

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

Leonardo Felipe da Silva dos Santos

ANÁLISE DE FALTAS EM SISTEMAS TRIFÁSICOS A DOIS FIOS

Santa Maria, RS
2023

Leonardo Felipe da Silva dos Santos

ANÁLISE DE FALTAS EM SISTEMAS TRIFÁSICOS A DOIS FIOS

Dissertação apresentada ao Curso/Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Elétrica**.

Orientador: Prof. Dr. Ghendy Cardoso Jr.

Coorientador: Prof. Dr. Gustavo Marchesan.

Santa Maria, RS

2023

Leonardo Felipe da Silva dos Santos

ANÁLISE DE FALTAS EM SISTEMAS TRIFÁSICOS A DOIS FIOS

Dissertação apresentada ao Curso/Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Elétrica**.

Aprovado em 28 de julho de 2023

Ghendy Cardoso Jr, Dr (UFSM)

(Orientador)

Gustavo Marchesan, Dr. (UFSM)

(Coorientador)

José Ezequiel Ramos, Dr. (UNIR)

Eduardo Machado dos Santos, Dr (UNIPAMPA)

Santa Maria, RS

2023

AGRADECIMENTOS

À minha família, em especial aos meus pais, Cenilda e Leoni, pelo amor, apoio, incentivo e cobrança constantes ao longo desta trajetória.

Ao meu irmão Pedro e minha namorada Gabriéli, pelo apoio, tempo de conversa, cobranças e incentivo.

Ao meu orientador Ghendy Cardoso Junior e coorientador Gustavo Marchesan pela orientação precisa, paciência e dedicação na condução deste trabalho.

Aos professores e demais membros da banca examinadora, Dr. José Ezequiel Ramos e Dr. Eduardo Machado dos Santos, pelas contribuições valiosas e pela avaliação criteriosa deste trabalho.

Aos colegas de laboratório e amigos que estiveram ao meu lado, principalmente Jean Roscini, Kaynan Maresch, Miguel Martins, Leonardo Silveira, Artur Dala Nora, Giancarlo Daros, Igor Barboza, Leonardo Vieira, Lucas Ilha, Caison Ramos, Gabriel Volpato, Aquiles Borin, Leyla Kraulich, Renata Martins, Lucas Rocha, Beatriz Cordeiro, Roberta Stefanello, Thais Schmidt, Luiz Fernando Menegazzo, Indaiara Flores, Maiquel Hammes, entre outros que estavam comigo, compartilhando conhecimento, experiências e momentos de descontração.

À Universidade Federal de Santa Maria, pela oportunidade de realizar este estudo e pelo suporte acadêmico proporcionado ao longo da minha formação.

Aos colegas do Centro de Excelência em Energia e Sistemas de Potência - CEESP, pela amizade e incentivo.

Agradeço ao CNPQ e a CEEE-Equatorial pelo suporte financeiro durante o projeto.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a conclusão deste trabalho e para o meu crescimento pessoal e acadêmico.

Muito obrigado!

Um grama de ação vale uma tonelada de teoria.

(ENGELS, Friedrich, Século 19)

RESUMO

ANÁLISE DE FALTAS EM SISTEMAS TRIFÁSICOS A DOIS FIOS

AUTOR: Leonardo Felipe da Silva dos Santos

ORIENTADOR: Ghendy Cardoso Jr, Dr

COORIENTADOR: Gustavo Marchesan, Dr

O Sistema de proteção é indispensável à distribuição de energia elétrica, seja rural ou urbana. Em meio as expansões das redes rurais, o custo de uma rede trifásica pode impossibilitar a aplicação do projeto, restringindo o acesso do consumidor a uma rede de MRT (monofásico com retorno por terra) ou MRN (monofásico com retorno por neutro). Estudos recentes têm proposto o desenvolvimento de uma rede trifásica inovadora conhecida como sistema T2F (trifásico a dois fios), que utiliza a terra como condutor de fase. Essa abordagem tem se mostrado financeiramente viável para a instalação de redes trifásicas em áreas rurais, uma vez que aproveita a infraestrutura já existente e não possui restrições quanto à potência monofásica. Neste estudo, foi proposta uma metodologia para o cálculo de curto-circuito em um sistema trifásico não convencional a dois fios (T2F). Além disso, buscou-se avaliar os resultados dos cálculos de curto-circuito por meio de simulações no sistema T2F. Também foi realizado um processo de validação dos modelos de elos fusíveis, comparando as informações das tabelas dos fabricantes com os valores obtidos neste estudo. Este estudo por fim validou as equações e o esquema de proteção do sistema T2F por meio de elos fusíveis. Cabe destacar que o sistema T2F possui um maior valor agregado social e econômico em comparação com o sistema trifásico convencional atualmente disponível para redes rurais.

Palavras-chave: Proteção de Distribuição; Redes Rurais; Trifásico a Dois Fios; Redes não convencionais; Elos Fusíveis.

ABSTRACT

FAULT ANALYSIS IN TWO-WIRE THREE-PHASE SYSTEMS

AUTHOR: Leonardo Felipe da Silva dos Santos

ADVISOR: Ghendy Cardoso Jr, Dr

CO-ADVISOR: Gustavo Marchesan, Dr

The protection system is essential for the distribution of electrical energy, whether in rural or urban areas. During rural network expansions, the cost of a three-phase network can hinder the implementation of the project, limiting consumer access to an MRT network (single-phase with earth return) or MRN network (single-phase with neutral return). Recent studies have proposed the development of an innovative three-phase network known as the TPTW system (two-wire three-phase), which utilizes the earth as a phase conductor. This approach has proven to be financially viable for installing three-phase networks in rural areas, as it leverages existing infrastructure and has no restrictions on single-phase power. In this study, a methodology was proposed for calculating short-circuits in a non-conventional two-wire three-phase system (TPTW). Additionally, an evaluation of the short-circuit calculations was conducted through simulations in the TPTW system. A validation process was also performed for the fuse-link models by comparing manufacturer data with values obtained in this study. Ultimately, this study validated the equations and the protection scheme for the TPTW system using fuse-links. It is worth noting that the TPTW system offers greater social and economic added value compared to the conventional three-phase system currently available for rural networks.

Keywords: Distribution Protection; Rural Networks; Two-Wire Three-Phase; Non-conventional Networks; Fuse-Links.

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001

da Silva dos Santos, Leonardo Felipe
ANÁLISE DE FALTAS EM SISTEMAS TRIFÁSICOS A DOIS FIOS
/ Leonardo Felipe da Silva dos Santos.- 2023.
97 p.; 30 cm

Orientador: Ghendy Cardoso Júnior
Coorientador: Gustavo Marchesan
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica, RS, 2023

1. Proteção de Distribuição 2. Redes Rurais 3.
Trifásico a Dois Fios 4. Redes não convencionais 5. Elos
Fusíveis I. Cardoso Júnior, Ghendy II. Marchesan,
Gustavo III. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Declaro, LEONARDO FELIPE DA SILVA DOS SANTOS, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquemático de uma rede SWER.	18
Figura 2 - Sistema monofilar com neutro parcial	19
Figura 3 - Rede proposta por Marchesan.....	22
Figura 4 - Componentes de um Elo Fusível.	24
Figura 5 - Curva de Mínima Fusão e Máxima Interrupção do elo fusível 6K, e 15K.....	28
Figura 6 - Modelo de rede referencia do sistema T2F.....	30
Figura 7 - Modelo equivalente, sem capacitâncias.....	31
Figura 8 - Modelo de Curto-Circuito do sistema T2F.....	31
Figura 9 - Diagrama de curto-circuito, modelo reduzido com valores substituidos.....	32
Figura 10 - Modelo de curto-circuito em final de linha.	36
Figura 11 - Modelo de curto-circuito deslizante ao longo da Linha.	37
Figura 12 - Modelo de linha utilizada para testes.....	38
Figura 13 - Comparativo - Falta no final da linha T2F, erro relativo entre simulação e calculado.....	39
Figura 14 - Comparativo – Caso 1 da Falta ABC no meio da linha T2F, erro relativo entre simulação e calculado.....	40
Figura 15 - Comparativo – Caso 2 da Falta ABC no meio da linha T2F, erro relativo entre simulação e calculado.....	41
Figura 16 - Comparativo – Falta AB no meio da linha T2F, erro relativo entre simulação e calculado.....	42
Figura 17 - Comparativo – Falta AC no meio da linha T2F, erro relativo entre simulação e calculado.....	43
Figura 18 - Comparativo – Falta BC no meio da linha T2F, erro relativo entre simulação e calculado.....	44
Figura 19 –Curto-circuito no ponto <i>F1</i> , assinalado em vermelho – início da linha T2F.	45
Figura 35 –Curto-circuito no ponto <i>F2</i> , assinalado em vermelho.....	48
Figura 51 - Elo fusível - 1H, curvas características - comparativo calculado versus fabricante.	54
Figura 52 - Elo fusível - 2H, curvas características - comparativo calculado versus fabricante.	54
Figura 53 - Elo fusível - 3H, curvas características - comparativo calculado versus fabricante.	55
Figura 54 - Elo fusível - 5H, curvas características - comparativo calculado versus fabricante.	55
Figura 55 - Elo fusível - 8H, curvas características - comparativo calculado versus fabricante.	56
Figura 56 - Elo fusível - 6K, curvas características - comparativo calculado versus fabricante.	58
Figura 57 - Elo fusível - 8K, curvas características - comparativo calculado versus fabricante.	58
Figura 58 - Elo fusível - 10K, curvas características - comparativo calculado versus fabricante.....	59
Figura 59 - Elo fusível - 12K, curvas características - comparativo calculado versus fabricante.....	59

Figura 60 - Elo fusível - 15K, curvas características - comparativo calculado versus fabricante.....	60
Figura 61 - Elo fusível - 20K, curvas características - comparativo calculado versus fabricante.....	60
Figura 62 - Elo fusível - 25K, curvas características - comparativo calculado versus fabricante.....	61
Figura 63 - Elo fusível - 30K, curvas características - comparativo calculado versus fabricante.....	61
Figura 64 - Elo fusível - 40K, curvas características - comparativo calculado versus fabricante.....	62
Figura 65 - Elo fusível - 50K, curvas características - comparativo calculado versus fabricante.....	62
Figura 66 - Elo fusível - 65K, curvas características - comparativo calculado versus fabricante.....	63
Figura 67 - Elo fusível - 80K, curvas características - comparativo calculado versus fabricante.....	63
Figura 68 - Elo fusível - 100K, curvas características - comparativo calculado versus fabricante.....	64
Figura 69 – Esquema de proteção para redes convencionais.....	64
Figura 70 - Esquema de proteção proposto para o sistema T2F.....	65
Figura 71 - Fluxograma algoritmo executado dentro do Simulink®.....	66
Figura 72 – Curto-circuito deslizante.....	67
Figura 73 - Proteção Transformador Isolador - Esquema convencional.....	67
Figura 74 - Proteção Transformador Isolador - Esquema T2F.....	68
Figura 75 - Proteção da rede - Esquema convencional.....	68
Figura 76 - Proteção da rede - Esquema T2F.....	68
Figura 77 - Proteção do transformador consumidor - Esquema convencional.....	69
Figura 78 - Proteção do transformador consumidor - Esquema T2F.....	69
Figura 79 – Exemplo de curto-circuito Trifásico no sistema T2F – Caso 1.....	70
Figura 80 – Quantidade de atuações versus o tipo de elo fusível – Curto-circuito ABC – Caso 1.....	71
Figura 81 – Tempo de abertura versus o tipo do elo fusível – Curto -circuito ABC – Caso 1.....	72
Figura 82 – Exemplo de curto-circuito Trifásico no sistema T2F – Caso 2.....	72
Figura 83 – Quantidade de atuações versus o tipo de elo fusível – Curto-circuito ABC – Caso 2.....	73
Figura 84 – Tempo de abertura versus o tipo do elo fusível – Curto-circuito ABC – Caso 2.....	74
Figura 85 – Exemplo de curto-circuito bifásico fases aéreas no sistema T2F.....	75
Figura 86 – Quantidade de atuações versus o tipo de elo fusível – Curto-circuito AB.....	76
Figura 87 – Tempo de abertura versus o tipo do elo fusível – Curto-circuito AB.....	77
Figura 88 – Exemplo de curto-circuito bifásico fase-solo no sistema T2F.....	78
Figura 89 – Quantidade de atuações versus o tipo de elo fusível – Curto-circuito AC.....	79
Figura 90 – Quantidade de atuações versus o tipo de elo fusível – Curto-circuito BC.....	79
Figura 91 – Tempo de abertura versus o tipo do elo fusível – Curto-circuito AC.....	80
Figura 92 – Tempo de abertura versus o tipo do elo fusível – Curto-circuito BC.....	81

LISTA DE ACRONIMOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CEEE	Companhia Estadual de Energia Elétrica
CEEE-D	Companhia Estadual de Energia Elétrica - Distribuição
COPEL	Companhia Paranaense de Energia
CPFL	Companhia Piratininga de Força e Luz
CT	Centro de Tecnologia
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FECOERGS	Federação das Cooperativas de Energia, Telefonia e Desenvolvimento Rural do Rio Grande do Sul
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
MME	Ministério de Minas e Energia
MRT	Monofásicas com Retorno por Terra
P&D	Pesquisa & Desenvolvimento
PNAD	Programa Nacional de Amostras de Domicílios
PRE	Para Raio Energizado
SWER	Single Wire Earth Return
T2F	Trifásico a Dois Fios
TCC	Time Current Curve

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	13
1.2	MOTIVAÇÃO	15
1.3	OBJETIVOS	16
1.3.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
1.4	CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO	16
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	17
2.2	REDE MRT.....	17
2.2.1	REDES MRT NÃO ISOLADAS OU NEUTRO PARCIAL.	18
2.2.2	REDES MRT COM TRANSFORMADOR ISOLADOR	19
2.3	PARA RAIOS ENERGIZADOS (PRE)	19
2.4	REDE T2F.....	20
2.4.1	COMPENSAÇÃO SÉRIE	23
2.5	ELO FUSÍVEL	24
2.5.1	PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO	25
<i>2.5.1.1</i>	<i>CURVAS CARACTERÍSTICAS TEMPO X CORRENTE</i>	<i>25</i>
2.5.2	CLASSIFICAÇÃO.....	25
<i>2.5.2.1</i>	<i>TIPO “H”</i>	<i>26</i>
<i>2.5.2.2</i>	<i>TIPO “K”</i>	<i>26</i>
<i>2.5.2.3</i>	<i>TIPO “T”</i>	<i>27</i>
3	METODOLOGIA PARA CÁLCULO DE CURTO-CIRCUITO NO SISTEMA T2F	29
3.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	29
3.2	Metodologia de cálculo de curto-circuito no sistema T2F.....	29
3.3	VALIDAÇÃO	35
3.3.1	CURTO-CIRCUITO EM REDES RURAIS	35
3.3.2	DEFINIÇÃO DE CURTO-CIRCUITO T2F.....	35
3.3.3	TESTES E RESULTADOS	38
<i>3.3.3.1</i>	<i>CURTO-CIRCUITO NO FINAL DA LINHA.....</i>	<i>38</i>
<i>3.3.3.2</i>	<i>CURTO-CIRCUITO DESLISANTE – FALTA ABC</i>	<i>39</i>
<i>3.3.3.3</i>	<i>CURTO-CIRCUITO DESLISANTE – FALTA AB.....</i>	<i>41</i>
<i>3.3.3.4</i>	<i>CURTO-CIRCUITO DESLISANTE – FALTA AC.....</i>	<i>42</i>

3.3.3.5 <i>CURTO-CIRCUITO DESLISANTE – FALTA BC</i>	43
3.3.4 VISUALIZAÇÃO DOS VALORES DE CURTOS-CIRCUITOS	44
3.3.4.1 <i>CURTO-CIRCUITO NO INÍCIO DE LINHA</i>	44
3.3.4.2 <i>CURTO-CIRCUITO NO FINAL DE LINHA</i>	48
4 PROTEÇÃO DO SISTEMA T2F	52
4.1 MODELAGEM ELOS FUSÍVEIS	52
4.1.1 MODELAGEM ELO FUSÍVEIS TIPO “H”	52
4.1.2 MODELAGEM FUSÍVEIS TIPO “K”	56
4.2 PROTEÇÃO POR FUSÍVEIS	64
4.3 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO.....	66
4.3.1 PROTEÇÃO DO TRANSFORMADOR ISOLADOR	67
4.3.2 PROTEÇÃO DA REDE	68
4.3.3 PROTEÇÃO DO TRANSFORMADOR CONSUMIDOR	68
4.3.4 CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO	69
4.3.5 CURTO-CIRCUITO BIFÁSICOS ENTRE FASES AÉREAS	75
4.3.6 CURTO-CIRCUITO BIFÁSICOS COM A TERRA	77
4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	81
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	82
5.1 CONCLUSÕES	82
5.2 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	82
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

De acordo com o Programa Nacional de Amostras de Domicílios (PNAD) em 2015, cerca de 15,28% da população brasileira residia no meio rural. Segundo o levantamento da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 6,5% do consumo de eletricidade é voltado as zonas rurais, tendo sido atendidos 4,7 milhões de consumidores (EPE, 2021). Até início do século XX, o uso da energia elétrica pelas famílias da zona rural brasileira é considerado precário por razões diversas. Segundo Vicente (2013) pode-se citar a baixa cobertura de serviço público, falta de investimento em infraestrutura e falta de acesso dos consumidores devido à falta de recursos financeiros.

A partir de 1980 em diante, iniciativas públicas e privadas, foram implementadas com o intuito de levar energia elétrica às zonas rurais, para promoção de desenvolvimento econômico destas áreas. Dentre essas iniciativas pode-se citar, programas como Clic Rural I e II (1984/1989 e 1990); Interluz (1989/1991); PROLUZ I e II (1990/1992 e 1995/1999); PRODEEM (1994); Luz da Terra (1996/2002); Luz no Campo (1999/2003) e Luz Para Todos (2003/2023). Todos estes programas foram implementados para aumentar o acesso das famílias em zonas rurais à energia elétrica, fazendo uso de um sistema de eletrificação rural de baixo custo.

O programa Luz Para Todos, do Ministério de Minas e Energia (MME), atualmente Programa de Universalização de Energia tem como objetivo atender, com energia elétrica, 100% da população brasileira, tanto em zonas rurais quanto em cidades. Acredita-se que cerca de 1 milhão de consumidores já foram beneficiados, (EPE, 2021). A universalização da energia elétrica no Brasil, Lei N° 10.438/2002, define que os serviços públicos de energia elétrica devem ser realizados de forma gratuita, sem ônus ao solicitante, desde que atenda aos requisitos básicos listados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), sendo eles:

- enquadramento no Grupo B;
- carga instalada na unidade consumidora de até 50kW;
- possa ser efetivado em tensão inferior a 2,3kV, ainda que necessária extensão da rede primária de tensão inferior ou igual a 138kV, ou atendido por sistemas isolados;
- Por fim não exista unidade consumidora com fornecimento de energia na mesma propriedade.

A gratuidade da conexão também se aplica a conexão individual de unidade consumidora situada em comunidades indígenas e quilombolas, desde que os demais critérios sejam satisfeitos segundo as normativas n° 950 e 1000 (ANEEL, 2021a, b). A distância geográfica associada com o baixo consumo destas propriedades faz com que o investimento em novas redes de distribuição não se torne atrativo. Caso o proprietário deseje aumentar a carga, devido ao aumento da demanda seja por novas técnicas de irrigação, plantio, criação animal entre outros avanços, deve haver uma contrapartida monetária junto a concessionária. Este aumento da demanda geralmente é feito pela utilização de motores trifásicos, que em relação aos monofásicos, tem maior eficiência. O elevado custo dos sistemas trifásicos de distribuição pode ser contornados com alternativas como (FANDI, 2013).

As iniciativas para levar a energia elétrica até áreas rurais, geralmente utilizam redes do Monofásicas com Retorno por Terra (MRT). Estas redes têm potência limitada à monofásica, mesmo com a utilização de inversores a jusante para produzir sistema trifásico. Pelo mundo, as redes SWER (do inglês, *Single Wire Earth Return*) são usadas para levar energia a áreas remotas.

As redes SWER são utilizadas desde aproximadamente 1925, tendo sido proposta inicialmente na Nova Zelândia. Hoje a técnica é utilizada em países como Uganda, Brasil, Austrália, Estados Unidos, entre outros (MANDENO, 1947). Por mais que a limitação de potência, seja uma das principais desvantagens dessa técnica, essa topologia é utilizada para levar energia a regiões remotas.

Uma alternativa para a repotencialização dos sistemas monofásicos do tipo MRT é o sistema trifásico à dois fios (T2F), cujas primeiras ideias foram publicadas por Borges (2017). Esta rede trifásica não convencional utiliza dois condutores aéreos e o solo como condutor da terceira fase. Este sistema necessita somente de dois condutores aéreos, para transmissão da potência trifásica entre os extremos da rede. No lado da carga se faz a coleta do terceiro condutor através da conexão com o aterramento.

Um projeto de Pesquisa & Desenvolvimento (P&D) da Companhia Estadual de Energia Elétrica (CEEE), com seu ramo de Distribuição (CEEE-D), atualmente Grupo Equatorial Energia, em conjunto com a Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), visa a concepção de um sistema de distribuição baseado nessa topologia. O projeto tem por objetivo identificar seus parâmetros e limitações, buscando um menor tempo de retorno e menor investimento inicial. O T2F visa auxiliar a eletrificação rural aproveitando estruturas de MRT já existentes ou não, que

é o caso de redes novas. Parte desta premissa visa a possibilidade da reutilização não só dos postes e estruturas como também das ferragens pré-existentes.

Todavia, utilizar o solo como condutor, apresenta riscos, como a energização de elementos estranhos à rede e tensões de toque e passo (MARTINS, 2022). Assim os sistemas de proteção devem atuar para evitar sobrecorrentes que possam gerar altas tensões de toque e passo.

Neste sentido, este trabalho propõe o estudo de curto-circuito, e proteção dos sistemas T2F. Também foi feita a modelagem dos elos fusíveis utilizados nas simulações.

1.2 MOTIVAÇÃO

As diversas características de consumo apresentadas pelos consumidores de energia elétrica, juntamente com as limitações de recursos financeiros para investimentos em programas de eletrificação rural, fazem com que as concessionárias invistam em sistemas monofásicos. Essas características podem ser explicadas pelo baixo consumo requisitado e o atendimento a pequenas densidades de carga o que resulta em pouca demanda simultânea.

É importante salientar que, com as obrigações de universalização, não haverá mais propriedades sem acesso à energia elétrica. No entanto, a maioria das redes que são instaladas na zona rural não foram projetadas prevendo futuro aumento de carga. Os avanços das técnicas de produção agrícola, como o plantio irrigado e o beneficiamento de produtos, o consumo de energia elétrica pelo produtor rural tende a aumentar. Porém, com o sistema monofásico atual, o produtor rural fica restrito às limitações inerentes a esse tipo de sistema.

Uma Audiência Pública da Comissão de Agricultura, Pecuária, Abastecimento e Desenvolvimento Rural foi realizada na Assembleia Legislativa do RS em setembro de 2015. Durante o evento, foi discutido o programa "ENERGIA - A Qualidade que o Brasil Precisa", que buscava melhorias nas redes monofásicas e a construção de redes bifásicas e trifásicas, seguindo o modelo do programa "Luz para Todos". Segundo o Ministro de Minas e Energia, Lucas Redeker, existiam 102 mil km de redes monofásicas no estado que precisavam ser transformadas em trifásicas, demandando um investimento de R\$1,6 bilhões.

Embora tornar o acesso à energia trifásica mais atraente para as concessionárias seja de grande importância, este novo sistema necessita do desenvolvimento de metodologias de proteção específicas. Por esse motivo, é necessário realizar uma análise de curto-circuito em sistemas não convencionais de distribuição de energia elétrica.

1.3 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo realizar um estudo de análise de faltas e proteção no sistema trifásico a dois fios, denominado de T2F.

1.3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- (i). Propor um método de cálculo de curto-circuito para o sistema T2F, uma vez que o T2F não tem simetria nas fases;
- (ii). Pesquisar como são estabelecidos os critérios para proteção de redes similares;
- (iii). Investigar os procedimentos de segurança para redes que utilizam o solo como meio condutor;
- (iv). Propor condições para que o sistema seja protegido e seguro em pleno funcionamento.

1.4 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

Os altos custos envolvidos na eletrificação rural, aliados às dificuldades na obtenção de recursos, tornam necessários estudos de otimização do sistema elétrico, de modo a adaptá-lo às particularidades das cargas elétricas nas áreas rurais do Brasil. Dentre esses estudos, destaca-se o uso do sistema trifásico com dois condutores aéreos (T2F).

Este trabalho utiliza os conceitos e metodologias da literatura para avaliar e dimensionar a proteção do T2F, estabelecendo critérios para sua operação segura.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

No capítulo 2 contém a revisão bibliográfica sobre métodos não tradicionais e alternativas ao sistema trifásico tais como Redes MRT, Para Raio Energizado (PRE), T2F. Também serão explorados os Elos Fusíveis.

No capítulo 3 mostra os procedimentos de cálculo de curto-circuito no sistema T2F, passando pelo equacionamento do curto-circuito, tipos de curto-circuito e a validação dos valores por meio simulações.

O capítulo 4 descreve a filosofia de proteção ao ser adotada no sistema T2F e a validação por meio de simulações computacionais.

No capítulo 5 é apresentada a conclusão da pesquisa e as propostas para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A primeira eletrificação rural no Brasil foi estabelecida em 1941 pela Cooperativa de Força e Luz, no Oitavo Distrito do município de José Bonifácio, agora conhecido como Erechim, no Rio Grande do Sul. Seu objetivo era fornecer energia elétrica para uma pequena localidade, sede da companhia colonizadora da região, a *Jewish Colonization and Association* (em português, colonização e associação Judaica), que estava instalada lá desde 1911 (FECOERGS, 2016).

Apesar da grande evolução do sistema de distribuição de energia elétrica, assim como em outros países, no Brasil o suprimento de eletricidade nas propriedades rurais ainda é predominantemente realizado por redes monofásicas. Apesar disso, fatores técnicos e econômicos ainda favorecem a distribuição de energia com esse princípio.

Neste capítulo, serão apresentadas as configurações existentes para atender principalmente às cargas rurais.

2.2 REDE MRT

Há mais de 70 anos, o sistema MRT tem sido utilizado em eletrificação rural em vários países. Seu objetivo original, em 1947, foi reduzir os custos de expansão da rede elétrica em áreas rurais na Ilha Norte da Nova Zelândia. As primeiras conclusões de Mandeno (1947) foram suficientes para tornar o sistema MRT uma referência mundial no atendimento às cargas rurais. Esse sistema consiste basicamente em um único condutor que se estende por dezenas ou até centenas de quilômetros, com vários transformadores de distribuição em sua extensão. As correntes fluem da linha para a terra através de uma malha de aterramento conectada ao primário do transformador, e assim a corrente encontra o caminho de retorno para o transformador principal no início da linha, completando o circuito.

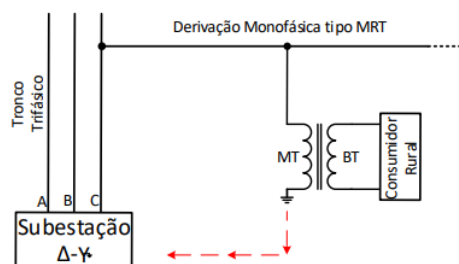
Mandeno (1947) desenvolveu os cálculos necessários para a implementação da primeira linha monofásica utilizando o solo como meio condutor. A rede SWER (do inglês, *Single Wire Earth Return*) foi criada com o objetivo de melhorar o acesso à rede elétrica no meio rural e beneficia as concessionárias por ter uma construção mais simples, tornando-a mais atraente para pequenos consumidores rurais.

O sistema MRT tem sido fundamental para melhorar a qualidade de vida em áreas rurais, muitas vezes isoladas e remotas. Atualmente, essa técnica é amplamente empregada no mundo. No entanto, com o crescente avanço tecnológico, a energia se tornou essencial para o dia a dia do consumidor rural. A necessidade do aumento de potência para esses consumidores é uma realidade, mas existe uma inviabilidade econômica para o atendimento com sistemas trifásicos convencionais.

No Brasil, esse sistema foi incentivado pela Eletrobras e teve sua normatização próxima aos anos 80, embora outras concessionárias, como a COPEL, já tenham normatizado esse sistema desde a década de 70, no Brasil o SWER é conhecido como MRT.

O sistema MRT é derivado, principalmente, de uma ou duas fases de uma rede trifásica, dependendo de sua potência máxima (sistemas menores não requerem um transformador isolador e podem ser derivados diretamente de uma fase) como visto na Figura 1.

Figura 1 - Esquemático de uma rede SWER.



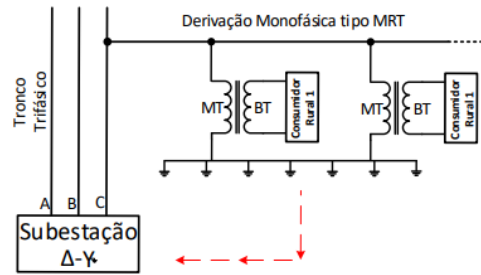
Fonte: Adaptado, (FANDI, 2013).

2.2.1 REDES MRT NÃO ISOLADAS OU NEUTRO PARCIAL.

As redes MRT são caracterizadas como não isoladas e são derivadas diretamente de uma rede trifásica, onde o retorno por terra ocorre na subestação, desde que ela possua uma configuração estrela-aterrado na sua origem. O transformador de distribuição possui o enrolamento primário ligado à fase e à terra.

Embora essa topologia seja vantajosa por sua simplicidade de instalação e funcionamento, é importante avaliar o balanceamento das fases no entorno do sistema, para que não haja desequilíbrio na rede trifásica originária. Para garantir o pleno funcionamento, a potência dessa topologia é geralmente limitada a 25kVA, como vista na Figura 2, podem utilizar vários pontos de aterramento visando melhorar a topologia.

Figura 2 - Sistema monofilar com neutro parcial



Fonte: Adaptado, (FANDI, 2013).

2.2.2 REDES MRT COM TRANSFORMADOR ISOLADOR

As redes MRT que fazem uso de transformador isolador derivam de duas fases da rede trifásica e passam por transformadores isoladores. Esses transformadores possuem uma fase em cada terminal de entrada e um terminal de saída aterrado (geralmente com uma relação de 1:1). Isso evita que a corrente elétrica de retorno percorra grandes distâncias por terra, tornando o sistema mais seguro.

Além disso, o transformador isolador previne a dessensibilização do dispositivo de proteção de neutro, evitando sua falha de operação em curtos-circuitos fase-terra na rede trifásica. Outra vantagem é o melhor controle de tensão e ajuste dos taps do transformador isolador.

No entanto, há uma desvantagem em relação ao custo adicional tanto do transformador isolador quanto do sistema de aterramento. Além de tornar o sistema uma zona fora de dos relés sensíveis a neutro, quais estão a montante do transformador isolador, no caso de faltas a terra dentro do sistema. Com isso a proteção destes sistemas se dá por dispositivos dispostos a montante, com sensibilidade de fase. Além disso, a complexidade do sistema aumenta, especialmente em relação ao aterramento do transformador isolador, o que pode limitar a máxima potência disponível para o ramo.

2.3 PARA RAIOS ENERGIZADO (PRE)

O Sistema MRT de Mandeno (1947) tem sido um incentivo para a pesquisa e implementação de novas tecnologias de transmissão de energia elétrica. Iliceto et al. (1989) desenvolveu um sistema de Para-Raios Energizado (PRE) baseado na isolação e energização dos cabos para-raios de uma linha de transmissão de 161 kV em Gana, país da África Ocidental. O sistema proposto pode assumir quatro diferentes configurações.

Na primeira, apenas um cabo para-raios é energizado para atender cargas monofásicas com retorno pelo solo. Na segunda, ambos os cabos para-raios são energizados para atender cargas monofásicas com retorno pelo cabo.

Na terceira, os dois cabos para-raios são energizados para atender consumidores trifásicos com transformadores conectados em delta aberto (conexão V) limitando o sistema a atender apenas carga entre fase e neutro. Na quarta e última configuração, os dois para-raios são utilizados com a terra como fase, o que apresenta particularidades relacionadas à resistência do solo e à relação de capacitâncias entre o solo e os condutores. Essa última configuração é a mais apropriada para atender cargas trifásicas.

O sistema PRE de Iliceto et al. (1989) foi desenvolvido com base no Sistema MRT de Mandeno (1947) e representa uma inovação tecnológica para atender às demandas crescentes de energia elétrica em áreas rurais.

No Brasil, a implementação do sistema PRE trifásico (quarta alternativa) ocorreu em Rondônia, através de um convênio entre a Eletronorte e as Centrais Elétricas de Rondônia. A análise dos dados de operação do sistema PRE Rondônia realizada por Rose, (1997) concluiu que este esquema é uma alternativa viável para a universalização da energia elétrica. Possibilitando o fornecimento de energia a pequenas comunidades ou cargas localizadas próximas às linhas de transmissão, o que seria proibitivo por meios convencionais devido a questões econômicas.

Os resultados do sistema PRE Rondônia também motivaram outras pesquisas. Ramos (2010) realizou um levantamento e classificação das interrupções do sistema. Ele avaliou o desempenho da tecnologia frente a descargas atmosféricas e estabeleceu índices operacionais para a avaliação do desempenho da tecnologia. Uma análise cuidadosa da tensão induzida causada pelo acoplamento capacitivo foi realizada, e um regulador de tensão baseado em sintonização de ressonância foi implementado. Ambos os estudos demonstraram que a tecnologia PRE atende aos requisitos básicos de qualidade e segurança para o fornecimento de energia elétrica, dentro dos conceitos fundamentais do sistema PRE.

2.4 REDE T2F

O sistema MRT é um sistema monofásico, onde transformadores possuem apenas um condutor aéreo com o retorno constituído pelas hastes aterradas em cada extremidade, permitindo uma construção simplificada, rápida e econômica (Kräulich et al., 2023).

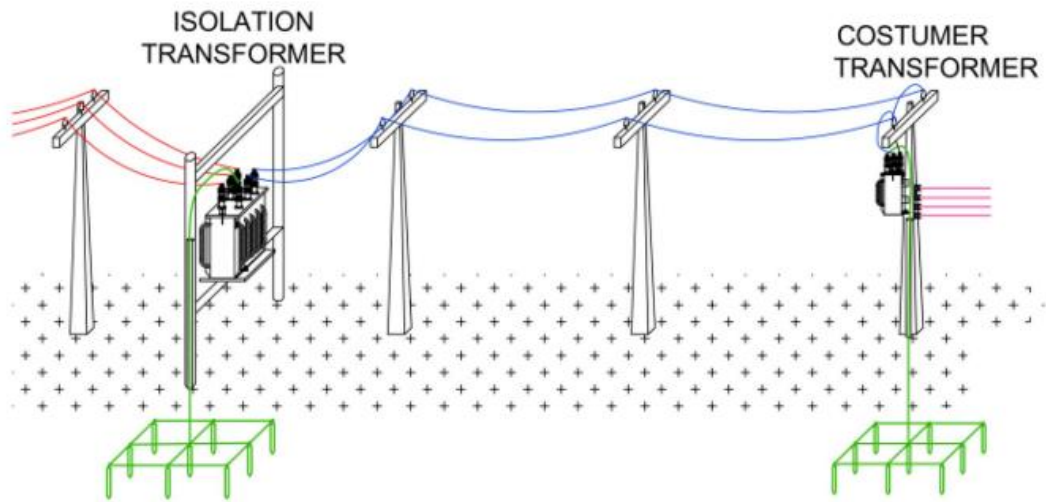
Dentre principais vantagens do sistema MRT estão a simplificação da construção, permitindo maior rapidez e menores custos, utilizam estações transformadoras mais simples e baratas. Os transformadores têm somente uma bucha de alta tensão e exigindo, portanto, um único para-raios e uma chave fusível monofásica.

Contudo, com o aumento de cargas, as redes rurais que necessitam passar de monofásicas para trifásicas, acabam sendo um desafio para a concessionária. Existe um alto custo da construção de uma rede trifásica nova, já que nem sempre é possível simplesmente acrescentar dois cabos aéreos a estrutura do MRT.

O sistema T2F utiliza um dos aterramentos já presente na rede MRT. Adiciona-se um transformador isolador trifásico com uma das fases aterradas e outras duas aéreas. Com isso, ainda pode-se usar a estrutura existente do SWER com apenas um isolador e chave fusível adicional.

No sistema T2F (mostrado na Figura 3), algumas considerações sobre a segurança contra choque elétrico devido à injeção de corrente no solo são necessárias. Segundo o padrão internacional da IEEE 80, o fluxo de corrente no solo irá produzir um gradiente de tensão no ponto e aos arredores do aterramento. Ainda, o guia da IEEE traz conceitos como corrente máxima tolerada, aterramento acidental e tensões de segurança toleráveis.

Figura 3 - Rede proposta por Marchesan.



Fonte: Adaptado de Marchesan, et. al (2022).

Embora haja semelhanças do T2F com o PRE, Marchesan et al. (2022), enfatiza que o sistema proposto apresenta características específicas que devem ser observadas, tais como:

- Para implementar o sistema T2F é necessário utilizar um transformador de isolamento que atue como intermediário entre a fonte de alimentação e a linha não convencional.
- Este transformador é alimentado por tensão trifásica simétrica em seu primário e possui uma das fases direcionada para conexão solidamente aterrada em seu secundário.
- O sistema é capaz de suprir 100% de carga trifásica através de transformadores de média tensão MT/BT convencionais, com enrolamento primário em delta e secundário em estrela aterrado.
- No entanto, devido à circulação de corrente no solo, é necessário garantir que o aterramento esteja seguro para seres humanos e animais, não aqueça o solo e não interfira com as linhas telefônicas.
- Além disso, os motores trifásicos de indução de maior potência podem ser alimentados para atender às necessidades dos agricultores rurais.

Inicialmente, a instalação do transformador isolador tem como objetivo isolar o circuito de alimentação trifásico da fonte alimentadora do circuito trifásico que abastece a área rural. Isso restringe a corrente de alimentação do circuito, permitindo um melhor controle das tensões de passo e de toque. É recomendado um monitoramento periódico dos pontos de aterramento dos transformadores isolador e consumidor.

As condições de alimentação deste transformador seguem as tensões normalmente padronizadas pelas concessionárias para a área rural e que atendem ao sistema de média tensão trifásico convencional.

2.4.1 COMPENSAÇÃO SÉRIE

A compensação série tem como objetivo minimizar o desequilíbrio na impedância série do sistema, e isso é alcançado por meio da inserção de um resistor-reator série ou de um resistor-capacitor na trajetória da terra. A compensação série é apresentada em (1),

$$Z_e = r_i - r_g + j0,121 \left[\ln \left(\frac{D_{ij}^2}{0.3048 \times GMR_i} \right) + 7,934 \right] \frac{1}{1.609} \frac{\Omega}{km} \quad (1)$$

Onde:

- r_i = resistência do condutor;
- r_g = resistência da terra;
- D_{ij} = Distância entre os condutores aéreos, em metros;
- GMR_i = o raio médio geométrico.

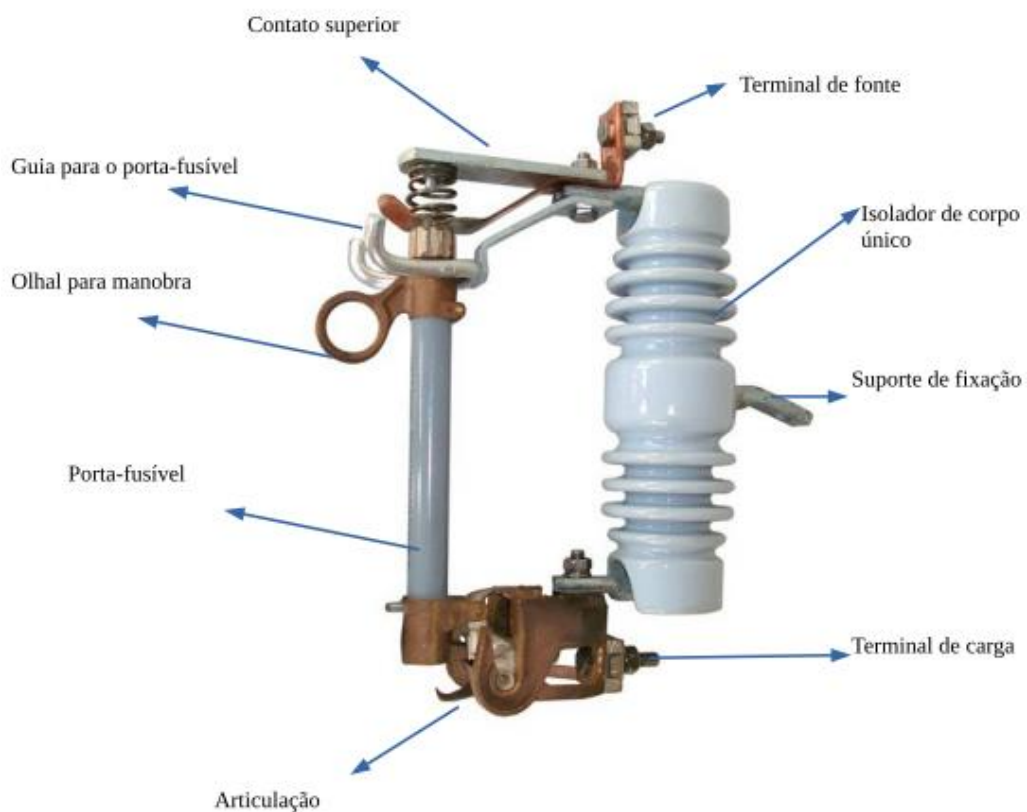
A equação (1), retorna o valor da impedância de compensação série do sistema qual seria aplicado ao meio do sistema. Porém com a existência da impedância do solo, ela é colocada após o transformador isolador, quando necessária conforme os estudos de Marchesan et al. (2022).

2.5 ELO FUSÍVEL

Segundo Gönen (2014), o elo fusível é o dispositivo mais utilizado para proteção de ramais e equipamentos, como transformadores e banco de capacitores, devido ao seu baixo custo, facilidade de substituição e desempenho satisfatório. A Figura 4 ilustra um exemplo de elo fusível.

De acordo com Gers e Holmes (2011) os fusíveis mais comumente utilizados em sistemas de distribuição são os do tipo expulsão, assim chamados porque operam expulsando gases de ionizantes. A chave fusível é composta por três componentes: a base, o porta-fusível (ou cartucho) e o elemento fusível (ou elo fusível). A Figura 4 representa esses componentes.

Figura 4 - Componentes de um Elo Fusível.



Fonte: Adaptada de <http://judycabos.com.br/produto/chave-fusivel-distribuicao-porce-lana-362kv-100a-10ka-c-ferragem-rpc/>

2.5.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

O elo fusível tem como função suportar a corrente nominal sem afetar suas características e, quando exposto a uma sobrecorrente, fundir-se em um tempo determinado de acordo com sua curva tempo x corrente.

Conforme Giguier (1988), existem diversos fatores que influenciam o tempo de fusão do elo fusível, como a densidade de corrente, as propriedades físicas do material do elemento fusível, o material envolvente, a temperatura ambiente e o grau de envelhecimento, entre outros.

Durante a passagem de sobrecorrente em uma chave-fusível, o elemento fusível se funde devido ao efeito térmico, o que interrompe o circuito. O arco formado na alta temperatura resultante da fusão provoca a queima e decomposição parcial do revestimento interno do cartucho, gerando gases que extinguem o arco no instante de corrente nula.

De acordo com Corrêa (2016), as características do elemento fusível determinam uma curva característica de tempo de fusão que é inversamente proporcional ao valor da corrente. Essa curva é usada na fabricação de elos fusíveis com diferentes curvas de tempo-corrente.

2.5.1.1 CURVAS CARACTERÍSTICAS TEMPO X CORRENTE

Segundo Anderson (1998), os elos fusíveis são fabricados com o objetivo de serem intercambiáveis, com dimensões padrões e com curvas TCC (do inglês, *Time Current Curve*) para se obter atributos específicos. Essas curvas utilizadas nos estudos de proteção são fornecidas pelos fabricantes de elos fusíveis em gráficos com escala logarítmica.

De acordo com a norma publicada em IEEE (2016), cada elo fusível possui três curvas que o definem: Mínima Fusão (MF), Máxima Fusão e Máxima Interrupção (MI). A curva de MF representa o menor tempo que o elo fusível demora a se fundir para uma determinada corrente. A curva de máxima fusão representa o maior tempo que o elo fusível demora a se fundir para uma determinada corrente. Por fim, a curva de MI representa o tempo total que a chave fusível leva para interromper a passagem da corrente, tempo este que inclui a abertura da chave fusível e a extinção do arco elétrico.

2.5.2 CLASSIFICAÇÃO

De acordo com Mamede Filho e Mamede (2020), é possível classificar os fusíveis em três tipos: H, K e T.

2.5.2.1 TIPO "H"

De acordo com Mamede Filho e Mamede (2020), o elo fusível tipo "H" é caracterizado por apresentar valores elevados de Relação de Rapidez (RR), ou seja, de ação lenta, conhecido como fusível de alto surto. A RR pode variar de 11,4 a 36,4. Este tipo de elo fusível é comumente utilizado na proteção de transformadores de distribuição, pois não queima em casos de surtos transitórios, como por exemplo, na energização do transformador. São fabricados com correntes nominais de 0,5, 1, 2, 3 e 5A e não possuem capacidade de sobrecarga.

Relação de Rapidez (RR) é a relação entre os valores de corrente mínima fusão a 0,1s e a 300s, para valores nominais até 100 A e 600s para valores acima de 100 A como demonstrado em (2).

$$RR_{2H} = \frac{80}{3,5} = 22,84 \quad (2)$$

Sendo 22,84 a Relação de Rapidez (RR) para o fusível 2H.

Tabela 1 - Fusão dos Elos Fusíveis do Tipo "H" em 300 segundos.

Elo	1H	2H	3H	5H
Mínima de Fusão	2,3A	3,5A	4,5A	7,0A

Fonte: (GIGUER, 1988)

2.5.2.2 TIPO "K"

Segundo Mamede Filho e Mamede (2020), os fusíveis tipo "K" apresentam tempo de atuação rápido e são frequentemente usados na proteção de ramais de alimentadores de distribuição, bem como ao longo dos alimentadores. Eles têm uma relação de rapidez (RR) entre 6 e 8,1 e são fabricados em dois tipos: preferenciais e não preferenciais.

Os elos preferenciais possuem correntes nominais de 6, 10, 15, 25, 40, 65, 100, 140 e 200 A, enquanto os não preferenciais possuem correntes nominais de 8, 12, 20, 30, 50 e 80 A.

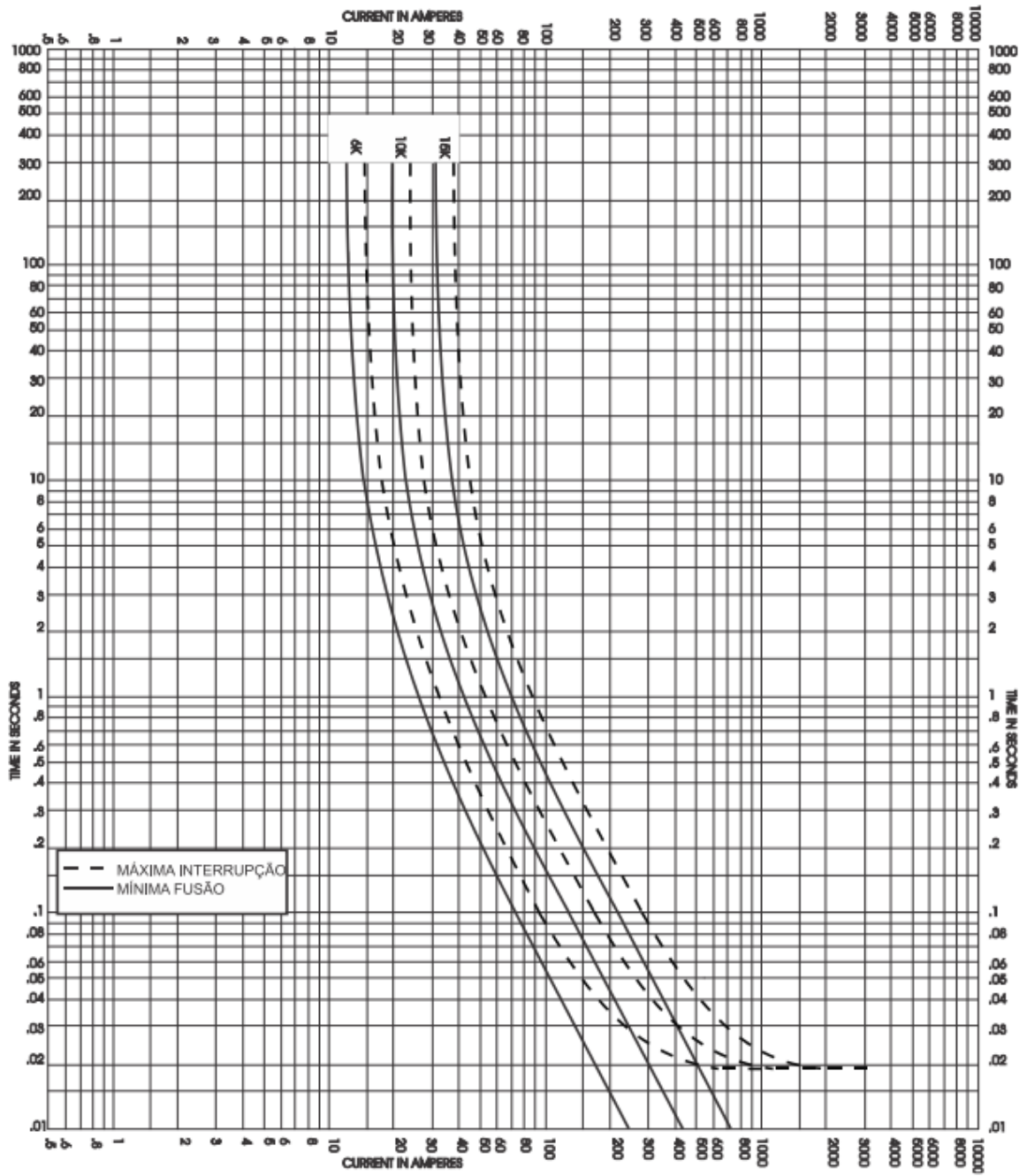
Devido à falta de seletividade entre os elos preferenciais e não preferenciais adjacentes, em estudos de proteção, é necessário escolher um grupo e excluir automaticamente o outro. Normalmente, escolhem-se os elos preferenciais, já que o número deles é maior.

2.5.2.3 TIPO "T"

O elo fusível do tipo "T" apresenta tempo de atuação lento, com Relação de Rapidez (RR) entre 10 e 13, em comparação com o tipo "K" de mesma bitola. É comumente utilizado na proteção de alimentadores e ramais, possuindo corrente nominal igual ao elo tipo "K". Tanto os elos fusíveis Tipo "K" e "T" suportam sobrecarga de até 1,5 vezes os seus valores nominais, sem causar excesso de temperatura à chave fusível.

Essa capacidade de sobrecarga é muito importante em aplicações em que a coordenação limita a escolha do elo. No entanto, a fusão dos elos Tipo K e T ocorre aproximadamente com 2,5 vezes os seus valores nominais para 300s.

Figura 5 - Curva de Mínima Fusão e Máxima Interrupção do elo fusível 6K, e 15K.



Fonte: Adaptado de Eletrofusi Power Systems Fuse links (2019).

3 METODOLOGIA PARA CÁLCULO DE CURTO-CIRCUITO NO SISTEMA T2F

3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

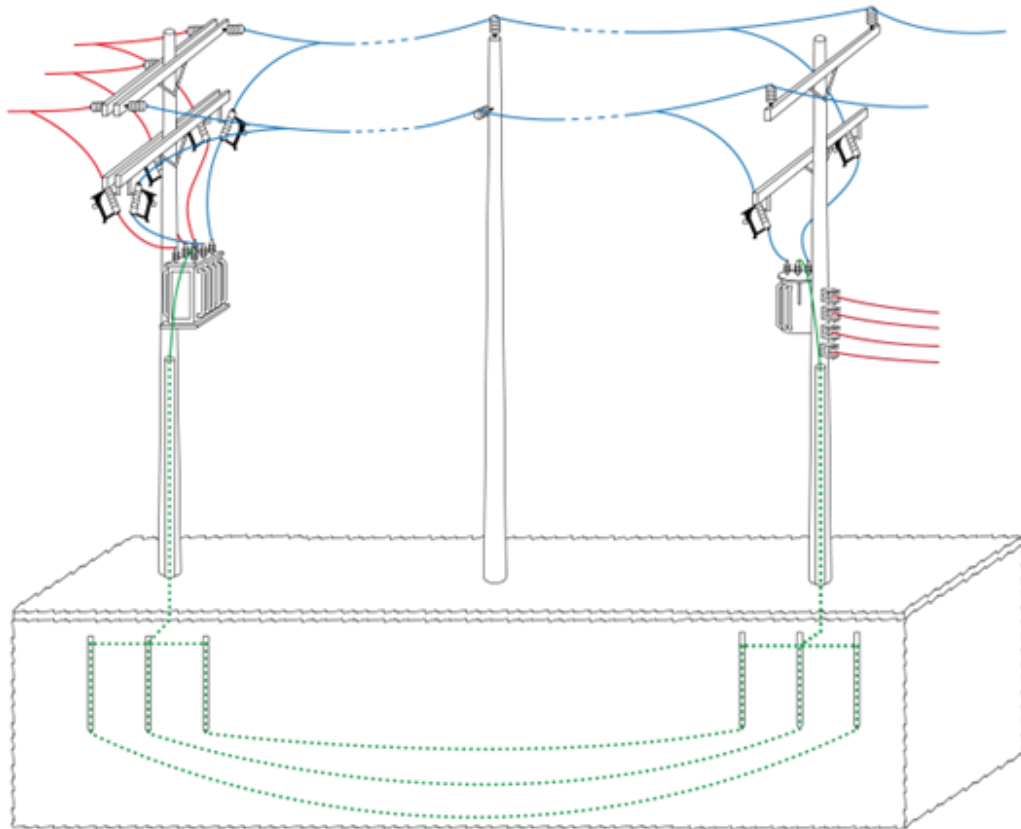
Neste capítulo são descritos a forma qual foi feita os equacionamentos do sistema T2F, juntamente com a validação destes equacionamentos, utilizando metodologias computacionais e simulações numéricas sobre o sistema T2F.

3.2 Metodologia de cálculo de curto-circuito no sistema T2F

O sistema T2F Figura 6 é composto por dois condutores aéreos em que a terra é parte ativa do sistema. Este sistema utiliza um transformador de isolamento para se conectar à rede convencional trifásica. O transformador isolador utiliza uma conexão delta-estrela, sendo a entrada em delta e a saída em estrela fase aterrada. O transformador consumidor tem a mesma configuração atualmente utilizada, delta-estrela com o neutro aterrado, sendo uma das fases do lado delta aterrada.

O transformador isolador e o transformador consumidor, são conectados utilizando as estruturas de aterramento. Essas estruturas de aterramento descem pelo meio do poste e/ou juntamente a lateral protegida por um eletroduto, se conectando assim ao aterramento. A interface de aterramento pode ser projetada de acordo com os requisitos locais de aterramento e segurança, conforme a Figura 6.

Figura 6 - Modelo de rede referencia do sistema T2F.

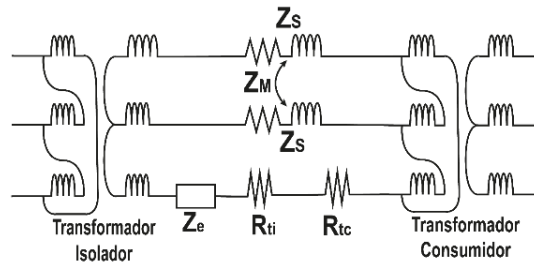


Fonte: Adaptado, de Leonardo de Freitas Silveira.

O sistema T2F exposto na Figura 6, emprega um transformador de isolamento para conectar o sistema trifásico (vermelho) e transformar em T2F (azul) fazendo conexão com o consumidor. Os transformadores de isolamento e do consumidor utilizam a terceira fase como acoplamento por meio de um aterramento disposto no local de instalação. Para fins deste trabalho, a interface de terra é simplificada como uma única impedância.

O modelo correto do sistema, visto utilizando as capacitâncias do sistema, quais não são utilizadas para modelo de curto-circuito, o modelo de Marchesan et al. (2022), mostra os modelos e sua influência na rede proposta. O modelo equivalente do sistema T2F, apresentado na Figura 7, desprezando as capacitâncias parasitas do sistema e modelando-se o modelo de rede T2F entre o transformador isolador e o transformador do consumidor.

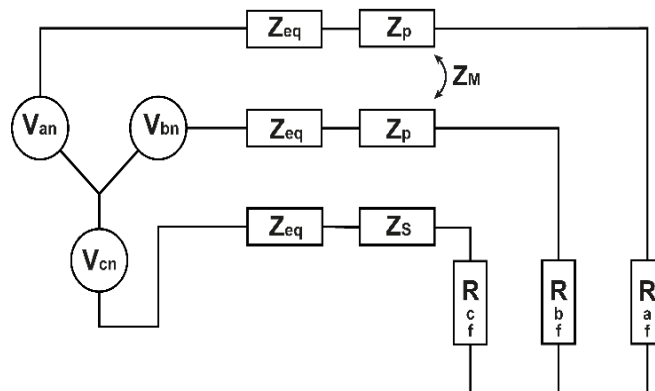
Figura 7 - Modelo equivalente, sem capacitâncias.



Fonte: Autor.

O desenvolvimento do equacionamento é baseado na Figura 7, sendo utilizado o modelo trifilar mostrado na Figura 8 para a dedução das equações por análise de malhas.

Figura 8 - Modelo de Curto-Circuito do sistema T2F.



Fonte: Autor.

A Figura 8 mostra a impedância Z_s que representa a associação da resistência de aterramento do transformador isolador (R_{ti}) juntamente com a impedância de equalização do sistema (Z_e), sendo assim:

$$Z_s = R_{ti} + Z_e \quad (3)$$

A Figura 8, também mostra as resistências de falta, caracterizadas pelos valores R_{af} , R_{bf} e R_{cf} , para as fases a, b e c, respectivamente. Para faltas do tipo franca, deve-se considerar os critérios desenvolvidos na Tabela 2.

Tabela 2 - Critério de valores utilizados para faltas sólidas.

	Raf (Ω)	Rbf (Ω)	Rcf (Ω)
Falta Trifásica ABC	0	0	0
Falta Bifásica AB	0	0	∞
Falta Bifásica AC	0	∞	0
Falta Bifásica BC	∞	0	0

Fonte: Autor.

As resistências de falta podem ser alteradas para algum valor específico qual se deseja analisar as correntes mínimas de falta. Porém, para aplicar ao equacionamento, deve-se manter os valores de zero (0) e infinito (∞). Seja zero uma resistência muito pequena ou infinito uma resistência muito grande.

Assim é possível simplificar as equações para obter as seguintes impedâncias:

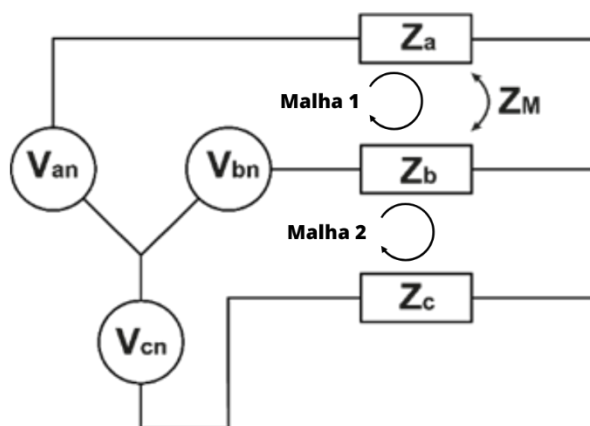
$$Z_a = Z_{eq} + Z_p + R_{af} \quad (4)$$

$$Z_b = Z_{eq} + Z_p + R_{bf} \quad (5)$$

$$Z_c = Z_{eq} + Z_s + R_{cf} \quad (6)$$

Utilizando as impedâncias definidas nas equações (4), (5) e (6), se pode montar o diagrama de modelo de curto-circuito conforme a Figura 9. Assim tem a substituição dos valores por um único elemento.

Figura 9 - Diagrama de curto-circuito, modelo reduzido com valores substituídos.



Fonte: Autor.

O diagrama de análise de curto-circuito demonstra três valores de impedâncias, Z_a , Z_b e Z_c , também possui um valor de mútua Z_m , qual utilizando estes componentes podemos aplicar a Lei das Malhas ou Segunda Lei de Kirchhoff, assim podemos definir as seguintes equações

$$Vbn - Van + I1(Za + Zb - 2Zm) + I2(Zm - Zb) = 0 \quad (7)$$

$$Vcn - Vbn + I1(-Zb + Zm) + I2(Zb + Zc) = 0 \quad (8)$$

Por meio da equação (8), é possível encontrar a corrente da malha 2 ($I2$), assim tem-se a equação (9) para definir $I2$, sendo ela:

$$I2 = \frac{Vbn - Vcn - I1(-Zb + Zm)}{Zb + Zc} \quad (9)$$

Com a definição de $I2$ (9), é praticável a substituição da equação (9) dentro da equação (7), para assim definir os termos diferenciais:

$$Vbn - Van + I1 * (Za + Zb - 2Zm) + \left[\frac{Vbn - Vcn - I1(-Zb + Zm)}{Zb + Zc} \right] (Zm - Zb) = 0 \quad (10)$$

Assim é realizável a distribuição conforme o terceiro termo, podemos expandir a equação (10), para:

$$Vbn - Van + I1 * (Za + Zb - 2Zm) + \frac{(Vbn - Vcn)(Zm - Zb)}{Zb + Zc} - I1 \frac{(Zm - Zb)^2}{Zb + Zc} = 0 \quad (11)$$

Deste modo é factível resolver a equação (11), obtendo os valores da malha 1 ($I1$), sendo isolados obtém-se:

$$I1 = \frac{Van - Vbn - \frac{(Vbn - Vcn)(Zm - Zb)}{Zb + Zc}}{(Za + Zb - 2Zm) - \frac{(Zm - Zb)^2}{Zb + Zc}} \quad (12)$$

Com a obtenção da equação (12), é realizada a substituição dentro da equação (9), para obter-se a variável I_2 completa e expandida, definida por:

$$I_2 = \frac{Vbn - Vcn - \left[\frac{Van - Vbn - \frac{(Vbn - Vcn)(Zm - Zb)}{Zb + Zc}}{(Za + Zb - 2Zm) - \frac{(Zm - Zb)^2}{Zb + Zc}} \right] (-Zb + Zm)}{Zb + Zc} \quad (13)$$

Com as equações de cada ramo definidas pode ser realizada a obtenção de cada uma das correntes de fase separadamente, utilizando as definições das equações previamente definidas e analisando a Figura 9, pode-se definir I_a , I_b e I_c , conforme:

$$I_a = I_1 \quad (14)$$

$$I_b = I_2 - I_1 \quad (15)$$

$$I_c = -I_2 \quad (16)$$

Conforme as equações (14), (15) e (16), a realização da substituição dos valores de I_1 e I_2 , para obter as componentes completas para I_a , I_b e I_c , conforme definidas por:

$$I_a = \frac{Van - Vbn - \frac{(Vbn - Vcn)(Zm - Zb)}{Zb + Zc}}{(Za + Zb - 2Zm) - \frac{(Zm - Zb)^2}{Zb + Zc}} \quad (17)$$

$$I_b = \frac{Vbn - Vcn - \left[\frac{Van - Vbn - \frac{(Vbn - Vcn)(Zm - Zb)}{Zb + Zc}}{(Za + Zb - 2Zm) - \frac{(Zm - Zb)^2}{Zb + Zc}} \right] (-Zb + Zm)}{Zb + Zc} \quad (18)$$

$$I_c = - \frac{Van - Vbn - \frac{(Vbn - Vcn)(Zm - Zb)}{Zb + Zc}}{(Za + Zb - 2Zm) - \frac{(Zm - Zb)^2}{Zb + Zc}} - \frac{Vbn - Vcn - \left[\frac{Van - Vbn - \frac{(Vbn - Vcn)(Zm - Zb)}{Zb + Zc}}{(Za + Zb - 2Zm) - \frac{(Zm - Zb)^2}{Zb + Zc}} \right] (-Zb + Zm)}{Zb + Zc} \quad (19)$$

3.3 VALIDAÇÃO

3.3.1 CURTO-CIRCUITO EM REDES RURAIS

Em sistemas rurais, especialmente os SWER, os curtos-circuitos são frequentes e difíceis de localizar devido à baixa densidade populacional e difícil acesso.

Os problemas podem ser causados por toques de maquinário agrícola, toques de árvores, rompimento de cabos e uma variedade de outros fatores ambientais. As faltas transitórias incluem contato momentâneo entre condutores, descargas atmosféricas, abertura de arco elétrico e falha no isolamento do material.

As faltas permanentes são aquelas que requerem intervenção humana antes do religamento completo do circuito. As mais comuns incluem queda de árvores sobre as linhas de distribuição, acidentes de trânsito envolvendo postes de energia e atos de vandalismo. É fundamental projetar proteções confiáveis e seletivas no sentido de minimizar o impacto das interrupções de energia devido a atuação da proteção.

Os problemas térmicos e mecânicos causados pelos curtos-circuitos devem ser considerados, bem como a necessidade de proteger os circuitos T2F para evitar danos aos elementos que constituem a rede. Para o modelo de estudo de caso, as proteções básicas para interrupção da corrente, mantendo assim os valores fixos.

3.3.2 DEFINIÇÃO DE CURTO-CIRCUITO T2F

Com o advento da definição das correntes por fase do sistema T2F, faz-se necessário a demonstração dos valores de curto-circuito, utilizando as equações (17), (18) e (19). Os valores destas equações demonstram os valores de curto-circuito quando este aplicado aos valores de R_{af} , R_{bf} e R_{cf} .

Os valores das correntes de curto-circuito calculados foram comparados com aqueles obtidos via simulações no Simulink®, os modelos são fidedignos ao modelo de rede utilizado para estudo. Foram realizados diversos estudos de curto-circuito em final de linha e deslizante ao longo da linha T2F.

Foi utilizado uma resistência de falta de 40Ω , conforme mostra a Tabela 3. Os valores de resistência de falta denominados R_{af} , R_{bf} e R_{cf} , são de 40Ω distribuídos em curtos-circuitos

entre fase e solo, para os curtos-circuitos que envolvem as fases aéreas considerou-se resistência de falta igual a zero.

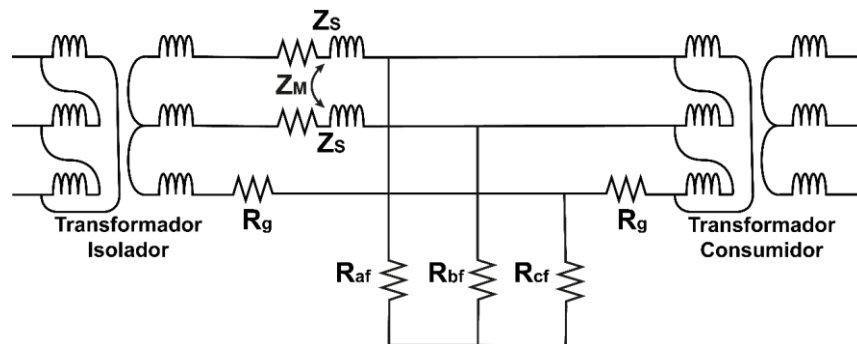
Tabela 3 – Valores utilizados como resistências de falta.

	Raf (Ω)	Rbf (Ω)	Rcf (Ω)
Caso 1 Falta Trifásica ABC	0	0	40
Caso 2 Falta Trifásica ABC	40	40	0
Falta Bifásica AB	20	20	∞
Falta Bifásica AC	0	∞	40
Falta Bifásica BC	∞	0	40

Fonte: Autor.

Segundo United States Department Of Agriculture (2012), os valores de curto-circuito são de até 40Ω , para transformadores até 5 MVA, representando esses valores na Tabela 3, sendo necessária a aplicação para testes. A valoração de 40Ω , se deu ao fato de a capacidade de curto-circuito ser o aplicado em sistemas pelas concessionárias de energia elétrica. Ele é o valor médio utilizado pelas concessionárias, para casos de toque em solo entre outras linhas faltas são analisadas no início, ao longo e final de linha, conforme as figuras.10 e 11

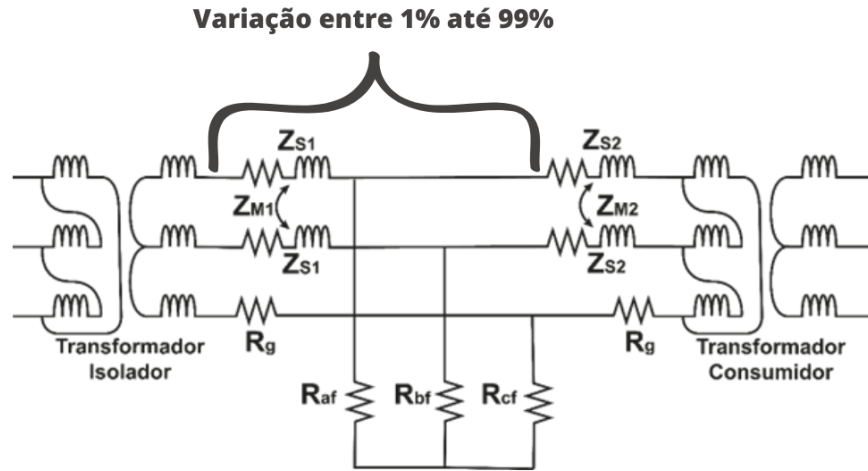
Figura 10 - Modelo de curto-circuito em final de linha.



Fonte: Autor.

Conforme mostrado na Figura 10, o modelo de curto-circuito em fim de linha necessita apenas dos parâmetros para os tipos de curto-circuito encontrados no sistema T2F. Já o curto-circuito deslizante ao longo da linha, necessita de uma análise mais profunda levando em consideração uma porcentagem de 1% até 99% do comprimento de linha. Assim tem-se a Figura 11.

Figura 11 - Modelo de curto-circuito deslizante ao longo da Linha.



Fonte: Autor.

O modelo de curto-circuito ao longo da linha leva em consideração algumas informações importantes, como a variação de 1% até 99% da linha.

Conforme a variação de Z_{s1} , utilizando os valores de variação da porcentagem, assim o valor de Z_{s2} pode ser definido por:

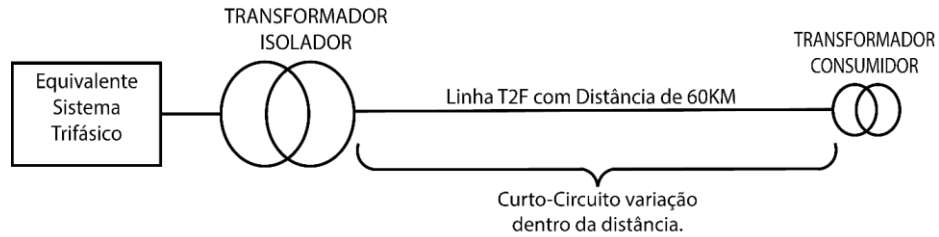
$$Z_{s2} = (1 - Z_{s1}) \quad (20)$$

Onde:

- Z_{s1} = Porcentagem da impedância até o ponto do curto-circuito;
- Z_{s2} = Porcentagem da impedância do restante da rede até transformador consumidor.

Foi utilizado para teste uma rede com comprimento de 60 km, qual é o valor médio de redes de distribuição utilizando MRT, com um transformador isolador e transformador dos consumidores com 120kVA, sendo a carga com fator de potência unitário.

Figura 12 - Modelo de linha utilizada para testes.



Fonte: Autor.

Foi considerado um cabo de 2 AWG, em 1.6m de distância entre cabos aéreos, conforme (MARCHESAN *et al.*, 2022).

3.3.3 TESTES E RESULTADOS

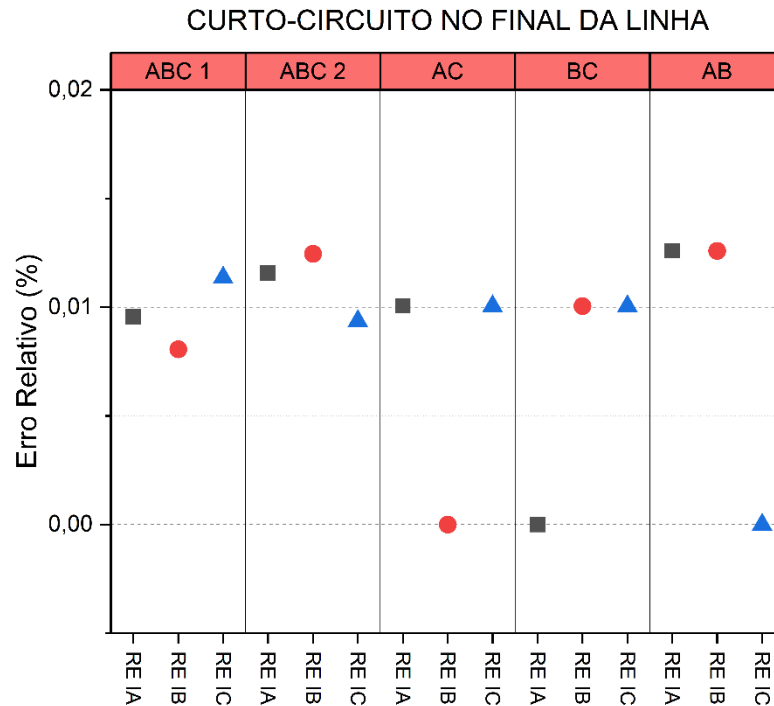
3.3.3.1 CURTO-CIRCUITO NO FINAL DA LINHA.

O valor de erro relativo se dá pela equação (21).

$$\text{Erro Relativo} = \frac{|\text{Valor Simulado} - \text{Valor Calculado}|}{\text{Valor Calculado}} \quad (21)$$

A Figura 13, mostra que as maiores diferenças foram encontradas para o curto-circuito trifásico (ABC), sendo que as diferenças nas fases A e B são maiores do que na fase C, com valores abaixo de 0,02%.

Figura 13 - Comparativo - Falta no final da linha T2F, erro relativo entre simulação e calculado.



Fonte: Autor.

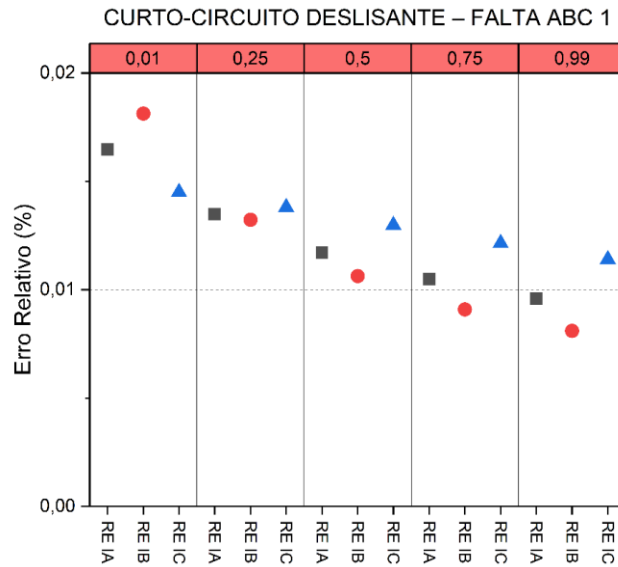
Para as faltas no final de linha próximo ao ponto de entrega da rede T2F, os curtos-circuitos bifásicos apresentaram variações de erro semelhantes, em torno de 0,01%. Curtos-circuitos envolvendo as fases AB envolvem somente os cabos aéreos, enquanto aqueles envolvendo as fases AC e BC representam contato de cabo aéreo com o solo (fase C). No que diz respeito aos curtos-circuitos no final da linha, a maior diferença ainda é encontrada nos para o tipo trifásico ABC. Isso pode ser explicado pelas diferenças nas fases e na linha mútua (Z_m) entre os condutores, que, mesmo consideradas, podem afetar ligeiramente os resultados, como mostrado na Figura 13.

3.3.3.2 CURTO-CIRCUITO DESLISANTE – FALTA ABC

Foi utilizado uma resistência de falta $R_{cf} = 40 \Omega$, e nos demais os valores de $1.10^{-5} \Omega$ para o caso 1 de curtos-circuitos, quando dois cabos se entrelaçam e caem ao solo. Já para caso 2 foi utilizado $R_{af} e R_{bf} = 40 \Omega$, no caso de dois cabos entrarem em contato com o solo em pontos diferentes.

Lembrando que os curtos-circuitos foram simulados entre 1%, 25%, 50% e 99% do comprimento de rede, sendo os resultados do caso 1 apresentados na Figura 14 e caso 2 representados na Figura 15.

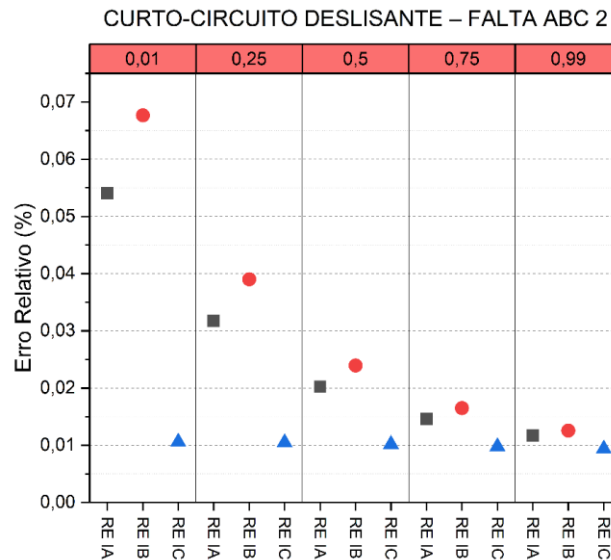
Figura 14 - Comparativo – Caso 1 da Falta ABC no meio da linha T2F, erro relativo entre simulação e calculado.



Fonte: Autor.

Conforme observado na Figura 14, os modelos de falta, de acordo com a corrente de fase, apresentam um desbalanço baixo, sendo o maior valor encontrado abaixo 0,02% na corrente IB, que equivale a 1% da linha. À medida que o comprimento da linha aumenta, os valores diminuem, chegando à média 0,01% dos valores encontrados em 99% das linhas.

Figura 15 - Comparativo – Caso 2 da Falta ABC no meio da linha T2F, erro relativo entre simulação e calculado.



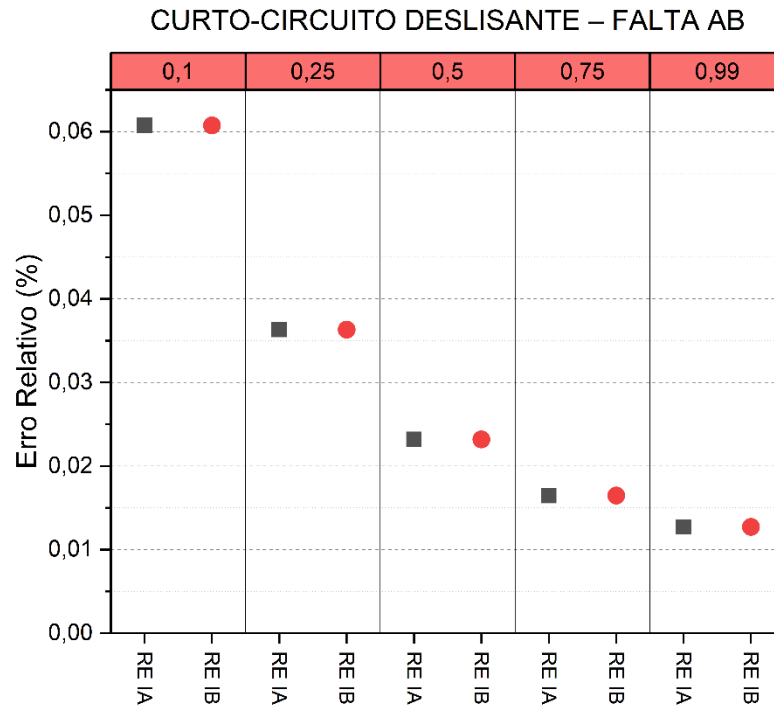
Fonte: Autor.

Assim como observado na Figura 15, demonstra que o erro relativo da corrente de curto-circuito para 1% da linha é abaixo de 0,07% para a corrente IB e abaixo de 0,6% para corrente IA. À medida que aumentamos o valor da linha aumenta em 99% pode-se verificar que o erro das três correntes está próximo a 0,01% de erro.

3.3.3.3 CURTO-CIRCUITO DESLISANTE – FALTA AB

Foi utilizado uma resistência de falta igual a um curto franco, deste modo foi utilizada valores para simulação de resistência nos valores R_{af} e $R_{bf} = 1 \cdot 10^{-5} \Omega$ e valor de $R_{cf} = 1 \cdot 10^6 \Omega$, demonstradas pela Figura 16.

Figura 16 - Comparativo – Falta AB no meio da linha T2F, erro relativo entre simulação e calculado.



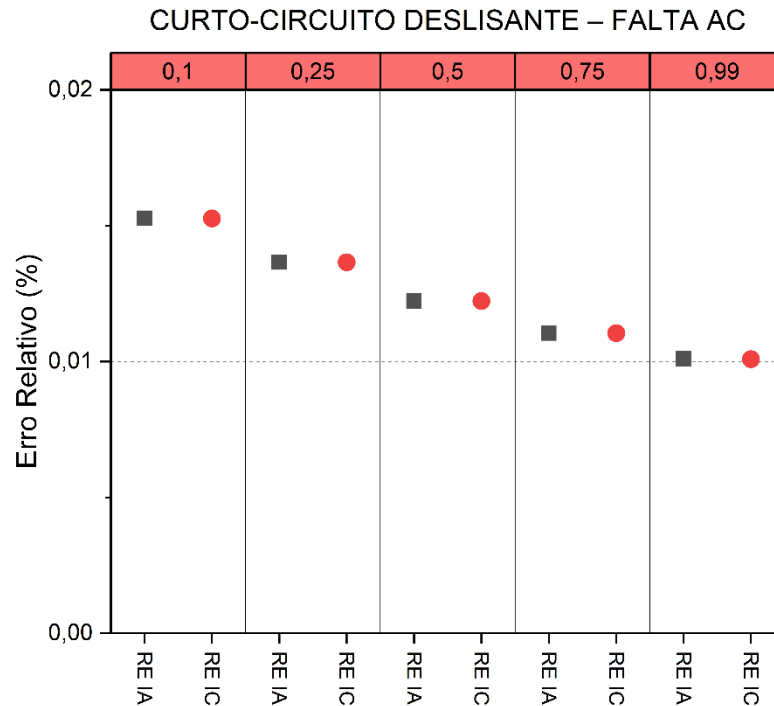
Fonte: Autor.

Os curtos-circuitos que envolvem as fases A e B apresentam erros de até 0,06%, em 1% do comprimento de linha, assim com o aumento da distância da linha o erro chega próximo aos 0.01%, conforme mostrado na Figura 16.

3.3.3.4 CURTO-CIRCUITO DESLISANTE – FALTA AC

Foi considerado uma resistência de falta $R_{cf} = 40 \Omega$ e $R_{af} = 1.10^{-5} \Omega$, considerando o valor de $R_{bf} = 1.10^6 \Omega$, assim temos o valor de toque ao solo ligado a R_{cf} e novamente não ligada aos dois componentes deste curto-circuito.

Figura 17 - Comparativo – Falta AC no meio da linha T2F, erro relativo entre simulação e calculado.



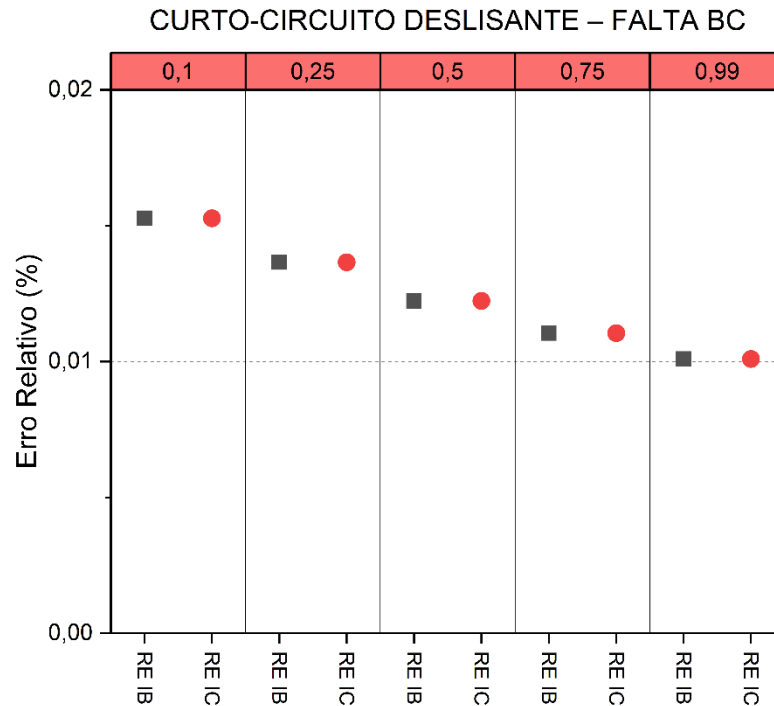
Fonte: Autor.

Os maiores erros foram em torno de 0,015%, com a rede em 1% do comprimento. Entretanto, para faltas em 99% do comprimento de linha, o erro é próximo a 0.01% de erro.

3.3.3.5 CURTO-CIRCUITO DESLISANTE – FALTA BC

Foi considerado uma resistência de falta $R_{cf} = 40 \Omega$ e $R_{bf} = 1 \cdot 10^{-5} \Omega$, considerando o valor de $R_{af} = 1 \cdot 10^6 \Omega$, assim temos o valor de toque ao solo ligado a R_{cf} e não aos dois componentes deste curto-circuito.

Figura 18 - Comparativo – Falta BC no meio da linha T2F, erro relativo entre simulação e calculado.



Fonte: Autor.

Os maiores erros estão em torno de 0,015% para o comprimento em 1%. Em 99% do comprimento de linha, a fase B apresenta um erro de aproximadamente 0,01%.

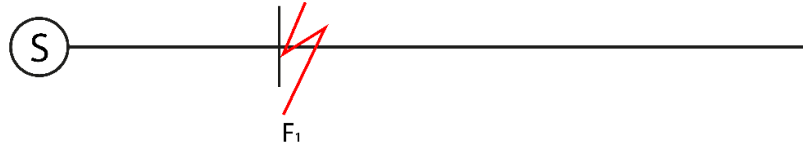
3.3.4 VISUALIZAÇÃO DOS VALORES DE CURTOS-CIRCUITOS

3.3.4.1 CURTO-CIRCUITO NO INÍCIO DE LINHA

Conforme a Tabela 3 três testes foram realizados: resistência de falta de 40Ω , curto-circuito franco ($1 \cdot 10^{-5} \Omega$) e resistência de falta de 100Ω . A Figura 19 mostra o local da falta na saída do transformador isolador, sendo os locais de medição antes e depois do transformador isolador.

Figura 19 –Curto-circuito no ponto F_1 , assinalado em vermelho – início da linha T2F.

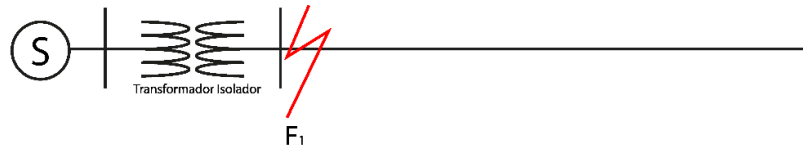
Rede Trifásica



Rede T2F



Rede Trifásica
com Isolador



Fonte: Autor.

Os resultados são comparados com o sistema trifásico convencional.

Tabela 4 – Resultados obtidos a aplicar valores de resistência Francos.

T2F												
Curto-Circuito	Ia Entrada	Ib Entrada	Ic Entrada	Vab Entrada	Vbc Entrada	Vca Entrada	Ia Saida	Ib Saida	Ic Saida	Vab Saida	Vbc Saida	Vca Saida
ABC 1	52,75	45,37	55,13	6151,62	6131,82	5176,70	56,52	47,06	49,70	0,54	2133,53	2133,43
ABC 2	52,75	45,37	55,13	6151,62	6131,82	5176,70	56,52	47,06	49,70	0,54	2133,53	2133,43
AC	25,31	25,34	50,65	11266,21	8230,83	6959,61	43,86	0,01	43,87	8868,24	10653,18	1883,15
BC	25,34	50,65	25,31	8230,58	6959,84	11266,25	0,01	43,87	43,86	10652,99	1882,66	8868,57
AB	52,75	26,36	26,39	7336,76	11266,23	7448,29	45,69	45,68	0,01	0,54	9755,90	9756,36
Trifásico - Sem Isolador												
Curto-Circuito	Ia Saida	Ib Saida	Ic Saida	Vab Saida	Vbc Saida	Vca Saida						
ABC 1	84,54	84,54	84,54	1,06	1,01	1,05						
ABC 2	84,54	84,54	84,54	1,06	1,01	1,05						
AC	73,08	1,62	73,35	9945,39	9946,29	1,05						

BC	1,46	73,33	73,10	9924,00	1,04	9923,09						
AB	73,33	73,10	1,46	1,04	9923,09	9924,00						
Trifásico - Sem Isolador												
Curto-Circuito	Ia Entrada	Ib Entrada	Ic Entrada	Vab Entrada	Vbc Entrada	Vca Entrada	Ia Saida	Ib Saida	Ic Saida	Vab Saida	Vbc Saida	Vca Saida
ABC 1	43,07	43,07	43,07	5528,16	5528,17	5528,17	43,07	43,07	43,07	0,54	0,52	0,54
ABC 2	43,07	43,07	43,07	5528,16	5528,17	5528,17	43,07	43,07	43,07	0,54	0,52	0,54
AC	21,32	21,85	43,07	11486,78	7521,84	7432,10	37,16	1,68	37,46	10130,00	10130,45	0,54
BC	21,81	43,07	21,34	7513,04	7420,61	11460,39	1,48	37,44	37,18	10085,68	0,53	10085,22
AB	43,07	21,34	21,81	7420,61	11460,39	7513,04	37,44	37,18	1,48	0,53	10085,22	10085,68

Tabela 5 – Resultados obtidos a aplicar valores de resistência 40Ω.

T2F												
Curto-Circuito	Ia Entrada	Ib Entrada	Ic Entrada	Vab Entrada	Vbc Entrada	Vca Entrada	Ia Saida	Ib Saida	Ic Saida	Vab Saida	Vbc Saida	Vca Saida
ABC 1	52,75	39,46	55,31	6558,47	6834,87	5117,16	58,10	43,28	46,36	0,54	3504,12	3504,10
ABC 2	49,13	47,37	49,34	6380,19	6475,09	6242,00	49,84	47,89	48,10	2779,54	3112,27	3228,46
AC	24,17	24,20	48,37	11266,17	8809,88	6904,03	41,88	0,01	41,89	8349,69	11209,60	3166,15
BC	24,20	48,37	24,17	8809,46	6904,36	11266,29	0,01	41,89	41,88	11209,36	3165,33	8350,33
AB	52,75	26,36	26,39	7336,76	11266,23	7448,29	45,69	45,68	0,01	0,54	9755,90	9756,36
Trifásico - Sem Isolador												
Curto-Circuito	Ia Saida	Ib Saida	Ic Saida	Vab Saida	Vbc Saida	Vca Saida						
ABC 1	92,63	71,29	76,72	1,06	3069,39	3069,34						
ABC 2	63,72	82,89	81,43	4938,20	3308,23	2559,52						
AC	68,27	1,62	68,94	8688,85	11229,84	2744,95						
BC	1,50	68,92	68,35	11211,40	2744,38	8668,66						
AB	73,33	73,10	1,46	1,04	9923,09	9924,00						
Trifásico - Sem Isolador												
Curto-Circuito	Ia Entrada	Ib Entrada	Ic Entrada	Vab Entrada	Vbc Entrada	Vca Entrada	Ia Saida	Ib Saida	Ic Saida	Vab Saida	Vbc Saida	Vca Saida
ABC 1	43,07	38,58	44,79	6008,03	5932,50	5228,94	45,58	39,50	41,36	0,54	1654,81	1654,71
ABC 2	40,20	44,56	38,89	5792,09	5681,22	6414,57	37,73	43,55	42,34	2785,83	1737,84	1514,58
AC	20,54	21,43	41,88	11486,77	8117,18	7105,64	36,02	1,68	36,53	9436,52	10828,07	1451,24
BC	21,38	41,90	20,59	8107,77	7093,85	11462,30	1,49	36,51	36,06	10786,86	1450,30	9394,64
AB	43,07	21,34	21,81	7420,61	11460,39	7513,04	37,44	37,18	1,48	0,53	10085,22	10085,68

Tabela 6 – Resultados obtidos a aplicar valores de resistência 100Ω.

T2F												
Curto-Circuito	Ia Entrada	Ib Entrada	Ic Entrada	Vab Entrada	Vbc Entrada	Vca Entrada	Ia Saida	Ib Saida	Ic Saida	Vab Saida	Vbc Saida	Vca Saida
ABC 1	52,75	31,42	53,98	7001,65	7849,06	5255,65	58,89	39,26	40,89	0,54	5094,08	5094,16

ABC 2	41,13	46,89	41,81	7559,93	7014,44	7677,20	39,50	44,83	45,46	5816,11	5101,81	4458,09
AC	22,18	22,20	44,38	11266,09	9553,59	7104,12	38,43	0,01	38,44	7880,29	11820,30	4788,13
BC	22,21	44,38	22,18	9552,98	7104,50	11266,37	0,01	38,44	38,43	11820,04	4786,90	7881,42
AB	52,75	26,36	26,39	7336,76	11266,23	7448,29	45,69	45,68	0,01	0,54	9755,90	9756,36
Trifásico - Sem Isolador												
Curto-Circuito	Ia Saida	Ib Saida	Ic Saida	Vab Saida	Vbc Saida	Vca Saida						
ABC 1	94,68	59,74	60,23	1,06	6021,68	6021,97						
ABC 2	42,16	67,39	74,07	8463,55	6703,56	4272,13						
AC	57,48	1,62	58,56	7880,96	12351,25	5801,79						
BC	1,52	58,56	57,64	12339,99	5803,12	7858,18						
AB	73,33	73,10	1,46	1,04	9923,09	9924,00						
Trifásico - Sem Isolador												
Curto-Circuito	Ia Entrada	Ib Entrada	Ic Entrada	Vab Entrada	Vbc Entrada	Vca Entrada	Ia Saida	Ib Saida	Ic Saida	Vab Saida	Vbc Saida	Vca Saida
ABC 1	43,07	31,41	45,28	6629,88	6958,76	5108,60	47,69	34,80	37,49	0,54	3748,30	3748,30
ABC 2	33,91	43,94	33,80	7097,04	6083,05	7719,85	29,74	40,89	40,81	5873,05	4065,00	3004,54
AC	18,98	20,33	39,22	11486,71	8989,39	6980,72	33,58	1,68	34,36	8637,70	11678,90	3396,59
BC	20,27	39,27	19,07	8980,67	6966,43	11464,76	1,51	34,36	33,67	11644,23	3395,40	8597,04
AB	43,07	21,34	21,81	7420,61	11460,39	7513,04	37,44	37,18	1,48	0,53	10085,22	10085,68

Da Tabela 4 análise de resistências de curto-circuito francas, demonstrando os valores de corrente das redes trifásicas são maiores que as do sistema T2F. Já os valores de tensão do sistema trifásico, se mostram zeros, por causa da falta, entretendo no sistema T2F, demonstra os valores de subtensão na entrada do transformador isolador. Para no sistema T2F demonstrar tensão desbalanceadas.

Na Tabela 5 análise de resistências de curto-circuito com 40Ω , demonstrando os valores de corrente das redes trifásica maiores que o T2F. Já os valores de tensão do sistema trifásico, se mostram desequilibrados, por causa da resistência de falta, entretendo no sistema T2F demonstrar tensão desbalanceadas, iguais no caso Franco.

Já na Tabela 6, análise de resistências de curto-circuito com 100Ω , demonstrando os valores de corrente das redes trifásicas são maiores que as do sistema T2F. Já os valores de tensão do sistema trifásico, se mostram desequilibrados, por causa da resistência de falta, entretendo no sistema T2F demonstrar tensão desbalanceadas maiores, iguais no caso Franco e de 40Ω . Sendo o afundamento de tensão da fase não participante, maior que em outros casos.

3.3.4.2 CURTO-CIRCUITO NO FINAL DE LINHA

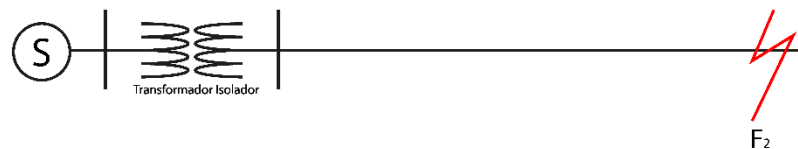
As Figura 20 até **Erro! Fonte de referência não encontrada.** demonstram o local da falta na entrada do transformador do consumidor, sendo as medidas representadas pelas barras.

Figura 20 –Curto-circuito no ponto F_2 , assinalado em vermelho.

Rede Trifásica



Rede T2F



Rede Trifásica
com Isolador



Fonte: Autor.

Tabela 7 – Resultados obtidos a aplicar valores de resistência Francos.

T2F												
Curto-Circuito	Ia Entrada	Ib Entrada	Ic Entrada	Vab Entrada	Vbc Entrada	Vca Entrada	Ia Saida	Ib Saida	Ic Saida	Vab Saida	Vbc Saida	Vca Saida
ABC 1	40,07	41,04	39,98	7204,56	7152,33	7279,95	39,67	40,74	40,65	4074,79	3842,79	3878,33
ABC 2	40,07	41,04	39,98	7204,56	7152,33	7279,95	39,67	40,74	40,65	4074,79	3842,79	3878,33
AC	20,24	20,27	40,51	11266,24	9124,08	7588,57	35,07	0,01	35,08	8654,90	11086,18	3859,05
BC	20,27	40,51	20,24	9124,12	7588,54	11266,23	0,01	35,08	35,07	11086,21	3859,11	8654,83
AB	40,07	20,02	20,05	7601,33	11266,23	9220,05	34,70	34,69	0,01	4074,79	8589,31	11175,41

Trifásico - Sem Isolador						
Curto-Circuito	Ia Saida	Ib Saida	Ic Saida	Vab Saida	Vbc Saida	Vca Saida
ABC 1	50,02	51,46	50,91	6374,24	6186,31	6257,98
ABC 2	50,02	51,46	50,91	6374,24	6186,31	6257,98
AC	42,91	1,62	43,95	8788,98	11839,49	6257,98
BC	1,48	44,74	43,86	11888,59	6279,95	8683,51
AB	44,70	43,80	1,45	6278,84	8687,21	11879,69

Trifásico - Sem Isolador												
Curto-Circuito	Ia En-trada	Ib En-trada	Ic En-trada	Vab En-trada	Vbc En-trada	Vca En-trada	Ia Saida	Ib Saida	Ic Saida	Vab Saida	Vbc Saida	Vca Saida
ABC 1	33,06	33,34	32,73	7224,80	7227,51	7295,63	32,74	33,35	33,02	4156,10	3998,42	4084,59
ABC 2	33,06	33,34	32,73	7224,80	7227,51	7295,63	32,74	33,35	33,02	4156,10	3998,42	4084,59
AC	15,73	17,10	32,73	11486,76	9295,41	7676,73	27,96	1,68	28,75	8961,70	11544,31	4084,59
BC	17,25	33,21	16,04	9294,52	7605,12	11462,19	1,49	29,11	28,42	11549,10	4077,63	8859,47
AB	33,18	16,00	17,25	7611,25	11458,56	9290,24	29,09	28,37	1,47	4076,44	8860,26	11537,30

Tabela 8 – Resultados obtidos a aplicar valores de resistência 40Ω.

T2F												
Curto-Circuito	Ia Entrada	Ib Entrada	Ic En-trada	Vab Entrada	Vbc Entrada	Vca Entrada	Ia Saida	Ib Saida	Ic Saida	Vab Saida	Vbc Saida	Vca Saida
ABC 1	40,07	37,17	40,10	7450,72	7642,43	7281,18	41,00	38,15	38,17	4074,79	4704,49	4702,00
ABC 2	36,25	40,75	36,47	7755,71	7395,62	7954,04	34,77	39,23	39,44	5629,14	4758,49	4655,47
AC	19,32	19,34	38,66	11266,21	9492,71	7671,60	33,47	0,01	33,48	8433,30	11413,83	4697,51
BC	19,34	38,66	19,32	9492,60	7671,67	11266,25	0,01	33,48	33,47	11413,76	4697,32	8433,50
AB	40,07	20,02	20,05	7601,33	11266,23	9220,05	34,70	34,69	0,01	4074,79	8589,31	11175,41

Trifásico - Sem Isolador						
Curto-Circuito	Ia Saida	Ib Saida	Ic Saida	Vab Saida	Vbc Saida	Vca Saida
ABC 1	51,61	46,84	44,90	6361,07	6998,59	7286,61
ABC 2	40,04	46,46	47,86	8047,33	7321,14	7003,31
AC	38,99	1,62	40,17	8789,95	12099,63	7187,16
BC	1,49	40,76	39,75	12147,10	7231,99	8698,36
AB	44,70	43,80	1,45	6278,84	8687,21	11879,69

Trifásico - Sem Isolador												
Curto-Circuito	Ia En-trada	Ib En-trada	Ic En-trada	Vab En-trada	Vbc En-trada	Vca En-trada	Ia Saida	Ib Saida	Ic Saida	Vab Saida	Vbc Saida	Vca Saida
ABC 1	33,04	30,15	32,81	7464,23	7725,97	7310,37	33,79	31,22	30,97	4151,69	4833,47	4927,72
ABC 2	29,90	33,16	29,79	7796,12	7477,27	7994,59	28,65	32,14	32,04	5753,60	4933,10	4862,32
AC	14,87	16,46	31,23	11486,73	9656,75	7769,89	26,59	1,68	27,51	8757,47	11857,76	4911,34
BC	16,57	31,67	15,17	9664,93	7705,85	11463,26	1,49	27,83	27,02	11868,92	4925,72	8654,02
AB	33,18	16,00	17,25	7611,25	11458,56	9290,24	29,09	28,37	1,47	4076,44	8860,26	11537,30

Tabela 9 – Resultados obtidos a aplicar valores de resistência 100Ω.

T2F												
Curto-Circuito	Ia Entrada	Ib Entrada	Ic Entrada	Vab Entrada	Vbc Entrada	Vca Entrada	Ia Saida	Ib Saida	Ic Saida	Vab Saida	Vbc Saida	Vca Saida
ABC 1	40,07	31,78	39,48	7712,27	8339,19	7390,36	42,10	34,98	34,30	4074,79	5705,68	5894,30
ABC 2	30,68	39,08	32,50	8600,31	7764,66	8680,64	28,67	35,96	37,53	7308,30	6069,38	5444,71
AC	17,87	17,89	35,76	11266,16	9962,08	7898,80	30,96	0,01	30,96	8269,30	11780,80	5798,15
BC	17,89	35,76	17,87	9961,79	7898,96	11266,31	0,01	30,97	30,96	11780,67	5797,60	8269,87
AB	40,07	20,02	20,05	7601,33	11266,23	9220,05	34,70	34,69	0,01	4074,79	8589,31	11175,41
Trifásico - Sem Isolador												
Curto-Circuito	Ia Saida	Ib Saida	Ic Saida	Vab Saida	Vbc Saida	Vca Saida						
ABC 1	52,32	42,52	37,24	6343,70	7730,84	8460,03						
ABC 2	30,39	39,23	43,48	9402,05	8591,13	7659,47						
AC	33,70	1,62	35,04	8956,79	12306,55	8227,02						
BC	1,49	35,42	34,28	12346,52	8282,18	8885,95						
AB	44,70	43,80	1,45	6278,84	8687,21	11879,69						
Trifásico - Sem Isolador												
Curto-Circuito	Ia Entrada	Ib Entrada	Ic Entrada	Vab Entrada	Vbc Entrada	Vca Entrada	Ia Saida	Ib Saida	Ic Saida	Vab Saida	Vbc Saida	Vca Saida
ABC 1	33,02	25,76	32,34	7717,92	8419,61	7427,14	34,68	28,64	27,86	4143,60	5807,81	6109,41
ABC 2	25,35	31,90	26,43	8662,38	7852,78	8748,14	23,55	29,56	30,49	7476,09	6260,39	5658,18
AC	13,57	15,43	28,91	11486,67	10115,32	8001,83	24,50	1,68	25,58	8609,58	12209,24	5992,48
BC	15,50	29,28	13,86	10132,47	7949,92	11464,52	1,50	25,84	24,89	12225,49	6025,23	8509,28
AB	33,18	16,00	17,25	7611,25	11458,56	9290,24	29,09	28,37	1,47	4076,44	8860,26	11537,30

Da Tabela 7 apresentam os valores de faltas francas, apresentando subtensões, para o sistema trifásico e a Rede T2F. Os valores de corrente são menos, a diferença se faz na utilização do transformador isolador. Assim os valores do sistema T2F se demonstram menores que o sistema Trifásico.

Da Tabela 8 demonstram as correntes de curto-circuito do sistema T2F menores que os valores de falta da rede trifásica. Demonstram que os valores utilizando a falta de 40 Ω, que a tensão da fase não participante nos casos de faltas bifásicas, tem valor de sobretensão em ambos os sistemas.

Já na Tabela 9 seria o menor valor de curto-circuito nos sistemas comparados. Sendo o afundamento de tensão da fase não participante, maior que em outros casos. Podendo-se verificar que as faltas com mais de 100 Ω, demorariam mais para ativar as proteções devidas as suas capacidades reduzidas de corrente. Pois assim as correntes demoram tempos de amostra maiores para fazer a verificação da corrente.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou as equações para cálculo de curtos-circuitos as quais foram comparadas com simulação computacionais no Simulink. Foram analisadas ocorrências de faltas na saída do transformador isolador e na entrada do transformador do consumidor. Para fins de comparação utilizou-se o sistema trifásico convencional.

4 PROTEÇÃO DO SISTEMA T2F

4.1 MODELAGEM ELOS FUSÍVEIS

Para a modelagem dos fusíveis foi utilizado o seguinte polinômio:

$$\text{Valor da Corrente} = a + (b * x) + (c + x^2) + (d + x^3) + (e + x^4) \quad (22)$$

Onde:

- a, b, c, d e e = Valores de ajuste de curva.
- x = Valor de tempo qual cada ponto dos dados, dados estes retirados das curvas qual os fabricantes fornecem, para alcançar o ponto de corrente.

A equação (22) foi reescrita devido aos fabricantes de fusíveis apresentarem valores logarítmicos, ou seja:

$$\log(\text{Valor da Corrente}) = \log(a + (b * x) + (c + x^2) + (d + x^3) + (e + x^4)) \quad (23)$$

4.1.1 MODELAGEM ELO FUSÍVEIS TIPO “H”

Os parâmetros da equação (23) para os elos fusíveis do tipo “H”, são mostrados na Tabela 10.

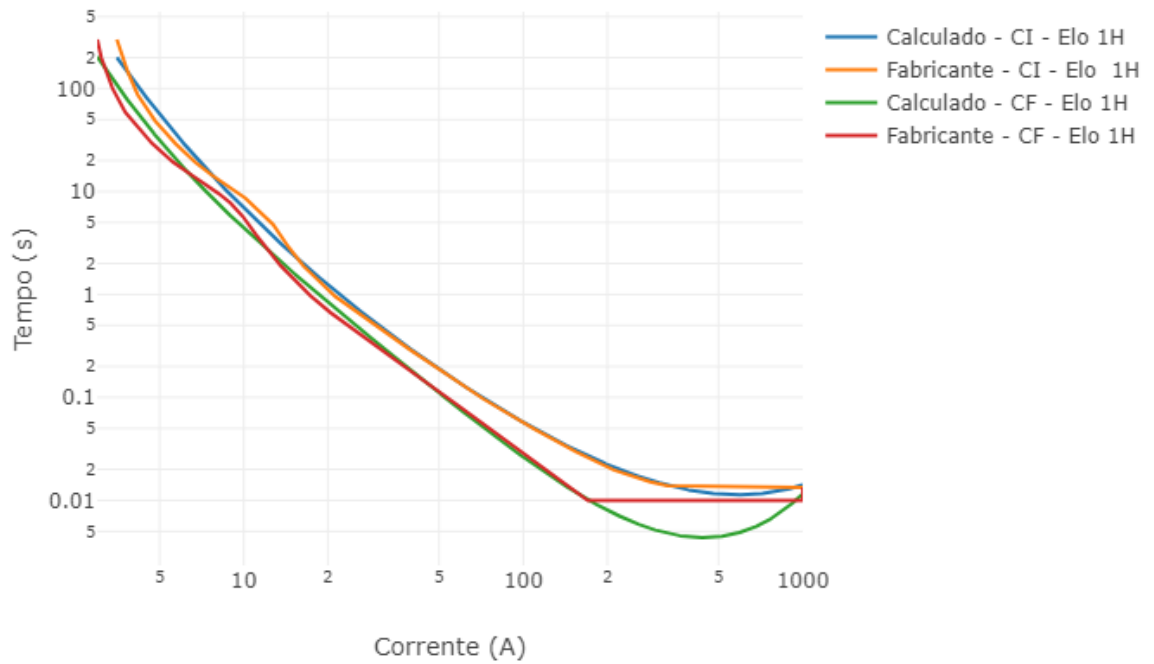
Tabela 10 - Tabela Elos Fusíveis tipo H, resolvida por ajuste de curvas.

Elo Fusível	a	b	c	d	e	Io	Curva
1H	11,5834	-7,7159	2,2435	-0,4141	0,0293	1	Máxima
	11,6256	-6,4698	1,3804	-0,2041	0,0133	1	Mínima
2H	15,3612	-11,3048	3,7855	-0,6767	0,0442	2	Máxima
	14,6714	-9,133	2,5653	-0,4144	0,0256	2	Mínima
3H	16,6469	-10,3608	2,8987	-0,4844	0,0315	3	Máxima
	16,3187	-8,3597	1,7248	-0,231	0,0136	3	Mínima
5H	33,5364	-24,1389	7,0071	-1,0167	0,0569	5	Máxima
	30,5611	-18,3646	4,2355	-0,4978	0,0237	5	Mínima
8H	137,5572	-119,0117	38,2794	-5,444	0,2846	8	Máxima
	138,7659	-111,3549	33,2333	-4,4002	0,2156	8	Mínima

Fonte: Autor.

A Figura 21, demonstra a diferença entre a capacidade de interrupção entre as curvas do fabricante (amarela e vermelha) versus a calculada (azul e verde), onde CI é curva inicial, ou curva mínima e CF é curva final, ou curva máxima.

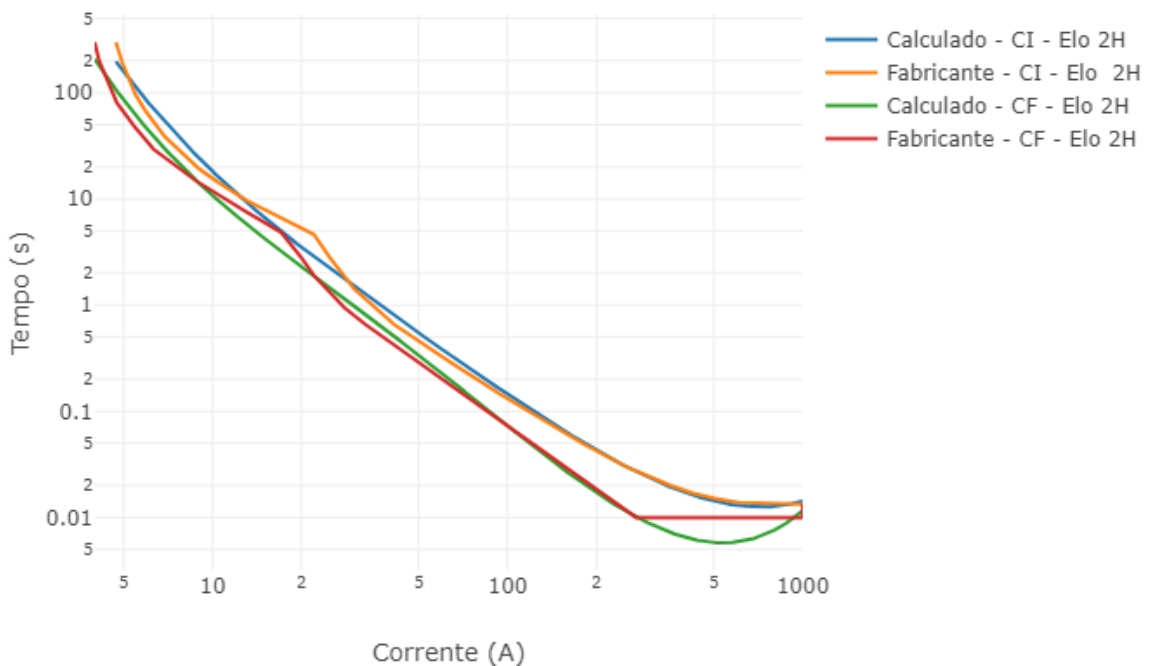
Figura 21 - Elo fusível - 1H, curvas características - comparativo calculado versus fabricante.



Fonte: Autor.

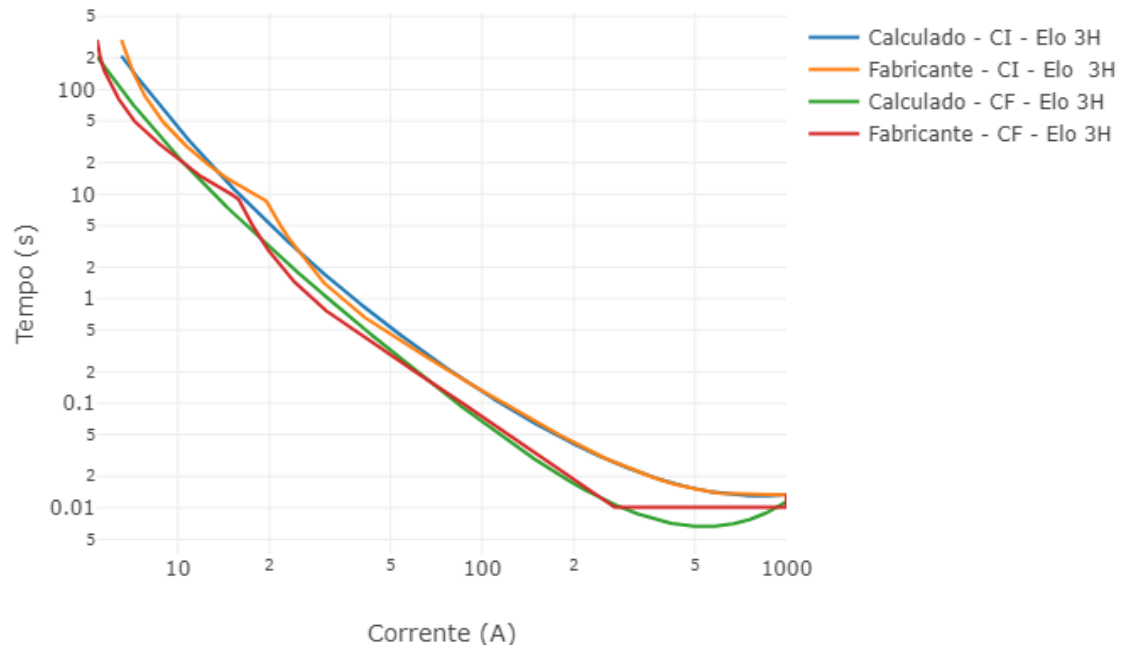
As mesmas comparações foram feitas para os elos fusíveis do tipo 2H, 3H, 5H e 8H sendo os resultados mostrados nas Figura 22, Figura 23, Figura 24 e Figura 25.

Figura 22 - Elo fusível - 2H, curvas características - comparativo calculado versus fabricante.



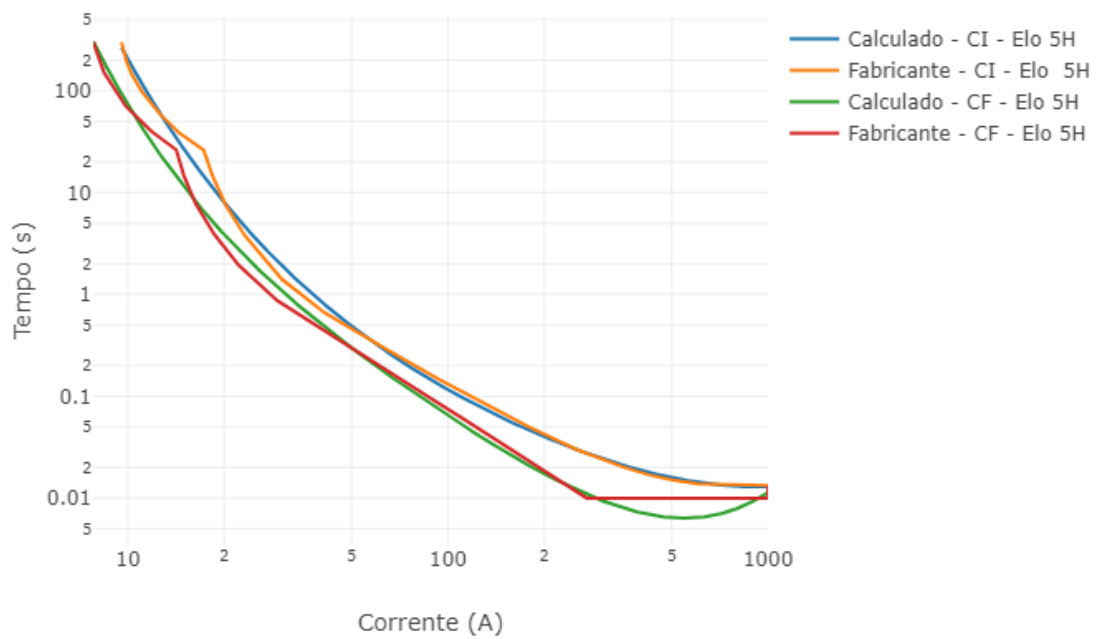
Fonte: Autor.

Figura 23 - Elo fusível - 3H, curvas características - comparativo calculado versus fabricante.



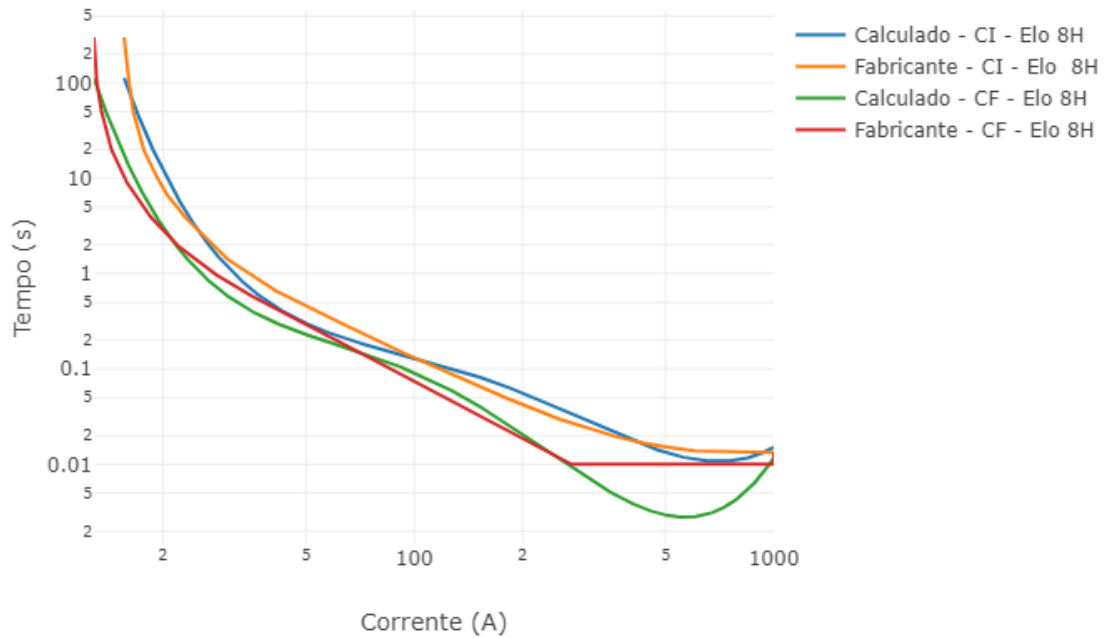
Fonte: Autor.

Figura 24 - Elo fusível - 5H, curvas características - comparativo calculado versus fabricante.



Fonte: Autor.

Figura 25 - Elo fusível - 8H, curvas características - comparativo calculado versus fabricante.



Fonte: Autor.

Segundo Mamede Filho e Mamede (2020), o elo fusível deve ser escolhido conforme:

$$\text{Valor Fusível } H = 1,5 * \text{Corrente nominal}$$

Onde:

- *Corrente nominal* = Corrente máxima de funcionamento do equipamento ou ramal protegido.

4.1.2 MODELAGEM FUSÍVEIS TIPO “K”

A Tabela 11 que apresenta os ajustes de curva para os valores mínimos e máximos das curvas.

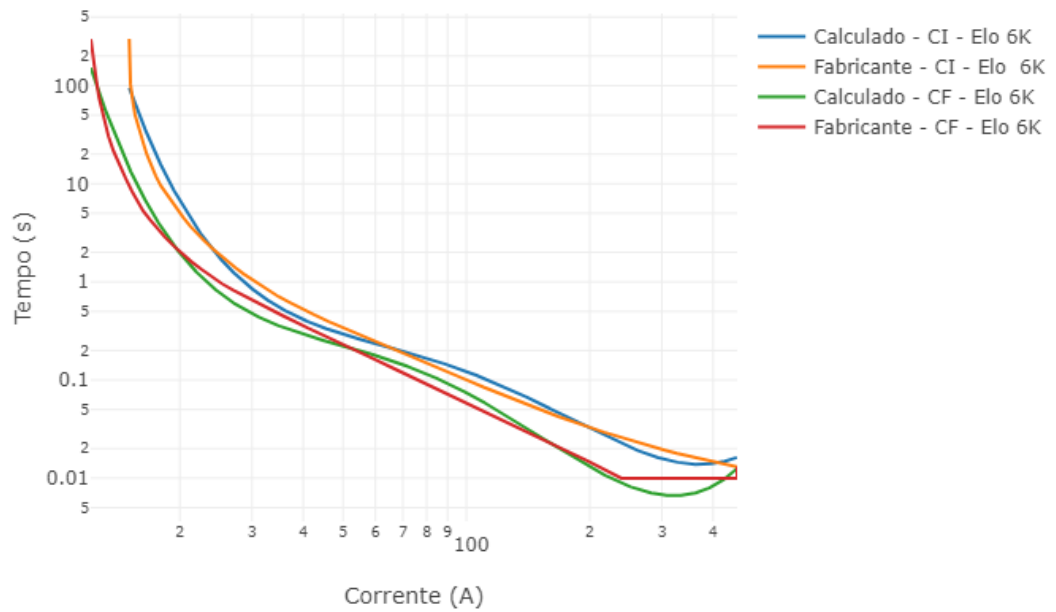
Tabela 11 - Elos fusíveis - fatores calculados do tipo K.

Elo Fusível	a	b	c	d	e	In	Curva
6K	181,2568	-167,571	57,6673	-8,7672	0,4916	6	Máxima
	192,9941	-169,038	55,2403	-7,9961	0,4286	6	Mínima
8K	201,6778	-175,238	56,876	-8,1725	0,434	8	Máxima
	232,6677	-193,038	59,8091	-8,2061	0,4173	8	Mínima
10K	251,8801	-206,638	63,3069	-8,581	0,4304	10	Máxima
	287,7564	-225,95	66,242	-8,5945	0,4135	10	Mínima
12K	294,2461	-229,034	66,6693	-8,5945	0,4107	12	Máxima
	334,4284	-250,54	70,1765	-8,7063	0,4011	12	Mínima
15K	346,407	-257,67	71,6644	-8,8225	0,4027	15	Máxima
	371,4044	-265,395	70,9172	-8,3938	0,3691	15	Mínima
20K	382,462	-271,399	72,1161	-8,4924	0,3714	20	Máxima
	438,8777	-299,286	76,3801	-8,64	0,3636	20	Mínima
25K	469,9755	-321,251	82,1749	-9,3092	0,3918	25	Máxima
	491,9018	-322,702	79,2818	-8,6364	0,3502	25	Mínima
30K	516,722	-337,603	82,5876	-8,9522	0,3608	30	Máxima
	549,9245	-345,522	81,3149	-8,4872	0,3299	30	Mínima
40K	672,136	-424,787	100,3706	-10,495	0,408	40	Máxima
	652,1884	-396,893	90,409	-9,1277	0,3432	40	Mínima
50K	691,3953	-419,23	95,173	-9,5735	0,3584	50	Máxima
	712,2121	-417,449	91,6205	-8,9153	0,3233	50	Mínima
65K	841,8993	-492,815	107,9499	-10,4731	0,3783	65	Máxima
	813,6765	-461,075	97,816	-9,1979	0,3223	65	Mínima
80K	881,1649	-499,458	106,0005	-9,9685	0,3492	80	Máxima
	970,6168	-532,692	109,4302	-9,9635	0,3382	80	Mínima
100K	1020,033	-554,447	112,8674	-10,1845	0,3425	100	Máxima
	1065,791	-563,602	111,5874	-9,7938	0,3206	100	Mínima

Fonte: Autor.

De forma análoga aos elos do tipo "H", a Tabela 11 apresenta os valores de curva mínima e máxima para os elos do tipo "K". A partir do modelo apresentado na Tabela 11 obteve-se a Figura 26, a qual permite verificar o erro da aproximação. Para realizar os testes, é necessário importar os valores de máxima e mínima de cada curva e aplicar a Equação (23) a fim de comparar ambas as curvas.

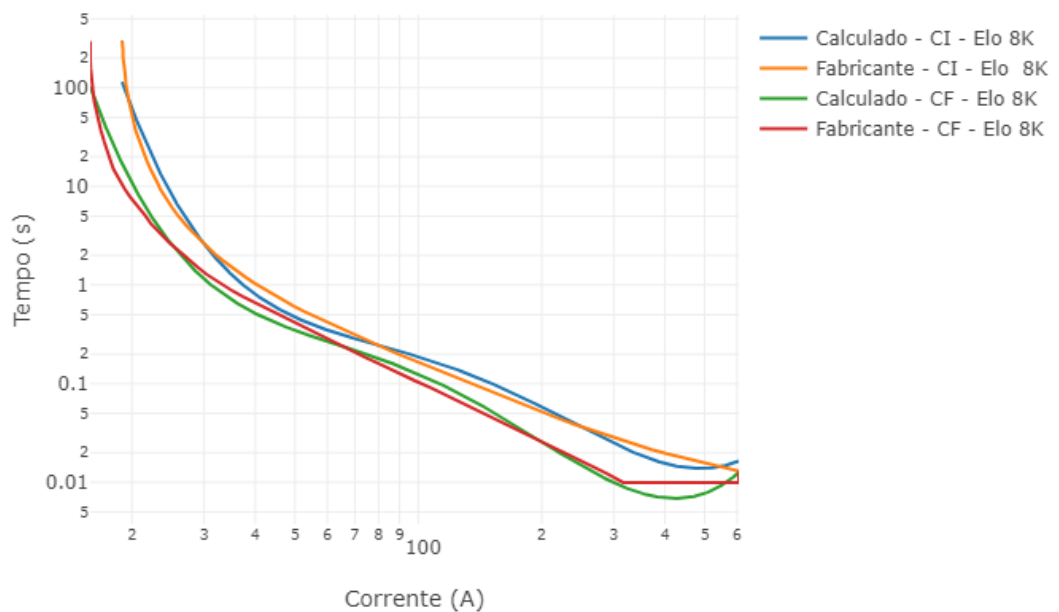
Figura 26 - Elo fusível - 6K, curvas características - comparativo calculado versus fabricante.



Fonte: Autor.

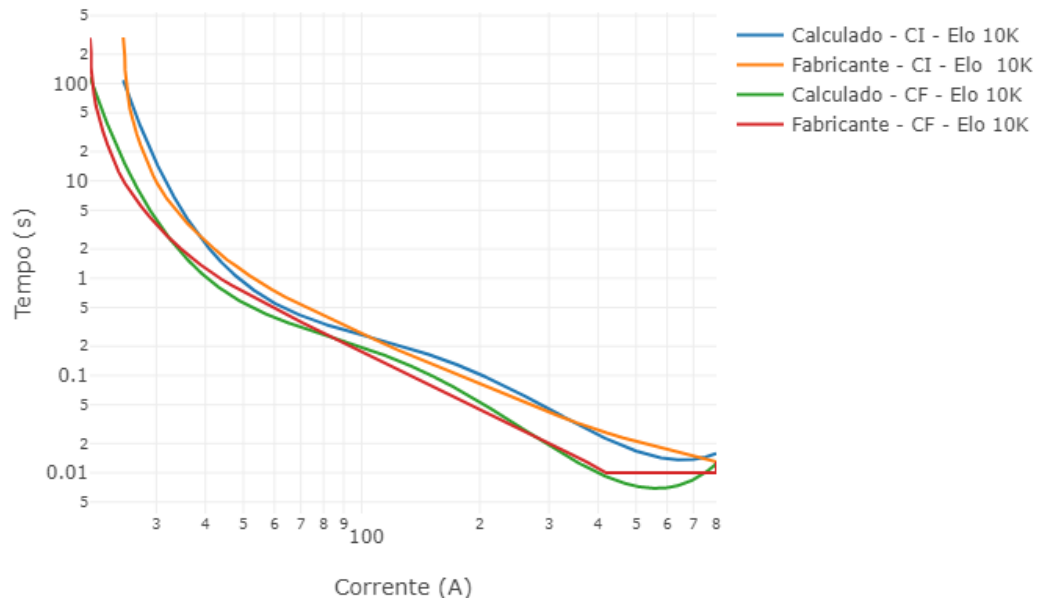
As Figura 27 até Figura 38 mostram a comparação entre os dados do fabricante e o modelado.

Figura 27 - Elo fusível - 8K, curvas características - comparativo calculado versus fabricante.



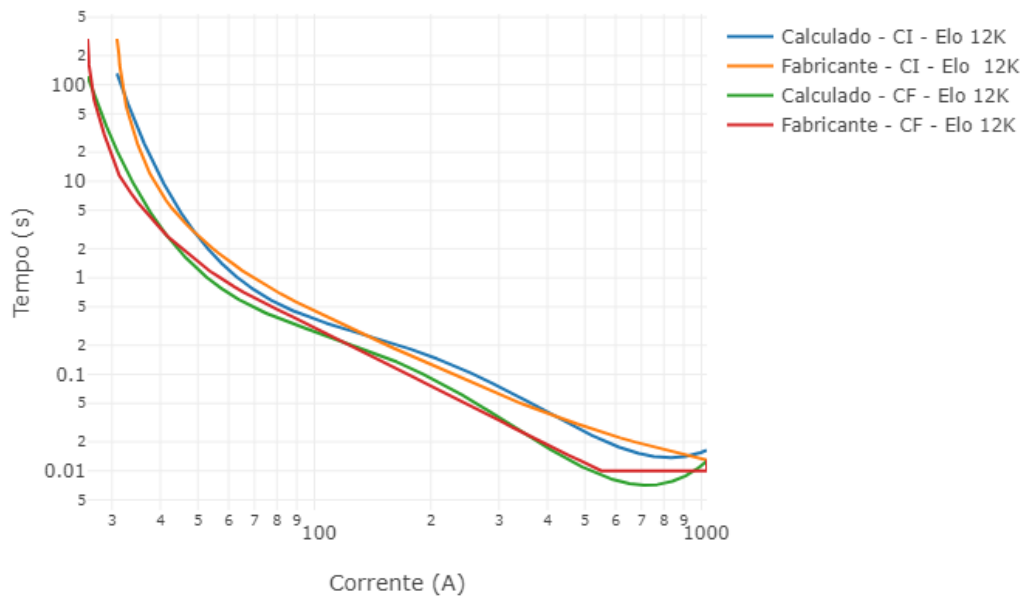
Fonte: Autor.

Figura 28 - Elo fusível - 10K, curvas características - comparativo calculado versus fabricante.



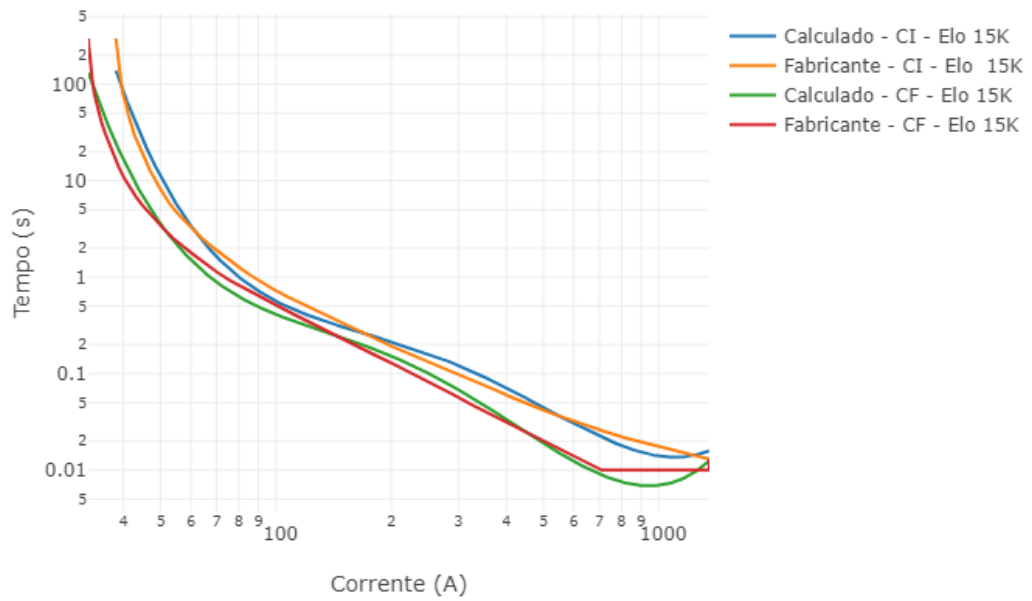
Fonte: Autor.

Figura 29 - Elo fusível - 12K, curvas características - comparativo calculado versus fabricante.



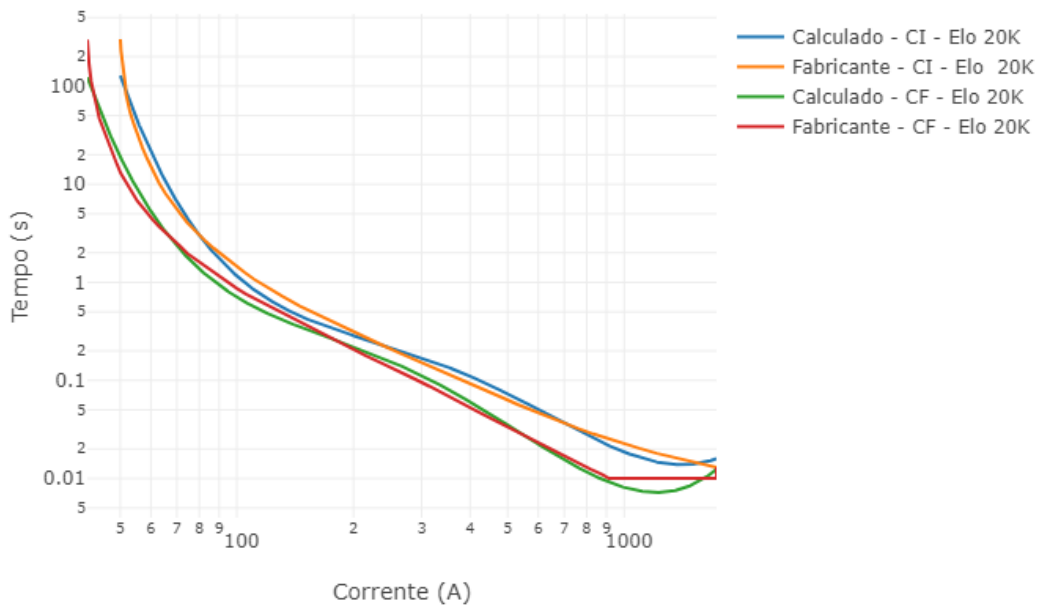
Fonte: Autor.

Figura 30 - Elo fusível - 15K, curvas características - comparativo calculado versus fabricante.



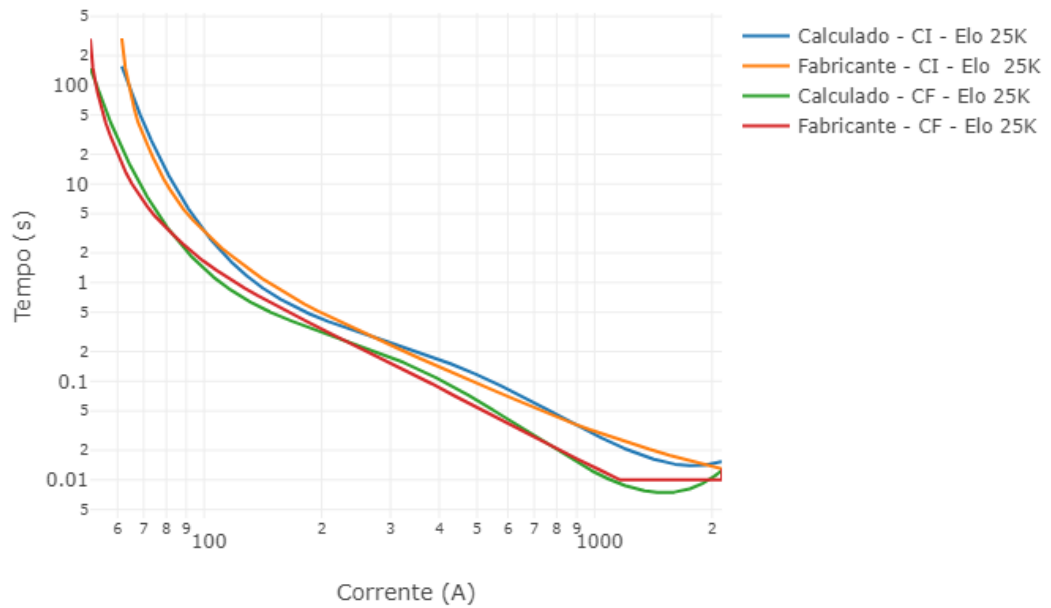
Fonte: Autor.

Figura 31 - Elo fusível - 20K, curvas características - comparativo calculado versus fabricante.



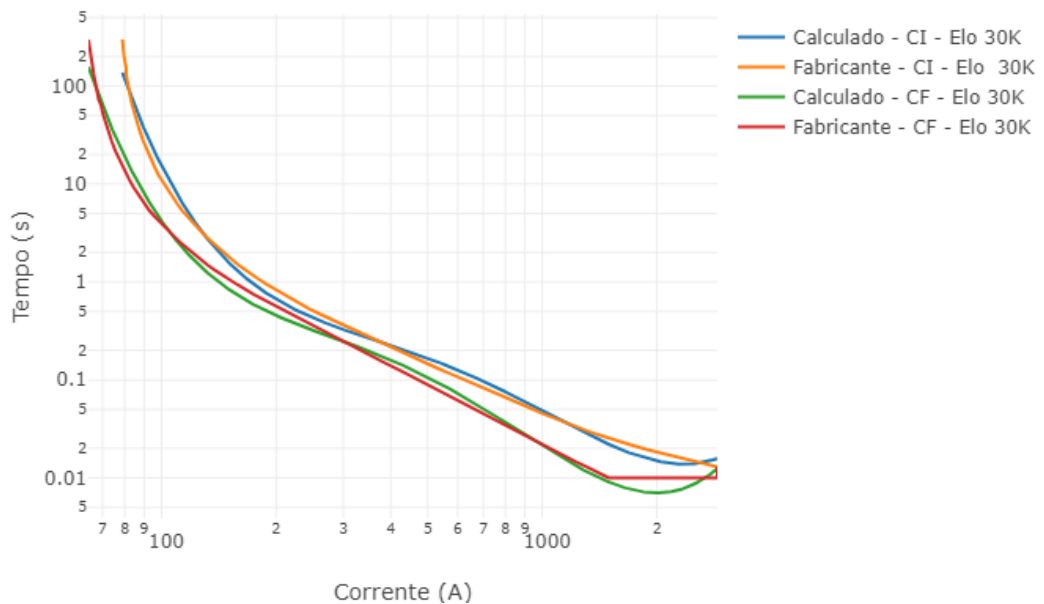
Fonte: Autor.

Figura 32 - Elo fusível - 25K, curvas características - comparativo calculado versus fabricante.



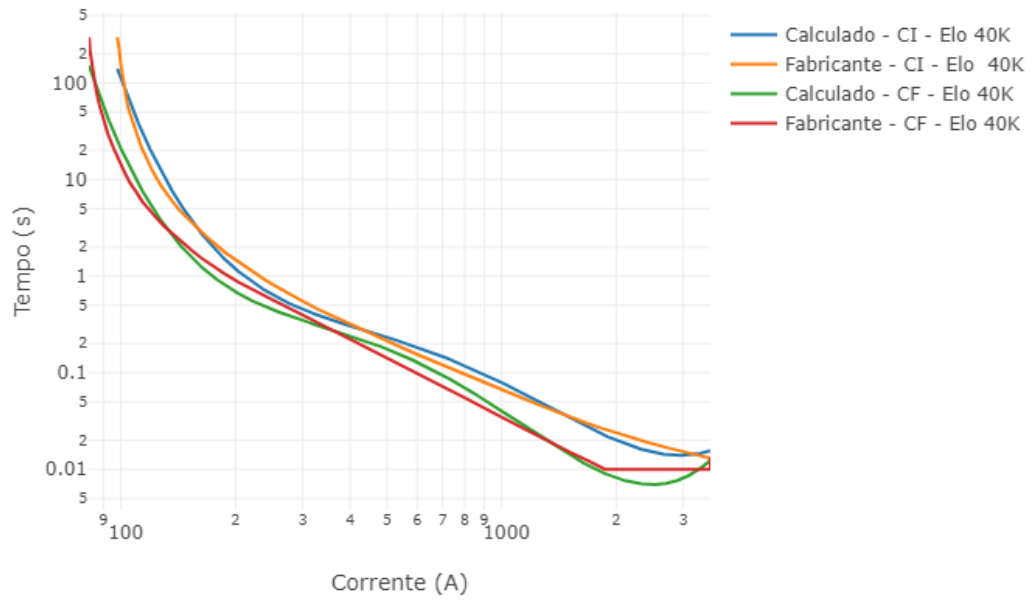
Fonte: Autor.

Figura 33 - Elo fusível - 30K, curvas características - comparativo calculado versus fabricante.



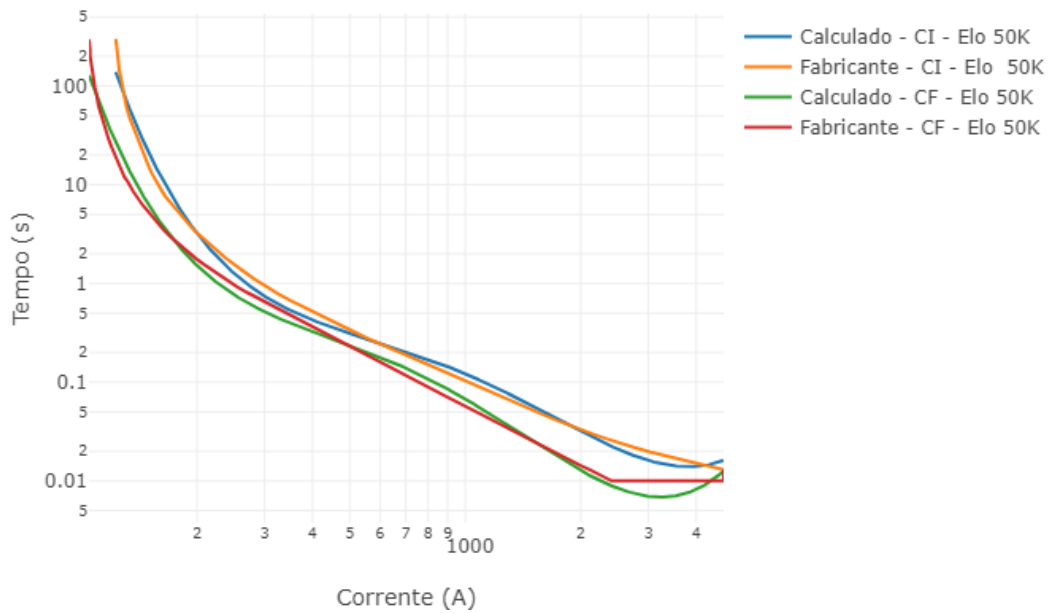
Fonte: Autor.

Figura 34 - Elo fusível - 40K, curvas características - comparativo calculado versus fabricante.



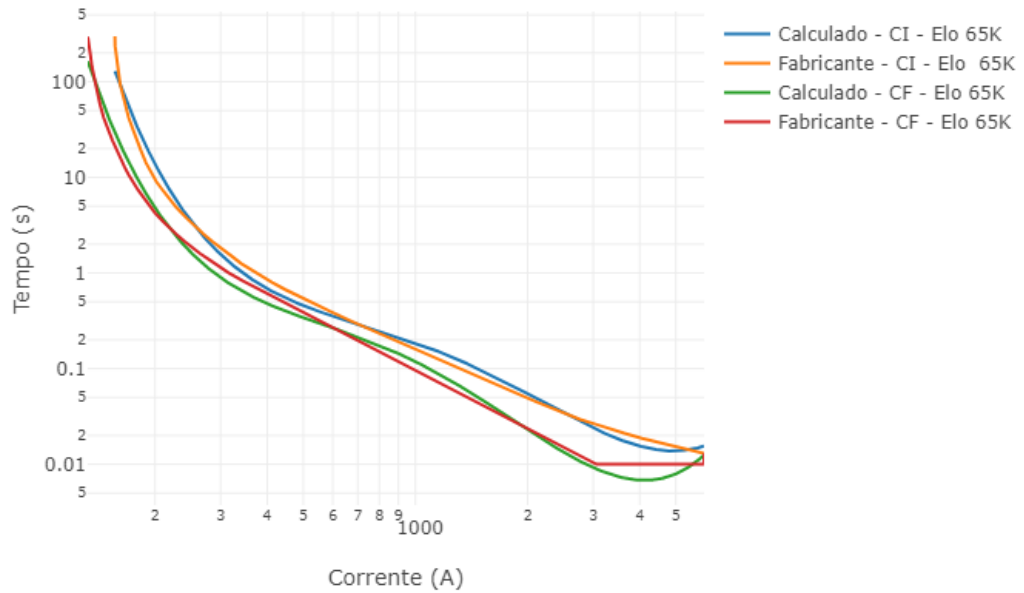
Fonte: Autor.

Figura 35 - Elo fusível - 50K, curvas características - comparativo calculado versus fabricante.



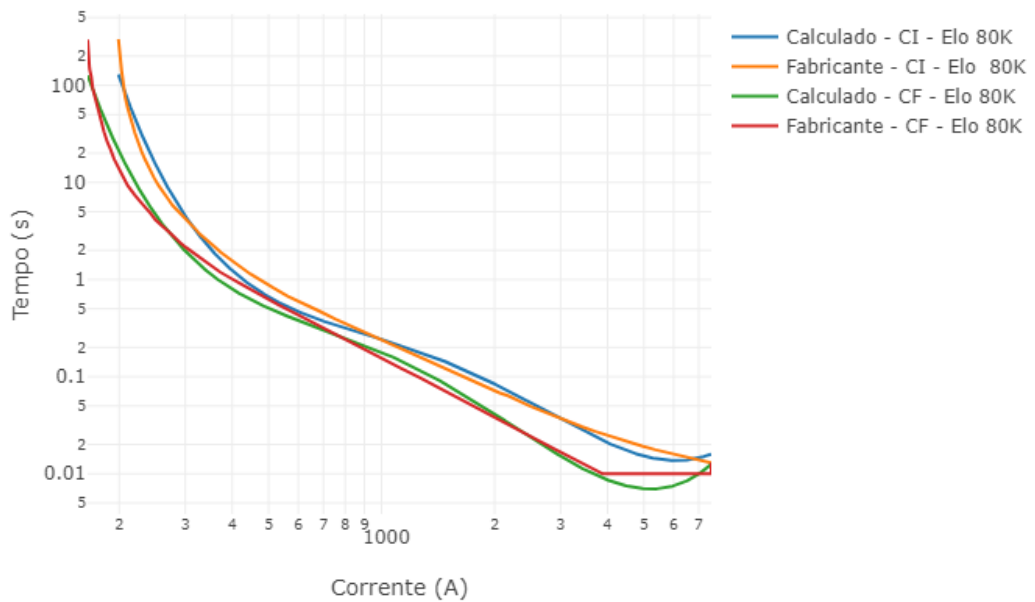
Fonte: Autor.

Figura 36 - Elo fusível - 65K, curvas características - comparativo calculado versus fabricante.



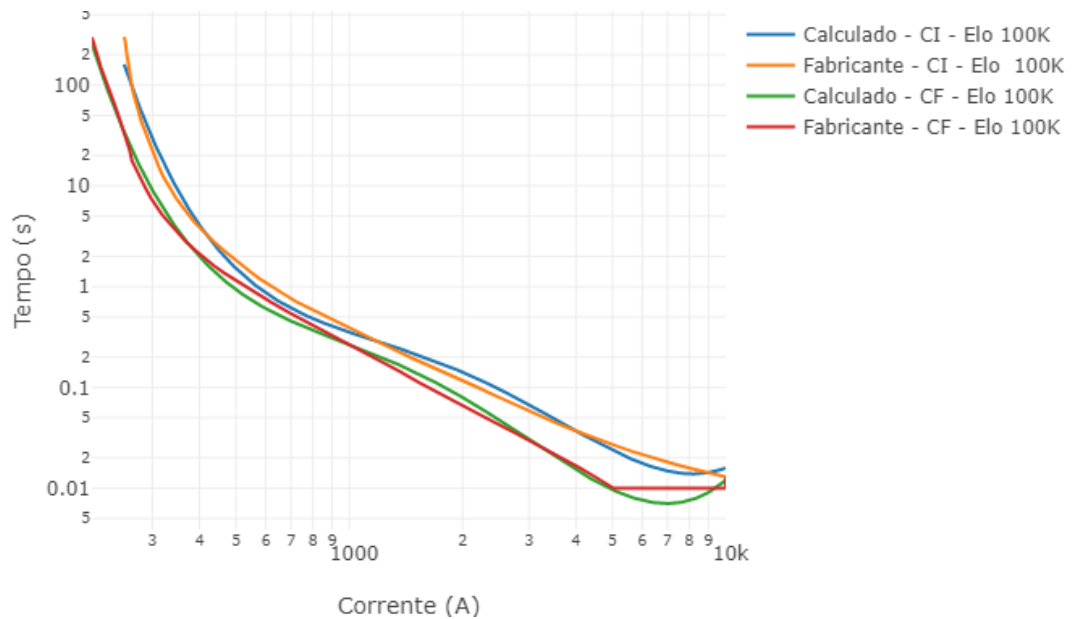
Fonte: Autor.

Figura 37 - Elo fusível - 80K, curvas características - comparativo calculado versus fabricante.



Fonte: Autor.

Figura 38 - Elo fusível - 100K, curvas características - comparativo calculado versus fabricante.

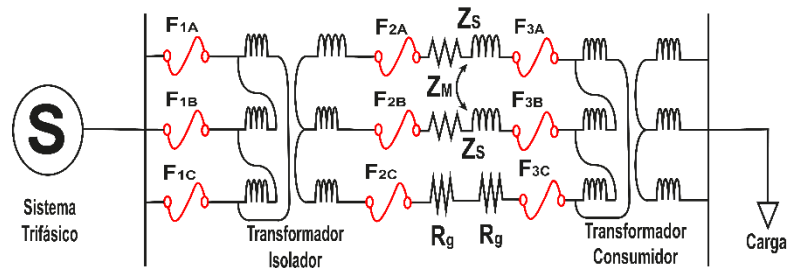


Fonte: Autor.

4.2 PROTEÇÃO POR FUSÍVEIS

Foram consideradas duas topologias diferentes para proteção sendo uma convencional e a outra a prevista para o T2F, conforme ilustrado na Figura 39 e Figura 40.

Figura 39 – Esquema de proteção para redes convencionais.



Fonte: Autor.

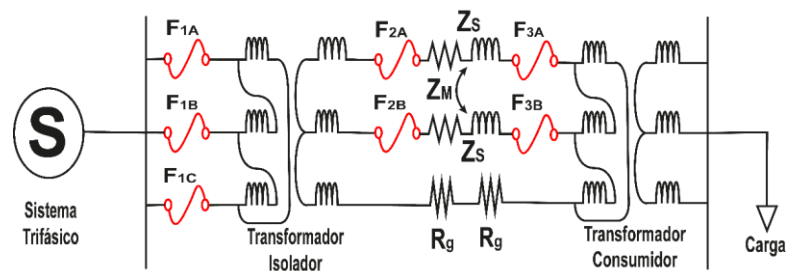
A Figura 39 apresenta um esquema de proteção simples, semelhante aos utilizados no sistema convencional. No entanto, é importante ressaltar que este método de proteção não deve ser aplicado no sistema T2F. Isso depende das correntes circulantes no sistema e, no caso de disparo dos fusíveis ligados à terra, a referência seria perdida e a tensão poderia mudar drasticamente.

A resistência de aterramento (R_g) deve ser calculada para cada um dos transformadores, pois é um dos componentes ativos do sistema. Problemas de aterramento podem resultar em falhas no acoplamento, levando aos problemas mencionados anteriormente.

A topologia apresentada na Figura 6 é considerada a de melhor custo-benefício, pois é capaz de proteger o transformador isolador e evitar problemas com a corrente capacitiva. Além disso, garante a proteção da linha contra possíveis problemas nas fases aéreas.

Ao retirar a proteção da fase conectada à malha de aterramento, evita-se a perda de referência do sistema e garante a isolação rápida e precisa do sistema. Isto impede que o sistema sofra com a falta de acoplamento magnético necessário para seu funcionamento adequado. Essa topologia também protege as fases aéreas de possíveis falhas entre elas, bem como de falhas à terra que possam causar um curto-circuito bifásico.

Figura 40 - Esquema de proteção proposto para o sistema T2F.



Fonte: Autor.

A rede T2F prevê a utilização de redes existentes do tipo MRT, essas redes já existem utilizando apenas proteção no condutor da fase aérea, assim o T2F adicionaria apenas um condutor e uma chave fusível, ao sistema do lado do isolador e do consumidor.

A Tabela 12 apresenta os elos fusíveis a serem utilizados de acordo com a potência do transformador.

Tabela 12 - Elos fusíveis para cargas mais utilizadas em sistemas MRT.

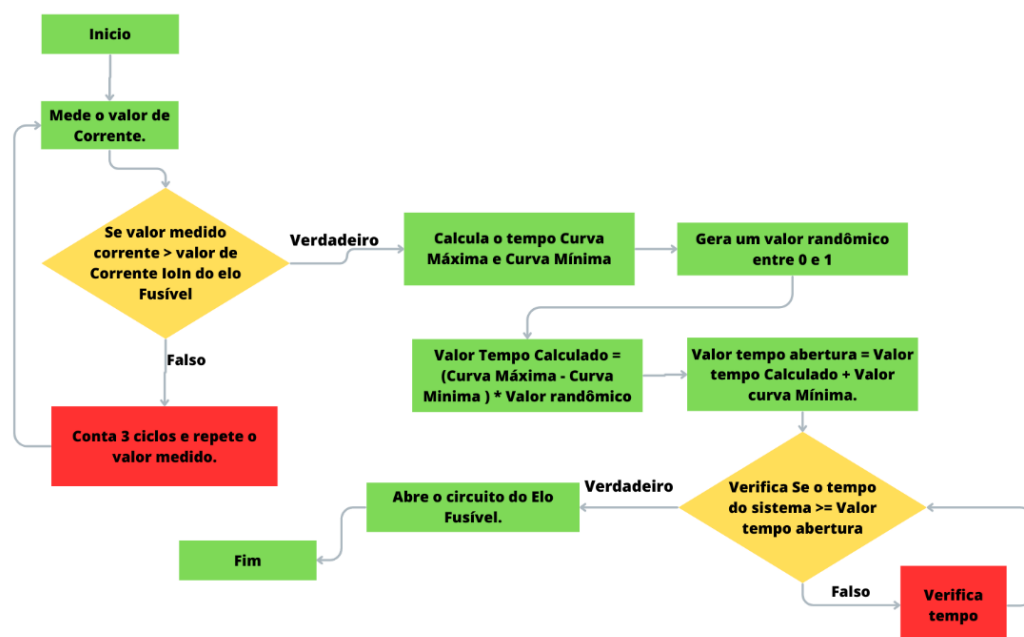
Potência do Transformador (kVA)	Tensão
	13.8 kV
15	1H
25	1H
30	2H
37,5	2H
45	2H
50	2H
75	3H
100	5H
112,5	5H
150	6K
200	10K
225	10K
250	12K

Fonte: Autor.

4.3 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

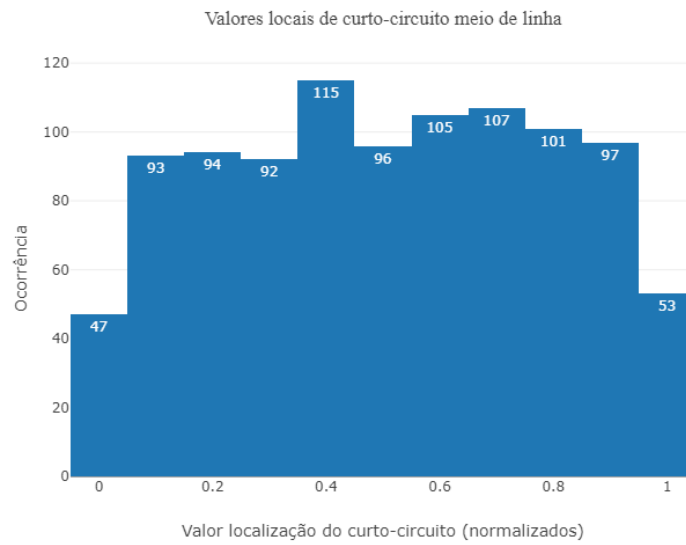
A Figura 41 demonstra o algoritmo utilizado no Simulink® para simulação dos elos fusíveis no sistema T2F. Foram realizadas 1000 simulações para cada tipo de curtos-circuitos distribuídos conforme Figura 42

Figura 41 - Fluxograma algoritmo executado dentro do Simulink®.



Fonte: Autor.

Figura 42 – Curto-circuito deslizando.

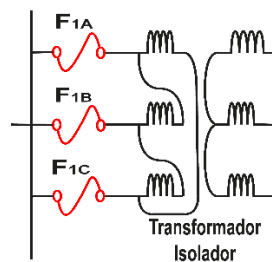


Fonte: Autor.

4.3.1 PROTEÇÃO DO TRANSFORMADOR ISOLADOR

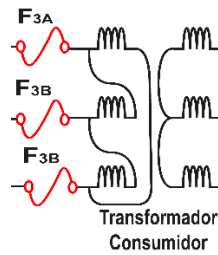
A proteção do transformador isolador pode ser realizada conforme a Figura 43 ou Figura 44

Figura 43 - Proteção Transformador Isolador - Esquema convencional.



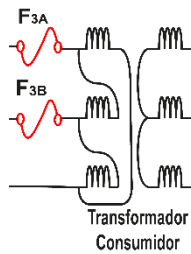
Fonte: Autor.

Figura 47 - Proteção do transformador consumidor - Esquema convencional.



Fonte: Autor.

Figura 48 - Proteção do transformador consumidor - Esquema T2F.

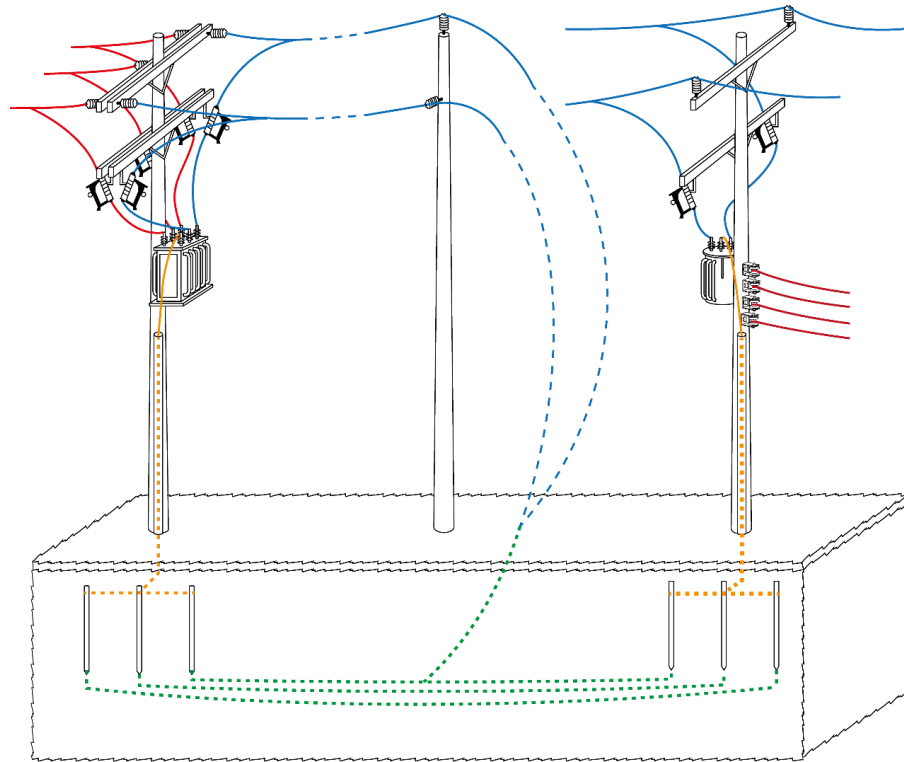


Fonte: Autor.

4.3.4 CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO

A Figura 49 mostra um curto-circuito trifásico do tipo caso 1 Trifásico, qual é demonstrado por $R_{cf} = 40 \Omega$, e nos demais os valores de $1.10^{-5} \Omega$.

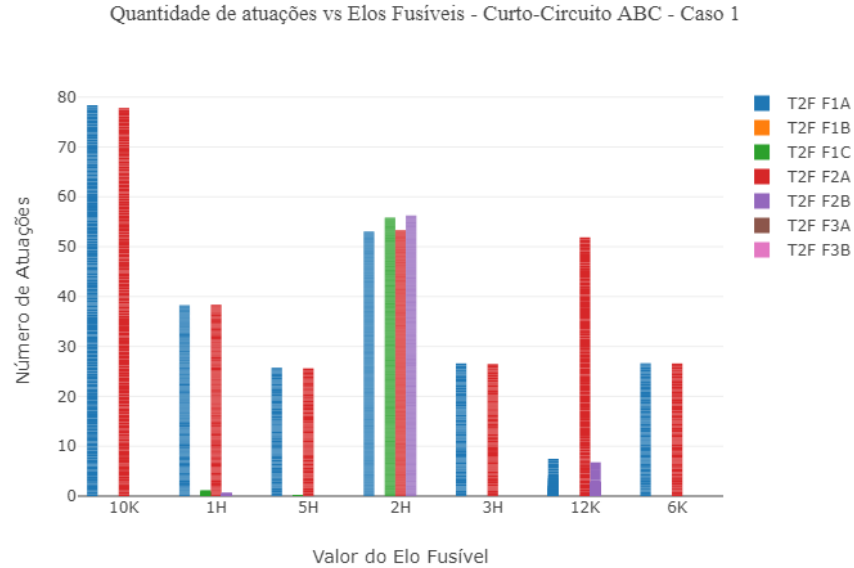
Figura 49 – Exemplo de curto-circuito Trifásico no sistema T2F – Caso 1.



Fonte: Autor.

A Figura 50 mostra que os fusíveis das fileiras F_1 e F_2 são os únicos que atuam, assim os localizados em F_3 , não tem nenhuma atuação independente da severidade. Os curtos-circuitos de tipo ABC – Caso 1, são curtos quais tendem a aumentar a corrente dos dois lados do transformador isolador e para isso pode-se isolar esse tipo de curto-circuito por no mínimo dois elos fusíveis.

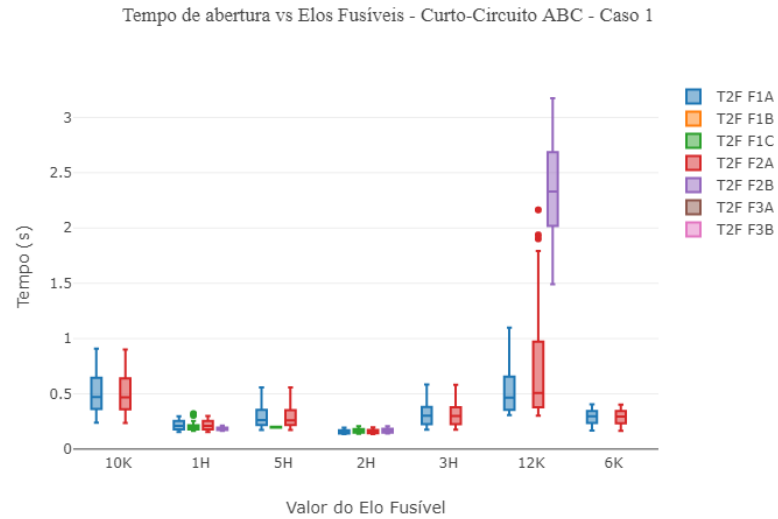
Figura 50 – Quantidade de atuações versus o tipo de elo fusível – Curto-circuito ABC – Caso 1.



Fonte: Autor.

A Figura 51 demonstra os tempos médio, máximos e mínimos, do tempo de atuação dos elos fusíveis, conforme a topologia do T2F, verificando assim que os dados da fileira F_3 não possuem atuações, assim o curto-circuito foi isolado pelas fileiras F_1 e F_2 . Assim demonstrando que a topologia T2F num curto trifásico ABC – Caso 1, consegue eliminar o curto-circuito de forma rápida, confiável.

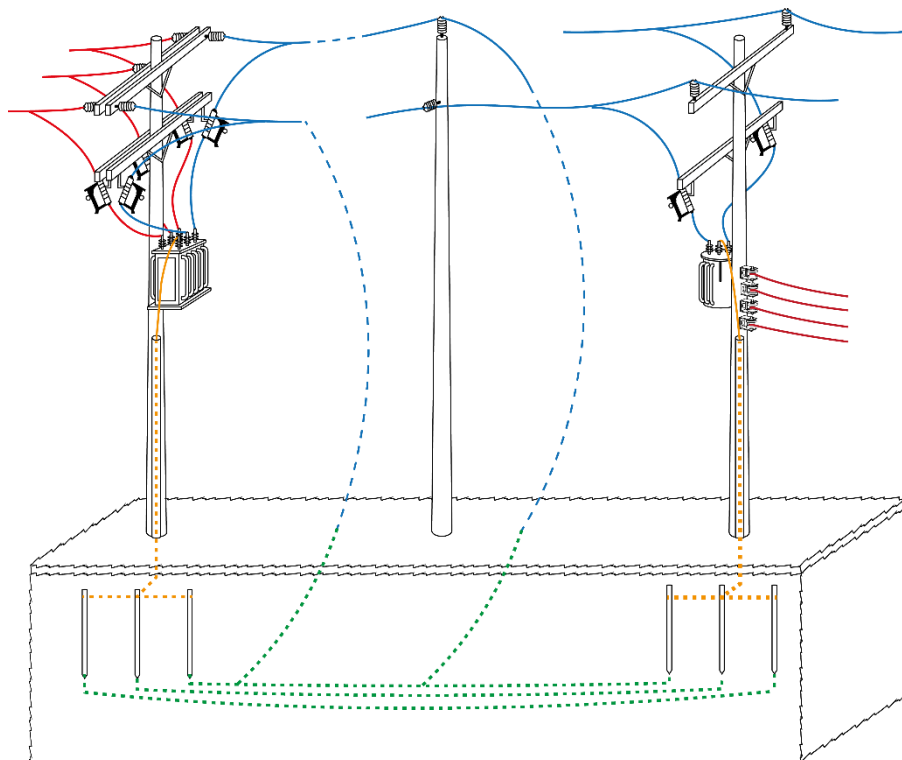
Figura 51 – Tempo de abertura versus o tipo do elo fusível – Curto -circuito ABC – Caso 1.



Fonte: Autor.

O caso 2 demonstrado pela Figura 52 representando os valores $R_{cf} = 1.10^{-5} \Omega$, R_{af} e $R_{bf} = 40 \Omega$.

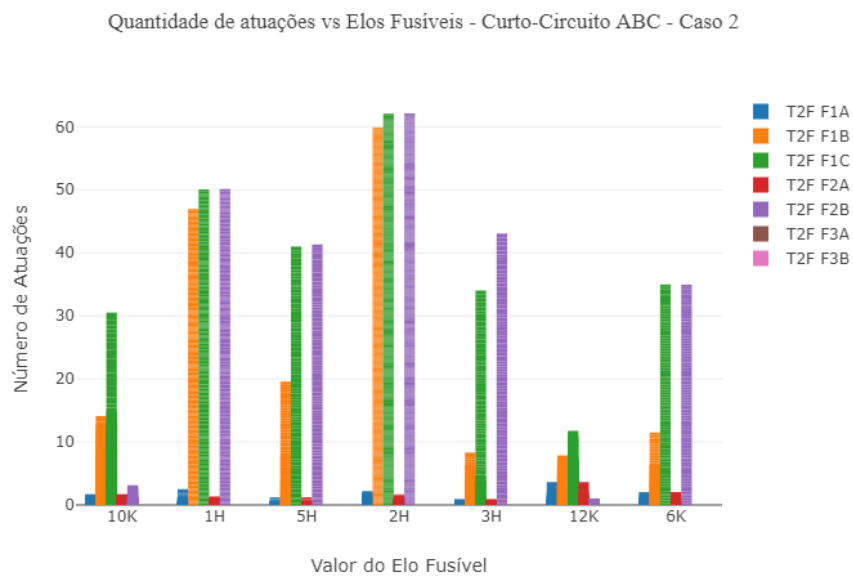
Figura 52 – Exemplo de curto-circuito Trifásico no sistema T2F – Caso 2.



Fonte: Autor.

A Figura 53 mostra que os fusíveis das fileiras F_1 e F_2 são os únicos que atuam, assim os localizados em F_3 , não tem nenhuma atuação independente da severidade. Os curtos-circuitos de tipo ABC – Caso 2, são curtos quais tendem a aumentar a corrente dos dois lados do transformador isolador igual o caso 1. Para isso pode-se isolar esse tipo de curto-circuito por no mínimo dois elos fusíveis.

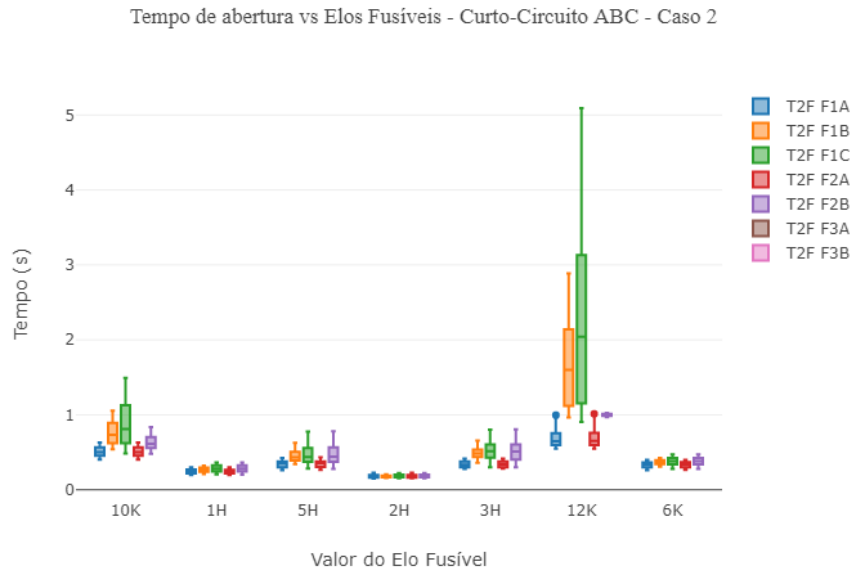
Figura 53 – Quantidade de atuações versus o tipo de elo fusível – Curto-circuito ABC – Caso 2.



Fonte: Autor.

A Figura 54 demonstra os tempos médio, máximos e mínimos, do tempo de atuação dos elos fusíveis, conforme a topologia do T2F, verificando assim que os fusíveis da fileira F_3 não possuem atuações. Deste modo a falta foi isolado pelas fileiras F_1 e F_2 , demonstrando que a topologia T2F num curto trifásico ABC – Caso 2, consegue eliminar a falta de forma rápida, confiável.

Figura 54 – Tempo de abertura versus o tipo do elo fusível – Curto-circuito ABC – Caso 2.



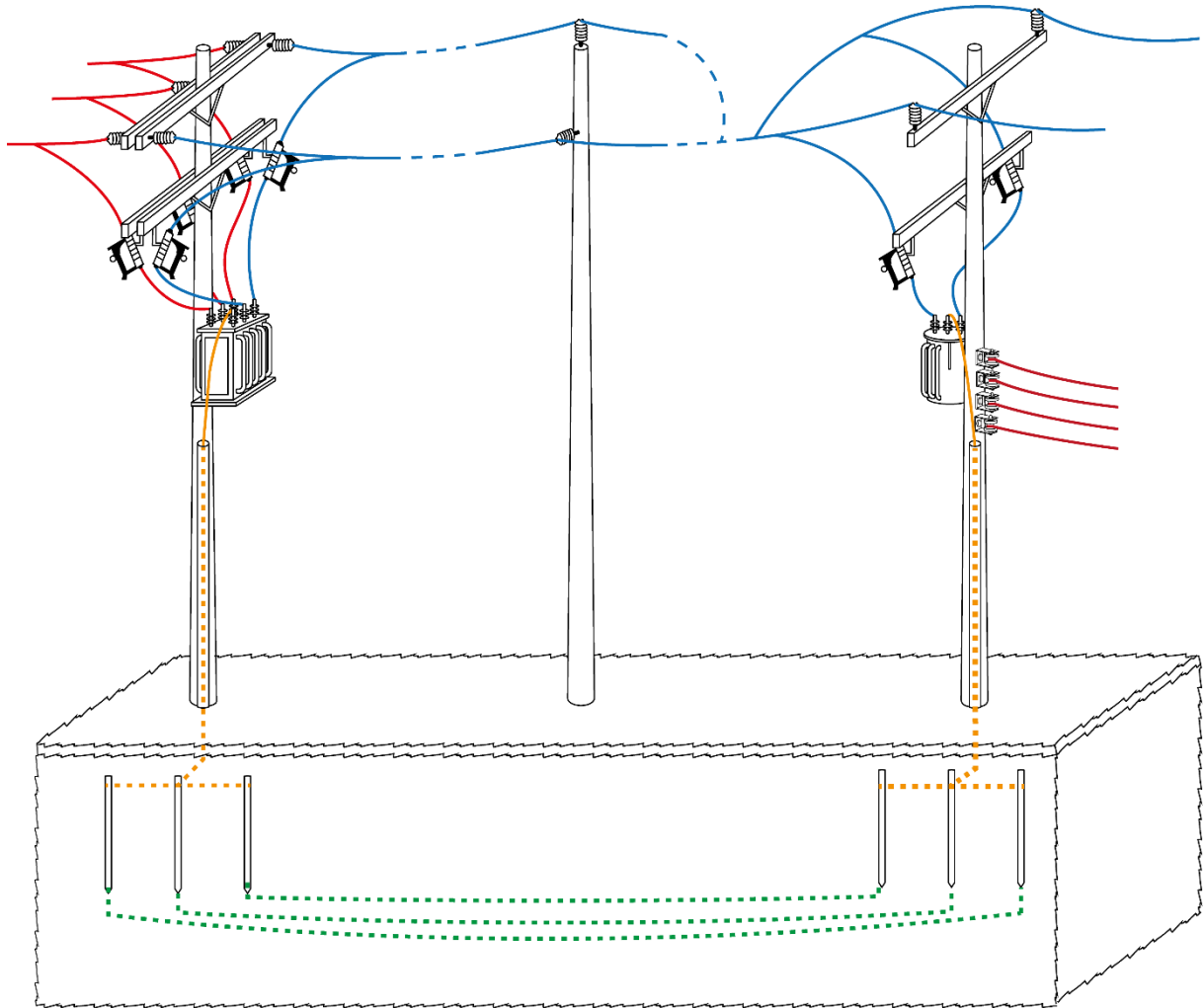
Fonte: Autor.

Foi verificado que a topologia proposta atende os requisitos para faltas trifásicas de caso 1 e caso 2, desta forma a análise deve prosseguir para os curtos-circuitos bifásicos.

4.3.5 CURTO-CIRCUITO BIFÁSICOS ENTRE FASES AÉREAS

Na Figura 55, demonstra-se um possível curto-circuito entre os condutores aéreos. Este tipo de curto pode acontecer no caso de rompimento ou contato dos condutores aéreos.

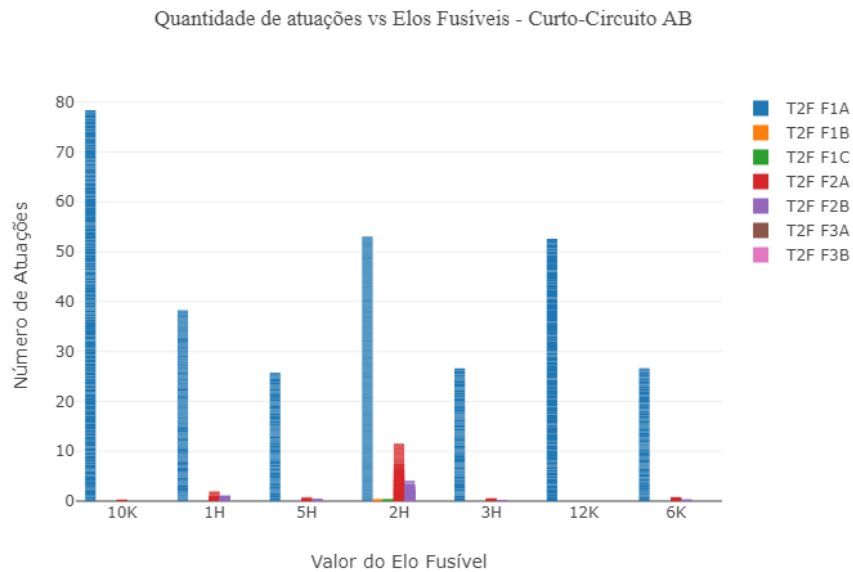
Figura 55 – Exemplo de curto-circuito bifásico fases aéreas no sistema T2F.



Fonte: Autor.

Os curtos-circuitos do tipo AB, podem ocorrer com maior frequência, pois a tendência de toques esporádicos da rede entre fases e por estarem no mesmo alinhamento, mas em alturas diferentes facilita que a fase superior se enrole na fase inferior. Tende-se de forma errônea visualizar o sistema como dois condutores com espaçamento lateral, sendo que o espaçamento destes é vertical, assim os curtos AB podem ser um dos curtos-circuitos com maior número de casos no sistema T2F.

Figura 56 – Quantidade de atuações versus o tipo de elo fusível – Curto-circuito AB.

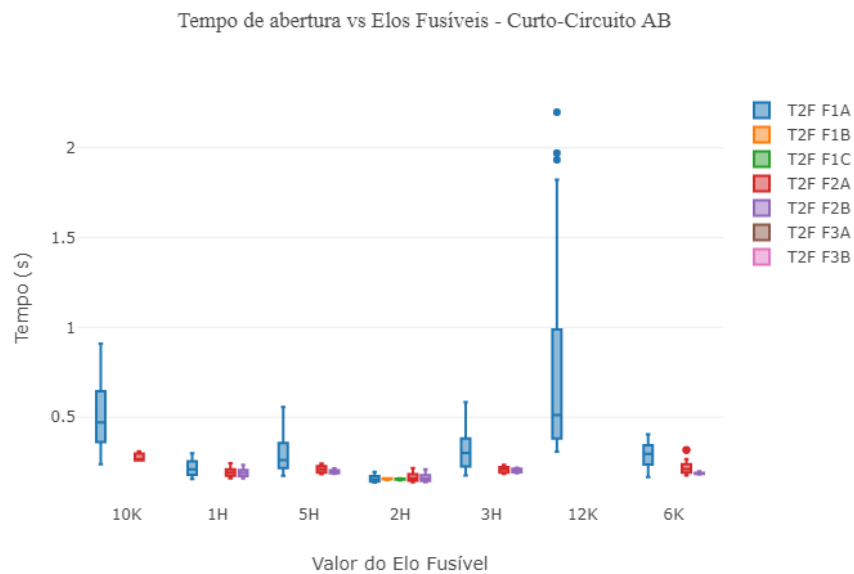


Fonte: Autor.

A Figura 56 analisa a quantidade de atuações de elos fusíveis, na topologia prevista para o T2F, qual utiliza curto-circuito nas fases A e B, sendo estas as fases aéreas. Pode-se verificar que o F_{1A} são de suma importância pois isola diversos curtos-circuitos. No entanto, há poucas atuações de F_{2A} e F_{2B} . Assim os curtos-circuitos podem ser isolados apenas utilizando a entrada do transformador isolador.

Na Figura 57 pode-se verificar a necessidade de um tempo maior no caso de um elo fusível do valor de 12K. Mesmo com essa necessidade de tempo maior, o tempo maior este valor ainda fica abaixo de 5 s de atuação. Sendo o valor médio abaixo de 1,5 s para ruptura deste elo. Desta forma os outros elos ficam abaixo de 1.5 s para ruptura e ponto máximo.

Figura 57 – Tempo de abertura versus o tipo do elo fusível – Curto-circuito AB.

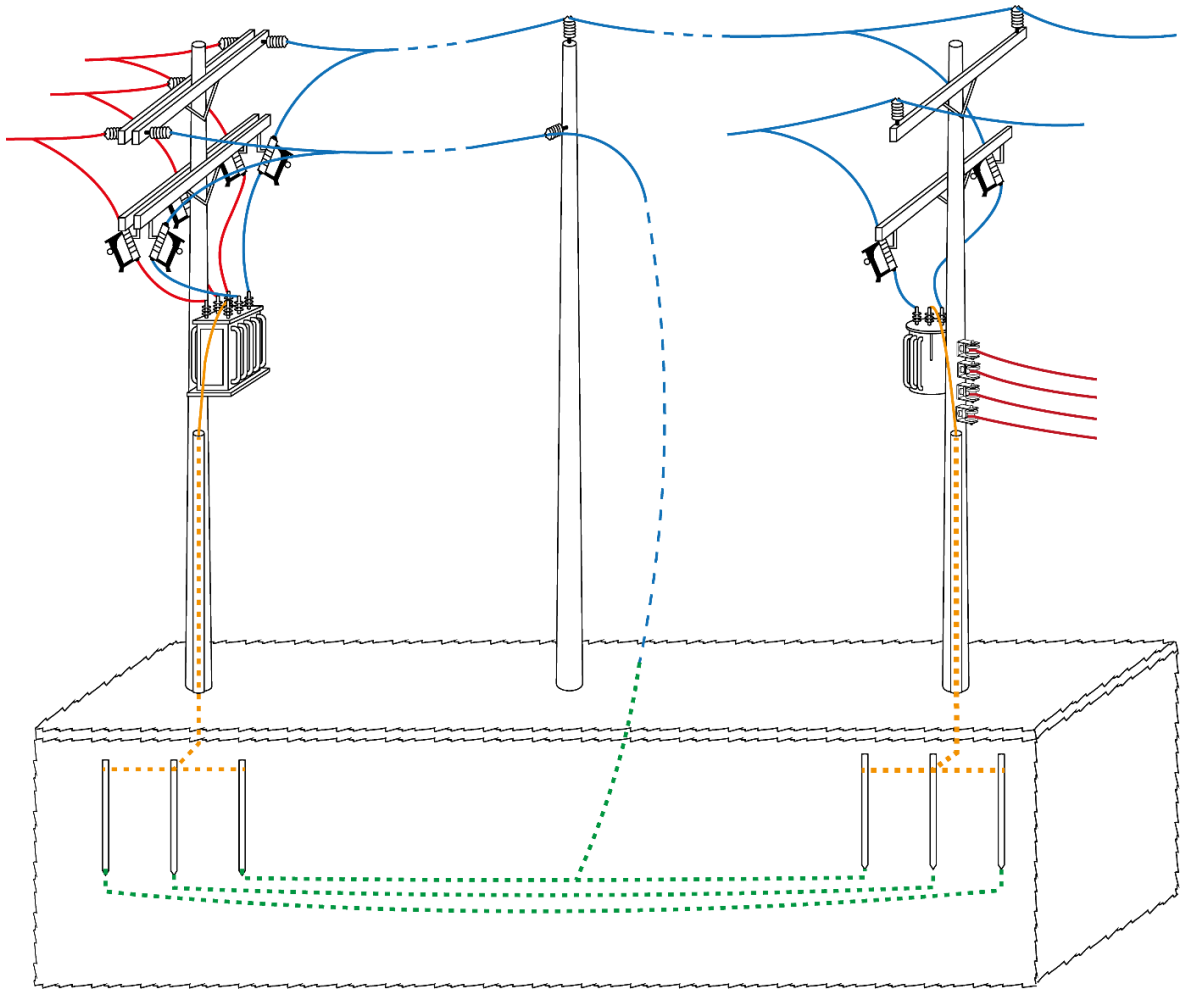


Fonte: Autor.

4.3.6 CURTO-CIRCUITO BIFÁSICOS COM A TERRA

Um curto-circuito bifásico com a terra, seria um condutor do sistema T2F tendo contato com o solo. Desta forma se faz necessária, o teste tanto utilizando fase A, quanto a Fase B, em contato com a fase C (solo), assim temos a Figura 58

Figura 58 – Exemplo de curto-circuito bifásico fase-solo no sistema T2F.

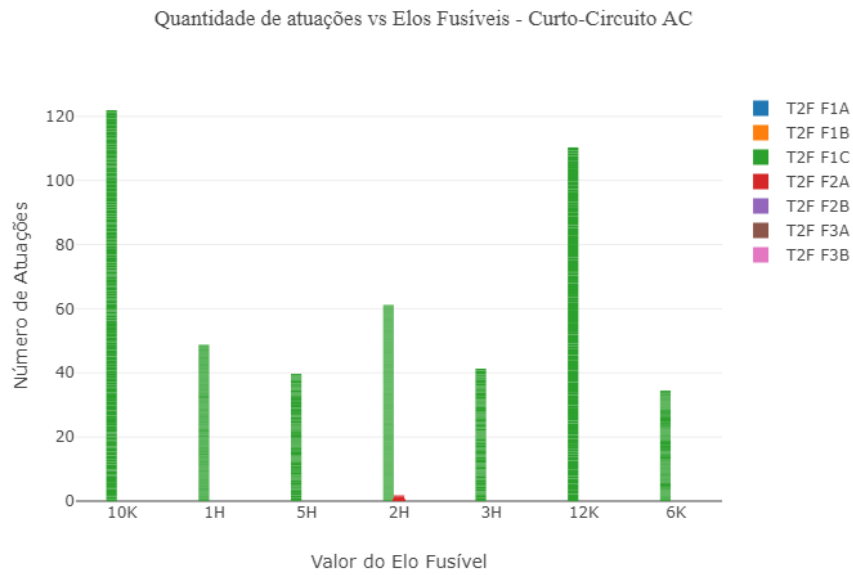


Fonte: Autor.

Para a falta bifásica fase-solo, a Figura 58 representa um curto-circuito formado pela queda de um cabo ao solo.

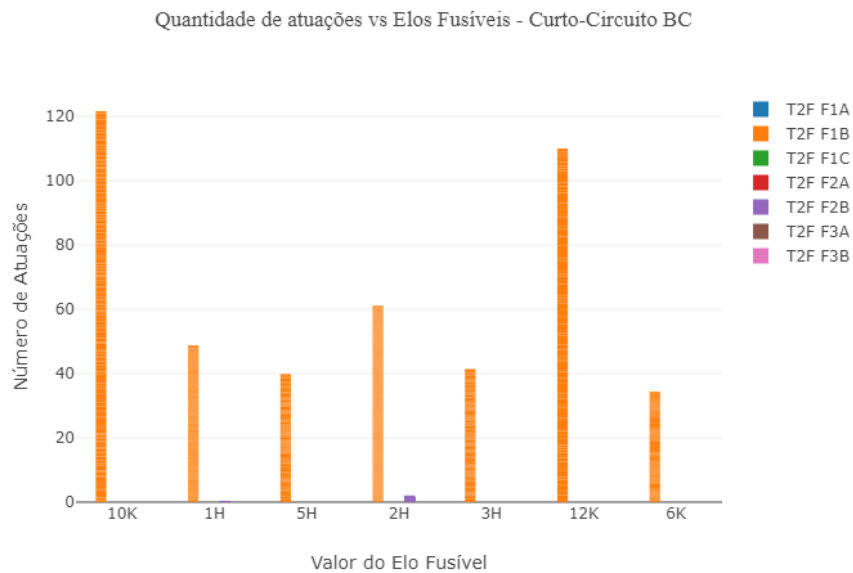
Os curtos-circuitos podem envolver as fases AC e BC.

Figura 59 – Quantidade de atuações versus o tipo de elo fusível – Curto-circuito AC.



Fonte: Autor.

Figura 60 – Quantidade de atuações versus o tipo de elo fusível – Curto-circuito BC.



Fonte: Autor.

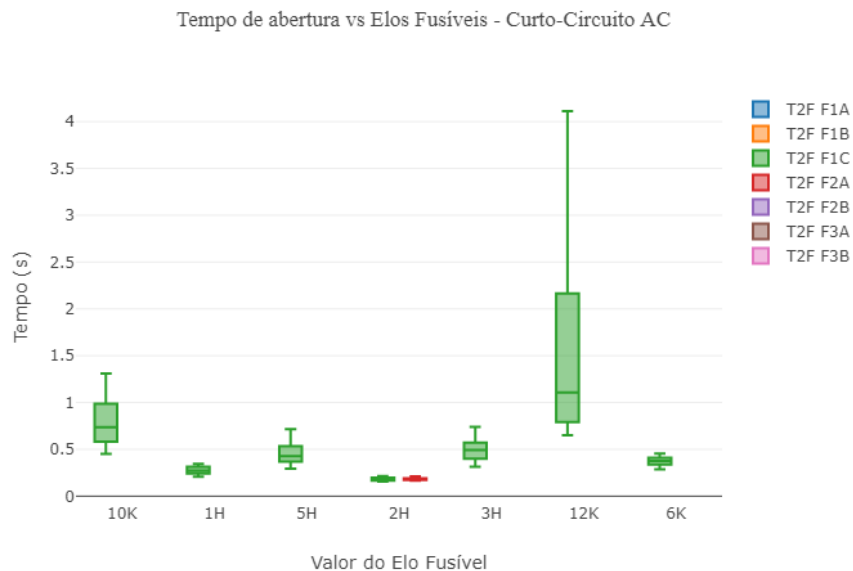
Pode-se notar as mesmas variações de ações vistas, nos anteriores. Porém na Figura 59 observa-se que o elo fusível F_{1C} atuou em quase todos os casos e já na Figura 60 demonstra que

o fusível F_{1B} fez o papel de seccionar o circuito. Com estas figuras demonstramos que os fusíveis de lado de entrada são tão ou mais importantes que os fusíveis da saída T2F do transformador isolador.

As correntes de curto-circuito em sua maioria não se mostram altas. isso pode causar em demora na identificação das faltas, ainda mais em caso de redes rurais, são redes quais não tem ramais com cargas altas assim dificultando a detecção deste tipo de curto-circuito. Esse tipo de curto-circuito representa um aumento na velocidade de ação dos elos fusíveis, pois são curtos-circuitos de valores grandes aplicados a terra, sensibilizando os fusíveis rapidamente.

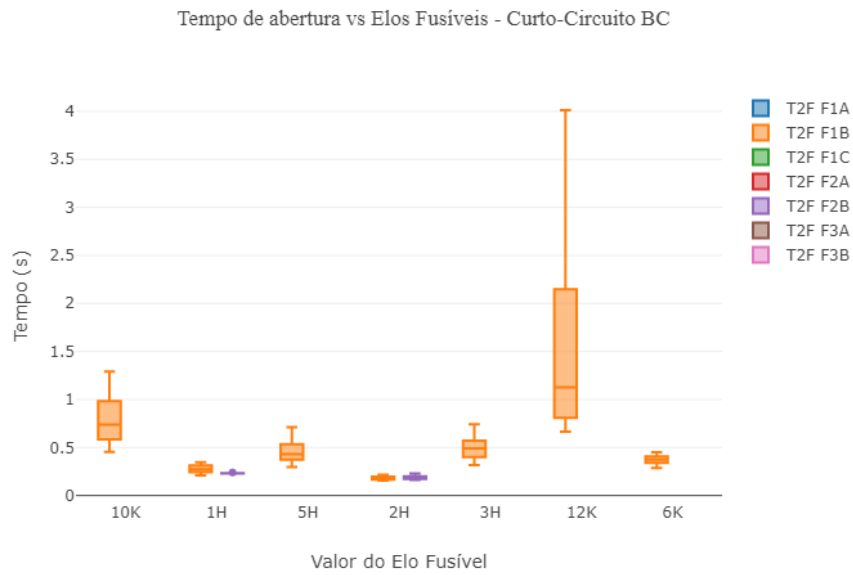
Na Figura 61 pode-se notar que o padrão se repete, pois os elos fusíveis de 12K necessitam de uma corrente alta para atuação de forma rápida, mas sua média, está abaixo de 5s, assim sendo tempo necessário para a maioria das atuações. Já na Figura 62 além de mostrar os problemas encontrados nos elos fusíveis de 12K para correntes baixas, confirma a sua média abaixo de 5s para atuação, fazendo com que o sistema fique seguro.

Figura 61 – Tempo de abertura versus o tipo do elo fusível – Curto-circuito AC.



Fonte: Autor.

Figura 62 – Tempo de abertura versus o tipo do elo fusível – Curto-circuito BC.



Fonte: Autor.

4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foram realizados testes na rede T2F que demonstraram a capacidade dos elos fusíveis em eliminar a falta.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

O aumento da necessidade de demanda de carga em meios rurais, exige que redes antigas sejam repotencializadas. Redes estas que não são de interesse da concessionária, devido ao grande investimento inicial. Segundo Kräulich et al. (2023), o sistema T2F se apresenta como solução, propondo um sistema inovador com um investimento inicial menor. Contudo este sistema apresenta características, as quais algumas são estudadas neste trabalho.

Tendo em vista o que foi dito acima, propôs-se as equações para o cálculo de curto-circuito em sistemas trifásicos não convencionais a dois fios. Foram utilizados modelos polinomiais para os elos fusíveis, a fim de obter os tempos de resposta durante a extinção da falta.

Inicialmente, o assunto foi introduzido, contextualizado e apresentado o sistema teste utilizado ao longo trabalho. As motivações e os objetivos também foram descritos. Após realizar uma abrangente revisão bibliográfica, abordou-se os conceitos básicos necessários para o entendimento deste trabalho.

Em seguida, desenvolveu-se as equações matemáticas para resolução dos curtos-circuitos nesse sistema, levando em consideração as características específicas dessa rede de distribuição. Além disso, apresenta-se a aplicação da filosofia de proteção de redes de distribuição adaptado ao sistema T2F.

A pesquisa destaca a importância do modelo de cálculo e simulação de curtos-circuitos. Seus resultados são demonstrados por meio de simulações em ambiente virtual, visto que estes devem ser aplicados em modelos práticos. Da mesma forma, a aplicação da metodologia de proteção segue a mesma proposta, tanto em simulações quanto em modelos práticos. Dito isso, viabiliza-se a implementação do sistema T2F em campo.

Por fim, este trabalho comprovou a eficácia da equação proposta para as faltas no sistema T2F, bem como possibilitou a aplicação da filosofia de proteção utilizada. Esse estudo proporciona a utilização de redes não convencionais, que aproveitam o solo como condutor ativo do sistema, como uma forma de repotencializar os sistemas MRT e MRN.

5.2 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

- analisar o comportamento do sistema T2F para descargas atmosféricas;

- estudo e aplicação de para-raios;
- avaliar o efeito da resistividade do solo nas correntes de curto-circuito, considerando as diversas sazonalidades do ano.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSON, P. M. *POWER SYSTEM PROTECTION*. . [S.l: s.n.], 1998.
- ANEEL. *RESOLUÇÃO NORMATIVA ANEEL Nº 1.000, DE 7 DE DEZEMBRO DE 2021*. . [S.l: s.n.], 2021a.
- ANEEL. *RESOLUÇÃO NORMATIVA ANEEL Nº 950, DE 23 DE NOVEMBRO DE 2021*. . [S.l: s.n.], 2021b.
- CORRÊA, R. *Programação Inteira Binária Aplicada na Coordenação da Proteção de Sistemas Elétricos de Potência*. [S.l: s.n.], 2016.
- EPE. *BRAZILIAN ENERGY BALANCE*. . [S.l: s.n.], 2021.
- FANDI, J. C. DE O. *Sistema de Distribuição de Energia Elétrica a Dois Condutores para Atendimento a Cargas Rurais Trifásicas*. . [S.l: s.n.], 2013.
- FECOERGS. *História da Eletrificação Rural*.
- GERS, J. M.; HOLMES, E. J. *Protection of Electricity Distribution Networks*. . [S.l: s.n.], 2011.
- GIGUER, S. *Proteção De Sistemas De Distribuição*. [S.l: s.n.], 1988.
- GÖNEN, T. *ELECTRIC POWER TRANSMISSION SYSTEM ENGINEERING*. [S.l: s.n.], 2014.
- IEEE, P. AND E. S. *IEEE Std C37.41-2016: IEEE Standard Design Tests for High-Voltage (>1000 V) Fuses and Accessories*. [S.l.]: IEEE, 2016.
- ILICETO, F. *et al.* Operation results of an experimental system and applications in ghana. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 4, n. 4, p. 2130–2144, 1989.
- KRÄULICH, L. *et al.* *PROPOSTA DE UM SISTEMA TRIFÁSICO NÃO CONVENCIONAL A DOIS FIOS PARA REAPROVEITAMENTO DE CAPITAL INVESTIDO E REPOTENCIALIZAÇÃO DE REDES MONOFILARES COM RETORNO POR TERRA*. . [S.l: s.n.], 2023.
- MAMEDE FILHO, J.; MAMEDE, D. *Proteção de Sistemas Elétricos de Potência*. [S.l: s.n.], 2020. v. 1.
- MANDENO, L. B. E. *RURAL POWER SUPPLY, ESPECIALLY IN BACK COUNTRY AREAS*. . [S.l: s.n.], 1947.
- MARCHESAN, G. *et al.* Three-phase-two-wire rural distribution network: influence of design characteristics on voltage unbalance. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2022.
- MARTINS, M. S. *ANÁLISE DE POTENCIAIS PERIGOSOS GERADOS EM REDES ELÉTRICAS QUE USAM O SOLO COMO MEIO CONDUTOR*. . [S.l: s.n.], 2022.
- RAMOS, J. E. Universalização Da Energia Elétrica Através Da Tecnologia Cabos Para-Raios Energizados (Pre). p. 350, 2010.
- ROSE, E. H. *Alimentacao pequenas cargas ao longo de LT por meio de para raios energizados*. . [S.l: s.n.], 1997

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. *Rural Utilities Service: Design Guide for Sectionalizing Distribution Lines*. . [S.l: s.n.], 2012. Disponível em: <<http://www.usda.gov/rus/electric/bulletins.htm>>.

VICENTE, J. R. Serviços Públicos e Mitigação da Pobreza Rural no Brasil. *Mediações - Revista de Ciências Sociais*, v. 18, n. 1, p. 125, 23 set. 2013.