geral	
Nº Fases	3
Hab. Circ. Snubber	Não
Descrição	Chv_Tempo-1
Controle Fechamento	Tempo (Interno)
Chave Real	Não
Valores	
RSnubber	0 Ω
Ron	1,00 m Ω
Roff	oo Ω
Lon	0 H
Forçar Abertura	Não
CSnubber	0 F
Corrente Máxima para Abrir	0 A
Dados Chaveamentos	
Valores Iguais	Não
> Dados Fase C	
> Dados Fase B	
> Dados Fase A	
Medições	

Fonte: PS SIMUL (CONPROVE INDÚSTRIA & COMÉRCIO LTDA, 2022)

No conjunto de blocos de transformadores, estão disponíveis os equipamentos de medição e proteção necessários na modelagem de um sistema de potência. A Figura 10 mostra a entrada de dados de um conjunto de transformador de corrente e transformador de potencial trifásico. Nele é possível alterar os valores de relação de transformação de ambos os transformadores, definir o tipo de transformador, além de alterar os valores de impedância dele, ficando mais próximo dos equipamentos reais.

Figura 10 - Entrada de dados dos transformadores de corrente e potencial

TP_TC_Ideal-2 (Transformadores-> Medição/Proteção)

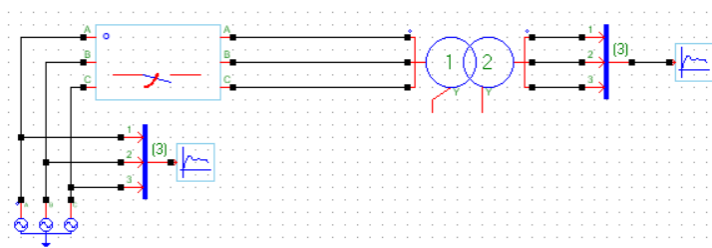
Geral	
RTP	10,00
RTC	10,00
Nº Fases	3
Descrição	TP_TC_Ideal-2
Dados TP Capacitivo	
TP Capacitivo	Não
Indutância de Compensação	0 H
Capacitância de Entrada 2 (C2)	0 F
Capacitância de Entrada 1 (C1)	0 F
Medições	

Fonte: PS SIMUL (CONPROVE INDÚSTRIA & COMÉRCIO LTDA, 2022)

Outro bloco utilizado é o bloco Sinais p/ Run Time, no conjunto Link com RT, que permite obter a oscilografia dos sinais presentes na rede.

Na Figura 11, foi modelada uma rede trifásica pequena, e obtido os sinais de tensão no secundário do transformador de potência com base em um exemplo disponível no PS Simul (CONPROVE INDÚSTRIA & COMÉRCIO LTDA, 2022). A fonte trifásica foi usada como geração e configurada em 138 kV, a chave trifásica foi configurada para abertura das três fases em 30 ms, e o transformador configurado com relação de transformação de 5 e 100MVA de potência.

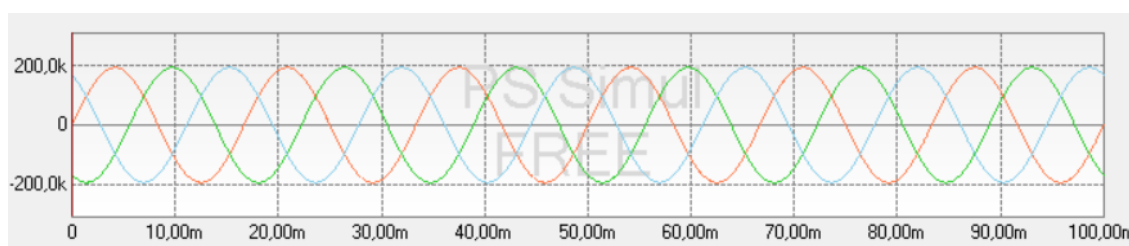
Figura 11. Simulação de um circuito trifásico com chaveamento da geração



Fonte: Autoria própria

O secundário do transformador por ser mantido sem carga conectada, não há sinal de corrente, apenas tensão nos terminais do secundário do transformador de potência. A simulação ocorreu por um período de 100 ms, e o sinal de tensão (kV) gerado pela fonte trifásica é apresentado na Figura 12. Conforme esperado, a chave se abriu no instante de tempo de 30 ms, e o sinal de tensão lido no secundário do transformador é apresentado na Figura 13.

Figura 12. Sinal de tensão da fonte trifásica



Fonte: Autoria própria

Figura 13. Sinal de tensão no secundário do transformador de potência



Fonte: Autoria própria

3 DESENVOLVIMENTO

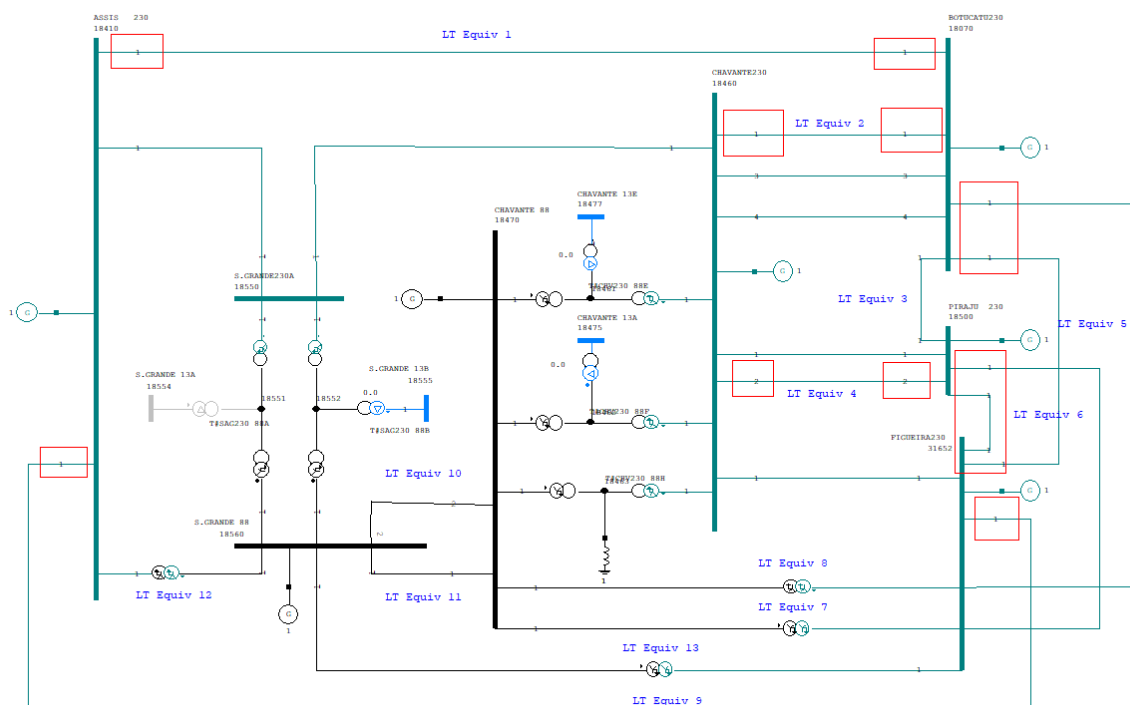
Nesta sessão será abordado o desenvolvimento do estudo, demonstrando o sistema a ser modelado, os parâmetros de cada componente modelado, e a modelagem dos curtos-circuitos nas barras das subestações.

3.1 Sistema Elétrico Simulado

O Desenvolvimento do trabalho foi baseado em parte de uma rede de transmissão de energia elétrica em 230kV, presente na mesorregião de Assis e Bauru, no estado de São Paulo, chegando até o estado do Paraná. O sistema envolve 6 unidades geradoras de energia, sendo elas fornecedoras de energia elétrica com tensões em 230kV e 88kV. Os municípios fornecedores de energia em 230kV para o sistema são Assis, Piraju, Botucatu e Chavantes, ambas nos estados de São Paulo, e o município de Figueira no estado do Paraná. No fornecimento de energia em 88kV para o sistema, temos os municípios de Salto Grande e outra unidade geradora em Chavantes, no estado de São Paulo. As unidades geradoras em 88kV possuem transformadores elevadores de tensão para 230kV, transmitindo energia para o sistema e se conectando ao sistema interligado nacional, através de linhas de transmissão.

O estudo é baseado segundo o caso 3Q2018 – “Setembro Média”, da base de dados do ONS nos arquivos de curto-circuito e fluxo de potência, conforme é mostrado na Figura 14.

Figura 14. Caso 3Q 2018 – “Setembro Médio”



Fonte: Autoria própria

As linhas de transmissão foram modeladas através das impedâncias de sequência, incluindo os parâmetros elétricos mútuos para linhas.

Para o estudo, foram modelados curtos-circuitos distintos na barra da SE Assis 230kV, SE Chavantes 230kV, SE Botucatu 230kV, SE Pirajú 230kV e SE Figueira 230kV, e aquisitado o valor da magnitude da corrente de curto-circuito total na respectiva barra e a contribuição do sistema para o curto-circuito.

3.2 Linhas de Transmissão

As linhas de transmissão foram modeladas de acordo com dados característicos fornecidos por uma empresa do setor elétrico, por haver realizado previamente um estudo neste sistema, e com os dados oriundos do programa Anafas. A Tabela 1, mostra os valores de impedância de sequência que foram parametrizados nos blocos de linhas de transmissão, contendo os valores de impedância de sequência positiva resistiva ($R1$) e indutiva ($X1$), e de sequência zero resistiva ($R0$) e indutiva ($X0$).

Tabela 1 – Valores de impedância de sequência das linhas de transmissão

Linha de Transmissão	Distância [km]	Sequência Positiva		Sequência Zero	
		R1 [Ω]	X1 [Ω]	R0 [Ω]	X0 [Ω]
LT 230kV – Assis/Salto Grande	61,500	4,036	23,162	26,597	89,617
LT 230kV – Salto Grande/Chavantes	44,300	2,971	16,530	19,477	64,681
LT 230kV – Chavantes/Piraju	41,800	2,737	15,633	18,397	59,507
LT 230kV – Chavantes/Botucatu	136,000	13,331	70,563	70,938	195,767
LT 230kV – Chavantes/Botucatu	136,000	9,710	51,275	66,294	179,341
LT 230kV – Chavantes/Figueira	40,000	10,633	54,434	40,045	147,750

Fonte: Autoria própria

A Tabela 2, mostra os valores de impedância mútua resistiva (R_m) e indutiva (X_m) entre as linhas de transmissão que foram utilizadas para o estudo.

Tabela 2 – Valores de impedância mútua das linhas de transmissão

Entre linhas	km	Sequência Zero	
		R_m [Ω]	X_m [Ω]
LT 230kV – Assis/Salto Grande	61,500	0,757	1,263
LT 230kV – Salto Grande/Chavantes	44,300	0,757	1,263

Fonte: Autoria própria

Foi utilizado equivalentes das linhas de transmissão do sistema para a obtenção de um modelo de sistema simplificado que seja o mais próximo do sistema real possível, buscando uma boa confiabilidade no resultado do estudo. Os valores para essa representação são apresentados na Tabela 3, contendo os valores de impedância de sequência positiva resistiva (R_1) e indutiva (X_1), e de sequência zero resistiva (R_0) e indutiva (X_0).

Tabela 3 – Valores de impedância de sequência das linhas de transmissão equivalentes

Linha de Transmissão Equivalente	R1 [Ω]	X1 [Ω]	R0 [Ω]	X0 [Ω]
LT – Assis 230kV/Botucatu 230kV	252,55	1035,04	2154,35	9541,20
LT – Chavantes 230kV/Botucatu 230kV	52899,94	52899,94	-25,55	-167,64
LT – Botucatu 230kV/Piraju 230kV	8,04	42,63	239,99	392,22
LT – Chavantes 230kV/Piraju 230kV	52899,94	52899,94	-42,06	-807,09
LT – Botucatu 230kV/Figueira 230kV	120,65	428,54	49549,31	59882,80
LT – Piraju 230kV/Figueira 230kV	561,53	1536,37	1206120,00	1026260,00
LT – Chavantes 88kV/Piraju 230kV	1843,14	2511,11	1909690,00	2290570,00
LT – Botucatu 230kV/Chavantes 88kV	295,77	676,53	3016,62	13024,87
LT – Assis 230kV/Figueira 230kV	30,73	134,20	226,69	777,52
LT – Salto Grande 88kV/Chavantes 88kV	130,14	249,99	-277,09	-1241,82
LT – Salto Grande 88kV/Chavantes 88kV	73,37	158,43	186,36	604,80
LT – Assis 230kV/Salto Grande 88kV	116,65	264,00	534,66	1691,37
LT – Salto Grande 88kV/Figueira 230kV	181,66	616,76	15492,45	28740,57

Fonte: Autoria própria

3.3 Fontes de Geração

Para a modelagem das fontes de geração, foi utilizado um modelo de fonte equivalente, que consiste em uma fonte de tensão em série com sua impedância. A Tabela 4 mostra os valores de impedância de sequência, utilizados nas fontes de geração, com os valores de impedância de sequência positiva, resistiva (R1) e indutiva (X1), e os valores de impedância de sequência zero, resistiva (R0) e indutiva (X0).

Tabela 4 – Equivalentes das fontes de geração

Subestação	R1 [Ω]	X1 [Ω]	R0 [Ω]	X0 [Ω]
SE Assis 230kV	0,66	10,61	0,52	7,35
SE Botucatu 230kV	4,11	25,18	2,75	21,57
SE Piraju 230kV	4,37	75,69	1,92	30,91
SE Figueira 230kV	1,71	13,81	3,56	18,89
SE Salto Grande 88kV	10,69	77,30	1,46	22,13
SE Chavantes 230kV	0,68	39,42	0,35	12,34
SE Chavantes 88kV	39,86	207,30	74,99	341,01

Fonte: Autoria Própria

3.4 Transformadores

No sistema analisado foram modelados cinco transformadores de potência, responsáveis por elevar a tensão gerada nas unidades geradoras em 88kV para 230kV, equalizando o nível de tensão no sistema. A Tabela 5, mostra as características dos transformadores presentes no sistema. O transformador foi modelado utilizando a impedância resistiva (R1) e indutiva (X1) por enrolamento.

Tabela 5 – Características dos transformadores de potência

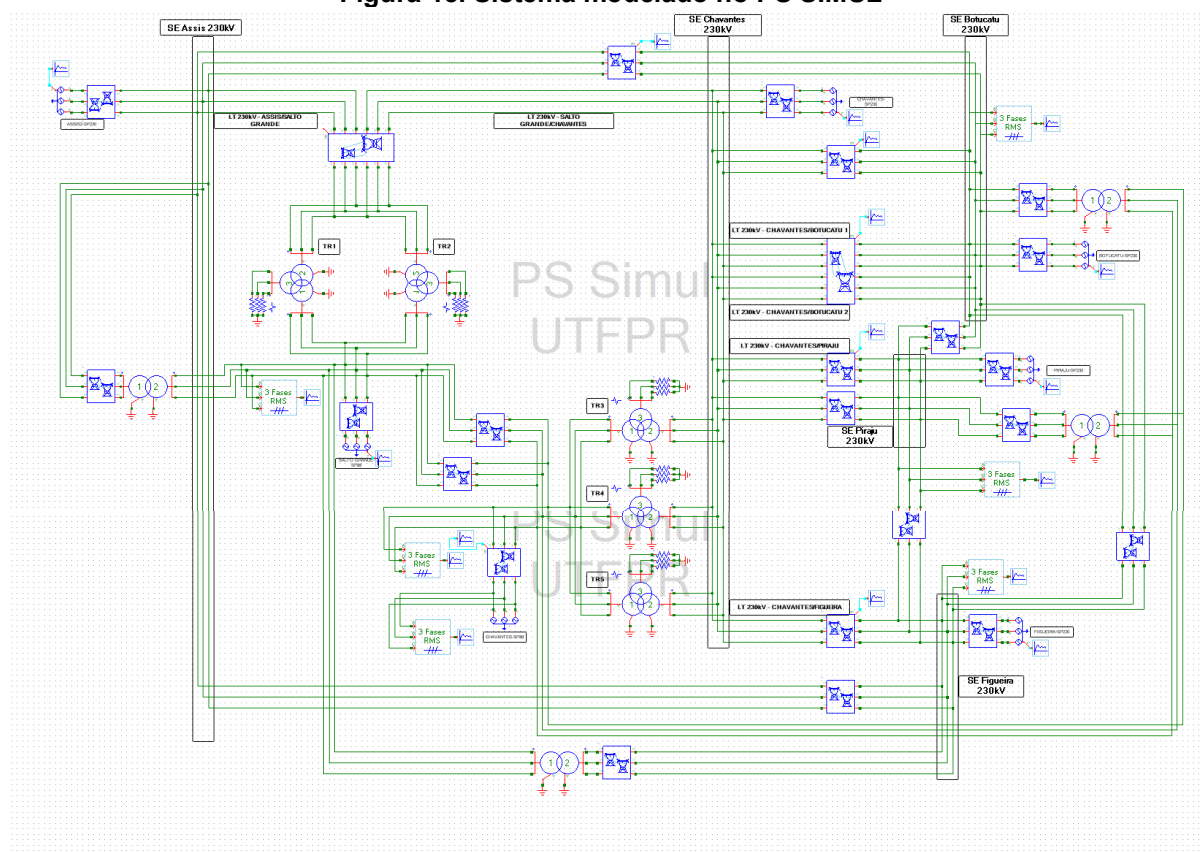
Transformador	Enrolamento	Tensão [kV]	Ligação	R1 [pu]	X1 [pu]
TR1 – Salto Grande	1	230	Y	0,005019	0,200600
TR1 - Salto Grande	2	88	Y	-0,000230	-0,017400
TR1 - Salto Grande	3	13,8	D	0,005041	0,243300
TR2 - Salto Grande	1	230	Y	0,005019	0,200600
TR2 - Salto Grande	2	88	Y	-0,000230	-0,017400
TR2 - Salto Grande	3	13,8	D	0,005041	0,243300
TR1 - Chavantes	1	88	Y	-0,000470	0,015000
TR1 - Chavantes	2	230	Y	0,007853	0,251300
TR1 - Chavantes	3	13,8	D	0,012241	0,391700
TR2 - Chavantes	1	88	Y	-0,000470	0,015000
TR2 - Chavantes	2	230	Y	0,007853	0,251300
TR2 - Chavantes	3	13,8	D	0,012241	0,391700
TR3 - Chavantes	1	88	Y	-0,000470	0,015000
TR3 - Chavantes	2	230	Y	0,007853	0,251300
TR3 - Chavantes	3	13,8	D	0,012241	0,391700

Fonte: Autoria Própria

3.5 Sistema modelado no PS SIMUL

A Figura 15 mostra o sistema modelado no PS SIMUL, conforme a Figura 14, em seu estado estável de operação, ou seja, sem nenhum curto-circuito em nenhum ponto do sistema.

Figura 15. Sistema modelado no PS SIMUL



Fonte: Autoria Própria

Os curto-circuitos foram modelados em 10 tipos diferentes, sendo eles monofásicos, fase A e a terra, fase B e a terra, fase C e a terra; bifásicos puro, fase AB, fases BC e fases CA; bifásicos e a terra, fases AB e a terra, fases BC e a terra, fases CA e a terra; e o curto-circuito trifásico. Ambos os curto-circuitos foram simulados no *software* ANAFAS e PS SIMUL para comparar se a magnitude da corrente de curto-circuito nas barras em estudo, e as correntes de contribuição oriundas das linhas de transmissão possuem a mesma ordem de grandeza, de acordo com a metodologia apresentada.

4 RESULTADOS

De acordo com a metodologia apresentada, serão apresentados os resultados obtidos através das simulações nos dois *softwares* em estudo, sendo modelados todos os diferentes tipos de curto-circuito nas barras de 230kV, sendo elas na SE Assis 230kV, SE Chavantes 230kV, SE Botucatu 230kV, SE Piraju 230kV e SE Assis 230kV.

Com a obtenção das magnitudes das correntes de curto-circuito em ambos os *softwares*, torna-se possível realizar uma análise comparativa entre os valores obtidos. Para essa comparação, pode-se empregar o conceito de erro relativo, que consiste na razão entre a diferença dos valores obtidos e o valor de referência ditado pelo ANAFAS, expressa em forma percentual. Portanto, é possível quantificar o grau de concordância entre os resultados do PS SIMUL e do ANAFAS, verificando se os valores simulados no PS SIMUL estão em conformidade com aqueles adquiridos pelo ANAFAS (CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA, 2024). No Anexo A, é apresentado as tensões nos barramentos no período pré-falta, e no Anexo B as impedâncias configuradas nos blocos de linha de transmissão e transformadores.

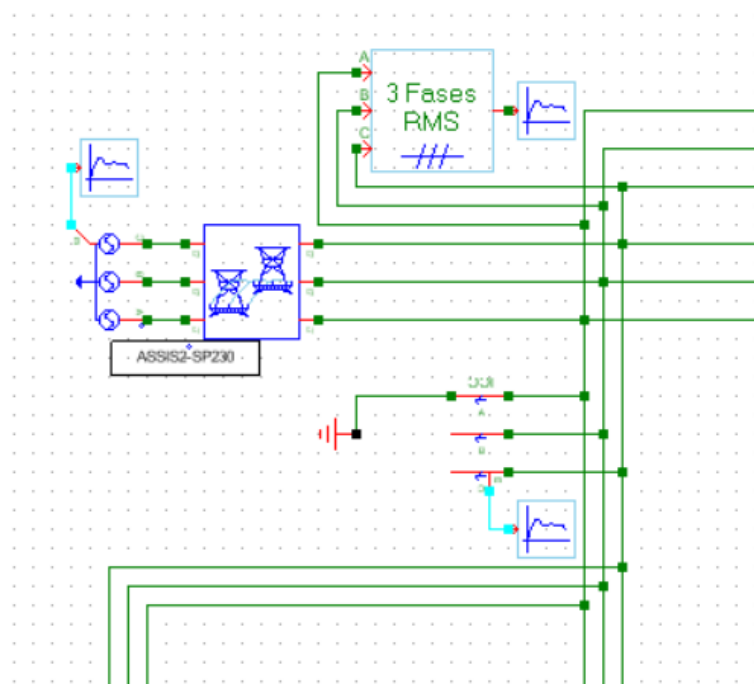
4.1 Curto-circuito na barra da SE Assis 230Kv

Foram modelados curto-circuito monofásicos, bifásicos com envolvimento do terra, bifásicos, e trifásicos na barra da SE Assis 230kV, sendo adquiridos os valores de corrente de curto-circuito total na barra, e as correntes de contribuição oriundas das linhas de transmissão.

4.1.1 Curto-circuito Monofásico na barra da SE Assis 230kV

A Figura 16, representa a modelagem de um curto monofásico entre a fase A e a terra na barra da SE Assis 230kV, sendo inserido um ponto de medição de corrente e aterrada a fase A, simulando um curto monofásico.

**Figura 16. Modelagem de um curto-circuito monofásico na barra da SE Assis 230kV pelo PS
SIMUL**



Fonte: Autoria própria

Os curto-circuitos monofásicos aplicados na barra SE Assis 230kV foram realizados considerando a aplicação de três faltas monofásicas distintas: uma entre a fase A e a terra, outra entre a fase B e a terra, e a terceira entre a fase C e a terra, em ambos os *softwares*. A Tabela 6 apresenta os valores da corrente de curto-circuito total na barra da SE Assis 230kV, e a Tabela 7 as correntes de contribuição ao curto-circuito oriundas das linhas de transmissão aquisitados pelo ANAFAS.

**Tabela 6 – Corrente de curto-circuito total monofásico na barra da SE Assis 230kV pelo
ANAFAS**

Monofásico $\phi A + \text{Terra}$ [A]	Monofásico $\phi B + \text{Terra}$ [A]	Monofásico $\phi C + \text{Terra}$ [A]
17242,20	17242,40	17242,40

Fonte: Autoria própria

Tabela 7 – Correntes de contribuição ao curto-circuito monofásico na barra da SE Assis 230kV pelo ANAFAS

Linha de Transmissão	Monofásico øA	Monofásico øB	Monofásico øC
	+ Terra [A]	+ Terra [A]	+ Terra [A]
LT 230kV – Assis/Salto Grande	2191,30	2191,30	2191,30
LT 230kV – Chavantes/Salto Grande	1696,70	1696,70	1696,70
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 1	148,70	148,70	148,70
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 2	202,80	202,80	202,80
LT 230kV – Chavantes/Piraju	367,00	367,00	367,00
LT 230kV – Chavantes/Figueira	218,90	218,90	218,90

Fonte: Autoria própria

A Tabela 8 apresenta os valores da corrente de curto-circuito total na barra, e a Tabela 9 as correntes de contribuição ao curto-circuito oriundas das linhas de transmissão adquiridas pelo PS SIMUL.

Tabela 8 – Corrente de curto-circuito total monofásico na barra da SE Assis 230kV pelo PS SIMUL

Monofásico øA + Terra [A]	Monofásico øB + Terra [A]	Monofásico øC + Terra [A]
16949,35	16963,49	16963,49

Fonte: Autoria própria

Tabela 9 – Correntes de contribuição curto-circuito monofásico na barra da SE Assis 230kV pelo PS SIMUL

Linha de Transmissão	Monofásico øA	Monofásico øB	Monofásico øC
	+ Terra [A]	+ Terra [A]	+ Terra [A]
LT 230kV – Assis/Salto Grande	2071,82	2071,82	2071,82
LT 230kV – Chavantes/Salto Grande	1697,06	1697,06	1697,06
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 1	166,1	166,03	165,96
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 2	221,89	221,75	221,68
LT 230kV – Chavantes/Piraju	412,24	412,24	412,24
LT 230kV – Chavantes/Figueira	244,23	243,95	244,16

Fonte: Autoria própria

A comparação dos resultados se deu pela análise do erro relativo entre o resultado obtido pelo ANAFAS e PS SIMUL, considerando que o ANAFAS é a referência. As Tabelas 10 e 11, representam o erro relativo da corrente de curto-

circuito total na barra e as contribuições das linhas de transmissão ao curto respectivamente.

Tabela 10 – Erro relativo entre as correntes de curto-circuito monofásico na barra da SE Assis 230kV

Monofásico ϕA + Terra [%]	Monofásico ϕB + Terra [%]	Monofásico ϕC + Terra [%]
1,70	1,62	1,62

Fonte: Autoria própria

Tabela 11 – Erro relativo entre as correntes de contribuição ao curto-circuito monofásico na barra da SE Assis 230kV

Linha de Transmissão	Monofásico ϕA + Terra [%]	Monofásico ϕB + Terra [%]	Monofásico ϕC + Terra [%]
LT 230kV – Assis/Salto Grande	5,45	5,45	5,45
LT 230kV – Chavantes/Salto Grande	0,02	0,02	0,02
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 1	11,7	11,65	11,61
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 2	9,41	9,34	9,31
LT 230kV – Chavantes/Piraju	12,33	12,33	12,33
LT 230kV – Chavantes/Figueira	11,57	11,44	11,54

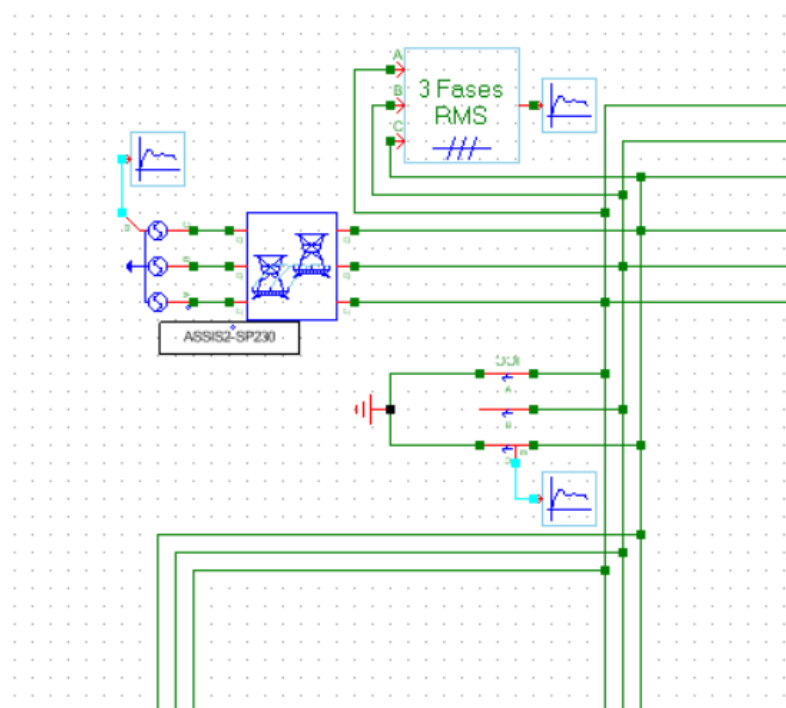
Fonte: Autoria própria

Com base nos valores adquiridos, pode-se notar uma diferença entre os resultados obtidos em ambos os *softwares* permitindo uma análise dessa diferença. Nota-se que o erro entre as correntes de curto-circuito total na barra foi baixo, menor que 2%. Para as correntes de contribuição observa-se um erro maior que o obtido na corrente de curto-circuito total, sendo necessário uma investigação maior sobre a causa da elevação da taxa de erro ou a utilização de um outro modelo de linha de transmissão.

4.1.2 Curto-circuito Bifásico Terra na barra da SE Assis 230kV

Para as faltas bifásicas envolvendo a terra aplicadas na barra SE Assis 230kV, foram curto-circuitadas duas fases e aterrada uma delas, sendo aquisitado os valores da magnitude das correntes em ambos os *softwares*, conforme modelado e apresentado na Figura 17.

Figura 17. Modelagem de um curto-circuito bifásico com a terra na barra da SE Assis 230kV no PS SIMUL



Fonte: Autoria própria

As correntes de curto-circuitos bifásico com envolvimento da terra modelado no ANAFAS estão apresentados nas Tabelas 12 e 13, sendo a corrente de curto-circuito total na barra SE Assis 230kV e as correntes de contribuição das linhas de transmissão respectivamente.

Tabela 12 – Corrente de curto-circuito total bifásicos com a terra na barra da SE Assis 230kV pelo ANAFAS

Bifásico ϕAB + Terra [A]	Bifásico ϕBC + Terra [A]	Bifásico ϕCA + Terra [A]
16808,00	16808,00	16887,20

Fonte: Autoria própria

Tabela 13 – Correntes de contribuição ao curto-circuito bifásico com a terra na barra da SE Assis 230kV pelo ANAFAS

Linha de Transmissão	Bifásico $\phi AB +$	Bifásico $\phi BC +$	Bifásico $\phi CA +$
	Terra [A]	Terra [A]	Terra [A]
LT 230kV – Assis/Salto Grande	2479,30	2479,30	2424,10
LT 230kV – Chavantes/Salto Grande	1995,2	1995,20	1947,90
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 1	182,90	182,90	179,10
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 2	250,70	250,70	246,60
LT 230kV – Chavantes/Piraju	449,50	449,50	440,60
LT 230kV – Chavantes/Figueira	273,70	273,70	270,70

Fonte: Autoria própria

As Tabelas 14 e 15 apresentam os curto-circuitos bifásicos com envolvimento da terra aplicado na barra SE Assis 230kV modelados no PS SIMUL, sendo a corrente de curto-circuito total e as correntes de contribuição das linhas de transmissão respectivamente.

Tabela 14 – Corrente de curto-circuito total bifásicos com a terra na barra da SE Assis 230kV pelo PS SIMUL

Bifásico $\phi AB +$ Terra [A]	Bifásico $\phi BC +$ Terra [A]	Bifásico $\phi CA +$ Terra [A]
16631,15	16638,22	16737,22

Fonte: Autoria própria

Tabela 15 – Correntes de contribuição ao curto-circuito bifásico com a terra na barra da SE Assis 230kV pelo PS SIMUL

Linha de Transmissão	Bifásico $\phi AB +$	Bifásico $\phi BC +$	Bifásico $\phi CA +$
	Terra [A]	Terra [A]	Terra [A]
LT 230kV – Assis/Salto Grande	2333,45	2397,09	2333,45
LT 230kV – Chavantes/Salto Grande	2043,54	2043,54	2008,18
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 1	191,98	191,98	187,10
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 2	261,42	261,35	255,90
LT 230kV – Chavantes/Piraju	470,93	470,93	461,74
LT 230kV – Chavantes/Figueira	287,30	287,37	284,68

Fonte: Autoria própria

O erro relativo percentual entre as modelagens no *software* ANAFAS e PS SIMUL para os curtos- circuitos bifásicos com envolvimento da terra, é apresentado

na Tabela 16, sendo a corrente de curto que passa pela barra, e a Tabela 17, para as correntes de contribuição ao curto-circuito oriunda das linhas de transmissão.

Tabela 16 – Erro relativo entre as correntes curto-circuito total bifásico com a terra na barra da SE Assis 230kV

Bifásico $\phi AB + \text{Terra}$ [%]	Bifásico $\phi BC + \text{Terra}$ [%]	Bifásico $\phi CA + \text{Terra}$ [%]
1,05	1,01	0,89

Fonte: Autoria própria

Tabela 17 – Erro relativo entre as correntes de contribuição ao curto-circuito bifásico com a terra na barra da SE Assis 230kV

Linha de Transmissão	Bifásico $\phi AB + \text{Terra}$ [%]	Bifásico $\phi BC + \text{Terra}$ [%]	Bifásico $\phi CA + \text{Terra}$ [%]
LT 230kV – Assis/Salto Grande	5,88	3,32	3,74
LT 230kV – Chavantes/Salto Grande	2,42	2,42	3,09
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 1	4,96	4,96	4,47
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 2	4,27	4,25	3,77
LT 230kV – Chavantes/Piraju	4,77	4,77	4,80
LT 230kV – Chavantes/Figueira	4,97	4,99	5,16

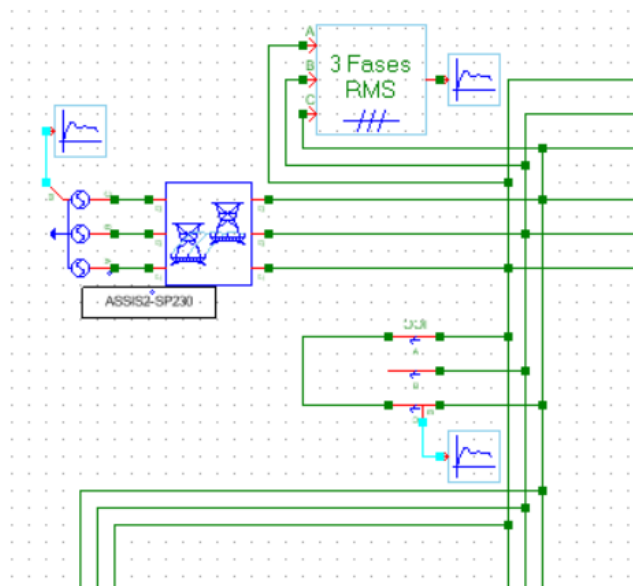
Fonte: Autoria própria

Comparando os resultados obteve-se um erro de aproximadamente 1% para a corrente de curto-circuito total adquirido pelo PS SIMUL, e abaixo de 6% para as correntes de contribuição ao curto circulantes pelas linhas de transmissão, um erro menor que o obtido pela modelagem dos curto-circuitos monofásicos.

4.1.3 Curto-circuito Bifásico na barra da SE Assis 230kV

Para as faltas bifásicas na barra SE Assis 230kV, foi-se curto-circuitadas duas fases e aquisitado os valores da magnitude das correntes, conforme modelado e apresentado na Figura 18.

Figura 18. Modelagem de um curto-circuito bifásico na barra da SE Assis 230kV pelo PS SIMUL



Fonte: Autoria própria

Os curto-circuitos bifásicos modelados no ANAFAS estão apresentados nas Tabelas 18 e 19, sendo a corrente de curto-circuito total na barra SE Assis 230kV e as correntes de contribuição das linhas de transmissão respectivamente.

Tabela 18 – Corrente de curto-circuito total bifásico na barra da SE Assis 230kV pelo ANAFAS

Bifásico ϕAB [A]	Bifásico ϕBC [A]	Bifásico ϕCA [A]
14172,40	14172,40	14172,40

Fonte: Autoria própria

Tabela 19 – Correntes de contribuição ao curto-circuito bifásico na barra da SE Assis 230kV pelo ANAFAS

Linha de Transmissão	Bifásico ϕAB [A]	Bifásico ϕBC [A]	Bifásico ϕCA [A]
LT 230kV – Assis/Salto Grande	2305,70	2305,70	2305,70
LT 230kV – Chavantes/Salto Grande	1883,60	1883,60	1883,60
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 1	175,50	175,50	175,50
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 2	241,50	241,50	241,50
LT 230kV – Chavantes/Piraju	431,10	431,10	431,10
LT 230kV – Chavantes/Figueira	265,30	265,30	265,30

Fonte: Autoria própria

A Tabela 20 apresenta a corrente de curto-circuito total modelados no PS SIMUL e a Tabela 21 as correntes de contribuição ao curto-circuito na barra da SE Assis 230kV circulantes pelas linhas de transmissão.

Tabela 20 – Corrente de curto-circuito total bifásico na barra da SE Assis 230kV pelo PS SIMUL

Bifásico ϕAB [A]	Bifásico ϕBC [A]	Bifásico ϕCA [A]
14163,35	14177,49	14163,35

Fonte: Autoria própria

Tabela 21 – Correntes de contribuição ao curto-circuito bifásico na barra da SE Assis 230kV pelo PS SIMUL

Linha de Transmissão	Bifásico ϕAB [A]	Bifásico ϕBC [A]	Bifásico ϕCA [A]
LT 230kV – Assis/Salto Grande	2234,46	2234,46	2234,46
LT 230kV – Chavantes/Salto Grande	1951,61	1951,61	1951,61
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 1	179,39	179,46	179,46
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 2	246,85	246,85	246,99
LT 230kV – Chavantes/Piraju	440,53	439,82	439,82
LT 230kV – Chavantes/Figueira	273,51	273,65	273,72

Fonte: Autoria própria

Para a corrente de curto-circuito total, o erro relativo percentual entre os resultados adquiridos no PS SIMUL e no Anafas é apresentado na Tabela 22, e o erro relativo percentual das correntes de contribuição ao curto-circuito é apresentado na Tabela 23.

Tabela 22 – Erro relativo entre as correntes de curto-circuito total bifásico na barra da SE Assis 230kV

Bifásico ϕAB [%]	Bifásico ϕBC [%]	Bifásico ϕCA [%]
0,06	0,04	0,06

Fonte: Autoria própria

Tabela 23 – Erro relativo entre as correntes de contribuição ao curto-circuito bifásico na barra da SE Assis 230kV

Linha de Transmissão	Bifásico ϕAB	Bifásico ϕBC	Bifásico ϕCA
	[%]	[%]	[%]
LT 230kV – Assis/Salto Grande	3,09	3,09	3,09
LT 230kV – Chavantes/Salto Grande	3,61	3,61	3,61
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 1	2,22	2,26	2,26
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 2	2,22	2,22	2,27
LT 230kV – Chavantes/Piraju	2,19	2,02	2,02
LT 230kV – Chavantes/Figueira	3,09	3,15	3,17

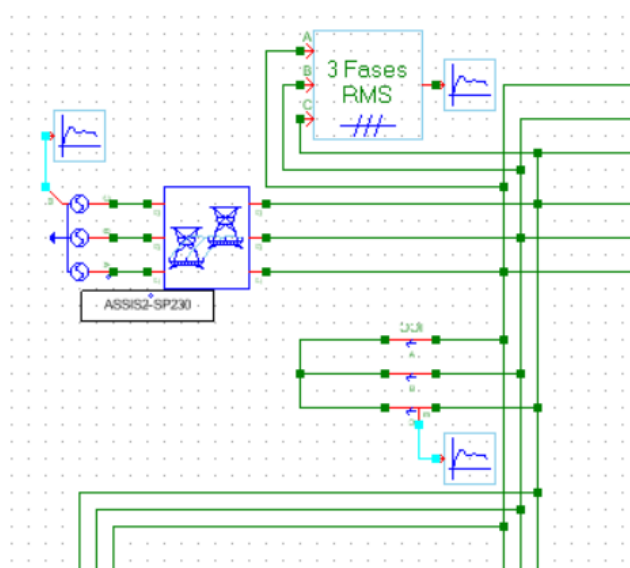
Fonte: Autoria própria

Os resultados de corrente de curto-circuito total foram próximos, com um erro relativo percentual de aproximadamente 0,1%, condizente com o esperado no ANAFAS. A taxa de erro aumenta para as correntes de contribuição, porém sem influência na corrente de curto-circuito total na barra.

4.1.4 Curto-circuito Trifásico na barra da SE Assis 230kV

O curto-circuito trifásico aplicado na barra SE Assis 230kV foi modelado circuitando as três fases, e aquisitando o valor de corrente de curto-circuito total na barra, e a contribuição das linhas de transmissão ao curto, conforme a Figura 19.

Figura 19. Modelagem de um curto-circuito trifásico na barra da SE Assis 230kV pelo PS SIMUL



Fonte: Autoria própria

A magnitude da corrente de curto-circuito total na barra da SE Assis 230kV aquiritada pela simulação no ANAFAS está presente na Tabela 24, e as correntes de contribuição ao curto vinda pelas linhas de transmissão de está representada na Tabela 25.

Tabela 24 – Corrente de curto-circuito total trifásico na barra da SE Assis 230kV pelo ANAFAS

Trifásico ϕABC [A]
16364,90
Fonte: Autoria própria

Tabela 25 – Correntes de contribuição ao curto-circuito trifásico na barra da SE Assis 230 kV pelo ANAFAS

Linha de Transmissão	Trifásico ϕABC [A]
LT 230kV – Assis/Salto Grande	2662,40
LT 230kV – Chavantes/Salto Grande	2175,00
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 1	202,70
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 2	278,90
LT 230kV – Chavantes/Piraju	497,80
LT 230kV – Chavantes/Figueira	306,30
Fonte: Autoria própria	

As Tabelas 26 apresenta a corrente de curto-circuito total na barra da SE Assis 230kV e a Tabela 27 as correntes de contribuição das linhas de transmissão ao curto-circuito, aquiritado pela simulação no PS SIMUL.

Tabela 26 – Corrente de curto-circuito total trifásico na barra da SE Assis 230kV pelo PS SIMUL

Trifásico ϕABC [A]
16369,52
Fonte: Autoria própria

Tabela 27 – Correntes de contribuição ao curto-circuito trifásico na barra da SE Assis 230kV pelo PS SIMUL

Linha de Transmissão	Trifásico ϕABC [A]
LT 230kV – Assis/Salto Grande	2580,94
LT 230kV – Chavantes/Salto Grande	2248,60
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 1	207,25
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 2	285,18
LT 230kV – Chavantes/Piraju	508,41
LT 230kV – Chavantes/Figueira	315,94

Fonte: Autoria própria

As Tabelas 28 e 29 apresentam o erro relativo resultante nas simulações no ANAFAS e no PS SIMUL para a corrente de curto-circuito total e as correntes de contribuição circulantes pelas linhas de transmissão na barra da SE Assis 230kV.

Tabela 28 – Erro relativo entre a corrente de curto-circuito total trifásico na barra SE Assis 230kV

Trifásico ϕABC [%]
0,03

Fonte: Autoria própria

Tabela 29 – Erro relativo entre as correntes de contribuição ao curto-circuito trifásico na barra da SE Assis 230kV

Linha de Transmissão	Trifásico ϕABC [%]
LT 230kV – Assis/Salto Grande	3,06
LT 230kV – Chavantes/Salto Grande	3,38
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 1	2,25
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 2	2,25
LT 230kV – Chavantes/Piraju	2,13
LT 230kV – Chavantes/Figueira	3,15

Fonte: Autoria própria

Para um curto-circuito trifásico na barra da SE Assis 230kV modelo pelo PS SIMUL a taxa de erro foi de 0,03%, valor próximo do ditado pelo ANAFAS e menor que 3,15% para as as correntes de contribuição ao curto, valores menores que os obtidos nas modelagens dos outros tipos de curto-circuito.

4.2 Curto-circuito na barra da SE Chavantes 230kV

Conforme a metodologia aplicada na barra da SE Assis 230kV foram modelados curto-circuito monofásicos, bifásicos com envolvimento da terra, bifásicos, e trifásicos na barra da SE Chavantes 230kV, sendo aquisitados os valores de corrente de curto-circuito total na barra, e a contribuição das linhas de transmissão.

4.2.1 Curto-circuito Monofásico na barra da SE Chavantes 230kV

A Tabela 30 apresenta os valores da corrente de curto-circuito total na barra da SE Chavantes 230kV, e a Tabela 31 as correntes de contribuição ao curto-circuito circulantes pelas linhas de transmissão aquisitados pelo ANAFAS.

Tabela 30 – Corrente de curto-circuito total monofásico na barra da SE Chavantes 230kV pelo ANAFAS

Monofásico ϕA + Terra [A]	Monofásico ϕB + Terra [A]	Monofásico ϕC + Terra [A]
13997,00	13997,00	13997,00

Fonte: Autoria própria

Tabela 31 – Correntes de contribuição ao curto-circuito monofásico na barra da SE Chavantes 230kV pelo ANAFAS

Linha de Transmissão	Monofásico ϕA + Terra [A]	Monofásico ϕB + Terra [A]	Monofásico ϕC + Terra [A]
LT 230kV – Assis/Salto Grande	1869,30	1869,30	1869,30
LT 230kV – Chavantes/Salto Grande	2453,80	2453,80	2453,80
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 1	794,10	794,10	794,10
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 2	1044,10	1044,10	1044,10
LT 230kV – Chavantes/Piraju	1894,80	1894,80	1894,80
LT 230kV – Chavantes/Figueira	1555,70	1555,70	1555,70

Fonte: Autoria própria

A Tabela 32 apresenta os valores da corrente de curto-circuito total na barra da SE Chavantes 230kV, e a Tabela 33 as correntes de contribuição ao curto-circuito aquisitados pelo PS SIMUL.

Tabela 32 – Corrente de curto-circuito total monofásico na barra da SE Chavantes 230kV pelo PS SIMUL

Monofásico $\varnothing A$ + Terra [A]	Monofásico $\varnothing B$ + Terra [A]	Monofásico $\varnothing C$ + Terra [A]
8237,79	8244,87	8244,87

Fonte: Autoria própria

Tabela 33 – Correntes de contribuição curto-circuito monofásico na barra da SE Chavantes 230kV pelo PS SIMUL

Linha de Transmissão	Monofásico $\varnothing A$ + Terra [A]	Monofásico $\varnothing B$ + Terra [A]	Monofásico $\varnothing C$ + Terra [A]
LT 230kV – Assis/Salto Grande	1378,86	1378,86	1378,86
LT 230kV – Chavantes/Salto Grande	1923,33	1923,33	1930,40
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 1	704,28	704,28	703,57
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 2	876,81	876,81	876,81
LT 230kV – Chavantes/Piraju	1732,41	1732,41	1739,48
LT 230kV – Chavantes/Figueira	1251,58	1244,51	1244,51

Fonte: Autoria própria

Os resultados foram comparados e o erro relativo é apresentado na Tabela 34 para a corrente de curto-circuito total na barra da SE Chavantes 230kV e para as correntes de contribuição ao curto na Tabela 35.

Tabela 34 – Erro relativo entre as correntes de curto-circuito monofásico na barra SE Chavantes 230kV

Monofásico $\varnothing A$ + Terra [%]	Monofásico $\varnothing B$ + Terra [%]	Monofásico $\varnothing C$ + Terra [%]
39,02	41,10	41,10

Fonte: Autoria própria

Tabela 35 – Erro relativo entre as correntes de contribuição ao curto-circuito monofásico na barra da SE Chavantes 230kV

Linha	Monofásico ϕA	Monofásico ϕB	Monofásico ϕC
	+ Terra [%]	+ Terra [%]	+ Terra [%]
LT 230kV – Assis/Salto Grande	28,51	26,24	26,24
LT 230kV – Chavantes/Salto Grande	16,72	21,62	21,33
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 1	10,95	11,31	11,40
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 2	15,34	16,02	16,02
LT 230kV – Chavantes/Piraju	7,82	8,57	8,20
LT 230kV – Chavantes/Figueira	19,09	20,00	20,00

Fonte: Autoria própria

Para o curto-circuito monofásico na barra da SE Chavantes 230kV, o erro relativo entre os resultados obtidos no ANAFAS e no PS SIMUL foram elevados. A influência das linhas de transmissões e nos modelos de linha configurados, pode ter levado a taxas de erros maiores nessa barra. Além disso, um dos transformadores é um modelo do tipo shunt, o qual não foi configurado, sendo adotado o mesmo modelo dos outros dois presente na barra, havendo necessidade de adaptação do modelo ou inserção de parâmetros no modelo escolhido que não foram disponibilizados.

4.2.2 Curto-circuito Bifásico Terra na barra da SE Chavantes 230kV

O resultado dos curto-circuito bifásicos com envolvimento da terra no ANAFAS é apresentado na Tabela 36 para a corrente de curto-circuito total na barra da SE Chavantes 230kV, e na Tabela 37 para as correntes de contribuição ao curto circulantes nas linhas de transmissão.

Tabela 36 – Corrente de curto-circuito total bifásicos e com a terra na barra da SE Chavantes 230kV pelo ANAFAS

Bifásico ϕAB + Terra [A]	Bifásico ϕBC + Terra [A]	Bifásico ϕCA + Terra [A]
13532	13532	13532

Fonte: Autoria própria

Tabela 37 – Correntes de contribuição ao curto-circuito bifásico com a terra na barra da SE Chavantes 230kV pelo ANAFAS

Linha de Transmissão	Bifásico $\phi AB +$	Bifásico $\phi BC +$	Bifásico $\phi CA +$
	Terra [A]	Terra [A]	Terra [A]
LT 230kV – Assis/Salto Grande	2196,6	2196,6	2196,6
LT 230kV – Chavantes/Salto Grande	2737,6	2737,6	2737,6
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 1	860,9	860,9	860,9
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 2	1159,1	1159,1	1159,1
LT 230kV – Chavantes/Piraju	2021,7	2021,7	2021,7
LT 230kV – Chavantes/Figueira	1748,7	1748,7	1748,7

Fonte: Autoria própria

As Tabelas 38 e 39 apresentam os curto-circuitos bifásicos com envolvimento da terra aplicado na barra SE Chavantes 230kV modelados no PS SIMUL, sendo a corrente de curto-circuito total e as correntes de contribuição das linhas de transmissão respectivamente.

Tabela 38 – Corrente de curto-circuito total bifásicos com a terra na barra da SE Chavantes 230kV pelo PS SIMUL

Bifásico $\phi AB +$ Terra [A]	Bifásico $\phi BC +$ Terra [A]	Bifásico $\phi CA +$ Terra [A]
11801,61	11808,68	11052,08

Fonte: Autoria própria

Tabela 39 – Correntes de contribuição ao curto-circuito bifásico com a terra na barra da SE Chavantes 230kV pelo PS SIMUL

Linha de Transmissão	Bifásico $\phi AB +$	Bifásico $\phi BC +$	Bifásico $\phi CA +$
	Terra [A]	Terra [A]	Terra [A]
LT 230kV – Assis/Salto Grande	2199,10	2199,10	2093,04
LT 230kV – Chavantes/Salto Grande	2708,22	2708,22	2573,87
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 1	855,60	855,60	791,96
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 2	1152,58	1152,58	1067,73
LT 230kV – Chavantes/Piraju	2015,25	2015,25	1887,98
LT 230kV – Chavantes/Figueira	1739,48	1739,48	1661,70

Fonte: Autoria própria

A comparação do resultados retornou taxas de erro que são apresentadas na Tabela 40 para a corrente de curto-circuito total na barra da SE Chavantes 230kV e na Tabela 41 para as correntes de contribuição.

Tabela 40 – Erro relativo entre as correntes curto-circuito total bifásico com a terra na barra da SE Chavantes 230kV

Bifásico $\phi AB + \text{Terra}$ [%]	Bifásico $\phi BC + \text{Terra}$ [%]	Bifásico $\phi CA + \text{Terra}$ [%]
12,79	12,74	18,33

Fonte: Autoria própria

Tabela 41 – Erro relativo entre as correntes de contribuição ao curto-circuito bifásico com a terra na barra da SE Chavantes 230kV

Linha de Transmissão	Bifásico $\phi AB + \text{Terra}$ [%]	Bifásico $\phi BC + \text{Terra}$ [%]	Bifásico $\phi CA + \text{Terra}$ [%]
LT 230kV – Assis/Salto Grande	0,11	0,11	4,71
LT 230kV – Chavantes/Salto Grande	1,07	1,07	5,98
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 1	0,62	0,62	8,01
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 2	0,56	0,56	7,88
LT 230kV – Chavantes/Piraju	0,32	0,32	6,61
LT 230kV – Chavantes/Figueira	0,53	0,53	4,98

Fonte: Autoria própria

O erro relativo para as correntes de curto-circuito total na barra da SE Chavantes 230kV se mostrou elevado, necessitando de uma maior atenção para os componentes conectados diretamente na barra e seus parâmetros. Diferente dos valores obtidos nos curto-circuito monofásicos, para os curto-circuito bifásicos com a terra a taxa de erro foi menor, entre 1%, se demonstrando elevado apenas para o curto-circuito entre as fases A e C, evidenciando uma melhor atenção na referência de tensão a qual foi utilizada.

4.2.3 Curto-circuito Bifásico na barra da SE Chavantes 230kV

Os resultados das correntes resultantes da modelagem de curto-circuitos bifásicos no ANAFAS estão apresentados nas Tabelas 42 e 43, sendo a corrente de curto-circuito total na barra SE Chavantes 230kV e as correntes de contribuição das linhas de transmissão respectivamente.

Tabela 42 – Corrente de curto-circuito total bifásico na barra da SE Chavantes 230kV pelo ANAFAS

Bifásico ϕAB [A]	Bifásico ϕBC [A]	Bifásico ϕCA [A]
11421	11421	11421

Fonte: Autoria própria

Tabela 43 – Correntes de contribuição ao curto-circuito bifásico na barra da SE Chavantes 230kV pelo ANAFAS

Linha de Transmissão	Bifásico ϕAB [A]	Bifásico ϕBC [A]	Bifásico ϕCA [A]
LT 230kV – Assis/Salto Grande	2080,9	2080,9	2080,9
LT 230kV – Chavantes/Salto Grande	2539,6	2539,6	2539,6
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 1	765,7	765,7	765,7
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 2	1053,6	1053,6	1053,6
LT 230kV – Chavantes/Piraju	1789,4	1789,4	1789,4
LT 230kV – Chavantes/Figueira	1628,9	1628,9	1628,9

Fonte: Autoria própria

Os resultados obtidos no PS SIMUL estão apresentados na Tabela 44 e Tabela 45, sendo a corrente de curto-circuito total na barra SE Chavantes 230kV e as correntes de contribuição das linhas de transmissão respectivamente.

Tabela 44 – Corrente de curto-circuito total bifásico na barra da SE Chavantes 230kV pelo PS SIMUL

Bifásico ϕAB [A]	Bifásico ϕBC [A]	Bifásico ϕCA [A]
11023,79	11023,79	11023,79

Fonte: Autoria própria

Tabela 45 – Correntes de contribuição ao curto-circuito bifásico na barra da SE Chavantes 230kV pelo PS SIMUL

Linha de Transmissão	Bifásico ϕAB [A]	Bifásico ϕBC [A]	Bifásico ϕCA [A]
LT 230kV – Assis/Salto Grande	2100,11	2100,11	2100,11
LT 230kV – Chavantes/Salto Grande	2538,51	2538,51	2538,51
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 1	763,68	763,68	763,68
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 2	1053,59	1053,59	1053,59
LT 230kV – Chavantes/Piraju	1788,98	1788,98	1788,98
LT 230kV – Chavantes/Figueira	1633,42	1633,42	1633,42

Fonte: Autoria própria

O erro relativo percentual entre as modelagens no *software* ANAFAS e PS SIMUL para os curto-circuitos bifásicos é apresentado na Tabela 46 e Tabela 47 para a corrente de curto-circuito na barra da SE Chavantes 230kV e as correntes de contribuição das linhas de transmissão, respectivamente.

Tabela 46 – Erro relativo entre as correntes de curto-circuito total bifásico na barra da SE Chavantes 230kV

Bifásico ϕAB [%]	Bifásico ϕBC [%]	Bifásico ϕCA [%]
3,48	3,48	3,48

Fonte: Autoria própria

Tabela 47 – Erro relativo entre as correntes de contribuição ao curto-circuito bifásico na barra da SE Chavantes 230kV

Linha de Transmissão	Bifásico ϕAB [%]	Bifásico ϕBC [%]	Bifásico ϕCA [%]
LT 230kV – Assis/Salto Grande	0,92	0,92	0,92
LT 230kV – Chavantes/Salto Grande	0,04	0,04	0,04
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 1	0,26	0,26	0,26
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 2	0,00	0,00	0,00
LT 230kV – Chavantes/Piraju	0,02	0,02	0,02
LT 230kV – Chavantes/Figueira	0,28	0,28	0,28

Fonte: Autoria própria

Os resultados obtidos na modelagem do curto-circuito bifásico sem o envolvimento da terra, se demonstrou ainda melhor que os obtidos nos curtos monofásicos e bifásicos com a terra, abaixo de 1% para as correntes de contribuição das linhas de transmissão, e abaixo de 3,5% para a corrente de curto-circuito total na barra da SE Chavantes 230kV.

4.2.4 Curto-circuito Trifásico na barra da SE Chavantes 230kV

Os resultados da simulação do curto-circuito trifásico pelo ANAFAS é representado na Tabela 48 para a corrente de curto-circuito total na barra da SE Chavantes 230kV, e na Tabela 49 para as correntes de contribuição oriundas das linhas de transmissão.

Tabela 48 – Corrente de curto-circuito total trifásico na barra da SE Chavantes 230kV pelo ANAFAS

Trifásico $\varnothing ABC$ [A]
13187,8

Fonte: Autoria própria

Tabela 49 – Correntes de contribuição ao curto-circuito trifásico na barra da SE Chavantes 230kV pelo ANAFAS

Linha de Transmissão	Trifásico $\varnothing ABC$ [A]
LT 230kV – Assis/Salto Grande	2402,9
LT 230kV – Chavantes/Salto Grande	2932,5
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 1	884,1
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 2	1216,6
LT 230kV – Chavantes/Piraju	2066,2
LT 230kV – Chavantes/Figueira	1880,9

Fonte: Autoria própria

O resultado da corrente de curto-circuito total trifásico pelo PS SIMUL na barra da SE Chavantes 230kV e das correntes de contribuição é apresentado na Tabela 50 e Tabela 51, respectivamente.

Tabela 50 – Corrente de curto-circuito total trifásico na barra da SE Chavantes 230kV pelo PS SIMUL

Trifásico $\varnothing ABC$ [A]
12720,85

Fonte: Autoria própria

Tabela 51 – Correntes de contribuição ao curto-circuito trifásico na barra da SE Chavantes 230kV pelo PS SIMUL

Linha de Transmissão	Trifásico $\varnothing ABC$ [A]
LT 230kV – Assis/Salto Grande	2425,38
LT 230kV – Chavantes/Salto Grande	2934,49
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 1	883,88
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 2	1216,22
LT 230kV – Chavantes/Piraju	2064,75
LT 230kV – Chavantes/Figueira	1887,98

Fonte: Autoria própria

O erro relativo percentual entre os valores obtidos em ambos os *softwares* é apresentado na Tabela 52 para a corrente de curto-circuito total na barra da SE Chavantes 230kV, e Tabela 53 para as correntes de contribuição.

Tabela 52 – Erro relativo entre a corrente de curto-circuito total trifásico na barra SE Chavantes 230kV

Trifásico ϕABC [%]
3,54

Fonte: Autoria própria

Tabela 53 – Erro relativo entre as correntes de contribuição ao curto-circuito trifásico na barra da SE Chavantes 230kV

Linha de Transmissão	Trifásico ϕABC [%]
LT 230kV – Assis/Salto Grande	0,94
LT 230kV – Chavantes/Salto Grande	0,07
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 1	0,02
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 2	0,03
LT 230kV – Chavantes/Piraju	0,07
LT 230kV – Chavantes/Figueira	0,38

Fonte: Autoria própria

Para um curto-circuito trifásico na barra da SE Chavantes 230kV modelo pelo PS SIMUL, a taxa de erro foi de 3,54% para a corrente de curto-circuito total e menor que 1% para as correntes de contribuição ao curto-circuito ditado pelo ANAFAS.

4.3 Curto-circuito na barra da SE Botucatu 230kV

Conforme a metodologia apresentada, foram modelados curto-circuito monofásicos, bifásicos com envolvimento do terra, bifásicos, e trifásicos na barra da SE Botucatu 230kV, aquisitando os valores de corrente de curto-circuito total na barra da SE, e as correntes de contribuição oriundas das linhas de transmissão, sendo comparado esses resultados.

4.3.1 Curto-circuito Monofásico na barra da SE Botucatu 230kV

A Tabela 54 apresenta os valores da corrente de curto-circuito total na barra da SE Botucatu 230kV, e a Tabela 55 as correntes de contribuição ao curto-circuito oriundas das linhas de transmissão simulados pelo ANAFAS.

Tabela 54 – Corrente de curto-circuito total monofásico na barra da SE Botucatu 230kV pelo ANAFAS

Monofásico ϕA + Terra [A]	Monofásico ϕB + Terra [A]	Monofásico ϕC + Terra [A]
8675,9	8675,9	8675,9

Fonte: Autoria própria

Tabela 55 – Correntes de contribuição ao curto-circuito monofásico na barra da SE Botucatu 230kV pelo ANAFAS

Linha de Transmissão	Monofásico ϕA + Terra [A]	Monofásico ϕB + Terra [A]	Monofásico ϕC + Terra [A]
LT 230kV – Assis/Salto Grande	547,6	547,6	547,6
LT 230kV – Chavantes/Salto Grande	673,1	673,1	673,1
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 1	906,8	906,8	906,8
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 2	1174,1	1174,1	1174,1
LT 230kV – Chavantes/Piraju	430	430	430
LT 230kV – Chavantes/Figueira	415,3	415,6	415,6

Fonte: Autoria própria

Os resultados da modelagem do curto pelo PS SIMUL é apresetado na Tabela 56 para os valores da corrente de curto-circuito total na barra, e na Tabela 57 para as correntes de contribuição ao curto-circuito oriundas das linhas de transmissão.

Tabela 56 – Corrente de curto-circuito total monofásico na barra da SE Botucatu 230kV pelo PS SIMUL

Monofásico ϕA + Terra [A]	Monofásico ϕB + Terra [A]	Monofásico ϕC + Terra [A]
8591,35	8591,35	8591,35

Fonte: Autoria própria

Tabela 57 – Correntes de contribuição curto-circuito monofásico na barra da SE Botucatu 230kV pelo PS SIMUL

Linha de Transmissão	Monofásico $\varnothing A$ + Terra [A]	Monofásico $\varnothing B$ + Terra [A]	Monofásico $\varnothing C$ + Terra [A]
LT 230kV – Assis/Salto Grande	590,43	590,43	589,73
LT 230kV – Chavantes/Salto Grande	742,46	742,46	742,46
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 1	869,74	869,74	869,74
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 2	1131,37	1131,37	1131,37
LT 230kV – Chavantes/Piraju	349,24	349,17	349,24
LT 230kV – Chavantes/Figueira	460,33	460,33	460,33

Fonte: Autoria própria

A comparação dos resultados obtidos pelo ANAFAS e PS SIMUL, é apresentado na Tabela 58 para o erro relativo da corrente de curto-circuito total na barra da SE Botucatu 230kV, e na Tabela 59 para as contribuições das linhas de transmissão ao curto.

Tabela 58 – Erro relativo entre as correntes de curto-circuito monofásico na barra SE Botucatu 230kV

Monofásico $\varnothing A$ + Terra [%]	Monofásico $\varnothing B$ + Terra [%]	Monofásico $\varnothing C$ + Terra [%]
0,97	0,97	0,97

Fonte: Autoria própria

Tabela 59 – Erro relativo entre as correntes de contribuição ao curto-circuito monofásico na barra da SE Botucatu 230kV

Linha	Monofásico $\varnothing A$ + Terra [%]	Monofásico $\varnothing B$ + Terra [%]	Monofásico $\varnothing C$ + Terra [%]
LT 230kV – Assis/Salto Grande	7,82	7,82	7,69
LT 230kV – Chavantes/Salto Grande	10,30	10,30	0,30
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 1	4,09	4,09	4,09
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 2	3,64	3,64	3,64
LT 230kV – Chavantes/Piraju	18,78	18,80	18,78
LT 230kV – Chavantes/Figueira	10,84	10,76	10,76

Fonte: Autoria própria

Os resultados obtidos na modelagem do curto-circuito monofásico pelo PS SIMUL, se manteve abaixo de 1% para a corrente de curto-circuito total na barra da

SE Botucatu 230kV. Para as correntes de contribuição ao curto-circuito o erro obtido foi menor que 20%, não influenciando na corrente de curto-circuito total na barra da SE.

4.3.2 Curto-circuito Bifásico Terra na barra da SE Botucatu 230kV

A corrente de curto-circuito total bifásico com envolvimento da terra na barra da SE Botucatu 230kV apresentada na Tabela 60 e as correntes de contribuição ao curto na Tabela 61, simulados no ANAFAS.

Tabela 60 – Corrente de curto-circuito total bifásicos e com a terra na barra da SE Botucatu 230kV pelo ANAFAS

Bifásico $\phi AB + \text{Terra [A]}$	Bifásico $\phi BC + \text{Terra [A]}$	Bifásico $\phi CA + \text{Terra [A]}$
9489,9	9489,9	9489,9

Fonte: Autoria própria

Tabela 61 – Correntes de contribuição ao curto-circuito bifásico com a terra na barra da SE Botucatu 230kV pelo ANAFAS

Linha de Transmissão	Bifásico $\phi AB + \text{Terra [A]}$	Bifásico $\phi BC + \text{Terra [A]}$	Bifásico $\phi CA + \text{Terra [A]}$
LT 230kV – Assis/Salto Grande	821,2	821,2	821,2
LT 230kV – Chavantes/Salto Grande	1000,3	1000,3	1000,3
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 1	1077,4	1077,4	1077,4
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 2	1452,4	1452,4	1452,4
LT 230kV – Chavantes/Piraju	636,4	636,4	636,4
LT 230kV – Chavantes/Figueira	618	618	618

Fonte: Autoria própria

A Tabela 62 apresenta a magnitude da corrente de curto-circuito total na barra da SE Botucatu 230kV, e a Tabela 63 as correntes de contribuição ao curto circulantes pelas linhas de transmissão, para a modelagem de curto-circuito bifásicos como envolvimento da terra no PS SIMUL

Tabela 62 – Corrente de curto-circuito total bifásicos com a terra na barra da SE Botucatu 230kV pelo PS SIMUL

Bifásico $\phi AB + \text{Terra [A]}$	Bifásico $\phi BC + \text{Terra [A]}$	Bifásico $\phi CA + \text{Terra [A]}$
9397,45	9397,45	9333,81

Fonte: Autoria própria

Tabela 63 – Correntes de contribuição ao curto-circuito bifásico com a terra na barra da SE Botucatu 230kV pelo PS SIMUL

Linha de Transmissão	Bifásico $\phi AB +$	Bifásico $\phi BC +$	Bifásico $\phi CA +$
	Terra [A]	Terra [A]	Terra [A]
LT 230kV – Assis/Salto Grande	862,67	862,67	834,39
LT 230kV – Chavantes/Salto Grande	1053,59	1053,59	1011,16
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 1	1046,52	1039,45	982,88
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 2	1407,14	1407,14	1343,50
LT 230kV – Chavantes/Piraju	581,95	581,95	605,28
LT 230kV – Chavantes/Figueira	652,66	652,66	622,25

Fonte: Autoria própria

O erro relativo percentual entre as modelagens nos *softwares* para os curto-circuitos bifásicos com envolvimento da terra, é apresentado na Tabela 64, sendo a corrente de curto que passa pela barra da SE Botucatu 230kV, e a Tabela 65, para as correntes de contribuição ao curto-circuito circulantes pelas linhas de transmissão.

Tabela 64 – Erro relativo entre as correntes curto-circuito total bifásico com a terra na barra da SE Botucatu 230kV

Bifásico $\phi AB +$ Terra [%]	Bifásico $\phi BC +$ Terra [%]	Bifásico $\phi CA +$ Terra [%]
0,97	0,97	1,64

Fonte: Autoria própria

Tabela 65 – Erro relativo entre as correntes de contribuição ao curto-circuito bifásico com a terra na barra da SE Botucatu 230kV

Linha de Transmissão	Bifásico $\phi AB +$	Bifásico $\phi BC +$	Bifásico $\phi CA +$
	Terra [%]	Terra [%]	Terra [%]
LT 230kV – Assis/Salto Grande	5,05	5,05	1,61
LT 230kV – Chavantes/Salto Grande	5,33	5,33	1,09
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 1	2,87	3,52	8,77
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 2	3,12	3,12	7,50
LT 230kV – Chavantes/Piraju	8,56	8,56	4,89
LT 230kV – Chavantes/Figueira	5,61	5,61	0,69

Fonte: Autoria própria

Foi obtido resultados com uma taxa de erro abaixo de entre 0,97% e 1,64% para a corrente de curto-circuito total na barra, e os resultados obtidos nas correntes de contribuição ao curto-circuito, se mantiveram abaixo de 9%.

4.3.3 Curto-circuito Bifásico na barra da SE Botucatu 230kV

Os curto-circuitos bifásicos modelados no ANAFAS estão apresentados nas Tabelas 66 e 67, sendo a corrente de curto-circuito total na barra SE Botucatu 230kV e as correntes de contribuição das linhas de transmissão respectivamente.

Tabela 66 – Corrente de curto-circuito total bifásico na barra da SE Botucatu 230kV pelo ANAFAS

Bifásico ϕAB [A]	Bifásico ϕBC [A]	Bifásico ϕCA [A]
8627,6	8627,6	8627,6

Fonte: Autoria própria

Tabela 67 – Correntes de contribuição ao curto-circuito bifásico na barra da SE Botucatu 230kV pelo ANAFAS

Linha de Transmissão	Bifásico ϕAB [A]	Bifásico ϕBC [A]	Bifásico ϕCA [A]
LT 230kV – Assis/Salto Grande	804,5	804,5	804,5
LT 230kV – Chavantes/Salto Grande	974,5	974,5	974,5
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 1	971,6	971,6	971,6
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 2	1336,9	1336,9	1336,9
LT 230kV – Chavantes/Piraju	622,5	622,5	622,5
LT 230kV – Chavantes/Figueira	602,4	602,4	602,4

Fonte: Autoria própria

Os valores obtidos no PS SIMUL estão dispostos na Tabela 68 para a corrente de curto-circuito total na barra da SE Botucatu 230kV, e na Tabela 69 para a corrente de contribuição circulante pelas linhas de transmissão.

Tabela 68 – Corrente de curto-circuito total bifásico na barra da SE Botucatu 230kV pelo PS SIMUL

Bifásico ϕAB [A]	Bifásico ϕBC [A]	Bifásico ϕCA [A]
8555,99	8555,99	8548,92

Fonte: Autoria própria

Tabela 69 – Correntes de contribuição ao curto-circuito bifásico na barra da SE Botucatu 230kV pelo PS SIMUL

Linha de Transmissão	Bifásico ϕAB [A]	Bifásico ϕBC [A]	Bifásico ϕCA [A]
LT 230kV – Assis/Salto Grande	834,39	834,39	834,39
LT 230kV – Chavantes/Salto Grande	1011,16	1011,16	1011,16
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 1	954,59	954,59	954,59
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 2	1308,15	1308,15	1308,15
LT 230kV – Chavantes/Piraju	591,85	591,85	591,85
LT 230kV – Chavantes/Figueira	624,38	624,38	624,38

Fonte: Autoria própria

O erro relativo percentual entre as modelagens nos *softwares* para os curto-circuitos bifásicos é apresentado na Tabela 70 para a corrente de curto-circuito total que passa pela barra da SE Botucatu 230kV, e na Tabela 71 para as correntes de contribuição ao curto-circuito oriundas das linhas de transmissão.

Tabela 70 – Erro relativo entre as correntes de curto-circuito total bifásico na barra da SE Botucatu 230kV

Bifásico ϕAB [%]	Bifásico ϕBC [%]	Bifásico ϕCA [%]
0,83	0,83	0,91

Fonte: Autoria própria

Tabela 71 – Erro relativo entre as correntes de contribuição ao curto-circuito bifásico na barra da SE Botucatu 230kV

Linha de Transmissão	Bifásico ϕAB [%]	Bifásico ϕBC [%]	Bifásico ϕCA [%]
LT 230kV – Assis/Salto Grande	3,71	3,71	3,71
LT 230kV – Chavantes/Salto Grande	3,76	3,76	3,76
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 1	1,75	1,75	1,75
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 2	2,15	2,15	2,15
LT 230kV – Chavantes/Piraju	4,92	4,92	4,92
LT 230kV – Chavantes/Figueira	3,65	3,65	3,65

Fonte: Autoria própria

Os resultados obtidos se apresentaram com erro abaixo de 4,92% para as correntes de contribuição e abaixo de 1% para a corrente de curto-circuito total na barra da SE Botucatu 230kV. O erro foi menor que os curtos-circuitos monofásicos e bifásicos com envolvimento da terra.

4.3.4 Curto-circuito Trifásico na barra da SE Botucatu 230kV

A magnitude da corrente de curto-circuito total na barra da SE Botucatu 230kV aquisitado pela simulação no ANAFAS está presente na Tabela 72, e as correntes de contribuição ao curto vinda pelas linhas de transmissão de está representada na Tabela 73.

Tabela 72 – Corrente de curto-circuito total trifásico na barra da SE Botucatu 230kV pelo ANAFAS

Trifásico ϕABC [A]
9962,2

Fonte: Autoria própria

Tabela 73– Correntes de contribuição ao curto-circuito trifásico na barra da SE Botucatu 230kV pelo ANAFAS

Linha de Transmissão	Trifásico ϕABC [A]
LT 230kV – Assis/Salto Grande	928,9
LT 230kV – Chavantes/Salto Grande	1125,3
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 1	1121,9
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 2	1543,7
LT 230kV – Chavantes/Piraju	718,8
LT 230kV – Chavantes/Figueira	695,6

Fonte: Autoria própria

O resultado obtido da simulação no PS SIMUL da corrente de curto-circuito total na barra da SE Botucatu 230kV é apresentado na Tabela 74, e magnitude das correntes de contribuição ao curto na Tabela 75.

Tabela 74 – Corrente de curto-circuito total trifásico na barra da SE Botucatu 230kV pelo PS SIMUL

Trifásico ϕABC [A]
9878,28

Fonte: Autoria própria

Tabela 75 – Correntes de contribuição ao curto-circuito trifásico na barra da SE Botucatu 230kV pelo PS SIMUL

Linha de Transmissão	Trifásico ϕABC [A]
LT 230kV – Assis/Salto Grande	961,67
LT 230kV – Chavantes/Salto Grande	1166,73
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 1	1103,09
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 2	1513,21
LT 230kV – Chavantes/Piraju	683,77
LT 230kV – Chavantes/Figueira	721,25

Fonte: Autoria própria

O erro relativo percentual entre os valores obtidos no ANAFAS e no PS SIMUL para a corrente de curto-circuito total na barra SE Botucatu 230kV para um curto trifásico, é apresentado na Tabela 76, e a contribuição das linhas de transmissão para o curto-circuito apresentado na Tabela 77.

Tabela 76 – Erro relativo entre a corrente de curto-circuito total trifásico na barra da SE Botucatu 230kV

Trifásico ϕABC [%]
0,84

Fonte: Autoria própria

Tabela 77 – Erro relativo entre as correntes de contribuição ao curto-circuito trifásico na barra da SE Botucatu 230kV

Linha de Transmissão	Trifásico ϕABC [%]
LT 230kV – Assis/Salto Grande	3,53
LT 230kV – Chavantes/Salto Grande	3,68
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 1	1,68
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 2	1,98
LT 230kV – Chavantes/Piraju	4,87
LT 230kV – Chavantes/Figueira	3,69

Fonte: Autoria própria

O erro relativo entre a corrente de curto-circuito total na barra da SE foi de 0,84%, e os obtidos nas correntes de contribuição das linhas de transmissão entre 4,87% e 1,68%.

4.4 Curto-circuito na barra da SE Piraju 230kV

Foram modelados na barra da SE Piraju 230kV curto-circuito monofásicos, bifásicos com envolvimento do terra, bifásicos, e trifásicos, sendo adquiridos os valores de corrente de curto-circuito total na barra da respectiva SE, e as correntes de contribuição oriundas das linhas de transmissão.

4.4.1 Curto-circuito Monofásico na barra da SE Piraju 230kV

A Tabela 78 apresenta os valores da corrente de curto-circuito total na barra da SE Piraju 230kV e a Tabela 79 as correntes de contribuição ao curto-circuito circulantes pelas linhas de transmissão obtidas pelo ANAFAS.

Tabela 78 – Corrente de curto-circuito total monofásico na barra da SE Piraju 230kV pelo ANAFAS

Monofásico ϕA + Terra [A]	Monofásico ϕB + Terra [A]	Monofásico ϕC + Terra [A]
7408,8	7408,8	7408,8

Fonte: Autoria própria

Tabela 79 – Correntes de contribuição ao curto-circuito monofásico na barra da SE Piraju 230kV pelo ANAFAS

Linha de Transmissão	Monofásico ϕA + Terra [A]	Monofásico ϕB + Terra [A]	Monofásico ϕC + Terra [A]
LT 230kV – Assis/Salto Grande	702,4	702,4	702,4
LT 230kV – Chavantes/Salto Grande	882,7	882,7	882,7
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 1	99,5	99,5	99,5
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 2	131,8	131,8	131,8
LT 230kV – Chavantes/Piraju	3442,5	3442,5	3442,5
LT 230kV – Chavantes/Figueira	555,8	555,8	555,8

Fonte: Autoria própria

Na Tabela 80 é apresentado os valores da corrente de curto-circuito total na barra da SE, e a Tabela 81 as correntes de contribuição ao curto-circuito oriundas das linhas de transmissão adquiridos pelo PS SIMUL.

**Tabela 80 – Corrente de curto-circuito total monofásico na barra da SE Piraju 230kV pelo PS
SIMUL**

Monofásico $\varnothing$A + Terra [A]	Monofásico $\varnothing$B + Terra [A]	Monofásico $\varnothing$C + Terra [A]
7071,07	7106,42	7078,14

Fonte: Autoria própria

**Tabela 81 – Correntes de contribuição curto-circuito monofásico na barra da SE Piraju 230kV
pelo PS SIMUL**

Linha de Transmissão	Monofásico $\varnothing$A + Terra [A]	Monofásico $\varnothing$B + Terra [A]	Monofásico $\varnothing$C + Terra [A]
LT 230kV – Assis/Salto Grande	763,68	763,68	763,68
LT 230kV – Chavantes/Salto Grande	997,02	997,02	997,02
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 1	166,24	163,48	166,10
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 2	205,49	202,59	205,27
LT 230kV – Chavantes/Piraju	3104,20	3125,41	3104,20
LT 230kV – Chavantes/Figueira	637,10	634,27	637,10

Fonte: Autoria própria

A Tabela 82 apresenta o erro relativo da corrente de curto-circuito total na barra da SE Piraju 230kV e a Tabela 83 as contribuições das linhas de transmissão ao curto-circuito monofásico.

**Tabela 82 – Erro relativo entre as correntes de curto-circuito monofásico na barra SE Piraju
230kV**

Monofásico $\varnothing$A + Terra [%]	Monofásico $\varnothing$B + Terra [%]	Monofásico $\varnothing$C + Terra [%]
4,56	4,08	4,46

Fonte: Autoria própria

Tabela 83 – Erro relativo entre as correntes de contribuição ao curto-circuito monofásico na barra da SE Piraju 230kV

Linha	Monofásico ϕA + Terra [%]	Monofásico ϕB + Terra [%]	Monofásico ϕC + Terra [%]
LT 230kV – Assis/Salto Grande	8,72	8,72	8,72
LT 230kV – Chavantes/Salto Grande	12,95	12,95	12,95
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 1	67,08	64,30	66,93
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 2	55,91	53,71	55,75
LT 230kV – Chavantes/Piraju	9,83	9,21	9,83
LT 230kV – Chavantes/Figueira	14,63	14,12	14,63

Fonte: Autoria própria

Os resultados obtidos para as correntes de curto-circuito total na barra da SE Piraju 230kV foram satisfatórios, abaixo de 5%. A corrente de contribuição que circula pela linha de transmissão entre a SE Chavantes 230kV e a SE Botucatu 230kV, não foi a esperada, retornando uma taxa de erro de quase 70%, sendo uma investigação afunda se o modelo utilizado é o mais adequado.

4.4.2 Curto-circuito Bifásico Terra na barra da SE Piraju 230kV

A simulação do curto-circuito bifásico com a terra no ANAFAS, resultou em correntes de curto-circuito total na barra da SE Piraju 230kV apresentados na Tabela 84, e as correntes de contribuição na Tabela 85.

Tabela 84 – Corrente de curto-circuito total bifásicos e com a terra na barra da SE Piraju 230kV pelo ANAFAS

Bifásico ϕAB + Terra [A]	Bifásico ϕBC + Terra [A]	Bifásico ϕCA + Terra [A]
7860,3	7860,3	7860,3

Fonte: Autoria própria

Tabela 85 – Correntes de contribuição ao curto-circuito bifásico com a terra na barra da SE Piraju 230kV pelo ANAFAS

Linha de Transmissão	Bifásico $\phi AB +$	Bifásico $\phi BC +$	Bifásico $\phi CA +$
	Terra [A]	Terra [A]	Terra [A]
LT 230kV – Assis/Salto Grande	999,3	999,3	999,3
LT 230kV – Chavantes/Salto Grande	1218	1218	1218
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 1	124,5	124,5	124,5
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 2	169,5	169,5	169,5
LT 230kV – Chavantes/Piraju	4162,1	4162,1	4162,1
LT 230kV – Chavantes/Figueira	769,4	769,4	769,4

Fonte: Autoria própria

A Tabela 86 apresenta o resultado da corrente de curto-circuito total na barra da SE Piraju 230kV, e Tabela 87 as correntes de contribuição para o curto-circuito bifásico com a terra modelado no PS SIMUL.

Tabela 86 – Corrente de curto-circuito total bifásicos com a terra na barra da SE Piraju 230kV pelo PS SIMUL

Bifásico $\phi AB +$ Terra [A]	Bifásico $\phi BC +$ Terra [A]	Bifásico $\phi CA +$ Terra [A]
7672,11	7665,04	7672,11

Fonte: Autoria própria

Tabela 87 – Correntes de contribuição ao curto-circuito bifásico com a terra na barra da SE Piraju 230kV pelo PS SIMUL

Linha de Transmissão	Bifásico $\phi AB +$	Bifásico $\phi BC +$	Bifásico $\phi CA +$
	Terra [A]	Terra [A]	Terra [A]
LT 230kV – Assis/Salto Grande	1032,38	1039,45	1011,16
LT 230kV – Chavantes/Salto Grande	1272,79	1272,79	1237,44
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 1	156,77	156,69	153,65
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 2	205,06	205,13	200,68
LT 230kV – Chavantes/Piraju	4002,22	4002,22	3874,95
LT 230kV – Chavantes/Figueira	806,10	806,10	784,89

Fonte: Autoria própria

O erro relativo percentual entre as modelagens é apresentado na Tabela 88 para a corrente de curto-circuito total na barra da SE Piraju 230kV e as correntes de contribuição na Tabela 89.

Tabela 88 – Erro relativo entre as correntes curto-circuito total bifásico com a terra na barra da SE Piraju 230kV

Bifásico ϕAB + Terra [%]	Bifásico ϕBC + Terra [%]	Bifásico ϕCA + Terra [%]
2,39	2,48	2,39

Fonte: Autoria própria

Tabela 89 – Erro relativo entre as correntes de contribuição ao curto-circuito bifásico com a terra na barra da SE Piraju 230kV

Linha de Transmissão	Bifásico ϕAB + Terra [%]	Bifásico ϕBC + Terra [%]	Bifásico ϕCA + Terra [%]
LT 230kV – Assis/Salto Grande	3,31	4,02	1,19
LT 230kV – Chavantes/Salto Grande	4,50	4,50	1,60
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 1	25,92	25,86	23,42
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 2	20,98	21,02	18,39
LT 230kV – Chavantes/Piraju	3,84	3,84	6,90
LT 230kV – Chavantes/Figueira	4,77	4,77	2,01

Fonte: Autoria própria

Diferente dos resultados obtidos na modelagem do curto monofásico, a taxa de erro foi menor em todos os casos, mas ainda se manteve com um valor elevado para a corrente de contribuição circulante pela linha de transmissão entre a SE Chavantes 230kV e a SE Botucatu 230kV.

4.4.3 Curto-circuito Bifásico na barra da SE Piraju 230kV

Os resultados da magnitude da corrente de curto-circuito total na barra da SE Piraju 230kV e as correntes de contribuição ao curto pelo ANAFAS estão apresentados na Tabela 90 e Tabela 91 respectivamente.

Tabela 90 – Corrente de curto-circuito total bifásico na barra da SE Piraju 230kV pelo ANAFAS

Bifásico ϕAB [A]	Bifásico ϕBC [A]	Bifásico ϕCA [A]
7070,6	7070,6	7070,6

Fonte: Autoria própria

Tabela 91 – Correntes de contribuição ao curto-circuito bifásico na barra da SE Piraju 230kV pelo ANAFAS

Linha de Transmissão	Bifásico ϕAB [A]	Bifásico ϕBC [A]	Bifásico ϕCA [A]
LT 230kV – Assis/Salto Grande	967,7	967,7	967,7
LT 230kV – Chavantes/Salto Grande	1177,6	1177,6	1177,6
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 1	117,1	117,1	117,1
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 2	161,1	165,1	165,1
LT 230kV – Chavantes/Piraju	3869,1	3869,1	3869,1
LT 230kV – Chavantes/Figueira	744,6	744,6	744,6

Fonte: Autoria própria

No PS SIMUL a magnitude da corrente de curto-circuito total na barra da SE Piraju 230kV é apresentado na Tabela 92 e as correntes de contribuição das linhas na Tabela 93.

Tabela 92 – Corrente de curto-circuito total bifásico na barra da SE Piraju 230kV pelo PS SIMUL

Bifásico ϕAB [A]	Bifásico ϕBC [A]	Bifásico ϕCA [A]
6979,14	6979,14	6979,14

Fonte: Autoria própria

Tabela 93 – Correntes de contribuição ao curto-circuito bifásico na barra da SE Piraju 230kV pelo PS SIMUL

Linha de Transmissão	Bifásico ϕAB [A]	Bifásico ϕBC [A]	Bifásico ϕCA [A]
LT 230kV – Assis/Salto Grande	997,02	997,02	997,02
LT 230kV – Chavantes/Salto Grande	1209,15	1209,15	1209,15
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 1	127,77	127,70	127,77
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 2	175,86	175,72	175,86
LT 230kV – Chavantes/Piraju	3790,09	3790,09	3790,09
LT 230kV – Chavantes/Figueira	763,68	763,68	763,68

Fonte: Autoria própria

O erro relativo entre os resultados obtidos é apresentado na Tabela 93 para a corrente de curto-circuito na barra da SE Piraju 230kV e na Tabela 94 para as correntes de contribuição ao curto-circuito.

Tabela 94 – Erro relativo entre as correntes de curto-circuito total bifásico na barra da SE Piraju 230kV

Bifásico ϕAB [%]	Bifásico ϕBC [%]	Bifásico ϕCA [%]
1,29	1,29	1,29

Fonte: Autoria própria

Tabela 95 – Erro relativo entre as correntes de contribuição ao curto-circuito bifásico na barra da SE Piraju 230kV

Linha de Transmissão	Bifásico ϕAB [%]	Bifásico ϕBC [%]	Bifásico ϕCA [%]
LT 230kV – Assis/Salto Grande	3,03	3,03	3,03
LT 230kV – Chavantes/Salto Grande	2,68	2,68	2,68
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 1	9,12	9,06	9,12
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 2	9,16	6,43	6,52
LT 230kV – Chavantes/Piraju	2,04	2,04	2,04
LT 230kV – Chavantes/Figueira	2,56	2,56	2,56

Fonte: Autoria própria

A taxa de erro foi menor que as obtidas nos outros curto-circuito modelados, e apresentou resultados melhores para as linha de transmissão da SE Botucatu 230kV.

4.4.4 Curto-circuito Trifásico na barra da SE Piraju 230kV

O curto-circuito trifásico simulado no ANAFAS, resultou em correntes de curto-circuito total na barra da SE Piraju 230kV apresentado na Tabela 96, e as correntes de contribuição circulantes pelas linhas de transmissão na Tabela 97.

Tabela 96 – Corrente de curto-circuito total trifásico na barra da SE Piraju 230kV pelo ANAFAS

Trifásico ϕABC [A]
8164,4

Fonte: Autoria própria

Tabela 97 – Correntes de contribuição ao curto-circuito trifásico na barra da SE Piraju 230kV pelo ANAFAS

Linha de Transmissão	Trifásico ϕABC [A]
LT 230kV – Assis/Salto Grande	1117,4
LT 230kV – Chavantes/Salto Grande	1359,8
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 1	135,2
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 2	186
LT 230kV – Chavantes/Piraju	4468
LT 230kV – Chavantes/Figueira	859

Fonte: Autoria própria

As Tabelas 98 e 99 apresentam a magnitude da corrente de curto-circuito total na barra da SE Piraju 230kV e a contribuição das linhas de transmissão ao curto-circuito, aquisitado pela simulação no PS SIMUL respectivamente.

Tabela 98 – Corrente de curto-circuito total trifásico na barra da SE Piraju 230kV pelo PS SIMUL

Trifásico ϕABC [A]
8053,95

Fonte: Autoria própria

Tabela 99 – Correntes de contribuição ao curto-circuito trifásico na barra da SE Piraju 230kV pelo PS SIMUL

Linha de Transmissão	Trifásico ϕABC [A]
LT 230kV – Assis/Salto Grande	1152,58
LT 230kV – Chavantes/Salto Grande	1393,00
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 1	147,57
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 2	203,08
LT 230kV – Chavantes/Piraju	4376,99
LT 230kV – Chavantes/Figueira	883,88

Fonte: Autoria própria

O erro relativo percentual entre os valores obtidos no ANAFAS e no PS SIMUL para a corrente de curto-circuito total na barra SE Piraju 230kV para um curto trifásico, é apresentado na Tabela 100, e a contribuição das linhas de transmissão para o curto-circuito apresentado na Tabela 101.

Tabela 100 – Erro relativo entre a corrente de curto-circuito total trifásico na barra SE Piraju

230kV	
Trifásico ϕABC [%]	
1,35	
Fonte: Autoria própria	

Tabela 101 – Erro relativo entre as correntes de contribuição ao curto-circuito trifásico na barra da SE Piraju 230kV

Linha de Transmissão	Trifásico ϕABC [%]
LT 230kV – Assis/Salto Grande	3,15
LT 230kV – Chavantes/Salto Grande	2,44
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 1	9,15
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 2	9,18
LT 230kV – Chavantes/Piraju	2,04
LT 230kV – Chavantes/Figueira	2,90
Fonte: Autoria própria	

Para um curto-circuito trifásico na barra da SE Piraju 230kV modelo pelo PS SIMUL, os resultados obtidos foram menores, com um erro percentual abaixo de 1,4% para a corrente de curto-circuito total na barra, e abaixo de 10 % para as correntes de contribuição ao curto oriundas das linhas de transmissão, se mantendo próximo aos resultados obtidos na modelagem do curto bifásico.

4.5 Curto-circuito na barra da SE Figueira 230kV

A ultima barra a ser analisada, foi a barra da SE Figueira 230kV a qual conforme a metodologia apresentada, foram modelados curto-circuito monofásicos, bifásicos com envolvimento do terra, bifásicos, e trifásicos, aqisitado-se os valores de corrente de curto-circuito total na barra, e as correntes de contribuição oriundas das linhas de transmissão.

4.5.1 Curto-circuito Monofásico na barra da SE Figueira 230kV

A Tabela 102 apresenta os valores da corrente de curto-circuito total na barra da SE Figueira 230kV, e a Tabela 103 as correntes de contribuição ao curto-circuito oriundas das linhas de transmissão aquisitados pelo ANAFAS.

Tabela 102 – Corrente de curto-circuito total monofásico na barra da SE Figueira 230kV pelo ANAFAS

Monofásico $\varnothing A$ + Terra [A]	Monofásico $\varnothing B$ + Terra [A]	Monofásico $\varnothing C$ + Terra [A]
10608,7	10608,7	10608,7

Fonte: Autoria própria

Tabela 103 – Correntes de contribuição ao curto-circuito monofásico na barra da SE Figueira 230kV pelo ANAFAS

Linha de Transmissão	Monofásico $\varnothing A$ + Terra [A]	Monofásico $\varnothing B$ + Terra [A]	Monofásico $\varnothing C$ + Terra [A]
LT 230kV – Assis/Salto Grande	198,7	198,7	198,7
LT 230kV – Chavantes/Salto Grande	245,6	245,6	245,6
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 1	90,5	90,5	90,5
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 2	120,5	120,5	120,5
LT 230kV – Chavantes/Piraju	220,9	220,9	220,9
LT 230kV – Chavantes/Figueira	1415,4	1415,4	1415,4

Fonte: Autoria própria

A Tabela 104 apresenta os valores da corrente de curto-circuito total na barra, e a Tabela 105 as correntes de contribuição ao curto-circuito oriundas das linhas de transmissão aquisitados pelo PS SIMUL.

Tabela 104 – Corrente de curto-circuito total monofásico na barra da SE Figueira 230kV pelo PS SIMUL

Monofásico $\varnothing A$ + Terra [A]	Monofásico $\varnothing B$ + Terra [A]	Monofásico $\varnothing C$ + Terra [A]
10451,04	10443,97	10443,97

Fonte: Autoria própria

Tabela 105 – Correntes de contribuição curto-circuito monofásico na barra da SE Figueira 230kV pelo PS SIMUL

Linha de Transmissão	Monofásico $\varnothing A$ + Terra [A]	Monofásico $\varnothing B$ + Terra [A]	Monofásico $\varnothing C$ + Terra [A]
LT 230kV – Assis/Salto Grande	228,25	228,25	227,48
LT 230kV – Chavantes/Salto Grande	335,66	335,95	334,89
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 1	124,66	157,68	124,59
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 2	157,90	157,68	157,76
LT 230kV – Chavantes/Piraju	310,35	310,21	310,07
LT 230kV – Chavantes/Figueira	1357,65	1357,65	1357,65

Fonte: Autoria própria

As Tabelas 106 e 107, representam o erro relativo da corrente de curto-circuito total na barra da SE Figueira 230kV e as contribuições das linhas de transmissão ao curto respectivamente.

Tabela 106 – Erro relativo entre as correntes de curto-circuito monofásico na barra SE Figueira 230kV

Monofásico $\varnothing A$ + Terra [%]	Monofásico $\varnothing B$ + Terra [%]	Monofásico $\varnothing C$ + Terra [%]
1,49	1,55	1,55

Fonte: Autoria própria

Tabela 107 – Erro relativo entre as correntes de contribuição ao curto-circuito monofásico na barra da SE Figueira 230kV

Linha	Monofásico ϕA + Terra [%]	Monofásico ϕB + Terra [%]	Monofásico ϕC + Terra [%]
LT 230kV – Assis/Salto Grande	14,87	14,87	14,48
LT 230kV – Chavantes/Salto Grande	36,67	36,79	36,35
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 1	37,75	74,24	37,67
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 2	31,03	30,86	30,92
LT 230kV – Chavantes/Piraju	40,49	40,43	40,37
LT 230kV – Chavantes/Figueira	4,08	4,08	4,08

Fonte: Autoria própria

Os resultados obtidos não foram satisfatórios, apresentando erros elevados, de aproximadamente 40% em alguns casos, porém nota-se que em todos os curtos-circuitos modelados, os curtos monofásicos em todas as barras resultaram em taxas de erros elevadas, se comparado aos outros curtos.

4.5.2 Curto-circuito Bifásico Terra na barra da SE Figueira 230kV

As correntes de curtos-circuitos bifásico com envolvimento da terra modelado no ANAFAS estão apresentadas na Tabela 108 para a corrente de curto-circuito total na barra SE Figueira 230kV e as correntes de contribuição das linhas de transmissão na Tabela 109.

Tabela 108 - Corrente de curto-circuito total bifásicos e com a terra na barra da SE Figueira 230kV pelo ANAFAS

Bifásico ϕAB + Terra [A]	Bifásico ϕBC + Terra [A]	Bifásico ϕCA + Terra [A]
12147,5	12147,5	12147,5

Fonte: Autoria própria

Tabela 109 – Correntes de contribuição ao curto-circuito bifásico com a terra na barra da SE Figueira 230kV pelo ANAFAS

Linha de Transmissão	Bifásico $\phi AB +$	Bifásico $\phi BC +$	Bifásico $\phi CA +$
	Terra [A]	Terra [A]	Terra [A]
LT 230kV – Assis/Salto Grande	304	304	304
LT 230kV – Chavantes/Salto Grande	352,8	352,8	352,8
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 1	126,4	126,4	126,4
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 2	172,5	172,5	172,5
LT 230kV – Chavantes/Piraju	306,2	306,2	306,2
LT 230kV – Chavantes/Figueira	1758,2	1758,2	1758,2

Fonte: Autoria própria

A Tabela 110 apresenta o resultado da corrente de curto-circuito total na barra da SE Figueira 230kV e a Tabela 111 as contribuições das linhas de transmissão para a modelagem no PS SIMUL

Tabela 110 – Corrente de curto-circuito total bifásicos com a terra na barra da SE Figueira 230kV pelo PS SIMUL

Bifásico $\phi AB +$ Terra [A]	Bifásico $\phi BC +$ Terra [A]	Bifásico $\phi CA +$ Terra [A]
12126,88	11773,33	12126,88

Fonte: Autoria própria

Tabela 111 – Correntes de contribuição ao curto-circuito bifásico com a terra na barra da SE Figueira 230kV pelo PS SIMUL

Linha de Transmissão	Bifásico $\phi AB +$	Bifásico $\phi BC +$	Bifásico $\phi CA +$
	Terra [A]	Terra [A]	Terra [A]
LT 230kV – Assis/Salto Grande	324,35	316,57	324,21
LT 230kV – Chavantes/Salto Grande	377,60	370,52	378,30
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 1	137,82	133,57	137,82
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 2	185,26	179,61	185,26
LT 230kV – Chavantes/Piraju	335,59	326,90	335,31
LT 230kV – Chavantes/Figueira	1732,41	1675,84	1739,48

Fonte: Autoria própria

O erro relativo percentual entre as modelagens dos curto-circuitos bifásicos com envolvimento da terra, é apresentado na Tabela 112, sendo a corrente de curto-

circuito total que passa pela barra da respective SE, e a Tabela 113 para as correntes de contribuição ao curto-circuito oriunda das linhas de transmissão.

Tabela 112 – Erro relativo entre as correntes curto-circuito total bifásico com a terra na barra da SE Figueira 230kV

Bifásico ϕAB + Terra [%]	Bifásico ϕBC + Terra [%]	Bifásico ϕCA + Terra [%]
0,17	3,08	0,17

Fonte: Autoria própria

Tabela 113 – Erro relativo entre as correntes de contribuição ao curto-circuito bifásico com a terra na barra da SE Figueira 230kV

Linha de Transmissão	Bifásico ϕAB + Terra [%]	Bifásico ϕBC + Terra [%]	Bifásico ϕCA + Terra [%]
LT 230kV – Assis/Salto Grande	6,69	4,14	6,65
LT 230kV – Chavantes/Salto Grande	7,03	5,02	7,23
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 1	9,03	5,67	9,03
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 2	7,40	4,12	7,40
LT 230kV – Chavantes/Piraju	9,60	6,76	9,51
LT 230kV – Chavantes/Figueira	1,47	4,68	1,06

Fonte: Autoria própria

O erro relativo percentual para um curto-circuito bifásico com a terra, foi menor que a modelagem de um curto monofásico, resultando taxas de até 10% de diferença entre os valores.

4.5.3 Curto-circuito Bifásico na barra da SE Figueira 230kV

Os curto-circuitos bifásicos modelados no ANAFAS estão apresentados nas Tabelas 114 e 115, sendo a corrente de curto-circuito total na barra SE Figueira 230kV e as correntes de contribuição das linhas de transmissão respectivamente.

Tabela 114 – Corrente de curto-circuito total bifásico na barra da SE Figueira 230kV pelo ANAFAS

Bifásico ϕAB [A]	Bifásico ϕBC [A]	Bifásico ϕCA [A]
11088,4	11088,4	11088,4

Fonte: Autoria própria

Tabela 115 – Correntes de contribuição ao curto-circuito bifásico na barra da SE Figueira 230kV pelo ANAFAS

Linha de Transmissão	Bifásico ϕAB [A]	Bifásico ϕBC [A]	Bifásico ϕCA [A]
LT 230kV – Assis/Salto Grande	295,6	295,6	295,6
LT 230kV – Chavantes/Salto Grande	339,6	339,6	339,6
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 1	120	120	120
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 2	165,1	165,1	165,1
LT 230kV – Chavantes/Piraju	290,2	290,2	290,2
LT 230kV – Chavantes/Figueira	1642,7	1642,7	1642,7

Fonte: Autoria própria

As Tabelas 116 e 117 apresentam os curto-circuitos bifásicos modelados no PS SIMUL, sendo a corrente de curto-circuito total na barra SE Figueira 230kV e as correntes de contribuição das linhas de transmissão respectivamente.

Tabela 116 – Corrente de curto-circuito total bifásico na barra da SE Figueira 230kV pelo PS SIMUL

Bifásico ϕAB [A]	Bifásico ϕBC [A]	Bifásico ϕCA [A]
11087,43	11073,29	11080,36

Fonte: Autoria própria

Tabela 117 – Correntes de contribuição ao curto-circuito bifásico na barra da SE Figueira 230kV pelo PS SIMUL

Linha de Transmissão	Bifásico ϕAB [A]	Bifásico ϕBC [A]	Bifásico ϕCA [A]
LT 230kV – Assis/Salto Grande	310,91	310,77	310,99
LT 230kV – Chavantes/Salto Grande	353,06	353,20	353,06
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 1	123,96	123,81	123,96
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 2	170,55	170,41	170,55
LT 230kV – Chavantes/Piraju	299,39	299,46	299,67
LT 230kV – Chavantes/Figueira	1633,42	1633,42	1633,42

Fonte: Autoria própria

O erro relativo percentual entre as modelagens dos curto-circuitos bifásicos é apresentado na Tabela 118 para a corrente de curto-circuito total que passa pela barra da SE, e a Tabela 119 para as correntes de contribuição ao curto-circuito oriundas das linhas de transmissão.

Tabela 118 – Erro relativo entre as correntes de curto-circuito total bifásico na barra da SE Figueira 230kV

Bifásico ϕAB [%]	Bifásico ϕBC [%]	Bifásico ϕCA [%]
0,01	0,14	0,07

Fonte: Autoria própria

Tabela 119 – Erro relativo entre as correntes de contribuição ao curto-circuito bifásico na barra da SE Figueira 230kV

Linha de Transmissão	Bifásico ϕAB [%]	Bifásico ϕBC [%]	Bifásico ϕCA [%]
LT 230kV – Assis/Salto Grande	5,18	5,13	5,20
LT 230kV – Chavantes/Salto Grande	3,96	4,00	3,96
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 1	3,30	3,18	3,30
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 2	3,30	3,22	3,30
LT 230kV – Chavantes/Piraju	3,17	3,19	3,26
LT 230kV – Chavantes/Figueira	0,57	0,57	0,57

Fonte: Autoria própria

Nota-se que o erro entre as correntes de curto-circuito total na barra foi baixo, menor que 0,15%, sendo um ótimo resultado. Para as correntes de contribuição das linhas de transmissão, os valores obtidos pelo PS SIMUL foram bem próximos do esperado, com um erro percentual abaixo de 5,5%.

4.5.4 Curto-circuito Trifásico na barra da SE Figueira 230kV

A simulação do curto-circuito trifásico no ANAFAS resultou em correntes de curto-circuito total na barra da SE Figueira 230kV presente na Tabela 120, e as correntes de contribuição ao curto vinda pelas linhas de transmissão está representada na Tabela 121.

Tabela 120 – Corrente de curto-circuito total trifásico na barra da SE Figueira 230kV pelo ANAFAS

Trifásico ϕABC [A]
12803,8

Fonte: Autoria própria

**Tabela 121 – Correntes de contribuição ao curto-circuito trifásico na barra da SE Figueira
230kV pelo ANAFAS**

Linha de Transmissão	Trifásico ϕABC [A]
LT 230kV – Assis/Salto Grande	241,70
LT 230kV – Chavantes/Salto Grande	392,20
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 1	138,60
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 2	190,70
LT 230kV – Chavantes/Piraju	335,10
LT 230kV – Chavantes/Figueira	1896,80

Fonte: Autoria própria

A Tabela 122 apresenta a magnitude da corrente de curto-circuito total na barra da respectiva SE, e a Tabela 123 a magnitude da corrente de contribuição das linhas de transmissão ao curto-circuito, aquisitado pela simulação no PS SIMUL.

**Tabela 122 – Corrente de curto-circuito total trifásico na barra da SE Figueira 230kV pelo PS
SIMUL**

Trifásico ϕABC [A]
12798,63

Fonte: Autoria própria

**Tabela 123 – Correntes de contribuição ao curto-circuito trifásico na barra da SE Figueira
230kV pelo PS SIMUL**

Linha de Transmissão	Trifásico ϕABC [A]
LT 230kV – Assis/Salto Grande	359,21
LT 230kV – Chavantes/Salto Grande	408,00
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 1	143,12
LT 230kV – Chavantes/Botucatu 2	196,93
LT 230kV – Chavantes/Piraju	345,63
LT 230kV – Chavantes/Figueira	1880,90

Fonte: Autoria própria

O erro relativo entre os resultados obtidos em ambos os *softwares* é apresentado na Tabela 124 para a corrente de curto-circuito total na barra da SE, e na Tabela 125 para a corrente de contribuição as linhas de transmissão.

Tabela 124 – Erro relativo entre a corrente de curto-circuito total trifásico na barra SE Figueira 230kV

Trifásico ϕABC [%]
0,04

Fonte: Autoria própria

Tabela 125 – Erro relativo entre as correntes de contribuição ao curto-circuito trifásico na barra da SE Figueira 230kV

Linha de Transmissão	Trifásico ϕABC [%]
Assis – Salto Grande	48,62
Chavantes – Salto Grande	4,03
Botucatu c1	3,26
Botucatu c2	3,27
Figueira	3,14
Piraju	0,84

Fonte: Autoria própria

O resultado obtido para a corrente de curto-circuito total na barra da SE Figueira 230kV resultou em um erro de 0,04%. Para as correntes de contribuição os resultados também se mostraram satisfatórios, entre 4%, em excessão a linha de transmissão entre a SE Assis 230kV e a SE Salto Grande 230kV, com uma taxa de erro de aproximadamente 50%, novamente sendo necessário um aprofundamento na modelagem e verificação se o modelo adotado é o mais apropriado para a simulação.

5 CONCLUSÃO

Os resultados evidenciaram que, para todas as modalidades de curto-circuito analisadas — monofásico, bifásico, bifásico com envolvimento da terra e trifásico — as diferenças nas magnitudes das correntes de falta permaneceram, em sua maioria, com taxas de erros entre 0,1% e 10% aproximadamente.

O *software* PS SIMUL se mostrou melhor para simulações de curto-circuito onde não houve envolvimento da terra, apresentando resultados mais próximos dos adquiridos no ANAFAS. Um dos modos de se diminuir as taxas de erros para esses tipos de curto-circuito é a melhor investigação da causa, fato que não foi realizado, ou a utilização de outros modelos de linha de transmissão disponíveis que melhor satisfaçam os requisitos do sistema. Os curtos-circuitos com maiores taxas de erro foram os monofásicos, fato que pode ser explicado devido a sua maior complexidade de solução, utilizando em seu cálculo os parâmetros de sequência positiva, negativa e zero, podendo resultar maior erro.

Entretanto, foi observado que, nas contribuições individuais das linhas de transmissão para os curtos-circuitos, o erro relativo se apresentou mais elevado, chegando a ultrapassar 50% em determinados ramos, especialmente nos circuitos de menor influência no sistema. Tais erros não influenciaram na soma total das correntes de curto-circuito nas barras, visto que as taxas de erro para as correntes de curto-circuito total se mantiveram entre 0,01% e 5%.

Outro fator importante é que os dois softwares não possuem a mesma finalidade, sendo que o ANAFAS é utilizado para estudos de curto-circuito em regime permanente, enquanto o PS SIMUL é utilizado para estudos de transitórios eletromagnéticos. Conclui-se que o sistema escolhido é complexo, com muitos equipamentos, e que a modelagem de tal sistema deve ser mais detalhada, ser estudada a fundo cada modelo e implementado métodos de melhoria e arranjos no sistema que aproximem mais os resultados, sem perder a validade do sistema.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Geração:** matriz Energética brasileira alcança 200 GW. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2024/matriz-eletrica-brasileira-alcanca-200-gw>. Acesso em: 28 abril. 2024.

BICHELS, A. **Sistemas elétricos de potência:** métodos de análise e solução. Curitiba: EDUTFPR, 2018. 466 p.

CAMINHA, A. C. **Introdução á proteção dos sistemas elétricos**. São Paulo: Editora Blucher, 1977. E-book. ISBN 9788521217589. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#!/books/9788521217589/>.

CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. *ANAFAS – Análise de Falhas Simultâneas*, versão 8.0 [programa de computador]. Rio de Janeiro: CEPEL, 2024

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Fontes**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/areas-de-atuacao/energia-eletrica/expansao-da-geracao/fontes>. Acesso em: 5 fev. 2024.

FERREIRA, R. V. **Previsão de demanda:** um estudo de caso para o sistema interligado nacional. 2006. 142 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

FILHO, J. M; MAMEDE, D. R. **Proteção de sistemas elétricos de potência**. LTC: Rio de Janeiro, 2011. 805 p.

FRAZÃO, R. J. A. **Proteção do sistema elétrico de potência**. Editora e Distribuidora Educacional S.A: Londrina, 2019.

INDÚSTRIA & COMÉRCIO LTDA. PS Simul. Versão 2.02.150. FREE. Uberlândia, 2022.

KAGAN, N; OLIVEIRA, C. C. B; ROBBA, E. J. **Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica**. 2 ed. Blücher: São Paulo, 2000. ISBN 9788521200789. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788521216896/pageid/3>

KINDERMANN, G. **Curto-circuito**. 2 ed. SAGRA LUZZATO: Porto Alegre, 1997

OLIVEIRA, I. C.; et al. **Proteção de sistemas elétricos**. Porto Alegre: Grupo A, 2022. E-book. ISBN 9786556902104. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9786556902104/>.

OLIVEIRA, I. C; et al. **Geração de energia elétrica**. SAGAH: Porto Alegre, 2021. E-book. ISBN 9786556902531. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9786556902531/pageid/1>

OLIVEIRA, I. C. de; et al. **Transmissão e distribuição de energia**. SAGAH: Porto Alegre, 2021. E-book. ISBN 9786556902111. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9786556902111/pageid/>
Operador Nacional do Sistema Elétrico. **O que é o SIN**. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>. Acesso em: 5 fev. 2024.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **O sistema em números**. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>. Acesso em: 5 fev. 2024.

PEQUENO, L. E. B. **Novas facilidades de operação do programa anarede**. 2010. 92 p. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

PINTO, M. **Energia elétrica: geração, transmissão e sistemas interligados**. LTC: Rio de Janeiro, 2018. E-book. ISBN 9788521625254. Disponível em: [https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/978-85-216-2526-1/epubcfi/6/10 \[%3Bvnd.vst.idref%3Dcopyright\]!/4/28/1:32\[0-0%2C40\]](https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/978-85-216-2526-1/epubcfi/6/10 [%3Bvnd.vst.idref%3Dcopyright]!/4/28/1:32[0-0%2C40]).

PS SIMUL: Por que migrar para o ps simul. Conprove. Disponível em: https://conprove.com/wp-content/uploads/2020/04/PS_SIMUL_Por_que_migrar_para_o_PS_Simul_V1.pdf. Acesso em: 05 mai. 2024.

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

SILVA, A. C. **Sistemas elétricos de potência e proteção de linhas de transmissão**. 2020. 53 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.

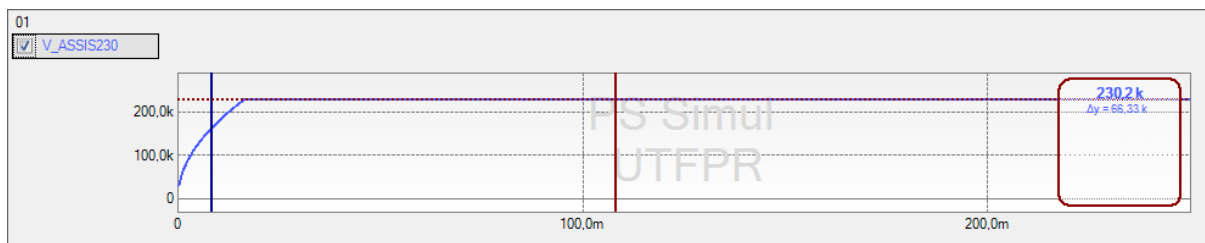
SILVEIRA, M. F. et al. **Sistemas elétricos de potência**. Grupo A: Porto Alegre, 2022. E-book. ISBN 9786556900872. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9786556900872>

TAESA. **Setor de transmissão.** Disponível em: <https://ri.taesa.com.br/sobre-a-taesa/setor-de-transmissao/>. Acesso em: 19 mar. 2024.

VASCONCELOS, K. **Estudos de proteção digital para sistemas elétricos de potência sob diversas condições de faltas em bancada didática smart grid.** 2023. 70 p. Monografia (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal da Paraíba, João Pessoa, 2023.

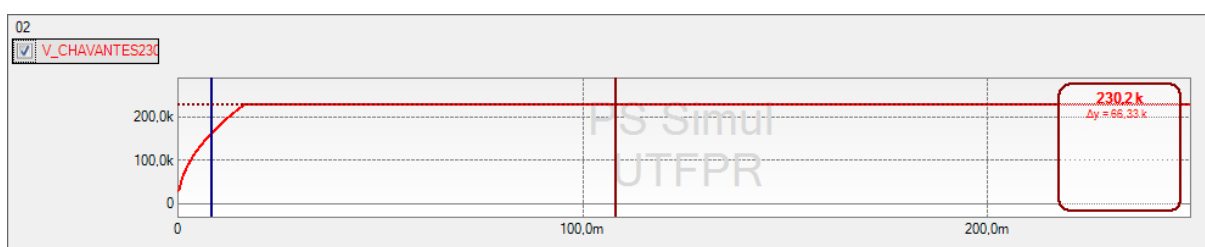
ANEXO A - Tensões nas barras no período pré-falta em regime permanente

Figura 20. Tensão pré-falta em regime permanente na barra da SE Assis 230 kV no PS SIMUL



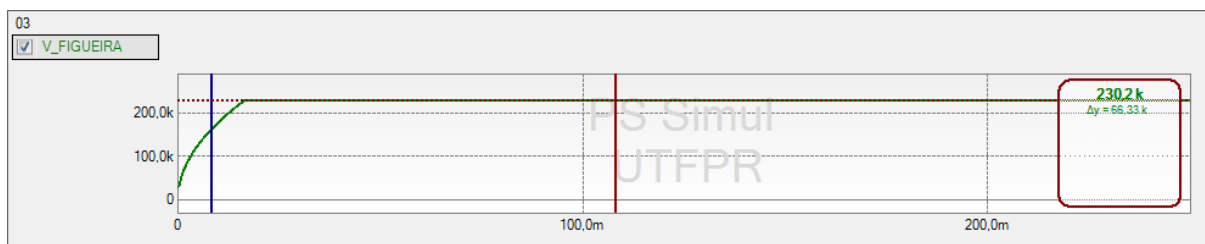
Fonte: Autoria Própria.

Figura 21. Tensão pré-falta em regime permanente na barra da SE Chavantes 230 kV no PS SIMUL



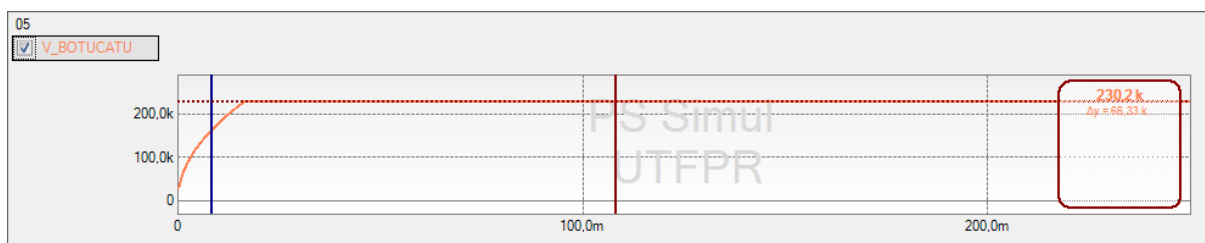
Fonte: Autoria Própria.

Figura 22. Tensão pré-falta em regime permanente na barra da SE Figueira 230 kV no PS SIMUL



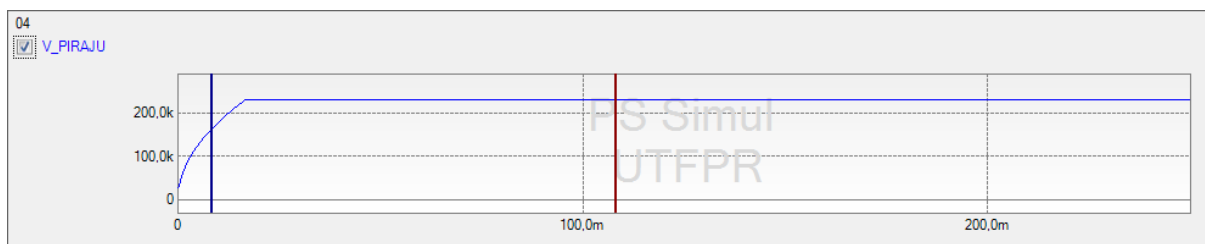
Fonte: Autoria Própria.

Figura 23. Tensão pré-falta em regime permanente na barra da SE Botucatu 230 kV no PS SIMUL



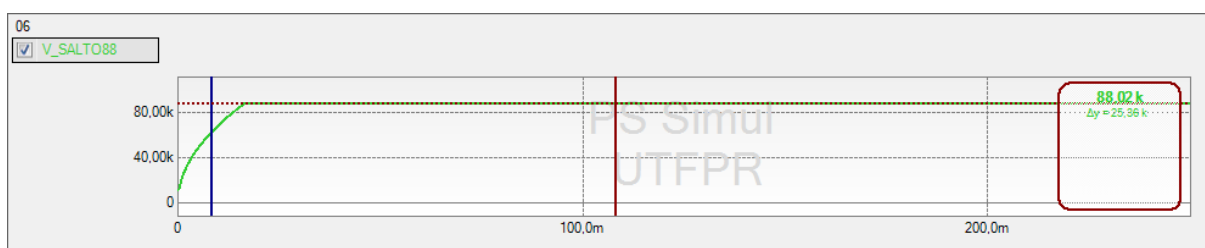
Fonte: Autoria Própria.

Figura 24. Tensão pré-falta em regime permanente na barra da SE Piraju 230 kV no PS SIMUL



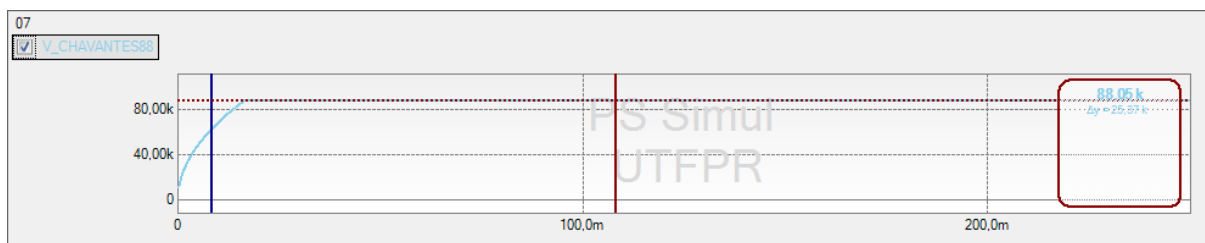
Fonte: Autoria Própria.

Figura 25. Tensão pré-falta em regime permanente na barra da SE Salto Grande 88 kV no PS SIMUL



Fonte: Autoria Própria.

Figura 26. Tensão pré-falta em regime permanente na barra da SE Chavantes 88 kV no PS SIMUL



Fonte: Autoria Própria.

ANEXO B - Blocos dos componentes utilizados na simulação

Figura 27. Parâmetros de configuração inseridos nas linhas de transmissão

LinCbo-1 (2) (Linhas/Cabos)

+ Geral

- Geral Lin/Cbo

Entrada de Dados	Matriz Seq
Frequência	60,00 Hz
Comprimento	1,00 km
Efeito Skin	Não
Transposta	Sim
Tipo Transposição	Total
Terra Segmentado	Não
Parâmetros Distribuídos	Não
Modelo Calc Z	Aproximado (Wedepohl/Wilcox)
Condutância em derivação	0 Ω
Fasor no LOG	Mod e Ang

+ Representação do Retorno pelo Solo

- Modelo

Modelo	RL
Interpolar	Sim
Força $P_i / D_t > \text{TempoOnda}$	Não
Def. Fator de Propagação	Calculado
Fator de Propagação	1,00

+ Dados Modelo Pi

+ Dados Modelo Frq Modal

+ Dados Modelo Frq Fase

+ Geometria

+ Matrizes

+ Medições

Fonte: Autoria Própria.

Figura 28. Impedâncias de sequência inseridas no bloco de linhas de transmissão

- Matrizes

Nº de Fases	3
Matriz Simétrica (R)	Não
Matriz Simétrica (L)	Não
Matriz Simétrica (C)	Não
L em Ohms (Ω)	Sim
C em Mhos (Ω)	Sim
> Matriz de Resistência	
> Matriz de Indutância	
> Matriz de Capacitância	
< Matriz de Seq (R)	
R+	0,664 Ω
R0	0,520 Ω
< Matriz de Seq (L)	
L+	10,55 Ω
L0	7,74 Ω
> Matriz de Seq (C)	

+ Medições

Fonte: Autoria Própria

Figura 29. Bloco de linha de transmissão mútuas

LinCbo-10 (1) (Linhas/Cabos)

[-] Geral	
Descrição	LinCbo-10 (1)
Tipo	Linha de Transmissão ▼
Cabo Tipo Pipe	Não ▼
Habilitar Falta	Não ▼
Habilitar SIR	Não ▼
[-] Geral Lin/Cbo	
Entrada de Dados	Matriz Seq ▼
Frequência	60,00 Hz
Comprimento	1,00 km
Efeito Skin	Não ▼
Transposta	Sim ▼
Tipo Transposição	Grupos 3Ø ▼
Terra Segmentado	Não ▼
Parâmetros Distribuídos	Não ▼
Modelo Calc Z	Aproximado (Wedepohl/Wilcox) ▼
Condutância em derivação	0 Ω
Fasor no LOG	Mod e Ang ▼
[+] Representação do Retorno pelo Solo	
[-] Modelo	
Modelo	Pi ▼
Interpolar	Sim ▼
Força Pi p/ Dt > TempoOnda	Não ▼
Def. Fator de Propagação	Calculado ▼
Fator de Propagação	1,00
[-] Dados Modelo Pi	
Definição Circ Pi	Nº de Circuitos ▼
Representação do Retorno pelo Solo	

Fonte: Autoria Própria

Figura 30. Impedâncias mútua de sequência inseridas no bloco de linhas de transmissão

LinCbo-10 (1) (Linhas/Cabos)

Correção Hiperbólica Não

+ Dados Modelo Frq Modal

+ Dados Modelo Frq Fase

+ Geometria

- Matrizes

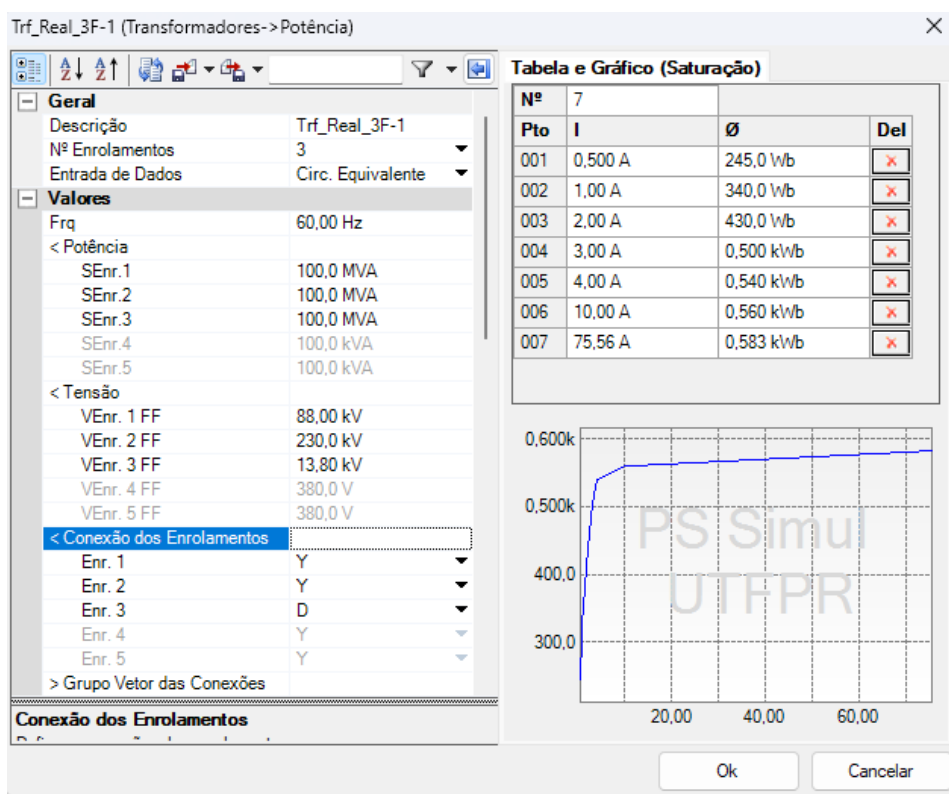
Nº de Fases	6
Matriz Simétrica (R)	Não
Matriz Simétrica (L)	Não
Matriz Simétrica (C)	Não
L em Ohms (Ω)	Sim
C em Mhos (Ω)	Sim
> Matriz de Resistência	
> Matriz de Indutância	
> Matriz de Capacitância	
< Matriz de Seq (R)	
R+ (1)	4,04 Ω
R0 (1)	26,60 Ω
R+ (2)	2,97 Ω
R0 (2)	19,48 Ω
Rm 1-2	1,20 Ω
< Matriz de Seq (L)	
L+ (1)	23,16 Ω
L0 (1)	89,62 Ω
L+ (2)	16,53 Ω
L0 (2)	64,68 Ω
Lm 1-2	2,00 Ω
< Matriz de Seq (C)	
C+ (1)	1,68 n Ω
C0 (1)	300,4 $\mu\Omega$
C+ (2)	1,68 n Ω
C0 (2)	363,3 $\mu\Omega$
Cm 1-2	0 Ω

+ Medições

Dados Modelo Frq Modal

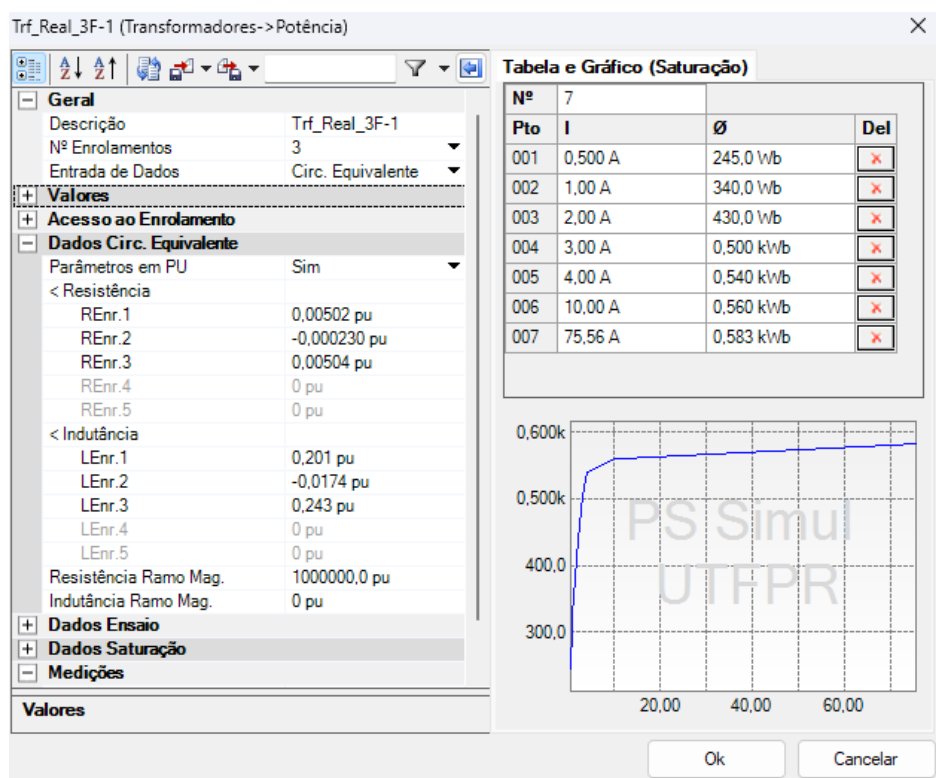
Fonte: Autoria Própria

Figura 31. Bloco do transformador trifásico real de três enrolamentos



Fonte: Autoria Própria

Figura 32. Impedâncias do transformador trifásico real de três enrolamentos



Fonte: Autoria Própria