

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
DEPARTAMENTO DE ÁREAS ACADÊMICAS IV
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

KAUAN FELIPE RIBEIRO DOURADO

ANÁLISE DE DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO FRENTE A SURTOS
ATMOSFÉRICOS: APLICAÇÕES NO PLANEJAMENTO DE AÇÕES DE MANUTENÇÕES

GOIÂNIA

2026

**TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO
NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG**

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Kauan Felipe Ribeiro Dourado

Matrícula: 20211011060252

Título do Trabalho: Análise de desempenho de linhas de transmissão frente a surtos atmosféricos: aplicações no planejamento de ações de manutenções

Autorização - Marque uma das opções

- ☒ (X) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
- ☐ () Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
- ☐ () Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- ☐ () O documento está sujeito a registro de patente.
☐ () O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
☐ () Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

KAUAN FELIPE RIBEIRO DOURADO

ANÁLISE DE DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO FRENTE A SURTOS
ATMOSFÉRICOS: APLICAÇÕES NO PLANEJAMENTO DE AÇÕES DE MANUTENÇÕES

TCC-2 apresentado ao curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica do Departamento de Áreas Acadêmicas IV do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Câmpus Goiânia como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Me. Paulo Sérgio Zanin Júnior

GOIÂNIA

2026

D739a Dourado, Kauan Felipe Ribeiro.

Análise de desempenho de linhas de transmissão frente a surtos atmosféricos: aplicações no planejamento de ações de manutenções / Kauan Felipe Ribeiro Dourado. – Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia, 2026.
89 f.: il.

Orientador: Prof. Me. Paulo Sérgio Zanin Júnior.

TCC (Trabalho de Conclusão de Curso) – Bacharelado em Engenharia Elétrica, Departamento de Áreas Acadêmicas IV, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.

1. Linhas de transmissão de energia elétrica - manutenção. 2. Descargas atmosféricas - Goiás (Estado). 3. Sistema de Monitoramento Ambiental Climático (SMAC). I. Zanin Junior, Paulo Sérgio (orientador). II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia. III. Título.

CDD 621.319 2

Ficha catalográfica elaborada pelo Bibliotecário Alisson de Sousa Belthodo Santos CRB1/2.266
Biblioteca Professor Jorge Félix de Souza,
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS GOIÂNIA

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Na presente data realizou-se a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso intitulado **Análise do Impacto das Descargas Atmosféricas em Linhas de Transmissão em Goiás: Aplicações em planejamento de Proteção e Manutenção Preditiva**, sob orientação de Paulo Sergio Zanin Junior, apresentado pelo aluno **Kauan Felipe Ribeiro Dourado (20211011060252)** do Curso **Bacharelado em Engenharia Elétrica (Câmpus Goiânia)**. Os trabalhos foram iniciados às **09:45** do dia **04/02/2026** pelo Professor presidente da banca examinadora, constituída pelos seguintes membros:

- Paulo Sergio Zanin Junior (Presidente)
- Raphael de Aquino Gomes (Examinador Interno)
- Gilberto Lopes Filho (Examinador Interno)
- Claudio Henrique Bezerra Azevedo (Examinador Externo)

A banca examinadora, tendo terminado a apresentação do conteúdo do Trabalho de Conclusão de Curso, passou à arguição do candidato. Em seguida, os examinadores reuniram-se para avaliação e deram o parecer final sobre o trabalho apresentado pelo aluno, tendo sido atribuído o seguinte resultado:

☒ Aprovado ☐ Reprovado Nota : 9,0

Observação / Apreciações:

Trabalho aprovado com correções da banca examinadora

Proclamados os resultados pelo presidente da banca examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, eu **Paulo Sergio Zanin Junior** lavrei a presente ata que assino juntamente com os demais membros da banca examinadora.

Documento assinado eletronicamente por:

- **Claudio Henrique Bezerra Azevedo**, em 18/02/2026 14:55:08 com chave **f6961ffc0cf211f1b13e005056a537a4**.
- **Raphael de Aquino Gomes**, em 05/02/2026 12:26:02 com chave **fb4e8cec02a611f1b505005056a537a4**.
- **Paulo Sergio Zanin Junior**, em 05/02/2026 09:47:52 com chave **e2d82530029011f1a160005056a537a4**.
- **Gilberto Lopes Filho**, em 05/02/2026 12:25:14 com chave **de53b28e02a611f1926b005056a537a4**.

Este documento foi emitido pelo SUAP. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse https://suap.ifgo.edu.br/comum/autenticar_documento/ e informe os dados a seguir.

Tipo de Documento: Ata de Projeto Final

Data da Emissão: 18/02/2026

Código de Autenticação: 56abe7



AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter concedido saúde, força e perseverança para superar as dificuldades enfrentadas ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu pai, Wandervan Francisco Dourado, pelo apoio, incentivo e fortalecimento ao longo de toda a minha formação pessoal, profissional e acadêmica.

À minha mãe, Rousmeyre Ribeiro de Rezende Dourado, pelo apoio incondicional, incentivo constante e presença nos momentos de desânimo e cansaço, sendo essencial para a conclusão deste trabalho.

Ao meu irmão, Kayque Emanuel, por sua leveza, bom humor e pelas pausas necessárias que contribuíram para manter o equilíbrio durante a realização deste trabalho.

Ao professor Me. Paulo Sérgio Zanin Júnior, pela orientação acadêmica, apoio, confiança e disponibilidade ao longo de todas as etapas deste trabalho.

Ao meu colega e mentor profissional, Me. Cláudio Bezerra, pelos ensinamentos, orientação e paciência, contribuindo para o meu desenvolvimento técnico e profissional.

Aos meus colegas de trabalho, pelo compartilhamento de conhecimentos e experiências, fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa.

À Equatorial Energia, pelo fornecimento dos dados utilizados neste trabalho e pelo suporte institucional que viabilizou a realização da pesquisa.

*“Eu não falhei.
Eu encontrei 10.000 maneiras que não funcionam.”*

- Thomas Edison

RESUMO

As descargas atmosféricas representam um dos principais desafios para a confiabilidade e a continuidade do sistema elétrico brasileiro, sendo responsáveis por aproximadamente 70% dos desligamentos nas linhas de transmissão. Em Goiás, no ano de 2025, foram registrados cerca de 1,5 milhão de raios; assim, esse fenômeno impacta de maneira direta os custos operacionais e o planejamento de manutenção da concessionária. Este trabalho teve como objetivo analisar o desempenho das linhas de transmissão no estado de Goiás frente a surtos atmosféricos, buscando, assim, correlacionar falhas às variáveis climáticas e às características estruturais. A metodologia do trabalho envolveu o processamento de dados do Sistema de Monitoramento Ambiental Climático (SMAC) em conjunto com registros de desarmes e dados estruturais da Equatorial Energia Goiás, utilizando scripts em Python para a geração de mapas de densidade cerâmica e a realização de análises estatísticas, por meio dos coeficientes de correlação de Pearson e do algoritmo de clusterização K-means. Os resultados demonstraram que a região Sul do estado de Goiás concentra cerca de 80% das descargas analisadas, com destaque para a linha de transmissão UTE Quirinópolis – Quirinópolis, a qual apresentou a maior susceptibilidade às descargas atmosféricas (59 descargas/km). Contrariando as expectativas iniciais da pesquisa, a variável umidade mínima demonstrou ser o fator climático com maior correlação com a incidência de raios no estado. Em relação às características estruturais, a análise realizada por cluster não possibilitou estabelecer uma relação direta significativa entre o tipo de componente estrutural da linha e a quantidade de desarmes. Dessa forma, conclui-se que o uso de mapas de densidade cerâmica é uma estratégia economicamente viável para a manutenção preventiva de linhas de transmissão, permitindo, assim, o direcionamento otimizado de recursos para os trechos críticos, além de reforçar a necessidade e a importância da integração da variável umidade mínima nos alertas dos setores de manutenção da concessionária.

Palavras-chave: Linhas de Transmissão. Descargas Atmosféricas. Manutenção Preventiva. Densidade Cerâmica.

ABSTRACT

Lightning discharges represent one of the main challenges to the reliability and continuity of the Brazilian electric power system, being responsible for a significant portion of transmission line outages. In the state of Goiás, the high incidence of lightning directly impacts operational costs and maintenance planning of the utility. This study aimed to analyze the performance of transmission lines in Goiás under atmospheric surges, seeking to correlate outages with climatic variables and structural characteristics. The methodology involved the processing of data from the Environmental Climatic Monitoring System (SMAC), combined with outage records and structural data provided by Equatorial Energia Goiás. Python algorithms were applied to generate lightning density maps and to perform statistical analyses using Pearson correlation coefficients and the K-means clustering algorithm. The results indicated that the southern region of Goiás concentrates approximately 80% of the analyzed lightning events, with emphasis on the UTE Quirinópolis – Quirinópolis transmission line, which presented the highest susceptibility to lightning discharges, reaching 59 discharges per kilometer. Contrary to initial expectations, minimum humidity was identified as the climatic variable with the highest correlation to lightning occurrence. Regarding structural characteristics, the cluster-based analysis did not allow the establishment of a significant direct relationship between structural components and the number of outages. Thus, the use of lightning density maps is concluded to be an economically viable strategy for preventive maintenance of transmission lines, enabling optimized allocation of resources to critical sections and reinforcing the importance of integrating minimum humidity as a variable in maintenance alert systems.

Keywords: Transmission lines. Lightning discharges. Preventive maintenance. Lightning density.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução da Capacidade instalada no SIN - junho 2025/ dezembro 2029.....	6
Figura 2 - Visão geral de um sistema de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica... 8	8
Figura 3 - Diferença entre fio maciço e cabo.....	11
Figura 4 - Disposição triangular.....	12
Figura 5 - Disposição horizontal.....	12
Figura 6 - Disposição vertical.....	13
Figura 7 - Cabos para-raios.....	13
Figura 8 - Estrutura autoportante de linha de transmissão.....	14
Figura 9 - Estrutura estaiada de linha de transmissão.....	15
Figura 10 - Cavalote.....	16
Figura 11 - Manilha.....	16
Figura 12 - Bola olhal.....	17
Figura 13 - Garfo-y-concha.....	17
Figura 14 - Balancim.....	17
Figura 15 - Garfo-y-olhal.....	18
Figura 16 - (a) Grampo de suspensão, (b) telha.....	18
Figura 17 - Espaçador.....	19
Figura 18 - Armadura pré-formada.....	19
Figura 19 - Amortecedor.....	19
Figura 20 - Isoladores de pino de porcelana: esquerda (a) - monocorpo; direita (b) – multicorpo	21
Figura 21 - Isolador de porcelana tipo pilar.....	21
Figura 22 - Isolador de suspensão com engate concha-bola.....	22
Figura 23 - Sistema típico de blindagem.....	24
Figura 24 - Sistema em trilho de blindagem.....	24
Figura 25 - Non-Gapped Line Arrester (NGLA).....	25
Figura 26 - External Gapped Line (EGLA).....	26
Figura 27 - Sistema de aterramento com haste e conectores de compressão.....	27
Figura 28 - Configuração básica do contrapeso.....	28
Figura 29 - Sobretensão resultante em linha não blindada atingida por descarga.....	32
Figura 30 - Ruptura de isolamento por backflashover.....	32
Figura 31 - Diagrama das ações de manutenção corretiva.....	35
Figura 32 - Diagrama das ações de manutenção preventiva.....	35
Figura 33 - Metodologia utilizada no trabalho (parte 1).....	38
Figura 34 - Metodologia utilizada no trabalho (parte 2).....	39

Figura 35 - Extração de dados do SMAC.	40
Figura 36 - Exemplo de resultado da organização dos dados por ano.	41
Figura 37 - Exemplo de resultado da organização dos dados por tipo de variável.	42
Figura 38 - Mapa de Densidade Cerâmica da linha Bela Vista - Vianópolis.....	47
Figura 39 - Mapa de Densidade Cerâmica da linha Eternit - Cezarina.....	48
Figura 40 - Mapa de Densidade Cerâmica da linha Eternit - Goianira.....	48
Figura 41 - Mapa de Densidade Cerâmica da linha Eternit - Inhumas.....	49
Figura 42 - Mapa de Densidade Cerâmica da linha Inhumas - Firminópolis.....	49
Figura 43 - Ranking das linhas de transmissão com maior susceptibilidade cerâmica.....	51
Figura 44 - Resultado da clusterização K-means.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Capacidade Instalada de Linhas de Transmissão.....	10
Tabela 2 - Correlação geral das variáveis climáticas.....	52
Tabela 3 - Correlação das variáveis climáticas das linhas do ranking.....	53
Tabela 4 - Variáveis predominantes em cada cluster.....	55

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	HIPÓTESES.....	3
1.2	OBJETIVOS	3
1.2.1	OBJETIVO GERAL	3
1.2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
2.	REFERENCIAL TEÓRICO.....	5
2.1	SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO.....	5
2.2	COMPONENTES DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO E TRANSMISSÃO.....	8
2.3	COMPONENTES DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO	9
2.3.1	CONDUTORES	10
2.3.2	ESTRUTURAS DE SUPORTE	14
2.3.3	FERRAGENS.....	15
2.3.4	ISOLADORES	20
2.4	BLINDAGEM DE LINHAS DE TRANSMISSÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	23
2.5	ATERRAMENTO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO.....	26
2.6	DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	29
2.7	A INCIDÊNCIA DIRETA DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO.....	31
2.7.1	<i>FLASHOVER</i>	31
2.7.2	<i>BACKFLASHOVER</i>	32
2.7.3	RUPTURA A MEIO DE VÃO	33
2.8	MANUTENÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO	33
2.9	ANÁLISE DE DADOS	36
2.9.1	COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON	36
2.9.2	CLUSTERIZAÇÃO PELO MÉTODO K-MEANS.....	37
3.	METODOLOGIA.....	38
3.1	ANÁLISE DOS DADOS DO SMAC DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO DO ESTADO DE GOIÁS	39

3.1.1	COLETA DE DADOS NO SMAC	40
3.1.2	DESCOMPRESSÃO E EXTRAÇÃO DOS DADOS	41
3.1.3	ORGANIZAÇÃO DOS DADOS	41
3.1.4	AGRUPAMENTO DOS DADOS	42
3.1.5	GERAÇÃO DO MAPA DE DENSIDADE CERÁUNICA	42
3.1.6	ANÁLISE ESTATÍSTICA DE CORRELAÇÃO DOS DADOS	43
3.1.7	IDENTIFICAÇÃO DAS LINHAS COM MAIOR SUSCEPTIBILIDADE DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	43
3.2	ANÁLISE DOS DADOS ESTRUTURAIS DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO DO ESTADO DE GOIÁS	44
3.2.1	COLETA DE DADOS ESTRUTURAIS DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO EM GOIÁS	44
3.2.2	ORGANIZAÇÃO DOS DADOS	44
3.3	ANÁLISE DOS DADOS DE DESARMES DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO DO ESTADO DE GOIÁS	45
3.3.1	ORGANIZAÇÃO DOS DADOS	45
3.4	ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DESARMES POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS COM OS DADOS ESTRUTURAIS DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO	46
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
4.1	MAPA DE DENSIDADE CERÁUNICA	47
4.2	DEFINIÇÃO DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO COM MAIOR SUSCEPTIBILIDADE CERÁUNICA	51
4.3	INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS NAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	52
4.4	RELAÇÃO DE VARIÁVEIS ESTRUTURAIS COM AS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS E DESARMES	54
4.5	PROPOSTA PARA MELHORIA NA CONCESSIONÁRIA	57
5.	CONCLUSÕES	58
6.	REFERÊNCIAS	60
	APÊNDICE A – SCRIPT PUXARDADOS_RAIO.PY	65
	APÊNDICE B – SCRIPT UNIFICACAO.PY	68

APÊNDICE C – SCRIPT UNIFICACAO_FINAL.PY	70
APÊNDICE D – SCRIPT CLUSTER.PY	71
APÊNDICE E – SCRIPT CLASSIFICACAO_VARIAVEIS.PY	74

1. INTRODUÇÃO

O uso da energia elétrica no Brasil começou entre 1880 e 1930. No entanto, poucos locais possuíam acesso a esse benefício, pois, por se tratar de algo novo e revolucionário, os estados e municípios não tinham a infraestrutura necessária para suportar essa chegada. Os primeiros estados a receberem esse benefício foram o estado do Rio de Janeiro e o estado de São Paulo, mas como não havia padronização no sistema de energia elétrica no país, cada estado tinha um sistema isolado dos outros (João Paulo, 2009).

Em 1930, ocorreu a primeira interligação de sistemas com frequências diferentes, através da construção da subestação conversora no Rio de Janeiro. Em 1960, foi implantado o Projeto Canambra, que visava solucionar problemas relacionados à energia elétrica no Brasil, sugerindo, na época, a unificação de todas as frequências do país em 60 Hz (MegaWhat, 2022). Através da padronização imposta e o passar dos tempos, ocorreu o aumento da quantidade de linhas de transmissão no país, e com isso, consequentemente, um aumento a exposição a fatores ambientais, sendo as descargas atmosféricas um dos principais problemas enfrentados pelas redes elétricas.

As descargas atmosféricas são fenômenos naturais que ocorrem com grande frequência no Brasil devido à sua localização geográfica e características climáticas. De acordo com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), o Brasil é um dos países com maior incidência de raios no mundo, registrando aproximadamente 77,8 milhões de descargas elétricas por ano (Nogueira, 2020). Essas descargas atmosféricas são mais comuns durante o período de verão, quando as condições meteorológicas favorecem a formação de tempestades intensas.

O sistema elétrico brasileiro é particularmente vulnerável às descargas atmosféricas devido à sua extensa rede de transmissão e distribuição de energia elétrica. A ocorrência de raios pode causar interrupções no fornecimento de energia, danificar equipamentos e comprometer a segurança das redes elétricas (Mendes et al., 2018). Segundo o ELAT - Grupo de Eletricidade Atmosférica (INPE, 2022), no Brasil, cerca de 70% dos desligamentos na transmissão são provocados por raios, e cerca de 40% dos transformadores são queimados por raios.

Segundo o Governo do Estado de Goiás, em 2025 Goiás registrou cerca de 1,5 milhão de raios, assim, essas descargas atmosféricas impactam diretamente no trabalho de manutenção da infraestrutura elétrica no estado. As interrupções causam transtornos para a população e prejuízos econômicos significativos para diversos setores, como indústrias e serviços. Além disso, os danos causados aos equipamentos elétricos podem aumentar os custos de manutenção e operação das concessionárias de energia.

Os danos causados pelas descargas atmosféricas podem se dividir em três (Instituto de Energia e Ambiente – USP, 2023):

- Danos causados por sobrecargas de energia: Esse é o tipo de dano ocasionado quando uma descarga atmosférica incide diretamente ou indiretamente no sistema elétrico de potência.
- Danos causados por incêndios: Esse é o tipo de dano ocasionado quando uma descarga atmosférica provoca incêndios.
- Danos por ondas de choque mecânica: Esse é o tipo de dano é ocasionado pelo efeito de aquecimento do ar numa descarga atmosférica, dessa forma são geradas ondas de choque que dependendo da distância, são capazes de destruir estruturas e até mesmo equipamentos.

De acordo com uma pesquisa realizada pelo ELAT INPE, no ano de 2007, em conjunto a outras empresas do ramo elétrico, cada dano gerado por uma descarga atmosférica causa um prejuízo de cerca de vinte reais, ou seja, seria aproximadamente um bilhão de dólares de prejuízo em um ano (Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, 2007).

Para mitigar os efeitos das descargas atmosféricas no sistema elétrico, diversas medidas são adotadas, incluindo a instalação de para-raios, melhorias no isolamento das linhas de transmissão e o desenvolvimento de sistemas de monitoramento e alerta precoce (Silva, 2019). O investimento em pesquisa e desenvolvimento de tecnologias de proteção contra raios é essencial para reduzir os impactos negativos dessas descargas e garantir a estabilidade e confiabilidade do fornecimento de energia elétrica no Brasil. A continuidade desses esforços é importante para minimizar os riscos e assegurar a resiliência do sistema elétrico frente aos desafios impostos pelas condições climáticas do país.

Neste contexto, este trabalho propõe analisar a relação entre condições climáticas e a ocorrência de descargas atmosféricas em linhas de transmissão no estado de Goiás, utilizando dados do Sistema de Monitoramento Ambiental Climático (SMAC) e registros de descargas atmosféricas. A partir dessa análise, o projeto visa propor estratégias voltadas para o planejamento de manutenção preditiva, reduzindo custos e aumentando a confiabilidade do sistema de energia elétrica.

1.1 HIPÓTESES

Considerando que as descargas atmosféricas representam uma das principais causas de falhas em linhas de transmissão, especialmente em regiões com alta densidade cerâmica como o estado de Goiás, presume-se que este estudo permitirá identificar linhas de transmissões críticas com maior incidência de raios e sua correlação com variáveis climáticas específicas. Nesse sentido, se for possível correlacionar a ocorrência de descargas atmosféricas com variáveis climáticas específicas, correlacionar os dados de descargas atmosféricas com os dados de desarmes de linhas de transmissão e correlacionar os dados de desarmes com os dados estruturais das linhas, pode-se então identificar áreas críticas e propor estratégias mais eficazes de proteção e manutenção preditiva.

1.2 OBJETIVOS

Nesta seção, são apresentados os objetivos que foram utilizados para o desenvolvimento desta pesquisa. A definição desses objetivos tem como finalidade apresentar o propósito central do estudo, bem como detalhar as etapas e metas específicas necessárias para avaliar o desempenho das linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas e contribuir para o aprimoramento do planejamento da manutenção.

1.2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo principal desta pesquisa é fazer um levantamento das linhas de transmissão que mais apresentam desligamentos em decorrência de descargas atmosféricas, verificar a correlação desses desligamentos com variáveis climáticas e, posteriormente, com as características físicas de cada linha. Com base nos dados obtidos, será proposto um plano de manutenção para os casos mais críticos e indicado o fator físico das linhas de transmissão que apresenta maior relação com os desligamentos causados por descargas atmosféricas.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Coletar e organizar dados climáticos e de descargas atmosféricas em regiões com linhas de transmissão em Goiás.
- Coletar e organizar dados de desarmes de linhas de transmissão em Goiás.

- Coletar e organizar dados das características físicas das linhas de transmissão em Goiás.
- Estabelecer correlações estatísticas entre variáveis meteorológicas e a ocorrência de descargas.
- Estabelecer correlações estatísticas entre os desarmes das linhas de transmissão e as características físicas das linhas.
- Identificar regiões críticas com alta densidade de descargas atmosféricas e sugerir ações técnicas de mitigação.
- Elaborar propostas para planejamento de manutenção preditiva e aprimoramento de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica que sustenta o desenvolvimento da pesquisa e auxilia na compreensão dos fenômenos analisados. Inicialmente, é apresentado um panorama histórico e a estrutura atual do setor elétrico brasileiro. Em seguida, são descritos os principais componentes das linhas de transmissão, com foco em seus aspectos técnicos.

Posteriormente, discutem-se os mecanismos físicos das descargas atmosféricas e seus efeitos sobre o sistema elétrico, além dos métodos de proteção e aterramento utilizados. Por fim, são abordadas as estratégias de manutenção e as técnicas de análise de dados empregadas para contribuir com a confiabilidade do fornecimento de energia.

2.1 SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO

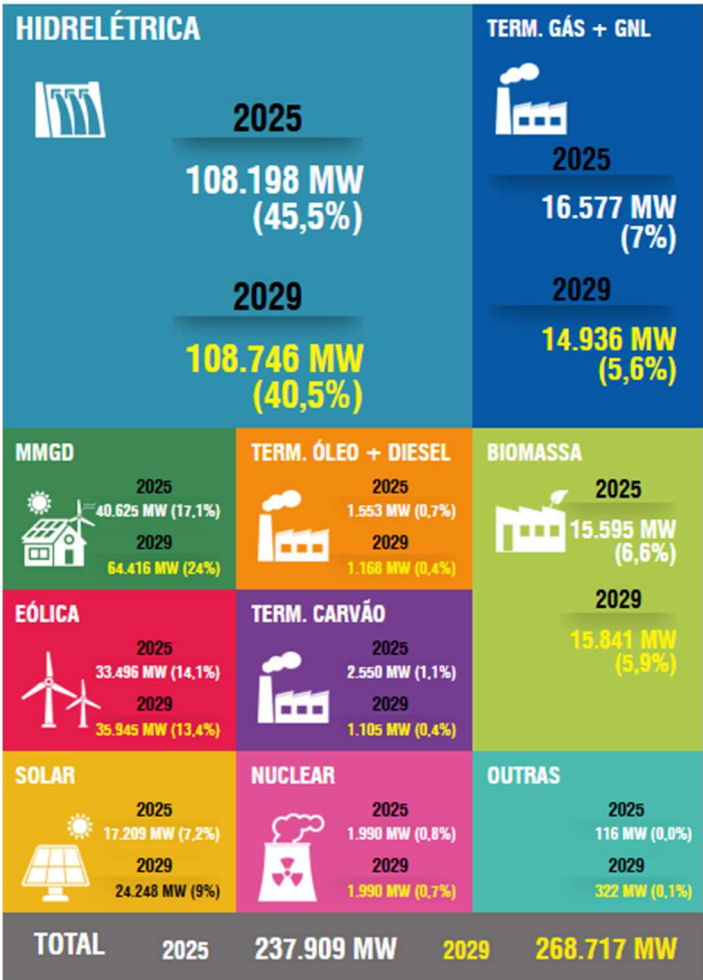
No Brasil, a energia elétrica chegou tardiamente, uma vez que não havia infraestrutura para receber esse tipo de tecnologia em todos os estados. Com o passar do tempo, a energia elétrica foi sendo implementada aos poucos em regiões industriais e nas grandes capitais. O marco inicial da chegada da energia elétrica foi em 1879, com a iluminação da estação central ferroviária Dom Pedro II, no estado do Rio de Janeiro. Entre os anos de 1890 e 1909, o número de estabelecimentos industriais no Brasil cresceu cerca de 800%. Até então, a fonte primária de energia elétrica para o acionamento da maquinaria era o carvão importado. Porém, com a implementação e o sucesso da geração de energia elétrica de origem hidráulica, as indústrias passaram a utilizar esse meio em vez do carvão importado, uma vez que havia maior eficiência e menor custo operacional (Gomes et al., 2002, p. 235).

Segundo um estudo conduzido por Roberto Simonsen (1973), engenheiro e industrial brasileiro, no ano de 1907, as empresas utilizavam apenas cerca de 5% de eletricidade, mas esse número aumentou para 47,2% no ano de 1920. Isso demonstra que o crescimento industrial influenciou diretamente a expansão do setor elétrico brasileiro, uma vez que o aumento no número de indústrias, nacionais e estrangeiras, demandava um fornecimento energético cada vez maior.

Como consequência do avanço do setor elétrico e industrial, no ano de 1954, durante o segundo governo de Getúlio Vargas, foi criada a Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (Eletrobras), com a missão de coordenar e executar projetos estratégicos de geração e transmissão de energia elétrica no país. Dessa forma, essa nova empresa passou a contribuir para a expansão da oferta de energia elétrica e desenvolvimento do Brasil (Eletrobras, 2024).

Com a implantação de unidades de geração de energia elétrica em diversas regiões do país, surgiu a necessidade de integrar essas estruturas para garantir uma operação mais eficiente, segura e equilibrada do sistema elétrico nacional. Com isso, no ano de 1998, o Ministério de Minas e Energia, criou o Sistema Interligado Nacional (SIN), que é a interligação de diversos sistemas elétricos, por meio de uma malha de transmissão nacional. Essa malha de transmissão nacional permite a transferência de energia entre diferentes regiões, as quais cada uma possuem suas características locais de geração e consumo, assim aumentando a confiabilidade do sistema elétrico e otimizando o uso dos recursos disponíveis no Brasil (ONS, 2024). Hodiernamente, no Brasil, há uma capacidade instalada de geração de mais de 174 GW (Giga Watts), conforme demonstrado na Figura 1, sendo cerca de 75% provenientes de hidrelétricas e o restante sendo proveniente de outras fontes renováveis, e o SIN possui mais de 161 mil quilômetros de linha de transmissão (ANEEL, 2024).

Figura 1 - Evolução da Capacidade instalada no SIN - junho 2025/ dezembro 2029.



Fonte: PMO junho/2025

Em razão da necessidade de um órgão responsável pela operação do SIN foi necessário criar, em 1998, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). O ONS é o órgão responsável pela coordenação e controle da operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional.

Entre seus principais objetivos, destacam-se:

- Promover a otimização da operação do sistema eletroenergético brasileiro;
- Garantir o acesso de todos os agentes do setor à rede de transmissão, de forma não discriminatória;
- Contribuir, de acordo com a natureza de suas atividades, para que a expansão do SIN se faça ao menor custo e vise às melhores condições operacionais futuras (ONS, 2024).

Assim como o ONS, existem também outros agentes importantes para a história e funcionamento do sistema elétrico brasileiro. São eles:

- Congresso Nacional, responsável por formular as leis que vão constituir a base do marco legal do setor elétrico;
- Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), responsável por fazer assessoria ao Presidente da República para as questões energéticas;
- Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico (CMSE), responsável pelo monitoramento do setor elétrico, avaliando as condições de segurança do fornecimento de energia elétrica no país.
- Ministério de Minas e Energia (MME), responsável pela produção e implementação das políticas públicas que regem o setor elétrico.
- Empresa de Pesquisa Energética (EPE), responsável por desenvolver estudos que dão sustentação técnica às decisões do MME (Clarke, 2022).

A análise da evolução histórica do sistema elétrico permite compreender a configuração atual do setor, marcada pela interligação de grandes blocos de geração e pela ampla extensão das redes de transmissão. Esse processo de expansão e integração resultou em um sistema cada vez mais complexo.

A partir desse contexto, torna-se necessário apresentar os principais componentes do Sistema Elétrico de Potência, com destaque para aqueles relacionados à transmissão e à distribuição de energia, uma vez que esses elementos estão diretamente expostos a fenômenos externos, como as descargas atmosféricas.

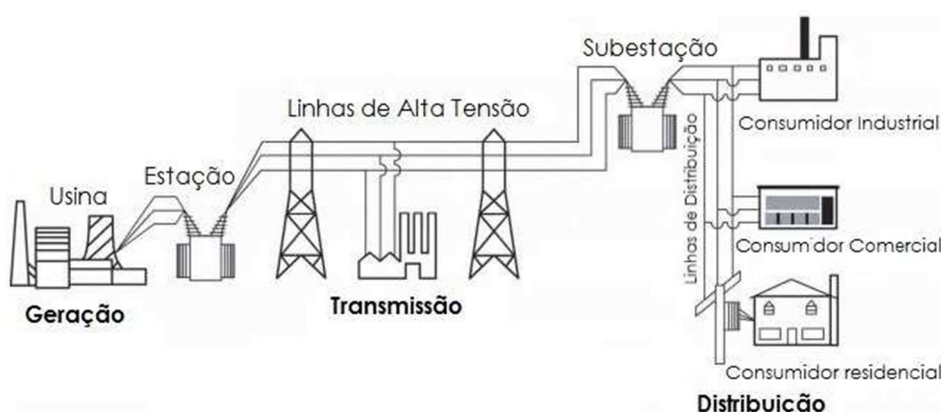
2.2 COMPONENTES DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO E TRANSMISSÃO

O sistema elétrico de potência é composto por três subsistemas que desempenham, cada um, uma função específica, sendo eles: geração, transmissão e distribuição. O sistema de geração, por sua vez, é responsável pela transformação de algum tipo de energia em energia elétrica, sendo as mais conhecidas: energia hidráulica, energia eólica, energia nuclear e energia solar.

Após a geração de energia elétrica, é necessário transmitir essa energia para todo o sistema elétrico de potência, e para isso utiliza-se o sistema de transmissão de energia elétrica. Segundo Fuchs (1977), a etapa de transmissão é responsável por conectar a parte de geração de energia elétrica com os centros de consumo, além de se interconectarem para garantir a confiabilidade do sistema e até mesmo atenderem sistemas independentes.

Para haver a transmissão de energia elétrica da geração para os centros de consumo, é necessário elevar o nível de tensão na saída da geração para que a corrente seja a menor possível, uma vez que com a menor corrente, menor será a bitola do cabo da linha de transmissão, assim tornando o projeto mais viável economicamente. Normalmente, as linhas de transmissão terminam em subestações abaixadoras, para poder adequar o nível de tensão para atender a uma maior quantidade de clientes (Fuchs, 1977). A Figura 2 demonstra de forma visual a um sistema elétrico de potência:

Figura 2 - Visão geral de um sistema de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.



O nível de tensão a ser adotado na transmissão influencia na construção da subestação abaixadora de tensão, pois é nela que será instalado um transformador de força capaz de abaixar o nível de tensão, seja de subtransmissão, alta tensão, extra alta ou até mesmo ultra alta.

Após a etapa de transmissão inicia-se então a etapa de subtransmissão. Segundo Kagan, Oliveira e Robba (2005), o sistema de subtransmissão tem a função de levar a energia elétrica das subestações de subtransmissão até as subestações de distribuição e consumidores do grupo A. A subtransmissão é então uma etapa anterior a distribuição e é responsável por ainda atender grandes consumidores como grandes indústrias ou alimentar subestações de distribuição. Por sua vez, as subestações de distribuição são aquelas que possuem transformadores abaixadores de tensão, ou seja, abaixam para algum nível usual pela indústria e pela rede urbana ou rural.

Após a energia elétrica sair das subestações de distribuição, ela vai então para o circuito urbano ou rural, ou até mesmo alimentar grandes clientes da indústria. Os circuitos urbanos e rurais por sua vez abaixam o nível da tensão mais uma vez através de transformadores aéreos ou subterrâneos, mas agora atendendo o cliente final na tensão de 220/127 V ou 380/220 V, variando em cada região do país. Para os grandes centros industriais é possível que a alimentação de suas subestações sejam através da subtransmissão ou da própria distribuição, seguindo os padrões regionais de nível de tensão e a necessidade de cada uma.

Por estarem continuamente expostas às condições climáticas e ambientais, as estruturas tornam-se particularmente vulneráveis às descargas atmosféricas, justificando um estudo detalhado de seus principais componentes.

2.3 COMPONENTES DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO

A infraestrutura de uma linha de transmissão é formada por diversos elementos interligados, responsáveis por garantir tanto a estabilidade mecânica quanto a continuidade elétrica do sistema. O entendimento detalhado desses componentes é essencial para avaliar o desempenho da linha diante de distúrbios externos e para planejar adequadamente as ações de manutenção.

Nesse sentido, Pereira (2019) destaca a importância estratégica das linhas de transmissão, pois são elas que possibilitam o transporte de grandes blocos de energia por longas distâncias, conciliando exigências técnicas com a viabilidade econômica do setor elétrico (Pereira, 2019, p. 77).

Conforme a Tabela 1 do Ministério de Minas e Energia (MME), no ano de 2023, a capacidade instalada de linhas de transmissão era de 185.374 quilômetros:

Tabela 1 - Capacidade Instalada de Linhas de Transmissão

Descrição	Unidade	2023
Capacidade Instalada de Linhas de Transmissão	km	185.374,00
230 kV	km	70.296,00
345 kV	km	11.095,00
440 kV	km	6.935,00
500 kV	km	72.345,00
600 kV (Corrente Contínua)	km	12.816,00
750 kV	km	2.683,00
800 kV (Corrente Contínua)	km	9.204,00
Capacidade Instalada de Subestações	MVA	453.351,00

Fonte: Ministério de Minas e Energia (2025).

Segundo Moura, Moura e Rocha (2019), os principais componentes de uma linha de transmissão são: os condutores, as estruturas de suporte, as ferragens, os isoladores e os para-raios. Cada um desses componentes desempenham um papel decisivo na transmissão de energia elétrica, onde os condutores são responsáveis pelo transporte da energia elétrica; as estruturas de suporte desempenham o papel mecânico de sustentar os condutores ao longo da extensão da linha de transmissão; os isoladores realizam a isolação entre os condutores e as estruturas metálicas; as ferragens possuem o papel de fixar e conectar elementos diversos ao longo da linha; e os para-raios desempenham um importante papel na proteção da linha de transmissão contra descargas atmosféricas, que são fenômenos frequentes em regiões tropicais, assim como o Brasil. Cada componente será detalhado de forma mais aprofundada nos tópicos abaixo.

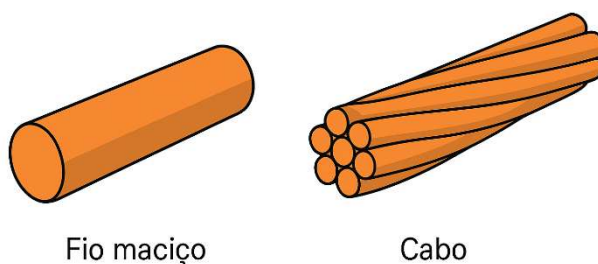
2.3.1 CONDUTORES

Para que seja possível a transmissão de grandes blocos de energia é preciso utilizar um meio físico, chamado de condutor. Hodiernamente, no Brasil, para os condutores que compõem as fases do sistema trifásico de energia elétrica, existem duas escalas de bitolas, sendo elas: a escala AWG (*American Wire Gauge*) e a escala MCM (mil circular mil). Conforme Moura, Moura e Rocha (2019, p. 86), a escala AWG é utilizada em função das seções em circular mil,

até o número 4, pois a partir dessa bitola é utilizado a escala MCM, para cabos de cobre, cabos de alumínio e cabos de alumínio-aço.

Existem ainda dois tipos de condutores, sendo eles: os com fios maciços e os cabos. Os fios maciços são utilizados com a limitação da bitola de até número 4 AWG, acima dessa bitola os cabos são recomendados, pois são mais flexíveis e mais fácil de manusear. Já os cabos são formados por um conjunto de fios, podendo ter até mais de uma camada e podendo ser compostos de fios de mesmo material ou de materiais diferentes. (Moura; Moura; Rocha, 2019, p. 87-88). A Figura 4 demonstra com maior clareza a diferença entre fio condutor e cabo condutor:

Figura 3 - Diferença entre fio maciço e cabo.

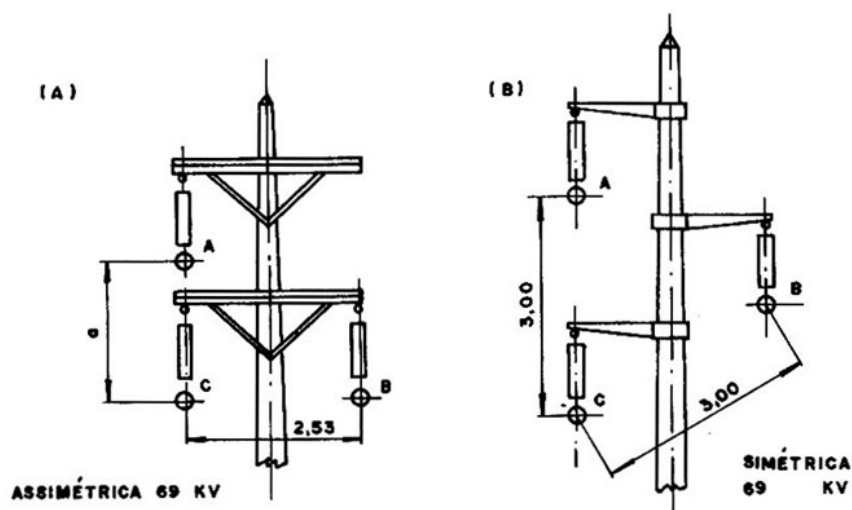


Fonte: Elaborado pelo autor com auxílio da ferramenta ChatGPT (2025).

Em linhas de transmissão é comum o uso de cabos condutores. Segundo (Fuchs, 1977), nas linhas trifásicas utilizam-se três tipos de disposição de condutores:

- a) Disposição Triangular: A disposição entre as fases segue a forma de um triângulo, podendo este ser simétrico ou assimétrico, conforme a Figura 5.

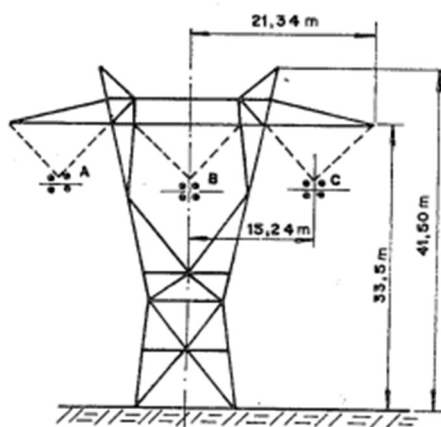
Figura 4 - Disposição triangular.



Fonte: Fuchs (1977).

- b) Disposição Horizontal: É a disposição mais utilizada para circuitos simples, e pode ser simétrica ou assimétrica. Sua vantagem é exigir estruturas menores, porém mais largas. A largura das estruturas nessa disposição é maior do que as demais, conforme a Figura 6.

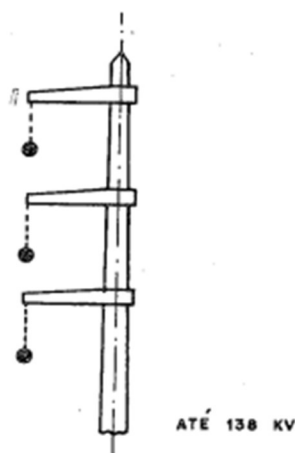
Figura 5 - Disposição horizontal.



Fonte: Fuchs (1977).

- c) Disposição Vertical: É a disposição mais utilizada para circuitos duplos e para linhas que acompanham vias públicas. Nela os condutores são montados em um plano vertical, conforme a Figura 7.

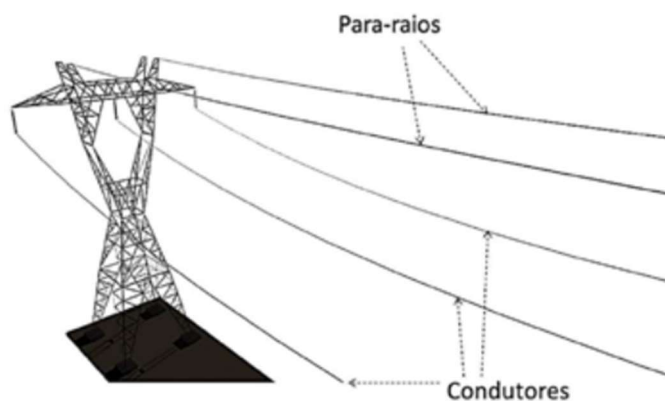
Figura 6 - Disposição vertical.



Fonte: Fuchs (1977).

Além dos cabos condutores das fases, também existem os cabos para-raios. Conforme explica Moura; Moura; Rocha (2019), os cabos para-raios são utilizados não para conduzir os blocos de cargas, mas sim são utilizados para eventuais descargas atmosféricas na linha de transmissão, de tal forma que esse distúrbio seja dissipado para a terra. A Figura 8 demonstra o posicionamento dos cabos para-raios em uma linha de transmissão.

Figura 7 - Cabos para-raios.



Fonte: Moura; Moura; Rocha (2019, p. 90).

2.3.2 ESTRUTURAS DE SUPORTE

Segundo Camargo (2006, p. 98), as estruturas de transmissão têm por objetivo sustentar os cabos condutores e elementos associados a construção da linha, como isoladores, ferragens e para-raios. Por sua vez, as estruturas de suportes podem estar sujeitas a três tipos de esforços:

1. Cargas verticais – devido ao próprio peso da estrutura e componentes verticais da linha, por exemplo;
2. Cargas horizontais transversais – devido a ação do vento perpendicular ao eixo da linha, por exemplo;
3. Cargas horizontais longitudinais – devido a ação do vento na direção do eixo da linha, por exemplo.

As estruturas de suporte são classificadas em autoportante (Figura 9), nas quais são sustentadas pela própria estrutura, e em estaiadas (Figura 10), que são sustentadas por cabos tensionados no solo (Moura; Moura; Rocha, 2019, p. 82).

Figura 8 - Estrutura autoportante de linha de transmissão.



Fonte: AEAARP (2025).

Figura 9 - Estrutura estaiada de linha de transmissão.



Fonte: AEAARP (2025).

Segundo Moura, Moura e Rocha (2019, p. 85), as estruturas podem ser classificadas conforme a função que desempenham na linha de transmissão, em:

- a) Estrutura de suspensão: É o tipo de estrutura mais simples e econômica, responsável por apoiar os cabos condutores e cabos para-raios. Nesse tipo de estrutura não há seccionamento mecânico dos condutores, assim eles são apenas grampeados através dos grampos de suspensão.
- b) Estrutura de ancoragem: É o tipo de estrutura que há o seccionamento mecânico dos condutores, dessa forma servindo de ponto de reforço e abertura eventual em ocasiões específicas.
- c) Estrutura para ângulos: É o tipo de estrutura apenas utilizada quando há alguma necessidade de derivação em um ponto na linha de transmissão.
- d) Estrutura de transposição: É o tipo de estrutura planejada para facilitar a transposição dos condutores.

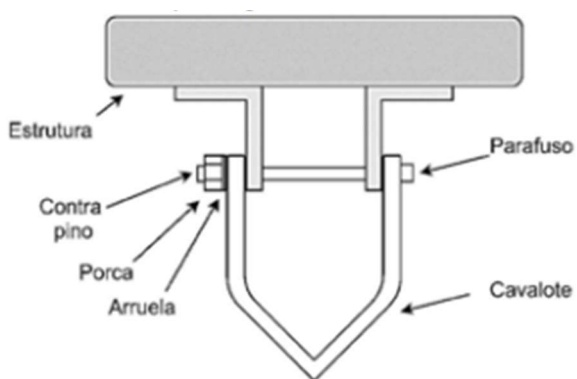
2.3.3 FERRAGENS

De acordo com (Fuchs, 1977), as ferragens de uma linha de transmissão são o conjunto de peças que devem suportar os cabos e ligá-los às cadeias de isoladores e estas às estruturas. As ferragens devem ser bem projetadas, pois o uso incorreto delas pode engendrar em fontes de Corona e fontes de radiointerferência.

Segundo Moura, Moura e Rocha (2019, p. 104), as ferragens utilizadas para uma cadeia de suspensão são:

- a) Cavalote – Utilizada para a fixação da cadeia de isoladores na estrutura, conforme a Figura 11.

Figura 10 - Cavalote.



Fonte: Moura; Moura; Rocha (2019, p. 102).

- b) Manilha – Utilizada para unir o Cavalote e outras ferragens, conforme a Figura 12.

Figura 11 - Manilha.



Fonte: Moura; Moura; Rocha (2019, p. 103).

- c) Bola olhal – Utilizada para unir a Manilha à cadeia de isoladores, conforme a Figura 13.

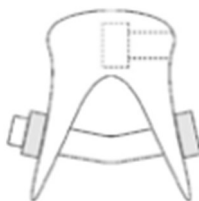
Figura 12 - Bola olhal.



Fonte: Moura; Moura; Rocha (2019, p. 103).

- d) Garfo-y-concha – Utilizado para unir a cadeia de isoladores ao Balancim, conforme a Figura 14.

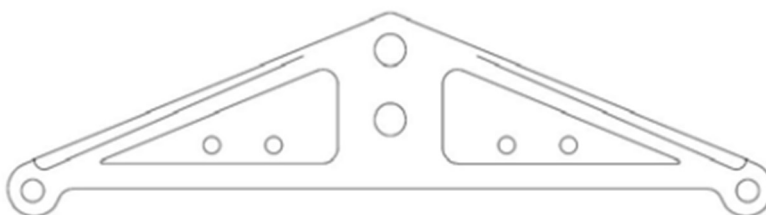
Figura 13 - Garfo-y-concha.



Fonte: Moura; Moura; Rocha (2019, p. 103).

- e) Balancim – Utilizado para unir os grampos que seguram os cabos, conforme a Figura 15.

Figura 14 - Balancim.



Fonte: Moura; Moura; Rocha (2019, p. 104).

- f) Garfo-y-olhal – Utilizado para unir o Balancim ao grampo que prende o cabo, conforme a Figura 16.

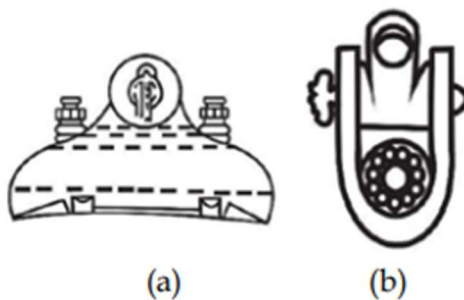
Figura 15 - Garfo-y-olhal.



Fonte: Moura; Moura; Rocha (2019, p. 104).

- g) Grampo de suspensão – Utilizado para segurar o cabo e unir ele aos isoladores. O grampo ainda é constituído de duas peças, a primeira peça é o próprio grampo e a segunda peça é a telha do grampo, conforme a Figura 17.

Figura 16 - (a) Grampo de suspensão, (b) telha.



Fonte: Moura; Moura; Rocha (2019, p. 105).

- h) Espaçador – Utilizado para evitar o contato mecânico entre de condutores da mesma fase, conforme a Figura 18.

Figura 17 - Espaçador.



Fonte: Moura; Moura; Rocha (2019, p. 106).

- i) Armadura pré-formada – São varetas de alumínio que são enroladas em torno do cabo para que ele seja grampeado, conforme a Figura 19.

Figura 18 - Armadura pré-formada.



Fonte: Moura; Moura; Rocha (2019, p. 107).

- j) Amortecedor – Utilizado para absorver a vibração dos cabos, ocasionado pela ação do vento, como pode ser visto na Figura 20.

Figura 19 - Amortecedor.



Fonte Moura; Moura; Rocha (2019, p. 107).

2.3.4 ISOLADORES

De acordo com Moura, Moura e Rocha (2019, p. 104), os isoladores são componentes cuja função é evitar a passagem de corrente do condutor para o apoio e sustentar mecanicamente os condutores. Os isoladores utilizados para a alta tensão podem ser compostos por três tipos de materiais diferentes, sendo eles: isoladores de porcelana, isoladores de vidro temperado e isoladores poliméricos.

Os isoladores de porcelana apresentam alta resistência às solicitações mecânicas e elétricas, possuem longa vida útil e são resistentes à variação de temperatura e à radiação ultravioleta. Contudo, possuem peso elevado, o que dificulta sua instalação em linhas de transmissão. Além disso, devido à sua robustez, em caso de falha, nem sempre apresentam sinais visíveis de dano, o que pode dificultar a identificação do problema.

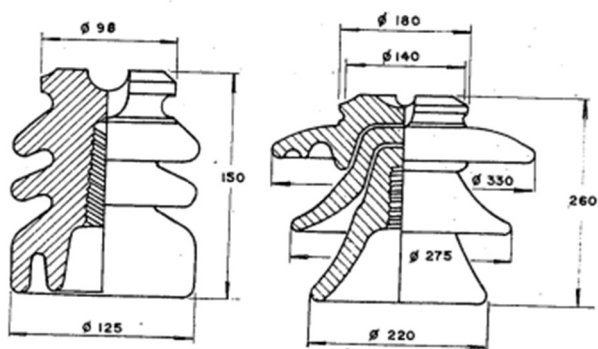
Os isoladores de vidro temperado possuem excelente desempenho elétrico e, em caso de falha, se fragmentam em pequenos pedaços, facilitando a visualização e identificação imediata do defeito. Adicionalmente, a superfície lisa do vidro reduz o acúmulo de poluição. No entanto, o vidro é um material mais frágil do ponto de vista mecânico e, por ser mais sofisticado, apresenta custo superior em relação aos outros tipos.

Já os isoladores poliméricos, formados por compostos sintéticos com propriedades hidrofóbicas, possuem boa resistência elétrica e mecânica, além de serem leves e resistentes à poluição. No entanto, sua vida útil é inferior à dos isoladores cerâmicos ou de vidro, uma vez que estão mais sujeitos à degradação por ação dos raios ultravioleta e envelhecimento dos materiais (Camargo, 2006).

Para as linhas de transmissão, utilizam-se três tipos de isoladores (Fuchs, 1977):

1. Isolador de pino – São fixados na estrutura através de um pino de aço e somente são empregados em linhas até 69 kV. Os isoladores de pino podem ser ainda monocorpo ou multicorpo conforme a Figura 21 a e b.

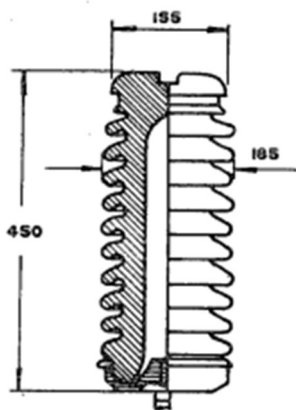
Figura 20 - Isoladores de pino de porcelana: esquerda (a) -



Fonte: Fuchs (1977, p. 27).

2. Isolador tipo pilar – São menos utilizados do que os isoladores do tipo pino, porém devido a sua forma de fixação eles resistem mais a solicitações mecânicas do que os do tipo pino. A Figura 22 demonstra um exemplo de isolador tipo pilar.

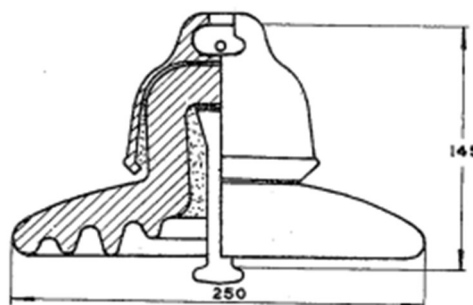
Figura 21 - Isolador de porcelana tipo pilar.



Fonte: Fuchs (1977, p. 28).

3. Isolador de suspensão – São os mais utilizados devido ao seu meio de fixação, pois ele se ajusta de maneira mais fácil as linhas de transmissão, conforme a Figura 23. Esse tipo de isolador pode ser encontrado em duas formas: monocorpo ou barra longa, e isoladores de disco.

Figura 22 - Isolador de suspensão com engate concha-bola.



Fonte: Fuchs (1977, p. 29).

Segundo Negrisoli (1989), para que os isoladores sejam projetados adequadamente, deve-se levar em consideração os esforços elétricos causados pela ocorrência de descargas atmosféricas, chaveamentos e as devidas frequência industrial, ainda considerando o grau de poluição das cadeias de isoladores, o efeito pelicular e o efeito corona ocasionado na linha de transmissão. A frequência industrial refere-se à frequência nominal de operação do Sistema Interligado Nacional (SIN), que no Brasil é padronizada em 60 Hz.

Inicialmente os isoladores eram projetados apenas considerando as solicitações de tensão à frequência industrial e as sobretensões ocasionadas pelas descargas atmosféricas (Negrisoli, 1989). Os isoladores serão expostos a dois tipos de solicitações numa linha de transmissão, sendo elas: solicitações mecânicas e solicitações elétricas. De acordo com (Fuchs, 1977), as solicitações mecânicas que são transmitidas pelos condutores são:

- Forças verticais – devido ao peso dos condutores;
- Forças horizontais axiais – devido a suspensão dos condutores sobre o solo;
- Forças horizontais transversais – devido a ação do vento nos condutores.

E para as solicitações elétricas, ou seja, surtos elétricos na linha de transmissão:

- Tensão normal e sobretensão em frequência industrial, ou seja, em 60 Hz (Hertz);
- Surtos de sobretensão devido a manobras;
- Surtos de sobretensão devido a descargas atmosféricas.

A capacidade de isolamento deve ser a máxima em ambas as solicitações, assim, tirando o maior proveito desse componente sem ocorrer a falha de isolamento. A falha de isolamento pode ocorrer internamente em um isolador ou externamente.

Dentre os diversos componentes que formam uma linha de transmissão, destacam-se aqueles voltados à proteção contra descargas atmosféricas. Desse modo, torna-se indispensável discutir os sistemas de blindagem empregados nessas estruturas, os quais desempenham papel importante na mitigação de falhas e na preservação da continuidade do fornecimento de energia elétrica.

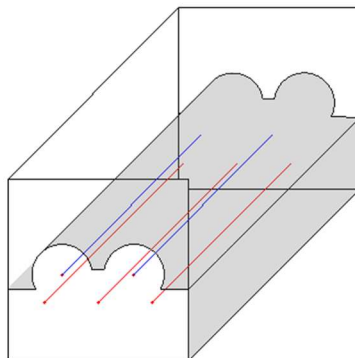
2.4 BLINDAGEM DE LINHAS DE TRANSMISSÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

As linhas de transmissão são compostas por dois tipos de cabos, sendo eles: cabos condutores e cabos para-raios (cabo-guarda). Os cabos condutores são responsáveis por transportar blocos de carga no sistema. Os cabos para-raios ou cabo-guarda são os cabos que ficam acima dos cabos condutores, com a finalidade de proteger a integridade da linha de transmissão frente a descargas atmosféricas (Gônen, 2009). A ocorrência de uma descarga atmosférica em uma linha de transmissão engendra em uma sobretensão nos cabos para-raios, que por sua vez possuem a função de dissipar esse surto para a terra, entretanto, devido ao surto transitório, pode ocorrer os efeitos de *Flashover* e *Backflashover* (Zanetta, 2003).

A blindagem de linhas de transmissão ocorre então com o uso de um cabo para-raios que geram um campo de proteção contra descargas atmosféricas para os condutores das fases (Mendonça; Araújo, 2023). Existem dois tipos de sistemas de blindagem, sendo eles:

- a) Sistema típico de blindagem: É o tipo de sistema mais usual nas linhas de transmissão, normalmente são utilizados dois cabos para-raios para proteção da linha de transmissão contra as descargas atmosféricas, conforme a Figura 24.

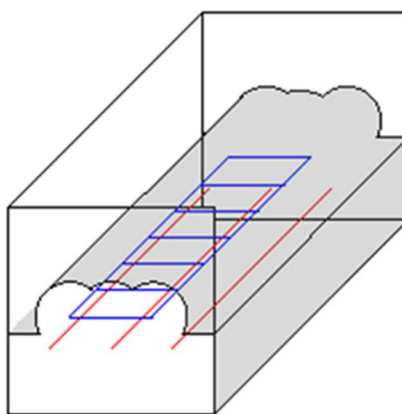
Figura 23 - Sistema típico de blindagem.



Fonte: Mendonça e Araújo (2023, p. 2).

- b) Sistema em trilho de blindagem: Nesse tipo de sistema há a conexão entre os cabos para-raios no decorrer da extensão da linha de transmissão, dessa forma aumentando a área de proteção dos cabos condutores, conforme a Figura 25.

Figura 24 - Sistema em trilho de blindagem.



Fonte: Adaptado de Mendonça e Araújo (2023, p. 3).

Além dos cabos para-raios, os para-raios também podem fazer parte do sistema de blindagem de linhas de transmissão, como componente adicional. A escolha do para-raios de linha, assim como a escolha do seu local de instalação, influencia diretamente na confiabilidade e integridade da linha de transmissão (Siemens Energy, 2025). Existem dois tipos de para-raios de linha, sendo eles:

1. *Non-Gapped Line Arrestor (NGLA)* – Conectado diretamente à linha aérea: Possuem uma maior confiabilidade e facilidade de instalação, podendo ser instalados diretamente na torre ou nos isoladores, conforme mostra a Figura 26. A principal função dele é diminuir o nível de sobretensão para um nível que seja admitido pelo isolador.

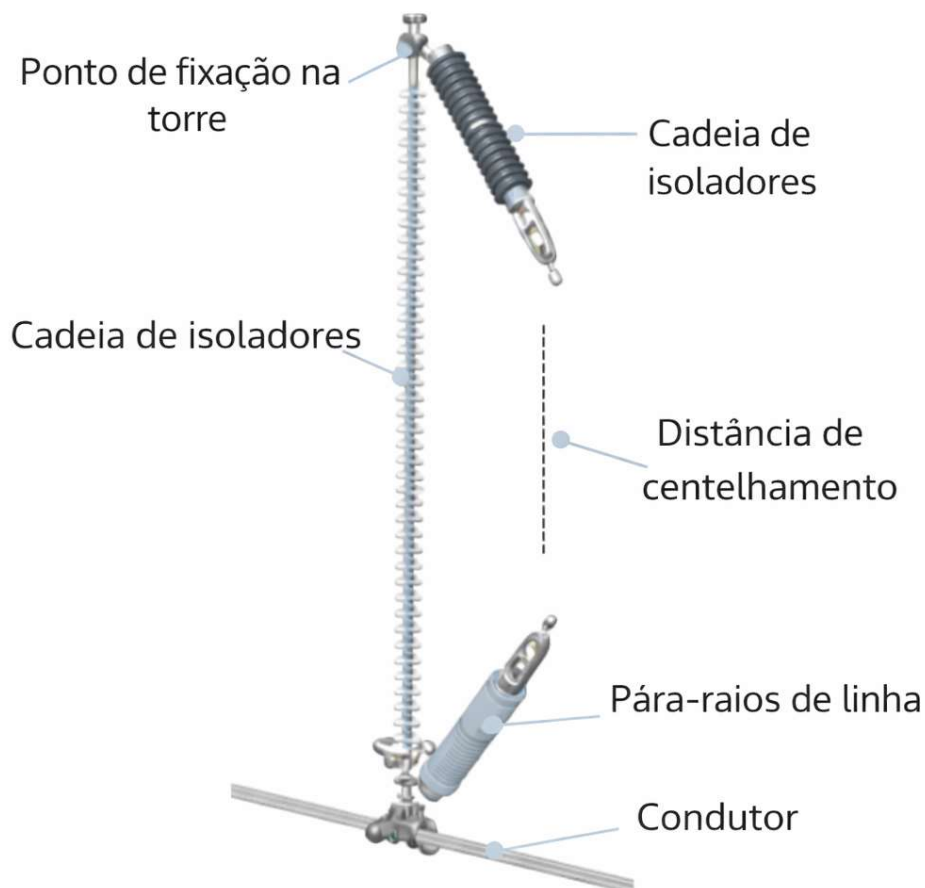
Figura 25 - *Non-Gapped Line Arrestor (NGLA)*.



Fonte: Adaptado e traduzido de Siemens Energy (2025).

2. *External Gapped Line Arrestor (EGLA)* – Isolado da linha de alta tensão por um espaço entre o condutor e o para-raios: Esse tipo possui um espaço entre o condutor e o para-raios, como é possível notar-se na Figura 27. Esse espaço servirá para extinção de arco elétrico em decorrência de um surto atmosférico.

Figura 26 - External Gapped Line (EGLA).



Fonte: Adaptado e traduzido de Siemens Energy (2025).

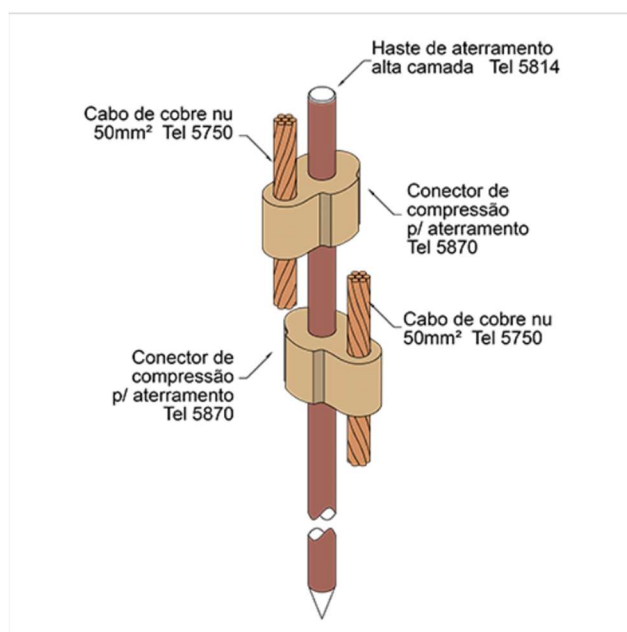
Para que a blindagem de uma linha de transmissão funcione de forma correta e eficiente é preciso que haja um sistema de aterramento bem dimensionado. Assim, o sistema de aterramento desempenha um papel essencial, funcionando como o caminho seguro para o escoamento das correntes elétricas provenientes das descargas.

2.5 ATERRAMENTO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Segundo Visacro (2002), um aterramento elétrico consiste na ligação elétrica proposital de um sistema físico ao solo. O aterramento elétrico é constituído basicamente de três componentes, conforme a Figura 28, sendo eles:

- Conexões elétricas que ligam um ponto do sistema aos eletrodos (Conectores para aterramento);
- Haste de aterramento;
- Cabo condutor de aterramento (Cabo de cobre nu);

Figura 27 - Sistema de aterramento com haste e conectores de compressão.



Fonte: TEL – Trefilação Equipamentos e Ligas (s. d.).

Para que o sistema de energia elétrica opere de forma correta e segura, é imprescindível que haja o dimensionamento correto do sistema de aterramento (Kindermann; Campagnolo, 1995, p. 1). O uso correto do aterramento em sistemas elétricos tem como objetivos:

- Garantir a menor resistência de aterramento possível, para correntes de falta à terra;
- Garantir que os potenciais gerados pelas correntes de falta estejam dentro dos limites de segurança;
- Garantir uma maior eficiência e sensibilidade para os equipamentos de proteção;
- Garantir um caminho de escoamento para a terra em casos de descargas atmosféricas.

Conforme Visacro (2002), para que esses objetivos sejam alcançados adequadamente, um aterramento deve apresentar basicamente três características:

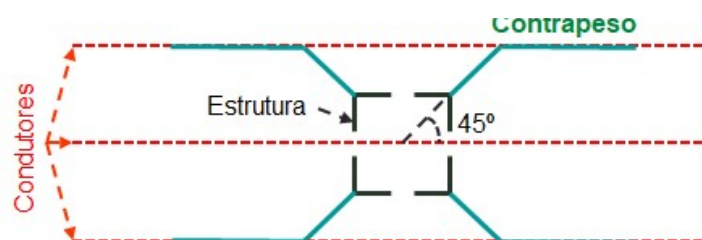
- Capacidade de condução;
- Baixo valor de resistência;
- Configuração de eletrodos que possibilite o controle do gradiente de potencial.

Portanto, de forma resumida, espera-se que qualquer aterramento tenha suficiente capacidade de dispersão para o solo de determinados valores, sem deixar com que os potenciais na superfície do solo atinjam níveis comprometedores (Visacro, 2002).

“De modo geral em linhas aéreas de transmissão, o aterramento é assessorado por um sistema coletor de raios, situado acima dos condutores de fase, denominado SPDA (Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas)” (Almeida, 2022). Dessa forma, nas linhas de transmissão, enquanto o SPDA é o sistema responsável pela captação das descargas atmosféricas, o aterramento será o responsável por facilitar o escoamento das correntes advindas dessas descargas atmosféricas para a terra. De acordo com Almeida (2022), a junção do SPDA com o Aterramento faz com que seja construído um circuito paralelo ao da linha de transmissão, de forma que as correntes de sequência zero passem por esse circuito em paralelo.

Conforme explicado por Bezerra (2020), para que haja o escoamento das correntes de surtos pelo aterramento, ele deve possuir uma baixa resistência de pé de torre. Para diminuir ao máximo a resistência de pé de torre, normalmente emprega-se o uso de fios de contrapesos nas estruturas, os quais ficam estendidos sob o solo. “O contrapeso é essencialmente uma impedância que tem um valor inicial entre 150 e 200 Ω , o qual decai, exponencialmente, até o valor da resistência de dispersão final em um tempo, em microssegundos, aproximadamente igual a seis vezes o comprimento do contrapeso em milhares de pés” (Bezerra, 2020). Na Figura 29 pode-se notar uma configuração básica para os fios de contrapeso.

Figura 28 - Configuração básica do contrapeso.



Fonte: Bezerra (2020).

Após a análise das principais medidas de proteção aplicadas às linhas de transmissão, é importante compreender melhor o fenômeno que origina tais medidas: as descargas atmosféricas. A caracterização de sua formação, tipos e mecanismos de ocorrência são importantes para avaliar os impactos reais que esses eventos podem provocar sobre as estruturas do sistema elétrico.

2.6 DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Segundo o ELAT (2025), um relâmpago é uma corrente elétrica de alta intensidade que ocorre na atmosfera com duração média de meio segundo e típica trajetória com comprimento de 5 a 10 quilômetros. Esse fenômeno ocorre devido à alta velocidade dos elétrons que ficam movimentando a todo instante. A consequência da velocidade de movimento é um clarão, denominado “raio” e o constante movimento gera calor, assim engendrando no som (ELAT, 2025). A descarga atmosférica é um fenômeno que ocorre em todo o globo terrestre e pode ser prejudicial tanto para os seres vivos, como também para objetos e estruturas.

As descargas atmosféricas ocorrem quando a isolamento do ar não é o suficiente para isolar a diferença de potencial entre nuvem-nuvem ou entre nuvem-solo. De acordo com Saba (2001), cerca de 80% das descargas atmosféricas ocorrem dentro das nuvens, mas devido as cargas elétricas nas nuvens induzirem cargas opostas no solo, as descargas também podem se dirigir a ele. Os relâmpagos podem ser divididos conforme sua natureza e sua incidência, sendo eles:

1) Relâmpagos que: tocam o solo

Segundo o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2025), os relâmpagos que tocam o solo são os tipos mais perigosos para os seres vivos e estruturas, e podem se dividir em dois subtipos:

- a) Descendentes ou Nuvem-Solo: Esse tipo de relâmpago inicia-se nas nuvens com carga negativa e descem para o solo;
- b) Ascendentes ou Solo-Nuvem: Esse tipo de relâmpago inicia-se em estruturas ou regiões altas, dessa forma começando do solo para a nuvem.

2) Relâmpagos que: não tocam o solo

Esse tipo de relâmpago ocorre apenas na atmosfera e, normalmente, não é prejudicial para os seres vivos ou estruturas. Ele pode se dividir em três subtipos:

- a) Dentro da nuvem: Esse tipo de relâmpago ocorre dentro das nuvens cumulonimbus, quando uma parte da nuvem está acumulado com uma carga positiva e a outra negativa, ou ao contrário;
- b) Da nuvem para o ar: Esse tipo de relâmpago ocorre quando há uma descarga para o ar;
- c) Entre nuvens: Esse tipo de relâmpago ocorre quando uma nuvem está carregada com mais cargas negativas e outra nuvem está carregada com mais cargas positivas, ou ao contrário.

De acordo com Jesus (2011), as descargas atmosféricas que mais afetam as linhas de transmissão são, geralmente, do tipo nuvem-solo, e sua corrente de descarga é utilizada na análise do desempenho de linhas frente a descargas atmosféricas. Caso o sistema de blindagem e aterramento não esteja bem dimensionado, os relâmpagos podem afetar diretamente ou indiretamente uma linha de transmissão.

Quando ocorre a incidência de uma descarga numa linha de transmissão, a sobretensão e a sobrecorrente, que são efeitos desse surto, irão se propagar nos dois sentidos, seguindo rumo aos terminais da LT (Cunha, 2010). Caso ocorra esse tipo de surto, alguns fenômenos podem ser causados, levando a linha de transmissão à falha. Tais fenômenos incluem o *flashover* e o *backflashover*.

O estudo das descargas atmosféricas permite identificar os diferentes cenários de impacto sobre o sistema elétrico. Dentre os efeitos possíveis, são focos desse estudo o *flashover* e o *backflashover*, que se relacionam diretamente à ruptura da isolação das linhas de transmissão. Uma análise detalhada desses dois fenômenos é primordial para que sejam compreendidos os mecanismos de falhas e as possíveis medidas de proteção a serem aplicadas. Dessa forma, na Seção 2.7.1 e na Seção 2.7.2, serão abordados, respectivamente, os fenômenos de *flashover* e *backflashover*.

Para a engenharia e, especialmente, para a proteção de sistemas elétricos, é fundamental quantificar a atividade elétrica atmosférica de uma região. Tradicionalmente, utiliza-se o conceito

de nível ceráunico, termo derivado do grego *keranos* (trovão), que corresponde ao número de dias de trovoadas registrados ao longo do ano em determinada localidade.

2.7 A INCIDÊNCIA DIRETA DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Segundo o ELAT - Grupo de Eletricidade Atmosférica (INPE, 2022), no Brasil, cerca de 70% dos desligamentos na transmissão são provocados por raios, e cerca de 40% dos transformadores também são queimados por raios. Nos desligamentos ocasionados devido a descargas atmosféricas há o estabelecimento de sobretensões nas cadeias de isoladores da linha ou entre condutores desta, que levam a ruptura do seu isolamento, podendo ser através de incidência direta ou indireta de relâmpagos (Cunha, 2010).

As incidências diretas de descargas atmosféricas numa linha de transmissão possuem três mecanismos básicos de ruptura (Visacro, 2007):

- a) Ruptura de isolamento devido as descargas atmosféricas diretamente nos cabos condutores das fases ou *Flashover*;
- b) Ruptura de isolamento devido as descargas atmosféricas diretamente nos cabos de blindagem (cabo-guarda) ou *Backflashover*;
- c) Ruptura a meio de vão devido as descargas atmosféricas nos cabo-guarda.

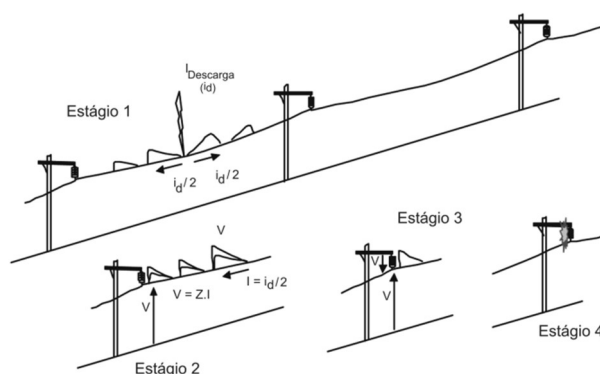
2.7.1 FLASHOVER

“O fenômeno do *flashover* é uma disrupção no isolamento de uma linha devido à incidência direta de uma descarga atmosférica nos cabos condutores, seja por ausência de cabos de blindagem ou por falha de blindagem” (Cunha, 2010). O *flashover* então é a quebra do isolamento de uma cadeia de isoladores devido a sobretensão de uma descarga atmosférica, dessa forma estabelecendo um curto-circuito entre a fase e a terra. Conforme explicado por Visacro (2005), o fenômeno do *flashover* pode ser subdividido em quatro estágios, conforme a Figura 31, sendo eles:

- 1) No primeiro estágio ocorre a descarga atmosférica diretamente no cabo condutor, e após isso a onda viajante se divide para ambos os lados, de forma a procurar uma estrutura aterrada.

- 2) No segundo estágio, como as ondas viajantes são diferentes em cada ponto ao longo da linha de transmissão, o valor da amplitude de tensão final da onda pode ser calculado pelo produto da impedância de surto pela amplitude da onda de corrente.
- 3) No terceiro estágio, o surto de tensão e de corrente encontram uma estrutura aterrada.
- 4) No quarto estágio, ocorre a quebra da isolação da estrutura aterrada (cadeia de isoladores), dessa forma formando um curto-circuito na estrutura.

Figura 29 - Sobretenção resultante em linha não blindada atingida por descarga.

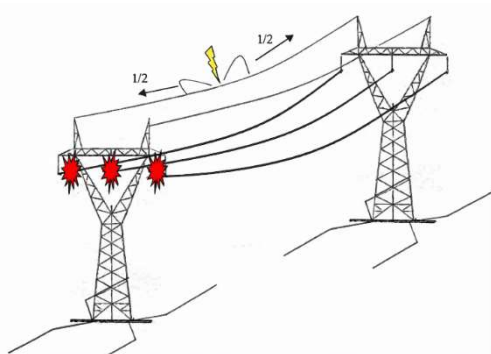


Fonte: Visacro (2005).

2.7.2 BACKFLASHOVER

Segundo Cunha (2010), o *backflashover* é a quebra do isolamento de uma linha de transmissão ocasionado por um surto de tensão provocado pela incidência direta de uma descarga atmosférica nos cabos para-raios, conforme a Figura 31.

Figura 30 - Ruptura de isolamento por backflashover.



Fonte: Adaptado de Cunha (2010).

Em uma incidência direta de uma descarga atmosférica nos cabos para-raios de uma linha de transmissão, ondas de surto viajantes se propagam em ambas as direções da linha, buscando uma estrutura aterrada. Quando essas ondas de sobretensão e sobrecorrente encontram uma estrutura com aterramento, o surto é conduzido ao solo. No entanto, caso a impedância de aterramento não esteja adequadamente dimensionada, parte da onda de sobretensão pode ser refletida de volta para a estrutura. Essa porção refletida da onda pode estressar o isolamento dos equipamentos, levando ao rompimento da isolação e ao fechamento de um curto-circuito entre a fase e a terra — fenômeno conhecido como Descarga Disruptiva de Retorno, ou *backflashover* (Visacro, 2007).

2.7.3 RUPTURA A MEIO DE VÃO

De acordo com Silva (2007), a ruptura a meio de vão ocorre quando uma descarga atmosférica incide diretamente nos cabos de blindagem de linhas de transmissão com vãos muito extensos entre torres. Inicialmente, nesse fenômeno, ocorre uma descarga atmosférica nos cabos para-raios e, logo após, ocorre o mesmo efeito do *backflashover*. Porém, como a distância entre a torre e o ponto de incidência do raio é longa, a onda refletida leva mais tempo para retornar ao ponto inicial, nessa condição, o risco de ruptura aumenta em função do comportamento das ondas viajantes de tensão geradas pelo impacto do raio.

Segundo Undo (1997), a probabilidade de ocorrência desse tipo de fenômeno varia de 1% a 5% em linhas de extra-alta tensão. Para evitar esse tipo de problema, é necessário ajustar adequadamente a distância entre os condutores de fase e o cabo de blindagem, de forma que a configuração se mantenha satisfatória (Silva, 2007, p. 16).

Os efeitos das descargas atmosféricas sobre as linhas de transmissão, como o flashover e o *backflashover*, evidenciam a vulnerabilidade dessas estruturas e a necessidade de estratégias consistentes de mitigação. Desse modo, um plano de manutenção surge como etapa essencial, para que seja possível corrigir falhas, e principalmente para prevenir desligamentos não programados, assim aumentando a confiabilidade do sistema elétrico frente às condições ambientais adversas.

2.8 MANUTENÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

Segundo Kiessling et al. (2013, apud Vier, 2019), a manutenção efetiva de um sistema elétrico é essencial para garantir o seu bom funcionamento. O sistema elétrico depende um

rigoroso plano de manutenção, a fim de prevenir eventuais problemas e manter as boas condições dos equipamentos. Logo, não se pode considerar a manutenção apenas como a parte de restaurar o serviço imediatamente após uma eventual interrupção, mas sim como a parte de previsão, detecção, remoção e substituição de componentes defeituoso, assim evitando futuros defeitos e desligamentos (Vier, 2019, p. 31).

De acordo com Fidalgo (2007), existe uma distinção importante entre os conceitos de defeito e falha, cuja compreensão é essencial para o planejamento eficiente da manutenção em sistemas elétricos.

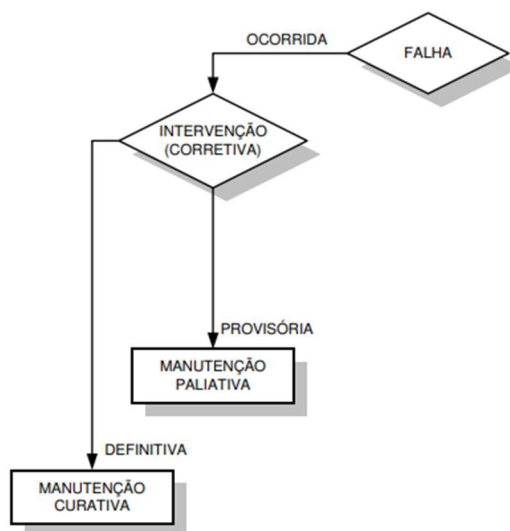
No contexto das linhas de transmissão, o defeito corresponde a uma anormalidade ou degradação em determinado componente que, embora não interrompa imediatamente a operação do sistema, compromete seu desempenho ou reduz sua margem de segurança. Como exemplo, pode-se citar um isolador trincado ou um condutor com sinais de corrosão. Nesses casos, a linha permanece em operação, porém o componente não atua com a confiabilidade originalmente prevista em projeto (Marinelli, 2021).

Por outro lado, a falha caracteriza-se pela perda efetiva da capacidade de operação do sistema, resultando na interrupção do fornecimento de energia. Em linhas de transmissão, a falha se manifesta, geralmente, pelo desligamento (desarme) da linha. Esse evento pode ocorrer quando um defeito previamente existente — como um isolador danificado — é submetido a uma sobretensão provocada por uma descarga atmosférica, evoluindo para um curto-circuito e, conseqüentemente, para a atuação dos disjuntores.

Conforme explica Vier (2019), a manutenção em linhas de transmissão é separada em manutenção corretiva e manutenção preventiva. A manutenção corretiva são todas as atividades realizadas para corrigir um problema existente no sistema. A manutenção preventiva são todas as atividades realizadas para prevenir o surgimento de problemas no sistema, assim antecipando defeitos e mantendo o sistema mais confiável.

A manutenção corretiva conforme Fidalgo (2007) é o reestabelecimento das condições normais operativas de um equipamento ou sistema, podendo essa ser programada ou não. Suas etapas podem ser representadas conforme a Figura 32:

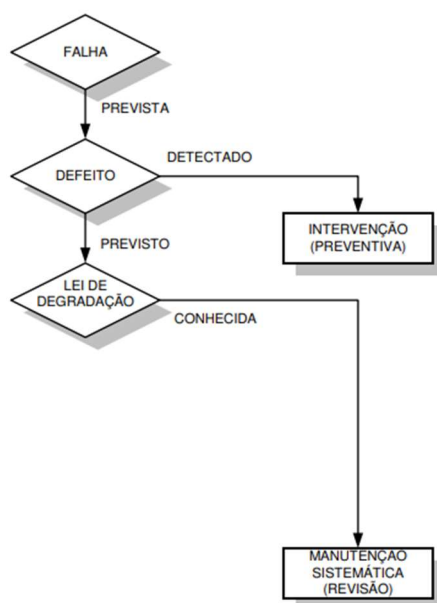
Figura 31 - Diagrama das ações de manutenção corretiva.



Fonte: Fidalgo (2007).

Já a manutenção preventiva são todos os serviços que são programados, para o controle, conservação e restauração de equipamentos ou sistemas, de tal forma a garantir o bom desempenho destes (Fidalgo, 2007, p. 19). A Figura 33 demonstra de forma visual as etapas de uma manutenção preventiva:

Figura 32 - Diagrama das ações de manutenção preventiva.



Fonte: Fidalgo (2007).

Os tipos de manutenções de linhas de transmissão podem ser divididos em quatro tipos:

- **Inspecção Visual:** Nesse tipo de inspecção não há o uso de equipamentos para inspecionar a linha de transmissão, assim apenas são identificados os defeitos que são evidentes visualmente (Fidalgo, 2007).
- **Inspecção Termográfica:** Nesse tipo de inspecção são utilizados os equipamentos termovisores para a detecção de pontos quentes no decorrer da linha.
- **Inspecção com Ultrassom:** Nesse tipo de inspecção são utilizados os equipamentos capazes de detectar falhas de descargas parciais nos componentes de uma linha de transmissão.
- **Manutenção Contínua da Limpeza de Faixa de Servidão:** Nesse tipo de manutenção é realizada a limpeza da faixa de servidão de uma linha de transmissão, podendo ser através de poda de árvores ou roçagem de vegetação.

2.9 ANÁLISE DE DADOS

A análise de dados é uma etapa crítica na produção de pesquisas científicas, permitindo a extração de informações relevantes a partir de grandes volumes de dados. Neste trabalho, essa etapa tem como objetivo principal investigar a relação entre variáveis climáticas e o desempenho das linhas de transmissão, e em paralelo, investigar a relação entre os desarmes ocasionados por descargas atmosféricas e as características estruturais das linhas de transmissão.

É importante destacar que os dados não devem ser interpretados como elementos absolutos ou totalmente objetivos. Conforme ressaltam Shikida, Monasterio e Nery (2021), os dados resultam de processos metodológicos e, por isso, necessitam de cuidado técnico na sua interpretação, a fim de evitar conclusões equivocadas (Shikida; Monasterio; Nery, 2021). Assim, para analisar os padrões de falhas e as possíveis influências ambientais nas linhas de transmissão do estado de Goiás, foram adotados dois métodos estatísticos amplamente utilizados: a Correlação de Pearson e a clusterização pelo método K-means

2.9.1 COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON

Para avaliar a relação entre variáveis climáticas, como umidade e precipitação, e a ocorrência de descargas atmosféricas, foi utilizado o Coeficiente de Correlação de Pearson (r).

Segundo Figueiredo Filho e Silva Júnior (2009), esse coeficiente é uma medida estatística que permite quantificar o grau e a direção da associação linear entre duas variáveis quantitativas (Figueiredo Filho; Silva Júnior, 2009).

O valor de “r” varia entre -1 e 1. Quanto mais próximo estiver de 1 ou -1, mais forte é a relação linear entre as variáveis. Valores próximos de zero indicam ausência de associação linear. Além disso, o sinal do coeficiente indica a direção da relação: valores positivos significam que as variáveis aumentam ou diminuem conjuntamente; valores negativos indicam que, quando uma variável aumenta, a outra tende a diminuir (Figueiredo Filho; Silva Júnior, 2009).

2.9.2 CLUSTERIZAÇÃO PELO MÉTODO K-MEANS

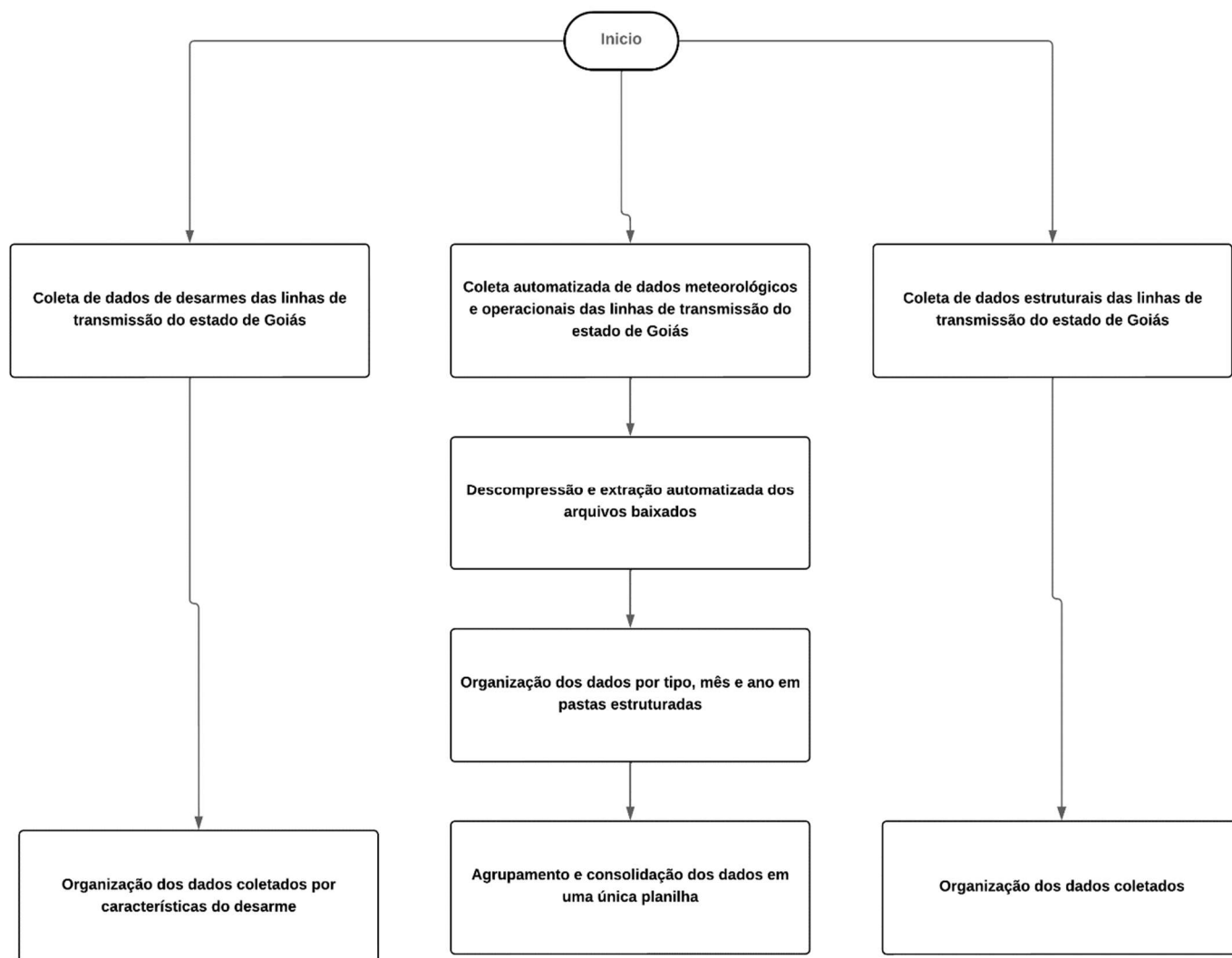
Para agrupar as linhas de transmissão com comportamentos semelhantes quanto ao desempenho, foi empregado o algoritmo de clusterização K-means. O uso de técnicas de agrupamento é especialmente relevante no setor elétrico atual, que lida com grandes volumes de dados operacionais. De acordo com Miraftebzadeh et al. (2023), esses algoritmos permitem organizar os dados em grupos significativos, facilitando a identificação de padrões e apoiando a tomada de decisão (Miraftebzadeh et al., 2023).

O método K-means consiste em dividir o conjunto de dados em K grupos distintos, chamados de clusters, de modo que não haja sobreposição entre eles. O algoritmo busca formar grupos internamente homogêneos, organizando os dados em torno de centroides e minimizando a variabilidade dentro de cada cluster. Sua ampla utilização na engenharia se deve à simplicidade de implementação e à eficiência computacional, características importantes quando se trabalha com grandes bases de dados, como as provenientes de sistemas elétricos (Miraftebzadeh et al., 2023).

3. METODOLOGIA

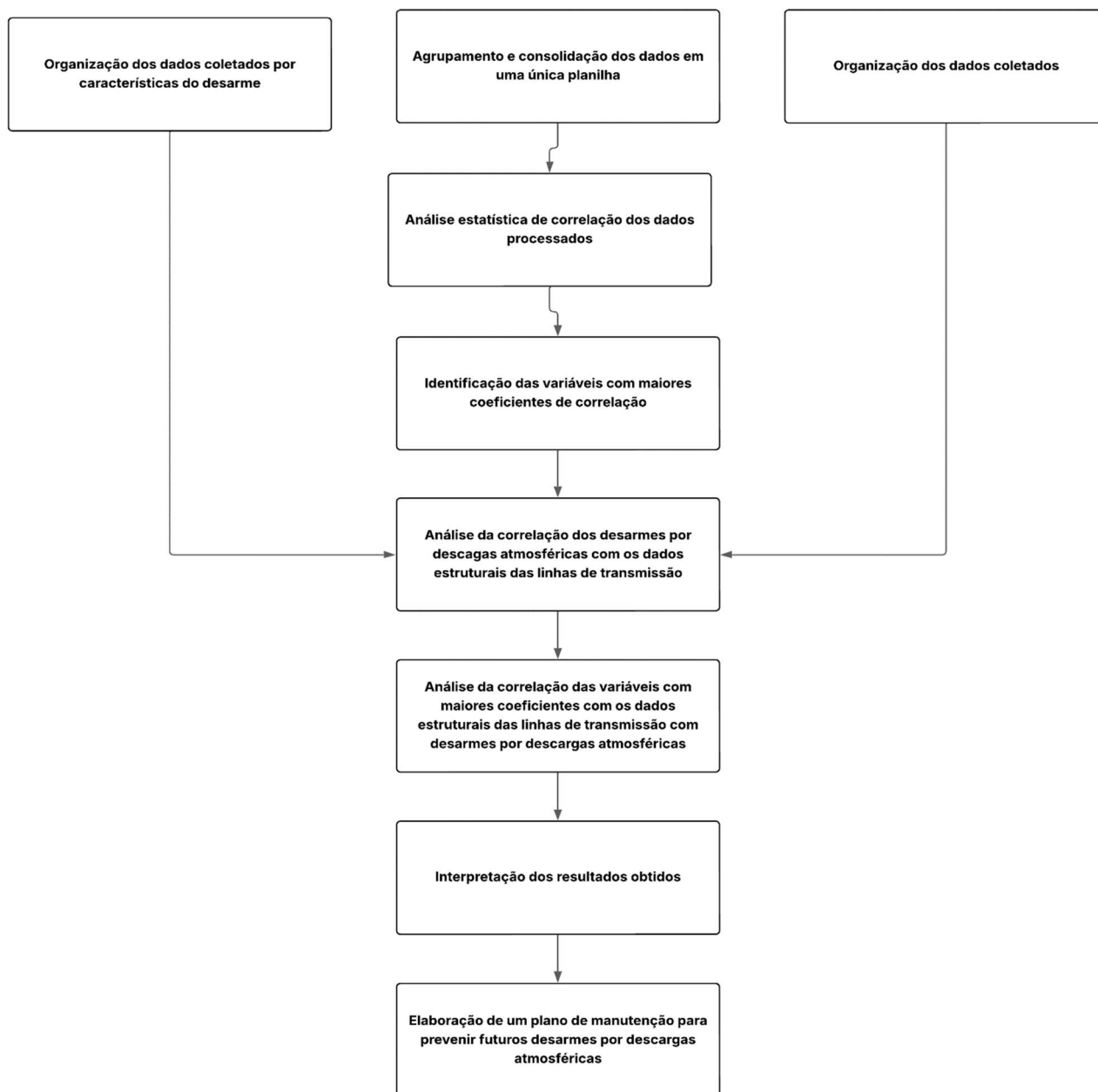
Para o desenvolvimento deste trabalho, foram efetivadas as etapas esquematizadas no fluxograma da Figura 34 e Figura 35.

Figura 33 - Metodologia utilizada no trabalho (parte 1).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 34 - Metodologia utilizada no trabalho (parte 2).



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1 ANÁLISE DOS DADOS DO SMAC DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO DO ESTADO DE GOIÁS

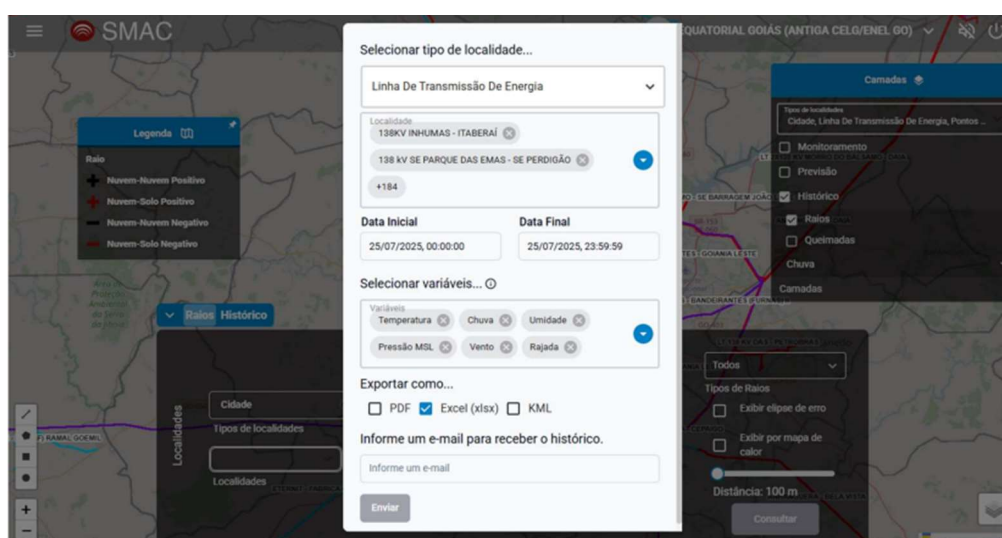
A etapa de análise dos dados do SMAC das linhas de transmissão do estado de Goiás consiste na análise dos dados das variáveis climáticas e dos dados de descargas atmosféricas, as quais envolvem uma parceria com a empresa Equatorial Energia Goiás, que disponibilizou o uso do Sistema de Monitoramento e Alerta ClimaTempo (SMAC), para que fosse possível acessar a

base de dados utilizada no trabalho. Primeiramente, para iniciar o trabalho foi preciso coletar os dados citados acima na ferramenta SMAC, para que depois fosse montada a base de dados, conforme será abordado no tópico a seguir.

3.1.1 COLETA DE DADOS NO SMAC

Na etapa de coleta de dados, foi desenvolvido um script em linguagem Python denominado `Puxardados_raios.py` apresentado no Apêndice A, capaz de acessar o site do SMAC, selecionar os dados necessários de todas as linhas de transmissão do estado de Goiás e, por fim, o mês desejado, realizando em seguida o download dos arquivos em formato comprimido. Na seleção dos dados das linhas de transmissão, foram escolhidas todas as linhas disponíveis no estado de Goiás. Após isso, devido a uma limitação da ferramenta SMAC, foi definido um intervalo de tempo de um ano para a obtenção dos dados, porém como foi realizado a automação do processo, foi possível carregar os dados no intervalo de nove anos, assim o processo foi repetido de forma automatizada nove vezes. Em seguida, foram selecionados os tipos de variáveis de interesse deste trabalho, sendo elas: Temperatura, Chuva, Umidade, Pressão, Vento, Rajada de Ar e Raios. Por fim, foi selecionado o tipo desejado de arquivo de saída e determinado um e-mail para recebimento dos arquivos enviados, conforme a Figura 35.

Figura 35 - Extração de dados do SMAC.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a coleta dos dados do SMAC, foi utilizada a linguagem de programação Python para a extração, organização e processamento das informações.

3.1.2 DESCOMPRESSÃO E EXTRAÇÃO DOS DADOS

Na etapa de extração, foi criado um script em linguagem Python, capaz de automatizar a extração dos dados baixados, que inicialmente vêm em formato comprimido, extraindo todos os dados de uma só vez e renomeando os arquivos conforme o tipo de dado correspondente. Após a realização da etapa de descompressão e extração dos dados é preciso organizar os dados, conforme descrito na subseção 3.1.3.

3.1.3 ORGANIZAÇÃO DOS DADOS

Na etapa de organização, como os dados são disponibilizados em formato de planilha mensais, eles foram separados em pastas por ano (Figura 36) e por tipo de dado (Figura 37), podendo ser variável climática ou descarga atmosférica, de modo a facilitar a etapa seguinte. Após a organização dos dados obtidos, a próxima etapa de agrupamento dos dados em um só arquivo será realizada de maneira mais eficiente.

Figura 36 - Exemplo de resultado da organização dos dados por ano.

Nome	Data de modificação	Tipo
📁 Abril_2016	23/07/2025 13:31	Pasta de arquivos
📁 Abril_2017	23/07/2025 13:31	Pasta de arquivos
📁 Abril_2019	23/07/2025 13:31	Pasta de arquivos
📁 Abril_2024	23/07/2025 13:31	Pasta de arquivos
📁 Agosto_2016	23/07/2025 13:31	Pasta de arquivos
📁 Agosto_2018	23/07/2025 13:31	Pasta de arquivos
📁 Agosto_2019	23/07/2025 13:31	Pasta de arquivos
📁 Agosto_2020	23/07/2025 13:31	Pasta de arquivos
📁 Agosto_2021	23/07/2025 13:31	Pasta de arquivos
📁 Agosto_2022	23/07/2025 13:31	Pasta de arquivos
📁 Agosto_2023	23/07/2025 13:31	Pasta de arquivos
📁 Dezembro_2018	23/07/2025 13:31	Pasta de arquivos
📁 Dezembro_2020	23/07/2025 13:31	Pasta de arquivos
📁 Dezembro_2022	23/07/2025 13:31	Pasta de arquivos
📁 Dezembro_2023	23/07/2025 13:31	Pasta de arquivos
📁 Dezembro_2024	23/07/2025 13:31	Pasta de arquivos
📁 Fevereiro_2016	23/07/2025 13:31	Pasta de arquivos
📁 Fevereiro_2017	23/07/2025 13:31	Pasta de arquivos
📁 Fevereiro_2018	23/07/2025 13:31	Pasta de arquivos
📁 Fevereiro_2020	23/07/2025 13:31	Pasta de arquivos
📁 Fevereiro_2023	23/07/2025 13:31	Pasta de arquivos

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 37 - Exemplo de resultado da organização dos dados por tipo de variável.

Dados_Variaveis

23/07/2025 13:31

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.4 AGRUPAMENTO DOS DADOS

Na etapa de processamento, os arquivos baixados e organizados em suas respectivas pastas foram reunidos de forma a gerar uma única planilha com os dados agrupados por linha de transmissão e data. Para isso, foi utilizado um script em linguagem Python denominado `Unificacao.py` e que está presente no Apêndice B, capaz de analisar a correspondência entre os nomes das linhas de transmissão e entre as datas das descargas atmosféricas e das variáveis climáticas coletadas, e por fim, foi utilizado um outro script em linguagem Python denominado `Unificacao_Final.py` presente no Apêndice C, para unificar mais uma vez os dados de cada mês e ano em um arquivo único. Dessa forma, no final foi gerado um único arquivo com todos os dados agrupados, assim possibilitando a execução da etapa de análise estatística de correlação de dados, uma vez que é necessário utilizar o conjunto de todos os dados.

3.1.5 GERAÇÃO DO MAPA DE DENSIDADE CERÁUNICA

Na etapa de geração do mapa de densidade ceráunica, foi desenvolvido um script em linguagem Python, denominado `Mapa_Raios.py`. Estes mapas possuem como objetivo processar os dados de descargas atmosféricas associados às linhas de transmissão em estudo. Inicialmente, os dados de descargas atmosféricas foram organizados e filtrados de acordo com a área de interesse e o período de análise considerado.

Após isso, através das coordenadas geográficas das descargas atmosféricas foi possível obter-se a identificação da distribuição espacial das descargas ao longo da linha. A partir desse processamento, foi aplicada uma técnica de densidade espacial, permitindo a geração dos mapas de densidade ceráunica, nos quais as regiões com maior concentração de descargas atmosféricas são representadas por cores mais intensas.

Os mapas gerados são ferramentas visuais que possibilitam a análise da incidência de descargas atmosféricas ao longo das linhas de transmissão, sendo utilizados posteriormente na etapa de resultados para a identificação de trechos críticos.

3.1.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA DE CORRELAÇÃO DOS DADOS

Na etapa de análise estatística de dados das variáveis e de descargas atmosféricas, considerando cada região do estado de Goiás, foram realizados os cálculos de correlação entre as variáveis e a incidência de descargas atmosféricas, para que fosse possível identificar qual variável está mais correlacionada com esse fenômeno atmosférico.

Para a análise de correlação dos dados, foi adotado o coeficiente de correlação de Pearson, por se tratar de um método amplamente utilizado em análises estatísticas exploratórias e por permitir a avaliação da intensidade e do sentido da relação linear entre duas variáveis quantitativas. A utilização desse coeficiente possibilita uma análise inicial das tendências de associação entre as variáveis, servindo como ferramenta de apoio à identificação de padrões nos dados analisados.

O coeficiente de correlação de Pearson assume valores no intervalo de -1 a $+1$, conforme descrito por Figueiredo Filho e Silva Júnior (2009), onde:

- $+1$ indica correlação positiva perfeita (ambas as variáveis aumentam juntas).
- -1 indica correlação negativa perfeita (uma variável aumenta enquanto a outra diminui).
- 0 indica ausência de relação linear.

3.1.7 IDENTIFICAÇÃO DAS LINHAS COM MAIOR SUSCEPTIBILIDADE DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Nesta etapa, foi realizada a identificação das linhas com maior susceptibilidade de descargas atmosféricas, foram coletados dados de extensão das linhas de transmissão, para que através do valor em quilômetros fosse realizado o cálculo de susceptibilidade cerâmica, ou seja, quantidade de raios por quilômetro.

3.2 ANÁLISE DOS DADOS ESTRUTURAIS DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO DO ESTADO DE GOIÁS

A etapa de análise dos dados estruturais das linhas de transmissão consiste em analisar as estruturas que formam uma linha de transmissão, a fim de procurar correlações de desarmes causados pelas descargas atmosféricas e os tipos de estruturas de cada linha. De forma inicial, foi necessário coletar os dados citados acima através de arquivos fornecidos pela concessionária de energia do estado de Goiás, Equatorial Energia Goiás, para que depois os dados fossem organizados para a realização de análises estatísticas posteriores.

3.2.1 COLETA DE DADOS ESTRUTURAIS DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO EM GOIÁS

Na etapa de coleta de dados estruturais das linhas de transmissão em Goiás, através de uma parceria com a empresa Equatorial Energia Goiás, foram coletados dados estruturais com o setor de projetos de linhas de transmissão.

3.2.2 ORGANIZAÇÃO DOS DADOS

Na etapa de organização dos dados estruturais, primeiramente, foi preciso definir um padrão de nomenclatura para as linhas de transmissão estudadas, uma vez que os nomes não eram os mesmos em todos os arquivos, assim dificultando a visualização dos dados. Logo após, foi necessário filtrar as linhas de transmissão do arquivo fornecido pelo setor de projetos, pois haviam linhas que já haviam sido descontinuadas e linhas de transmissão que ainda estavam em construção, assim não sendo pertinentes a este trabalho. Além disso, os dados foram resumidos em outro arquivo, através do uso de Python, com apenas as seguintes colunas:

- Linhas de transmissão – Contêm o nome de cada linhas de transmissão;
- Nível de tensão – Contêm os valores em “kV” de cada linha de transmissão;
- Região – Contêm a região do estado na qual cada linha está localizada;
- Cabo condutor – Contêm a especificação do tipo de cabo condutor utilizado em cada linha de transmissão;
- Cabo para-raios – Contêm a especificação do tipo de cabo para-raios utilizado em cada linha de transmissão;

- Tipo de isolador – Contêm a especificação do tipo de isolador utilizado em cada linha de transmissão;
- Tipo poste – Contêm a especificação do tipo de estrutura utilizada em cada linha de transmissão;
- Tipo Cruz – Contêm a especificação do tipo de cruzeta utilizada em cada linha de transmissão;
- Configuração - Contêm o tipo de arranjo dos cabos condutores em cada linha de transmissão;

3.3 ANÁLISE DOS DADOS DE DESARMES DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO DO ESTADO DE GOIÁS

A etapa de análise dos dados de desarmes teve como objetivo investigar as causas dos desligamentos das linhas de transmissão, com ênfase nos eventos associados a descargas atmosféricas. A partir dessas informações, buscou-se estabelecer possíveis correlações estatísticas com as características estruturais das linhas.

Para viabilizar o estudo, os dados foram obtidos por meio de parceria com a concessionária Equatorial Energia Goiás, que disponibilizou os registros de desarmes junto ao setor responsável. Após a coleta, as informações passaram por um processo de tratamento e organização, de modo a garantir consistência e possibilitar a aplicação das análises estatísticas previstas na metodologia.

3.3.1 ORGANIZAÇÃO DOS DADOS

Inicialmente, na etapa de organização dos dados de desarmes, foi preciso readequar as nomenclaturas das linhas novamente, pois foi constatado que cada setor utilizava uma nomenclatura diferente para referir-se a cada linha. Durante o processo de padronização da nomenclatura de cada linha no arquivo de desarmes, foi preciso retornar ao arquivo de dados estruturais para eliminar alguns dados do arquivo de dados, pois eles se referiam exclusivamente aos ramais das linhas, assim duplicando informações de dados da linha por completo. Após a padronização da nomenclatura das linhas, foi necessário resumir e filtrar os dados de desarmes em um único arquivo, considerando apenas as linhas estudadas e desarmes que haviam sido ocasionados por descargas atmosféricas. Os dados foram resumidos de forma automatizada em Python e, dessa forma, foi gerado outro arquivo com apenas as seguintes colunas:

- Data – Contêm a data de cada desarme;
- Linha – Contêm o nome de cada linha de transmissão;
- Desarmes – Contêm a quantidade de desarmes que ocorreram conforme a data;

3.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DESARMES POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS COM OS DADOS ESTRUTURAIS DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO

Na etapa de análise estatística dos dados de desarmes ocasionados por descargas atmosféricas com os dados estruturais das linhas de transmissão, foram realizadas análises para identificar quais variáveis dos dados estruturais estão mais relacionadas com os desarmes por descargas. Para a análise estatística, adotou-se uma análise exploratória, com algoritmo de clusterização de K-means, na qual os dados foram analisados através de formação de grupos com características semelhantes, com base na proximidade entre os pontos das variáveis estruturais e da ocorrência de desarmes por descargas atmosféricas (Kapoor; Singhal, 2017).

O algoritmo de K-means foi implementado em linguagem de programação Python, através do arquivo Cluster.py presente no Apêndice D, para isso os dados de análise do algoritmo foram os dados estruturais das linhas de transmissão e os dados de ocorrências de desarmes por descargas atmosféricas. Antes da aplicação do algoritmo, os dados foram organizados e analisados, de modo a evitar a influência de diferenças de escala entre as variáveis analisadas.

Para definir a quantidade de *clusters* a serem utilizados, foi adotado o método elbow, também conhecido como método do cotovelo, normalmente utilizado em conjunto com análises de clusterização com K-means. Esse método consiste no teste da variância dos dados conforme o número de clusters (Dias, s.d.). Assim, o valor ótimo de clusters a serem utilizado será aquele no qual, através da visualização do gráfico do cotovelo, não houver ganho em relação ao aumento de clusters.

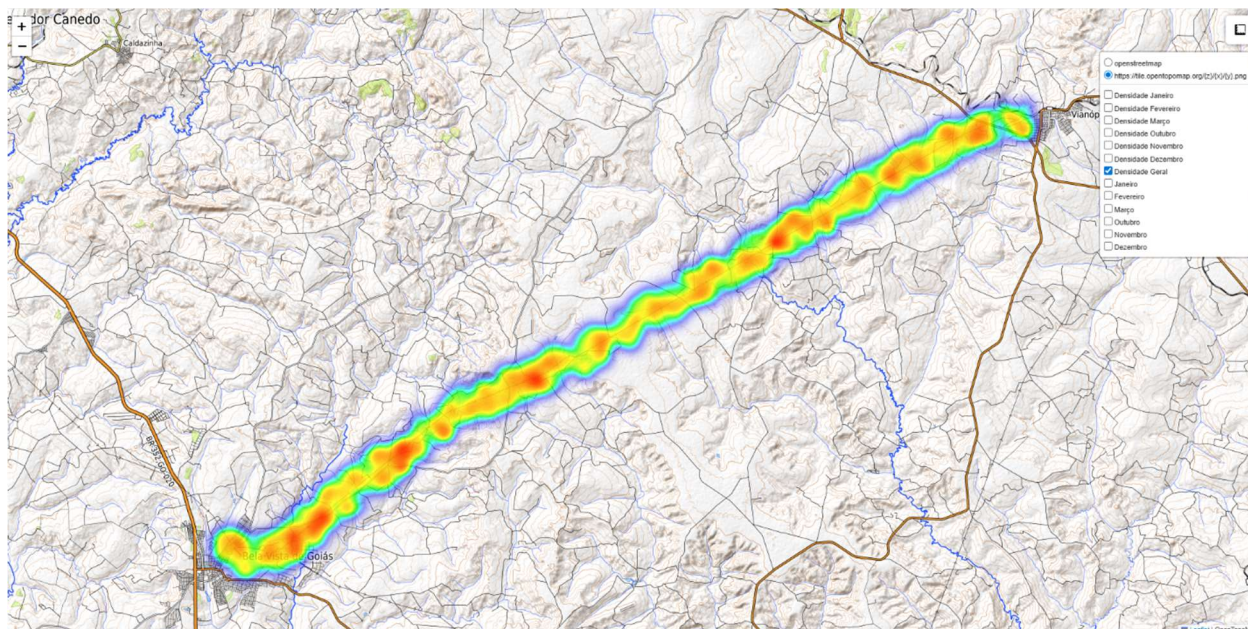
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir das análises estatísticas realizadas e discussões acerca da realização do estudo. A análise dos dados foi realizada por meio de dois métodos: a Correlação de Pearson, utilizada para identificar o grau de associação linear entre as variáveis climáticas e descargas atmosféricas, e a Clusterização K-means, aplicada nos dados de desarmes por descargas atmosféricas e os dados estruturais das linhas de transmissão.

4.1 MAPA DE DENSIDADE CERÁUNICA

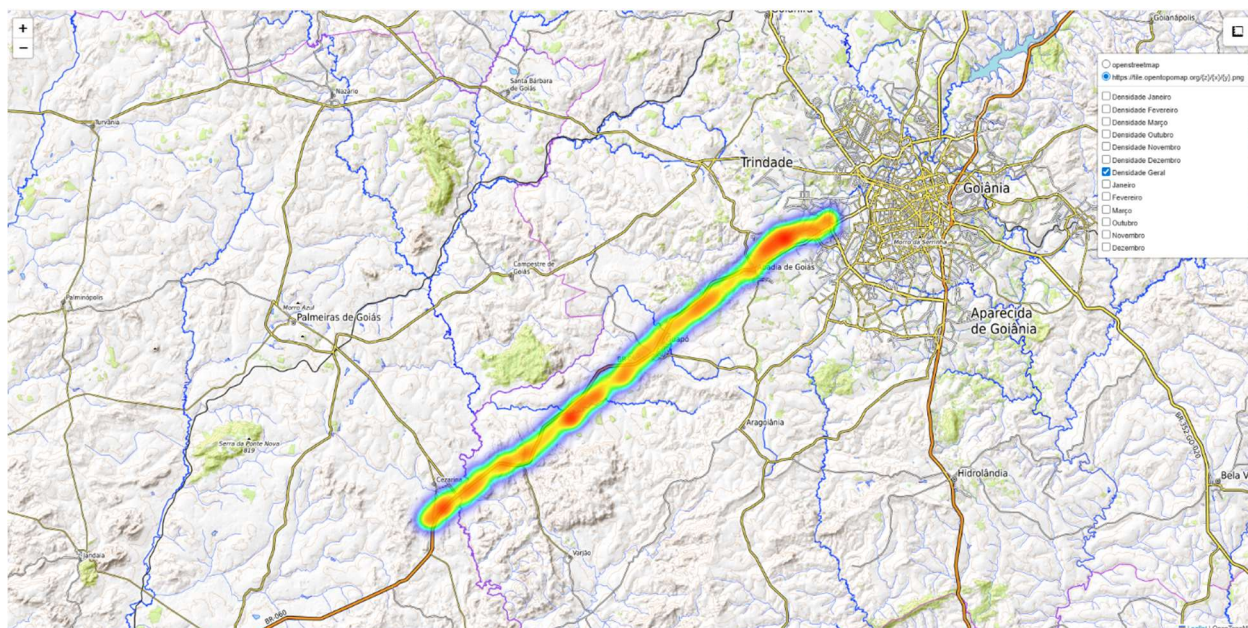
As Figuras 39 a 43 apresentam exemplos de mapas de densidade ceráunica, gerados por meio de script desenvolvido em Python, denominado Mapa_Raios.py. A seleção das linhas buscou abranger diferentes características geográficas e níveis de incidência, garantindo uma análise representativa do desempenho do algoritmo em cenários distintos.

Figura 38 - Mapa de Densidade Ceráunica da linha Bela Vista - Vianópolis



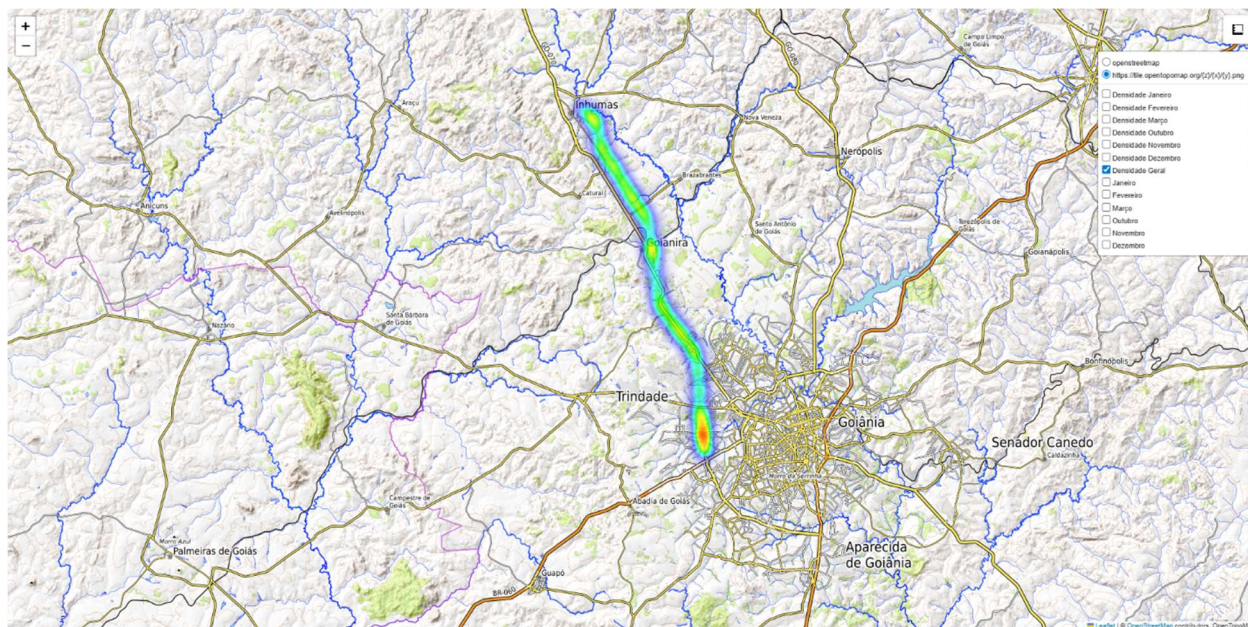
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 39 - Mapa de Densidade Cerâmica da linha Eternit - Cezarina



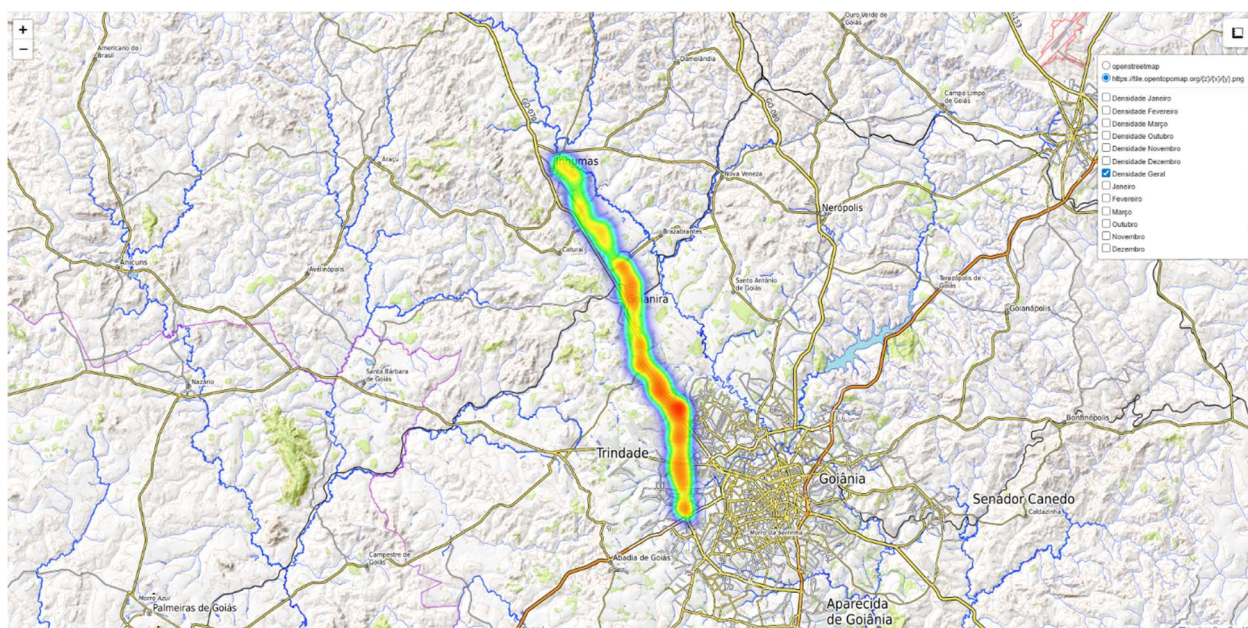
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 40 - Mapa de Densidade Cerâmica da linha Eternit - Goianira



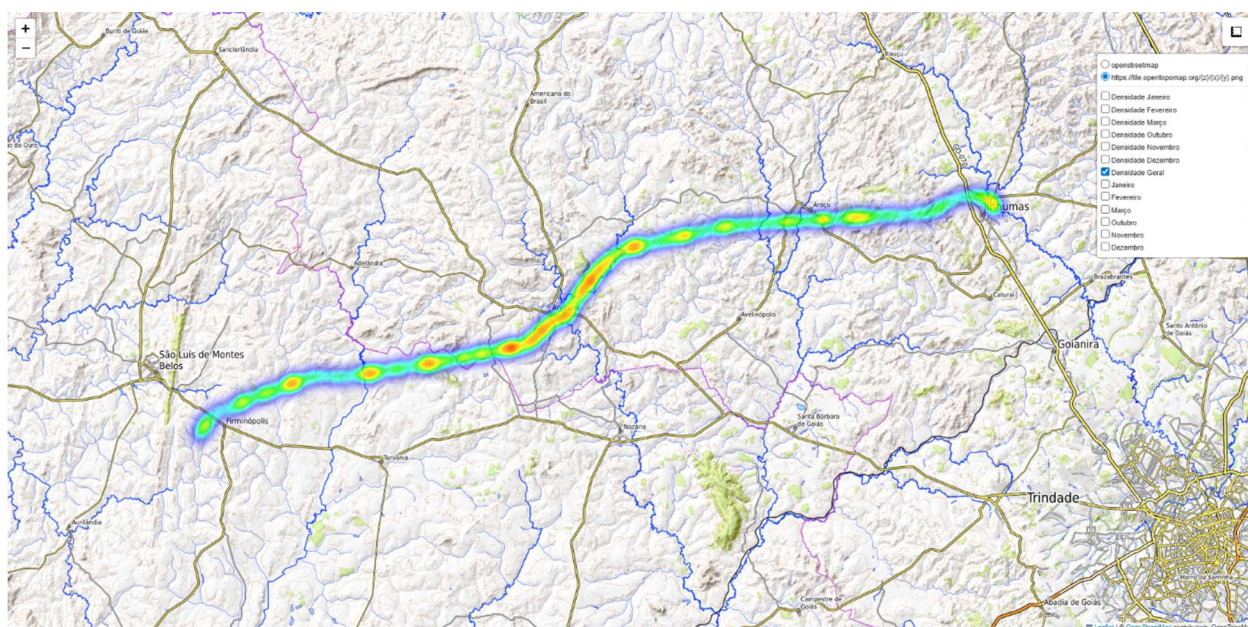
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 41 - Mapa de Densidade Cerâmica da linha Eternit - Inhumas



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 42 - Mapa de Densidade Cerâmica da linha Inhumas - Firminópolis



Fonte: Elaborado pelo autor.

Inicialmente, para a geração dos mapas, devido à ausência de dados de descargas atmosféricas em determinados meses do ano nas linhas de transmissão, em função do clima do estado de Goiás, convencionou-se a escolha dos dados referentes apenas aos meses chuvosos da região, sendo eles: janeiro, fevereiro, março, outubro, novembro e dezembro.

Por meio dos mapas de densidade cerâmica, foi possível analisar quais trechos das linhas de transmissão receberam maior incidência de descargas atmosféricas ao longo do tempo. Dessa forma, os pontos que apresentam as maiores concentrações de descargas atmosféricas, representados pela coloração vermelha, são caracterizados como pontos críticos das linhas de transmissão, devendo, assim, ser priorizados em ações de inspeção e manutenção.

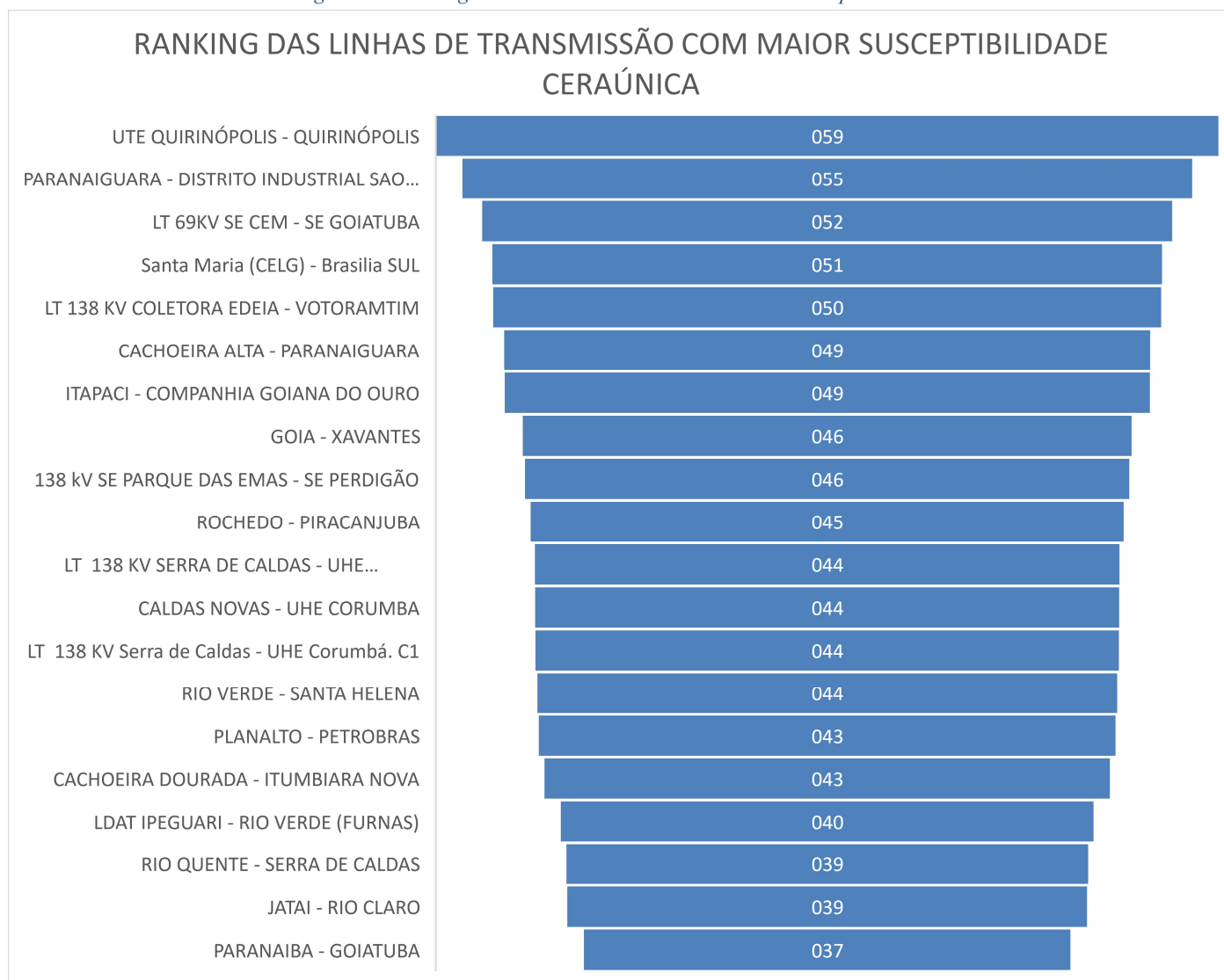
A análise dos resultados demonstra que não há um padrão ou uniformidade na distribuição das descargas atmosféricas ao longo das linhas. Esse comportamento está associado a outros fatores, como as variáveis climáticas locais e as características estruturais de cada linha. Assim, o mapa de densidade cerâmica apresenta-se como uma ferramenta relevante para a identificação preliminar de regiões mais vulneráveis.

Do ponto de vista prático, os resultados obtidos possibilitam o direcionamento otimizado de ações de manutenção preventiva e inspeção, priorizando os trechos críticos. Dessa forma, é possível obter-se a otimização de recursos por meio da concentração de atividades preventivas em regiões com maior probabilidade de ocorrência de desligamentos provocados por descargas atmosféricas.

4.2 DEFINIÇÃO DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO COM MAIOR SUSCEPTIBILIDADE CERÁUNICA

A Figura 44 apresenta o gráfico com o ranking das linhas de transmissão com maior susceptibilidade cerâmica, ou seja, com a maior quantidade de descargas atmosféricas por quilômetro:

Figura 43 - Ranking das linhas de transmissão com maior susceptibilidade cerâmica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para considerar um ranking de linhas com maior susceptibilidade de descargas atmosféricas, foram descartadas quaisquer linhas com extensões menores que 20km, pois nessas linhas, consideradas como ramais devido a curta extensão, os valores de susceptibilidade eram altos devido sua curta extensão.

Ao analisar os dados da Figura 44, observa-se que a linha UTE Quirinópolis - Quirinópolis apresenta a maior criticidade em termos de susceptibilidade cerâmica no estado de Goiás, registrando 59 descargas/km. Em seguida tem-se, como linhas com maior susceptibilidade cerâmica, a linha Paranaiguara – Distrito Industrial (55 descargas/km) e a linha LT 69 kV SE CEM – SE Goiatuba (52 descargas/km). Além disso, observa-se que a Região Sul do estado de Goiás concentra 80% dos dados analisados, evidenciando maior incidência de descargas atmosféricas em relação às demais regiões do estado no conjunto de dados estudado. Dessa forma, vale ressaltar que há uma concentração significativa de ativos, tanto em 69 kV quanto em 138 kV, operando em zonas com índices superiores a 40 descargas/km, o que reforça a necessidade de estratégias robustas de proteção contra surtos atmosféricos nessas regiões.

4.3 INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS NAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

A Tabela 2 apresenta a relação geral de variáveis climáticas com maior correlação às descargas atmosféricas encontradas:

Tabela 2 - Correlação geral das variáveis climáticas.

CORRELAÇÃO GERAL	
Variáveis	Correlação
Umidade – Mínima	0.651179808
Umidade – Média	0.644653102
Umidade – Máxima	0.592689154
Temperatura - Mínima	0.540552367
Precipitação – Valor	0.496736947
Vento a 10m - Direção	0.327645893
Temperatura - Média	0.244872347
Temperatura - Máxima	-0.035547365
Pressão MSL - Máxima	-0.044502301
Rajada a 10m - Velocidade Máxima	-0.203592973
Vento a 10m - Velocidade Máxima	-0.225759468
Rajada a 10m - Velocidade	-0.292836644

CORRELAÇÃO GERAL	
Variáveis	Correlação
Vento a 10m - Velocidade	-0.359937959
Vento a 10m - Velocidade Mínima	-0.36175182
Rajada a 10m - Velocidade Mínima	-0.402287091
Pressão MSL - Média	-0.4522392
Pressão MSL - Mínima	-0.493416615
Delta Temperatura	-0.62861376

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados acima revelam que, considerando o estado de Goiás, a variável climática com maior correlação às descargas atmosféricas é a Umidade – Mínima. Dessa forma, contrariando as expectativas iniciais, uma vez que, inicialmente, esperava-se que a variável com maior grau de correlação fosse a Precipitação – Valor.

Por outro lado, observou-se que a variável Delta Temperatura apresentou o coeficiente mais negativo (-0.628) na análise geral (Tabela 2), sugerindo uma relação inversamente proporcional significativa: dias com maiores amplitudes térmicas tendem a registrar menor incidência de descargas. Já variáveis como Temperatura Máxima e Pressão Atmosférica (MSL) apresentaram coeficientes próximos de zero, o que, segundo Figueiredo Filho e Silva Júnior (2009), sinaliza a inexistência de uma relação linear relevante entre esses fatores e as descargas atmosféricas.

Além da análise da correlação geral das variáveis climáticas, foi realizado o levantamento de quais variáveis climáticas tem maior correlação com as descargas atmosféricas em cada linha. A Tabela 3 destaca as variáveis climáticas que apresentaram os maiores coeficientes de correlação positiva apresentadas no Ranking da Figura 44:

Tabela 3 - Correlação das variáveis climáticas das linhas do ranking.

LINHA DE TRANSMISSÃO	VARIÁVEL MAIS INFLUENTE
UTE QUIRINÓPOLIS - QUIRINÓPOLIS	Umidade - Mínima
PARANAIGUARA - DISTRITO INDUSTRIAL SAO SIMAO	Precipitação - Valor
LT 69KV SE CEM - SE GOIATUBA	Umidade - Mínima
Santa Maria (CELG) - Brasília SUL	Umidade - Média
LT 138 KV COLETORA EDEIA - VOTORAMTIM	Umidade - Mínima

LINHA DE TRANSMISSÃO	VARIÁVEL MAIS INFLUENTE
CACHOEIRA ALTA - PARANAIGUARA	Umidade - Média
ITAPACI - COMPANHIA GOIANA DO OURO	Umidade - Média
GOIA – XAVANTES	Umidade - Média
138 kV SE PARQUE DAS EMAS - SE PERDIGÃO	Precipitação - Valor
ROCHEDO – PIRACANJUBA	Umidade - Mínima
LT 138 KV SERRA DE CALDAS - UHE CORUMBÁ. C2	Umidade - Mínima
CALDAS NOVAS - UHE CORUMBA	Umidade - Mínima
LT 138 KV Serra de Caldas - UHE Corumbá. C1	Umidade - Mínima
RIO VERDE - SANTA HELENA	Umidade - Mínima
PLANALTO – PETROBRAS	Precipitação - Valor
CACHOEIRA DOURADA - ITUMBIARA NOVA	Umidade - Mínima
LDAT IPEGUARI - RIO VERDE (FURNAS)	Umidade - Mínima
RIO QUENTE - SERRA DE CALDAS	Umidade - Mínima
JATAI - RIO CLARO	Umidade - Mínima
PARANAIBA – GOIATUBA	Umidade - Mínima

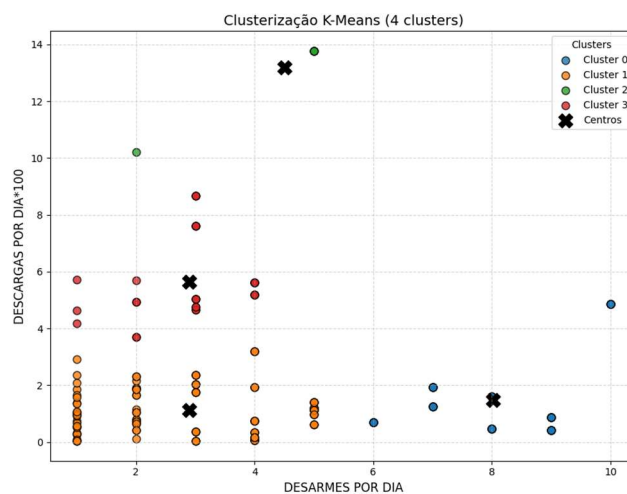
Fonte: Elaborado pelo autor.

Através dos resultados da Tabela 3, evidencia-se que a variável Umidade – Mínima possui a maior correlação com as descargas atmosféricas, assim estando presente como variável mais influente na maior parte das linhas de transmissão.

4.4 RELAÇÃO DE VARIÁVEIS ESTRUTURAIS COM AS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS E DESARMES

A clusterização final permitiu a identificação de grupos de linhas de transmissão com comportamentos semelhantes quanto aos desarmes, conforme pode ser visto na Figura 45. Após a visualização gráfica, também se foi gerada uma planilha com os dados analisados através do algoritmo de K-means. Essa etapa permitiu uma visualização mais detalhada e com um novo filtro, os clusters, assim sendo possível analisar os dados de cada cluster separadamente.

Figura 44 - Resultado da clusterização K-means.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir do gráfico de clusterização gerado, identificaram-se quatro clusters. O cluster 0 apresentou elevada quantidade de desarmes e baixa incidência de descargas atmosféricas; o cluster 1 exibiu baixos índices em ambos os parâmetros; o cluster 2 caracterizou-se por uma baixa quantidade de desarmes frente a uma elevada incidência de descargas; e, por fim, o cluster 3 apresentou baixa quantidade de desarmes e uma quantidade mediana de descargas atmosféricas por dia.

Com os resultados obtidos por meio da planilha com os dados dos clusters, foi possível analisar, por meio de um algoritmo de agrupamento (clustering) em linguagem Python denominado *Classificacao_Variaveis.py*, quais são as variáveis estruturais predominantes em cada cluster, conforme pode ser visto na Tabela 4, entendendo-se, assim, que essas variáveis estariam ligadas à quantidade de desarmes por descargas atmosféricas de cada cluster.

Tabela 4 - Variáveis predominantes em cada cluster

Cluster	Característica	Mais frequente	Percentual (%)
0	CABO CONDUTOR	ACSR 266,8	64
0	CABO PARA-RAIO	5/16	38
0	TIPO DE ISOLADOR	10"DV	66
0	TIPO POSTE	CONC.	56
0	TIPO CRUZ	CONC.	56
0	CONFIGURAÇÃO	VARIÁVEL	52
1	CABO CONDUTOR	ACSR 266,8	62,38
1	CABO PARA-RAIO	5/16 / (Não Tem)	42,57
1	TIPO DE ISOLADOR	10"DV	62,38
1	TIPO POSTE	CONC.	62,38
1	TIPO CRUZ	CONC.	59,41
1	CONFIGURAÇÃO	VARIÁVEL	58,42
2	CABO CONDUTOR	ACSR 266,8	83,33

Cluster	Característica	Mais frequente	Percentual (%)
2	CABO PARA-RAIO	5/16	50
2	TIPO DE ISOLADOR	10"DV	83,33
2	TIPO POSTE	CONC.	66,67
2	TIPO CRUZ	CONC.	66,67
2	CONFIGURAÇÃO	VARIÁVEL	83,33
3	CABO CONDUTOR	ACSR 266,8	55,17
3	CABO PARA-RAIO	5/16	44,83
3	TIPO DE ISOLADOR	10"DV	75,86
3	TIPO POSTE	CONC.	68,97
3	TIPO CRUZ	CONC.	65,52
3	CONFIGURAÇÃO	SIMPLES T.	48,28

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a análise da Tabela 4, foi necessário aprofundar-se na análise das variáveis estruturais em relação aos desarmes provocados por descargas atmosféricas, verificando, dessa vez, cada cluster isoladamente e variando as variáveis estruturais de forma individual. Para isso, cada variável estrutural foi alterada uma a uma, com o objetivo de verificar se mudanças específicas, como a substituição da variável Cabo Para-Raios de “5/16” para “Não tem”, resultariam em variações significativas na quantidade de desarmes ocasionados por descargas atmosféricas.

Com os resultados obtidos, não foi possível identificar fatores estruturais críticos associados aos desarmes em cada cluster, uma vez que as variações das variáveis estruturais não resultaram em mudanças significativas na quantidade de desarmes por descargas atmosféricas.

Esse comportamento pode ser explicado por três fatores principais. O primeiro é a padronização dos projetos. Linhas pertencentes à mesma classe de tensão são dimensionadas para atender ao mesmo Nível Básico de Isolamento (NBI), independentemente de utilizarem estruturas de concreto ou metálicas. Dessa forma, o desempenho elétrico tende a ser semelhante, mesmo quando há diferenças construtivas entre os componentes.

O segundo fator é a ausência de dados referentes à resistência de aterramento das torres na modelagem adotada. Essa variável é, do ponto de vista físico, uma das mais relevantes para a ocorrência de *backflashovers*. Sua ausência pode ter reduzido a capacidade do modelo de captar a real influência das demais características estruturais.

Por fim, deve-se considerar as limitações do próprio método de clusterização empregado. Conforme discutido por Miraftebadeh et al. (2023), o algoritmo K-means apresenta restrições na identificação de relações não lineares complexas e na formação de agrupamentos com formatos irregulares. Essa característica pode ter dificultado a separação mais precisa de grupos

de risco quando a análise se baseou apenas em variáveis categóricas relacionadas aos componentes das linhas.

Dessa forma, não foi possível estabelecer uma relação direta entre as variáveis estruturais analisadas e a ocorrência de desarmes, não sendo possível, portanto, propor um plano de manutenção específico para prevenir futuros desarmes por descargas atmosféricas nas linhas de transmissão em Goiás.

4.5 PROPOSTA PARA MELHORIA NA CONCESSIONÁRIA

Inicialmente, compreende-se que se torna viável o uso do mapa de densidade cerâmica para a manutenção preventiva de linhas de transmissão, visando à diminuição dos desarmes ocasionados por descargas atmosféricas, por meio da instalação otimizada de cabos para-raios e para-raios em regiões críticas específicas de cada linha de transmissão, havendo, assim, vantagem econômica para a concessionária.

Além disso, torna-se imprescindível a incorporação da variável climática umidade mínima nos alertas do setor de manutenção de linhas de transmissão da concessionária. Dessa forma, facilita-se o atendimento de emergências, por meio do aumento do efetivo de equipes técnicas durante temporais.

Por fim, conforme os resultados das variáveis estruturais analisadas anteriormente, entende-se que as características estruturais, considerando as variáveis avaliadas de forma geral, não garantem, por si só, a confiabilidade das linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas. Dessa forma, torna-se necessária uma análise mais detalhada, linha por linha, bem como a consideração de outras variáveis relevantes, além da confirmação das causas reais dos desarmes, a fim de evitar generalizações indevidas. Nesse contexto, não se mostra tecnicamente nem economicamente viável, de forma generalizada, a instalação de para-raios ou cabos para-raios, nem a substituição de características estruturais ao longo da linha, como medida única para evitar desarmes por descargas atmosféricas.

5. CONCLUSÕES

Este estudo avaliou como as linhas de transmissão do estado de Goiás funcionam frente às descargas atmosféricas. O trabalho buscou identificar os trechos mais problemáticos e relacionar as falhas a fatores climáticos e estruturais das linhas. Foram utilizados dados do Sistema de Monitoramento Ambiental Climático (SMAC) em conjunto com scripts em Python, e observou-se que as descargas atmosféricas não ocorrem de forma uniforme nas linhas de transmissão do estado. Dessa forma, esse comportamento impacta a confiabilidade e a qualidade do sistema elétrico da região.

Os resultados mostraram que a região Sul de Goiás é a área mais impactada por descargas atmosféricas, concentrando cerca de 80% dos registros analisados. Entre as linhas estudadas, a LT UTE Quirinópolis – Quirinópolis destacou-se com o maior índice de susceptibilidade, registrando 59 descargas/km, seguida pelas linhas Paranaiguara – Distrito Industrial e SE CEM – SE Goiátuba. A identificação de que uma parcela significativa dos ativos opera em zonas com índices superiores a 40 descargas/km reforça a hipótese de que estratégias de proteção diferenciadas são fundamentais nessas localidades.

Entretanto, os resultados devem ser interpretados considerando as limitações das metodologias estatísticas utilizadas. A Correlação de Pearson indicou a umidade mínima como a variável climática com maior associação às descargas atmosféricas. Contudo, esse coeficiente mede apenas a intensidade da relação linear entre variáveis, não permitindo afirmar, por si só, a existência de causalidade. Além disso, fatores não considerados neste estudo, como topografia e níveis de poluição atmosférica, podem influenciar o comportamento observado.

Da mesma forma, o uso do algoritmo K-means teve caráter exploratório. Como o método é sensível à escolha inicial dos centroides e assume agrupamentos de formato aproximadamente esférico, a ausência de uma relação clara entre componentes estruturais e desarmes pode estar associada tanto à complexidade não linear do fenômeno quanto às limitações do próprio algoritmo na modelagem de dados de sistemas elétricos, que apresentam elevada variabilidade.

Apesar dessas limitações, a elaboração dos mapas de densidade cerâmica mostrou-se uma ferramenta prática e relevante para a concessionária. O mapeamento possibilita a identificação preliminar de áreas críticas, contribuindo para o direcionamento mais eficiente de inspeções e manutenções preventivas, com melhor aproveitamento de recursos técnicos e financeiros.

Como limitação adicional, o estudo considerou apenas os meses de maior incidência de chuvas (janeiro a março e outubro a dezembro). Para trabalhos futuros, recomenda-se ampliar a série histórica para um período superior a cinco anos, bem como empregar métodos estatísticos

mais robustos para análise inferencial. Sugere-se ainda a incorporação de dados referentes à resistência de aterramento das torres, variável que pode influenciar diretamente o desempenho da blindagem das linhas.

Por fim, a integração entre monitoramento climático e análise estatística de dados operacionais, ainda que em caráter exploratório, mostrou-se relevante para o aprimoramento da confiabilidade do sistema elétrico. Os resultados contribuem para uma melhor compreensão do comportamento das linhas frente às descargas atmosféricas, oferecendo subsídios técnicos para a redução de impactos econômicos e sociais no estado de Goiás.

6. REFERÊNCIAS

1. ALMEIDA, Geraldo R. de. Aterramento em linhas de transmissão. Intelli, 18 jan. 2022. Disponível em: <https://www.intelli.com.br/base-de-conhecimento/artigos-tecnicos/aterramento-em-lt>. Acesso em: 5 ago. 2025.
2. ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Fundamentos do Setor Elétrico [curso online]. Brasília: Escola Virtual da ANEEL, 2024. Disponível em: <https://ead.aneel.gov.br/#/instituicao/aid/curso/24/informacoes>. Acesso em: 10 jun. 2025.
3. ASSOCIAÇÃO DE ENGENHEIROS, ARQUITETOS E AGRÔNOMOS DA REGIÃO DE RIBEIRÃO PRETO (AEAARP). Torres de energia. Disponível em: <https://aeaarp.org.br/torres-de-energia/>. Acesso em: 28 jul. 2025.
4. BEZERRA, Maurício. Aterramento de estruturas de linhas de transmissão. Transmissão 108196393, 25 jun. 2020. Disponível em: <https://transmissao108196393.com/2020/06/25/aterramento-de-estruturas-de-linhas-de-transmissao/>. Acesso em: 5 ago. 2025.
5. BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Sistema de Informações de Energia – SIEBRASIL. Disponível em: <https://www.mme.gov.br/SIEBRASIL/consultas/reporte-dato42-jerarquizado.aspx?oc=30183&or=30184&ss=2&v=1>. Acesso em: 16 jul. 2025.
6. CAMARGO, Maurício Alves. Transmissão de Energia Elétrica: aspectos fundamentais. 3. ed. São Paulo: EdUSP, 2011.
7. CLARKE. Órgãos do setor elétrico. Disponível em: <https://clarke.com.br/post/orgaos-do-setor-eletrico/>. Acesso em: 10 jun. 2025.
8. CONFEA – CONSELHO FEDERAL DE ENGENHARIA E AGRONOMIA. Congresso Técnico-Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC, 2023, Recife. Anais [...]. Brasília: CONFEA, 2023.

9. CUNHA, Leandro Veloso. Avaliação de métodos de mitigação dos efeitos de descargas atmosféricas em linhas de transmissão. 2016. 86 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016.
10. DIAS, Gabriel. *K-means clustering e método do cotovelo*. RPubS, [s.d.]. Disponível em: <https://rpubs.com/diascodes/770518>. Acesso em: 30 dez. 2025.
11. ELETROBRAS. Sobre a Eletrobras. Disponível em: <https://eletrobras.com/pt/Paginas/Sobre-a-Eletrobras.aspx>. Acesso em: 9 jun. 2025.
12. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Matriz Energética e Elétrica. Rio de Janeiro, [2025]. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 16 jul. 2025.
13. ENEL DISTRIBUIÇÃO. PM-Br 510.30.0 – Cavalote. Fortaleza, 2019. Desenho técnico, 4 f. Disponível em: <https://www.eneldistribuicao.com.br/ce/documentos/PM-Br%20510.30.0%20-%20Cavalote.pdf>. Acesso em: 29 jul. 2025.
14. EXAME. *10 frases de Thomas Edison*. Disponível em: <https://classic.exame.com/ciencia/10-frases-de-thomas-edison/>. Acesso em: 17 jan. 2026.
15. FIDALGO, João Emanuel Lós Reis. Maximização de receita de concessionária de transmissão de energia elétrica através da otimização da manutenção. 2007. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
16. FIGUEIREDO FILHO, Dalson Britto; SILVA JÚNIOR, José Alexandre da. Desvendando os mistérios do coeficiente de correlação de Pearson (r). *Política Hoje*, Recife, v. 18, n. 1, p. 115– 146, 2009.

17. FUCHS, Rubens Dario. Transmissão de energia elétrica: linhas aéreas: teoria das linhas em regime permanente. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos; Itajubá: Escola Federal de Engenharia, 1977. v. 1.

18. GOMES, Antônio Claret S.; ABARCA, Carlos David G.; FARIA, Eliada Antonieta S. T.; FERNANDES, Heloísa Helena de O. O setor elétrico. In: PINHEIRO, Armando Castelar; GIAMBIAGI, Fábio (orgs.). Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social: 50 anos. Rio de Janeiro: Editora Dbá, 2002. p. 234-254.

19. GÖNEN, Turan. Electric Power Transmission System Engineering: Analysis and Design. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2009.

20. HEDMAN, D.E. Teorias das Linhas de Transmissão II. Rio Grande do Sul: Santa Maria, 1978.

21. INSTITUTO DE ENERGIA E AMBIENTE – USP. Descargas atmosféricas: conheça seus impactos e os sistemas de proteção. IEE/USP, 2023. Disponível em: <https://www.iee.usp.br/noticia/descargas-atmosfericas-conheca-seus-impactos-e-os-sistemas-de-protecao/>. Acesso em: 7 ago. 2025.

22. INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Sistema elétrico. São José dos Campos: INPE, 2024. Disponível em: <http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/infor/relampagos.e.efeitos/sistema.eletrico.php>. Acesso em: 11 abr. 2025.

23. INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Descargas atmosféricas. Disponível em: <http://www.inpe.br/webelat/rindat/menu/desc.atm/#:~:text=Descargas%20atmosf%C3%A9ricas%20s%C3%A3o%20descargas%20el%C3%A9tricas,em%20geral%20dentro%20de%20tempestades/>. Acesso em: 6 ago. 2025.

24. INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Tipos de relâmpagos. Disponível em: <http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/relamp/relampagos/tipos.php>. Acesso em: 5 ago. 2025.
25. INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. O que são os relâmpagos? Disponível em: <http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/relamp/relampagos/definicao.php>. Acesso em: 5 ago. 2025.
26. JESUS, Gustavo Silva de. Estudo das tensões induzidas por descargas atmosféricas em linhas de transmissão. 2011. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2011.
27. JOÃO PAULO. O campo da energia elétrica no Brasil de 1880 a 2002. Revista de Administração Pública, Rio de Janeiro, v. 37, n. 5, p. 821-841, 2009. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rap/a/NWxd9HmK8wJBGKMPq6GcLqz/>. Acesso em: 12 abr. 2025.
28. KAGAN, Nelson; OLIVEIRA, Carlos César Barioni de; ROBBA, Ernesto João. Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica. 1. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2005. ISBN 85-212-0355-1.
29. KAPOOR, Akanksha; SINGHAL, Abhishek. A comparative study of K-means, K-means++ and fuzzy C-means clustering algorithms. In: *3rd IEEE International Conference on Computational Intelligence and Communication Technology (IEEE-CICT)*. Índia, 2017. p. 1–6.
30. MARINELLI, Igor. Entenda as diferenças entre falha, defeito e pane. Revista Manutenção, 2 jun. 2021. Disponível em: <https://revistamanutencao.com.br/literatura/tecnica/manutencao/entenda-as-diferencas-entre-falha-defeito-e-pane.html>. Acesso em: 7 ago. 2025.

31. MEGAWHAT. Transmissão de energia elétrica. Acesso em: 11 de abril de 2025, disponível em: megawhat.energy: <https://megawhat.energy/verbetes/412/transmissao-de-energia-eletrica>.
32. MENDES, F. R.; OLIVEIRA, C. S.; FERREIRA, A. G. Impacto das descargas atmosféricas no sistema elétrico brasileiro. *Revista de Engenharia Elétrica*, São Paulo, v. 12, n. 2, p. 45-53, 2018.
33. MENDONÇA, Alisson Henrique Duarte França de; ARAÚJO, Francisco José Costa. Blindagem de linhas de transmissão através do posicionamento dos cabo-guardas. In: CONGRESSO TÉCNICO-CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA – CONTECC, 2023, Recife. Anais [...]. Brasília: CONFEEA, 2023.
34. MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. INPE avalia prejuízos causados por raios. 15 jan. 2007. Disponível em:
<http://www.inpe.br/noticias/noticia.php?Cod_Noticia=936#:~:text=Seu%20preju%C3%ADzo%20est%C3%A1%20avaliado%20em,50%20milh%C3%B5es>
35. MIRAFATABZADEH, S. M. et al. K-means and alternative clustering methods in modern power systems. *IEEE Access*, v. 11, p. 119530-119556, 2023.
36. SHIKIDA, C. D.; MONASTERIO, L.; NERY, P. F. (org.). *Guia brasileiro de análise de dados: armadilhas & soluções*. Brasília: Enap, 2021.

APÊNDICE A – SCRIPT PUXARDADOS_RAIOS.PY

```
import pytesseract
import pyautogui
import time
import webbrowser
import datetime
from dateutil.relativedelta import relativedelta

pytesseract.pytesseract.tesseract_cmd =
r"C:\Users\kauan\AppData\Local\Programs\Tesseract-OCR\tesseract.exe"

def exportar_dados(data_inicio_str, data_fim_str):

    pyautogui.moveTo(1113, 640)
    time.sleep(3)
    pyautogui.click(1113, 640)
    time.sleep(3)
    pyautogui.click(906, 636)
    time.sleep(3)
    pyautogui.moveTo(961, 497)
    time.sleep(3)
    pyautogui.scroll(-100)
    time.sleep(3)
    pyautogui.click(898, 563)
    time.sleep(3)
    pyautogui.click(906, 636)
    time.sleep(3)

    pyautogui.click(840, 532)
    time.sleep(2)
    pyautogui.hotkey('ctrl', 'a')
    time.sleep(1)
    pyautogui.hotkey('delete')
    time.sleep(1)
    pyautogui.write(data_inicio_str)
    time.sleep(5)

    pyautogui.click(1049, 531)
    time.sleep(1)
    pyautogui.hotkey('ctrl', 'a')
    time.sleep(1)
    pyautogui.hotkey('delete')
    time.sleep(1)
    pyautogui.write(data_fim_str)
    time.sleep(5)

    pyautogui.click(858, 805)
```



```

time.sleep(5)
pyautogui.write('*****') # E-mail para recebimento dos dados
time.sleep(5)

pyautogui.click(767, 855)
time.sleep(10)

def puxar_dados():
    webbrowser.open('https://smac.climatempo.com.br/aconteceAgora/monitoramento')
    time.sleep(30)

    screenshot = pyautogui.screenshot()
    texto = pytesseract.image_to_string(screenshot)

    if "Acesse" in texto:
        print("Fazendo login...")
        pyautogui.click(1040, 512)
        time.sleep(3)
        pyautogui.write('*****') # Meu login na página
        time.sleep(2)
        pyautogui.click(1071, 582)
        time.sleep(2)
        pyautogui.write('*****') # Senha para entrar na página
        time.sleep(2)
        pyautogui.click(1105, 674)
        time.sleep(10)

    print("Iniciando automação de exportação de dados...")

    pyautogui.click(1705, 185)
    time.sleep(3)
    pyautogui.click(1592, 399)
    time.sleep(3)
    pyautogui.click(1119, 921)
    time.sleep(5)
    pyautogui.click(966, 316)
    time.sleep(2)
    pyautogui.click(836, 406)
    time.sleep(2)
    pyautogui.click(949, 399)
    time.sleep(2)
    pyautogui.click(909, 452)
    time.sleep(2)
    pyautogui.click(1044, 351)
    time.sleep(2)

    data_atual = datetime.date(2016, 1, 1)
    data_final = datetime.date(2024, 12, 31)
    primeira_execucao = True

```

```
while data_atual <= data_final:
    inicio = data_atual.replace(day=1)
    fim = (inicio + relativedelta(months=1)) - datetime.timedelta(days=1)

    data_inicio_str = inicio.strftime('%d/%m/%Y, 00:00:00')
    data_fim_str = fim.strftime('%d/%m/%Y, 23:59:59')

    print(f"Exportando dados de {data_inicio_str} até {data_fim_str}")

    if primeira_execucao:
        pyautogui.click(830, 740)
        time.sleep(5)
        primeira_execucao = False

    exportar_dados(data_inicio_str, data_fim_str)

    pyautogui.click(1119, 921)
    time.sleep(2)

    data_atual = inicio + relativedelta(months=1)

puxar_dados()
```

APÊNDICE B – SCRIPT UNIFICACAO.PY

```
import pandas as pd
import os

pd.set_option('display.max_columns', None)
pd.set_option('display.max_rows', None)
pd.set_option('display.width', None)

def juntar_tudo(caminho_raios, nome_guia_raios, caminho_variaveis,
output_excel=False):
    df_raios = pd.read_excel(caminho_raios, sheet_name=nome_guia_raios)
    variaveis = pd.read_excel(caminho_variaveis, sheet_name=None)

    variaveis.pop('Vento a 10m - Direção Cardial', None) # Descartar essa aba

    for nome_guia in variaveis.keys():
        print("Segue os nome_guia:")
        print(nome_guia)
        df_raios[nome_guia] = ''

    for nome_guia in variaveis.keys():
        df_variavel = variaveis[nome_guia]

        # Nome da coluna com o nome da linha de transmissão nas abas de variáveis
        nome_coluna_linha_transmissao_variaveis = df_variavel.columns[0]
        print(nome_coluna_linha_transmissao_variaveis)

        for j in range(len(df_raios)):
            nome_linha_raios = df_raios.loc[j, 'Localidade']
            data_raio = df_raios.loc[j, 'Data e Hora'][0:10] # Pega a data no
formato YYYY-MM-DD

            # Filtra a linha da aba de variáveis correspondente à linha de
transmissão
            linha_variavel =
df_variavel[df_variavel[nome_coluna_linha_transmissao_variaveis] ==
nome_linha_raios]

            if not linha_variavel.empty:
                for coluna_data in df_variavel.columns[1:]: # Ignora a coluna
com o nome da linha
                    # Garante que está comparando strings de datas no mesmo
formato
                    if str(coluna_data)[0:10] == data_raio:
                        valor = linha_variavel[coluna_data].values[0]
                        df_raios.loc[j, nome_guia] = valor
                        break
```

```

        else:
            print(f"Linha de transmissão '{nome_linha_raios}' não encontrada
em '{nome_guia}'.")

    if output_excel:
        nome_arquivo = caminho_raios.split(os.sep)[-2]
        df_raios.to_excel(f"{nome_arquivo}_output.xlsx", header=True,
index=False)

    return df_raios

nomes_meses = ['Janeiro', 'Fevereiro', 'Março', 'Abril', 'Maio', 'Junho',
               'Julho', 'Agosto', 'Setembro', 'Outubro', 'Novembro', 'Dezembro']

meses = [f"{mes}_{ano}" for ano in range(2016, 2025) for mes in nomes_meses]

nome_guia_raios = "Minuto (página 1)"

base_raios = r'C:\Users\kauan\Desktop\IC\INH-ETR - Raios'
base_variaveis = r'C:\Users\kauan\Desktop\IC\INH-ETR - Variáveis'

for mes in meses:
    caminho_raios = os.path.join(base_raios, mes, 'relatorio_raios.xlsx')
    caminho_variaveis = os.path.join(base_variaveis, mes,
'relatorio_variaveis.xlsx')

    if os.path.exists(caminho_raios) and os.path.exists(caminho_variaveis):
        print(f"\n--- PROCESSANDO: {mes} ---")
        juntar_tudo(caminho_raios, nome_guia_raios, caminho_variaveis,
output_excel=True)
    else:
        print(f"\nArquivos não encontrados para o mês: {mes}")

```

APÊNDICE C – SCRIPT UNIFICACAO_FINAL.PY

```
import pandas as pd
import os

base_outputs = r'***' # pasta onde estão os output.xlsx
dfs = []

for root, dirs, files in os.walk(base_outputs):
    for file in files:
        if file.endswith('_output.xlsx'):
            caminho = os.path.join(root, file)
            print(f"Lendo: {caminho}")
            df = pd.read_excel(caminho)
            dfs.append(df)

# Unifica tudo em um único DataFrame
df_unificado = pd.concat(dfs, ignore_index=True)

# Salva a base final
df_unificado.to_excel('base_unificada.xlsx', index=False)

print("Base unificada criada com sucesso!")
```

APÊNDICE D – SCRIPT CLUSTER.PY

```
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
from sklearn.cluster import KMeans
import numpy as np

# Leitura dos dados
arquivo = 'relatorio_expandido_final.xlsx'
df = pd.read_excel(arquivo, sheet_name='Geral desarme+descarga')

# Colunas de interesse
x_col = 'DESARMES POR DIA'
y_col = 'DESCARGAS POR DIA*100'

# Limpeza
print(f"Linhas originais: {len(df)}")

df = df[[x_col, y_col]].dropna()
print(f"Após remover nulos: {len(df)}")

df = df[(df[x_col] != 0) & (df[y_col] != 0)]
print(f"Após remover zeros: {len(df)}")

# Dados para o K-Means
X = df[[x_col, y_col]].values

# Método do cotovelo
inertias = []
k_values = range(1, 11)

for k_test in k_values:
    kmeans_temp = KMeans(n_clusters=k_test, random_state=42)
    kmeans_temp.fit(X)
    inertias.append(kmeans_temp.inertia_)

# Cálculo automático do cotovelo
pontos = np.array(list(zip(k_values, inertias)))

x1, y1 = pontos[0]
x2, y2 = pontos[-1]

distancias = []
for x0, y0 in pontos:
    numerador = abs((y2 - y1)*x0 - (x2 - x1)*y0 + x2*y1 - y2*x1)
    denominador = np.sqrt((y2 - y1)**2 + (x2 - x1)**2)
    distancias.append(numerador / denominador)
```

```

k_recomendado = k_values[np.argmax(distancias)]
print(f"\nNúmero de clusters sugerido: {k_recomendado}")

# Gráfico do cotovelo
plt.figure(figsize=(8, 5))
plt.plot(k_values, inertias, 'o-')
plt.axvline(k_recomendado, color='red', linestyle='--',
label=f'k={k_recomendado}')
plt.xlabel('k')
plt.ylabel('Inércia')
plt.title('Método do Cotovelo')
plt.grid(True, linestyle='--', alpha=0.6)
plt.legend()
plt.tight_layout()
plt.show()

# K escolhido manualmente
k = 4
print(f"\nAplicando K-Means com {k} clusters")

kmeans = KMeans(n_clusters=k, random_state=42)
df['Cluster'] = kmeans.fit_predict(X)

centros = kmeans.cluster_centers_
print("Centros dos clusters:")
print(centros)

# Gráfico final
plt.figure(figsize=(9, 7))
cores = plt.cm.tab10.colors

for i in range(k):
    dados = df[df['Cluster'] == i]
    plt.scatter(
        dados[x_col],
        dados[y_col],
        color=cores[i % len(cores)],
        label=f'Cluster {i}',
        edgecolor='black',
        s=60,
        alpha=0.8
    )

plt.scatter(
    centros[:, 0],
    centros[:, 1],
    color='black',
    marker='X',
    s=200,

```

```
    label='Centros'
)

plt.xlabel(x_col)
plt.ylabel(y_col)
plt.title(f'K-Means com {k} clusters')
plt.legend()
plt.grid(True, linestyle='--', alpha=0.5)
plt.tight_layout()
plt.savefig('grafico_clusters_geral.png')
plt.show()

print("\nColunas do DataFrame:")
for col in df.columns:
    print(col)
```


APÊNDICE E – SCRIPT CLASSIFICACAO_VARIAVEIS.PY

```
import pandas as pd
from sklearn.cluster import KMeans
import numpy as np
from openpyxl import Workbook

arquivo = 'relatorio_expandido_final.xlsx'
df = pd.read_excel(arquivo, sheet_name='Geral desarme+descarga')

x_col = 'DESARMES POR DIA'
y_col = 'DESCARGAS POR DIA*100'

df = df.dropna(subset=[x_col, y_col])
df = df[(df[x_col] != 0) & (df[y_col] != 0)]

X = df[[x_col, y_col]].values

k = 4
kmeans = KMeans(n_clusters=k, random_state=42)
df['Cluster'] = kmeans.fit_predict(X)

caracteristicas = [
    'CABO CONDUTOR',
    'CABO PARA-RAIO',
    'TIPO DE ISOLADOR',
    'TIPO POSTE',
    'TIPO CRUZ',
    'CONFIGURAÇÃO'
]

wb = Workbook()

ws_dados = wb.active
ws_dados.title = "DadosComCluster"

for col_i, col in enumerate(df.columns, start=1):
    ws_dados.cell(row=1, column=col_i, value=col)

for row_i, row in enumerate(df.values, start=2):
    for col_i, val in enumerate(row, start=1):
        ws_dados.cell(row=row_i, column=col_i, value=val)

ws_analise = wb.create_sheet("AnaliseClusters")
ws_analise.cell(row=1, column=1, value="Cluster")
ws_analise.cell(row=1, column=2, value="Característica")
ws_analise.cell(row=1, column=3, value="Mais frequente")
ws_analise.cell(row=1, column=4, value="Percentual (%)")
```

```

linha_excel = 2

for cluster_id in sorted(df['Cluster'].unique()):
    dados_cluster = df[df['Cluster'] == cluster_id]

    for col in caracteristicas:
        contagem = dados_cluster[col].value_counts()

        if not contagem.empty:
            mais_frequente = contagem.idxmax()
            porcentagem = round(contagem.max() / len(dados_cluster) * 100, 2)
        else:
            mais_frequente = "-"
            porcentagem = 0

        ws_analise.cell(row=linha_excel, column=1, value=cluster_id)
        ws_analise.cell(row=linha_excel, column=2, value=col)
        ws_analise.cell(row=linha_excel, column=3, value=mais_frequente)
        ws_analise.cell(row=linha_excel, column=4, value=porcentagem)

        linha_excel += 1

ws_geral = wb.create_sheet("AnaliseGeral")

ws_geral.cell(row=1, column=1, value="Característica")
ws_geral.cell(row=1, column=2, value="Valor mais frequente")
ws_geral.cell(row=1, column=3, value="Quantidade")
ws_geral.cell(row=1, column=4, value="Percentual (%)")

linha_geral = 2

for col in caracteristicas:
    contagem = df[col].value_counts()

    if not contagem.empty:
        mais_frequente = contagem.idxmax()
        quantidade = contagem.max()
        porcentagem = round(quantidade / len(df) * 100, 2)
    else:
        mais_frequente = "-"
        quantidade = 0
        porcentagem = 0

    ws_geral.cell(row=linha_geral, column=1, value=col)
    ws_geral.cell(row=linha_geral, column=2, value=mais_frequente)
    ws_geral.cell(row=linha_geral, column=3, value=quantidade)
    ws_geral.cell(row=linha_geral, column=4, value=porcentagem)

    linha_geral += 1

```