



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

BIANCA SOARES DE MELO

**DIMENSIONAMENTO DE CABOS PARA-RAIOS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO
AÉREAS SOB CONDIÇÕES DE CURTO-CIRCUITO**

Recife
2024

BIANCA SOARES DE MELO

**DIMENSIONAMENTO DE CABOS PARA-RAIOS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO
AÉREAS SOB CONDIÇÕES DE CURTO-CIRCUITO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Vicente Ribeiro Simoni

Coorientador: Prof. Dr. Alexander Barros Lima

Recife
2024

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Melo, Bianca Soares de.

Dimensionamento de cabos para-raios em linhas de transmissão aéreas sob condições de curto-circuito / Bianca Soares de Melo. - Recife, 2024.

72 p. : il., tab.

Orientador(a): Vicente Ribeiro Simoni

Coorientador(a): Alexander Barros Lima

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Elétrica - Bacharelado, 2024.

Inclui referências.

1. Linhas de Transmissão. 2. Cabos Para-Raios. 3. Curto-Circuito. 4. Dimensionamento de Cabos Para-Raios. I. Simoni, Vicente Ribeiro. (Orientação). II. Lima, Alexander Barros. (Coorientação). IV. Título.

620 CDD (22.ed.)

BIANCA SOARES DE MELO

**DIMENSIONAMENTO DE CABOS PARA-RAIO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO
AÉREAS SOB CONDIÇÕES DE CURTO-CIRCUITO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovado em: 18/10/2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Vicente Ribeiro Simoni (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Lauro Rodrigo Gomes da Silva Lourenço Novo (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Eng. M.Sc. Ericles Mauricio Barbosa (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, pela força, saúde e discernimento concedidos ao longo desta jornada. Sem Sua graça e bênçãos, este trabalho não teria sido possível.

Aos meus pais, Fabio e Valdenice (*in memoriam*), agradeço por não medirem esforços para proporcionar todas as condições necessárias para meus estudos. Seu amor, dedicação e confiança em meu potencial foram fundamentais para que eu trilhasse este caminho. O amor de vocês foi e sempre será a base de todas as minhas conquistas.

A toda minha família, especialmente aos meus irmãos e melhores amigos, Ana Beatriz e Fabio Júnior, que acompanharam de perto toda a minha jornada na universidade. Sou imensamente grata por sempre estarem ao meu lado, me ouvindo, me apoiando e compartilhando este sonho comigo. Vocês tornaram os desafios mais fáceis de enfrentar e as vitórias ainda mais significativas.

À ESC Engenharia, expresso minha gratidão pela confiança e pelas inúmeras oportunidades que me foram oferecidas ao longo desses anos. Um agradecimento especial a todo o setor de eletromecânico pela parceria e pelos valiosos conhecimentos adquiridos. Agradeço ao meu gestor, Fernando Guerra, pelo constante incentivo ao crescimento e ao aprendizado.

A todos os meus amigos, agradeço por todo o apoio e por celebrarem cada conquista junto comigo. A Camilla Domingues, Tiago Guilherme e Samuel Leal, pela amizade construída no início do curso, que tenho certeza perdurará por toda a vida. Aos membros do grupo "Cartada", por toda a amizade, parceria e momentos inesquecíveis compartilhados ao longo desses anos.

A Brenda Estefany, Keyla Mirelle e Pedro Igor, meu sincero agradecimento pelo apoio indispensável durante a criação deste TCC. E a todos os membros do grupo "Insolide", cuja amizade e parceria tornaram o final do curso mais leve e divertido. Juntos enfrentamos desafios acadêmicos e criamos laços que vão além da universidade.

Por fim, agradeço ao Prof. Dr. Vicente Simoni e ao Prof. Dr. Alexander Barros Lima, por todo o apoio, paciência e atenção essenciais para a realização deste TCC.

RESUMO

As linhas de transmissão aéreas são essenciais para o transporte de energia elétrica entre centros de geração e consumo, mas estão sujeitas a riscos como descargas atmosféricas e curtos-circuitos. Para mitigar esses problemas, os cabos para-raios desempenham um papel crucial, oferecendo proteção contra descargas elétricas e escoamento de correntes de falta, o que melhora a segurança e a confiabilidade do sistema. Este trabalho desenvolve uma rotina computacional no MATLAB, integrada ao ATP (Alternative Transients Program), para o dimensionamento de cabos para-raios em condições de curto-circuito monofásico-terra. A partir de simulações, foram modeladas linhas de transmissão e analisadas as distribuições de correntes de falta em diferentes comprimentos (curtas, médias e longas). Foram avaliadas diferentes opções de cabos para-raios, como OPGW e Dotterel, e propostas otimizações na escolha e distribuição desses cabos. O objetivo é identificar o cabo para-raio mais adequado para cada linha de transmissão, garantindo a integridade do sistema elétrico e reduzindo interrupções no fornecimento de energia, promovendo maior eficiência e segurança.

Palavras-chave: Linhas de Transmissão; Cabos Para-Raios; Curto-Circuito; Dimensionamento de Cabos Para-Raios.

ABSTRACT

Overhead transmission lines are essential for the transport of electrical energy between generation and consumption centers, but they are subject to risks such as atmospheric discharges and short circuits. To mitigate these issues, lightning protection cables play a crucial role, providing protection against electrical discharges and fault current dissipation, which enhances the safety and reliability of the system. This work develops a computational routine in MATLAB, integrated with the ATP (Alternative Transients Program), for the sizing of lightning protection cables under monophasic-to-ground short-circuit conditions. Simulations were conducted to model transmission lines and analyze fault current distributions at various line lengths (short, medium, and long). Different types of lightning protection cables, such as OPGW and Dotterel, were evaluated, and optimizations in the selection and distribution of these cables were proposed. The aim is to identify the most suitable lightning protection cable for each transmission line, ensuring the integrity of the electrical system and reducing interruptions in energy supply, thereby promoting greater efficiency and safety.

Keywords: Transmission Lines; Lightning Protection Cables; Short Circuit; Sizing of Lightning Protection Cables.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Estrutura básica de um sistema elétrico.....	18
Figura 2 – Geração no SIN no dia 18/05/2024.	19
Figura 3 – Principais elementos de um LT.	21
Figura 4 – Condutores de Alumínio com Alma de Aço (CAA).	22
Figura 5 – Estruturas de circuito duplo, em suspensão.....	24
Figura 6 – Isolador de disco de suspensão de vidro temperado.	24
Figura 7 – Circuito π equivalente de uma LT.....	27
Figura 8 – Diagrama e circuito equivalente de uma LT curta.	28
Figura 9 – Circuito π equivalente de uma LT média.....	29
Figura 10 –Circuito equivalente π de uma LT longa.....	30
Figura 11 – Cabo Aço-Alumínio.	32
Figura 12 – Cabo para-raios OPGW.	33
Figura 13 – Elementos do aterramento de uma torre autoportante.....	37
Figura 14 – Sistema de potência típico em condição de falta para a terra.	39
Figura 15 – Ocorrência dos curtos-circuitos.....	40
Figura 16 – Curto-circuito monofásico-terra.	42
Figura 17 – Conexões do curto-circuito monofásico-terra.....	42
Figura 18 – Estrutura básica de um sistema elétrico.....	45
Figura 19 – <i>Command Window</i> do MATLAB com informações dos cabos da LT.	47
Figura 20 – Exemplo de arquivo .pch criado ao fim da rotina <i>Line Constants</i>	48
Figura 21 – Tela do MATLAB com características físicas da LT.....	49
Figura 22 – Arquivo .atp com parâmetros do vão.....	49
Figura 23 – Distribuição das correntes durante o curto.....	50
Figura 24 – Gráfico criado pelo programa.....	51
Figura 25 – Geometria do topo da estrutura com espaçamentos entre cabos condutores e para-raios.	52
Figura 26 – Distâncias ao solo na estrutura e no meio do vão.....	52
Figura 27 – Gráfico da distribuição de corrente para linha curta utilizando cabo OPGW.....	54
Figura 28 – Gráfico da distribuição de corrente para linha curta utilizando cabo Dotterel.....	55

Figura 29 - Gráfico da distribuição de corrente para linha curta com trocas de cabos no vão 10.....	56
Figura 30 - Gráfico da distribuição de corrente para linha curta com trocas de cabos no vão 10.....	57
Figura 31 – Gráfico da distribuição de corrente para linha média utilizando cabo OPGW.....	59
Figura 32 – Gráfico da distribuição de corrente para linha média utilizando cabo Dotterel.....	60
Figura 33 – Gráfico da distribuição de corrente para linha média com trocas de cabos no vão 25.	61
Figura 34 – Gráfico da distribuição de corrente para linha média com trocas de cabos no vão 26.	62
Figura 35 – Gráfico da distribuição de corrente para linha longa utilizando cabo OPGW.....	63
Figura 36 – Gráfico da distribuição de corrente para linha longa utilizando cabo Dotterel.....	64
Figura 37 – Gráfico da distribuição de corrente para linha longa com trocas de cabos no vão 50.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tipos de condutores de alumínio.....	22
Tabela 2 – Constate de materiais condutores.....	35
Tabela 3 – Comparação dos valores de corrente máxima.....	35
Tabela 4 – Parâmetros dos cabos fase e para-raios.....	47
Tabela 5 – Corrente máxima suportada pelos cabos para-raios.....	51
Tabela 6 – Distribuição de corrente para linha curta utilizando cabo OPGW.....	54
Tabela 7 – Distribuição de corrente para linha curta utilizando cabo Dotterel.....	55
Tabela 8 – Distribuição de corrente para linha curta com troca no vão 10.....	56
Tabela 9 – Distribuição de corrente para linha curta com troca no vão 40.....	58
Tabela 10 – Distribuição de corrente para linha média utilizando cabo OPGW.....	59
Tabela 11 – Distribuição de corrente para linha média utilizando cabo Dotterel.....	60
Tabela 12 – Distribuição de corrente para linha média com troca no vão 25.....	61
Tabela 13 – Distribuição de corrente para linha curta com troca no vão 26.....	62
Tabela 14 – Distribuição de corrente para linha longa utilizando cabo OPGW.....	64
Tabela 15 – Distribuição de corrente para linha longa utilizando cabo Dotterel.....	65
Tabela 16 – Distribuição de corrente para linha longa com troca no vão 50.....	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC	<i>Alternating Current</i>
ACAR	Condutor de Alumínio com Alma de Aço
ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
CA	Condutor de Alumínio
CA	Corrente Alternada
CAA	Condutor de Alumínio com Alma de Aço
CAL	Condutor de Alumínio Liga
CALA	Condutor de Alumínio Liga com Alma de Aço
EHS	<i>Extra High Strength</i>
HS	<i>High Strength</i>
LT	Linha de Transmissão
OPGW	<i>Optical Ground Wire</i>
RMG	Raio Médio Geométrico
SE	Subestação
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SIN	Sistema Interligado Nacional

LISTA DE SÍMBOLOS

Y	Admitância shunt distribuída da linha de transmissão
A	Área do condutor
α_0	Coefficiente térmico de resistividade em 0 °C
α_r	Coefficiente térmico de resistividade na temperatura de referência
l	Comprimento da linha de transmissão
γ	Constante de Propagação
K_f	Constante para materiais considerando a temperatura ambiente como 40°C
I_f	Corrente de falta
I	Corrente eficaz
I_S	Corrente na extremidade de envio
I_R	Corrente na extremidade de recebimento
λ	Fasor representando comprimento de onda ou fator de fase
$TCAP$	Fator de capacidade térmica
Z_C	Impedância característica da linha de transmissão
Z	Impedância de linha
L	Indutância da linha
μ	Permeabilidade magnética
W	Potência ativa
R	Resistência em corrente alternada
ρ_r	Resistividade do condutor na temperatura de referência
S	Seção transversal do condutor
T_R	Temperatura de referência para as constantes dos materiais
T_a	Temperatura do condutor
T_m	Temperatura máxima admissível
t_c	Tempo de fluxo da corrente

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	MOTIVAÇÃO	14
1.2	OBJETIVOS	16
1.2.1	Geral.....	16
1.2.2	Específicos	16
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA.....	18
2.1.1	Geração.....	18
2.1.2	Transmissão	19
2.1.3	Distribuição.....	19
2.2	LINHAS DE TRANSMISSÃO.....	20
2.2.1	Características Construtivas.....	20
2.2.1.1	<i>Condutores</i>	21
2.2.1.2	<i>Estruturas</i>	23
2.2.1.3	<i>Isoladores</i>	24
2.2.1.4	<i>Cabos Para-raios</i>	25
2.2.2	Parâmetros	25
2.2.2.1	<i>Resistência</i>	26
2.2.2.2	<i>Indutância</i>	26
2.2.2.3	<i>Capacitância</i>	27
2.2.3	Modelos	27
2.2.3.1	<i>Linha de Transmissão Curta</i>	28
2.2.3.2	<i>Linha de Transmissão Média</i>	29
2.2.3.3	<i>Linha de Transmissão Longa</i>	30
2.3	CABOS PARA-RAIOS	31
2.3.1	Cabos Para-Raios Convencionais.....	31
2.3.2	Cabos Para-Raios OPGW	32
2.3.3	Dimensionamento de Cabos Para-Raios.....	33
2.4	SISTEMA DE ATERRAMENTO.....	35
2.4.1	Aterramento de Linhas de Transmissão	37
2.4.2	Aterramento de Subestações	38
2.5	FALTAS NO SEP.....	39
2.5.1	Curto-Circuito 1 ϕ -terra	41
2.6	ATP.....	43
2.6.1	Line Constants.....	43
3	METODOLOGIA.....	45

3.1	INFORMAÇÕES DOS CABOS DA LT.....	46
3.2	CÁLCULO DOS PARÂMETROS DA LT.....	48
3.3	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA LT	48
3.4	CÁLCULO DAS CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO.....	49
3.5	EXIBIÇÃO DOS RESULTADOS.....	50
4	APLICAÇÃO	52
4.1	LINHA CURTA.....	53
4.1.1	Cenário 1	53
4.1.2	Cenário 2	56
4.2	LINHA MÉDIA.....	58
4.2.1	Cenário 1	58
4.2.2	Cenário 2	61
4.3	LINHA LONGA.....	63
4.3.1	Cenário 1	63
4.3.2	Cenário 2	65
5	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE	67
5.1	TRABALHOS FUTUROS.....	68
	REFERÊNCIAS.....	69

1 INTRODUÇÃO

No sistema elétrico de potência (SEP), as linhas de transmissão de energia (LT) são fundamentais para transportar a eletricidade gerada nos centros de produção até os centros de consumo, percorrendo longas distâncias e conectando as diferentes regiões do país [1]. No Brasil, essa infraestrutura, conhecida como Sistema Interligado Nacional (SIN), é essencial para garantir o fornecimento estável e confiável de eletricidade, atendendo à crescente demanda do país [2]. No entanto, devido a extensão do SIN, as LTs ficam expostas a vários riscos, como as descargas atmosféricas. É nesse contexto que os cabos para-raios desempenham um papel importante na proteção das LTs [3].

Embora sua função principal seja proteger contra descargas atmosféricas, os cabos para-raios também oferecem benefícios na mitigação dos efeitos de curtos-circuitos ao escoar a corrente, proteger contra sobretensões e melhorar a estabilidade do sistema. Assim, eles contribuem para a segurança e a confiabilidade do sistema elétrico como um todo [4]. Para garantir a proteção eficaz das LTs, é necessário realizar o dimensionamento correto dos cabos para-raios, seguindo as normas e regulamentações pertinentes. Isso não apenas assegura a segurança operacional, mas, também, auxilia na redução de danos e interrupções no fornecimento de energia elétrica [4].

1.1 Motivação

Para realizar o dimensionamento dos cabos para-raios, é necessário um estudo sobre a distribuição de correntes de falta e suas contribuições na LT e nas SEs adjacentes [5]. Essa temática começa a ganhar destaque na década de 60, quando é apresentado um procedimento que possibilita uma análise mais profunda da distribuição da corrente de falta fase-terra em LT, sem limitações de vãos [6]. Nas décadas seguintes, diversas pesquisas e estudos aprofundaram o conhecimento sobre o assunto, levando ao desenvolvimento de novas metodologias, como a determinação dos parâmetros de linha, de cabos para-raios e de interconexões de sistemas de aterramento.

No final dos anos 70, introduz-se o conceito básico do uso de cabos do tipo OPGW (do inglês, *Optical Ground Wire*), com suas aplicações práticas como ferramenta de proteção começando nos anos 80 [7]. Em 1988, é introduzido um algoritmo para detecção de falhas utilizando cabos OPGW [8]. Concomitantemente, trabalhos pioneiros propõem métodos analíticos e computacionais para quantificar as distribuições de corrente em diferentes tipos de falha (monofásica, bifásica e trifásica a terra) [9,10,11].

A variação da intensidade de corrente de falha e seus efeitos térmicos, resultantes da inserção de novas LTs no sistema, é, também, um ponto importante de estudo [12]. Para compreender melhor essa dinâmica, utiliza-se um programa de simulação computacional que permite verificar a distribuição de correntes de falha em circuitos simples e duplos, como o software EMTP (*Electromagnetic Transients Program*). Mais tarde, esse software evoluiu para o ATP [13]. Mais recentemente, em 2017, realizou-se um estudo abordando a intensidade e a distribuição da corrente de curto-circuito ao longo da LT, influenciado pela escolha do cabo para-raios [4]. Na mesma época, em [14], foi avaliada a capacidade de condução de correntes de curto-circuito em cabos para-raios ao longo de sua vida útil.

De acordo com [2], em 2023, 74,23% das perturbações registradas na Rede Básica tiveram sua origem em LT, sendo as condições meteorológicas adversas a principal causa. Dessa forma, é crucial a escolha correta dos cabos para-raios para proteger o sistema. Além disso, na existência de uma falta monofásica, devido ao acoplamento indutivo com a fase que sofreu a falta, parcelas da corrente de curto percorrerão os cabos para-raios.

Em novembro de 2023, foi publicada a norma ABNT NBR 17140, que trata do aterramento de estruturas e do dimensionamento de cabos para-raios em linhas de transmissão de energia elétrica aéreas. Em relação ao tema cabos para-raios, existem poucos estudos, e os disponíveis se concentram, principalmente, na proteção de linhas contra descargas atmosféricas. Diante disso, torna-se imprescindível conduzir estudos específicos para o dimensionamento de cabos para-raios, especialmente considerando as condições de curto-circuito.

1.2 Objetivos

1.2.1 Geral

Desenvolvimento de uma rotina computacional elaborada no MATLAB, em conjunto com o ATP (*Alternative Transients Program*) para realizar um estudo de dimensionamento de cabos para-raios em LTs em condições de faltas monofásicas, conforme [5].

1.2.2 Específicos

- Desenvolver uma rotina computacional no MATLAB integrada ao ATP para a modelagem de uma LT, permitindo a simulação detalhada de curtos-circuitos monofásicos.
- Analisar a distribuição das correntes de falta nas diferentes estruturas de uma LT, com ênfase nas parcelas de corrente direcionadas aos cabos para-raios.
- Propor otimizações no dimensionamento dos cabos para-raios, considerando diferentes configurações de linhas curtas, médias e longas, de acordo com os dados simulados.

1.3 Organização do Trabalho

Esse trabalho está organizado em seis capítulos:

- Capítulo 1 - Introdução ao tema, com pesquisa de informações em estudos publicados em âmbito nacional e internacional, além das normas vigentes sobre o assunto, destacando a motivação e os principais objetivos do trabalho.
- Capítulo 2 - Fundamentação teórica necessária para o dimensionamento de cabos para-raios, abordando conceitos e informações relevantes.
- Capítulo 3 - Desenvolvimento de um programa no MATLAB, utilizando dados obtidos por meio de simulações realizadas no ATP, para o dimensionamento de cabos para-raios.

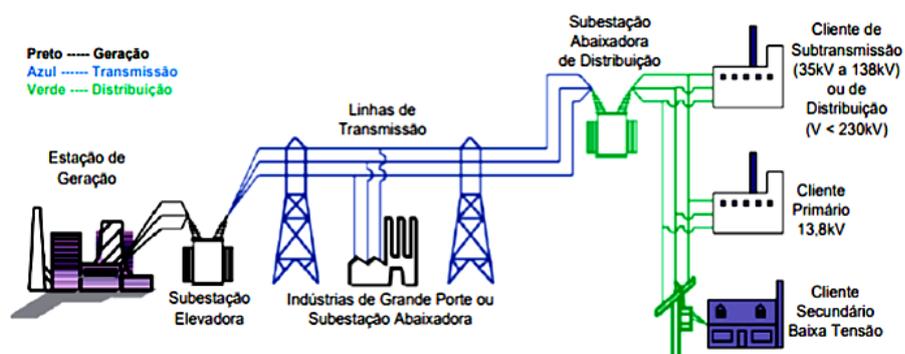
- Capítulo 4 - Aplicação do programa criado em LT de tamanhos diferentes.
- Capítulo 5 - Conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Sistema Elétrico de Potência

O SEP é composto por todas as instalações e equipamentos utilizados para gerar, transmitir e distribuir energia elétrica. Como ilustra a Figura 1, ele é composto por grandes usinas que utilizam diversas fontes de energia, como hidráulica, térmica, nuclear, eólica e solar, e que estão interligadas entre si e às SEs dos principais centros através de longas LTs em diferentes níveis de tensões [15].

Figura 1 – Estrutura básica de um sistema elétrico.

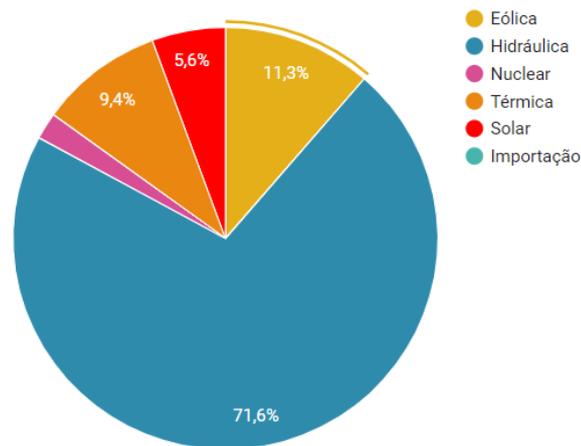


Fonte: adaptado de [16].

2.1.1 Geração

A maior parte da eletricidade consumida no Brasil é gerada em usinas, e pode ser obtida através da transformação de energia proveniente de diversas fontes [17]. Ao contrário da matriz energética global, no Brasil, a capacidade instalada de geração é composta em sua maioria por fontes renováveis, principalmente, por hidrelétricas, como apresenta a Figura 2 [2]. Depois de gerada, a energia vai para as SEs de transmissão, em que transformadores aumentam a tensão da rede com objetivo de evitar perdas [17].

Figura 2 – Geração no SIN no dia 18/05/2024.



Fonte: retirado de [2].

2.1.2 Transmissão

Na transmissão, a energia produzida é levada aos grandes centros de carga por meio de LTs com tensões entre 230 kV e 750 kV [18]. Essa infraestrutura faz parte do SIN, que é dividido em quatro subsistemas: Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e a maior parte da região Norte [2,17]. A integração dos diversos elementos do sistema elétrico garante a estabilidade e confiabilidade da rede, facilita a interligação entre bacias hidrográficas e regiões com características hidrológicas variadas, e promove a integração energética com países vizinhos [18].

Antes de chegar aos consumidores, a energia passa pelas SEs de distribuição, em que a tensão é reduzida novamente para garantir um fornecimento seguro [17].

2.1.3 Distribuição

Essa é a etapa que assegura que a energia chegue às residências, empresas, indústrias, estabelecimentos comerciais e postes de iluminação pública. No Brasil, o serviço de distribuição é concedido a empresas públicas e privadas, que são responsáveis por administrar o fornecimento [17]. De acordo com [19], os níveis de tensão na distribuição de energia elétrica são divididos em três categorias principais:

- **Baixa Tensão:** nessa categoria, a tensão entre fases é de até 1 kV. Essa faixa é utilizada para fornecer energia diretamente aos consumidores finais, como residências, pequenos comércios e propriedades rurais.
- **Média Tensão:** aqui, a energia é transportada das subestações de distribuição até os transformadores que alimentam os consumidores. As tensões variam de 2,3 kV a 69 kV.
- **Alta Tensão:** utilizada nas redes de transmissão e nas subestações de distribuição, essa categoria cobre tensões entre fases de 69 kV a 230 kV.

2.2 Linhas de Transmissão

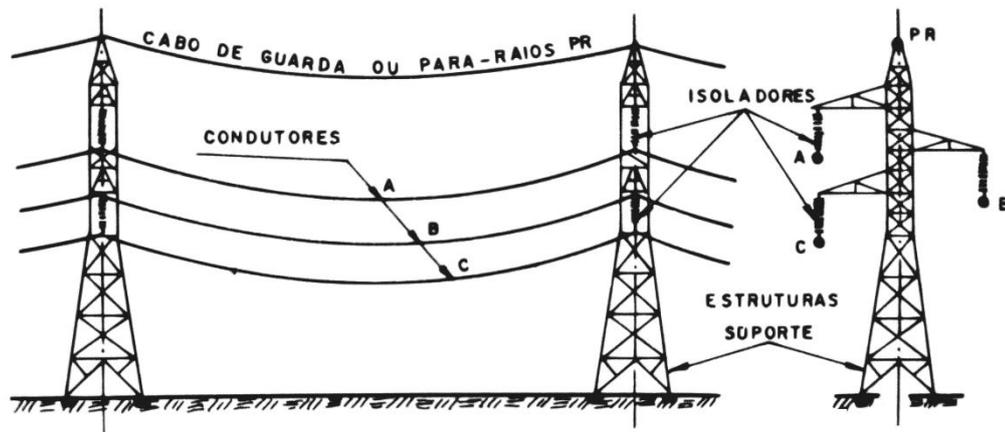
As LTs são responsáveis por conectar as usinas geradoras aos centros de consumo, assim como interligar centros de produção e sistemas independentes [17,1]. A decisão de construir novas LTs é fundamentada em estudos de planejamento do sistema elétrico para atender às futuras demandas de crescimento da carga e nova geração. Os pontos de interconexão de cada nova LT e suas especificações de potência e tensão são selecionados com base nessas análises [20].

O projeto de uma LT deve ter como objetivo otimizar fatores elétricos, mecânicos, ambientais e econômicos, incluindo a suportabilidade dielétrica dos isoladores, desempenho frente a descargas atmosféricas e capacidade de suportar cargas mecânicas, e isso sem deixar de lado outro aspecto igualmente relevante, que é o aspecto financeiro [1].

2.2.1 Características Construtivas

Uma LT aérea, como apresentado na Figura 3, é composta por cabos (condutores e os para-raios), isoladores, estruturas de suporte e o sistema de aterramento. Seu desempenho está diretamente relacionado às características de seus componentes e à sua configuração geométrica [3].

Figura 3 – Principais elementos de um LT.



Fonte: adaptado de [3].

2.2.1.1 Condutores

Os condutores são os elementos ativos da LT, constituídos por cabos obtidos a partir do encordoamento de fios metálicos. O tipo, o tamanho e a quantidade de condutores por fase em um feixe, devem possuir alta condutividade elétrica para limitar as perdas por efeito Joule [3]. Além disso, é crucial que tenham custo acessível, já que representam entre 30% e 35% no investimento total da linha [21].

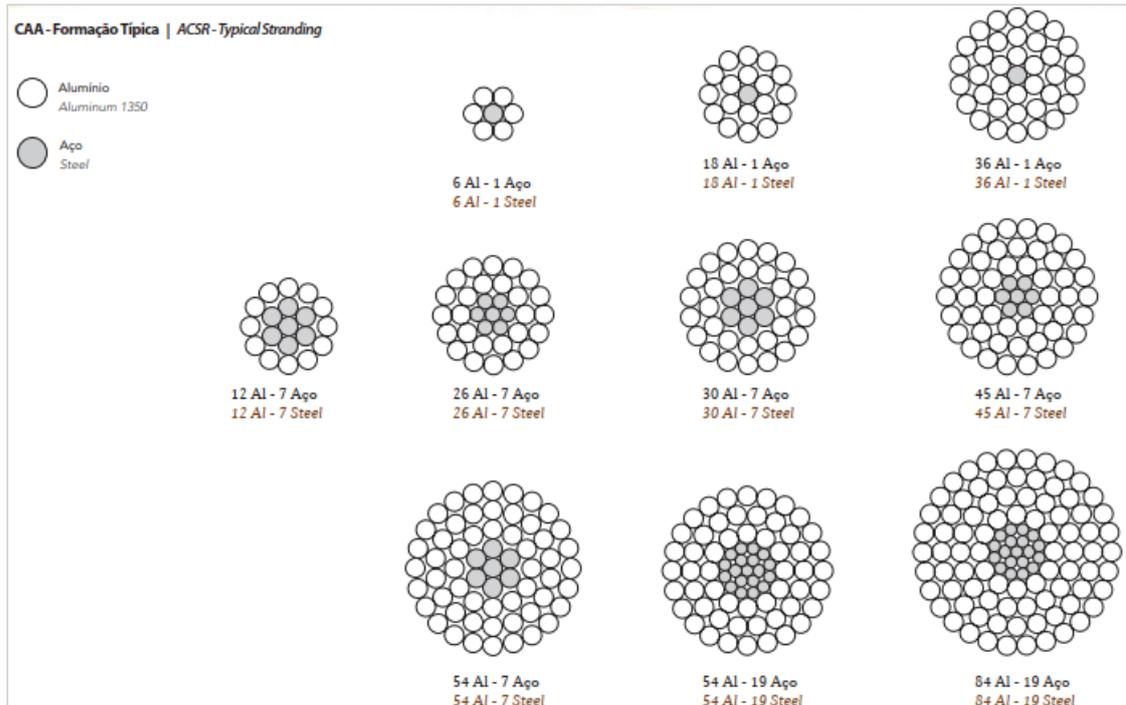
Eles também devem oferecer boa resistência mecânica para garantir a integridade da linha, assegurando a continuidade do serviço e a segurança das áreas circundantes. Da mesma forma, é fundamental que possuam baixo peso específico e alta resistência à oxidação e corrosão, prevenindo a redução de sua seção ao longo do tempo e possíveis problemas operacionais [1].

Inicialmente, os condutores utilizados eram de cobre, mas, com o tempo, os condutores de alumínio passaram a ser amplamente utilizados. Isso porque, apesar do alumínio requerer uma área transversal maior para atingir a mesma eficiência de um condutor de cobre, ele apresenta vantagens como menor custo e menor massa linear. Ademais, o alumínio é um recurso abundante, enquanto o cobre é mais limitado [20,21,22].

Como mostrado por [21], a chegada dos condutores de alumínio com alma de aço (CAA), mostrado na Figura 4, trouxe uma combinação vantajosa entre as boas propriedades elétricas do alumínio e a alta resistência do aço, com um investimento

razoável. Para dissipação de calor, os condutores das LTs aéreas são nus, ou seja, não possuem cobertura isolante.

Figura 4 – Condutores de Alumínio com Alma de Aço (CAA).



Fonte: retirado de [23].

Ao longo dos anos, novos tipos de condutores foram desenvolvidos. Eles apresentam um desempenho semelhante aos CAA, mas não enfrentam problemas de corrosão, algo que pode afetar o núcleo desses condutores em ambientes agressivos [20]. As siglas para identificar os cabos de alumínio mais utilizados estão listadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Tipos de condutores de alumínio.

Sigla	Condutor
CA	Condutor de Alumínio
CAA	Condutor de Alumínio com Alma de Aço
ACAR	Condutor de Alumínio Reforçados com Alumínio Liga
CAL	Condutor de Alumínio Liga
CALA	Condutor de Alumínio Liga com Alma de Aço

Fonte: adaptado de [3].

2.2.1.2 Estruturas

As estruturas, também conhecidas como suportes, são responsáveis pela sustentação dos cabos (condutores e para-raios). Elas existem em uma variedade de formas e tamanhos que dependem de diversos fatores, como a disposição, a distância entre condutores, as dimensões, a forma de isolamento, o número de circuitos e os materiais estruturais. Além disso, elas devem ser capazes de resistir aos esforços a que são submetidas [1,20,3].

Segundo [3], as estruturas de uma LT podem ser classificadas de várias maneiras:

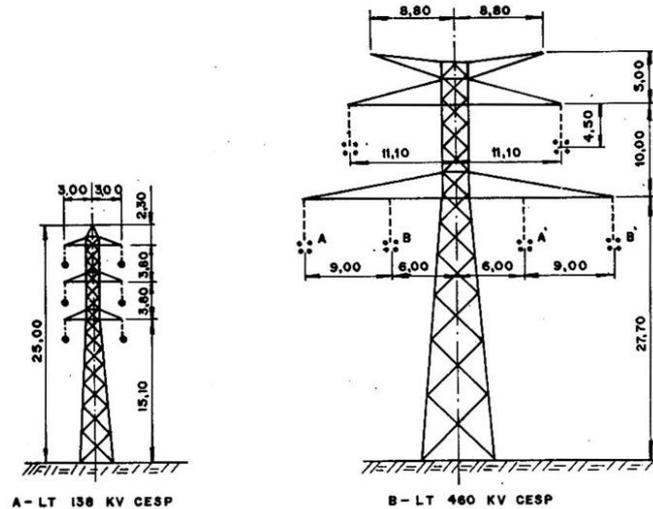
- Classificação segundo a função estrutural:
 - Estruturas de transposição de fases
 - Estruturas de ancoragem
 - Estruturas para ângulos
 - Estruturas de suspensão
 - Estruturas de derivação

- Classificação segundo a forma de resistir das estruturas
 - Estruturas autoportantes
 - Estruturas rígidas
 - Estruturas flexíveis
 - Estruturas mistas ou semirrígidas
 - Estruturas estaiadas

- Classificação segundo os materiais estruturais:
 - Estruturas de madeira
 - Estruturas de concreto armado
 - Estruturas de metais

A escolha final dos suportes dependerá da arquitetura mais adequada aos materiais estruturais empregados, selecionados com base na confiabilidade e no custo [3]. Um exemplo de estrutura de uma LT, está representado na Figura 5.

Figura 5 – Estruturas de circuito duplo, em suspensão.



Fonte: retirado de [1].

2.2.1.3 Isoladores

Os cabos são sustentados pelas estruturas por meio de isoladores, que os mantêm eletricamente isolados das estruturas. Esses isoladores devem resistir às demandas, tanto mecânicas quanto elétricas, e possuir um acabamento que suporte a exposição às intempéries [1].

Nas LTs, três tipos de isoladores são empregados: isoladores de pino, isoladores tipo pilar e isoladores de disco de suspensão feitos de porcelana vitrificada, vidro temperado ou material sintético composto [1,20,3]. A Figura 6 apresenta um isolador de disco de suspensão feito de vidro temperado.

Figura 6 – Isolador de disco de suspensão de vidro temperado.



Fonte: retirado de [24].

Conforme [1], os mais utilizados são do tipo suspensão, pois, trabalhando sob tração, eles se adequam bem às condições de serviço, especialmente, em LTs de alta e extra alta tensão. Esses isoladores são compostos por um corpo isolante e ferragens de suspensão, que conectam as unidades entre si, formando longas cadeias. O número de discos em uma cadeia aumenta conforme a tensão da LT.

2.2.1.4 Cabos Para-raios

Os cabos para-raios ficam localizados na parte superior das estruturas e têm a função de proteger os condutores de fase contra descargas atmosféricas, direcionando-as para o solo e em caso de falta, fornecer um caminho alternativo para a corrente de curto-circuito. Isso evita danos e interrupções nos sistemas de transmissão de energia [1,20].

Em geral, eles são feitos de aço de alta ou extra alta resistência, *Alumoweld* ou CAA, e possuem uma seção transversal muito menor que a dos condutores de fase. Além das funções já mencionadas, esses cabos podem ter outras funções sem comprometer sua função principal. Um exemplo é o OPGW, que permite a transmissão de dados utilizando as estruturas já existentes. Isso resulta em grande economia e é usado na comunicação entre SEs provendo um caminho para sinais de dados e proteção, nas centrais de controle e na transmissão de sinal de internet para alguns provedores [20,21].

2.2.2 Parâmetros

Uma LT apresenta quatro parâmetros elétricos que influenciam na capacidade de transporte de energia: resistência, indutância, capacitância e condutância [22]. No entanto, a condutância costuma ser desconsiderada nos estudos de sistemas de energia, pois representa uma fração muito pequena da admitância paralela [20].

2.2.2.1 Resistência

Conforme [1,20,22], a resistência dos condutores de uma LT é o principal fator responsável pela perda de potência ativa. A resistência em corrente alternada (CA) ou resistência efetiva de um condutor pode ser definida como:

$$R = \frac{Perdas}{|I|^2} \quad (2.1)$$

Onde:

- *Perdas* é a perda de potência ativa do condutor, em W;
- *I* é a corrente eficaz, em A;

2.2.2.2 Indutância

De acordo com [22], a indutância de uma LT é calculada como as ligações de fluxo por *ampère*. Se a permeabilidade magnética (μ) é constante, a corrente senoidal produz variações sinusoidais no fluxo, que estão em fase com a corrente. As ligações de fluxo resultantes são expressas como um fasor λ , em que:

$$L = \frac{\lambda}{I} \quad (2.2)$$

A indutância de uma LT depende diretamente da sua configuração física, que inclui o formato dos condutores, a distância entre eles, o meio envolvente (como o ar ou materiais isolantes em cabos) e o raio médio geométrico (RMG) dos condutores. O RMG é crucial para o cálculo da indutância externa, representando o efeito distribuído do campo magnético ao longo de uma seção do condutor [20].

Para obter um valor preciso da indutância total de uma LT, é necessário levar em conta tanto o fluxo magnético dentro de cada condutor quanto o fluxo externo, que se propaga ao redor do sistema de condutores [20,22].

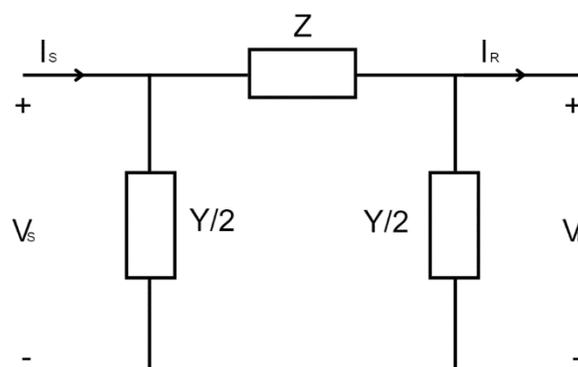
2.2.2.3 Capacitância

A capacitância em uma LT resulta da diferença de potencial entre os condutores e entre os condutores e o solo, fazendo com que eles se carreguem de forma semelhante às placas de um capacitor quando há uma diferença de potencial entre elas. Em vez de estarem isolados, cada condutor em uma LT está acoplado capacitivamente aos condutores adjacentes, aos cabos para-raios e ao solo. A capacitância entre os condutores é definida como a carga por unidade de diferença de potencial [20,22,25].

2.2.3 Modelos

Em condições normais de operação em estado estacionário, apesar de a resistência, a indutância e a capacitância serem distribuídas ao longo da LT, o circuito equivalente é simplificado em parâmetros concentrados. A LT é tratada como uma rede de dois terminais, para a qual são derivados os parâmetros ABCD e um circuito π equivalente, como apresentado na Figura 7. Isso possibilita o cálculo da tensão e da corrente em qualquer ponto ao longo da LT, considerando a impedância série e a admitância shunt distribuídas. A admitância shunt consiste em uma condutância e uma reatância capacitiva. Entretanto, a condutância shunt é, frequentemente, desconsiderada [20].

Figura 7 – Circuito π equivalente de uma LT.



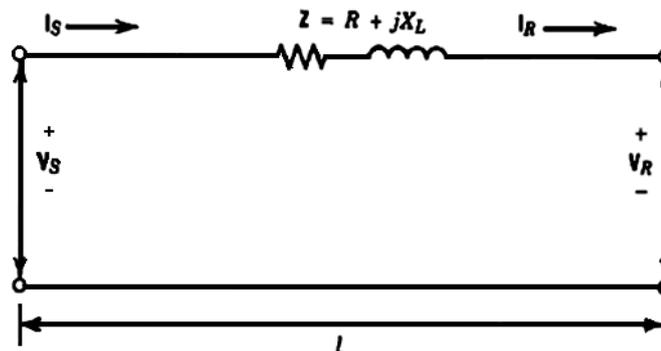
Fonte: adaptado de [20].

As equações que descrevem as grandezas elétricas consideram três parâmetros principais distribuídos: a resistência e a reatância, ambas em série, e a susceptância, em paralelo. A relevância dos parâmetros varia, contudo, conforme o nível de tensão e o comprimento da LT: linhas curtas, possuem até 80 km; linhas de comprimento médio, entre 80 e 240 km; e linhas longas, acima de 240 km [20,22].

2.2.3.1 Linha de Transmissão Curta

Em uma LT classificada como curta, a admitância paralela é tão pequena que pode ser desprezada, e é considerada apenas a resistência série R e a indutância série L para o comprimento total da linha. O diagrama e circuitos equivalentes deste tipo de LT, estão representados na Figura 8 [20,22].

Figura 8 – Diagrama e circuito equivalente de uma LT curta.



Fonte: [22].

Em que:

$$I_S = I_R \quad (2.3)$$

$$V_S = V_R + ZI_R \quad (2.4)$$

$$Z = R + j\omega L \quad (2.5)$$

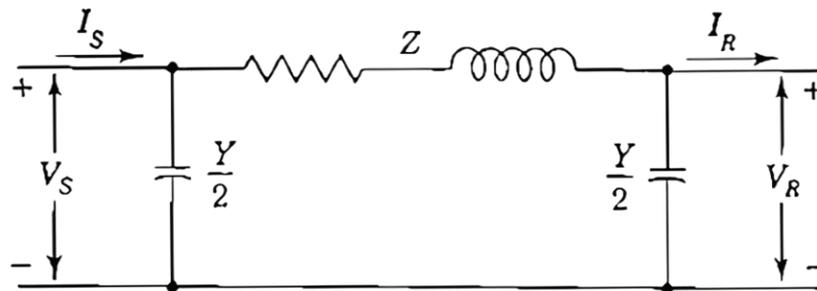
Na forma matricial,

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

2.2.3.2 Linha de Transmissão Média

Em uma LT classificada como média, a admitância paralela, geralmente modelada como um pura capacitância, é incluída nos cálculos e o circuito equivalente é apresentado na Figura 9 [22].

Figura 9 – Circuito π equivalente de uma LT média.



Fonte: [22].

De acordo com [25], V_S e I_S podem ser modelados como:

$$\begin{aligned} V_S &= AV_R + BI_R \\ I_S &= CV_R + DI_R \end{aligned} \quad (2.7)$$

Na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Onde os parâmetros A, B, C e D, são dados pelas expressões abaixo:

$$A = D = \left(1 + \frac{YZ}{2}\right) \quad (2.9)$$

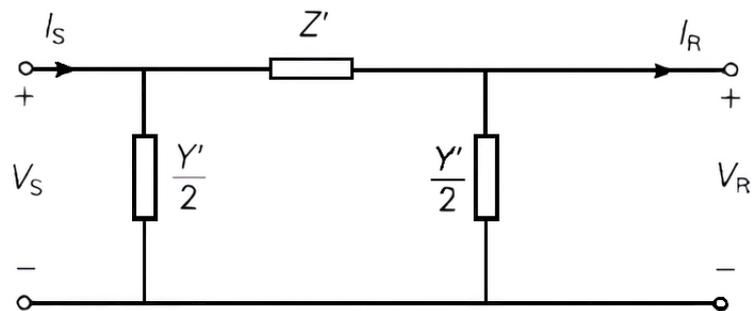
$$B = Z \quad (2.10)$$

$$C = Y \left(1 + \frac{YZ}{4}\right) \quad (2.11)$$

2.2.3.3 Linha de Transmissão Longa

Conforme [20,22], uma LT longa não pode ser representada exatamente pelo modelo π porque não representaria de forma adequada a distribuição uniforme dos parâmetros da linha. A discrepância entre o modelo e a realidade aumenta proporcionalmente ao comprimento da linha. No entanto, é possível encontrar um circuito π equivalente de uma LT longa por uma rede de parâmetros concentrados, como mostrado na Figura 10.

Figura 10 –Circuito equivalente π de uma LT longa.



Fonte: adaptado de [20].

Dessa forma, Z e Y , utilizados nos modelos π previamente apresentados, são substituídos por Z' e Y' , e:

$$Z' = Z_c \sinh(\gamma l) = \sqrt{\frac{Z}{y}} \sinh(l\sqrt{yz}) = Z \frac{\sinh(\gamma l)}{\gamma l} \quad (2.12)$$

$$\frac{Y'}{2} = \frac{\tanh(\gamma l/2)}{Z_c} = \frac{Y \tanh(\gamma l/2)}{2 (\gamma l/2)} \quad (2.13)$$

Na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Em que:

$$A = D = \cosh(\gamma l) \quad (2.15)$$

$$B = Z' \quad (2.16)$$

$$C = \frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma l) \quad (2.17)$$

2.3 Cabos Para-raios

Como mencionado na Seção 3.2.1.4, a utilização de cabos para-raios em torres de LT tem duas funcionalidades principais: proteger contra descargas atmosféricas e fornecer um caminho alternativo para a corrente de curto-circuito [1].

Como descrito em [5], existem dois tipos de cabos: os convencionais e os com fibras ópticas do tipo OPGW.

2.3.1 Cabos Para-Raios Convencionais

De acordo com [3], os cabos para-raios convencionais são:

- Cordoalha de Fios de Aço Zincada: existem dois tipos, diferenciados pela resistência mecânica: alta resistência (HS) e extra alta resistência (EHS). A maioria das LTs de alta tensão usa cordoalhas EHS de 7 fios com diâmetro de 3/8";
- Cabos CAA e CAA Extrafortes: para aplicações que exigem menor atenuação, utilizam-se cabos CAA extrafortes, conhecidos como CAA-EF. Eles têm uma menor proporção de alumínio em relação ao aço;
- Cabos Aço-Alumínio (*Alumosteel* ou *Alumoweld*): combinam fios de aço revestidos com uma camada espessa de alumínio aproveitando as vantagens de ambos os metais, como mostra a Figura 11.

Figura 11 – Cabo Aço-Alumínio.



Fonte: retirado de [26].

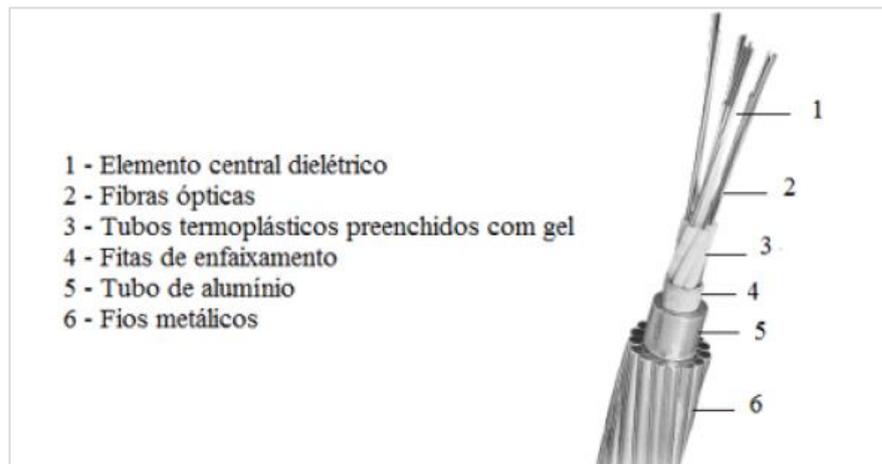
Dependendo da aplicação, esses cabos oferecem baixo peso específico, alta resistência mecânica e à corrosão, além de excelente condutividade elétrica. São ideais para ambientes agressivos ao aço galvanizado.

2.3.2 Cabos Para-Raios OPGW

O OPGW é o tipo de cabo para-raios usado em LT de alta tensão ou extra alta tensão. Esses cabos combinam a função de proteção com a capacidade de transmitir informações a longas distâncias, evitando que as empresas de telecomunicações precisem investir na construção de novas redes físicas [4].

As fibras ópticas dentro do OPGW são revestidas com acrilato e colocadas em tubos preenchidos com gel. Estes tubos são agrupados em torno de um elemento central dielétrico, protegido por fitas, um tubo de alumínio e camadas de fios metálicos. Esses fios podem ser de aço revestido de alumínio, liga de alumínio ou aço galvanizado [4]. A Figura 12 ilustra a estrutura do OPGW.

Figura 12 – Cabo para-raios OPGW.



Fonte: [4].

2.3.3 Dimensionamento de Cabos Para-Raios

Quando ocorre uma falta monofásica, parte da corrente flui pelos cabos para-raios devido ao acoplamento indutivo com a fase que sofreu o surto. Como o valor da corrente de curto-circuito varia ao longo da LT, sendo mais elevado nas proximidades das subestações terminais, diferentes tipos de cabos podem ser empregados. Assim, cabos de maior seção transversal são instalados nas proximidades das SEs, enquanto cabos de menor seção transversal são utilizados nas regiões intermediárias da LT, tornando o projeto mais econômico [5].

Nessa perspectiva, os cabos para-raios devem ser dimensionados de forma a suportar, sem sofrer danos, o valor máximo de corrente em casos de curto-circuito monofásico franco em qualquer ponto da LT. Esse dimensionamento deve garantir que a temperatura máxima admissível não seja ultrapassada durante o tempo em que a proteção de retaguarda estiver atuando, conforme os materiais do cabo ou cordoalha. A temperatura limite de referência do cabo OPWG conforme a norma ABNT NBR 17140 é 180°C [5], contudo outros limites térmicos podem ser empregados de acordo com especificação do fabricante.

De acordo com [5], a corrente máxima dos condutores, medida em ampères, é determinada pela fórmula de Onderdonk, apresentada na Equação 3.18, amplamente aplicada em cabos de aterramento. Esta fórmula considera o aquecimento do

condutor resultante das perdas ativas RI^2 e a dissipação de calor para o meio ambiente [27].

$$I = A \sqrt{\left(\frac{TCAP * 10^{-4}}{t_c * \alpha_r * \rho_r}\right) \ln\left(\frac{k_0 + T_m}{k_0 + T_a}\right)}$$

Onde:

- T_m é a temperatura máxima admissível, expressa em graus Celsius;
- T_a é a temperatura do condutor, expressa em graus Celsius;
- α_r é o coeficiente térmico de resistividade na temperatura de referência T_r ; (2.18)
- ρ_r é a resistividade do condutor de aterramento na temperatura de referência em T_r , expressa em micro ohms centímetro;
- k_0 é o coeficiente térmico de resistividade do condutor a 0 °C;
- t_c é o tempo do fluxo da corrente, expresso em segundos;
- TCAP é o fator de capacidade térmica, expresso em Joules por centímetro cúbico graus Celsius ($J/cm^3 \cdot ^\circ C$).

A fórmula pode ser simplificada como:

$$A = I * K_f \sqrt{t_c} \quad (2.19)$$

Em que:

- A é a área do condutor, em kcmil;
- I é a corrente de falta, em kA;
- t_c é a duração da corrente, em segundos;
- K_f é uma constante para materiais considerando a temperatura ambiente (T_a) como 40 °C.

A Tabela 2, apresenta os valores das constantes K_f para diferentes materiais condutores, baseados em suas respectivas condutividades [28]:

Tabela 2 – Constate de materiais condutores.

Material e Condutividade (%IACS)	K_f
Cobre (97%)	0,0289
1350-H19 (61,2)	0,0126
6201 (52,5%)	0,0107
Aço (8%)	0,00327
1350-0 (63%)	0,0130

Fonte: adaptado de [28].

Os resultados obtidos para a corrente máxima dos cabos utilizando a fórmula simplificada de Onderdonk se aproximam significativamente dos valores especificados pela norma NBR 8449, que precedeu a norma atual, a NBR 17140. Um exemplo disso é mostrado na Tabela 3, para o caso do cabo Dotterel.

Tabela 3 – Comparação dos valores de corrente máxima.

t_c	K_f	A	I Calculado	I NBR 8449
1	0,0126	176,9	14,040	13,5
0,5	0,0126	176,9	19,855	19
0,4	0,0126	176,9	22,199	21,5
0,2	0,0126	176,9	31,394	31

Fonte: o autor (2024).

Para os cabos do tipo OPGW, os fabricantes disponibilizam em seus catálogos uma constante de capacidade de corrente de curto-circuito dos cabos em kA^2s . Tal contante deverá ser levada em consideração para definição da máxima corrente admissível para um dado tempo de eliminação da falta, levando em consideração possíveis falhas na proteção e tempos de retaguarda.

2.4 Sistema de Aterramento

Para que o SEP funcione corretamente, assegurando a continuidade do serviço, a segurança do sistema de proteção e, principalmente, a segurança pessoal, é crucial garantir um aterramento adequado [29].

Durante curtos-circuitos, os sistemas enfrentam correntes elevadas e tensões que podem se desviar da nominal. A intensidade dessas correntes e tensões depende do tipo de aterramento adotado, afetando as condições de curto-circuito, as especificações e os custos dos equipamentos, e os requisitos de proteção do sistema [15]. Conforme [29], os principais objetivos do aterramento são:

- Reduzir a resistência de aterramento para correntes de falha à terra;
- Manter os potenciais gerados por correntes de falha dentro de limites seguros para evitar fibrilação cardíaca;
- Assegurar que os equipamentos de proteção sejam mais sensíveis e isolem rapidamente as falhas à terra;
- Oferecer um caminho seguro para a condução de descargas atmosféricas para a terra;
- Utilizar a terra como caminho de retorno de corrente no sistema;
- Remover as cargas estáticas acumuladas nas carcaças dos equipamentos.

Os métodos de aterramento variam desde o uso de uma simples haste até a instalação de placas de diferentes formatos e tamanhos, além de configurações mais complexas com cabos enterrados no solo [29].

Conforme detalhado em [15], os tipos de aterramento incluem sólido, aterrado por impedância ou resistência e isolado. Os sistemas solidamente aterrados têm correntes de curto-circuito mais altas, tensões mais baixas e oferecem melhor proteção. Em contrapartida, sistemas isolados têm correntes mais baixas, tensões mais altas e enfrentam maiores desafios de proteção. Por fim, os sistemas aterrados por impedância ou resistência apresentam características intermediárias.

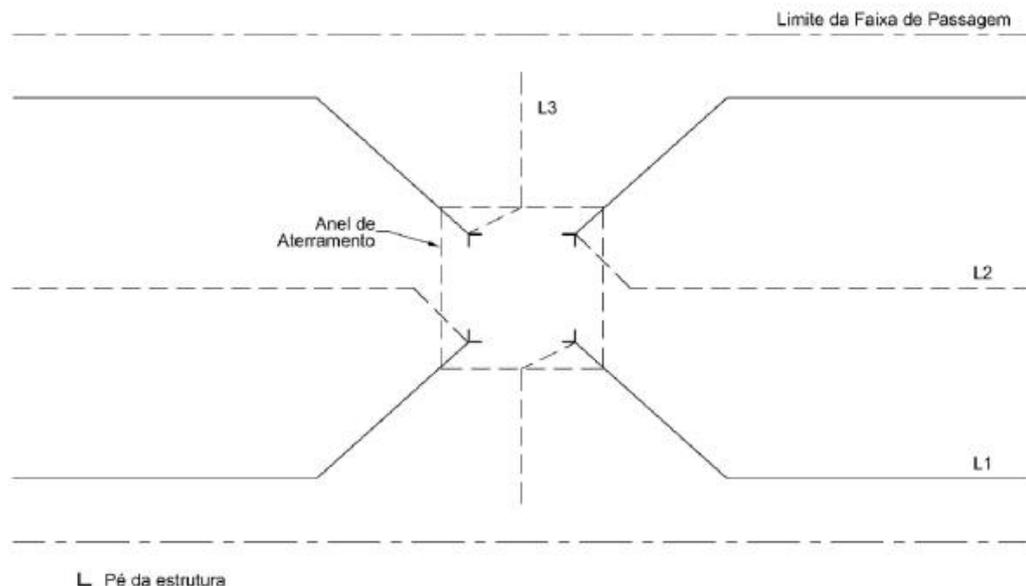
Nesse contexto, dependendo do tipo de aterramento, sobretensões na frequência fundamental podem ocorrer durante um curto-circuito e persistir nos equipamentos até que a falha seja resolvida, o que pode causar danos significativos [15].

2.4.1 Aterramento de Linhas de Transmissão

O sistema de aterramento das LTs é fundamental para garantir a segurança e a eficiência do sistema. Ele desempenha funções importantes, como a condução das correntes de descargas atmosféricas e de faltas para a terra, além de proteger contra as tensões de toque na base da estrutura e as tensões de passo ao redor dela e nos contrapesos, quando aplicáveis [5].

Esse sistema é constituído por eletrodos de aterramento, que podem ser interligados por cabos para-raios. A configuração típica dos eletrodos de aterramento em estruturas de LTs envolve o uso de cabos contrapeso dispostos radialmente, geralmente feitos de aço zincado, cobre ou aço cobreado [5]. Na configuração convencional, ilustrada na Figura 13, a estrutura básica é composta por contrapesos designados como L1, enquanto L2 e L3 funcionam como contrapesos complementares que podem ser adicionados conforme necessário [5].

Figura 13 – Elementos do aterramento de uma torre autoportante.



Fonte: retirado de [5].

A topologia linear das LTs, que pode se estender por quilômetros, influencia diretamente o circuito equivalente do sistema de aterramento, que é representado

pelas resistências de aterramento das estruturas interligadas, bem como pelas impedâncias dos cabos para-raios [5]. As empresas responsáveis pela transmissão de energia no Brasil estabelecem, como padrão de projeto, que a resistência de aterramento das torres deve permanecer abaixo de 30Ω [30].

2.4.2 Aterramento de Subestações

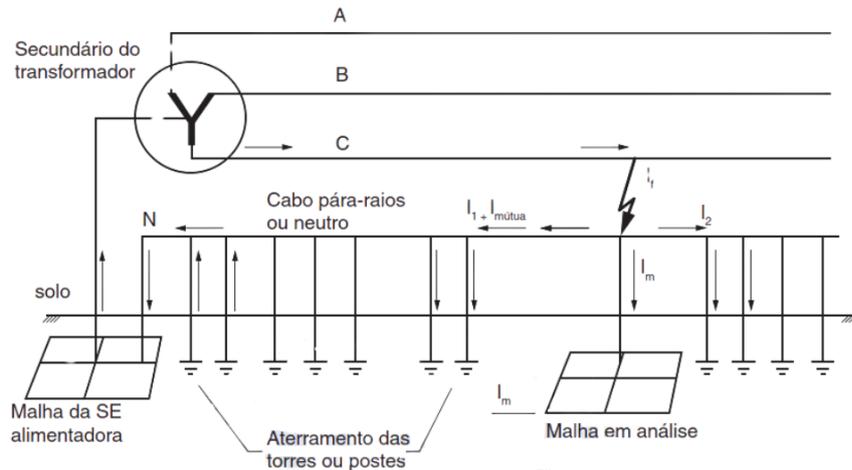
O projeto de aterramento de uma SE busca garantir a segurança de pessoas e equipamentos, controlando potenciais de passo e toque e assegurando a eficiente atuação dos dispositivos de proteção. Para tanto, o dimensionamento da malha de aterramento deve levar em conta a resistividade do solo, as correntes de curto-circuito e os tempos de atuação da proteção [31].

A etapa inicial do dimensionamento consiste em definir a geometria básica da malha, que deve abranger toda a área da SE, incluindo, no mínimo, o pátio onde estão localizados os equipamentos. Em seguida, é necessário planejar a configuração dos eletrodos, a partir da disposição desses equipamentos e as edificações dentro da SE, além do modelo de solo, que deve ser previamente determinado [31].

A malha de aterramento é representada por uma resistência de aterramento e, de acordo com [4], em sistemas de altas tensões, são obtidos valores de resistência de aterramento inferiores a 5Ω , enquanto em redes de distribuição de energia elétrica, com tensões entre 13,8 kV e 34,5 kV, esses valores podem variar entre 40 e 400Ω .

Durante a ocorrência de uma falta de curta duração para a terra, a corrente de defeito (I_f) é, inicialmente, injetada na malha de aterramento, distribuindo-se por todo o sistema interligado, em que cada componente escoar uma parcela. A corrente de malha (I_m) corresponde à fração que se dissipa no solo através da malha de aterramento, como mostra a Figura 14. Além disso, também é necessário considerar a corrente de malha de longa duração, que pode retornar ao sistema pela malha. Essa corrente pode ser gerada por sistemas monofásicos com retorno por terra ou por outras configurações, como redes de distribuição com transformadores monofásicos ligados entre fase e neutro ou transformadores trifásicos com primário em estrela aterrada [31].

Figura 14 – Sistema de potência típico em condição de falta para a terra.



Fonte: retirado de [31].

Dependendo da configuração dos sistemas de aterramento, o trecho do cabo para-raios mais próximo às SEs tende a ser o mais exigido durante a condução das correntes de falha. Nesse segmento, essa corrente pode ser a maior em comparação com outros trechos do circuito.

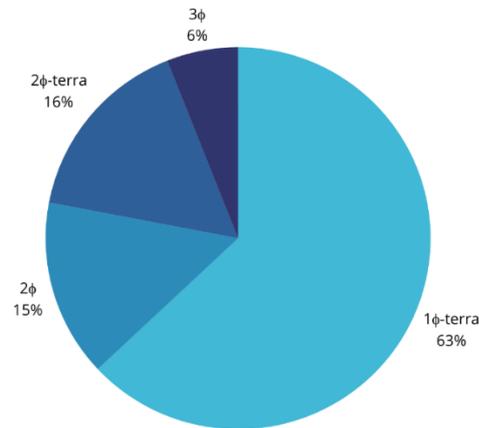
2.5 Falhas no SEP

Os sistemas de potência estão sempre sujeitos a eventos que podem afetar seu funcionamento, causando alterações nas grandezas elétricas [32]. Entre os componentes do sistema, as LTs são especialmente vulneráveis a falhas, pois se estendem por todo o país, atravessando regiões com variados tipos de terrenos e condições climáticas [33]. Entre esses eventos, os curtos-circuitos são os mais frequentes e os mais graves, ocorrendo quando há uma falha no isolamento entre as fases ou entre fase e terra.

De acordo com [33], os curtos-circuitos podem ser causados por diversos fatores, como sobretensão na rede, que pode gerar um arco elétrico (*flashover*), além da contaminação do isolador por poeira, poluição, umidade, chuva, salinidade, galhos de árvores, pássaros, vento e neve. Os tipos mais comuns de curtos-circuitos são os monofásicos, enquanto os trifásicos são menos frequentes devido às suas

características específicas [22,32,33]. A Figura 15 apresenta as porcentagens médias de ocorrência para cada tipo de curto-circuito.

Figura 15 – Ocorrência dos curtos-circuitos.



Fonte: adaptado de [33].

Segundo [22], o teorema de Fortescue é uma ferramenta essencial na análise de sistemas elétricos trifásicos, especialmente em condições de desequilíbrio. Ele permite decompor um sistema trifásico desbalanceado em três sistemas balanceados mais simples:

- Componentes de sequência positiva: três fasores com a mesma magnitude, deslocados em fase por 120° e com a mesma sequência de fase dos fasores originais. Esta componente representa o estado normal de operação do sistema.
- Componentes de sequência negativa: três fasores com a mesma magnitude, também deslocados em fase por 120° , mas com a sequência de fase oposta à dos fasores originais. Este componente pode indicar a presença de falhas ou desequilíbrios no sistema.
- Componentes de sequência zero: três fasores com a mesma magnitude com deslocamento de 360 graus entre si, comumente associados a correntes de retorno através da terra ou de neutros.

Esses componentes podem ser representados pelas seguintes equações matriciais:

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_a \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Em que:

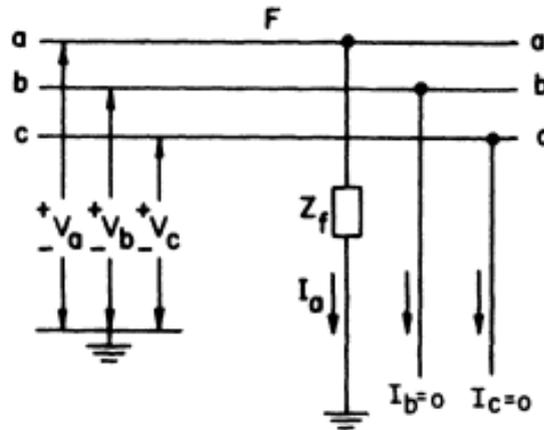
- E_a é a tensão equivalente de Thevenin;
- V_{a0} , I_{a0} e Z_0 são, respectivamente, a tensão, corrente e impedância de sequência zero;
- V_{a1} , I_{a1} e Z_1 são, respectivamente, a tensão, corrente e impedância de sequência positiva;
- V_{a2} , I_{a2} e Z_2 são, respectivamente, a tensão, corrente e impedância de sequência negativa.

Os defeitos mencionados, exceto os trifásicos, causam desequilíbrio entre as fases e são classificados como defeitos desequilibrados, exigindo o uso dos diagramas de sequência positiva, negativa e zero. No caso dos defeitos trifásicos, é necessário considerar apenas o circuito de sequência positiva [20]. Para o desenvolvimento deste trabalho, os cabos para-raios foram dimensionados considerando apenas situações de curto-circuito monofásico terra.

2.5.1 Curto-Circuito 1 ϕ -terra

Conforme abordado em [22], um curto-circuito monofásico-terra ocorre quando um condutor entra em contato direto com o solo ou com uma estrutura que esteja conectada à terra. A Figura 16 mostra a representação geral desse tipo de curto-circuito.

Figura 16 – Curto-circuito monofásico-terra.



Fonte: [4].

Neste cenário, observam-se as seguintes condições:

$$I_b = I_c = 0 \quad (2.21)$$

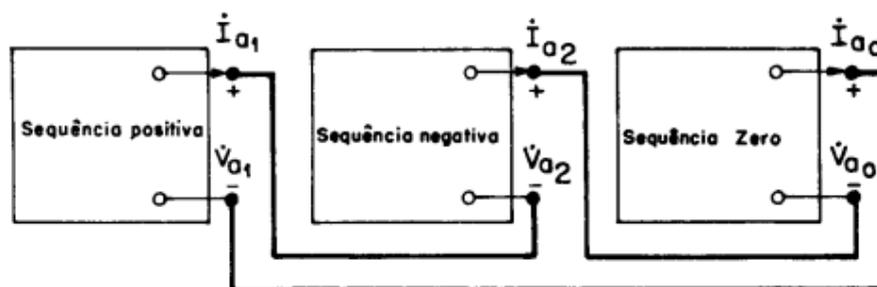
$$V_a = Z_f I_a \quad (2.22)$$

As correntes de seqüência da fase a são dada por:

$$I_{a0} = I_{a1} = I_{a2} = \frac{E_a}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3Z_f} \quad (2.23)$$

Neste caso, os circuitos equivalentes de Thevenin das seqüências devem ser conectados em série, conforme representado na Figura 17 abaixo:

Figura 17 – Conexões do curto-circuito monofásico-terra.



Fonte: retirado de [33].

2.6 ATP

O *Alternative Transients Program* (ATP) é um programa computacional gratuito amplamente utilizado para simular fenômenos transitórios eletromagnéticos e eletromecânicos, permitindo a modelagem de redes elétricas complexas e sistemas de controle com suas capacidades avançadas e recursos adicionais. O programa utiliza um arquivo de dados em formato texto, que deve incluir parâmetros como tempo total e passo de integração, além das características do sistema elétrico analisado. Assim, ele é processado para gerar um arquivo que contém todos os resultados do estudo [34].

A vantagem da escrita direta do cartão ATP é que o modelo é construído a partir de um arquivo de texto simples, que pode ser facilmente criado e editado com qualquer editor. No entanto, a criação deste arquivo exige o cumprimento de uma série de regras específicas, pois a execução do programa segue uma estrutura rígida onde a posição dos termos define parâmetros essenciais. O não cumprimento dessas regras pode resultar em erros de processamento [32].

Neste trabalho, o ATP é utilizado para modelar detalhadamente a LT em análise e simular o curto-circuito monofásico à estrutura, obtendo-se todas as parcelas de corrente passante pelos cabos para-raios e pelos sistemas de aterramento das torres e das SEs terminais.

2.6.1 *Line Constants*

É uma rotina auxiliar do ATP e realiza o cálculo dos parâmetros das LTs. Para isso são necessárias algumas informações específicas dos condutores, além de alguns dados como:

- Distância horizontal entre o centro da torre e o centro do condutor, em metros.
- Altura do centro do condutor a partir do solo, em metros.
- Altura do condutor no meio do vão a partir do solo, em metros.
- Parâmetros elétricos dos cabos condutores e para-raios.
- Resistividade média do solo.
- Comprimento do vão típico.

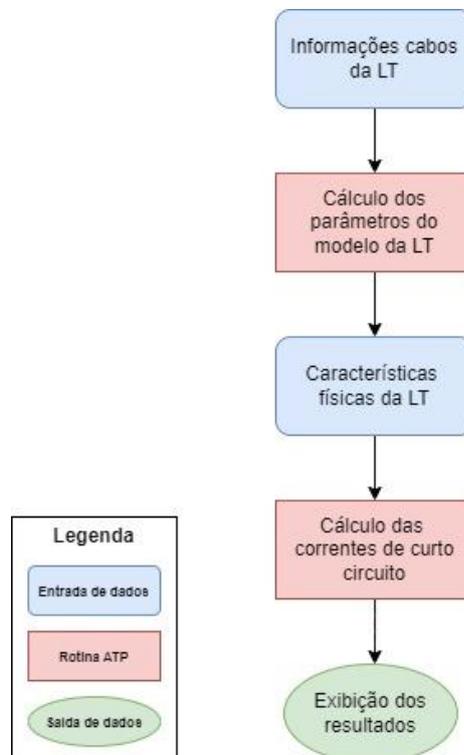
- Temperaturas de projeto dos cabos condutores e para-raios para a condição de longo duração.
- Comprimento da LT.

3 METODOLOGIA

Para a análise das correntes de curto-circuito, conforme descrito na referência [5], desenvolve-se um *script* em MATLAB. O programa inicialmente utiliza a rotina auxiliar *Line Constants* no ATP para calcular os parâmetros da LT a partir dos dados dos cabos condutores e para-raios inseridos pelo usuário. Após isso, solicita informações sobre as características físicas da linha, como a quantidade de vãos e os valores das resistências de aterramento.

Com os parâmetros e as características da linha definidos, o *script* no MATLAB executa um programa no ATP que simula um curto-circuito monofásico-terra em cada torre, determinando a contribuição das correntes de falta nos cabos para-raios e nos aterramentos das torres. Por fim, os dados de corrente obtidos são armazenados em um arquivo .csv e, em seguida, gera-se um gráfico das correntes em função de cada torre. A Figura 18 apresenta um fluxograma lógico do código.

Figura 18 – Fluxograma lógico do código.



Fonte: o autor (2024).

3.1 Informações dos cabos da LT

Conforme mencionado na Seção 3.3, nas proximidades das subestações em uma LT, a corrente de falta induzida no cabo para-raio é maior, exigindo o uso de condutores que suportem essa corrente. No entanto, como condutores de maior seção transversal são mais caros, uma prática comum para reduzir custos é utilizar bitolas menores no centro das linhas, em que as correntes são mais baixas, e optar por bitolas maiores à medida que se aproxima das subestações. Dessa forma, é possível reduzir o custo de implementação do sistema sem comprometer a segurança.

Neste trabalho, considera-se que a torre de transmissão possui dois cabos para-raios, denominados R e S, ambos do mesmo tipo. No entanto, pode haver mais de um tipo de cabo para-raios utilizado na linha. Com base nas informações mencionadas anteriormente, inicialmente o projetista informa ao programa em MATLAB a quantidade de cabos para-raios que são utilizados na LT. Posteriormente, é selecionado entre realizar os cálculos dos parâmetros da linha ou carregar um arquivo já com todos os dados descritos em formato específico para leitura pelas rotinas de MATLAB desenvolvidas neste trabalho.

Caso o projetista opte por realizar os cálculos, ele precisa fornecer informações sobre os cabos de fase e para-raios utilizados para preenchimento da rotina *Line Constants*. Isso inclui a inserção de dados como a resistência AC em ohm/km, o raio médio geométrico (RMG) em cm, a altura dos cabos até o centro da linha e as distâncias entre os cabos em relação ao centro da torre da LT, além do comprimento do vão. Se forem utilizados dois tipos de cabos para-raios, essas informações devem ser fornecidas para ambos.

Nesse contexto, o programa desenvolvido neste trabalho oferece quatro opções padrão de cabos de fase e quatro de cabos para-raios amplamente utilizados em LT. Os dados dessas opções já estão configurados e foram retirados de catálogos técnicos dos fabricantes e de estudos específicos, como no caso do EHS 3/8" [35,36,37], como mostrado na Tabela 4. Portanto, ao selecionar uma das opções, não é necessário inserir manualmente as informações de resistência, RMG e diâmetro dos cabos.

Tabela 4 – Parâmetros dos cabos fase e para-raios.

Tipo de Cabo	Nome do Cabo	Dados		
		Resistência AC (ohm/km)	RMG (cm)	Diâmetro (cm)
Fase	Grosbeak	0,099	1,021	2,515
Fase	Rail	0,073	1,174	2,961
Fase	Hawk	0,144	0,884	2,180
Fase	Bluejay	0,063	1,269	3,198
Para-raio	EHS 3/8"	3,281	0,895	0,914
Para-raio	Dotterel	0,497	0,600	1,540
Para-raio	Butte	0,255	0,617	1,630
Para-raio	OPGW	0,438	0,259	1,640

Fonte: o autor (2024).

A Figura 19 apresenta um exemplo da interação via a *Command Window* do MATLAB utilizada para essa configuração.

Figura 19 – *Command Window* do MATLAB com informações dos cabos da LT.

```

Escolha uma das opções abaixo:
1. A LT terá apenas UM tipo de cabo PARA-RAIO
2. A LT terá DOIS tipos de cabos PARA-RAIOS
Digite o número da sua escolha (1 ou 2): 2
Deseja criar ou carregar um novo arquivo de dados? (1 - Criar | 2 - Carregar)
Digite o número da sua escolha (1 ou 2): 1
Escolha o tipo de cabo FASE:
1 - Grosbeak
2 - Rail
3 - Hawk
4 - Bluejay
5 - Outro
Digite o número do tipo de cabo (1, 2, 3, 4, ou 5): 1
Distância Horizontal do cabo ao centro da torre(m): 8
Altura do Cabo na estrutura em relação ao solo(m): 19.18
Altura do cabo em relação ao solo no meio do vão (m): 8.27
Escolha o tipo de cabo PARA-RAIO 1:
1 - EHS 3/8'
2 - Dotterel
3 - Butte
4 - OPGW
5 - Outro
Digite o número do tipo de cabo (1, 2, 3, 4, ou 5): 2
Escolha o tipo de cabo PARA-RAIO 2:
1 - EHS 3/8'
2 - Dotterel
3 - Butte
4 - OPGW
5 - Outro
Digite o número do tipo de cabo (1, 2, 3, 4, ou 5): 1
Distância Horizontal do cabo ao centro da torre(m): 4
Altura do Cabo na estrutura em relação ao solo(m): 24.46
Altura do cabo em relação ao solo no meio do vão(m): 15.6
Tamanho do vão(km): 0.5
Arquivo dados1.atp criado com sucesso.
Arquivo dados2.atp criado com sucesso.

```

Fonte: o autor (2024).

3.2 Cálculo dos parâmetros da LT

Para o cálculo dos parâmetros, as informações fornecidas são inseridas na rotina *Line Constants*. Se a opção escolhida for carregar um arquivo, o usuário deve fornecer um arquivo com a rotina, que precisa ser colocado na mesma pasta em que está o *script* MATLAB. Assim, a rotina gera o arquivo .pch ao ser executada, como mostra a Figura 20. Caso a linha utilize dois tipos de cabos para-raios, são criados dois arquivos diferentes, um para cada tipo de cabo.

Figura 20 – Exemplo de arquivo .pch criado ao fim da rotina *Line Constants*.

```

C LINE CONSTANTS
C $ERASE
C METRIC
C 1 0 0.0996 2 1.0210 2.5160 -8.00 19.1800 8.2700
C 2 0 0.0996 2 1.0210 2.5160 0.00 19.1800 8.2700
C 3 0 0.0996 2 1.0210 2.5160 8.00 19.1800 8.2700
C 4 0 3.2810 2 0.8950 0.9140 -4.00 24.4600 15.6000
C 5 0 3.2810 2 0.8950 0.9140 4.00 24.4600 15.6000
C BLANK CARD ENDING CONDUCTOR CARDS
C 1000 60 1 1 0.5000 1 44
$VINTAGE, 1
$UNITS, 60., 60.
1NonameNoname 7.91245271E-02 4.70837283E-01 1.46265381E+00
2NonameNoname 2.93239585E-02 2.19616452E-01 -1.64601114E-01
7.91245271E-02 4.70837283E-01 1.50127980E+00
3NonameNoname 2.93222670E-02 1.93485698E-01 -5.16630905E-02
2.93239585E-02 2.19616452E-01 -1.64601114E-01
7.91245271E-02 4.70837283E-01 1.46265381E+00
4NonameNoname 2.92469981E-02 2.20857675E-01 -1.90721259E-01
2.92469981E-02 2.20857675E-01 -1.69039922E-01
2.92459315E-02 1.99367861E-01 -7.99251958E-02
2.77670476E-01 4.91058530E-01 1.33743989E+00
5NonameNoname 2.92459315E-02 1.99367861E-01 -7.99251958E-02
2.92469981E-02 2.20857675E-01 -1.69039922E-01
2.92469981E-02 2.20857675E-01 -1.90721259E-01
2.91699695E-02 2.19777649E-01 -1.85626879E-01
2.77670476E-01 4.91058530E-01 1.33743989E+00
$VINTAGE, -1,
$UNITS, -1., -1., { Restore values that existed b4 preceding $UNITS

```

Fonte: o autor (2024).

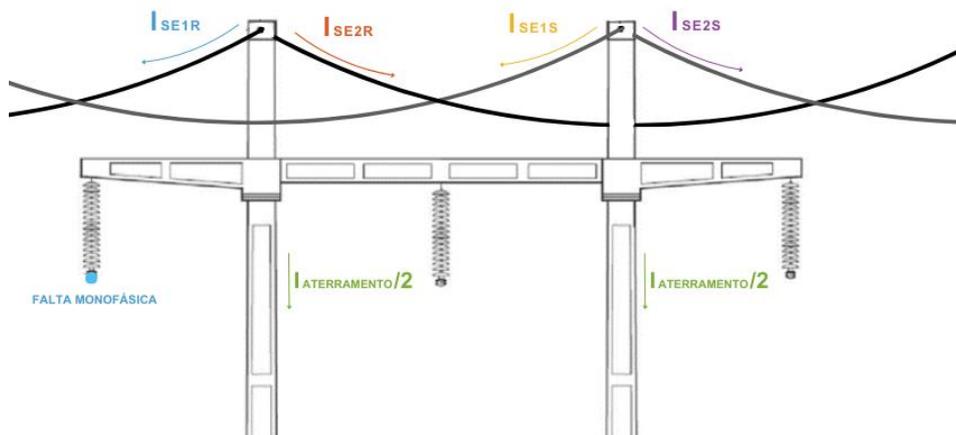
3.3 Características Físicas da LT

Nesta etapa, é solicitado o valor da resistência de aterramento das torres, as resistências de aterramento das subestações a montante e a jusante da linha, além dos dados dos equivalentes de curto-circuito nessas subestações, e o número de vãos da linha, como apresentado na Figura 21. No caso de existirem dois tipos de para-raios, é necessário especificar até qual vão cada um será aplicado.

3.5 Exibição dos resultados

O *script* no MATLAB executa o programa no ATP, simulando o curto-circuito em uma torre por vez e criando um arquivo .lis. A corrente de curto se distribui para o aterramento, para o cabo para-raios R em direção à SE 1, para o cabo para-raios R em direção à SE 2, para o cabo para-raios S em direção à SE 1, e para o cabo para-raios S em direção à SE 2, conforme ilustrado na Figura 23.

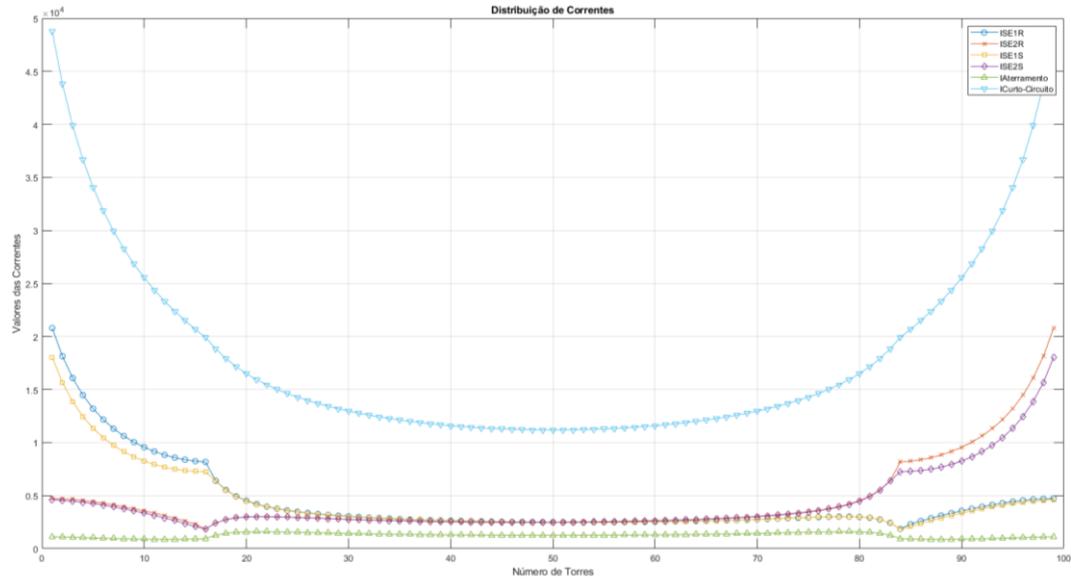
Figura 23 – Distribuição das correntes durante o curto.



Fonte: o autor (2024).

Esses valores são extraídos dos arquivos .lis e integrados a um arquivo no formato .csv. A partir dessas informações, o MATLAB gera um gráfico que mostra a contribuição das correntes, em que a corrente de curto-circuito é a soma de todas as outras correntes, como apresentado na Figura 24.

Figura 24 – Exemplo de gráfico criado pelo programa.



Fonte: o autor (2024).

Com base nos resultados obtidos, o projetista analisa os valores de corrente máxima suportadas pelos cabos e os compara com a corrente máxima dos cabos para-raios em função do tempo de eliminação de falta (Tabela 5), que nesse projeto será 0,5 segundos. Se o cabo simulado não fizer parte do conjunto pré-definido, a corrente máxima suportada é calculada utilizando a fórmula de Onderdonk, conforme mencionado na Seção 2.3.3.

Tabela 5 – Corrente máxima suportada pelos cabos para-raios.

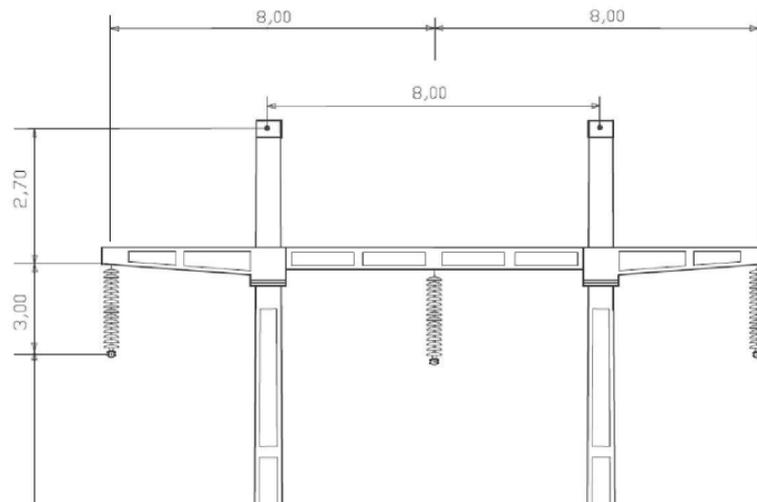
Nome do Cabo	Corrente Máxima Suportada (kA)
EHS 3/8"	5,5
Dotterel	19
Butte	29,4
OPGW	15,9

Fonte: o autor (2024).

4 APLICAÇÃO

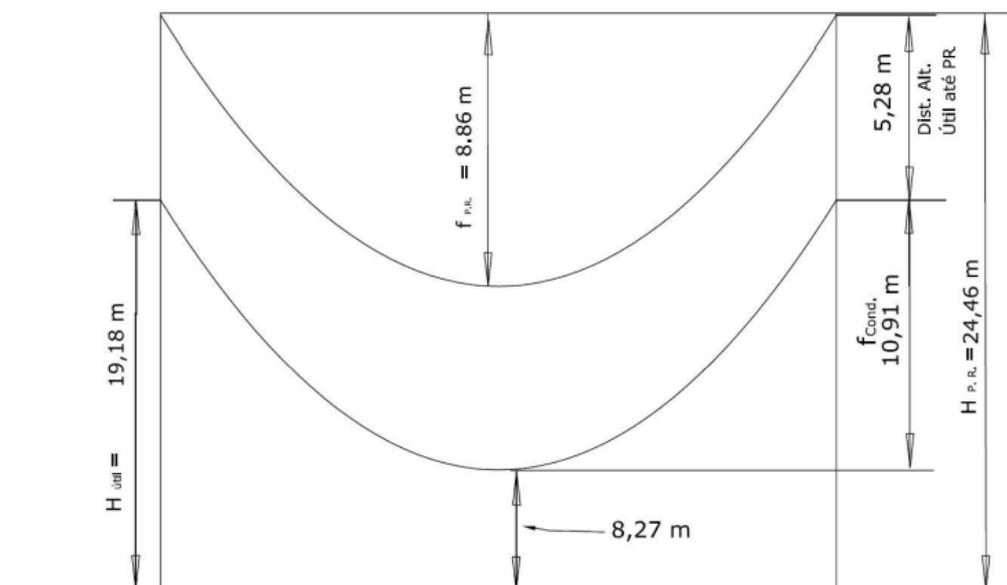
Neste trabalho, simulam-se três linhas de transmissão de energia elétrica, classificadas como curta, média e longa. As alturas das torres dessas linhas estão representadas na Figura 25 e Figura 26.

Figura 25 – Geometria do topo da estrutura com espaçamentos entre cabos condutores e para-raios.



Fonte: material didático disponibilizado na disciplina Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência (E493), DEE/UFPE.

Figura 26 – Distâncias ao solo na estrutura e no meio do vão.



Fonte: material didático disponibilizado na disciplina Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência (E493), DEE/UFPE.

Para cada linha, são consideradas as seguintes condições de operação:

- Cabo condutor: Grosbeak (1 por fase);
- Vão básico: 500 m;
- Tempo de atuação da proteção: 500 ms;
- Resistência média de aterramento das torres: 20 Ω ;
- Resistência da malha de aterramento das subestações: 0,5 Ω ;
- Níveis monofásicos de curto-circuito: 50 kA.

As simulações contemplam dois cenários principais: no primeiro, analisa-se a utilização de um único tipo de cabo para-raios, sendo considerados os cabos OPGW e Dotterel. No segundo cenário, são testados dois tipos de cabos para-raios simultaneamente, utilizando-se os cabos EHS 3/8" e Dotterel. Como o cabo Dotterel possui uma bitola maior que a do cabo EHS 3/8", ele é empregado nas proximidades das subestações, onde se exige maior capacidade de condução de corrente.

Nos casos em que dois tipos de cabos para-raios são utilizados, ajusta-se o ponto de transição entre eles de forma iterativa, até que os valores de corrente passante estejam dentro dos limites adequados para cada cabo. Inicialmente, foi considerado que o cabo para-raio de maior bitola vai até 10% da linha.

4.1 Linha curta

Para o modelo de linha curta, consideram-se os seguintes dados:

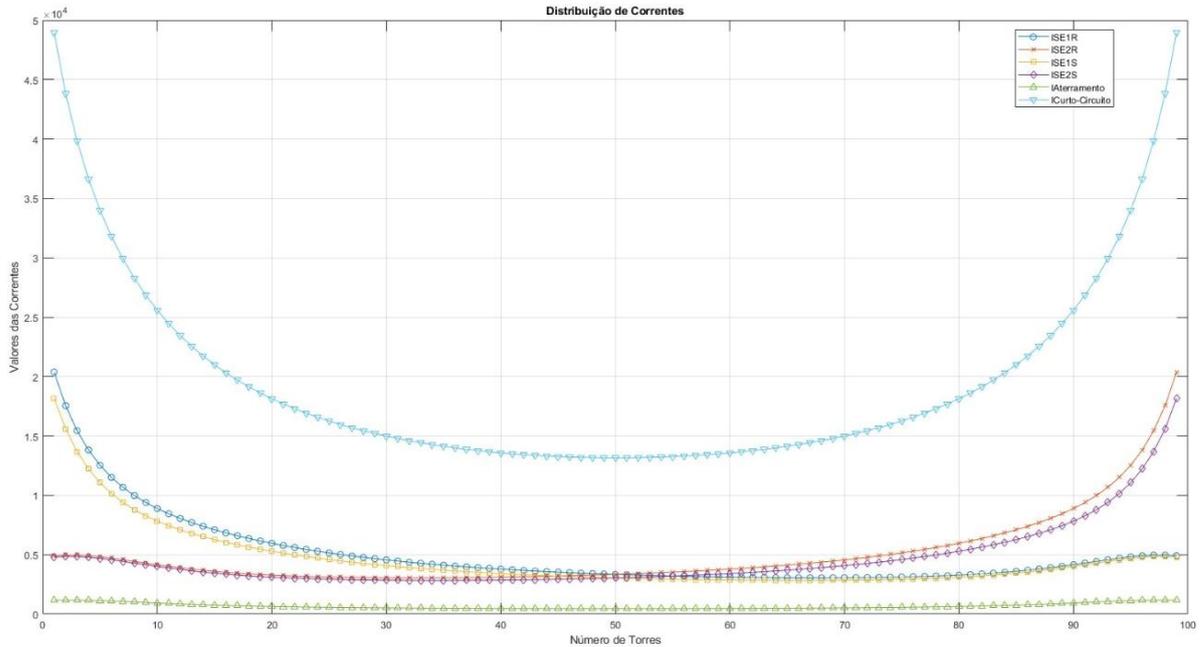
- Número de vãos: 100;
- Comprimento da linha: 50 km.

4.1.1 Cenário 1

Inicialmente, a linha foi simulada considerando o uso do para-raios OPGW. Os gráficos resultantes, juntamente com os valores das correntes nos para-raios, estão apresentados na Figura 27 e na Tabela 6, respectivamente. Vale destacar que as

correntes destacadas em vermelho na tabela estão acima do que o cabo suporta, o que se verifica em todas as simulações realizadas ao longo deste trabalho.

Figura 27 – Distribuição de corrente para linha curta utilizando cabo OPGW.



Fonte: o autor (2024).

Tabela 6 – Distribuição de corrente para linha curta utilizando cabo OPGW.

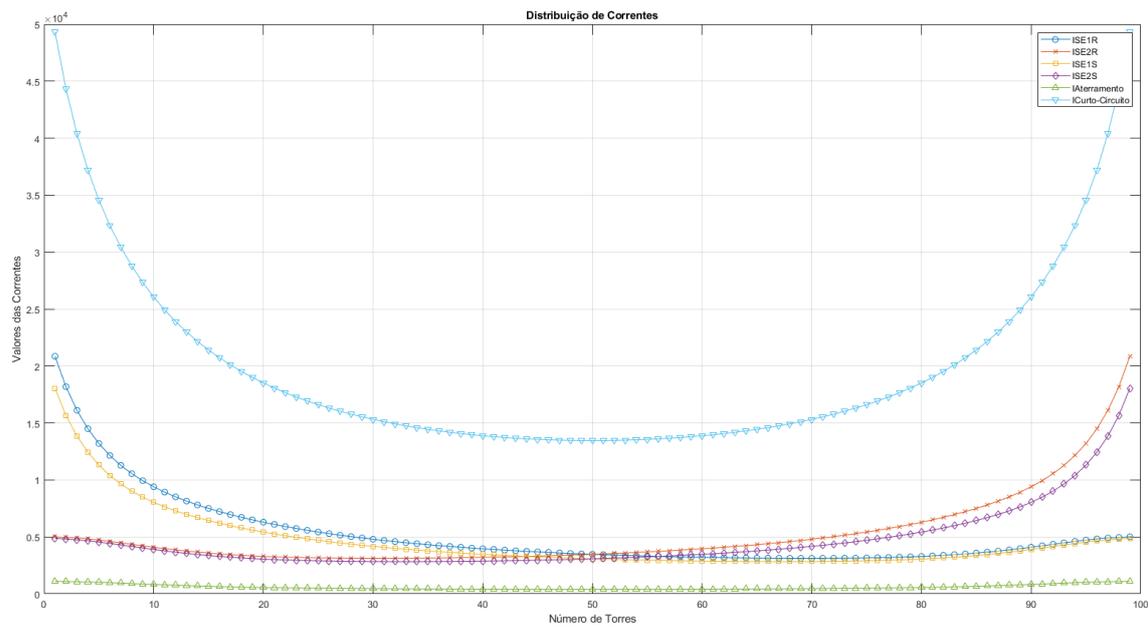
Comprimento (km)	Ise1r (A)	Ise2r (A)	Ise1s (A)	Ise2s (A)
0,5	20364,63	4906,72	18164,50	4798,98
1,0	17548,42	4958,75	15594,50	4838,51
1,5	15431,53	4959,69	13681,57	4831,88

Comprimento (km)	Ise1r (A)	Ise2r (A)	Ise1s (A)	Ise2s (A)
48,5	4959,69	15431,53	4831,88	13681,57
49	4958,75	17548,42	4838,51	15594,50
49,5	4906,72	20364,62	4798,98	18164,50

Fonte: o autor (2024).

Nota-se que o cabo OPGW está sobrecarregado nos dois primeiros e nos dois últimos vãos. Em seguida, é realizada a simulação da mesma linha utilizando o cabo Dotterel cujo gráfico e os valores das correntes podem ser observados Tabela 7. Observa-se que o cabo Dotterel é superado no primeiro e no último vão.

Figura 28 – Distribuição de corrente para linha curta utilizando cabo Dotterel



Fonte: o autor (2024).

Tabela 7 – Distribuição de corrente para linha curta utilizando cabo Dotterel.

Comprimento (km)	Ise1r (A)	Ise2r (A)	Ise1s (A)	Ise2s (A)
0,5	20855,95	5013,71	18055,08	4874,06
1,0	18187,57	4958,29	15.666,54	4802,54
1,5	16119,71	4902,23	13856,76	4735,82

Comprimento (km)	Ise1r (A)	Ise2r (A)	Ise1s (A)	Ise2s (A)
48,5	4902,23	16119,71	4735,82	13856,76
49	4958,29	18187,57	4802,54	15666,54
49,5	5013,71	20855,95	4874,06	18055,08

Fonte: o autor (2024).

4.1.2 Cenário 2

É feita uma análise da linha curta utilizando dois tipos de cabo: o cabo Dotterel nas extremidades, próximo às subestações, e o cabo EHS 3/8" no centro da linha. Inicialmente, assume-se que o cabo Dotterel está presente nos 10 primeiros e nos 10 últimos vãos. Os gráficos gerados, assim como os valores das correntes nos para-raios, encontram-se na Figura 29 e na Tabela 8, respectivamente.



Fonte: o autor (2024).

Tabela 8 – Distribuição de corrente para linha curta com troca no vão 10.

Cabo	Comprimento (km)	Ise1r (A)	Ise2r (A)	Ise1s (A)	Ise2s (A)
Dotterel	0,5	20.804,93	4.629,41	18.066,49	4.480,34
Dotterel	4,5	10.761,32	2.805,18	9.438,83	2.582,32
EHS 3/8"	5,0	10.455,17	2.269,01	9.216,41	2.255,36
EHS 3/8"	7,0	5.330,40	3.494,39	5.288,54	3.490,63

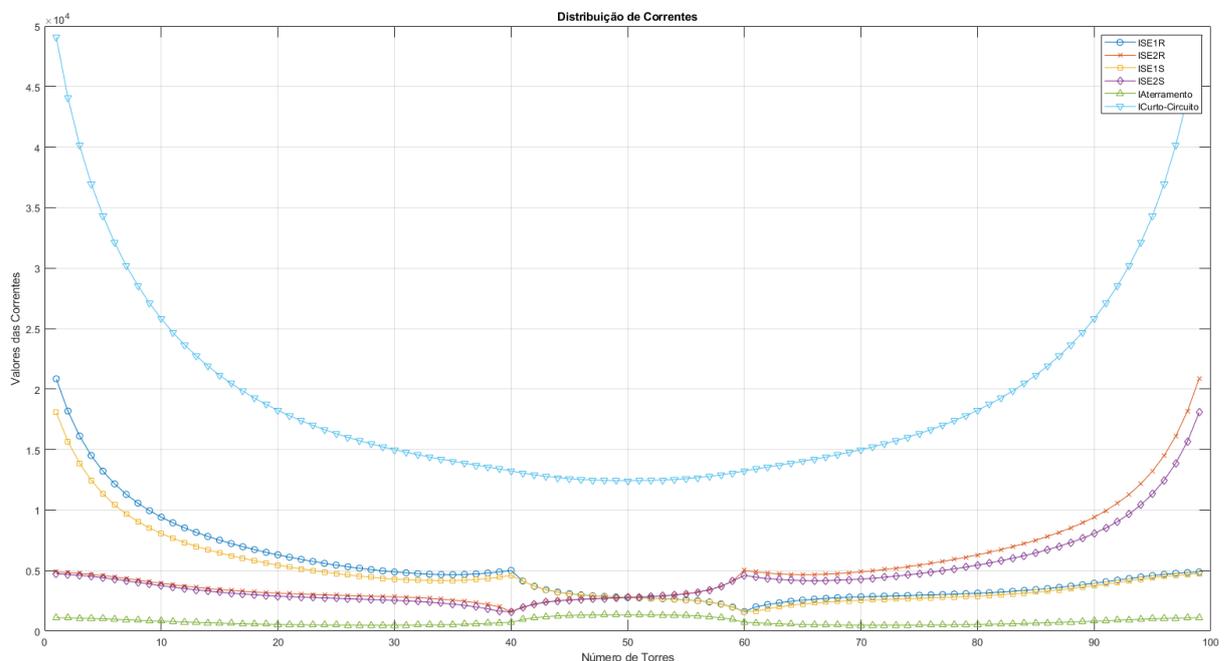
Cabo	Comprimento (km)	Ise1r (A)	Ise2r (A)	Ise1s (A)	Ise2s (A)
EHS 3/8"	43,0	3.494,39	5.330,40	3.490,63	5.288,54
EHS 3/8"	45,0	2.269,01	10.455,17	2.255,36	9.216,41
Dotterel	45,5	2.805,18	10.761,32	2.582,32	9.438,83

Cabo	Comprimento (km)	Ise1r (A)	Ise2r (A)	Ise1s (A)	Ise2s (A)
Dotterel	49,5	4.629,41	20.804,93	4.480,34	18.066,49

Fonte: o autor (2024).

Observando os pontos de troca, nota-se que os cabos Dotterel estão com valores de corrente acima do suportado. No entanto, de acordo com os valores tabelados, o vão 14 possui uma corrente que o cabo pode suportar. Foi realizada uma nova simulação alterando o ponto de troca dos cabos para o vão 14, mas o cabo Dotterel ainda não suportou o valor da corrente. Em seguida, foi verificado em qual vão a corrente seria adequada para o cabo e a simulação foi refeita. Esse processo foi repetido até que, no ponto de troca localizado no vão 40, o cabo EHS 3/8" fosse capaz de suportar a corrente, como apresentado na Figura 30 e na Tabela 9. No entanto, em todos os casos, o cabo Dotterel foi sobrecarregado no primeiro e no último vão.

Figura 30 - Distribuição de corrente para linha curta com trocas de cabos no vão 40.



Fonte: o autor (2024).

Tabela 9 – Distribuição de corrente para linha curta com troca no vão 40.

Cabo	Comprimento (km)	Ise1r (A)	Ise2r (A)	Ise1s (A)	Ise2s (A)
Dotterel	0,5	20.845,19	4.885,23	18.059,96	4.747,16
Dotterel	19,5	4.886,54	2.004,85	4.450,54	1.646,25
EHS 3/8"	20,0	5.017,54	1.610,44	4.592,53	1.583,03

Cabo	Comprimento (km)	Ise1r (A)	Ise2r (A)	Ise1s (A)	Ise2s (A)
EHS 3/8"	30,0	1.610,44	5.017,54	1.583,03	4.592,53
Dotterel	30,5	2.004,85	4.886,54	1.646,25	4.450,54
Dotterel	49,5	4.885,23	20.845,19	4.747,16	18.059,96

Fonte: o autor (2024).

Vale ressaltar que, embora o processo de troca de cabos tenha se mostrado eficaz em termos de adequação às correntes, em uma linha curta, como é o caso, a redução de custos resultante dessa troca pode ser muito pequena. Isso ocorre porque o número de vãos onde a troca seria necessária é relativamente pequeno, o que limita o impacto financeiro. Dependendo das características da linha de transmissão e dos cabos utilizados, pode não ser economicamente viável realizar essas substituições em projetos similares, uma vez que o custo-benefício seria reduzido.

4.2 Linha média

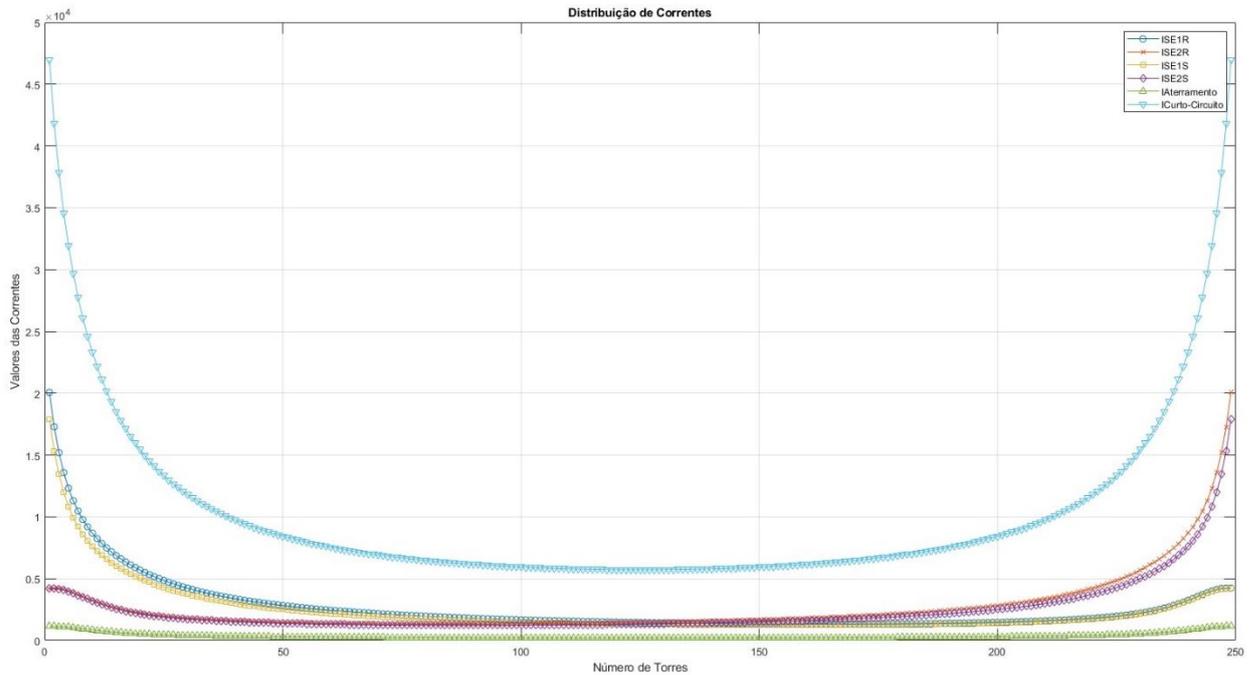
Para a simulação da linha média, são utilizados os seguintes dados:

- Número de vãos: 250;
- Comprimento da linha: 125 km.

4.2.1 Cenário 1

Novamente, a linha é simulada considerando o uso do cabo para-raios OPGW. A Figura 31 e a Tabela 10 apresentam, respectivamente, os gráficos resultantes e os valores das correntes nos para-raios.

Figura 31 – Distribuição de corrente para linha média utilizando cabo OPGW.



Fonte: o autor (2024).

Tabela 10 – Distribuição de corrente para linha média utilizando cabo OPGW.

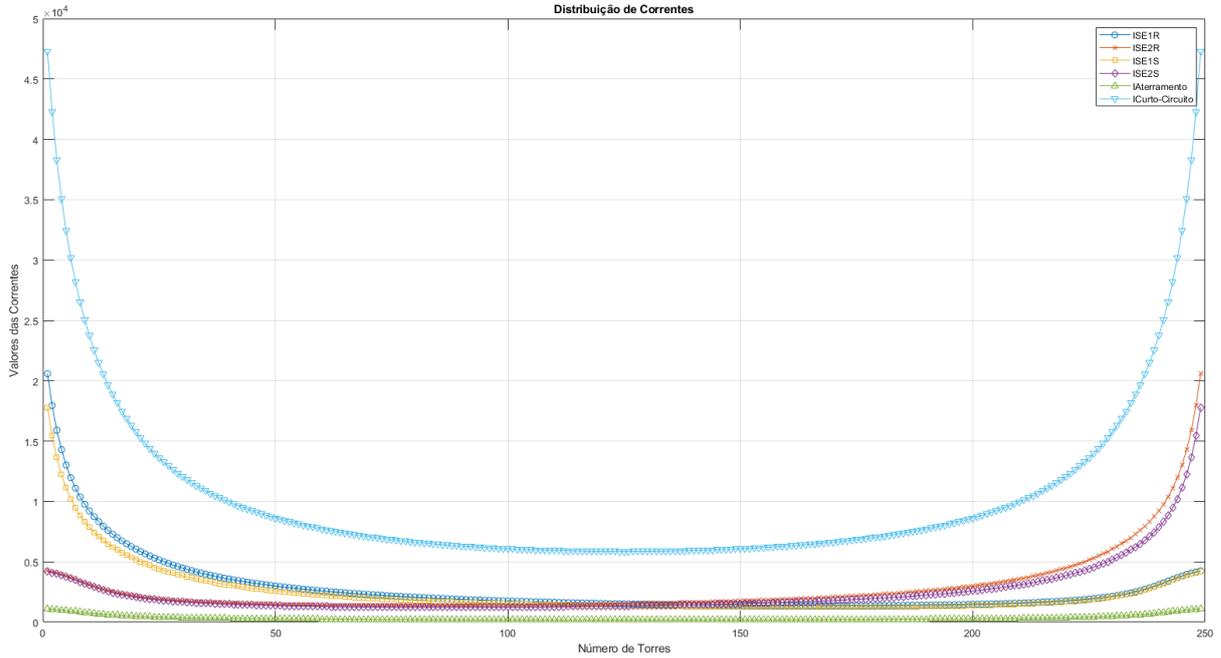
Comprimento (km)	Ise1r (A)	Ise2r (A)	Ise1s (A)	Ise2s (A)
0,5	20.061,90	4.229,61	17.870,10	4.187,09
1,0	17.282,37	4.235,87	15.331,67	4.188,01
1,5	15.191,34	4.201,89	13.441,33	4.151,06

Comprimento (km)	Ise1r (A)	Ise2r (A)	Ise1s (A)	Ise2s (A)
123,5	4.201,89	15.191,34	4.151,06	13.441,33
124,0	4.235,87	17.282,37	4.188,01	15.331,67
124,5	4.229,61	20.061,90	4.187,09	17.870,10

Fonte: o autor (2024).

Assim como na linha curta, o cabo OPGW foi superado nos primeiros vãos. Em seguida, é feita a simulação da mesma linha utilizando o cabo Dotterel. Os gráficos gerados, assim como os valores das correntes nos para-raios, encontram-se na Figura 32 e na Tabela 11, respectivamente.

Figura 32 – Distribuição de corrente para linha média utilizando cabo Dotterel.



Fonte: o autor (2024).

Tabela 11 – Distribuição de corrente para linha média utilizando cabo Dotterel.

Comprimento (km)	Ise1r (A)	Ise2r (A)	Ise1s (A)	Ise2s (A)
0,5	20.583,79	4.253,75	17.801,83	4.198,45
1,0	17.946,62	4.155,17	15.438,39	4.093,04
1,5	15.901,42	4.065,32	13.646,88	3.998,96

Comprimento (km)	Ise1r (A)	Ise2r (A)	Ise1s (A)	Ise2s (A)
123,5	4.065,32	15.901,42	3.998,96	13.646,88
124,0	4.155,17	17.946,62	4.093,04	15.438,39
124,5	4.253,75	20.583,79	4.198,45	17.801,83

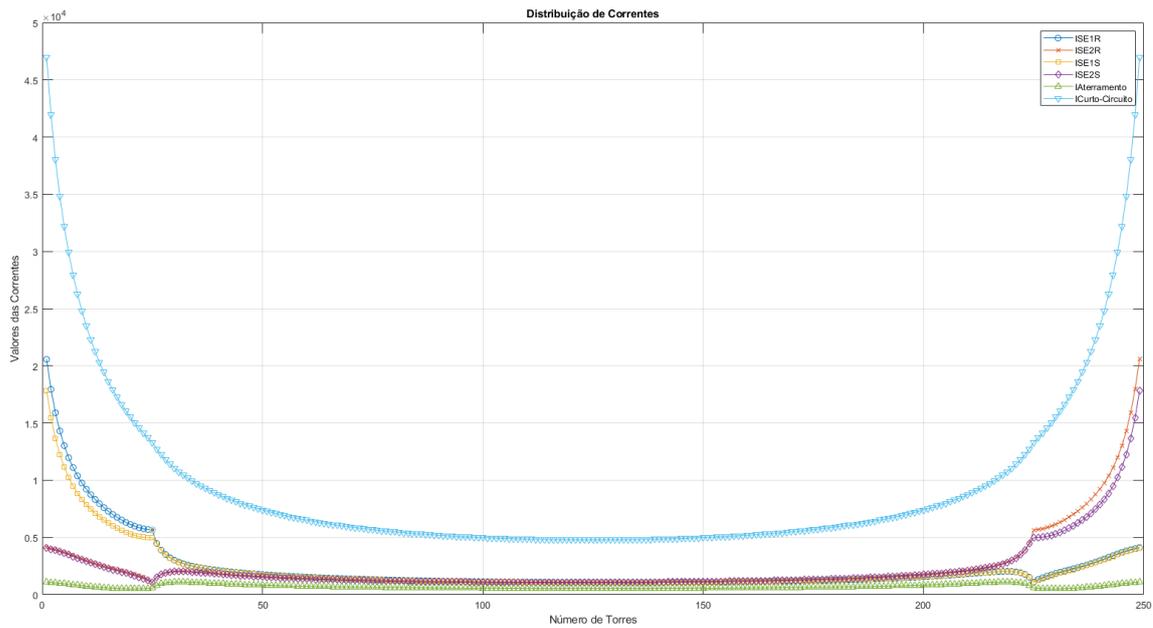
Fonte: o autor (2024).

Novamente, no primeiro e no último vão o valor da corrente está acima ao valor suportado pelo cabo.

4.2.2 Cenário 2

Para a simulação com dois tipos de cabos, inicialmente, a troca dos cabos acontece no vão 25 cujo gráfico e valores de corrente estão presentes na Figura 33 e na Tabela 12.

Figura 33 – Gráfico da distribuição de corrente para linha média com trocas de cabos no vão 25.



Fonte: o autor (2024).

Tabela 12 – Distribuição de corrente para linha média com troca no vão 25.

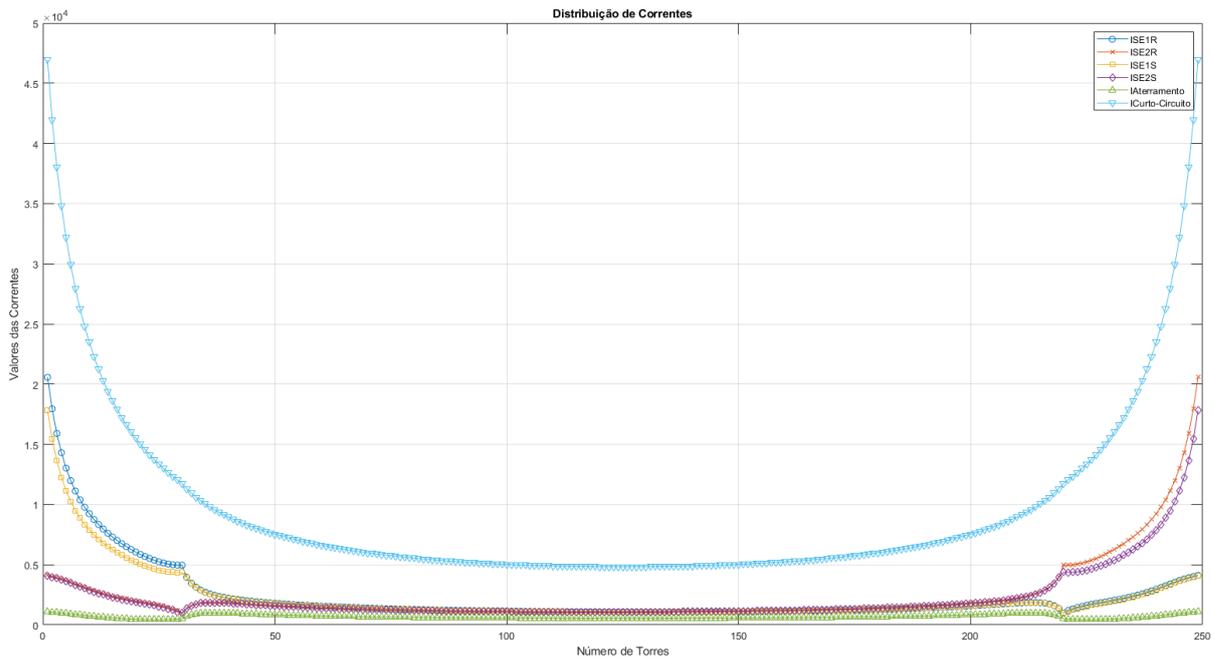
Cabo	Comprimento (km)	Ise1r (A)	Ise2r (A)	Ise1s (A)	Ise2s (A)
Dotterel	0,5	20.570,33	4.118,39	17.805,59	4.064,32
Dotterel	12,0	5.686,45	1.321,35	4.980,18	1.223,14
EHS 3/8"	12,5	5.653,39	1.090,75	4.973,43	1.085,31
EHS 3/8"	13,0	4.469,98	1.516,31	4.448,30	1.513,04

Cabo	Comprimento (km)	Ise1r (A)	Ise2r (A)	Ise1s (A)	Ise2s (A)
EHS 3/8"	112,0	1.516,31	4.469,98	1.513,04	4.448,30
EHS 3/8"	112,5	1.090,75	5.653,39	1.085,31	4.973,43
Dotterel	113,0	1.321,35	5.686,45	1.223,14	4.980,18
Dotterel	124,5	4.118,39	20.570,33	4.064,32	17.805,59

Fonte: o autor (2024).

Mais uma vez, o cabo Dotterel está sobrecarregado no primeiro e no último vão, e nos pontos de troca, o cabo EHS apresenta valores de corrente ligeiramente acima do suportado. Realiza-se uma nova simulação, alterando o ponto de troca dos cabos para o vão 26, em que os resultados gráficos, juntamente com as correntes nos para-raios, são exibidos na Figura 34 e na Tabela 13, respectivamente.

Figura 34 – Gráfico da distribuição de corrente para linha média com trocas de cabos no vão 16.



Fonte: o autor (2024).

Tabela 13 – Distribuição de corrente para linha média com troca no vão 26.

Cabo	Comprimento (km)	Ise1r (A)	Ise2r (A)	Ise1s (A)	Ise2s (A)
Dotterel	0,5	20.573,96	4.118,39	17.808,80	4.064,34
Dotterel	12,5	5.570,16	1.942,19	4.973,29	1.885,54
EHS 3/8"	13,0	5.421,36	1.842,11	4.850,55	1.783,27

Cabo	Comprimento (km)	Ise1r (A)	Ise2r (A)	Ise1s (A)	Ise2s (A)
EHS 3/8"	112,0	1.842,11	5.421,36	1.783,27	4.850,55
Dotterel	112,5	1.942,19	5.570,16	1.885,54	4.973,29
Dotterel	124,5	4.118,39	20.573,96	4.064,34	17.808,80

Fonte: o autor (2024).

A partir dos valores tabelados, é possível notar que o cabo EHS 3/8" suporta os valores de correntes e que mais uma vez no vão inicial e final, o cabo Dotterel é superado.

4.3 Linha longa

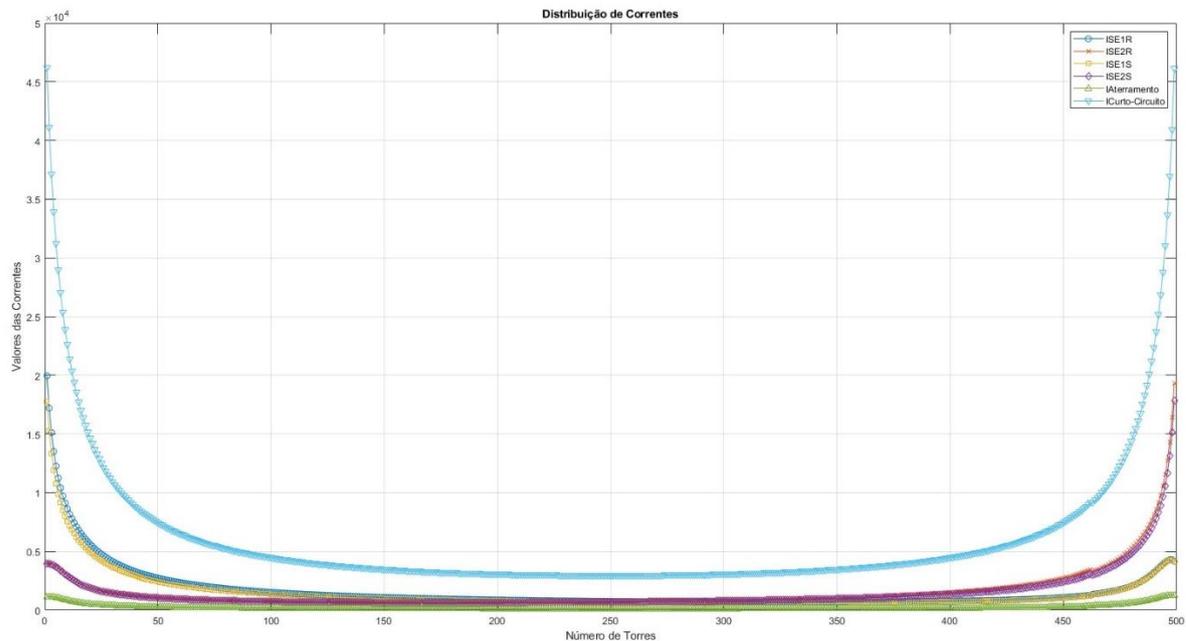
Por fim, na linha longa os dados utilizados são:

- Número de vãos: 500;
- Comprimento da linha: 250 km.

4.3.1 Cenário 1

Simula-se a linha longa considerando o uso do para-raios OPGW, e o gráfico e os valores das correntes estão apresentados abaixo, nas Figura 35 e na Tabela 14.

Figura 35 – Gráfico da distribuição de corrente para linha longa utilizando cabo OPGW.



Fonte: o autor (2024).

Tabela 14 – Distribuição de corrente para linha longa utilizando cabo OPGW.

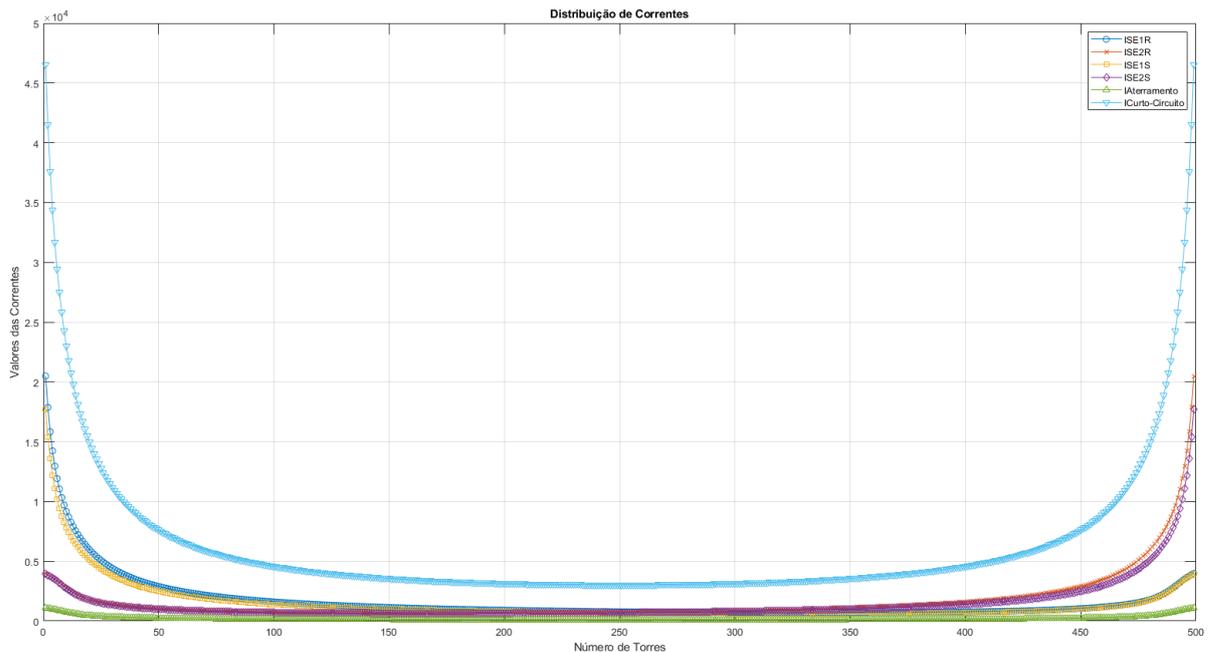
Comprimento (km)	Ise1r (A)	Ise2r (A)	Ise1s (A)	Ise2s (A)
0,5	19.960,77	3.992,54	17.774,13	3.968,61
1,0	17.195,23	3.982,96	15.247,89	3.956,32
1,5	15.114,20	3.938,09	13.366,39	3.910,01

Comprimento (km)	Ise1r (A)	Ise2r (A)	Ise1s (A)	Ise2s (A)
248,5	3.938,09	15.114,20	3.910,01	13.366,39
249,0	3.982,96	17.195,23	3.956,32	15.247,89
249,5	3.992,54	19.960,77	3.968,61	17.774,13

Fonte: o autor (2024).

Assim como nas outras linhas, o cabo OPGW está sobrecarregado nas seções inicial e final. Portanto, realiza-se a simulação da mesma linha utilizando o cabo Dotterel. A Figura 36 e a Tabela 15 ilustram, respectivamente, os gráficos obtidos e os valores das correntes nos para-raios.

Figura 36 – Gráfico da distribuição de corrente para linha longa utilizando cabo Dotterel.



Fonte: o autor (2024).

Tabela 15 – Distribuição de corrente para linha longa utilizando cabo Dotterel.

Comprimento (km)	Ise1r (A)	Ise2r (A)	Ise1s (A)	Ise2s (A)
0,5	20.493,91	3.986,13	17.721,50	3.955,32
1,0	17.868,85	3.872,67	15.368,01	3.838,42
1,5	15.832,57	3.772,34	13.583,84	3.736,04

Comprimento (km)	Ise1r (A)	Ise2r (A)	Ise1s (A)	Ise2s (A)
248,5	3.772,34	15.832,57	3.736,04	13.583,84
249,0	3.872,67	17.868,85	3.838,42	15.368,01
249,5	3.986,13	20.493,91	3.955,32	17.721,50

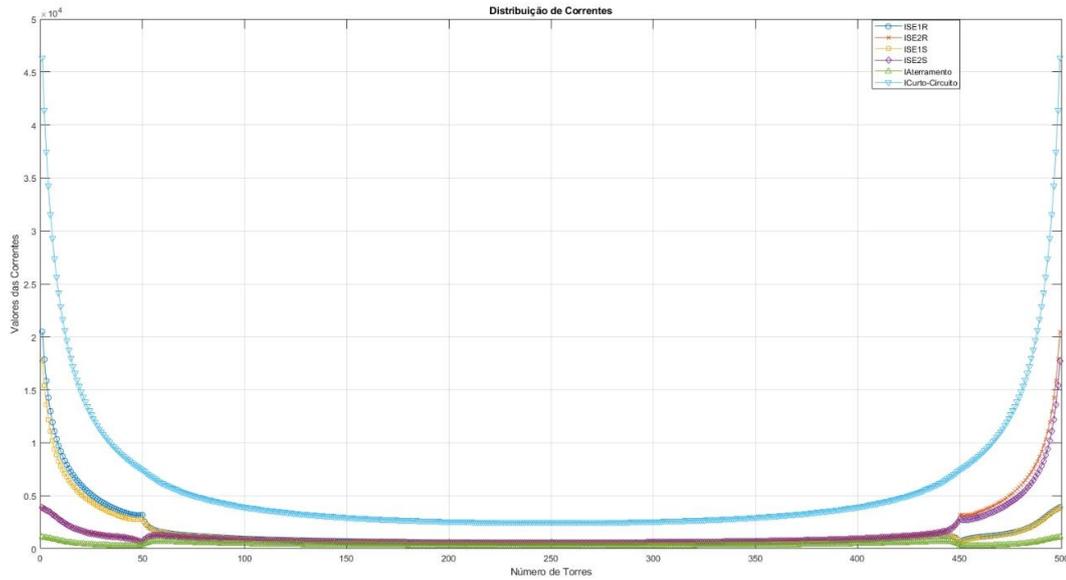
Fonte: o autor (2024).

Novamente, o cabo Dotterel se adequa aos valores de corrente em toda a linha, exceto nos vãos inicial e final.

4.3.2 Cenário 2

Realiza-se a simulação da linha com o ponto de troca ocorrendo a 10% do tamanho total, desta vez no vão 50. Na Figura 37 e na Tabela 16, podem ser encontrados, respectivamente, os gráficos e os valores das correntes nos para-raios.

Figura 37 – Gráfico da distribuição de corrente para linha longa com trocas de cabos no vão 50.



Fonte: o autor (2024).

Tabela 16 – Distribuição de corrente para linha longa com troca no vão 50.

Cabo	Comprimento (km)	Ise1r (A)	Ise2r (A)	Ise1s (A)	Ise2s (A)
Dotterel	0,5	20.492,37	3.911,10	17.729,06	3.880,70
Dotterel	24,5	3.153,41	727,59	2.763,19	673,56
EHS 3/8"	25,0	3.175,58	608,30	2.793,90	605,01

Cabo	Comprimento (km)	Ise1r (A)	Ise2r (A)	Ise1s (A)	Ise2s (A)
EHS 3/8"	225,0	608,30	3.175,58	605,01	2.793,90
Dotterel	225,5	727,59	3.153,41	673,56	2.763,19
Dotterel	249,5	3.911,10	20.492,37	3.880,70	17.729,06

Fonte: o autor (2024).

Nota-se que em 10% da linha, os valores de corrente nos cabos estão consideravelmente abaixo dos valores máximos suportados por eles.

5 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

Este trabalho teve como objetivo principal o dimensionamento de cabos para-raios sob condições de curto-circuito monofásicos, utilizando uma abordagem teórica e prática. O programa desenvolvido no MATLAB, em parceria com o ATP, foi capaz de simular curtos-circuitos em todas as torres de uma linha de transmissão, gerando gráficos e valores das correntes de curto-circuito, além de suas contribuições nos para-raios e nos aterramentos das torres.

Nas simulações realizadas em linhas longas, médias e curtas, observou-se que o cabo Dotterel foi sobrecarregado nos primeiros vãos, próximos às subestações, em todos os casos, assim como o cabo OPGW. Como solução para o cabo OPGW, recomenda-se o uso de cabos desse tipo com bitola maior. No caso do cabo Dotterel, uma alternativa seria a utilização de cabos de bitolas maiores nos vãos iniciais da linha, como, por exemplo, o cabo Butte de liga de alumínio. Tal substituição terá ainda o benefício da redução da massa linear em comparação com um cabo CAA, evitando a necessidade de reforços adicionais nas mísulas dos cabos para-raios.

Além disso, constatou-se que, do ponto de vista econômico, a combinação dos cabos para-raios Dotterel e EHS 3/8" em linhas curtas não é viável, uma vez que o cabo EHS 3/8" é utilizado em um número muito pequeno de vãos no meio da linha, o que não justifica seu uso.

Outro ponto importante observado é que, no caso das linhas longas, o ponto de troca pode ocorrer em menos de 10% da extensão total, sugerindo que a utilização de dois ou mais tipos de cabos para-raios ao longo da linha pode ser uma solução eficiente e econômica.

Essa análise contribui para a compreensão das limitações e possibilidades do dimensionamento de cabos para-raios em diferentes cenários, oferecendo sugestões práticas para melhorar o desempenho e a viabilidade econômica das linhas de transmissão.

5.1 Trabalhos Futuros

O programa desenvolvido demonstrou ser uma ferramenta valiosa para o dimensionamento de cabos para-raios. No entanto, ainda existem melhorias que podem enriquecer os estudos sobre o tema. A seguir, são apresentadas sugestões para o desenvolvimento futuro do trabalho:

- Simulação de LTs com 3 ou mais tipos de cabos para-raios;
- Simulação de LTs em que os cabos para-raios R e S são de tipos diferentes;
- Aumento da base de dados no programa, inserindo mais opções de cabos para-raios e condutores;
- Realização da análise automática do programa, retornando se o cabo está superado em alguma parte da linha e sugerindo opções de cabos para troca.

REFERÊNCIAS

1. FUCHS, R. D. **Transmissão de Energia Elétrica: Linhas Aéreas**. Itajubá: LTC / EFEI, v. 1, 1977.
2. ONS - OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **ONS**. Disponível em: <<https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>>. Acesso em: 10 jul. 2024.
3. PAULO, L. R. et al. **Projetos mecânicos das linhas aéreas de transmissão**. 2ª. ed. São Paulo: Edgard Blucher LTDA, 1992. 1-86 p.
4. DE OLIVEIRA, R. V. **A INFLUÊNCIA EXERCIDA PELOS TIPOS DE CABOS PARARRAIOS SOBRE A INTENSIDADE DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO E SUA DISTRIBUIÇÃO NA REDE ELÉTRICA**. CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS. São João Del-Rei. 2017.
5. ABNT NBR 17140. Aterramento de estruturas e dimensionamento de cabos para-raios de linha de transmissão aérea de energia elétrica, 2023.
6. POPOVIC, L. M. Practical method for evaluating ground fault current distribution in station, towers and ground wire. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 13, n. 1, p. 123-128, January 1998.
7. MURATA, H. "Application of Optical Communications for Power Distribution. **IEEE Region 10 Conference on Computer and Communication Systems**, Hong Kong, September 1990.
8. OKADA, K. et al. Knowledge-based fault location system for electric power transmission lines with OPGW. **Proceedings of the International Workshop on Artificial Intelligence for Industrial Applications**, 1988. 52-57.
9. DAWALIBI, F.; NILES, G. B. Measurements and computations of fault current distribution on overhead transmission lines. **IEEE transactions on power apparatus and systems**, n. 3, p. 553-560, 1984.
10. VERMA, R.; MUKHEDKAR, D. Ground fault current distribution in sub-station, tower and ground wire. **IEEE transactions on power apparatus and systems**, n. 3, p. 724-730, 1979.
11. DAWALIBI, F. Ground fault current distribution between soil and neutral conductors. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, n. 2, p. 452-461, 1980.
12. SOBRAL, S. T.; NOVAES, E. O.; COELHO, A. R. Improvement of transmission line ground circuit current carrying limit after system interconnections. **IEEE transactions on power delivery**, v. 8, n. 4, p. 2023-2030, 1993.
13. GATTA, F. M.; ILICETO, F. Calculation of current flow in grounding systems of substations and of HV line towers, in line shield wires and cable sheaths during earth faults. **European transactions on electrical power**, v. 8, n. 2, p. 81-90, 1998.
14. ASSIS, S. D. C. **Avaliação de risco de rompimento de cabos para-raios instalados em linhas de transmissão**. Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG. Minas Gerais. 2017.
15. BICHELS, A. Sistemas Elétricos de Potência. In: BICHELS, A. **Sistemas Elétricos de Potência**. [S.l.]: EDUTFPR, 2018. p. 24.

16. GOMES, F. V. **Transmissão de Energia Elétrica**. Universidade Federal de Juiz de Fora, UFJF. Juiz de Fora. 2011.
17. NEOENERGIA. Caminho da energia elétrica, da geração à distribuição. **Neoenergia**, 2024. Disponível em: <<https://www.neoenergia.com/w/caminho-da-energia-eletrica-da-geracao-a-distribuicao>>. Acesso em: 10 jul. 2024.
18. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2031**. Empresa de Pesquisa Energética - EPE. [S.l.]. 2022.
19. ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **PROCEDIMENTOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO SISTEMA ELÉTRICO NACIONAL – PRODIST - Módulo 1**. ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. [S.l.]. 2022.
20. GLOVER, D.; OVERBYE, T. J.; SARMA, M. S. **Power system analysis & design**. 6. ed. [S.l.]: Cengage Learning, 2017.
21. KIESSLING, F. et al. **Overhead Power Lines: Planning, Design, Construction**. Berlim: Springer, 2003.
22. GRAINGER, J.; STEVENSON, D. **Power system analysis**. [S.l.]: McGraw-Hill Book Co., 1994.
23. ALUBAR ALTEC. Catálogo Técnico - Condutores Elétricos de Alumínio. **Alubar Altec**, 2015. Disponível em: <https://alubar.net.br/img/site/arquivo/Cat_Tec_Alubar_Aluminio_2015.pdf>. Acesso em: 11 jul. 2024.
24. SIKLOWATT ISOLADORES. Catálogo de isoladores de disco de vidro. **Siklowatt Isoladores**, 2020. Disponível em: <<https://www.siklo.com.br/wp-content/uploads/2020/12/catalogo-siklo-isoladores-disco-de-vidro.pdf>>. Acesso em: 12 jul. 2024.
25. FUCHS, R. D. **Transmissão de energia elétrica: linhas aéreas**. Itajubá : LTC/EFEI, v. 2 , 1977.
26. AFL GLOBAL. Alumoweld® Aluminum-Clad Steel Overhead Ground Wire, 2024. Disponível em: <<https://www.aflglobal.com/en/Products/Aluminum-Clad-Steel/Overhead-Ground-Wire/Alumoweld-Aluminum-Clad-Steel-Overhead-Ground-Wire>>. Acesso em: 10 set. 2024.
27. SVERAK, J. G. Sizing of Ground Conductors Against Fusing. **IEEE**, Janeiro 1981.
28. SOUTHWIRE COMPANY. **Southwire Overhead Conductor Manual**. 2ª. ed. [S.l.]: [s.n.], 2007.
29. KINDERMANN, G.; CAMPAGNOLO, J. M. **Aterramento Elétrico**. 5a edição. ed. [S.l.]: LabPlan, EEL, UFSC, 2002.
30. CUNHA, L. Desempenho de Linhas de Transmissão Frente a Descargas Atmosféricas: Influência do Efeito Corona na Ruptura a Meio de Vão. **Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE)**, Belo Horizonte, 2010.
31. ABNT NBR 15751. Sistemas de aterramento de subestações - Requisitos, 2013.
32. SATO, ; FREITAS, W. **Análise de curto-circuito e princípios de proteção em sistemas de energia elétrica**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.
33. KINDERMANN, G. **Curto-Circuito**. 2. ed. Porto Alegre: Sagra Luzzatto, 1997.

34. CANADIAN-AMERICAN EMTP USER'S GROUP. **Alternative Transients Program (ATPEMTP) - Rule Book**. [S.l.]: [s.n.], 1987-2016.
35. NEXANS. **Catálogo de Alumínio - Condutores Nus**. [S.l.]: [s.n.], 2020.
36. INCAB AMERICA LLC. **Product Datasheet OPGW S 60N/60U (2x48)(1x24) 16.4mm 127kA2-s 107kN**. Arlington: [s.n.], 2023.
37. K. M. C. DANTAS, F. V. L. K. M. S. F. B. C. A. N. S. S. R. Phasor-Based Single-Phase Auto-Reclosing Scheme for Non-Compensated Transmission Lines. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Fevereiro 2022.
38. RIBEIRO JR.,. Aula 10 - Sistema Elétrico de Potência (SEP).
39. SOBRAL, S. T. et al. **Redução de potenciais de terra pela utilização de cabos para-raios CAA nos trechos de linhas e transmissão próximos a subestações e usinas**. XIV SNPTEE. [S.l.]. 1997.
40. PIMENTA, D. G. **Análise de sobretensões em linhas de transmissão com cabos para-raios isolados**. Universidade Federal do Rio De Janeiro - UFRJ. [S.l.], p. 15. 2006.
41. PAUL, C. R. **Eletromagnetismo para Engenheiros: Com Aplicações**. Rio de Janeiro: LTC, 2006.
42. EMTP. EMTP History. **EMTP**, 2024. Disponível em: <<https://www.emtp.com/about-us/emtp-history>>. Acesso em: 2024 julho 10.
43. IEEE - INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS. IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System. **IEEE Std 81-2012 (Revision of IEEE Std 81-1983)**, p. 1-86, Dec. 2012.
44. DIMCEV, V.; HANDJISKI, B.; SEKERINSKA, R. Alternative fall-of-potential method for grounding grids impedance measurements and inductive coupling between leads. **Electromagnetic Compatibility, 2003. EMC '03. 2003 IEEE International Symposium on**, v. 1, p. 74-77, May 2003.
45. SUNDE, E. D. **Earth conduction effects in transmission systems**. New York: Dover Publications, INC., 1968.