

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

EDUARDO BARBOSA MELLO PAIVA

Desenvolvimento de Método para Avaliação de Falhas em Linhas de  
Transmissão Utilizando Árvores de Decisão e Modelos de Markov

São Carlos

2023



EDUARDO BARBOSA MELLO PAIVA

Desenvolvimento de Método para Avaliação de Falhas em Linhas de  
Transmissão Utilizando Árvores de Decisão e Modelos de Markov

Dissertação<sup>1</sup> apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, sendo parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa de Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Sistemas Elétricos de Potência.

Orientador: Prof. Dr. Rogério Andrade Flauzino

São Carlos

2023

<sup>1</sup> Trata-se da versão corrigida da dissertação. A versão original se encontra disponível na EESC/USP que aloja o Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica.

## FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **EDUARDO BARBOSA MELLO PAIVA**.

Título da dissertação: "Desenvolvimento de método para avaliação de falhas em linhas de transmissão utilizando árvores de decisão e modelos de Markov".

Data da defesa: 24/02/2023.

### Comissão Julgadora

### Resultado

Prof. Associado **Rogério Andrade Flauzino**  
**(Orientador)**  
(Escola de Engenharia de São Carlos – EESC/USP)

*Aprovado*

Prof. Dr. **Eduardo Coelho Marques da Costa**  
(Escola Politécnica/EP-USP)

*Aprovado*

Prof. Dr. **Bruno Albuquerque de Castro**  
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP-Bauru)

*Aprovado*

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica:  
Prof. Associado **João Bosco Augusto London Junior**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:  
Prof. Titular **Murilo Araujo Romero**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

Paiva, Eduardo  
P142d      Desenvolvimento de Método para Avaliação de Falhas em Linhas de Transmissão Utilizando Árvores de Decisão e Modelos de Markov / Eduardo Paiva; orientador Rogério Flauzino. São Carlos, 2023.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Área de Concentração em Sistemas Elétricos de Potência -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2023.

1. Linhas de transmissão. 2. Árvores de Decisão. 3. Markov. 4. Manutenção. 5. Confiabilidade. I. Título.

Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

## **Dedicatória**

*Aos meus pais por não terem  
medido esforços para me tornar a  
pessoa e profissional que sou hoje.*

*Aos meus irmãos pelo  
companheirismo.*

*A minha esposa pelo amor, carinho  
e compreensão.*

## **Agradecimentos**

Ao meu orientador Prof. Dr. Rogério Andrade Flauzino pelo apoio, confiança e ensinamentos demonstrados durante a execução desta dissertação.

Aos meus pais Cláudia e Fernando, que não mediram esforços para que eu pudesse ter a melhor condição de vida e educação possíveis, que me permitiram chegar à condição de Mestrando.

Aos meus irmãos Renata e Marcelo, pelo carinho e companheirismo demonstrados durante todas nossas vidas.

A minha esposa Thais, por seu amor, apoio, compreensão e incentivo durante toda nossa vida juntos.

A toda equipe da ISA CTEEP, especialmente da TMxL e gestores Luiz Fernando Justo, Paulo César, Tarcísio Misael, Renato Pagotto e Rogério Lavandoscki, pela oportunidade oferecida e aprendizados constantes.

## **Epígrafe**

*“Quanto mais aumenta nosso conhecimento, mais evidente fica nossa ignorância”*

*John F. Kennedy*



## **Resumo**

PAIVA, E. B. M. (2023). *Desenvolvimento de Método para Avaliação de Falhas em Linhas de Transmissão utilizando Árvores de Decisão e Modelos de Markov*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2023.

Os modelos de Markov são extensamente aplicados para modelar sistemas sujeitos a diferentes estados durante o seu ciclo de vida, sendo muito úteis para a Engenharia da Manutenção, pois permitem o cálculo de probabilidades de falhas e defeitos em equipamentos. Este trabalho apresenta uma metodologia de aplicação dos Modelos de Markov em conjunto com Árvores de Decisão para avaliação de falhas e defeitos em linhas de transmissão do sistema da ISA CTEEP. O método proposto apresenta um Modelo de Markov adequado à linhas de transmissão (LT's), bem como o cálculo das probabilidades de transição do modelo através da utilização de dados existentes de manutenção. As Árvores de Decisão são também utilizadas, com o objetivo de identificar quais atributos de diferenciação entre as diferentes LT's consideradas mais contribuem para as taxas calculadas. Os resultados mostram que a taxa de falhas é crescente em relação à idade, e que os atributos mais relevantes para estas falhas são o nível de tensão, nível de agressividade corrosiva e comprimento.

**Palavras-chave:** Linhas de Transmissão, manutenção, confiabilidade, Markov, Árvores de Decisão

## **Abstract**

PAIVA, E. B. M. (2023). *Development of a Method of Evaluation of Transmission Line Failures using Decision Trees and Markov Models*. Master's Degree – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2023.

Markov Models are widely applied to model systems which are subject to different states during their lyfe cycle, and, for that reason, are useful to Maintenance Engineering, because they allow the calculation of equipment failure and defects probabilities. This work presents a methodology for applying Markov Models in conjunction with Decision Trees to evaluate failures and anomalies in ISA CTEEP's transmission lines system. The proposed method presents a Markov Model suitable to transmission lines, as well as the calculation of the transition probabilities using existing maintenance data. Subsequently, Decision Trees are utilized in order to identify which attributes of differentiation between the transmission lines most contribute for the calculates rates. The results show that the failure rate increases with the line's age, and the most relevant attributes for these failures are the voltage level, corrosion level and length.

**Keywords:** Transmission Lines, maintenance, reliability, Markov, Decision Trees, information gain

## Índice de Ilustrações

Figura 1 - Extensão de km de LT's na Rede Básica - 2019 x 2024. Fonte: [1] .....	18
Figura 2 - Perturbações no SEP por Tipo de Equipamento. Fonte: [1] .....	19
Figura 3 – Principais Causas de Perturbações em LT's da Rede Básica. Fonte: [1] .....	19
Figura 4 - Infográfico Básico da Metodologia Aplicada .....	20
Figura 5 - Componentes de uma LT. Fonte: autor .....	22
Figura 6 - Exemplos de Cabos Condutores. Fonte: [2] e [7] .....	26
Figura 7 - Alguns tipos de Espaçadores. Fonte: [8] .....	27
Figura 8 - Espaçadores em LT de 500kV. Fonte: [4] .....	27
Figura 9 – Emendas a Compressão e Pré-Formadas. Fonte: [9] e [10] .....	28
Figura 10 - Amortecedores Stockbridge, Festão e Helicoidais. Fonte: [2] e [11] .....	28
Figura 11 - Ferragens de Cabos Para-Raios. Suspensão com Grampos Convencionais e Oscilantes Preformados (acima) e Ancoragem com Grampos Passantes e Preformados (abaixo). Fonte: [12].....	30
Figura 12 - Esferas de Sinalização Aérea. Fonte: [11] .....	30
Figura 13 - Cabo Optical Ground-Wire (OPGW). Fonte: [16] .....	31
Figura 14 - Isoladores de Porcelana, Vidro e Poliméricos. Fonte: [17] e [18] .....	32
Figura 15 - Principais Componentes de Isoladores de Disco. Fonte: adaptado de [4] .....	33
Figura 16 - Principais Componentes de Isoladores Poliméricos. Fonte: adaptado de [11] .....	33
Figura 17 -Visão Geral dos Tipos de Isoladores utilizados em LTA's. Fonte: adaptado de [4] .....	34
Figura 18 – Comprimento de Seção (à esquerda), Distância de Arco (ao centro) e Distância de Escoamento (à direita) de Diferentes Tipos de Isoladores. Fonte: autor .....	35
Figura 19 – Ferragens Típicas de uma Cadeia de Suspensão com Grampo Convencional (à esquerda), Armado (à direita). Fonte: [2] .....	35
Figura 20 - Anéis de Corona. Fonte: [2] .....	36
Figura 21 – Cadeia de Suspensão em “V”. Fonte: [2].....	37
Figura 22 - Grampos de Ancoragem - Passagem (à esquerda) e Compressão (à direita). Fonte: [10] .....	38
Figura 23 - Exemplos de Tipos de Silhuetas de Linhas de Transmissão. Fonte: adaptado de [11] .....	41
Figura 24 - Fundações em Postes com Concreto no Fundo (acima), Concretagem da Base (meio) e Utilização de Mortos (abaixo). Fonte: [2] .....	42
Figura 25 - Fundações em Grelhas. Fonte: adaptado de [20] .....	43
Figura 26 – Fundações em Tubulão. Fonte: adaptado de [19].....	43
Figura 27 - Ancoragem em Rocha. Fonte: [2].....	44
Figura 28 – Fundações em Sapata. Fonte: adaptado de [19] .....	44
Figura 29 - Fundações Estaqueadas. Fonte: adaptado de [19].....	45
Figura 30 - Fundações para Estais. Fonte: adaptado de [19].....	45
Figura 31 - Aterramento Típico de Estrutura de LT. Fonte: [26].....	46
Figura 32 - Faixa de Servidão de LT. Fonte: autor .....	48
Figura 33 - Cabos com Corrosão. Fonte: [30] e [31] .....	51
Figura 34 - Tentos Rompidos em Cabo Condutor. Fonte: [30] .....	52
Figura 35 - Danos em Cabos Condutores em Interface com Espaçadores. Fonte: [31] .....	52

Figura 36 – Cabos com Sinais de Descargas. Fonte: [30].....	53
Figura 37 - Cabos engaiolados. Fonte: [30].....	53
Figura 38 - Emendas a Compressão com Problemas. Fonte: [31].....	54
Figura 39 - Anomalias em Esferas de Sinalização. Fonte: [30] e [31].....	55
Figura 40 – Corrosão em Isoladores de Vidro. Fonte: [4] .....	56
Figura 41 - Perfurações em Isoladores de Disco de Porcelana. Fonte: [4] .....	56
Figura 42 - Fratura Frágil e Flashunder em Isoladores Poliméricos. Fonte: adaptado de [34]	57
Figura 43 - Corrosão em Estruturas. Fonte: [31] .....	58
Figura 44 - Trincas na Fundação. Fonte: [35] .....	59
Figura 45 - Corrosão em Grelhas. Fonte: [35] .....	59
Figura 46 - Erosões e Invasões de Faixa em LT's. Fonte: [36].....	60
Figura 47 - Deep Learning como Parte do Machine Learning e Inteligência Artificial. Fonte: adaptado de [38] .....	64
Figura 48 - Categorização de Algoritmos de Machine Learning. Fonte: adaptado de [48] ....	66
Figura 49 - Exemplo de Árvore de Decisão. Fonte: adaptado de [50].....	67
Figura 50 - Modelo de Markov Simplificado com Dois Estados. Fonte: autor.....	71
Figura 51 - Processo da Metodologia Aplicada. Fonte: autor .....	73
Figura 52 – Curvas de Defeitos e Falhas em Função da Idade. Fonte: autor .....	74
Figura 53 - Modelo de Markov. Fonte: autor .....	74
Figura 54 - Árvores de Decisão e Atributos Mais Relevantes. Fonte: autor .....	75
Figura 55 – Qtde. x Níveis de Tensão e Comprimento x Níveis de Tensão das LT's Utilizadas no Modelo. Fonte: autor .....	78
Figura 56 – Idade e Idade x Comprimento das LT's Utilizadas no Modelo. Fonte: autor .....	78
Figura 57 – Regionais e Regionais x Comprimento das LT's Utilizadas no Modelo. Fonte: autor.....	79
Figura 58 – Qtde. de Circuitos e Qtde. de Circuitos x Comprimento das LT's Utilizadas no Modelo. Fonte: autor .....	79
Figura 59 – Mapa de Estações Meteorológicas do Estado de São Paulo. Fonte: [76].....	80
Figura 60 – Exemplo para Cálculo de IDW. Fonte: autor .....	81
Figura 61 – Estratificação de Descargas Atmosféricas/100km/ano x Nível de Tensão .....	82
Figura 62 – Níveis de Agressividade Corrosiva. Fonte: autor .....	83
Figura 63 – Distribuição de Anomalias x Componente nas LT's do Estudo. Fonte: autor .....	84
Figura 64 – Perturbações por Nível de Tensão e Causas nas LT's do Estudo. Fonte: autor ...	85
Figura 65 - Curva de Taxa de Falhas em Função da Idade .....	87
Figura 66 - Curva de Taxa de Defeitos em Função da Idade .....	88
Figura 67 - Modelo de Markov para os Dados do Estudo.....	90
Figura 68 - Árvore de Decisão para Falhas – Árvore Geral. Fonte: Autor .....	92
Figura 69 - Árvore de Decisão para Falhas – Exemplo 1. Fonte: autor .....	92
Figura 70 - Árvore de Decisão para Falhas – Exemplo 2. Fonte: autor .....	93
Figura 71 - Árvore de Decisão para Falhas – Exemplo 3. Fonte: autor .....	94
Figura 72 - Matriz de Confusão para Árvore de Decisão - Falhas. Fonte: autor.....	95

## Lista de Tabelas

Tabela 1 – Resumo dos Principais Componentes, Funções e Tipos em Linhas de Transmissão .....	48
Tabela 2 - Principais Componentes e Modos de Falha de Linhas de Transmissão.....	62
Tabela 3 – Classificação de Níveis de Agressividade Corrosiva .....	82
Tabela 4 - Banco de Dados de Exemplo .....	86
Tabela 5 - Comportamento por Faixa Etária.....	86
Tabela 6 - Comportamento por Idade .....	86
Tabela 7 - Exemplo de Banco de Dados de Variáveis Dependentes e Independentes para Árvore de Decisão .....	91

## Lista de Siglas e Abreviaturas

SEP – Sistema Elétrico de Potência

SIN – Sistema Interligado Nacional

EAT – Extra Alta Tensão

LTA – Linha de Transmissão Aérea

LT – Linha de Transmissão

ONS – Operador Nacional do Sistema

VANT – Veículo Aéreo Não Tripulado

IA – Inteligência Artificial

ML – *Machine Learning*

DL – *Deep Learning*

CART – *Classification and Regression Trees*

ID3 – *Iterative Dichotomizer*

## Sumário

1	INTRODUÇÃO .....	18
1.1	Contextualização e Objetivo.....	18
1.2	Organização da Dissertação.....	21
2	ASPECTOS CONSTRUTIVOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO AÉREAS.....	22
2.1	Introdução .....	22
2.2	Componentes de Linhas de Transmissão Aéreas .....	23
2.2.1	Cabos Condutores.....	23
2.2.2	Cabos Para-Raios e Ferragens .....	29
2.2.3	Isoladores e Ferragens do Condutor .....	31
2.2.4	Estruturas .....	38
2.2.5	Fundações.....	41
2.2.6	Sistema de Aterramento.....	45
2.2.7	Vão.....	47
2.3	Resumo do Capítulo .....	48
3	ASPECTOS DE MANUTENÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO AÉREAS.....	50
3.1	Introdução .....	50
3.2	Modos de Falha de Linhas de Transmissão Aéreas .....	50
3.2.1	Cabos Condutores.....	50
3.2.2	Cabos Para-Raios e Ferragens .....	54
3.2.3	Isoladores e Ferragens.....	55
3.2.4	Estrutura.....	57
3.2.5	Fundações.....	58
3.2.6	Sistema de Aterramento.....	59
3.2.7	Vão.....	60
3.3	Manutenção e Inspeção de Linhas de Transmissão Aéreas .....	60
3.4	Resumo do Capítulo .....	61
4	ASPECTOS SOBRE APRENDIZAGEM DE MÁQUINA, ÁRVORES DE DECISÃO E MODELOS DE MARKOV.....	63
4.1	Introdução .....	63
4.2	Árvores de Decisão .....	66
4.3	Modelos de Markov .....	69
4.4	Resumo do Capítulo .....	72
5	METODOLOGIA PROPOSTA .....	73

5.1	Introdução .....	73
5.2	Extração de Dados .....	76
5.2.1	Dados Gerais.....	78
5.2.2	Dados Meteorológicos.....	79
5.2.3	Dados de Agressividade Corrosiva.....	82
5.2.4	Anomalias .....	83
5.2.5	Perturbações .....	84
5.3	Curvas de Falhas e Defeitos em Função da Idade e Modelo de Markov.....	85
5.3.1	Curvas de Falhas e Defeitos .....	85
5.3.2	Modelo de Markov .....	89
5.4	Árvore de Decisão.....	90
5.5	Resumo do Capítulo .....	96
6	CONCLUSÕES .....	97
	REFERÊNCIAS .....	100
	APÊNDICE I – TEXTO DA ÁRVORE DE DECISÃO .....	106





# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização e Objetivo

O SEP - Sistema Elétrico de Potência é composto por uma enorme quantidade de subestações e linhas de transmissão. Dados de 2019 do ONS – Operador Nacional do Sistema mostram que a capacidade de transformação do SIN – Sistema Interligado Nacional é da ordem de 325.000MVA, com extensão de mais de 140.000km de linhas de transmissão. Trata-se de um sistema robusto e em constante expansão, sendo que a previsão é de um aumento de 28% na extensão de LT's até 2024, apenas na EAT - Extra Alta Tensão, também conhecida como Rede Básica, que engloba instalações de tensões iguais ou superiores a 230kV. Na Figura 1 se mostra esta evolução prevista.

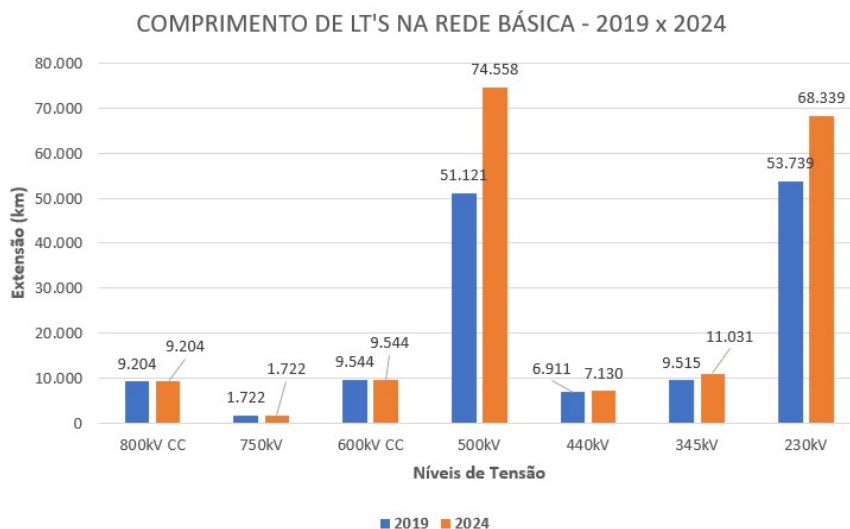


Figura 1 - Extensão de km de LT's na Rede Básica - 2019 x 2024. Fonte: [1]

Todo este vasto parque é composto por diversos equipamentos (transformadores, disjuntores, chaves seccionadoras, reatores, bancos de capacitores, etc.), bem como linhas de transmissão de diferentes tipos, atravessando áreas específicas, com projetos particulares e idades variadas.

Os componentes do SEP estão sujeitos a falhas e defeitos, particularmente as LT's. Conforme é mostrado na Figura 2, dados computados no período de 2012 a 2020 pelo ONS

mostram que 70% das perturbações no sistema elétrico têm como origem as linhas de transmissão.

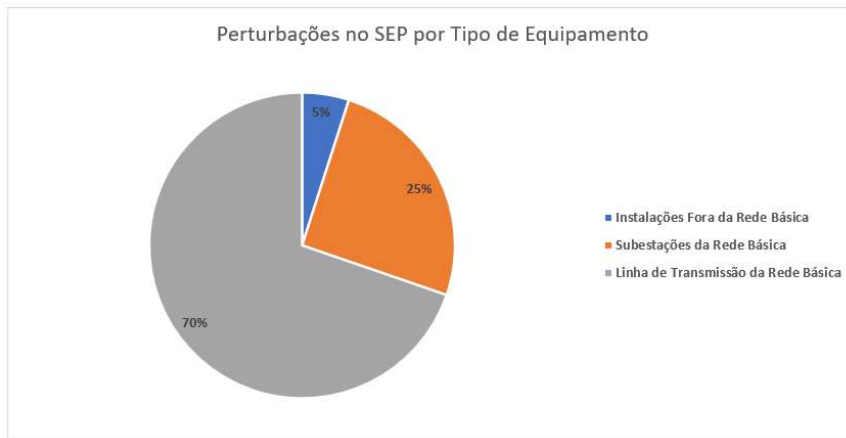


Figura 2 - Perturbações no SEP por Tipo de Equipamento. Fonte: [1]

Estas perturbações podem ser de variadas causas. Outro levantamento, também do ONS e no mesmo período, mostra que 82% das causas de desligamentos em LT's têm como origem fatores externos (condições meteorológicas adversas, queimadas e vegetação). Na Figura 3 são apresentados estes dados.

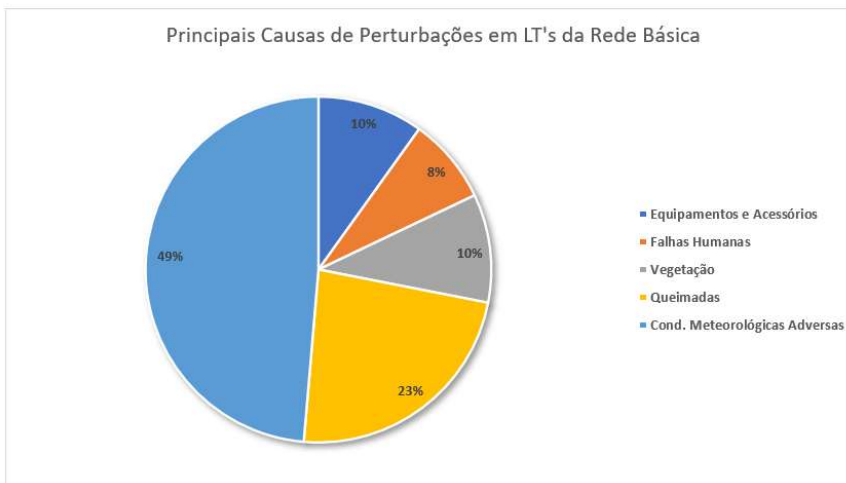


Figura 3 – Principais Causas de Perturbações em LT's da Rede Básica. Fonte: [1]

Esta quantidade de perturbações exige o emprego de técnicas cada vez mais apuradas de manutenção preventiva, preditiva e inspeções, de modo a se evitar que ocorram desligamentos indesejados. Estes processos, por sua vez, geram uma ampla gama de dados, que

exigem cada vez mais o emprego de análises e métodos que sejam capazes de transformar todo esse volume em informações que apoiem a tomada de decisão. O estudo de probabilidade de falhas em ativos e quais são os fatores que mais contribuem para estas falhas é comumente realizado através de análises baseadas na experiência, sem qualquer estruturação quantitativa.

Neste sentido, o presente trabalho visa construir uma perspectiva que permita o estudo destes fatores de forma mais assertiva, através do desenvolvimento de uma metodologia para análise de perturbações e anomalias em LTA's - linhas de transmissão aéreas empregando modelos de Markov e árvores de decisão,

Para tanto, são utilizados bancos de dados de anomalias e falhas de linhas de transmissão, características técnicas e geográficas das linhas e seus componentes e informações meteorológicas. Através destes dados são obtidas curvas de taxas de falhas e defeitos, com as quais é possível gerar um modelo de Markov.

As curvas de taxas são também utilizadas como dados de entrada para aplicação de algoritmo de árvore de decisão, com o qual é possível obter quais são os atributos (características técnicas, geográficas e/ou meteorológicas) mais relevantes para as falhas e defeitos nas linhas de transmissão.

A metodologia a ser aplicada pode ser vista na Figura 4.

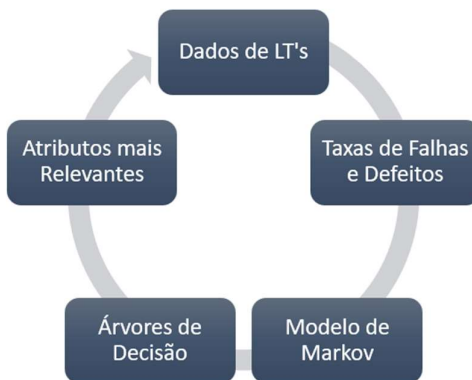


Figura 4 - Infográfico Básico da Metodologia Aplicada

O estudo é realizado tendo como enfoque dados oriundos de Linhas de Transmissão, buscando preencher uma lacuna existente na literatura para este tipo de ativo, principalmente no que diz respeito à utilização de árvores de decisão e modelos de Markov em um mesmo trabalho. No entanto, a metodologia construída permite que as análises sejam realizadas para qualquer tipo de equipamento sujeito a falhas.

## 1.2 Organização da Dissertação

A dissertação está dividida em seis capítulos, conforme descrito a seguir:

No **Capítulo 1** o trabalho é introduzido, contextualizando o cenário em que ele está inserido, relevância do tema, objetivos e metodologia utilizada.

No **Capítulo 2** é apresentada revisão bibliográfica acerca de linhas de transmissão, focando-se nos seus principais componentes, características e aspectos construtivos.

No **Capítulo 3** são descritos os principais modos de falha referentes aos componentes de linhas de transmissão, bem como são elencados aspectos de manutenção e inspeção para este tipo de ativo.

No **Capítulo 4** é realizada uma introdução teórica ao Aprendizado de Máquina, Árvores de Decisão e Modelos de Markov, sendo realizada uma descrição teórica e levantamento bibliográfico de aplicações práticas em engenharia e Sistemas Elétricos de Potência.

No **Capítulo 5** é descrita com detalhes a metodologia aplicada, os dados que serão utilizados, as manipulações que se fizeram necessárias e a aplicação dos modelos de Markov e árvores de decisão, bem como os resultados obtidos.

No **Capítulo 6** são elencadas as conclusões acerca das contribuições do trabalho, bem como são sugeridos desenvolvimentos futuros.

## 2 ASPECTOS CONSTRUTIVOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO AÉREAS

### 2.1 Introdução

As LTA's são equipamentos cruciais para o funcionamento do Sistemas Elétricos de Potência. Tem como função principal o transporte de energia entre subestações de energia, sendo o principal elo de conexão entre os centros geradores e a distribuição, que atende aos diferentes consumidores industriais, comerciais e residenciais.

As LTA's são formadas por diferentes componentes, como mostrado na Figura 5.

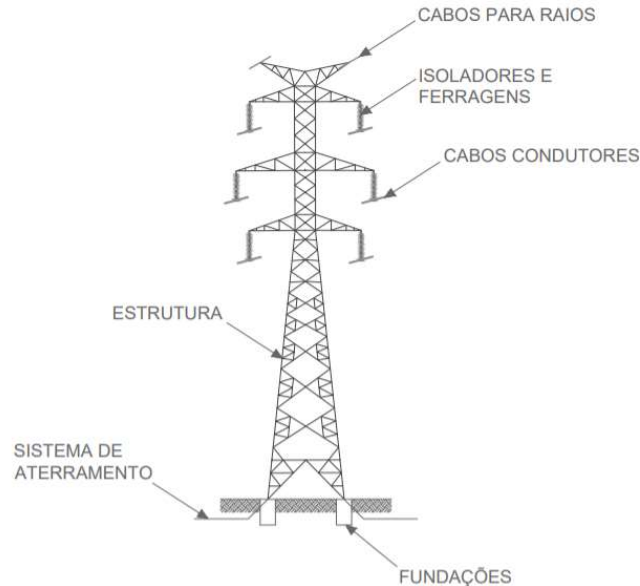


Figura 5 - Componentes de uma LT. Fonte: autor

Cada um destes componentes desempenha uma função específica, possuindo diferentes particularidades e materiais empregados. Além destas diferenças, se comportam de maneira distinta durante o ciclo de vida do ativo, apresentando vários modos de falha, de acordo com os materiais empregados, bem como o ambiente nos quais estão inseridos.

Este capítulo apresenta os principais componentes e modos de falha das LTA's, assim como as metodologias mais aplicadas no mundo para inspeção destes ativos.

## 2.2 Componentes de Linhas de Transmissão Aéreas

### 2.2.1 Cabos Condutores

Os agentes de transporte da energia elétrica são os campos elétricos e magnéticos. Neste contexto, os cabos condutores são os elementos que funcionam como “guias”, proporcionando a transmissão e distribuição de energia [2].

Para promover esta função de forma eficiente, os cabos condutores devem possuir algumas características específicas, como mostrado em [3]:

1. Alta condutibilidade elétrica – de forma a minimizar perdas por efeito Joule;
2. Baixo custo – por apresentarem parcela considerável do investimento de uma LT, influenciando diretamente no custo da energia;
3. Boa resistência mecânica – devem ser capazes de suportar cargas mecânicas de diversas naturezas, de forma a garantir a confiabilidade e continuidade do fornecimento de energia elétrica;
4. Baixo peso específico – para minimizar custos com estruturas, que são responsáveis por suporta-los;
5. Alta resistência a corrosão – de forma a não sofrer danos e redução de seção devido a intempéries ambientais ao longo de sua vida útil, acarretando em riscos de ruptura.

Quando se fala especificamente de linhas de transmissão aéreas, os condutores utilizados são “nus”, o que significa que não possuem nenhum tipo de elemento isolante, sendo formados apenas por elementos metálicos. As características citadas anteriormente são relativamente conflitantes, e não são atendidas por nenhum material existente. Dentre os metais que mais satisfazem estas especificidades de forma simultânea estão o cobre e o alumínio [3], que são os materiais empregados em cabos condutores, principalmente o segundo.

Após a primeira metade do século XX o alumínio passou a dominar os projetos de cabos condutores para linhas de transmissão aéreas, principalmente devido ao fato de terem um menor custo. A resistência mecânica do cobre é maior que a do alumínio, mas esta diferença é compensada com a utilização de cabos de alumínio com alma de aço [3]. Além disto, o alumínio apresenta menor visibilidade no que se refere a furtos em relação ao cobre, sendo este também um fator de vantagem para esta solução.

Os cabos utilizados em LT's são formados por vários fios metálicos, também chamados de “tentos”, que são encordoados em camadas para formar o condutor, obedecendo à seguinte lei:

$$N = 3x^2 + 3x + 1 \quad (2.2.1)$$

Em que:

$N$  – Número total de fios componentes

$x$  – Número de camadas ou coroas

Desta forma, os condutores de uma camada são formados por 7 fios, de duas camadas por 19 fios, três por 37 e assim por diante. Estas camadas são formadas por tentos de diferentes materiais, de acordo com o tipo de cabo, sendo os mais comuns, conforme [2] e [4]:

1. AAC – *All Aluminum Conductor* ou CA – Cabo de Alumínio:

Formados inteiramente por tentos de alumínio de 99,45% de pureza com condutividade de 61% IACS (*International Annealed Copper Standard*). Os fabricantes costumemente se referem a estes cabos identificando-os com o nome de uma flor no inglês, como por exemplo LILAC, TULIP, etc.

2. ACSR – *Aluminum Conductor Steel Reinforced* ou CAA – Cabos de Alumínio com Alma de Aço:

Como apontado anteriormente, os cabos de alumínio possuem resistência mecânica inferior à do cobre. Uma forma de compensar esta característica é a utilização de tentos de aço no núcleo do condutor, formando uma “alma de aço” galvanizada, com três classes crescentes de espessura de zinco: A, B ou C, dependendo do nível de agressividade corrosiva do ambiente. Quanto maior a espessura da camada de zinco, menor a resistência mecânica para um dado diâmetro do tento. Os fabricantes costumemente se referem a estes cabos identificando-os com o nome de uma ave no inglês, como por exemplo ORIOLE, GROSBEAK, etc.

3. SD – *Self Damping* ou Auto-Amortecidos:

São cabos construídos com tentos de alumínio trapezoidais, em torno de uma alma de aço, com folgas entre as camadas, que, sob a ação do vento, permite vibrações induzidas e movimentos relativos e atritos entre as coroas, dissipando a energia das vibrações.

4. ACSS – *Aluminum Conductor Steel Supported* ou CASA – Cabos de Alumínio Suportados pelo Aço:



Têm construção similar aos cabos ACSR, mas utiliza tentos de alumínio com têmpera mole. Após a tração, os fios de alumínio deixam de absorver esforços mecânicos, que são inteiramente transferidos para a alma. Apresentam condutibilidade de 63% IACS, maior possibilidade de tracionamento e operação em temperaturas mais elevadas, próximas de 200°C.

1. AAAC – *All Aluminum Alloy Conductor* ou CAL – Cabos de Alumínio Liga:

São inteiramente compostos de fios de liga de alumínio, obtidas através de adição de elementos como ferro, cobre, silício, manganês, magnésio, zinco, dentre outros. São cabos muito leves, com maior resistência mecânica que cabos AAC e, por serem compostos apenas de alumínio, são menos susceptíveis à corrosão que os cabos ACSR.

2. ACAR – *Aluminum Conductor Alloy Reinforced* ou CALA – Cabos de Alumínio Reforçado com Fios de Liga de Alumínio:

A alma destes cabos é composta de fios de liga de alumínio, e aqueles que a envolvem são de alumínio comum.

Nos últimos anos, a crescente necessidade de aumento de capacidade de linhas de transmissão, flexibilização operativa, sendo conciliadas com menor impacto ambiental, segurança operacional e de terceiros trouxe o advento dos chamados condutores HTLS – *High Temperature Low Sag Conductors*, cabos de alta temperatura e baixa catenária. Estes tipos de cabos podem operar em altas temperaturas (iguais ou acima a 200°C), tendo como exemplos, além do já citado ACSS, o TASCAR, TACIR, ACPR, ACCR, dentre outros [5], [6].

Na Figura 6 são mostrados exemplos de seções de diferentes cabos condutores. O número de tentos de alumínio e aço do cabo é a sua formação, representada pela notação, por exemplo, 26x7, significando que o condutor é composto de 26 tentos de alumínio e 7 de aço.

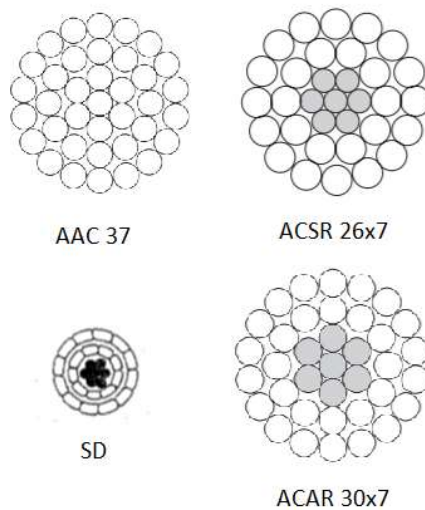


Figura 6 - Exemplos de Cabos Condutores. Fonte: [2] e [7]

Além de sua formação, os cabos condutores geralmente são especificados pela sua área de seção nominal, em  $\text{mm}^2$ , ou seu equivalente em CM – Circular Mil, que corresponde à área de um círculo cujo diâmetro é de um milésimo de polegada [2].

Quando o transporte de grandes blocos de energia é necessário, em muitas ocasiões os condutores são organizados em feixes, ou *bundles*, especialmente em tensões mais elevadas. Um feixe é uma montagem de dois ou mais condutores em uma mesma fase de uma LT, arranjo que permite aumentar eletricamente a seção nominal dos condutores de fase, sem a necessidade de utilização de um condutor único, de maior seção [4]. Isto é possibilitado pela diminuição da reatância indutiva da linha, bem como o aumento de sua capacitância, com consequente aumento da sua impedância característica.

Para a separação dos condutores são utilizados espaçadores, dispositivos que permitem manter o paralelismo dos sub-condutores da mesma fase ao longo de toda a LT, montados a intervalos regulares ao longo dos vãos [2]. Os espaçadores podem ser do tipo rígido, quando não apresentam características que auxiliam no amortecimento e espaçadores-amortecedores, quando têm esta funcionalidade. Na Figura 7 são apresentados alguns tipos de espaçadores, e na Figura 8 é mostrada a instalação de um *bundle* em LT de 500kV.



Figura 7 - Alguns tipos de Espaçadores. Fonte: [8]

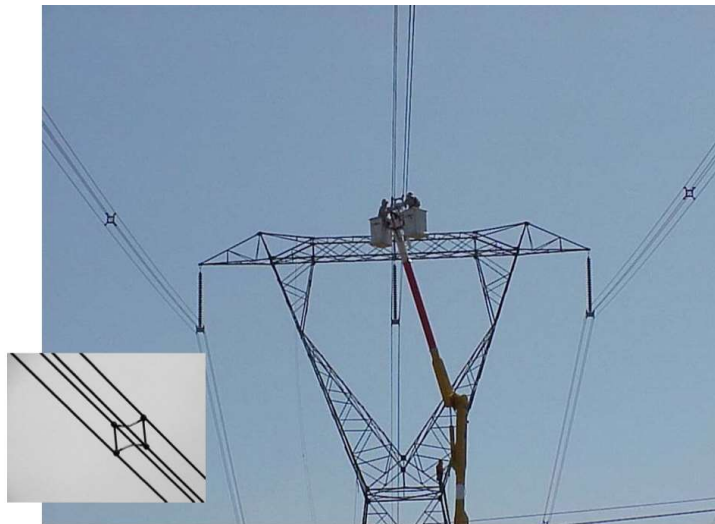


Figura 8 - Espaçadores em LT de 500kV. Fonte: [4]

Os condutores de LT's são fornecidos em bobinas de dimensões padronizadas, obviamente de comprimentos muito menores daqueles da LT como um todo, que pode chegar a algumas centenas de quilômetros. Sendo assim, é necessário que, durante o lançamento dos cabos sejam utilizadas emendas, assegurando a continuidade elétrica e resistência mecânica [2].

Os dois principais tipos de emendas utilizadas em cabos condutores são as pré-formadas e a compressão. As primeiras são constituídas por jogos de varetas pré-formadas, que são empregadas de diferentes formas, de acordo com o tipo de cabo. Para o caso de cabos AAC e AAAC, por exemplo, um único jogo é aplicado sobre os cabos a serem emendados. No caso de cabos ACSR, são utilizados conjuntos para emendar alma de aço, a camada externa de alumínio e para preenchimento do vão entre a emenda de aço e a de alumínio. Já as emendas a compressão são constituídas de luvas, que são prensadas no cabo através de compressores hidráulicos ou mecânicos. Para cabos AAC e AAAC é usada uma luva, ao passo que para os ACSR são

utilizadas duas, uma para a alma de aço e outra para o alumínio [2]. Na Figura 9 são expostos os tipos de emenda.

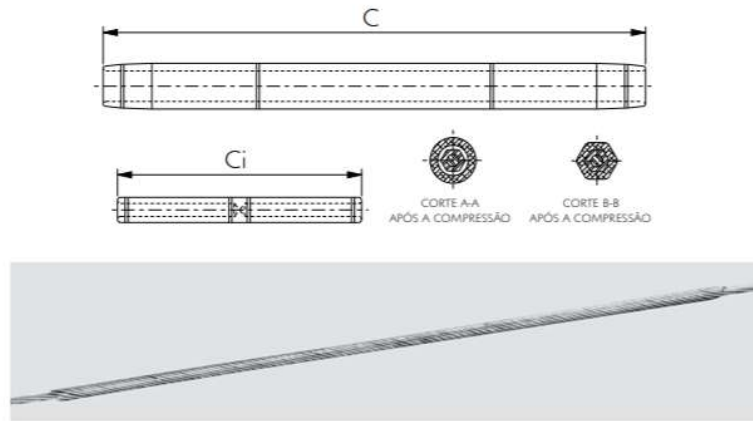


Figura 9 – Emendas a Compressão e Pré-Formadas. Fonte: [9] e [10]

Por estarem instalados a alturas elevadas, os cabos condutores são expostos a ventos durante todo o seu ciclo de vida. Sob a ação de ventos, os cabos podem oscilar e vibrar, como resultado de diferentes tipos de instabilidades aerodinâmicas e aeroelásticas. Estas movimentações, se não mitigadas de forma efetiva, pode levar à falha por fadiga de tentos do cabo, dano a outros componentes e, finalmente, à falha da LT [11].

Para se mitigar este risco, são utilizados dispositivos amortecedores, capazes de diminuir de forma substancial o perigo da ruptura de cabos junto a pontos de suspensão [2]. Os principais tipos de amortecedores utilizados atualmente são o *stockbridge*, helicoidais e festões. Na Figura 10 são apresentados exemplos destes tipos de amortecedores.

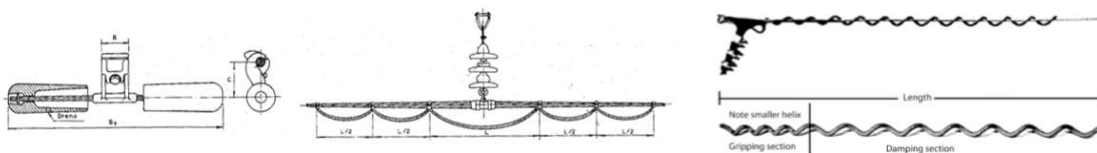


Figura 10 - Amortecedores Stockbridge, Festão e Helicoidais. Fonte: [2] e [11]

### 2.2.2 Cabos Para-Raios e Ferragens

As LT's são frequentemente submetidas a intempéries ambientais, dentre as quais se destacam as descargas atmosféricas. Os cabos para-raios, também chamados de cabos guarda, têm como principal função a interceptação destas descargas, de forma que não atinjam os cabos condutores, reduzindo a possibilidade de danos aos mesmos, além de descarregarem a corrente de descarga ao sistema de aterramento, mitigando efeitos que possam levar as linhas ao desligamento [2], [3].

Os tipos mais utilizados de cabos para-raios, também chamados de cabos guarda são [2], [3]:

1. Cordoalhas de aço zincadas – de alta resistência (AR, ou HS) e de extra alta resistência (EAR, ou EHS). A exemplo das almas de aço dos cabos ACSR, são galvanizados de acordo com as três classes de zincagem: A, B ou C, dependendo do nível de agressividade corrosiva do ambiente.
2. Cabos ACSR extra fortes – similares aos utilizados em cabos condutores, mas se distinguem por apresentarem uma menor relação alumínio/área de aço, apresentando alta resistência mecânica.
3. Cabos aço-alumínio – conhecidos como *alumoweld*, ou *alumoclad*, são formados por cabos de aço revestidos de camada de alumínio, propícios para utilização em regiões de alta agressividade corrosiva.

No que se refere aos acessórios, os cabos para-raios se mostram similares aos cabos condutores, também apresentando emendas pré-formadas e prensadas, bem como amortecedores, do tipo *stockbridge* e helicoidais, não sendo utilizados os festões.

Importantes elementos que devem ser mencionados são as ferragens, conjuntos de peças que se destinam a conectar os cabos para-raios às estruturas, fornecendo sustentação e conexão ao sistema de aterramento. Podem ser de suspensão, com a utilização de grampos convencionais, oscilantes ou com isoladores ou de ancoragem, utilizando grampos passantes, preformados ou com isoladores [12]. Em ambas as situações a conexão ao sistema de aterramento é realizada através de elementos denominados rabichos, que são conectados à estrutura. Na Figura 11 são apresentados exemplos.

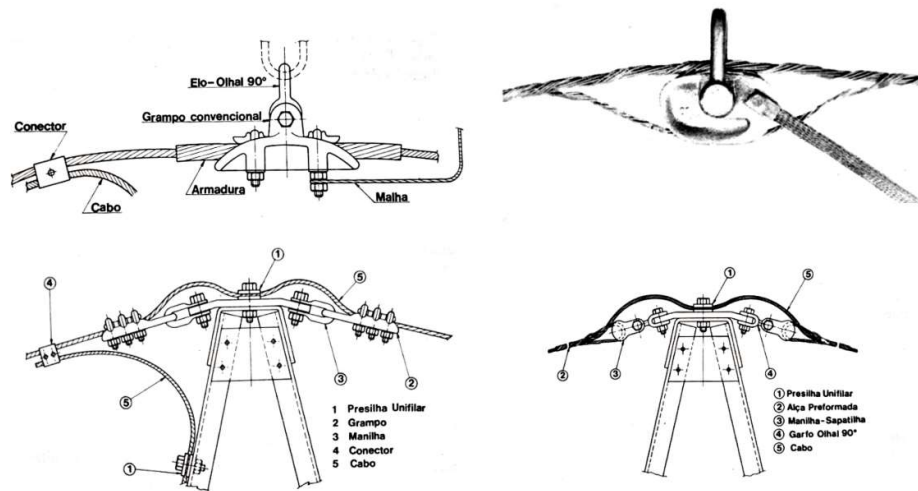


Figura 11 - Ferragens de Cabos Para-Raios. Suspensão com Grampos Convencionais e Oscilantes Preformados (acima) e Ancoragem com Grampos Passantes e Preformados (abaixo). Fonte: [12]

Quando a LT apresenta travessias com rodovias, ferrovias, linhas de transmissão, gasodutos, dentre outros, devem ser utilizadas esferas de sinalização. Estes dispositivos são empregados para alertar aviões e helicópteros das obstruções [11]. As normas ABNT NBR 6535 – Sinalização de Linhas de Transmissão com Vistas à Segurança da Inspeção Aérea - Procedimento [13] e ABNT NBR 7276 – Sinalização de Advertência em Linhas de Transmissão de Energia Elétrica – Procedimento [14] detalham as situações e tipos de sinalização necessárias no Brasil. Na Figura 12 são mostrados exemplos destas esferas.



Figura 12 - Esferas de Sinalização Aérea. Fonte: [11]

Os cabos-guarda podem também ser utilizados como eficiente meio de comunicação, com a utilização dos chamados cabos OPGW (*Optical Ground-Wire*). Estes elementos comportam fibras óticas, canais que possuem capacidade de transmissão de dados e imunes aos efeitos eletromagnéticos que acometem os condutores elétricos tradicionais [15].

Nos cabos OPGW as fibras óticas são envolvidas por tubos de aço inoxidável e alumínio, bem como por tentos de aço alumínio, fornecendo proteção mecânica suficiente para

que possam ser utilizados também como cabos para-raios. Na Figura 13 é apresentado um cabo OPGW e seus principais componentes.

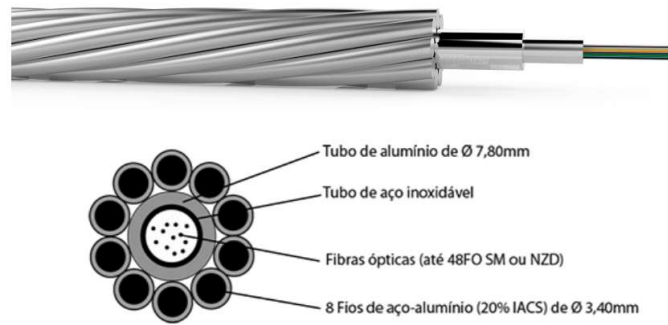


Figura 13 - Cabo Optical Ground-Wire (OPGW). Fonte: [16]

### 2.2.3 Isoladores e Ferragens do Condutor

Os cabos condutores são suportados pelas estruturas, devendo ser eletricamente isolados destas e do solo. Nas LT's aéreas esta isolação é promovida por elementos constituídos de materiais dielétricos denominados isoladores [2], [3].

Os isoladores devem ser dimensionados para suportar solicitações de naturezas mecânicas e elétricas. No que se refere aos esforços mecânicos, devem resistir a forças verticais (devido ao peso dos condutores), longitudinais (necessários para que os condutores se mantenham suspensos) e transversais (devido à ação de ventos sobre os cabos da LT) [3].

No que tange às solicitações elétricas, os isoladores devem ser capazes de fornecer isolamento à linha durante seu funcionamento normal, e em basicamente três situações de exceção: sobretensões de frequência industrial (valores baixos e duração na ordem de segundos), sobretensões de manobra (valores elevados e duração na ordem de centenas  $\mu$ s) de sobretensões atmosférica (de valores muito elevados e duração na ordem de dezenas de  $\mu$ s) [2], [3].

Em linhas aéreas de transmissão, são empregados basicamente três tipos de materiais em isoladores [2]:

1. Porcelana vitrificada – têm bom desempenho elétrico, sendo que seu maior inconveniente é o preço, quando comparado a isoladores de vidro temperado. Além disto, possuem desvantagens no que se refere à inspeção à distância, por apresentarem defeitos como trincas e “vazamentos”, imperceptíveis a olho nu.

2. Vidro temperado – apresentam rigidez dielétrica maior que os isoladores de porcelana, e rigidez mecânica equivalente. Durante seu processo de fabricação sofrem um tratamento térmico para torna-los mais resistentes, processo que cria um estado de tensão tal que, quando submetidos a choques mais fortes, ocasiona em completo estilhaçamento do vidro, não admitindo trincas. Esta é uma vantagem para a manutenção, pois os isoladores defeituosos podem ser facilmente vistos a distância, mas em contrapartida favorece a ação de vandalismo.
3. Material sintético composto (poliméricos) – são compostos de peças de fibra de vidro ou de carbono, ligadas por resina do tipo “epóxi”, formando uma peça em formato de bastão, que é envolta por material composto polimérico ou de silicone. Apresentam menor susceptibilidade a vandalismos.



Figura 14 - Isoladores de Porcelana, Vidro e Poliméricos. Fonte: [17] e [18]

Os tipos mais empregados de isoladores em LT's são basicamente de três tipos [2], [3]:

1. Pino – são fixados à estrutura através de pinos de aço, sendo empregados em linhas de níveis de tensão de até 69kV.
2. Pilar ou coluna – são pouco utilizados no Brasil, sendo compostos de uma única peça em porcelana vitrificada ou vidro temperado. Em sua parte inferior, é cimentada uma base de ferro com um duro rosqueado no centro, para fixação às estruturas.
3. Suspensão – são os tipos de isoladores mais utilizados em linhas de transmissão de alta e extra alta tensão. Podem ser de constituição monocorpo ou de disco. Os primeiros são formados por peças únicas de porcelana, vidro ou material composto, com comprimentos adequados ao nível de tensão. Já os segundos são formados por



um corpo de porcelana ou de vidro, ao qual são cimentadas as ferragens necessárias à sua montagem. Através destas ferragens são encadeadas unidades individuais de isoladores, formando cadeias, que também variam de comprimento de acordo com o nível de tensão, nível de poluição do ambiente e sobretensões de manobra e impulso.

Na Figura 15 são mostrados os principais componentes de um isolador do tipo disco, que pode ser de vidro ou porcelana.

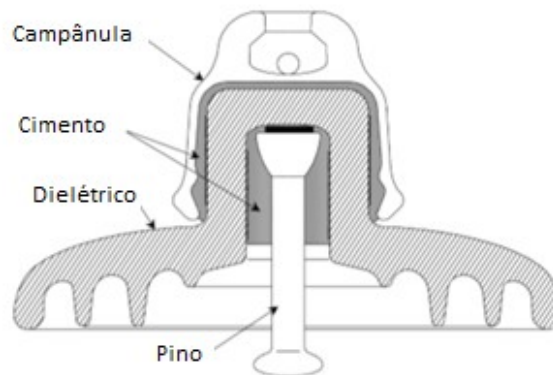


Figura 15 - Principais Componentes de Isoladores de Disco. Fonte: adaptado de [4]

Na Figura 16 são apresentados os principais componentes de um isolador do tipo polimérico.

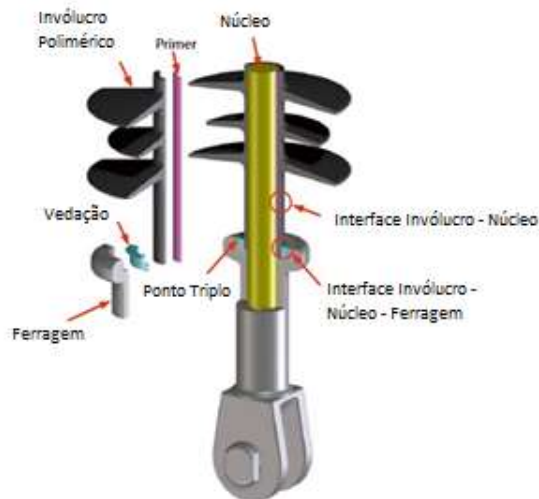


Figura 16 - Principais Componentes de Isoladores Poliméricos. Fonte: adaptado de [11]

Na Figura 17 é apresentada uma visão geral dos tipos e materiais empregados em isoladores discutidos até aqui.

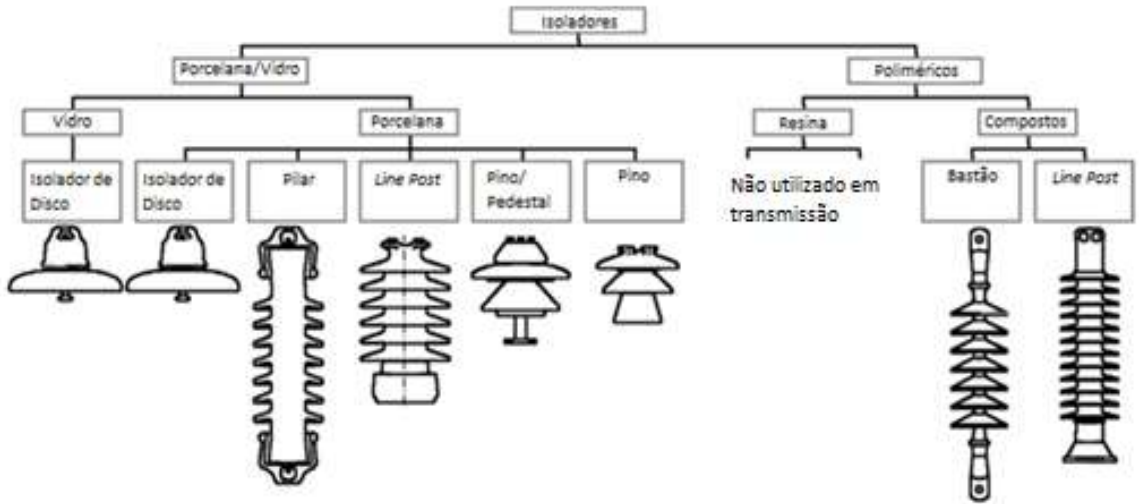


Figura 17 -Visão Geral dos Tipos de Isoladores utilizados em LTA's. Fonte: adaptado de [4]

Independentemente do tipo ou constituição, são definidos uma série de parâmetros para caracterizar as dimensões e formas dos isoladores, sendo as principais [4]:

1. Comprimento de seção – menor distância entre os pontos de fixação dos lados energizado e aterrado.
2. Distância de arco – menor distância no ar, externa ao isolador, entre as ferragens metálicas que estão submetidas a tensão de operação do sistema.
3. Distância de escoamento – menor distância ao longo da superfície do isolador entre as ferragens metálicas que estão submetidas à tensão de operação do sistema.

Na Figura 18 são expostos exemplos destes parâmetros.

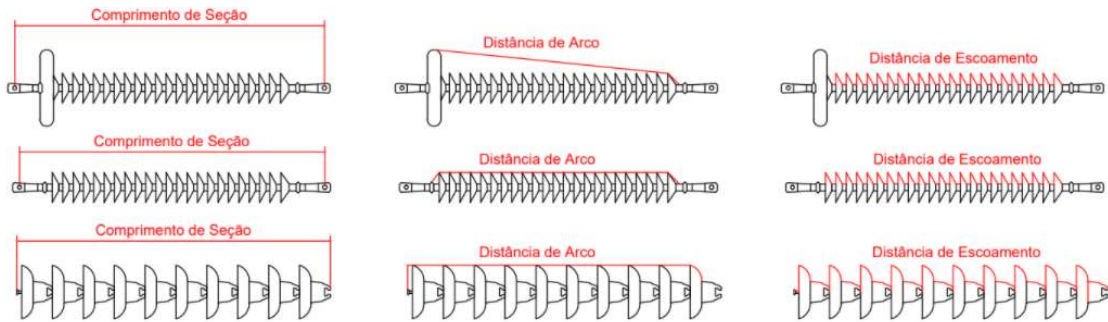


Figura 18 – Comprimento de Seção (à esquerda), Distância de Arco (ao centro) e Distância de Escoamento (à direita) de Diferentes Tipos de Isoladores. Fonte: autor

As cadeias de isoladores são também compostas por ferragens, conjuntos de peças que se destinam a conectar as cadeias aos cabos condutores, suportando-os, e às estruturas. As ferragens podem ser divididas em dois principais grupos, que seguem a característica de aplicação da estrutura: suspensão e ancoragem [2].

Em cadeias de suspensão, na parte superior são utilizadas peças de ligação à estrutura, podendo ser usados conjuntos bola-garfo-manilha ou bola-gancho-manilha. Na parte inferior são fixados os cabos condutores, com a utilização de grampos de suspensão, que podem ser do tipo convencional ou armado. Nas linhas que contém um cabo por fase, é utilizado apenas um grampo, ao passo que naquelas com mais cabos é empregada uma chapa multiplicadora, à qual são fixados tantos grampos quanto o número de condutores por fase. Nas LT's com cabos de alumínio é usual o emprego de varetas anti vibrantes nos pontos de suspensão, para reforçar os cabos, evitando que seus tentos sofram ruptura por ação de vibrações eólicas [2].

Na Figura 19 são mostradas ferragens típicas de uma cadeia de suspensão com um cabo.

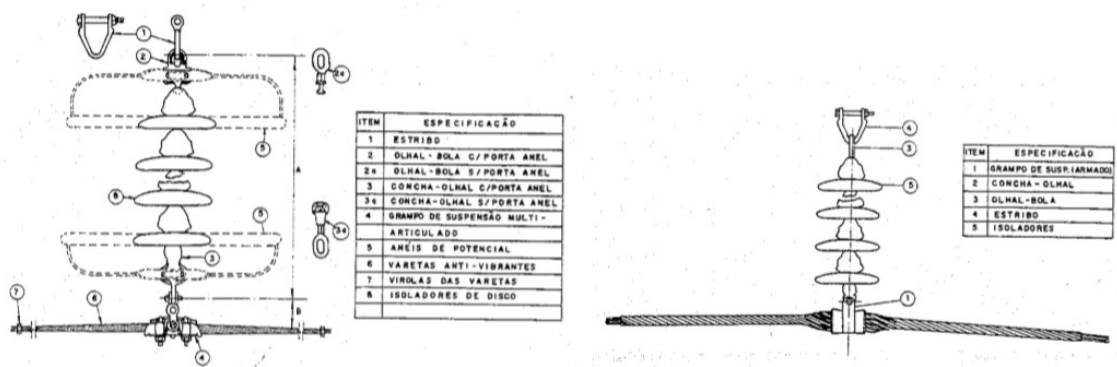


Figura 19 – Ferragens Típicas de uma Cadeia de Suspensão com Grampo Convencional (à esquerda), Armado (à direita). Fonte: [2]

As cadeias de isoladores são submetidas à tensão de operação em regime permanente da LT, mas em virtude de acoplamentos capacitivos entre os pinos e campânulas dos isoladores com as estruturas e cabos os isoladores mais próximos do lado energizado são mais solicitados eletricamente. Desta forma, em algumas situações anéis metálicos são instalados no entorno do isolador mais próximo do cabo, com diâmetro de duas a três vezes maior que dos isoladores, de forma a melhorar a distribuição de potencial ao longo das cadeias. Também é possível a instalação dos mesmos anéis no isolador mais próximo da estrutura, com o objetivo de melhorar a distribuição de potenciais, bem como proteger a cadeia dos arcos voltaicos oriundos de sobretensões atmosféricas. Em linhas de EAT são observados efeitos corona em alguns pontos das ferragens das cadeias. Desta forma, podem ser empregados anéis de corona (*corona shields*), laterais às cadeias, como mostrado na Figura 20 [2].

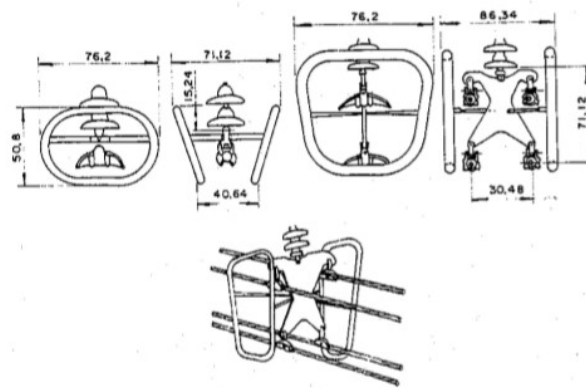


Figura 20 - Anéis de Corona. Fonte: [2]

As cadeias de suspensão podem ser do tipo “I”, formadas por cadeias montadas de forma vertical, como mostrado na Figura 19. Em algumas situações também são utilizadas as cadeias do tipo “V”, compostas por duas colunas de isoladores que mantêm um ângulo de 45° com a vertical, fixadas em sua parte inferior a uma chapa multiplicadora. Este tipo de montagem evita o balanço dos cabos condutores sob o efeito do vento, permitindo redução nas dimensões horizontais das estruturas, o que compensa o custo de utilização de mais cadeias e ferragens [2]. Na Figura 21 é mostrada este tipo de cadeia.

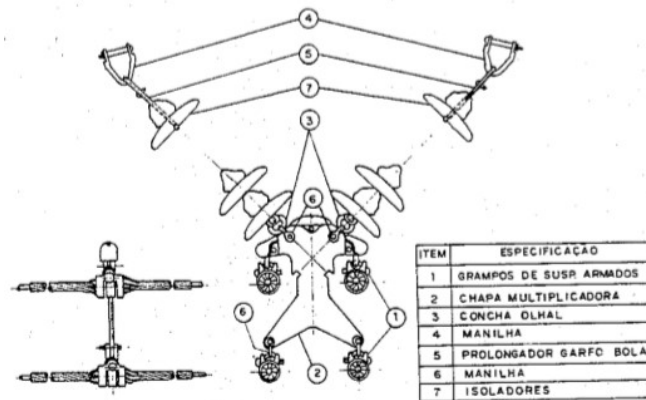


Figura 21 – Cadeia de Suspensão em “V”. Fonte: [2]

As cadeias de ancoragem são mais solicitadas mecanicamente, pois além de suportar os efeitos que as cadeias de suspensão são submetidas, devem também resistir aos esforços de tracionamento dos cabos. Podem ser constituídas de uma ou mais cadeias de isoladores, dependendo da força da tração a que estão sujeitas [3].

Neste tipo de montagem, os cabos são fixados às cadeias através de grampos de tensão, ou de ancoragem, sendo empregados basicamente dois tipos: passagem e compressão. Nos primeiros, os cabos são retidos por pressão, atravessando o grampo sem cortes. Não são utilizados em linhas de EAT, devido a estarem sujeitos a corona. Nos segundos o cabo é seccionado no ponto de ancoragem, sendo o grampo aplicado por compressão do material por meio de prensa hidráulica ou alicate-prensa. Em cabos monometálicos é composto apenas de um tubo de liga de alumínio, ao passo que nos cabos bimetálicos os grampos são constituídos de duas partes, uma de aço para retenção da alma do cabo e outra de alumínio para a fixação dos tentos e condução elétrica [2]. Na Figura 22 são apresentados exemplos de grampos de ancoragem.

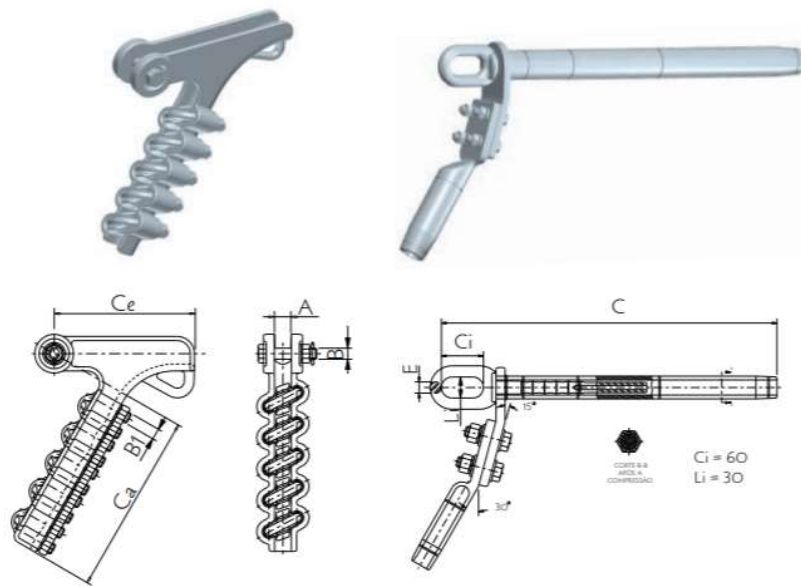


Figura 22 - Grampos de Ancoragem - Passagem (à esquerda) e Compressão (à direita). Fonte: [10]

#### 2.2.4 Estruturas

As estruturas, também chamadas de torres ou suportes são os elementos responsáveis pela sustentação dos cabos condutores e para-raios das LT's. Possuem duas funções principais, segundo [2]:

1. Proporcionam o ponto de fixação de cabos condutores e para-raios, garantindo distâncias de segurança dos condutores energizados em relação à estrutura, às outras fases e ao solo;
2. Transmitem às fundações, e conseqüentemente ao solo todas as solicitações a que são submetidas.

O projeto das estruturas, portanto, é multidisciplinar, envolvendo aspectos elétricos e mecânicos. Enquanto o primeiro aspecto visa atender para o correto dimensionamento das distâncias de segurança mínimas para a operação segura da LT, o segundo tem como objetivo determinar cada elemento, de forma que todo o conjunto seja resistente aos esforços a que são submetidos [2].

As estruturas de LT's podem ser de variados tipos, a depender de diversos aspectos, como os níveis de tensão de operação e transitórias do sistema, quantos são os circuitos, de que tipo

são os cabos condutores e cabos para-raios a serem empregados e qual a sua disposição, quais são os isoladores utilizados e sua quantidade, qual o tipo de sustentação e cargas que a torre deve suportar, quais são as distâncias de segurança a serem respeitadas, dentre outros [2], [3].

Todos estes aspectos ajudam a definir algumas características dos suportes, dentre as quais destacam-se [2], [3], [11]:

1. Número de condutores:
  - Simples – estruturas contém apenas um circuito.
  - Duplo – estruturas comportam dois circuitos.
  - Maiores que três circuitos – aplicação de três ou mais circuitos em uma mesma torre.
2. Disposição dos condutores:
  - Vertical – condutores são montados em planos verticais, muito utilizada em LT's de circuito duplo.
  - Horizontal – condutores são fixados em um mesmo plano horizontal, sendo bastante utilizadas em LT's de circuito simples e tensões mais elevadas.
  - Triangular – condutores estão dispostos segundo os vértices de um triângulo, podendo ser equilátero (disposição simétrica) ou assimétrica.
3. Tipo do material:
  - Metálico – aço carbono comum e de alta resistência, alumínio ou liga de alumínio, em perfilados ou tubos. Como estão expostas ao meio ambiente, é comum serem galvanizadas a quente, garantindo maior vida útil. Em regiões de maior agressividade é comum a utilização de pinturas anti corrosivas.
  - Concreto armado – com a utilização de armadura convencional ou de pré-tensionamento, sendo as primeiras mais usuais.
  - Madeira – sendo utilizadas madeiras ao natural, imunizada ou laminados.
4. Tipo da sustentação:
  - Autoportantes – transmitem todos os esforços diretamente para as fundações.

- Estaiadas – são estruturas nas quais são aplicados tirantes ou estais, que absorvem os esforços e os transmitem ao solo através de âncoras. Normalmente são aplicados cabos de aço galvanizado, mas também há registros de utilização de cabos *alumoweld* e *copperweld*.

5. Tipo de cargas que devem suportar:

- Suspensão – estruturas dimensionadas para, em condições normais de operação, resistir aos esforços verticais oriundos dos pesos dos cabos, isoladores, ferragens e estais, quando aplicável. Também devem ser projetadas para resistir a esforços transversais provenientes da ação do vento sobre estes elementos, assim como de pequenos ângulos (geralmente menores que 5°). Em casos excepcionais (como em ruptura de cabos, por exemplo), devem resistir a esforços longitudinais. É o tipo mais empregado nas linhas, sendo o menos reforçado.
- Ancoragem – são divididas entre ancoragens parciais e totais. As primeiras, também denominadas intermediárias, são empregadas ao longo da linha e resistem, em condições diárias, a esforços de tração unilateral, oriundos do tracionamento dos cabos, além daqueles transversais e longitudinais. Já as ancoragens totais são posicionadas no início e fim das LT's, sendo dimensionadas para resistir a todas as cargas unilateralmente, sendo por esta razão as estruturas mais reforçadas das LT's.
- Ângulo – são torres cuja principal função é resistir às forças horizontais decorrentes da presença de ângulos, além dos esforços normais. Para ângulos menores, de até 5°, geralmente são empregadas torres de suspensão. Para maiores são utilizadas torres de ancoragem.
- Derivação – são empregadas em situações nas quais é necessária a alimentação de um ramal, sem que haja necessidade de seccionamento neste ponto.
- Transposição – são utilizadas em algumas situações em que se requiere assegurar a simetria elétrica da LT, sendo então realizada a rotação das fases.

Na Figura 23 são apresentados exemplos de tipos de estruturas utilizadas em LT's.



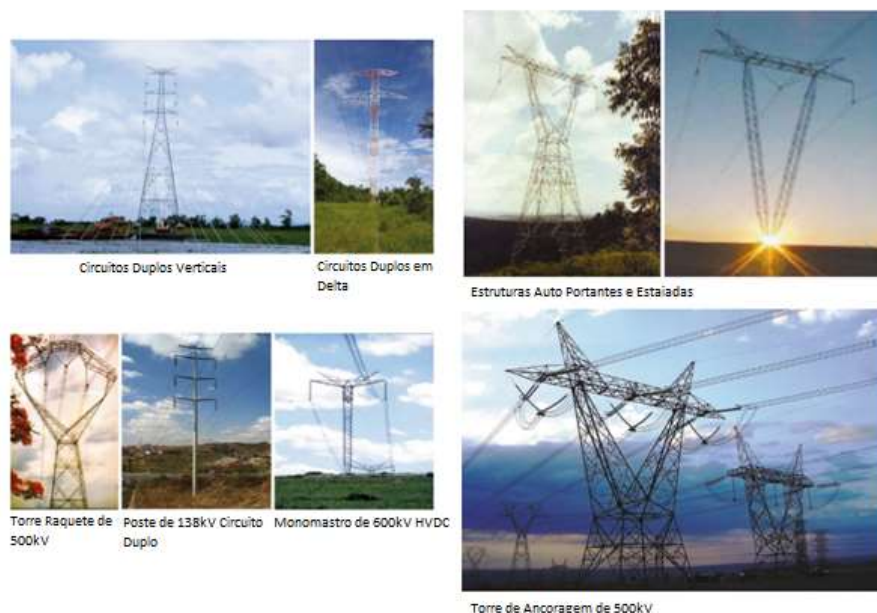


Figura 23 - Exemplos de Tipos de Silhuetas de Linhas de Transmissão. Fonte: adaptado de [11]

## 2.2.5 Fundações

As fundações de LTA's são os componentes responsáveis pela interconexão entre a estrutura e o solo. Todas as solicitações advindas da montagem, sustentação, dos cabos condutores e para-raios, equipamentos eletromecânicos, esforços provenientes de fenômenos naturais, bem como o peso dos suportes e da própria fundação devem ser absorvidos pelo solo, através das fundações [2].

As fundações em LT's podem ser divididas em quatro grupos principais [2], [19]:

1. Simples – geralmente utilizadas em estruturas constituídas por postes únicos ou duplos, ou em torres metálicas de dimensões de base reduzidas, em que cada estrutura tem uma fundação única.
2. Fracionadas – dimensionadas para suportar os esforços transmitidos por cada perna da torre. São empregadas quando as estruturas apresentam grandes dimensões, fazendo com que cada perna tenha sua própria fundação, que pode ser inclusive de diferentes tipos para uma mesma torre.
3. Estaiamento – são fundações empregadas no ancoramento dos cabos de estais de estruturas não autoportantes, ou absorver esforços laterais em estruturas em ângulo.

#### 4. Especiais – tipos de fundação que fogem à regra das tradicionais descritas acima.

Os grupos de fundações citados anteriormente têm relação com as dimensões e tipos das estruturas a serem utilizadas. Os tipos construtivos, por sua vez, são praticamente definidos pela geologia do local, sendo os principais [2], [19], [20], [21]:

##### 1. Postes:

As fundações em postes, sejam eles de concreto, aço ou madeira consistem no engastamento dos mesmos em um furo cilíndrico no solo. Em alguns casos, onde os esforços de compressão são maiores que a resistência do terreno os fundos destes furos são concretados. Pequenos esforços de flexão são geralmente absorvidos pelo solo. Quando há necessidade de capacitação destas fundações frente a estes esforços de flexão são utilizadas técnicas como aumento de profundidade de engastamento, concretagem da base e utilização de mortos. Esforços laterais e transversais podem ser absorvidos por estaiamento direto ou com a utilização de contra postes.

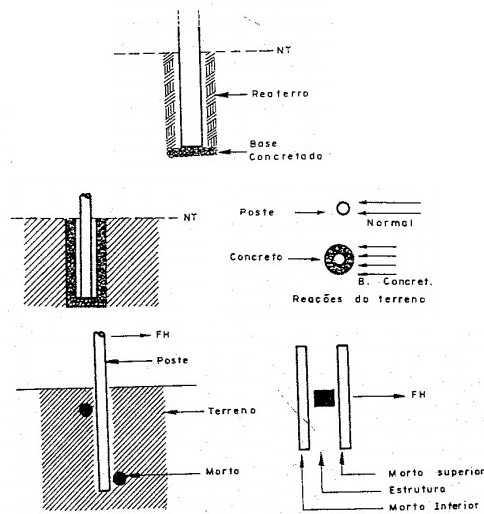


Figura 24 - Fundações em Postes com Concreto no Fundo (acima), Concretagem da Base (meio) e Utilização de Mortos (abaixo). Fonte: [2]

##### 2. Grelhas:

São fundações rasas, com 2 a 4m de profundidade, sendo indicadas para terrenos argilosos e arenosos, porém secos, com resistência crescente com a profundidade. São de aço galvanizado, o mesmo material das estruturas, o que permite que sejam compradas em conjunto. Apresentam como desvantagem o fato de serem susceptíveis à corrosão e não serem indicadas para terrenos com níveis de água. Na Figura 25 é mostrado um exemplo de fundações em grelhas.

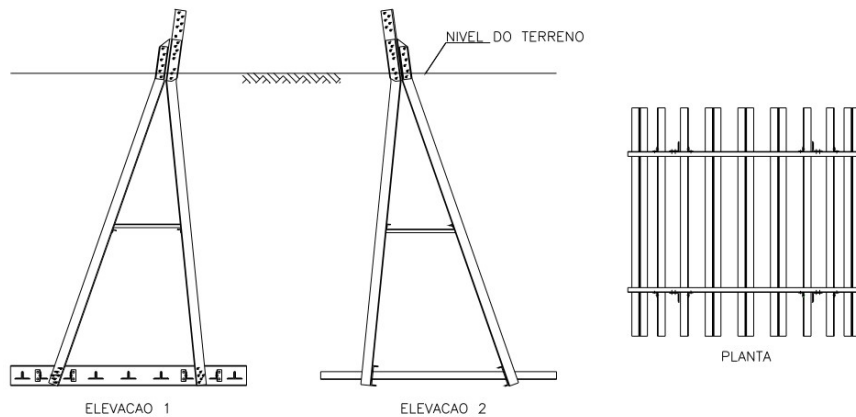


Figura 25 - Fundações em Grelhas. Fonte: adaptado de [20]

### 3. Tubulão:

São fundações profundas, de seções transversais geralmente circulares, atingindo usualmente 10m ou mais de profundidade, até atingir regiões de solo mais resistentes, de preferência rochosas. São indicados para terrenos argilosos e arenosos, sendo mais utilizados como fundações fracionadas, com um tubulão para cada pé de torre. Na Figura 26 são apresentados exemplos de fundações deste tipo.

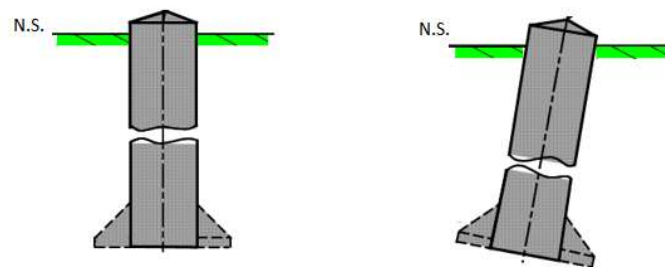


Figura 26 – Fundações em Tubulão. Fonte: adaptado de [19]

### 4. Blocos ancorados em rocha:

Em locais onde existam afloramentos ou pequenas profundidades de rochas sãs ou em decomposição, impossíveis de se escavar pode ser realizada a ancoragem da base da estrutura diretamente na rocha, ou através de um bloco de ancoragem, como mostrado em exemplo na Figura 27.

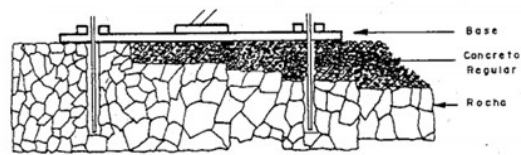


Figura 27 - Ancoragem em Rocha. Fonte: [2]

### 5. Sapatas:

As sapatas são fundações diretas em concreto armado, aplicadas em solos de boa resistência a baixas profundidades e baixa resistência mecânica à compressão. São fundações rasas, com profundidades entre 2 e 4m, formadas por uma base de concreto, usualmente de formato quadrado ou retangular e um fuste, que pode ser normal ou inclinado. Na Figura 28 são mostrados exemplos.

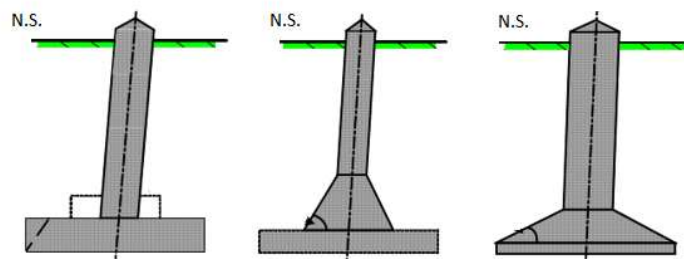


Figura 28 – Fundações em Sapata. Fonte: adaptado de [19]

### 6. Estaqueadas:

São fundações indicadas para terrenos pantanosos e alagados, que apresentam baixa resistência. Neste caso são utilizadas estacas, verticais ou inclinadas, que transmitem as cargas diretamente às camadas de solo mais profundas, mais resistentes. Esta transmissão é realizada através de atrito lateral entre a estaca e o solo, bem como por sua ponta. Neste tipo de fundação também são utilizados blocos de fundação, estruturas de concreto armado ou metálicas utilizadas na transição de esforços entre a estrutura e as estacas.

Nos últimos anos o uso de estacas helicoidais tem se mostrado cada vez maior, dada sua facilidade de execução, agilidade e utilização de equipamentos e mão de obra simples [22]. Na Figura 29 são mostrados exemplos de fundações estaqueadas convencionais e helicoidais.

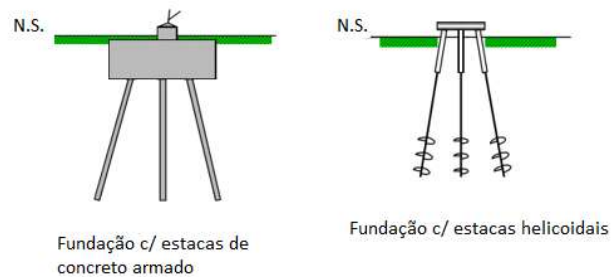


Figura 29 - Fundações Estaqueadas. Fonte: adaptado de [19]

## 7. Fundações para Estais:

Quando da utilização de estruturas estaiadas, é necessário que não só os mastros principais das estruturas tenham fundações, mas também as próprias peças enterradas que são conectadas aos cabos de aço que formam os estais. As fundações deste tipo podem ser construídas com placas de concreto armado pré-moldadas, com a utilização de tubulões curtos, blocos ancorados em rocha, hastes helicoidais, dentre outras. Na Figura 30 são apresentados alguns exemplos.

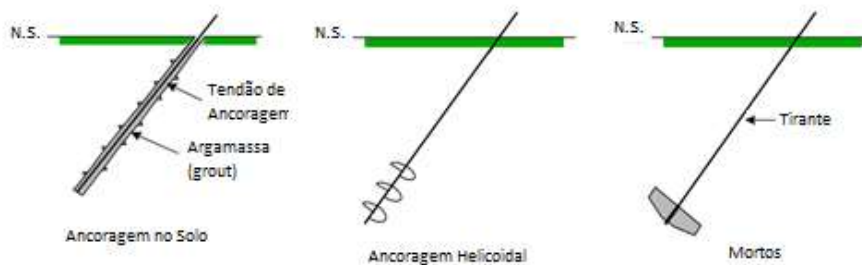


Figura 30 - Fundações para Estais. Fonte: adaptado de [19]

### 2.2.6 Sistema de Aterramento

Um aterramento elétrico consiste em uma ligação elétrica proposital entre um sistema físico ao solo, sendo composto basicamente de eletrodos de aterramento, conexões elétricas de pontos dos sistemas aos eletrodos e a terra. Estes sistemas apresentam uma gama de aplicações, que sempre estão associadas a dois fatores principais: desempenho do sistema ao qual está conectado e questões de segurança de seres vivos e proteção de equipamentos [23].

As LT's são equipamentos distribuídos, que atravessam longas distâncias, proporcionando uma probabilidade elevada de serem atingidas por descargas atmosféricas, com possibilidade de desligamento devido às sobretensões geradas por este tipo de fenômeno [24].

O desligamento de uma linha devido à incidência de descargas atmosféricas pode ocorrer basicamente através de dois mecanismos: *flashover* e *back-flashover*. No primeiro fenômeno, também chamado de falha de blindagem, a descarga atinge diretamente os cabos condutores, gerando ondas de sobretensão, submetendo as cadeias de isoladores a valores de tensão elevados, que podem promover a ruptura de seu isolamento. Já no *backflashover*, as descargas atingem diretamente os cabos para-raios, que são conectados eletricamente à estrutura e, conseqüentemente, a seu sistema de aterramento. Quando a onda de corrente - e sua onda de sobretensão associada - geradas pela descarga chegam à estrutura, uma parte continua seguindo pelos cabos para-raios, e a maior parte desce em direção ao sistema de aterramento, sendo então refletida “de volta” para a torre. O resultado é o surgimento de sobretensões no topo da torre que são mais severas quando a impedância de aterramento é maior [24].

Por esta razão, o remédio mais comum para melhorar o desempenho das LT's frente a descargas atmosféricas é a diminuição da impedância de pé de torre. O sistema de aterramento fornece um caminho de baixa impedância para a corrente ser descarregada no solo, impossibilitando o desenvolvimento de sobretensões na torre que poderiam levar à ruptura do isolamento das cadeias de isoladores [25].

Os sistemas de aterramento de LT's geralmente são compostos de cabos conectados aos pés das estruturas, chamados de cabos contrapesos. Estes cabos, podem ser de diferentes materiais, sendo os mais comuns o aço e o *copperweld* (aço-cobre). As ferragens de fundação da torre também podem ser consideradas parte do aterramento [26]. Na Figura 31 é mostrado um sistema de aterramento típico de linha de transmissão.

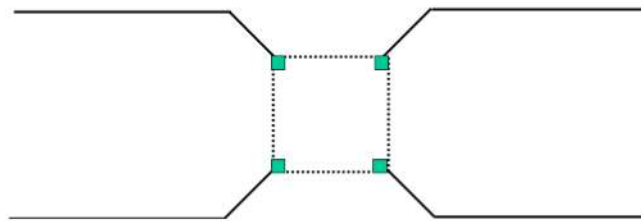


Figura 31 - Aterramento Típico de Estrutura de LT. Fonte: [26]

Além da melhoria do desempenho, o sistema de aterramento das LT's apresenta também outras funções. Dentre elas se destaca o seu papel para que seja assegurada a correta operação de sistemas de proteção, ao viabilizar níveis maiores de correntes de falta, proporcionando sua rápida detecção e eliminação. Desempenham também importante parte no controle e limitação de tensões de passo e toque que podem ser geradas na ocorrência de faltas e incidência de

descargas atmosféricas, e podem causar riscos à segurança de pessoas e materiais. Nestes casos, o sistema mostrado na Figura 31 geralmente não é suficiente, sendo necessário um projeto específico e diferenciado, geralmente aplicáveis a zonas urbanas e/ou com possibilidade de circulação de pessoas.

### 2.2.7 Vão

O vão é a faixa de terreno compreendida entre duas estruturas de uma LTA. Não se configuram como componentes eletromecânicos da linha propriamente ditos, sendo, no entanto, de fundamental importância, pois são compostos por elementos e fatores ambientais que podem gerar risco à operação do ativo e segurança de pessoas, como vegetações, erosões, queimadas, invasões irregulares, dentre outros.

Esta faixa de terreno leva o termo técnico de faixa de passagem, ou faixa de segurança, sendo uma área de terreno ao longo da LT cujo principal objetivo é garantir as condições necessárias para a construção, operação, inspeção e manutenção, bem como a segurança de pessoas, equipes de manutenção e terceiros [27]. O cálculo da largura da faixa de segurança é dado leva em conta o balanço dos cabos devido à ação dos ventos, fatores elétricos (campos eletromagnéticos, corona, rádio interferência e ruído audível) e o posicionamento das fundações das torres e estais [28].

A faixa de passagem por ser basicamente classificada em dois grupos [27]:

1. Domínio – faixa de terreno que sofreu processo desapropriatório em favor da concessionária, tornando-se, portanto, sua propriedade.
2. Servidão – faixa de terreno instituída legalmente em favor da concessionária, cuja utilização é regida por meio de contratos firmados entre os proprietários e a concessionária. Esta área, portanto, permanece como propriedade de um terceiro, mas sob restrições de ocupação e uso.

Na Figura 32 é apresentado um exemplo de faixa de servidão.

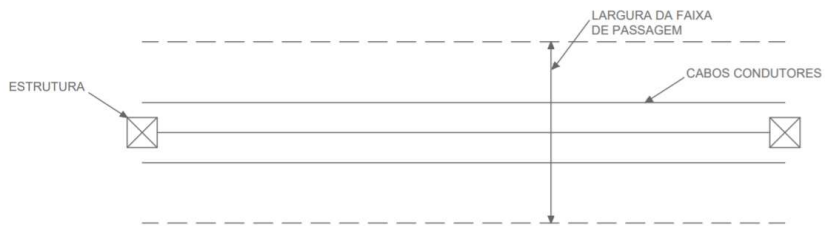


Figura 32 - Faixa de Servidão de LT. Fonte: autor

## 2.3 Resumo do Capítulo

Neste capítulo foram abordados os principais componentes construtivos de uma linha de transmissão, seus diferentes tipos e funções. Na Tabela 1 é mostrado um resumo dos pontos discutidos.

Tabela 1 – Resumo dos Principais Componentes, Funções e Tipos em Linhas de Transmissão

Componente	Função	Principais Tipos
Cabos condutores	Conduzir corrente elétrica	CA, CAA, CAL, SD, CASA, CALA
Cabos para raios	Proteção contra descargas atmosféricas	Aço, CAA, aço-alumínio, OPGW
Isoladores e ferragens	Isolar eletricamente os isoladores das estruturas e suportar os cabos condutores	Vidro, porcelana, poliméricos
Estruturas	Suportar e transmitir às fundações as solicitações verticais, horizontais e longitudinais e proporcionar pontos de fixação aos cabos condutores e para raios	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aço, concreto, madeira,</li> <li>• Ancoragem, suspensão, transposição</li> <li>• Circuito simples, duplo</li> <li>• Disposição horizontal, vertical, triangular</li> <li>• Autoportantes, estaiadas</li> </ul>
Fundações	Transmitir ao solo todas as solicitações e esforços	Tubulão, sapata, estacas, grelha, blocos
Sistema de aterramento	Melhoria de desempenho da LT, aspectos de segurança e operação de sistemas de proteção	Cabos de cobre ou aço, utilização de hastes
Vão (faixa de passagem) (1)	Garantir as condições necessárias para a construção, operação, inspeção e manutenção, segurança de pessoas, equipes de manutenção e terceiros	N/A

(1) O vão não se configura exatamente como um componente eletromecânico da LT. no entanto, de fundamental importância, pois são compostos por elementos e fatores ambientais que podem gerar risco à operação do ativo e segurança de pessoas, como vegetações, erosões, queimadas, invasões irregulares, dentre outros.



O próximo capítulo aborda aspectos de manutenção das linhas de transmissão, e quais são os principais modos de falha que acometem os seus componentes.

## **3 ASPECTOS DE MANUTENÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO AÉREAS**

### **3.1 Introdução**

Os componentes apresentados no capítulo anterior são projetados para suportarem todas as solicitações às quais a LT é submetida ao longo de sua vida útil, ou seja, não falham repentinamente, sendo este um processo gradativo. Antes de uma falha completa, ou falha funcional, que resulta em um desligamento, os componentes das LT's “dão sinais” de que podem vir a falhar.

Estes sinais, também chamados de anomalias, ou modos de falha, são típicos de cada componente, e surgem pelas mais variadas razões. Este capítulo aborda os itens apresentados no capítulo anterior e os principais modos de falha levantados na literatura acerca do tema.

### **3.2 Modos de Falha de Linhas de Transmissão Aéreas**

#### **3.2.1 Cabos Condutores**

Os modos de falha em cabos condutores e seus acessórios se apresentam de diferentes formas, sendo as principais [11], [29], [30]:

1. Corrosão;
2. Tentos rompidos;
3. Espaçadores defeituosos ou frouxos;
4. Amortecedores faltantes, defeituosos ou corroídos;
5. Emendas defeituosas, mal instaladas ou desgastadas;
6. Engaiolamento.

A deterioração por corrosão se manifesta de formas diferentes em áreas distintas, sendo muito dependente da região em que o ativo está instalado. LT's localizadas em regiões industriais, próximas do mar, ou que apresentem um misto dos dois ambientes são mais propensas a apresentar problemas relacionados à corrosão.

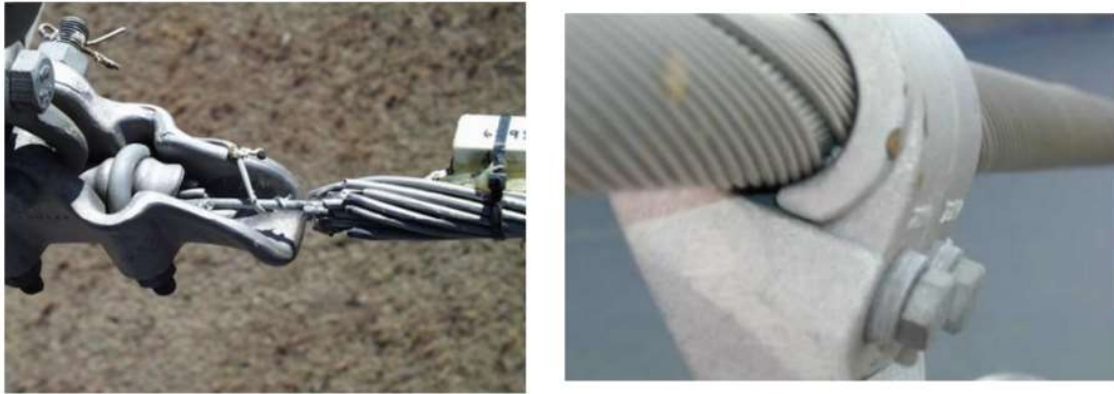
No que se refere aos cabos condutores, a corrosão pode ocorrer de forma interna ou externa. A primeira se refere à degradação nas camadas internas do condutor, formadas por tentos de alumínio e a alma de aço, sendo causada principalmente por poluição industrial e salina, na presença de umidade. Já a segunda ocorre nos tentos externos dos condutores, onde poluentes sulfurosos causam pequenas imperfeições na superfície do condutor, onde impurezas são depositadas. Desta forma, na presença de umidade são formadas pequenas células de corrosão, distribuídas de forma relativamente uniforme [11]. Na Figura 33 são mostrados exemplos de cabos com corrosão interna e externa.



Figura 33 - Cabos com Corrosão. Fonte: [30] e [31]

Modos de falha bastante comuns em cabos condutores se referem a aqueles induzidos pela ação dos ventos, que pode ser dividida em três grupos: vibrações eólicas, oscilação dos sub-condutores e *galloping* [11], [31]. As vibrações eólicas representam a forma mais crítica de ação dos ventos sobre condutores, por estarem presentes em todas as linhas de transmissão [12].

As vibrações eólicas ocorrem quando o vento incide sobre os condutores, preferencialmente de forma perpendicular e em terrenos abertos, gerando pequenos vórtices próximos ao cabo, criando vibrações da ordem de poucos Hz. Com o tempo, estas vibrações acarretam fadiga do cabo, incorrendo em rompimento de tentos, principalmente nas condições em que o cabo apresenta baixa mobilidade, como por exemplo, em grampos de suspensão e ancoragem, emendas, amortecedores, espaçadores, etc. [11], [31], [12]. Na Figura 34 são apresentados exemplos.



*Figura 34 - Tentos Rompidos em Cabo Condutor. Fonte: [30]*

Outro ponto relacionado à vibração de cabos condutores se refere à interação entre estes e os espaçadores e amortecedores. Considera-se situação de falha dos sistemas de grampeamento e amortecimento quando, devido à frouxidão ou má instalação, movimento relativo entre estes elementos e o cabo é permitido, acarretando danos ao cabo devido à abrasão causada por vibração e oscilação dos condutores. Estes danos eventualmente podem evoluir para rupturas e levar o cabo à falha completa [31]. Na Figura 35 são mostrados exemplos.



*Figura 35 - Danos em Cabos Condutores em Interface com Espaçadores. Fonte: [31]*

Descargas atmosféricas também podem ser fontes de potenciais falhas em cabos condutores. Embora sejam relativamente bem dimensionados para suportar impactos externos desta natureza, os condutores podem sofrer danos, especialmente no caso de descargas de maiores magnitudes. Estas avarias podem variar desde pequenas picadas na parte externa, até derretimento e quebra de tentos, reduzindo a capacidade mecânica [11]. Na Figura 36 são apresentados exemplos.



Figura 36 – Cabos com Sinais de Descargas. Fonte: [30]

O *birdcaging*, ou engaiolamento de cabos pode surgir quando os tentos externos de alumínio são comprimidos, fazendo com que assumam um formato semelhante a uma gaiola de pássaros, ou *bird cage*. Costumam surgir durante o encordoamento, instalação de ferragens a compressão ou por excessivo aquecimento do cabo enquanto em operação. Na Figura 37 são mostrados exemplos.

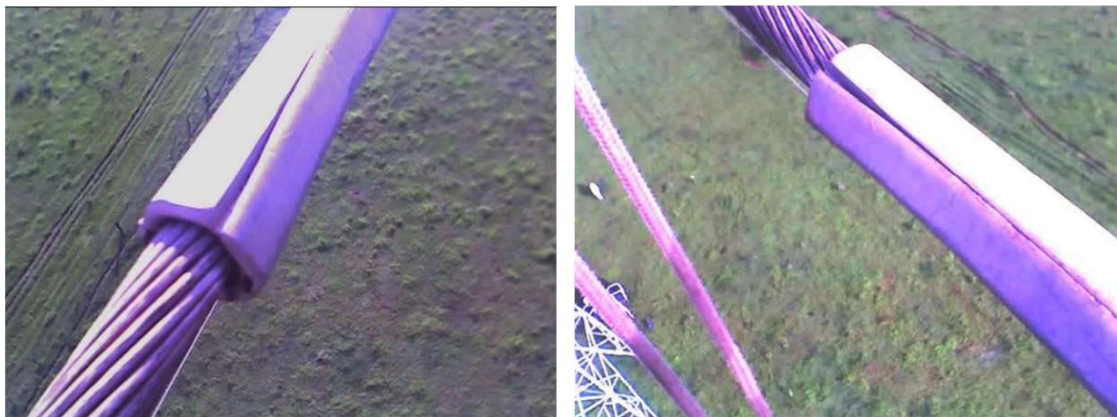


Figura 37 - Cabos engaiolados. Fonte: [30]

No que se refere a falhas em emendas e conexões de condutores em LT's, são resultado de diversos mecanismos, que dependem de parâmetros operacionais e ambientais. De forma geral, um processo predominante é o relaxamento gradual da força de contato, que leva a um aumento da resistência de contato, trazendo aquecimento. Esta diminuição no contato pode ser oriunda de diversos fatores, como abrasão, fadiga e corrosão galvânica [32].

Nas emendas a compressão, problemas surgem devido à compressão inadequada ao longo da emenda, principalmente devido à má aplicação ou projeto inadequado. Isto leva à possibilidade de ingresso de umidade, resultando em oxidação das superfícies internas de alumínio, entre a emenda e o condutor. O resultado disto é que, com o tempo, a emenda pode se tornar um elemento de aquecimento, piorando ainda mais a taxa de oxidação, aumentando a resistência elétrica, levando à circulação de corrente na alma do condutor, sobreaquecimento e até mesmo ruptura [11]. Na Figura 38 são mostradas emendas a compressão mal instaladas.

Outro ponto, observado em [32], é que, conforme apontado anteriormente, a fadiga devido a vibrações eólicas é mais evidente em pontos onde o movimento é restringido. Desta maneira, “pode-se presumir que, em emendas, o efeito da pouca mobilidade dos fios dentro da região da emenda também faz com que estes fios acabem por romper”.



*Figura 38 - Emendas a Compressão com Problemas. Fonte: [31]*

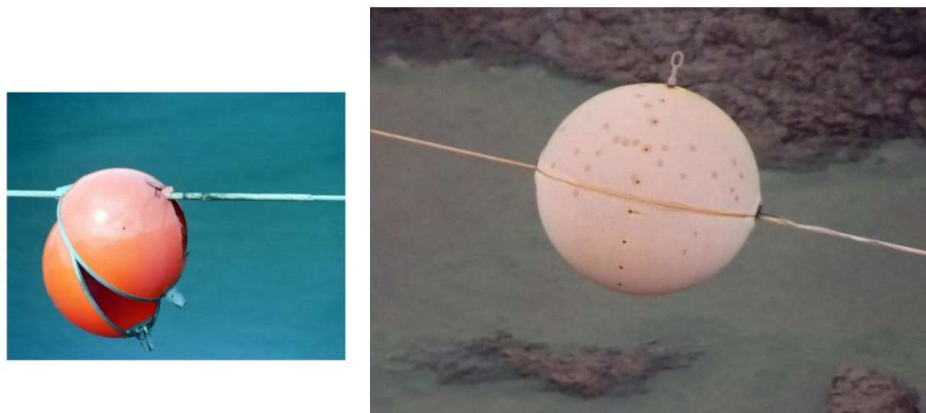
No que se refere a emendas pré-formadas, o mau contato elétrico também é reportado como o principal problema reportado, levando ao recozimento, fusão e ruptura da emenda. Várias causas são elencadas para esta diminuição de contato, como transporte, instalação e montagem inadequadas, não aplicação ou perda de propriedades da pasta antioxidante, sujeiras nos tetos das emendas, grau de liberdade na movimentação dos tetos, qualidade do material ou problemas de projeto, temperatura de operação e fadiga do material [32].

### 3.2.2 Cabos Para-Raios e Ferragens

Por também serem formados por tetos, apresentarem elementos de amortecimento e emendas, grande parte das anomalias em cabos para-raios é similar a aquelas encontradas em cabos condutores, com algumas particularidades.

Não são utilizados espaçadores nestes tipos de cabos, não havendo, portanto, anomalias associadas a estes tipos de componentes. Os cabos de aço galvanizado, pela própria constituição do material, tendem a sofrer um pouco mais os efeitos da corrosão, por estarem expostos diretamente ao ambiente. Descargas atmosféricas também costumam afetar mais os cabos guarda, que são projetados exatamente para receber os impactos mecânicos e elétricos destes fenômenos naturais.

Uma outra fonte de falhas em cabos para-raios são as esferas de sinalização. Apesar de desempenharem apenas funções de aviso a aeronaves, o seu formato e os materiais utilizados as tornam susceptíveis a danos. Vários modos de falha acometem estes componentes, incluindo degradação e perda de cor do material devido a exposição a intempéries diversas, o que pode levar a rachaduras e desintegração da esfera. A interface das esferas com os cabos para-raios pode também ser origem de degradação, devido a abrasão produzida pelo movimento relativo entre os dois elementos [30]. Na Figura 39 são apresentados exemplos.



*Figura 39 - Anomalias em Esferas de Sinalização. Fonte: [30] e [31]*

No que se refere às ferragens, existem vários mecanismos de degradação que podem afetar estes elementos, como corrosão, desgaste e fadiga. Além disto, a degradação destes elementos, por estarem sujeitos à passagem de corrente elétrica, pode ocasionar no aumento da resistência elétrica do componente, com posterior aquecimento, e, no limite, derretimento da ferragem, levando o cabo ao solo [33].

### 3.2.3 Isoladores e Ferragens

As causas de degradação em isoladores são várias, podendo ser oriundas de defeitos de fabricação, manuseio durante a instalação e manutenção, erros de projeto, degradação durante o ciclo de vida, vandalismo e danos causados por animais [4].

No que se refere a isoladores de disco de vidro, os modos de falha podem ser divididos em elétricos e mecânicos. Estes tipos de componentes são altamente resistentes à perfuração elétrica, mas, nas ocasiões em que elas acontecem a tensão residual no vidro, introduzida devido ao processo de fabricação, irá acarretar em sua quebra, facilitando a identificação da anomalia. Perfurações em isoladores de vidro podem ser causada por diversos fatores, como concentração

de descargas elétricas devido a acúmulo de poluição, perfuração térmica devido a perdas dielétricas no vidro ou choque térmico devido a descargas atmosféricas ou *flashovers* [4].

Em relação a modos de falha mecânicos, os isoladores de vidro podem sofrer quebras devido a fatores como erosões devido a correntes de fuga, vandalismo e corrosão. Esta última pode afetar os pinos, tendo origem em altas densidades de correntes de fuga concentradas neste componente, gerando descargas parciais, removendo a galvanização e consumindo o metal base, até um ponto em que a resistência mecânica do isolador é diminuída de tal forma que há o seu rompimento [4].

A corrosão também afeta as campânulas, principalmente nas unidades mais próximas do lado energizado, e em situações nas quais não há anéis de corona e/ou há espaço entre o vidro e a campânula. Este efeito corona persistente causa erosão da galvanização e consequentemente expõe o metal base à corrosão [4]. Na Figura 40 são mostrados exemplos de corrosão na campânula e pino de isoladores de vidro.



Figura 40 – Corrosão em Isoladores de Vidro. Fonte: [4]

Os isoladores de disco de porcelana estão mais sujeitos a perfurações elétricas, que se manifestam como pequenos orifícios no dielétrico, entre a campânula e o pino. As causas para perfuração são variadas, e incluem impulsos atmosféricos, aquecimento devido a perdas dielétricas e *stress* causado por campos elétricos de longo prazo [4]. Na Figura 41 são apresentados exemplos de isoladores deste tipo perfurados.



Figura 41 - Perfurações em Isoladores de Disco de Porcelana. Fonte: [4]



No que tange à defeitos mecânicos, considera-se que isoladores de porcelana falharam quando não mais conseguem suportar as cargas mecânicas para as quais foram projetados, ou quando há danos significativos na porcelana, em formas de trincas e quebras. Estas anomalias podem ter várias origens, como erosão de material devido a corona e/ou altos campos elétricos, estresses mecânicos devido a corrosão de partes metálicas do isolador, expansões térmicas desiguais entre os seus diferentes materiais e induzidas por perfuração elétrica da porcelana, sobrecargas mecânicas e vandalismo [4].

Em relação aos isoladores poliméricos, os principais modos de falha listados na literatura correspondem podem ser divididos em mecânicos e elétricos. Os primeiros se manifestam através de fraturas frágeis (falhas mecânicas do bastão de fibra de vidro devido a ataques químicos), destruição do bastão por descargas, e falha mecânica das ferragens. Já os modos de falha elétricos ocorrem devido a descargas disruptivas (*flashovers*) devido à contaminação e *flashunders*, atividades elétricas internas ao isolador, originadas devido ao ingresso de umidade e falhas internas, que resultam em carbonização interna ou na superfície do bastão de fibra de vidro. Este fenômeno gera trilhamentos (*tracking*), fendas e furos ao longo do bastão, até o momento que o componente não consegue mais isolar a tensão aplicada [4], [34]. Na Figura 42 são apresentados exemplos de fraturas frágeis e *flashunders*.

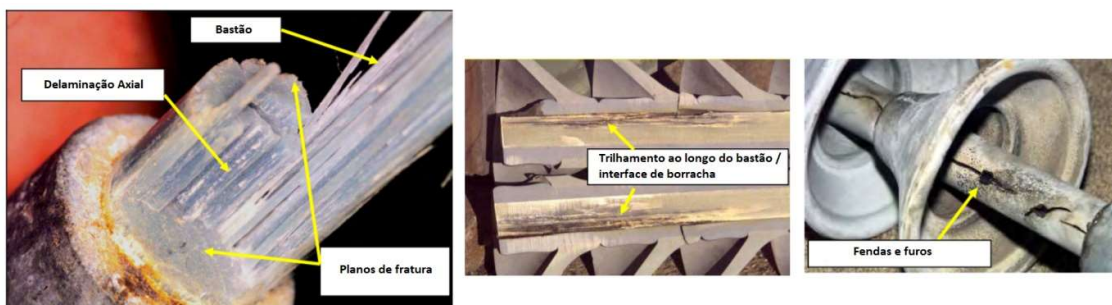


Figura 42 - Fratura Frágil e Flashunder em Isoladores Poliméricos. Fonte: adaptado de [34]

No que se refere às ferragens, pode-se considerar que estão sujeitas aos mesmos mecanismos descritos em 3.2.2.

### 3.2.4 Estrutura

O principal modo de falha em elementos das estruturas de linhas de transmissão é a atuação da corrosão e problemas de pintura. A taxa na qual ela evolui depende de vários fatores,

como condições ambientais, altitude, poluição atmosférica e proximidade do mar, bem como aspectos relacionados à proteção, como periodicidade e momento da primeira pintura e qualidade da preparação de superfície para a pintura [11]. Na Figura 43 são mostrados exemplos de corrosão em peças de torres.



Figura 43 - Corrosão em Estruturas. Fonte: [31]

Além de corrosão do aço galvanizado, as estruturas podem também estar sujeitas à flambagem devido a movimentações na fundação, peças quebradas e parafusos soltos [11]. Também é comum que peças ou parafusos estejam faltantes, devido a ações de vandalismo, bem como peças podem entortar devido à colisão de veículos e máquinas.

### 3.2.5 Fundações

Quando as fundações são construídas utilizando-se os materiais e métodos apropriados, não há sinais evidentes de degradação. No entanto, processos de deterioração podem ocorrer, se manifestando principalmente na forma de trincas no concreto e corrosão, tanto das ferragens internas quanto do *stub* [11], [35].

Em fundações que utilizam concreto, trincas podem se manifestar principalmente em processos de cura do concreto, ataques de agentes químicos e físicos e má qualidade da obra e materiais [35]. Na Figura 44 são apresentados exemplos de trincas em fundações.



Figura 44 - Trincas na Fundação. Fonte: [35]

A corrosão se dá quando umidade e oxigênio estão presentes, e quando a passividade do metal já se perdeu. Ela aparece nas ferragens internas, quando a cobertura de concreto está porosa, devido a ataques químicos, perda de alcalinidade no concreto e trincas. Uma das consequências da corrosão nestes tipos de elementos é o aumento de volume do metal, o que pode levar a trincas no concreto, que geralmente se manifestam paralelamente às ferragens.

A corrosão também se manifesta em *stubs*. A interface entre o concreto que aflora do solo e a estrutura metálica da torre normalmente não é selada o suficiente para impedir o ingresso de agentes, como a umidade, servindo de caminho para elementos agressivos [35].

Por fim, as fundações em grelhas e ancoragens de estais também sofrem degradação corrosiva, seguindo o mesmo padrão descrito anteriormente [26]. Na Figura 45 são mostrados exemplos de corrosão em grelhas.



Figura 45 - Corrosão em Grelhas. Fonte: [35]

### 3.2.6 Sistema de Aterramento

Os cabos contrapesos dos sistemas de aterramento apresentam tempos de vida não maiores que dez anos em várias aplicações, dependentes de diversos fatores, como acesso irrestrito ao público em geral, podendo ocasionar em escavação e rompimento dos cabos e

conexões, solos ácidos, que aceleram a corrosão ou quando há consideráveis tensões de neutro em regime permanente [4].

### 3.2.7 Vão

Como apontado anteriormente, o vão não se configura como um componente eletromecânico da LT, mas representa fundamental importância, dado que são compostos por elementos e fatores ambientais que podem gerar risco à operação do ativo e segurança de pessoas.

Dentre estes fatores de risco destacam-se as vegetações e queimadas. Conforme mostrado na Figura 3, 33% dos desligamentos em LT's da Rede Básica, no período de 2012 a 2020 tiveram como origem eventos de aproximação de vegetação aos cabos condutores e queimadas na faixa ou próximas à faixa.

Outro elemento de atenção que merece destaque nos vãos são as erosões e invasões. As primeiras, causadas por diversos fatores ambientais, põem em risco as fundações das estruturas. Já as invasões são construções irregulares dentro das faixas de servidão. Além de gerar riscos à população, comprometem a operação da linha e dificultam o acesso de equipes de manutenção da concessionária [27].

Na Figura 46 são apresentados exemplos de erosões e invasões.



Figura 46 - Erosões e Invasões de Faixa em LT's. Fonte: [36]

## 3.3 Manutenção e Inspeção de Linhas de Transmissão Aéreas

A estratégia de manutenção de LT's pode basicamente ser resumida em manutenções periódicas e corretivas, que envolvem reparo de componentes e, em casos mais extremos, restaurações emergenciais [11].

As atividades de manutenção periódica envolvem intervenções como por exemplo inspeções, gestão de faixas de passagem e vegetação, pintura de torres e lavagem de cadeias de isoladores. A decisão sobre a necessidade e periodicidade destas manutenções deve levar em conta vários aspectos, como o ambiente nos quais as linhas estão inseridas, aspectos regulatórios, condição dos ativos e sua criticidade/importância [11].

As inspeções são parte crucial da estratégia de manutenção de LT's. Estas podem se dar de diversas formas, desde métodos mais simples e diretos como inspeções terrestres com escalada e averiguação visual dos componentes, até a utilização de helicópteros para ganhos de produtividade, muitas vezes acoplados com câmeras de alta definição, termográficas e sensores LIDAR (*Lighting Detection and Ranging*) [11].

A utilização de equipamentos de monitoramento em tempo real de componentes, como o tamanho da catenária, vibração, contaminação de isoladores, vem crescendo nos últimos anos, bem como a utilização de VANT's - Veículos Aéreos Não Tripulados, mais conhecidos como drones e robôs para inspeção e manutenção [11], [36], [37].

De forma mais específica, de acordo com o componente da LT, várias técnicas distintas de inspeção são elencadas em [11]. Para o caso de sistemas de aterramento, técnicas de medição são descritas em [23] e [25]. A necessidade e periodicidade destas técnicas mais específicas também depende da análise dos fatores elencados acima.

### 3.4 Resumo do Capítulo

Neste capítulo foram abordados os principais modos de falha de componentes de linha de transmissão. Na Tabela 2 é mostrado um resumo dos principais apresentados.

Tabela 2 - Principais Componentes e Modos de Falha de Linhas de Transmissão

Componente	Principais Modos de Falha
Cabos condutores	Corrosão, tentos rompidos, engaiolamento, espaçadores, emendas e amortecedores defeituosos, faltantes, corroídos ou desgastados
Cabos para raios	Corrosão, tentos rompidos, engaiolamento, emendas e amortecedores defeituosos, faltantes, corroídos ou desgastados, esferas de sinalização degradadas
Isoladores e ferragens	Corrosão, quebras, trincas, perfuração elétrica, contaminação, degradação do material polimérico e do núcleo, falha mecânica
Estruturas	Corrosão, pintura desgastada, peças tortas e/ou faltantes, parafusos faltantes
Fundações	Corrosão em grelhas e stubs, trincas no concreto
Sistema de aterramento	Corrosão, rompimento de cabos e conexões, conectores faltantes
Vão (faixa de passagem)	Vegetação perigosa, erosões, invasões de faixa,

Foi também apresentado um panorama geral dos principais aspectos de manutenção e inspeção de linhas de transmissão aéreas.

O próximo capítulo traz o tema de aprendizagem de máquina, focando especificamente nas árvores de decisão, bem como os modelos de Markov.

## 4 ASPECTOS SOBRE APRENDIZAGEM DE MÁQUINA, ÁRVORES DE DECISÃO E MODELOS DE MARKOV

### 4.1 Introdução

Quando os primeiros computadores surgiram, as pessoas logo se perguntaram se aquelas máquinas um dia seriam capazes de se tornar inteligentes. A partir daí surgiu a ideia de IA, ou Inteligência Artificial, ramo da ciência da computação que busca automatização de tarefas repetitivas. Um dos desafios centrais da IA é resolver tarefas que são fáceis para as pessoas executarem, mas difíceis de serem descritas formalmente [38]. Conseguimos facilmente reconhecer palavras, fotos, padrões, etc., mas não sabemos formalmente como executamos estas ações. O objetivo da IA, portanto, é ensinar máquinas a realizar estas ações de forma automática e independente.

ML - *Machine Learning*, ou aprendizagem de máquina, é um campo da IA, que busca aprender com dados e tomar decisões ou fazer previsões, sendo baseada em teoria da probabilidade e estatística. Os algoritmos de ML têm a capacidade de aprender sem programação explícita, ou seja, aprendem com a experiência. Para tanto, utilizam técnicas como regressão logística, *Maximum Likelihood Estimators*, *Support Vector Machines*, entre outros [38], [39], [33].

Segundo [38], os modelos DL - *Deep Learning*, ou aprendizagem profunda, são sistemas inspirados no funcionamento do cérebro humano, neste sentido não diferindo muito das Redes Neurais Artificiais. As referências [40] e [41] também apontam que o DL advém das Redes Neurais Artificiais, cujos estudos exploratórios se iniciaram na década de 40, com o modelo de McCulloch e Pitts, passando pelo Perceptron de Frank Ronsblatt, Redes Associativas de Hopfield, dentre outros.

De acordo com [40], o Deep Learning nada mais que é uma classe de técnicas de *Machine Learning* que explora diferentes camadas de processamento de dados não lineares para extração e transformação de informações através de aprendizados supervisionados ou não supervisionados.

Conforme [41], o DL também é uma classe de algoritmos de *Machine Learning* que utiliza várias camadas de unidades de processamento não lineares. Cada uma destas camadas utiliza a saída da anterior como entrada, em uma representação hierárquica de níveis.

Vê-se, portanto, que o DL se apresenta como uma vertente da área de ML, que por sua vez é uma dimensão da IA. Na Figura 47 é apresentado um diagrama mostrando a relação entre os três termos.

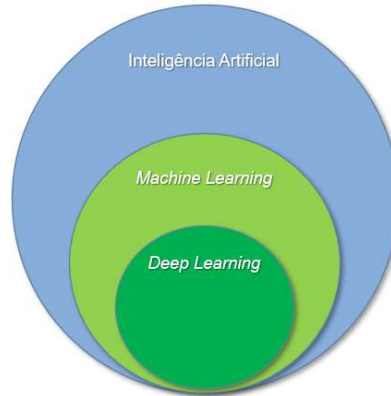


Figura 47 - Deep Learning como Parte do Machine Learning e Inteligência Artificial. Fonte: adaptado de [38]

Os algoritmos utilizados em ML e DL são inúmeros, para diversos tipos de aplicações nas mais variadas atividades. De uma forma geral, podem ser divididos em três principais tipos [42], [43], [44], [45]:

1. Aprendizado Supervisionado
2. Aprendizado Não Supervisionado
3. Aprendizado Semi-Supervisionado
4. Aprendizado por Reforço

Em uma estrutura de aprendizado supervisionado, as entradas e saídas desejadas para a rede são fornecidas por um agente externo. Consiste em se ter disponíveis, considerado cada amostra dos sinais de entrada, as respectivas saídas desejadas, ou seja, cada amostra de treinamento é composta por sinais de entrada e suas respectivas saídas [46], [47], [45].

Já no aprendizado não supervisionado, não há um agente externo, ou professor, para acompanhar o processo de aprendizado. Desta forma, as saídas desejadas não estão disponíveis, e, conseqüentemente, o algoritmo deve ser capaz de auto-organizar as entradas, identificando subconjuntos (clusters) que contenham similaridades [37], [47], [45].

A aprendizagem semi-supervisionada consiste em um meio termo entre a supervisionada e não supervisionada, na qual há um conjunto de observações rotuladas e não



rotuladas, sendo utilizados ambos para encontrar uma hipótese que seja capaz de classificar novas observações entre as classes já existentes [45].

O aprendizado por reforço pode ser visto como um caso particular do aprendizado supervisionado, em que no primeiro a medida de desempenho é baseada no conjunto de respostas desejadas usando um critério de erro conhecido, ao passo que no segundo o desempenho é baseado em qualquer medida que possa ser fornecida ao sistema. Desta forma, diversos algoritmos utilizados no treinamento com reforço são baseados em métodos estocásticos, que selecionam probabilisticamente os ajustes, em um processo cujo objetivo é maximizar o valor da recompensa através de tentativa e erro [43], [46], [47], [45].

Pelo fato de o aprendizado por reforço ser uma espécie de aprendizado supervisionado, vamos nos ater aos dois primeiros grupos. Estes podem ainda ser divididos em três classes de algoritmos:

1. Classificação
2. Regressão
3. Clusterização

Algoritmos de classificação são utilizados em problemas em que as saídas são compostas por um número finito de categorias discretas [42]. São técnicas de aprendizado supervisionado, pois as saídas, ou classes, são diretamente relacionadas com parâmetros de entrada. Existem inúmeros algoritmos de classificação, como os SVM's, *K-Nearest Neighbour*, *Naive Bayes*, *Random Forests*, Redes Neurais Artificiais, dentre outros.

Já algoritmos de regressão são empregados quando as saídas são compostas de uma ou mais variáveis contínuas [42]. São também técnicas de aprendizado supervisionado, pois estas saídas estão relacionadas com as entradas, e o objetivo é encontrar uma função que melhor descreva a relação entre os inputs e outputs. Exemplos de algoritmos deste tipo incluem a regressão linear e múltipla, SVR – *Support Vector Regression*, *Regression Trees*, Redes Neurais Artificiais, dentre outros.

A clusterização, ou *clustering*, busca identificar padrões entre as entradas [42], sem que sejam apresentadas as respectivas saídas, sendo algoritmos auto-organizáveis. Exemplos de aplicações são as técnicas de *K-Means Clustering*, *Hidden Markov Model* e Redes Neurais Artificiais, mais particularmente os Mapas Auto-Organizáveis de Kohonen.

Na Figura 48 é apresentado um resumo das principais categorizações e técnicas discutidas.

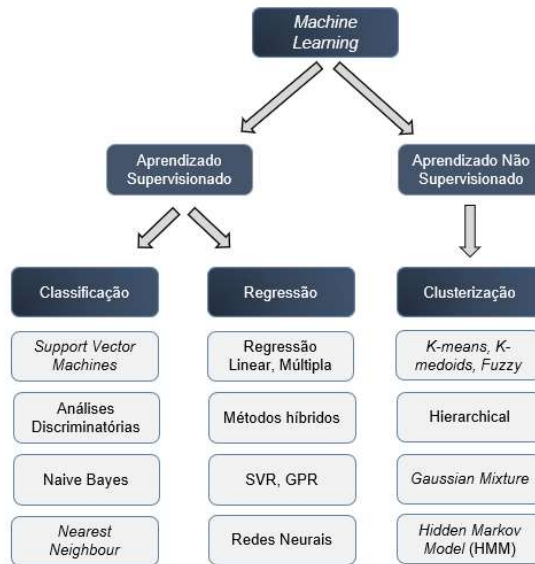


Figura 48 - Categorização de Algoritmos de Machine Learning. Fonte: adaptado de [48]

## 4.2 Árvores de Decisão

Árvores de decisão são modelos preditivos que podem ser utilizados tanto para classificação quanto para regressão, sendo denominadas árvores de classificação ou árvores de regressão, respectivamente. Dada a natureza do problema, nesta dissertação serão apresentadas as árvores de classificação, que são utilizadas para classificar um objeto, ou instância, em classes pré-definidas, baseados nos seus atributos [49].

As árvores de decisão são utilizadas em vários campos do conhecimento humano, como finanças, marketing, medicina e engenharia [49]. Exemplos práticos incluem predição de preços de opções de ação no mercado financeiro, estabelecimento de estratégias de marketing baseadas em previsões de compra de consumidores, diagnósticos de infecções sanguíneas e problemas cardíacos, reconhecimento facial e de movimentos na indústria de jogos eletrônicos [50], dentre várias outras aplicações.

No que se refere ao setor elétrico, as árvores de decisão são empregadas em uma variedade de aplicações, tanto em LT's quanto em equipamentos e sistemas de proteção. Em [51] são utilizadas para estimação de localização de falta em linhas de transmissão. Em [52] é realizada classificação de diferentes modos de falha em transformadores de corrente. Na referência [53] métodos de classificação, entre eles as árvores de decisão são empregadas para cálculo do índice de saúde de transformadores de potência. O artigo [54] apresenta o uso destes

algoritmos para classificação de diferentes tipos de falta em sistemas controladores de fluxo de potência em fazendas de energia eólica. Em [55] é descrita metodologia para cálculo de índice de saúde de disjuntores utilizando as árvores. Em [56] árvores de decisão são utilizadas para reconhecimento e classificação de falhas utilizando análise de resposta em frequência em transformadores de potência. Os trabalhos [57] e [58] trazem mais exemplos de aplicação em classificação e detecção de faltas em LT's, aéreas e subterrâneas respectivamente.

O funcionamento básico de uma árvore de decisões pode ser mostrado com o exemplo simples da Figura 49, um classificador para decisão de concessão de empréstimos.

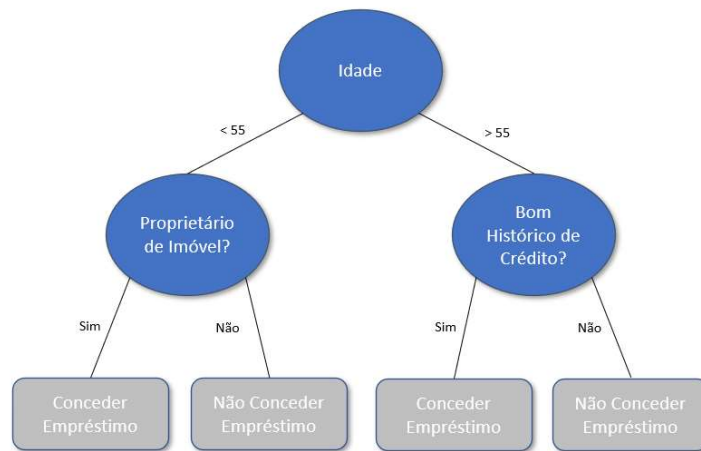


Figura 49 - Exemplo de Árvore de Decisão. Fonte: adaptado de [50]

As árvores são formadas por nós raízes (ou iniciais), internos e folhas. Os nós raízes e internos são associados aos atributos de entrada, ou independentes, sendo que os primeiros são aqueles situados no topo das árvores, apenas com ramificações de saída, e os segundos são posicionados em instâncias intermediárias das árvores, com ramificações de entrada e saída. Os nós folha, também chamados de nós terminais ou de decisão, estão associados à variável de saída, ou dependente [49], [50], [59].

No exemplo da Figura 49, “Idade” é o nó raiz, que tem duas ramificações, se o cliente tem mais do que 55 anos ou menos. A idade do cliente determina o que ocorre em seguida: se o cliente tem idade menor que 55 anos a árvore leva ao nó interno “Proprietário de Imóvel?”, caso contrário chega-se ao nó interno “Bom Histórico de Crédito?”. As respostas binárias “Sim” ou “Não” levam aos nós folhas, que representam a decisão final de concessão de empréstimo.

A metodologia para construção de árvores de decisão, também chamada de Indução de Árvores de Decisão, é descrita em [44], [49], [50], [59], [60] e [63]. O algoritmo é construído de cima para baixo, em uma abordagem conhecida como *top-down*, em que são realizadas várias

iterações, particionando os atributos de entrada em espaços menores, de forma que estes mesmos atributos divididos possam ser novamente fragmentados ou associados a uma classe. Por esta particularidade, esta abordagem é também conhecida como “dividir para conquistar” [49], [59].

Um importante critério do algoritmo é o Critério de Parada, que estabelece o fim das iterações do algoritmo caso algum critério seja atingido. Algumas condições são mais utilizadas, como a profundidade máxima da árvore ter sido atingida, todas as instâncias no banco de dados pertencentes a um único valor de classe de saída, o número de casos no nó “filho” ser menor que o número mínimo de casos no nó “pai”, dentre outros [49].

O Critério de Divisão é outro aspecto fundamental do algoritmo, permitindo a seleção adequada do atributo que divide os nós internos, de forma que esta escolha seja mais otimizada e contribua para uma árvore menor [59]. Existem diversas metodologias para este processo, como o Ganho de Informação [60], Índice Gini [61], Chi-Squared, DKM, Taxa de Ganho [49], dentre outros, dependendo do tipo de aplicação.

A utilização de árvores de decisão apresenta uma série de vantagens [49], [50]:

1. Facilidade de leitura e entendimento, mesmo por leigos.
2. Facilidade de manipulação dos bancos de dados. Podem ser utilizados atributos de entrada numéricos e textuais, os bancos de dados podem ter erros ou valores ausentes.
3. Dado que se tenha um poder computacional alto, os modelos desempenham muito bem, inclusive para bancos de dados de maior magnitude.
4. São modelos precisos, capazes de representar qualquer classificador de valores discretos.
5. Ao contrário de técnicas como redes neurais artificiais, não é uma “caixa preta”, ou seja, é possível se ter maior clareza do que está ocorrendo no algoritmo.

Obviamente, todo modelo apresenta também desvantagens. No caso das árvores de decisão, um dos principais problemas é que, dependendo dos dados apresentados, modelos extremamente complexos podem ser criados, levando a *overfitting* [50], característica de algoritmos de aprendizagem de máquina que leva o modelo a fazer previsões muito boas apenas dos dados aos quais foi apresentado, não sendo capaz de generalizar, ou seja, fazer previsões para dados novos.

A implementação computacional das árvores de decisão passa por diferentes algoritmos que foram desenvolvidos ao longo dos anos, como o ID3, C4.5, CART, CHAID, QUEST, CAL5, FACT, LMDT, T1, PUBLIC, MARS [49], [50], [59], cada um com suas especificidades. Dentre estes, os principais são descritos abaixo:

1. CART – *Classification and Regression Trees*:

Desenvolvido em [60], sendo caracterizado pelo fato de que são construídas árvores binárias, ou seja, cada nó apresenta apenas duas saídas. Uma outra funcionalidade muito importante do algoritmo é o fato de que ele pode trabalhar com regressão, ou seja, dados numéricos contínuos e não apenas classes.

2. ID3 - *Iterative Dichotomiser 3*:

Proposto em [61], o algoritmo ID3 é considerado um algoritmo bastante simples, frequentemente utilizado para propósitos de ensino. Trabalha com atributos categóricos nominais, e utiliza o método de ganho de informação para decisão de qual será o nó raiz, otimizando a construção da árvore. Este algoritmo apresenta baixo desempenho e *overfitting* em situações de árvores com tamanhos mais elevados, além de não apresentar mecanismo para tratamento de valores desconhecidos.

3. C4.5:

Proposto pelo mesmo autor (Quinlan) em [62], representa uma evolução do ID3. Também utiliza o conceito de ganho de informação, mas traz algumas novidades, como a possibilidade de se trabalhar com atributos categóricos (nominais e não nominais), ou contínuos, a utilização de uma metodologia de “poda” diferenciada, que remove ramos que não contribuem para a acurácia do modelo, transformando-os em nós folha, e a perspectiva de se trabalhar com valores ausentes, que não são utilizados no cálculo de ganho de informação.

### 4.3 Modelos de Markov

Os modelos são formas de representação da realidade através de equações matemáticas que buscam explicar e retratar os fenômenos observados. Parte importante do processo científico é comparar os resultados destes modelos com observações experimentais, para verificar o grau de sua aderência à realidade [64].

Os modelos de Markov podem ser aplicados e representam importância em vários ramos da ciência, alguns deles abordados em [64], como crescimento de populações, epidemias,

processos de cascatas em física, transformações radioativas, fissão nuclear, astronomia, reações químicas, teoria das filas e engenharia.

Em problemas de engenharia, os sistemas reais também podem ser descritos por seus estados, pela possível transição entre estes estados e à taxa na qual estas transições ocorrem. Qualquer falha de componente, manutenção, reparo, ou mudanças relevantes no entorno, como por exemplo clima ou carregamento, modificam o estado do sistema [67].

No setor elétrico várias aplicações destes modelos podem ser citadas, como em [68], em que são utilizadas para modelagem e prevenção de desligamentos em cascata. Em [69] são utilizadas para cálculo ótimo de sobressalentes de transformadores de potência. No trabalho em [70] as Cadeias de Markov servem para modelagem meteorológica para apoio no cálculo de distância mínima cabo solo em LT's. No artigo [71] a confiabilidade de sistemas de distribuição é avaliada, empregando-se Cadeias de Markov para descrever os estados das linhas de distribuição e equipamentos. Em [72] estes modelos, combinados com lógica *fuzzy*, são utilizados para predição de espessura de gelo em cabos condutores. Em [73] são aplicados em análise de custo e risco em projetos de LT's. O artigo [74] traz os modelos sendo empregados em análise de saúde de transformadores. Em [75] trazem aplicações em detecção dinâmica de falhas em LT's.

De forma mais detalhada, os modelos de Markov são enquadrados no que se denominam processos estocásticos. Um processo estocástico pode ser definido como “a abstração matemática de um processo empírico cujo desenvolvimento é governado por leis probabilísticas” [64].

Sejam as variáveis independentes  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ , representando  $n$  tentativas independentes, e sejam  $E_1, E_2, E_3, \dots, E_n$ , representando as possíveis saídas, ou estados do sistema, a cada tentativa. Temos, de acordo com [64]:

$$p_i = P(X_i = E_j) \quad j = 1, 2, 3 \dots \quad (3.1.1)$$

Considerando-se que as tentativas são independentes, a probabilidades de se observar uma sequência de estados é dada por:

$$P(E_{j1}, E_{j2}, \dots, E_{jn}) = p_{j1} \cdot p_{j2} \dots p_{jn} \quad (3.1.2)$$

Ou seja, a probabilidade de uma sequência de estados é dada pela multiplicação das probabilidades associadas a aqueles estados. O matemático russo A. A. Markov generalizou o desenvolvimento acima, ao assumir que a saída de cada tentativa depende apenas da tentativa diretamente anterior, trazendo:

$$p_{ij} = P(X_{n+1} = E_j | X_n = E_i) \quad n = 0, 1, 2 \dots \quad (3.1.3)$$

Os modelos de Markov, são técnicas de análise de espaço de estados, e apresentam duas principais propriedades [65]:

1. As probabilidades de mudança de um estado para outro são constantes, sendo o processo homogêneo.
2. Estados futuros do sistema são independentes de todos os estados anteriores, à exceção daquele exatamente anterior.

De uma forma geral, em modelos de Markov tanto o tempo quanto o espaço podem ser ou contínuos ou discretos. Geralmente, em análises de confiabilidade de sistemas reais, o espaço é considerado discreto, pois os estados em que os componentes destes sistemas podem residir são mais facilmente identificáveis de forma discretizada. Já o tempo pode ser caracterizado como contínuo ou discreto. Sistemas de tempo discreto são conhecidos como Cadeias de Markov, e de tempo contínuo Processos de Markov [66].

De forma mais visual, os modelos de Markov podem ser representados por diagramas de estados, conforme Figura 50 a seguir.

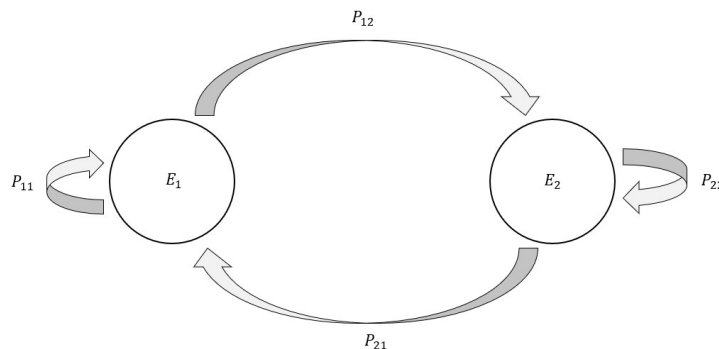


Figura 50 - Modelo de Markov Simplificado com Dois Estados. Fonte: autor

O exemplo acima representa um sistema simples, composto de dois estados  $E_1$  e  $E_2$ . A probabilidade de mudança do estado 1 para o 2 e vice versa é dada por  $P_{12}$ , e  $P_{21}$ , respectivamente. Já a probabilidade de o sistema se manter nos estados 1 ou 2 é dada por  $P_{11}$  e  $P_{22}$ , respectivamente. Frequentemente estas probabilidades são representadas em matrizes estocásticas de transição, conforme abaixo:

$$P = \begin{vmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{vmatrix}$$

Como tratamos de probabilidade, as linhas da matriz anteriormente apresentada devem sempre somar 1. Esta propriedade é intuitiva, pois como podemos ver no sistema representado, há apenas duas probabilidades para o estado  $E_1$ : permanecer em  $E_1$  ou migrar para  $E_2$ . Sendo assim, a soma destas probabilidades deve ser sempre igual à unidade. Como afirma [66], este princípio se aplica a quaisquer tipos de sistemas, independente da sua complexidade, número de estados ou transições: a soma das probabilidades de se permanecer em um estado ou sair deste estado deve ser sempre 1.

#### 4.4 Resumo do Capítulo

Neste capítulo foram apresentados os principais conceitos teóricos acerca de modelos de Markov e de aprendizagem de máquina, mais especificamente as árvores de decisão. Foram elencadas referências de trabalhos publicados nos quais estas metodologias são utilizadas para várias aplicações do setor elétrico, não somente relacionadas a linhas de transmissão. Os trabalhos citados trazem grande variedade de empregos de ambas metodologias, mostrando o caráter diversificado de sua aplicação para solução de problemas reais. Em nenhuma das referências é realizada a combinação de modelos de Markov e árvores de decisão para análise de dados de linhas de transmissão.

O próximo capítulo descreve a metodologia proposta neste trabalho, utilizando-se os dados reais de linhas de transmissão para obtenção das taxas de falhas e defeitos e modelo de Markov, bem como o emprego das árvores de decisão para análise dos atributos mais relevantes para as taxas obtidas.



## 5 METODOLOGIA PROPOSTA

### 5.1 Introdução

De maneira a sistematizar o processo metodológico neste trabalho, se propõem os seguintes passos:

1. Extração de Dados
2. Construção de Curvas de Defeitos e Falhas
3. Construção de Modelos:
  - a. Modelo de Markov
  - b. Árvore de Decisão
2. Obtenção dos Atributos mais Relevantes para Falhas e Defeitos
3. Resultados e Discussões

Na Figura 51 é mostrada graficamente a metodologia, já apresentada no capítulo 1 e agora mais detalhada.



Figura 51 - Processo da Metodologia Aplicada. Fonte: autor

O processo tem início com a manipulação de bancos de dados de idades, falhas, defeitos e atributos das linhas de transmissão, os quais são detalhados na seção 5.2. O tratamento destes dados foi realizado com a ferramenta MS Excel combinada com *scripts* em Python.

Uma vez extraídos os dados, foram geradas curvas de evolução de falhas e defeitos de acordo com a idade no MATLAB e MS Excel. O banco de dados disponível contempla falhas de 2008 a 2020 e defeitos de 2017 a 2020. Para cada um destes anos do histórico foram discretizadas as faixas etárias, comprimentos e taxas de falhas correspondentes de todas as LT's consideradas neste estudo.

Desta forma, para cada faixa etária de LT's obtém-se um número de falhas, defeitos e comprimento total. Estes dados são então resumidos, variando de 0 a 68 anos, ponderando-se pelo comprimento, obtendo-se a taxa para cada idade.

Na Figura 52 é apresentado um diagrama esquemático simplificado desta etapa, cujo produto final, como apontado, são as curvas de taxas de falha e defeitos em função da idade.

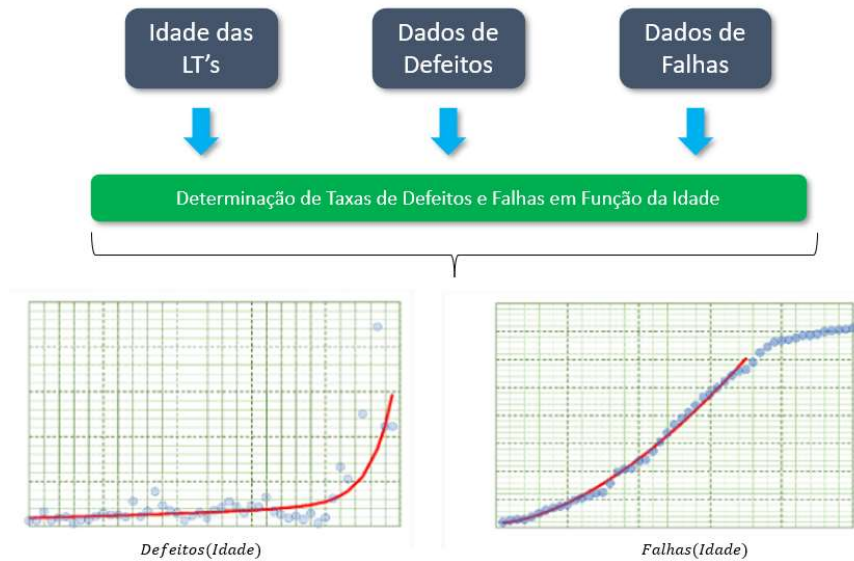


Figura 52 – Curvas de Defeitos e Falhas em Função da Idade. Fonte: autor

A partir das taxas calculadas na etapa anterior é possível construir o Modelo de Markov, conforme mostrado na Figura 53.

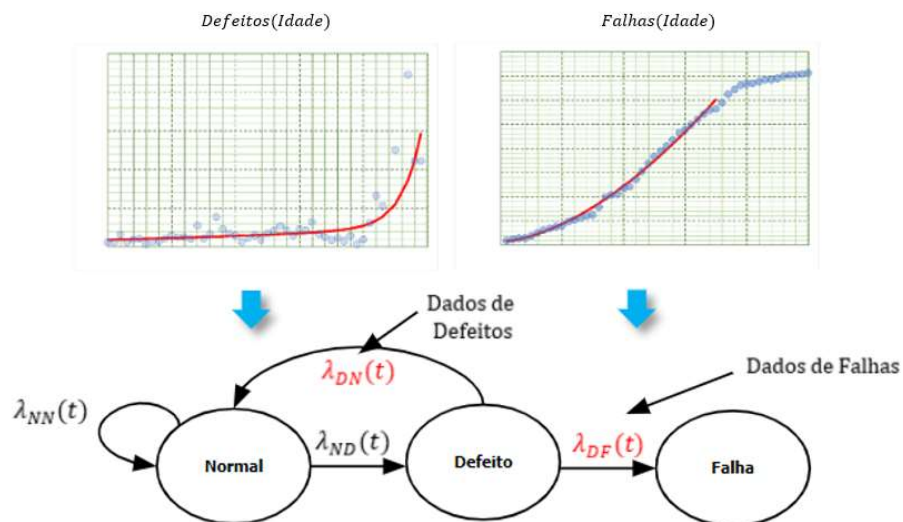


Figura 53 - Modelo de Markov. Fonte: autor

Nota-se que se trata de um modelo de três estados: Normal, Defeito e Falha, com quatro taxas de transição possíveis:

4.  $\lambda_{NN}$  – Taxa de transição do estado Normal para o estado Normal

5.  $\lambda_{ND}$  – Taxa de transição do estado Normal para o estado de Defeito
6.  $\lambda_{DN}$  – Taxa de transição do estado de Defeito para o estado Normal
7.  $\lambda_{DF}$  – Taxa de transição do estado de Defeito para o estado de Falha

A probabilidade de o sistema estar em estado Normal, Defeito ou Falha no momento  $t + 1$  é proporcional a seu estado no momento  $t$  multiplicado pelas taxas de transição anteriormente descritas. A equação 5.1 a seguir mostra esta relação.

$$\begin{pmatrix} P(N|t+1) \\ P(D|t+1) \\ P(F|t+1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda_{NN}(t) & \lambda_{ND}(t) & 0 \\ \lambda_{DN}(t) & 0 & \lambda_{DF}(t) \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P(N|t) \\ P(D|t) \\ P(F|t) \end{pmatrix} \quad (5.1)$$

Nota-se que é necessário somente o conhecimento de três das quatro taxas de transição, para que o sistema matricial possa ser solucionado. Esta é uma grande vantagem, pois as probabilidades de transição Defeito-Normal  $\lambda_{DN}$  e Defeito-Falha  $\lambda_{DF}$  são extraídas das curvas de defeitos e falhas em função da idade obtidas no passo anterior. A probabilidade de transição Normal-Normal  $\lambda_{NN}$  também é obtida dos dados de defeitos, que contém as informações de inspeções das LT's.

A próxima etapa é a obtenção dos atributos mais relevantes para as falhas e defeitos nas LT's, como mostrado na Figura 54 em um exemplo esquemático. A partir das taxas em função da idade é possível dividir as linhas de transmissão em dois grandes grupos discretos, neste exemplo representados pelas LT's LT1, LT2, LT3 e LT4.

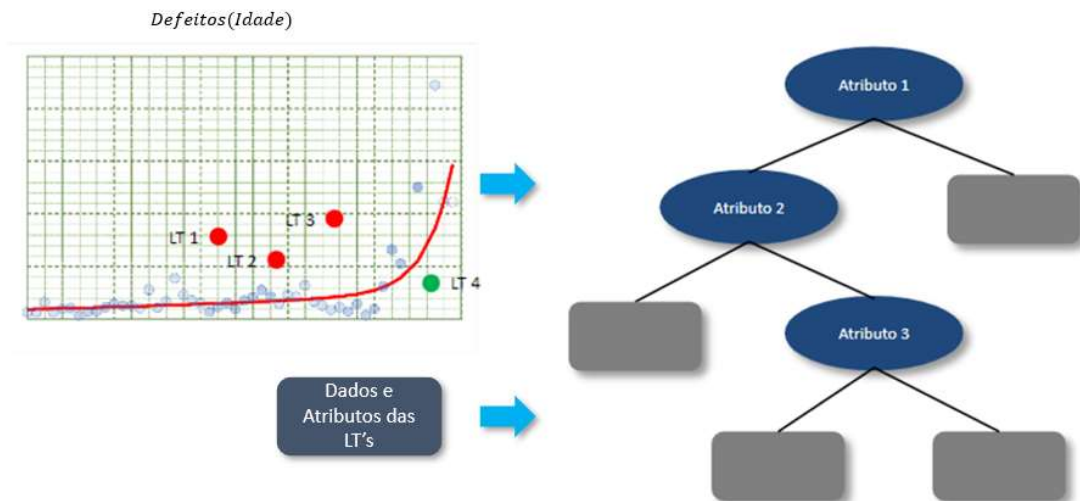


Figura 54 - Árvores de Decisão e Atributos Mais Relevantes. Fonte: autor

A associação desta divisão das LT's com seus dados e atributos (meteorológicos, geográficos e físicos, conforme será descrito no item 5.2) permite a utilização do algoritmo de árvore de decisão, conforme mostrado no capítulo 4, onde os atributos atuam como variáveis independentes e a classificação das LT's como dependentes. Os atributos que aparecem no topo da árvore, são aqueles considerados mais relevantes.

Por fim, com todas as etapas cumpridas, os resultados são analisados e discutidos, procurando-se melhorias para futuras explorações. Ressalta-se que as curvas das figuras mostradas neste item são exemplificativas, não representando os resultados reais da aplicação da metodologia. Estes serão mostrados nos próximos itens, onde cada passo da metodologia será melhor detalhado.

## 5.2 Extração de Dados

Para aplicação da metodologia foram reunidas informações de 195 linhas de transmissão do sistema da ISA CTEEP do estado de São Paulo, contemplando diferentes atributos de diferenciação, como níveis de tensão, região que atravessa o estado, comprimento, número de circuitos, aspectos de agressividade corrosiva e meteorológicos. Além disto, foram coletados informações de perturbações (desligamentos) e anomalias das referidas LT's. Estes dados foram obtidos de diversas fontes na companhia, como bancos de dados históricos, sistema ERP, cadastros de ativos e arquivos georreferenciados.

Os dados utilizados, de forma resumida, foram os seguintes:

### 1. Dados Gerais:

- Tensão (kV)
- Regional
- Quantidade de Circuitos
- Comprimento
- Idade

### 2. Dados Meteorológicos:

- Descargas Atmosféricas/100km/ano
- Dias ao ano de precipitação entre 2.5 mm/h e 10 mm/h

- Horas ao ano de precipitação entre 10 mm/h e 50 mm/h
- Dias ao ano de temperatura entre 30°C e 35°C
- Horas ao ano de temperatura acima de 35°C
- Radiação média para os momentos onde a temperatura está entre 30°C e 35°C
- Radiação média para os momentos onde a temperatura é superior a 35°C
- Dias ao ano com a temperatura de orvalho entre 85% e 95% da temperatura ambiente
- Horas ao ano com a temperatura de orvalho acima de 95% da temperatura ambiente
- Umidade relativa para os momentos com a temperatura de orvalho entre 85% e 95% da temperatura ambiente
- Umidade relativa para os momentos com a temperatura de orvalho acima da 95% da temperatura ambiente
- Horas ao ano com rajadas de vento entre 30 km/h e 50 km/h
- Minutos ao ano com rajadas de vento superior a 50 km/h

3. Dados de Agressividade Corrosiva:

- Porcentagem de Torres em Zona de Agressividade Corrosiva Baixa
- Porcentagem de Torres em Zona de Agressividade Corrosiva Moderada
- Porcentagem de Torres em Zona de Agressividade Corrosiva Levemente Alta
- Porcentagem de Torres em Zona de Agressividade Corrosiva Alta
- Porcentagem de Torres em Zona de Agressividade Corrosiva Muito Alta
- Porcentagem de Torres em Zona de Agressividade Corrosiva Severa
- Porcentagem de Torres em Zona de Agressividade Corrosiva Muito Severa
- Porcentagem de Torres em Zona de Agressividade Corrosiva Extremamente Severa

4. Anomalias: dados de modos de falha das LT's mapeados em inspeções de rotina
5. Perturbações: dados de desligamentos das LT's, com datas e causas mapeadas

As seções a seguir descrevem com maior detalhe os dados utilizados.

### 5.2.1 Dados Gerais

No que se refere aos aspectos gerais, na Figura 55 é apresentado o perfil dos níveis de tensão das LT's estudadas.

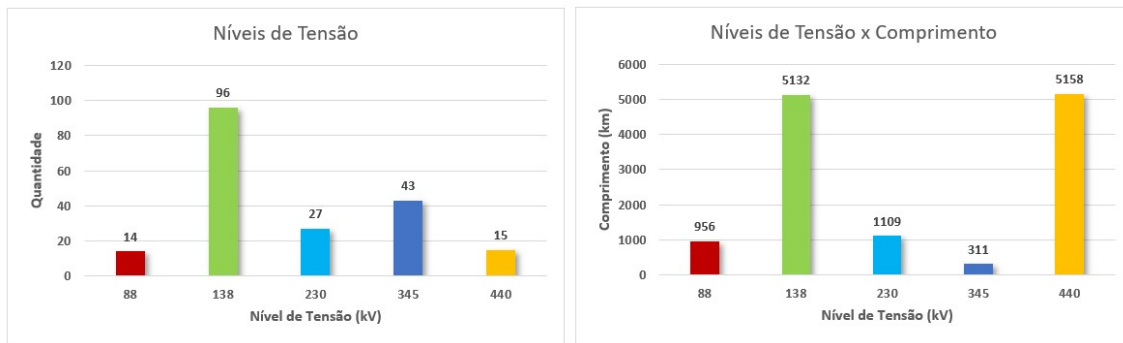


Figura 55 – Qtd. x Níveis de Tensão e Comprimento x Níveis de Tensão das LT's Utilizadas no Modelo. Fonte: autor

Na Figura 56 é mostrado o perfil de idade das LT's.

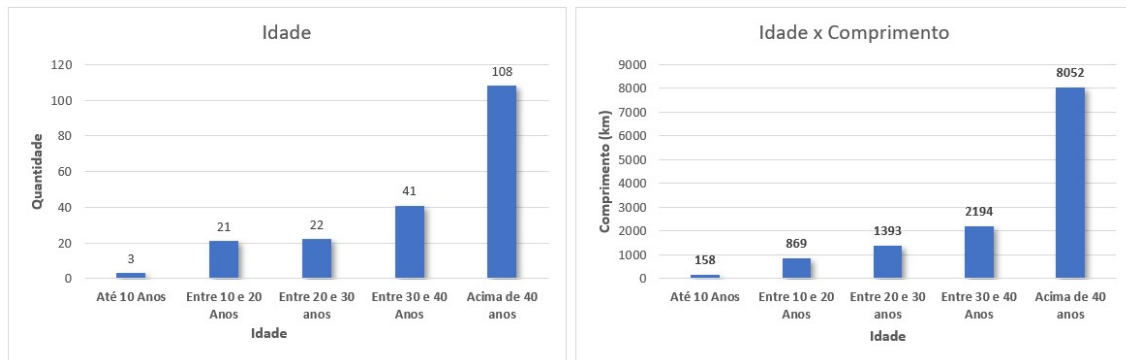


Figura 56 – Idade e Idade x Comprimento das LT's Utilizadas no Modelo. Fonte: autor

Na Figura 57 é mostrada a distribuição entre regionais.

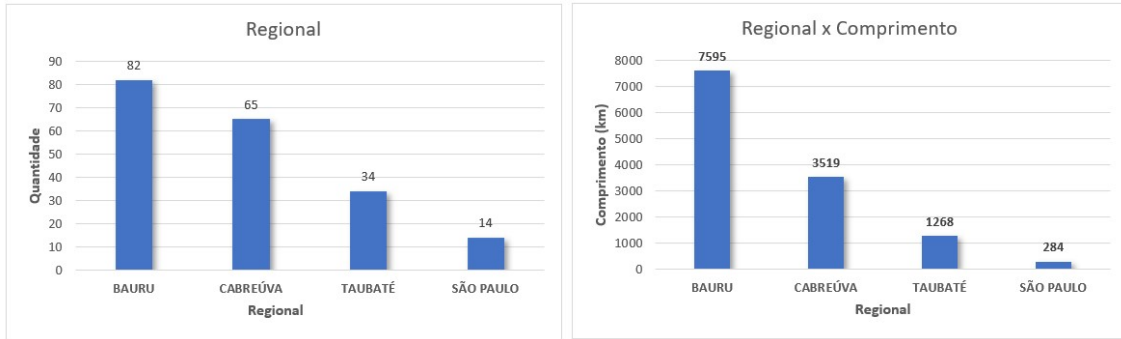


Figura 57 – Regionais e Regionais x Comprimento das LT's Utilizadas no Modelo. Fonte: autor

Na Figura 58 é apresentada a distribuição e comprimentos no que se refere a quantidade de circuitos.

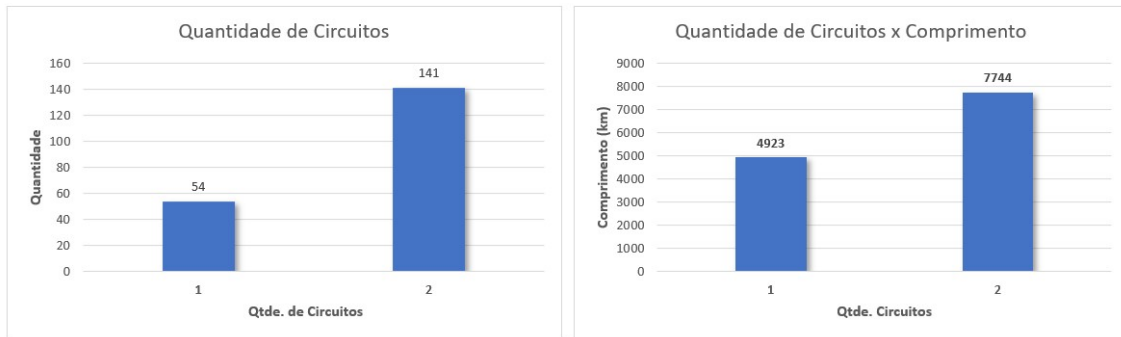


Figura 58 – Qtde. de Circuitos e Qtde. de Circuitos x Comprimento das LT's Utilizadas no Modelo. Fonte: autor

### 5.2.2 Dados Meteorológicos

Para os dados meteorológicos foram extraídas informações do banco de dados do INMET – Instituto Nacional de Meteorologia [76]. Este repositório contém diversas informações meteorológicas históricas de estações meteorológicas de todo o Brasil, desde o ano 2000. Para o estudo, foram levantadas as informações descritas no item 5.2, de estações presentes no estado de São Paulo, desde 2012. Na Figura 59 é apresentada a distribuições das estações.

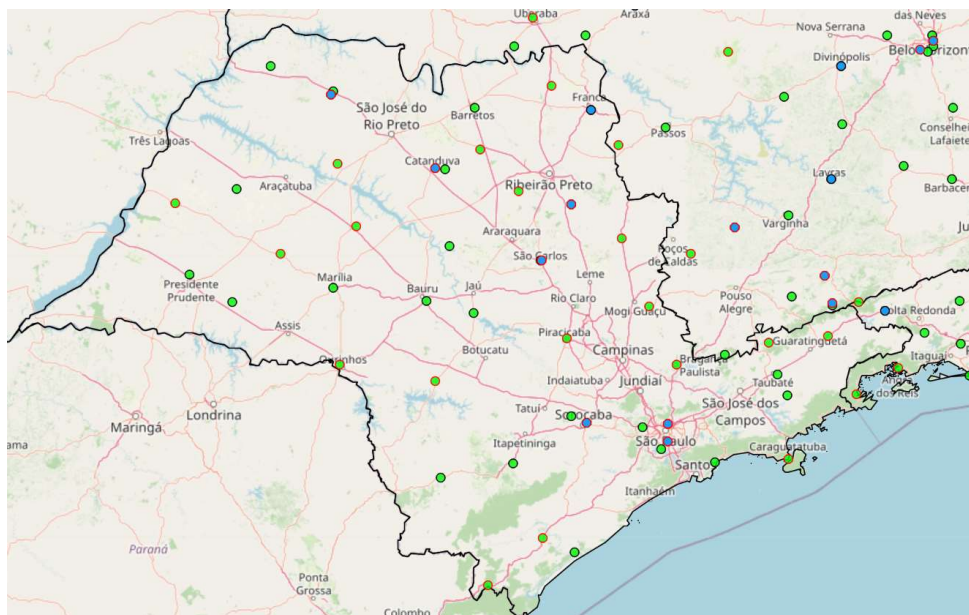


Figura 59 – Mapa de Estações Meteorológicas do Estado de São Paulo. Fonte: [76]

Como o número de instalações pelo estado é limitado, foi utilizada interpolação, um método para estimar valores em pontos desconhecidos (torres das LT's) utilizando informações conhecidas (dados das estações meteorológicas).

A metodologia utilizada para a interpolação foi a IDW – *Inverse Distance Weighting*, ou Ponderação pelo Inverso da Distância. Este método é baseado na premissa de que os dados conhecidos mais próximos dos pontos desconhecidos têm um peso maior do que aqueles mais distantes [77]. Seu valor é usualmente dado por [78]:

$$F(x, y) = \sum_{k=1}^N W(x_k, y_k) F(x_k, y_k) \quad (5.2)$$

Em que  $F(x, y)$  é o valor interpolado do ponto desconhecido, para a coordenada  $(x, y)$ ,  $N$  é o número de pontos observados na vizinhança do local interpolado,  $F(x_k, y_k)$  é o valor observado no ponto  $k$  e  $W(x_k, y_k)$  são os pesos atribuídos a cada uma das localidades conhecidas. Estes pesos, conforme dito, são maiores conforme a proximidade ao ponto desconhecido, e são dados por:

$$W(x_k, y_k) = \frac{d_k(x, y)^{-p}}{\sum_{i=1}^N d_k(x, y)^{-p}} \quad (5.3)$$



Onde  $d_k(x, y)$  é a distância entre a coordenada interpolada  $(x, y)$  e cada um dos locais observados  $(x_k, y_k)$ . O parâmetro  $p$  é um fator escolhido arbitrariamente, sendo usualmente considerado o valor de 2 [77].

Como exemplo, consideremos o sistema da Figura 60.

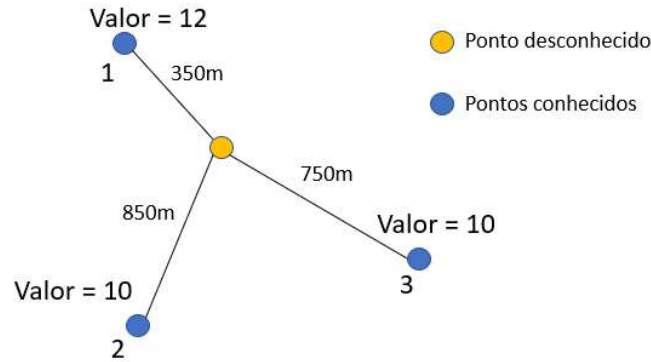


Figura 60 – Exemplo para Cálculo de IDW. Fonte: autor

Para o sistema apresentado, considerando  $p = 2$ , temos:

$$W(x_1, y_1) = \frac{350^{-2}}{(350^{-2} + 850^{-2} + 750^{-2})} = 0,72$$

$$W(x_2, y_2) = \frac{850^{-2}}{(350^{-2} + 850^{-2} + 750^{-2})} = 0,12$$

$$W(x_3, y_3) = \frac{750^{-2}}{(350^{-2} + 850^{-2} + 750^{-2})} = 0,16$$

$$F(x_1, y_1)W(x_1, y_1) = 12 \times 0,72 = 8,65$$

$$F(x_2, y_2)W(x_2, y_2) = 10 \times 0,12 = 1,22$$

$$F(x_3, y_3)W(x_3, y_3) = 10 \times 0,16 = 1,56$$

O valor final, interpolado, seria, portanto:

$$F(x, y) = 8,65 + 1,22 + 1,56 = \mathbf{11,43}$$

Conforme mencionado, os dados obtidos através da interpolação fornecem informações meteorológicas para cada estrutura de cada LT do estudo. Como os dados do modelo estão organizados por LT, e não por estrutura, para cada atributo meteorológico foi considerada a moda dos dados.

Especificamente para os dados de descargas atmosféricas foi consultado banco de dados do SMAC – Sistema de Monitoramento e Alerta do Climatempo [79], sistema da ISA CTEEP para monitoramento climático em tempo real e histórico. Para as LT's consideradas no estudo

foi realizado levantamento da Quantidade de Descargas/100km/ano, compreendendo o período entre 2012 e 2020.

Foram levantadas 1.752.735 descargas no período, nas diferentes LT's do estudo. Na Figura 61 é mostrado um detalhamento da incidência por nível de tensão.

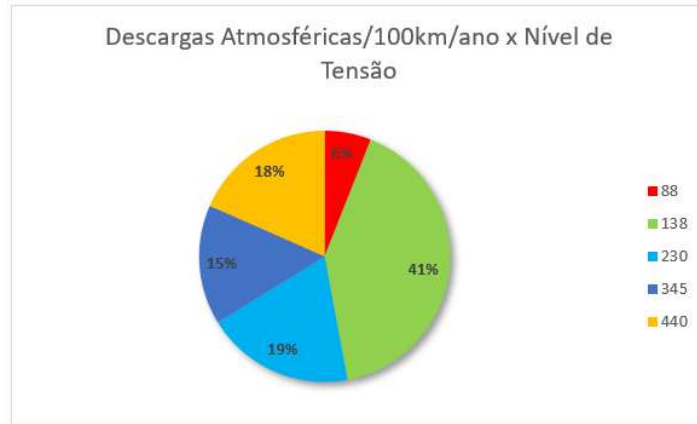


Figura 61 – Estratificação de Descargas Atmosféricas/100km/ano x Nível de Tensão

### 5.2.3 Dados de Agressividade Corrosiva

No que se refere aos atributos de nível de agressividade corrosiva, foi realizado levantamento das estruturas da distância em relação ao mar de cada estrutura das LT's. O nível de agressividade no qual cada torre está inserida foi então calculado tendo como base a Tabela 3 a seguir.

Tabela 3 – Classificação de Níveis de Agressividade Corrosiva

Distância ao Mar (km)	Nível de Agressividade Corrosiva
$0 \leq D < 5$	Extremamente Severa
$5 < D \leq 10$	Muito Severa
$10 < D \leq 15$	Severa
$15 < D \leq 20$	Muito Alta
$20 < D \leq 25$	Alta
$25 < d \leq 30$	Levemente Alta
$30 < D \leq 50$	Moderada
$D > 50$	Baixa

Como o banco de dados utilizado para o modelo está organizado por LT, e não por estrutura, o nível de agressividade corrosiva resultante foi calculado de acordo com a razão da quantidade de estruturas de cada LT em cada nível de agressividade sobre a quantidade total de torres de cada linha.

Na Figura 62 é mostrada uma estratificação mais simplificada dos perfis de agressividade corrosiva considerados para as LT's do estudo. Nota-se que 94% das LT's estão em regiões consideradas de agressividade baixa e moderada, ao passo que os 6% restantes podem ser divididos nos diferentes níveis de agressividade alta e severa, conforme Tabela 3.



Figura 62 – Níveis de Agressividade Corrosiva. Fonte: autor

#### 5.2.4 Anomalias

Como explicitado no item 3.2, as LT's aéreas apresentam grande quantidade e variedade de modos de falha, nos seus diferentes componentes. As inspeções realizadas nas linhas têm como objetivo detectar estas anomalias preventivamente, de modo que não evoluam, levando a LT a uma perturbação.

Para o estudo, foi levantado banco de dados de inspeções realizadas nas LT's da ISA CTEEP e anomalias registradas no sistema de gerenciamento da manutenção da companhia. Para as LT's do estudo, foram encontrados 43.727 registros de defeitos, divididos nos seguintes componentes:

1. AT – Sistema de Aterramento
2. CC – Cabos Condutores
3. CP – Cabos Para-Raios

4. CI – Cadeias de Isoladores e Ferragens
5. ES – Estrutura
6. FS – Faixa de Servidão

Na Figura 63 é apresentado um resumo dos dados utilizados, no qual se pode observar que a maioria esmagadora das anomalias encontradas se refere à faixa de servidão, mostrando principalmente problemas relacionados à vegetação.

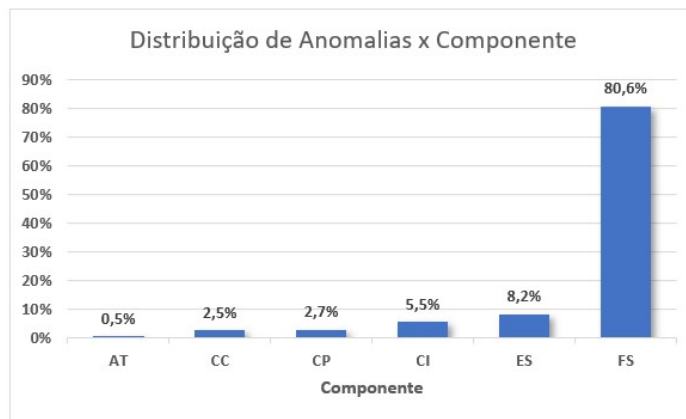


Figura 63 – Distribuição de Anomalias x Componente nas LT's do Estudo. Fonte: autor

### 5.2.5 Perturbações

Como citado no item 5.2.4, o objetivo das inspeções de LT's é detectar as anomalias de forma antecipada, de forma que se evite que a linha sofra uma perturbação, ou seja, um curto circuito que leve ao seu desligamento. No entanto, como visto no item 3.2, nem sempre isto é possível, e as LT's são ativos passíveis de perturbações, ou falhas.

Para o estudo, foi levantado banco de dados de desligamentos em LT's da ISA CTEEP no período compreendido entre 2008 e 2020. Foram registradas 7.312 perturbações, de diferentes causas. Na Figura 64 é apresentada uma estratificação das ocorrências levantadas.

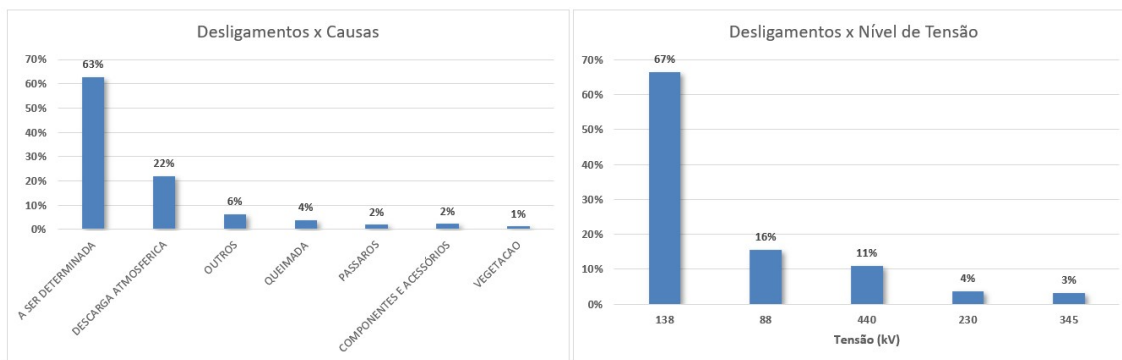


Figura 64 – Perturbações por Nível de Tensão e Causas nas LT's do Estudo. Fonte: autor

## 5.3 Curvas de Falhas e Defeitos em Função da Idade e Modelo de Markov

### 5.3.1 Curvas de Falhas e Defeitos

Como anteriormente apontado, o banco de dados disponível contempla falhas de 2008 a 2020 e defeitos de 2017 a 2020. Para cada um destes anos do histórico foram discretizadas as faixas etárias, comprimentos e taxas de falhas e anomalias correspondentes das 194 LT's consideradas neste estudo. Desta forma, para cada faixa etária obtém-se um número de falhas, defeitos e comprimento total. Os dados obtidos anteriormente foram então sumarizados, e obtidas as taxas para cada idade, variando de 0 a 68 anos, ponderando-se pelo comprimento.

A título de exemplo do cálculo consideremos um banco de dados de LT's fictício, mostrado na Tabela 4.

Tabela 4 - Banco de Dados de Exemplo

Linha de Transmissão	Idade (anos)	Comprimento (km)	Qtde. Desligamentos
LT1	1	6,05	0
LT2	1	15	0
LT3	0	10,18	0
LT4	0	91,73	6
LT5	1	21,22	1
LT6	0	3,73	0
LT7	1	8	0
LT8	2	227,82	6
LT9	2	63,04	1
LT10	1	15	0
LT11	2	17,98	0
LT12	2	80,8	4
LT13	1	21,22	1
LT14	2	18,3	0

A partir destes dados, pode-se obter a quantidade de desligamentos (falhas) e comprimento total por faixa etária, conforme Tabela 5.

Tabela 5 - Comportamento por Faixa Etária

Faixa Etária		Qtde. Desligamentos	Comprimento (km)
Idade Inicial	Idade Final		
0	1	8	192,13
1	2	13	494,43
0	2	19	600,07

Por fim, obtém-se a taxa de falhas para cada idade, como mostrado na Tabela 6.

Tabela 6 - Comportamento por Idade

Idade	Taxa de falhas (desligamentos/km)
0	0,034082
1	0,031089

O cálculo é repetido para todos os intervalos de idade, de forma que se chegue a uma taxa de falhas para cada idade, variando de 0 a 68 anos.

Com base nos cálculos para todas as idades, é gerada uma curva de taxa de falhas ou defeitos em função da idade. Para o caso das falhas, chegou-se a um comportamento conforme mostrado na Figura 65.

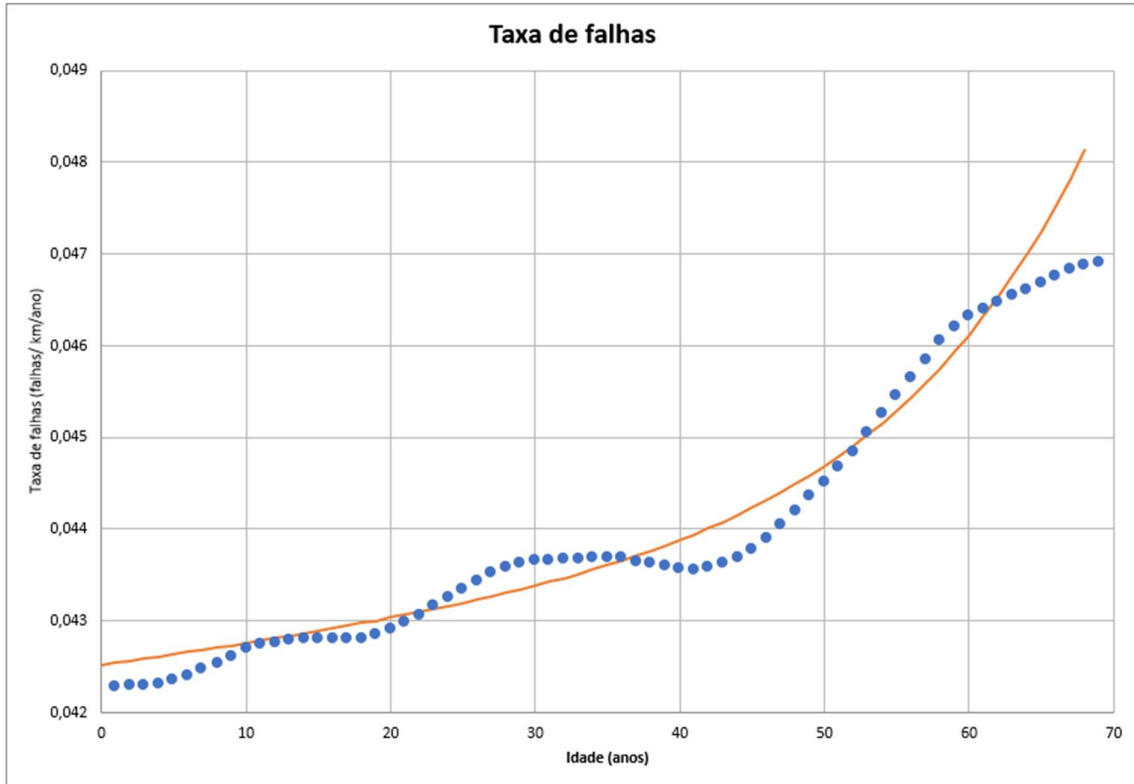


Figura 65 - Curva de Taxa de Falhas em Função da Idade

Nota-se que, como esperado, trata-se de um comportamento crescente com o avanço da idade, muito embora este incremento não seja tão significativo, de aproximadamente 10%. Este fato também é esperado, pois uma parcela das causas de desligamentos em LT's se deve a eventos que independem da idade, como por exemplo queimadas, vegetação e excrementos de pássaros.

Os dados mostrados como pontos azuis representam as taxas de falhas calculadas para cada idade. Observa-se que para algumas faixas no eixo horizontal as taxas diminuem. Foi realizado ajuste no MATLAB dos pontos a uma função exponencial de segunda ordem, com a seguinte forma:

$$y = ae^{(bx)} + ce^{(dx)} \quad (5.4)$$

Os parâmetros  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$  calculados foram:

$$a = 0.04319$$

$$b = 0.009384$$

$$c = 0.0003901$$

$$d = 1.409$$

O índice  $R^2$  calculado para a curva foi de 0.9411, mostrando que um bom ajuste aos pontos plotados. Outras aproximações foram testadas, como a exponencial simples, potência, mas com resultados piores no que se refere à ajuste.

Para o caso dos defeitos ou anomalias foi realizado o mesmo processo, chegando-se a um resultado conforme mostrado na Figura 66.

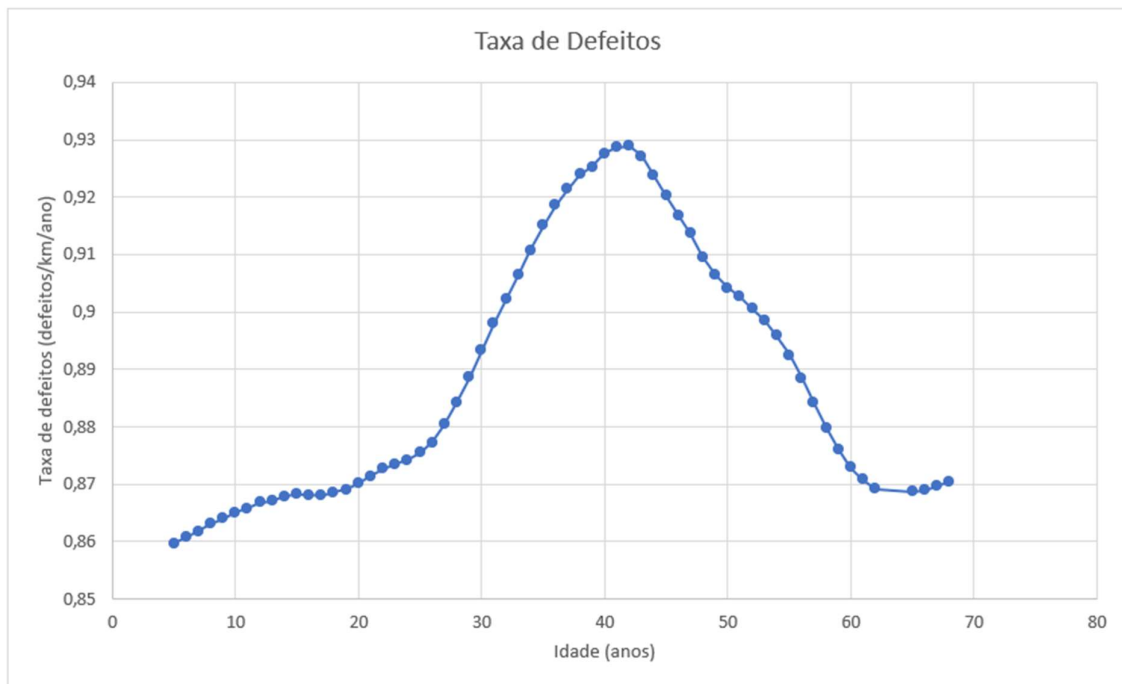


Figura 66 - Curva de Taxa de Defeitos em Função da Idade

O comportamento da taxa de defeitos crescente com a idade é esperado, pois à medida que as LT's envelhecem, a tendência é que passem a apresentar mais problemas de manutenção, e consequentemente sua taxa de anomalias cresça. Como vimos na Figura 66, este comportamento ocorre até a idade de 40 anos. No entanto, entre 40 e 60 anos a taxa de defeitos decai com o tempo, fugindo ao que, em teoria, seria esperado.

Este desvio pode ser explicado pela baixa quantidade de dados. Enquanto para as taxas de falhas foram elencadas informações históricas de 12 anos, para os defeitos o horizonte considerado foi de apenas 3 anos. Além disto, grande parte das anomalias registradas em inspeções de linhas de transmissão não necessariamente são crescentes com a idade, e



apresentam natureza aleatória, como por exemplo defeitos de vegetação. O fato de anomalias desta natureza estarem presentes no banco de dados empregado na análise, contribui com o perfil da curva mostrada, que não necessariamente cresce para todas as idades.

### 5.3.2 Modelo de Markov

A partir dos dados e curvas obtidos no item 5.3.1 é possível obter o modelo de Markov. Isto foi feito obtendo-se as taxas médias de falhas e defeitos considerando todas as idades, obtendo-se:

$$\lambda_{DN} = 0.888 \text{ defeitos}/\text{km}/\text{ano}$$

$$\lambda_{DF} = 0.044 \text{ falhas}/\text{km}/\text{ano}$$

Em termos de probabilidade, temos:

$$\lambda_{DN} = 95\%$$

$$\lambda_{DF} = 5\%$$

Como a soma das probabilidades de se permanecer em um estado ou sair deste estado deve ser sempre 1, é possível obter as outras taxas, conforme abaixo:

$$\lambda_{NN} = 0\%$$

$$\lambda_{ND} = 100\%$$

Obtém-se, finalmente, o modelo de Markov para os dados utilizados, conforme mostrado na Figura 67.



Figura 67 - Modelo de Markov para os Dados do Estudo

A interpretação do modelo pode ser realizada da seguinte forma. Para uma linha de transmissão de 100km de extensão, a probabilidade de que seja realizada uma inspeção no próximo intervalo de tempo  $t$  (ano) e seja encontrada uma anomalia é de 100%. A probabilidade de que esta anomalia seja sanada é de 95%, e a probabilidade de que haja um desligamento é de 5%.

Esta é uma conclusão que está em linha com o que é verificado na prática. De fato, a experiência mostra que as inspeções de linhas de transmissão geram sempre algum tipo de anomalia, e a proporção de desligamentos, ou falhas, quando comparadas com os defeitos é realmente muito baixa. Os dados utilizados no estudo corroboram estes fatos, com uma proporção de falhas em relação a desligamentos de aproximadamente 20 para 1.

## 5.4 Árvore de Decisão

Como comentado no item 5.1, de posse das curvas de falhas e defeitos em função da idade, é possível dividir as LT's individualmente em dois grupos:

1. Aquelas na qual a sua taxa de falhas/defeitos individual é menor do que a taxa média para determinada idade. Para as LT's deste grupo foi atribuída a variável "1".
2. Aquelas na qual a sua taxa de falhas/defeitos individual é maior do que a taxa média para determinada idade. Para as LT's deste grupo foi atribuída a variável "0".

Ressalta-se que, devido ao fato de que a curva de taxa de defeitos ter apresentado um comportamento conforme descrito no item 5.3.1, a modelagem da árvore de decisão foi realizada apenas considerando as taxas de falhas.

Conjugando os grupos obtidos acima, com os atributos descritos nos itens 5.2.1, 5.2.2 e 5.2.3, obtém-se um banco de dados de variáveis dependentes e independentes. Na Tabela 7 é apresentado um exemplo da estrutura deste banco.

*Tabela 7 - Exemplo de Banco de Dados de Variáveis Dependentes e Independentes para Árvore de Decisão*

LT	Idade	Atributo 1	Atributo 2	Atributo 3	Atributo N	Taxa de Falhas LT na Idade	Taxa de Falhas Média na Idade	Grupo
LT1	10	Valor 1.1	Valor 2.1	Valor 3.1	Valor N.1	17,23	1,48	0
LT2	12	Valor 1.2	Valor 2.2	Valor 3.2	Valor N.2	2,47	13,39	1
LT3	32	Valor 1.3	Valor 2.3	Valor 3.3	Valor N.3	23,98	3,62	0
LT4	40	Valor 1.4	Valor 2.4	Valor 3.4	Valor N.4	5,32	3,06	0
LT5	60	Valor 1.5	Valor 2.5	Valor 3.5	Valor N.5	2,01	2,23	1

As colunas Idade e de Atributos (1 a n) representam as variáveis independentes do modelo. Os Atributos seriam aqueles que diferenciam as LT's umas das outras, e explicados nos itens 5.2.1, 5.2.2 e 5.2.3, como por exemplo Regional, Nível de Tensão, Agressividade Corrosiva, Dados Meteorológicos, etc. Ressalta-se aqui que os dados de Descargas Atmosféricas foram expurgados do modelo, pois para muitos anos esta informação não estava disponível.

A coluna Grupo representa as variáveis dependentes do modelo. Como explicado, trata-se do resultado da comparação entre as taxas de falhas individuais e médias para cada idade. No banco real utilizado para o trabalho, de um total de 2510 dados, 1564 (62,3%) foram classificados como grupo "1" e 946 (37,7%) como grupo "0".

Tendo o banco de dados formado, foi realizado o modelamento da árvore de decisão no MATLAB, de forma a obter quais atributos das LT's são mais relevantes para as taxas de falhas calculadas. Na Figura 68 é apresentada a magnitude do modelo, com os atributos mais relevantes mostrados na parte superior.

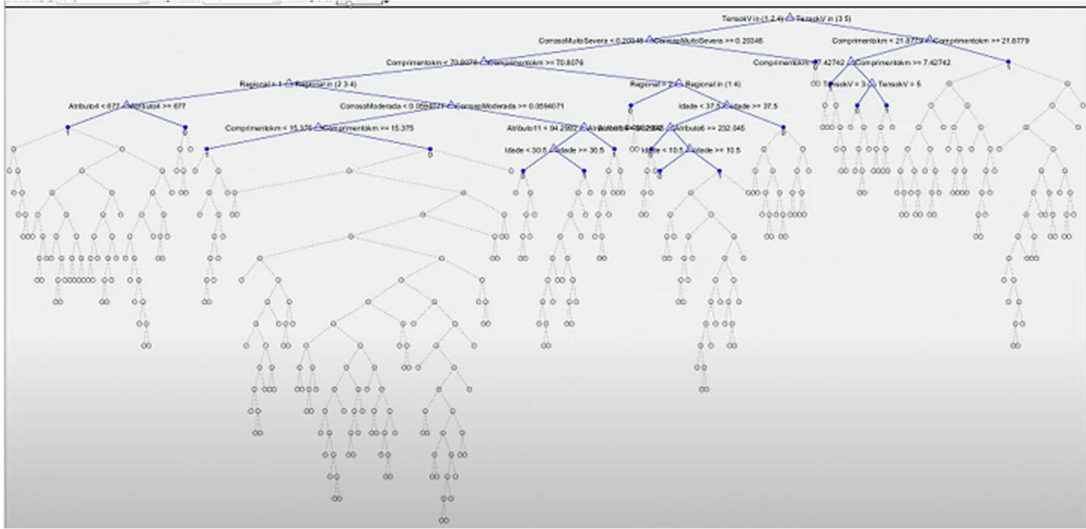


Figura 68 - Árvore de Decisão para Falhas – Árvore Geral. Fonte: Autor

Como era esperado, dado o volume de dados e atributos, a árvore gerada é muito grande. Desta forma, na Figura 69, Figura 70 e Figura 71 são apresentados alguns exemplos da parte mais superior do modelo, de forma que se possam discutir os resultados.

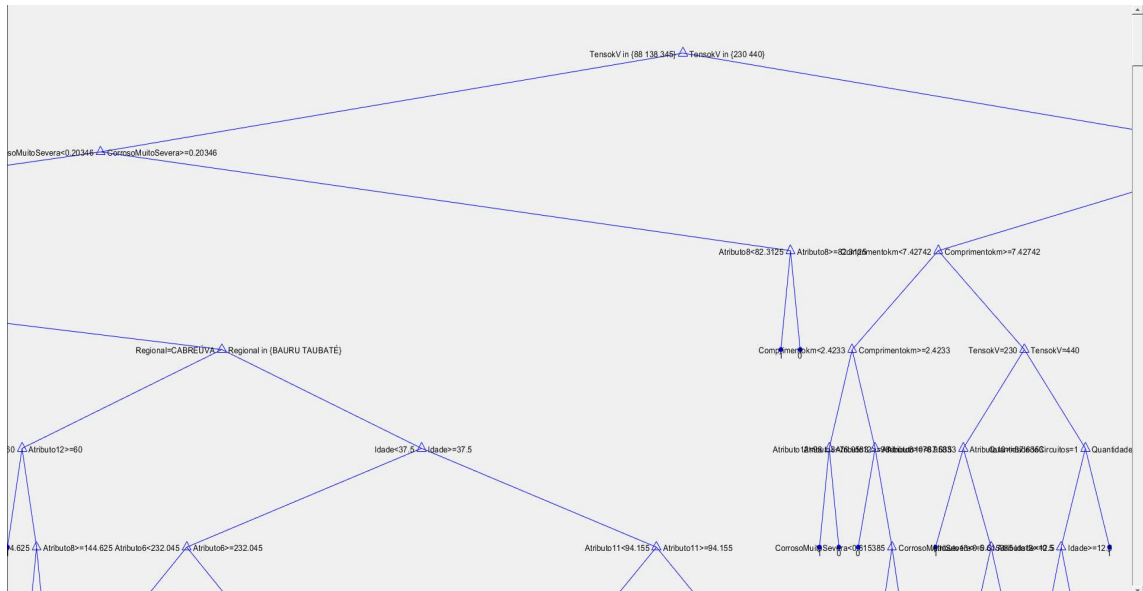


Figura 69 - Árvore de Decisão para Falhas – Exemplo 1. Fonte: autor

Na Figura 69 é mostrado o topo da árvore de decisão, onde pode-se notar que o atributo mais relevante para as falhas é o “Nível de Tensão”. Por meio desta figura pode-se concluir que a árvore é dividida em dois ramos. As LT’s com níveis de tensão 88kV, 138kV e 345kV se

comportam de uma forma, e seguem pelo ramo da esquerda, ao passo que aquelas com nível de tensão 230kV e 440kV se comportam de outra forma, seguindo pelo ramo da direita.

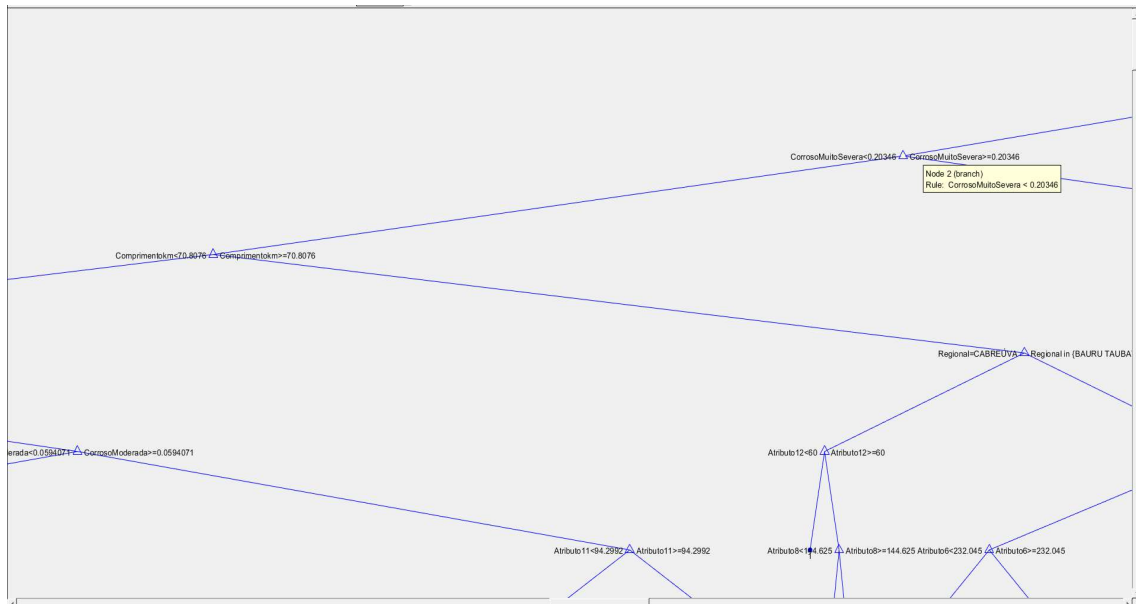


Figura 70 - Árvore de Decisão para Falhas – Exemplo 2. Fonte: autor

Na Figura 70 é mostrado o desdobramento do ramo da esquerda, referente às LT's com nível de tensão de 88kV, 138kV e 345kV. Pode-se notar que o segundo atributo mais relevante para as taxas de falha destas LT's é o nível de agressividade corrosiva do meio, mais especificamente o atributo “Corrosão Muito Severa”.

O fato de o segundo atributo mais relevante para estas linhas ser a corrosão chama a atenção quando se compara com o conhecimento tácito referente ao parque de LT's estudado. De fato, na prática, a corrosão se apresenta como um fator muito importante no desempenho destes ativos, principalmente as de 138kV, com grande contingente atravessando a Serra do Mar, região de conhecida agressividade corrosiva.

Na Figura 71 é apresentado o desdobramento do ramo da direita, referente às LT's com nível de tensão de 230kV e 440kV. Pode-se notar que o segundo e o terceiro atributo mais relevante para as taxas de falha destas LT's é o “Comprimento”. O número de eventos de desligamentos nestas linhas é muito reduzido, especialmente em LT's de 440kV. Este fato pode explicar este atributo como sendo mais relevantes para ativos desta classe de tensão, pois, em teoria, quanto maior o comprimento da LT, maior o número de desligamentos.

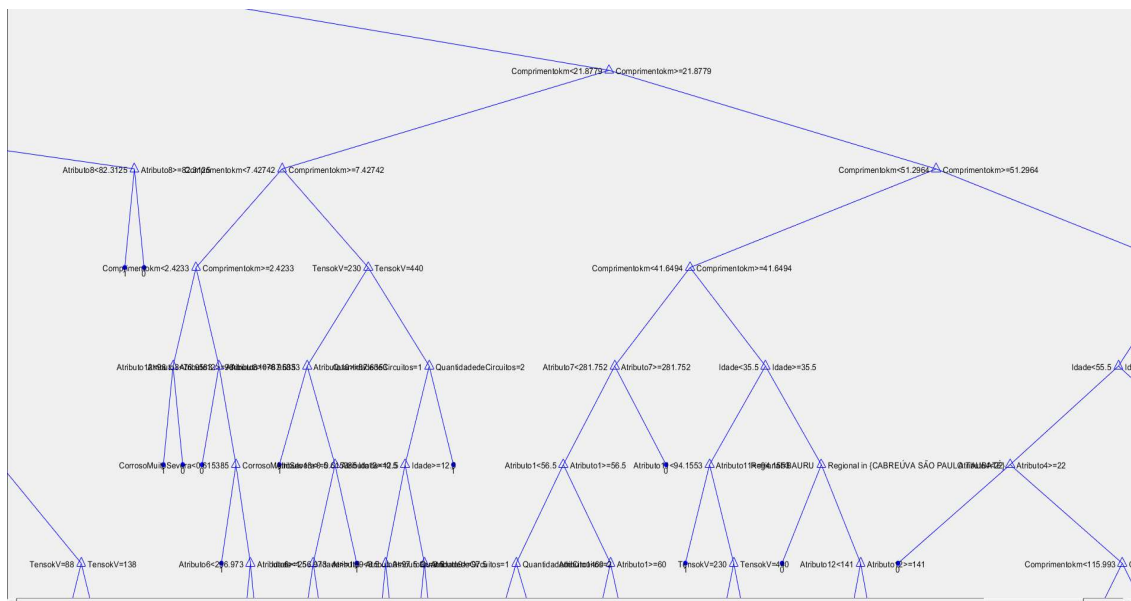


Figura 71 - Árvore de Decisão para Falhas – Exemplo 3. Fonte: autor

Uma das grandes vantagens do modelo de árvore de decisão é o fato de ser extremamente visual e de fácil interpretação, como pode-se observar nas figuras anteriores. O modelo também pode ser descrito de forma textual, como um encadeamento de uma série de condicionais, conforme mostra o Apêndice I.

Como forma de exemplo, no texto a seguir é apresentada esta estrutura textual, que segue um dos caminhos da árvore até a classificação em grupo “0” ou “1”:

```

1 if TensokV in {88 138 345} then node 2 elseif TensokV in {230 440} then node 3 else 1
2 if CorrosoMuitoSevera < 0.20346 then node 4 elseif CorrosoMuitoSevera >= 0.20346 then node 5 else 0
3 if Comprimentokm < 21.8779 then node 6 elseif Comprimentokm >= 21.8779 then node 7 else 1
4 if Comprimentokm < 70.8076 then node 8 elseif Comprimentokm >= 70.8076 then node 9 else 1
5 if Atributo8 < 82.3125 then node 10 elseif Atributo8 >= 82.3125 then node 11 else 0
6 if Comprimentokm < 7.42742 then node 12 elseif Comprimentokm >= 7.42742 then node 13 else 1
7 if Comprimentokm < 51.2964 then node 14 elseif Comprimentokm >= 51.2964 then node 15 else 1
8 if Regional = BAURU then node 16 elseif Regional in {CABREÚVA SÃO PAULO TAUBATÉ} then node 17
else 1
9 if Regional = CABREÚVA then node 18 elseif Regional in {BAURU TAUBATÉ} then node 19 else 0
10 class = 1
11 class = 0

```

Seguindo os textos em negrito acima, tem-se a seguinte interpretação:

“Se a LT tiver nível de tensão igual a 88kV, 138kV ou 345kV e porcentagem de torres em região de corrosão muito severa acima de 20,346% e dias ao ano com a temperatura de orvalho entre 85% e 95% da temperatura ambiente maior do que 82,3125, então ela pertence ao grupo 0, ou seja, sua taxa de falhas individual é maior do que a média.”

\* Obs.: O atributo 8 se refere a “Dias ao ano com temperatura de orvalho entre 85% e 95% da temperatura ambiente”

A análise da Figura 68, de forma visual, permite chegar ao mesmo caminho. Novamente, este comportamento é consonante com a prática, visto que normalmente LT’s atravessando regiões de níveis de corrosão mais elevados tendem a falhar mais. O atributo meteorológico da temperatura apenas reforça esta tendência, já que ambientes desta natureza apresentam temperaturas e umidade maiores, que acentuam ainda mais o processo corrosivo.

Nenhum modelo é perfeito, dado que são representações da realidade. Por esta razão, em algoritmos de aprendizagem de máquina existem uma série de técnicas de avaliação da do modelo. Uma das mais utilizadas, em algoritmos de classificação, é a Matriz de Confusão, que consiste em uma tabela que mostra as frequências de classificação para cada classe do modelo.

Na Figura 72 é apresentada Matriz de Confusão para a árvore de decisão gerada. Os valores na diagonal da esquerda para a direita mostram aquelas situações em que o modelo acerta, ao passo que a diagonal da direita para a esquerda mostra eventos nos quais o modelo erra.

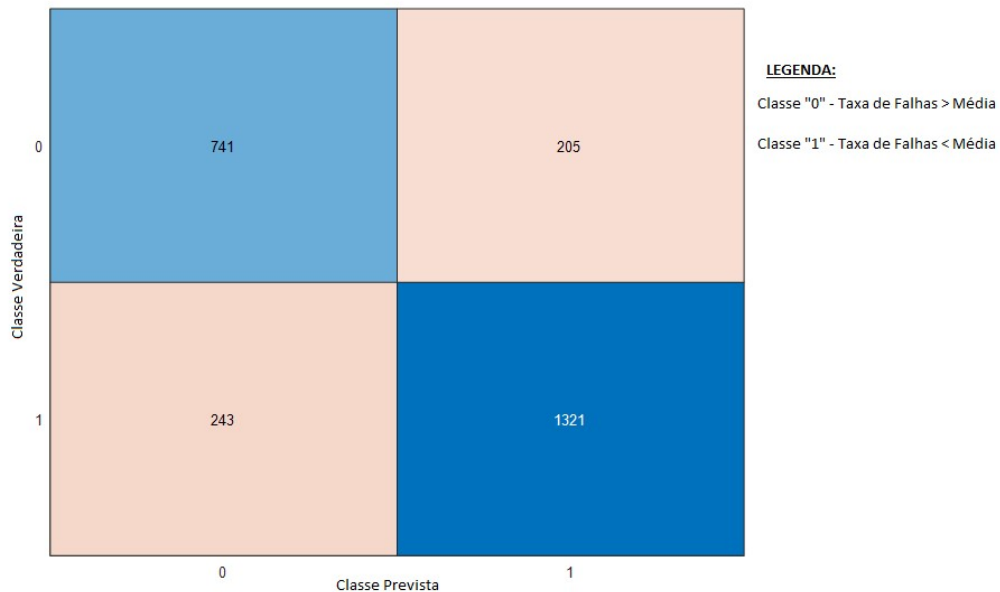


Figura 72 - Matriz de Confusão para Árvore de Decisão - Falhas. Fonte: autor

De um total de 2510 dados, o modelo foi capaz de acertar a previsão em 2062, uma acurácia de 82%.

## 5.5 Resumo do Capítulo

Este capítulo trouxe a descrição detalhada da metodologia aplicada para análise de falhas em linhas de transmissão. Para tanto, foram geradas curvas de taxas de falhas e defeitos em relação à idade. Mostrou-se que a taxa de falhas apresenta um comportamento crescente com a idade, ao passo que as anomalias crescem até um determinado ponto, para depois decrescer. Com estes dados foi possível gerar um modelo de Markov simplificado que traduz as probabilidades de defeitos e falhas nas LT's do estudo. Mostrou-se que a proporção entre a taxa de defeitos e falhas é muito alta, da ordem de vinte vezes.

A partir da curva de taxa de falhas também foi possível gerar um modelo de árvore de decisão, de forma que se pudesse avaliar quais os atributos que mais contribuem para as falhas. O principal atributo, aquele localizado no topo da árvore, foi o “Nível de Tensão”, seguidos de “Corrosividade Muito Alta” e “Comprimento”. Notou-se que o comportamento atingido pelo modelo está consonante com o esperado, principalmente para as LT's de nível de tensão 88kV, 138kV e 345kV, que representam 86% do total de desligamentos.

O próximo capítulo traz as conclusões finais da dissertação, e sugestões para futuros trabalhos.



## 6 CONCLUSÕES

A abordagem baseada em dados para tratamento de informações de manutenção é essencial para empresas ativo intensivas, de qualquer segmento. Esta importância se mostra crucial também para empresas de transmissão de energia elétrica, principalmente pelo fato de estarem posicionadas em um ambiente fortemente regulado, o qual cada vez mais impõe pesadas penalizações por indisponibilidade dos ativos.

Tendo este contexto, o trabalho de mestrado mostrou a importância de se tratar os dados de manutenção com um olhar quantitativo, de forma que se contribua para a diminuição da subjetividade e melhoria da assertividade nas análises e tomadas de decisão.

Através de introdução teórica, mostrou-se os principais componentes de linhas de transmissão aérea e suas respectivas funções, como também as causas mais relevantes que podem levar este tipo de equipamento a falhas funcionais (desligamentos) ou anomalias (defeitos). Esta introdução é fundamental para se montar um arcabouço teórico acerca deste ativo, de forma que se possa entender os dados que foram utilizados na elaboração do trabalho.

Foram também apresentados modelos de análise de dados, especificamente os modelos de Markov e árvores de decisão. Vários trabalhos de aplicação das duas metodologias foram mostrados, inclusive no que diz respeito a equipamentos elétricos e linhas de transmissão.

Neste sentido, a proposta deste trabalho foi desenvolver um método, utilizando dados reais de manutenção, que combinasse as duas metodologias, de forma que se pudesse avaliar tanto as taxas de falhas e defeitos das linhas de transmissão, quanto quais são os atributos mais relevantes que as levam às falhas.

Os resultados mostram que a taxa de desligamento das LT's estudadas cresce com a idade, o que é um comportamento esperado, visto que o envelhecimento dos ativos, via de regra, traz também uma maior probabilidade de falhas. Este incremento, no entanto, não se mostra acentuado. A principal razão para tal fato pode ser que muitos dos dados de falhas utilizados são oriundos de causas que não necessariamente dependem da idade, como queimadas e excrementos de pássaros.

Para as anomalias, os resultados mostram que, também como esperado, a taxa de defeitos cresce com o tempo, porém até uma certa faixa de idade, quando começam a decair. Este não é um comportamento esperado, que pode ser explicado com a baixa quantidade de dados de anomalias disponíveis para a análise, bem como a grande quantidade de defeitos que também não dependem da idade, como por exemplo vegetação na faixa de servidão. Outro fator

preponderante a ser considerado é que as inspeções detalhadas nas linhas de transmissão, que são capazes de detectar defeitos mais específicos, como corrosão – que dependem mais fortemente da idade – são realizadas, de forma geral, a cada três anos, contribuindo ainda mais para a escassez de dados de anomalias.

Como resultado das taxas de falhas e defeitos obtidas, pôde-se construir o modelo de Markov que descreve as taxas de transição das LT's estudadas, de forma que se possa ter uma previsibilidade de cenários de defeitos e falhas. Com este modelo simplificado, os resultados mostram que as taxas de defeitos são muito maiores do que as taxas de falhas, em uma ordem de grandeza de vinte para um.

Com as curvas geradas, em conjunção com os atributos de cada LT, também foi possível gerar uma árvore de decisão, de forma a se analisar quais são os atributos mais relevantes para as falhas.

Ressalta-se que não foi gerado um modelo similar para os defeitos, visto que, como descrito acima, a curva de taxa de anomalias obtida não teve um comportamento dentro do esperado. Além disto, não foi possível utilizar os dados de densidade de descargas atmosféricas, devido também à escassez de dados.

Os resultados mostram que o principal fator para as taxas de falhas, aquele localizado no topo da árvore é o nível de tensão, seguido de agressividade corrosiva para LT's de 88kV, 138kV e 345kV, e comprimento para linhas de 230kV e 440kV. Os resultados se mostram dentro do esperado, especialmente para o primeiro grupo de LT's, principalmente pelo fato de que estas representam 86% do volume total de desligamentos do banco de dados utilizado.

O modelo de estimação da taxa de falhas em relação à idade, assim como qualquer modelo, não é perfeito. O fato de atributos distintos da idade serem mais representativos na árvore de decisão mostra exatamente esta realidade, ou seja, as taxas de falhas nas linhas de transmissão não necessariamente dependem apenas da idade, mas de outras características.

Para trabalhos futuros, sugere-se que sejam realizadas análises semelhantes em linhas de transmissão de outros agentes no Brasil, ou mesmo no exterior, que tenham políticas de manutenção diferentes, de forma que as taxas obtidas sejam comparadas. Para a driblar a limitação dos dados sugere-se que seja feita uma análise exploratória mais acentuada, de forma a expurgar da análise as falhas e defeitos que não sejam diretamente dependentes da idade. Esta é uma abordagem mais direcionada, que permitiria, por exemplo, focar em modos de falha específicos, como corrosão. No entanto, sofreria pela escassez, pois a quantidade de anomalias a ser trabalhada seria menor.

Outra sugestão seria o aprofundamento do modelo de Markov, de forma a retratar mais fortemente a realidade da manutenção de linhas de transmissão, incluindo-se aí mais estados, como por exemplo falhas internas e externas e/ou estágios de defeitos.

No que se refere às árvores de decisão, acurácia obtida foi de 82%. De forma a melhorar a performance, sugere-se que mais dados de perturbações sejam obtidos e novos atributos sejam incorporados ao modelo, como por exemplo a densidade de queimadas, assim como as já citadas densidades de descargas atmosféricas. Tratam-se de atributos bastante relevantes para perturbações em linhas de transmissão, principalmente de 440kV (queimadas) e 88kV e 138kV (descargas).

A densidade de descargas é um atributo que poderia melhorar sensivelmente o modelo, visto que, como mostrado nos dados extraídos, 22% das causas de desligamento se devem a incidência de descargas atmosféricas nas LT's. Outras características interessantes de serem agregadas, caso disponíveis, e que também podem agregar em trabalhos futuros, seriam a quantidade de torres sujeitas a vegetação alta e excrementos de pássaros.

Atributos técnicos das LT's, como tipo de isolador, altura das torres, disposição dos circuitos, dentre outros, também poderiam agregar à análise. Estas características poderiam oferecer importantes conclusões acerca de formas de melhorar o desempenho das LT's. Por exemplo, caso uma LT com isoladores do tipo poliméricos apresentasse taxa de falhas maiores do que aquelas de vidro, este seria um indicativo inicial de análise de uma possível troca pelas equipes de engenharia de manutenção.

Além disto, recomenda-se que seja realizada modelamento dos atributos mais relevantes para a taxa de defeitos. Para tanto, seria necessário a obtenção de uma quantidade maior de dados, bem como uma análise exploratória mais detalhada, como citado acima.

## REFERÊNCIAS

- [1] ONS - Operador Nacional do Sistema, 2020. [Online]. Available: [www.ons.org.br](http://www.ons.org.br). [Acesso em 10 Junho 2020].
- [2] P. R. Labegalini, J. A. Labegalini, R. D. Fuchs e M. T. de Almeida, *Projetos Mecânicos das Linhas Aéreas de Transmissão - 2a Edição*, São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1992.
- [3] R. D. Fuchs, *Transmissão de Energia Elétrica - Linhas Aéreas*, Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1977.
- [4] Electric Power Research Institute, *Transmission Line Reference Book - 345kV and Above/3rd Edition*, Palo Alto, California: Electric Power Research Institute, 2005.
- [5] G. Braga, E. Filho, C. Nascimento, C. Nogueira, P. Nogueira, G. Miranda e I. Motta, *Recapitação de linhas aéreas de transmissão existentes utilizando cabos condutores especiais de altas temperaturas de operação e baixa flecha*, Belo Horizonte, 2008.
- [6] CIGRÉ WG B2.55, *Technical Brochure 763: Conductors for the Uprating of Existing Lines*, Paris, 2019.
- [7] Alubar, "Catálogo Técnico - Condutores Elétricos de Alumínio," 2015. [Online]. Available: [https://www.alubar.net.br/img/site/arquivo/Cat\\_Tec\\_Alubar\\_Aluminio\\_2015.pdf](https://www.alubar.net.br/img/site/arquivo/Cat_Tec_Alubar_Aluminio_2015.pdf). [Acesso em 23 Maio 2020].
- [8] PLP, "PLP Brasil - A conexão que você pode contar," PLP, 2020. [Online]. Available: <http://plp.com.br/>. [Acesso em 23 Maio 2020].
- [9] PLP, "Emenda Preformada Condutora - LS," 2020. [Online]. Available: <http://plp.com.br/wp-content/uploads/2017/03/ls.pdf>. [Acesso em 23 Maio 2020].
- [10] Forjasul, "Catálogo de Transmissão/Distribuição," 2018. [Online]. Available: <http://www.forjasul.com.br/pt-br/>. [Acesso em 23 Maio 2020].
- [11] International Council on Large Electric Systems (CIGRÉ): *Study Committee B2, Overhead Lines*, Cham, Switzerland: Springer, 2017.
- [12] B. L. Pavik, *Tecnologia da Ferragem para Linhas de AT e EAT*, São Paulo: Editorial Gente, 1989.
- [13] ABNT, *ABNT NBR 6535: Sinalização de Linhas de Transmissão com Vistas à Segurança da Inspeção Aérea - Procedimento*, Rio de Janeiro, 2005.
- [14] ABNT, *ABNT NBR 7276: Sinalização de Advertência em Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Alétrica - Procedimento*, Rio de Janeiro, 2005.
- [15] J. Mamede Filho e D. R. Mamede, *Proteção de Sistemas Elétricos de Potência*, Rio de Janeiro: LTC, 2011.

- [16] Furukawa Electric, "CABO OPGW DUAL DS1.084.146 - 125mm<sup>2</sup>," 2020. [Online]. Available: [https://www.furukawatam.com/pt\\_BR/versao-et-pdf/cabo-opgw-dual-ds1084146---125mm2](https://www.furukawatam.com/pt_BR/versao-et-pdf/cabo-opgw-dual-ds1084146---125mm2). [Acesso em 23 Maio 2020].
- [17] CST, CST Isoladores Santa Terezinha, 2019. [Online]. Available: <http://cst-isoladores.com.br/2019/>. [Acesso em 23 Maio 2020].
- [18] Yamuna Power, Yamuna Power & Infrastructure Ltd., 2020. [Online]. Available: <https://www.yamunapower.com/>. [Acesso em 23 Maio 2020].
- [19] CIGRÉ WG B2.07, Technical Brochure 308: Foundation Installation - An Overview, Paris, 2006.
- [20] R. A. Chaves, *Fundações de Torres de Linhas de Transmissão e de Telecomunicação*, Belo Horizonte, 2004.
- [21] L. T. Velozo, *Metodização do Estudo das Fundações para Suportes de Linhas de Transmissão*, Rio de Janeiro, 2010.
- [22] I. P. G. d. Carvalho, *Estudo Teórico-Experimental da Capacidade de Carga à Tração e Compressão de Estacas Metálicas Helicoidais*, Belo Horizonte, 2007.
- [23] S. V. Filho, *Aterramentos Elétricos - Conceitos Básicos, Técnicas de Medição, Instrumentação e Filosofias de Aterramento*, São Paulo, SP: Artliber, 2002.
- [24] S. V. Filho, *Descargas Atmosféricas - Uma Abordagem de Engenharia*, São Paulo, SP: Artliber, 2005.
- [25] Electric Power Research Institute, *Guide for Transmission Line Grounding: A Roadmap for Design, Testing and Remediation: Part I - Theory Book*, Palo Alto, California: Electric Power Research Institute, 2007.
- [26] L. V. Cunha, *Desempenho de Linhas de Transmissão Frente a Descargas Atmosféricas: Influência do Efeito Corona na Ruptura de Meio de Vão*, Belo Horizonte, 2010.
- [27] K. M. Elias, *Torre de Transmissão de Energia Elétrica: Novo Design e os Desafios da Inserção no Contexto Urbano*, Belo Horizonte, 2015.
- [28] ABNT, ABNT NBR 5422: *Projetos de Linhas de Transmissão Aéreas*, Rio de Janeiro, 1985.
- [29] CIGRÉ WG 22.13, Technical Brochure 175: *Management of Existing Overhead Transmission Lines*, Paris, 2000.
- [30] CIGRÉ WG B2.47, Technical Brochure 708: *Guide on Repair of Conductors and Conductor-Fitting Systems*, Paris, 2017.
- [31] ISA CTEEP, São Paulo/SP.
- [32] CIGRÉ Task Force B2.11.07, Technical Brochure 332: *Fatigue Endurance Capability of Conductor/Clamp Systems - Update of Present Knowledge*, Paris, 2007.

- [33] A. L. Francato, C. D. F. Barbosa, C. A. Severino Costa, D. Cecílio, E. J. Luciano, F. R. Farias, H. Horioka, J. B. da Silva, M. A. L. Filho, M. J. Plesch, P. S. Barbosa, R. Lavandoscki e T. Forte, *Confiabilidade Integrada Estratégica em Conexões de Cabos de Linhas Aéreas de Alta Tensão*, São Paulo: Editora Nelpa, 2015.
- [34] CIGRÉ WG B2.32, Technical Brochure 477: Evaluation of Aged Fittings, Paris, 2011.
- [35] CIGRÉ WG B2.21, Technical Brochure 575: Assessment of in-service Composite Insulators by using Diagnostic Tools, Paris, 2013.
- [36] CIGRÉ WG 22.07, Technical Brochure 141: Refurbishment and Upgrading of Foundations, Paris, 1999.
- [37] IEEE, "IEEE Approved Draft Guide for Unmanned Aerial Vehicle-based Patrol Inspection System for Transmission Lines," *IEEE P2821/D6*, pp. 1-50, 2020.
- [38] CIGRÉ WG B2.52, The Use of Robotics in Assessment and Maintenance of Overhead Lines, Paris, 2018.
- [39] I. Goodfellow, Y. Bengio e A. Courville, *Deep Learning*, Cambridge: MIT, 2016.
- [40] L. Yuxi, "Deep Reinforcement Learning: An Overview," 26 11 2018. [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/1701.07274v6.pdf>. [Acesso em 10 10 2019].
- [41] L. Deng e Y. Dong, *Deep Learning: Methods and Applications*, Boston: Now Publishers Inc., 2013.
- [42] L.-N. W. X. L. e J. D. G. Zhong, "An Overview on Data Representation Learning: From Traditional Feature Learning to Recent Deep Learning," *The Journal of Finance and Data Scienc*, vol. 2, nº 4, pp. 265-278, 2016.
- [43] M. R. M. B. P. A. P. B. A. P. S. Mohammad Saeid Mahdavinejada, "Machine learning for internet of things data analysis: a survey," *Digital Communications and Networks*, vol. 4, pp. 161-175, 2018.
- [44] L. Cheng e T. Yu, "A New Generation of AI: A Review and Perspective on Machine Learning Technologies Applied to Smart Energy and Electric Power Systems," *International Journal of Energy Research*, vol. 43, pp. 1928-1973, 2019.
- [45] S. J. Russel e P. Norvig, *Artificial Intelligence - A Modern Approach*, Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 1995.
- [46] R. C. Prati, *Novas Abordagens em Aprendizado de Máquina para a Geração de Regras, Classes Desbalanceadas e Ordenação de Casos*, São Carlos, 2006.
- [47] A. d. P. Braga, T. B. Ludermir e A. C. P. d. L. F. Carvalho, *Redes Neurais Artificiais - Teoria e Aplicações*, Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2000.
- [48] I. N. da Silva, D. H. Spattu e R. A. Flauzino, *Redes Neurais Artificiais para Engenharia e Ciências Aplicadas*, São Paulo: Artliber, 2019.

- [49] M. T. V. K. S. Sivadi Balakrishna, "IoT Sensor Data Integration in Healthcare using Semantics and Machine Learning Approaches," em *A Handbook of Internet of Things in Biomedical and Cyber Physical System*, Intelligent Systems Reference Library, vol 165. Springer, Cham, 2019, pp. 275-300.
- [50] L. Rokach e O. Maimon, *Data Mining with Decision Trees 2nd Edition*, Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2015.
- [51] J. Bell, *Machine Learning: Hands-On For Developers and Technical Professionals*, Indianapolis: John Wiley & Sons Inc., 2015.
- [52] A. Swetapadma e A. Yadav, "A Novel Decision Tree Regression-Based Fault Distance Estimation Scheme for Transmission Lines," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 32, nº 1, pp. 234-245, 2017.
- [53] S. Bagheri e G. B. Gharehpetian, "Classification and Discrimination Among Winding Mechanical Defects, Internal and External Electrical Faults, and Inrush Current of Transformer," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 14, nº 2, pp. 484-493, 2018.
- [54] S. S. M. Ghoneim e I. . B. M. Taha, "Comparative Study of Full and Reduced Feature Scenarios for Health Index Computation of Power Transformers," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 181326 - 181339, 2020.
- [55] M. K. Jena e R. Samantaray, "Data-Mining-Based Intelligent Differential Relaying for Transmission Lines Including UPFC and Wind Farms," *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, vol. 27, nº 1, pp. 8-17, 2016.
- [56] A. . I. Khalyasmaa, M. D. Senyuk e S. A. Eroshenko, "High-Voltage Circuit Breakers Technical State Patterns Recognition Based on Machine Learning Methods," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 34, nº 4, pp. 1747-1756, 2019.
- [57] M. Bigdeli, P. Siano e H. H. Alhelou, "Intelligent Classifiers in Distinguishing Transformer Faults Using Frequency Response Analysis," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 13981-13991, 2021.
- [58] R. Godse, "Mathematical Morphology-Based Feature-Extraction Technique for Detection and Classification of Faults on Power Transmission Line," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 38459-38471, 2020.
- [59] X. Wang, X. Gao, Y. Liu e Y. Wang, "WRC-SDT Based On-Line Detection Method for Offshore Wind Farm Transmission Line," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 53547-53560, 2020.
- [60] M. A. d. Araújo, *Metodologia Baseada em Medidas Dispersas de Tensão e Árvores de Decisão para Localização de Faltas em Sistemas de Distribuição Modernos*, São Carlos, 2017.
- [61] L. Breiman, J. H. Friedman, R. A. Olshen e C. J. Stone, *Classification and Regression Trees*, Boca Raton, London, New York, Washington DC: Chapman & Hall/CRC, 1984.
- [62] J. A. Baranauskas e M. C. Monard, *Reviewing some Machine Learning Concepts and Methods*, São Carlos, 2000.
- [63] J. Quinlan, "Induction of Decision Trees," *Machine Learning*, vol. 1, nº 1, pp. 81-106, 1986.

- [64] J. R. Quinlan, *C4.5: Programs for Machine Learning*, San Francisco, CA: Morgan Kauffman Publishers Inc., 1993.
- [65] A. Bharucha-Reid, *Elements of the Theory of Markov Processes and Their Applications*, Mineola, New York: Dover Publications, Inc., 1997.
- [66] L. Wang e J. Endrenyi, "Reliability Techniques in Large Electric Power Systems," *Controls and Dynamic Systems*, vol. 42, pp. 163-243, 1991.
- [67] K. Zhou, I. Dobson, Z. Wang, A. Roitershtein e A. P. Ghosh, "A Markovian Influence Graph Formed From Utility Line Outage Data to Mitigate Large Cascades," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 35, nº 4, pp. 3224-3235, 2020.
- [68] M. P. Marbun, N. I. Sinisuka e N. Hariyanto, "Inventory Management Method to Determined Spare Transformer Optimization," em *TENCON 2015 - 2015 IEEE Region 10 Conference*, Macao, China, 2015 .
- [69] A. Mutule, E. Grebesh, . I. Oleinikova e A. Obushevs, "Overhead Line Weak Point Mechanical Analysis Based on Markov Chain Method," em *2016 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS)*, Beijing, China, 2016.
- [70] C. Feng, H. Zhang, S. Yan, Y. Fu e X. Bao, "Reliability Evaluation for Distribution System Based on Probabilistic Model Checking," em *Second International Conference on Reliability Systems Engineering (ICRSE)*, Beijing, China, 2017.
- [71] H. W. L. H. W. L. J. Z. L. X. J. X. Y. J. T. Chang Liu, "Research of Icing Thickness on Transmission Lines Based on Fuzzy Markov Chain Prediction," em *IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices*, Beijing, China, 2013.
- [72] Y. H. H. R. X. W. H. T. W. Zhu, "The Monte Carlo method application in cost risk management of pre-transmission line project based on Markov chain," em *2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration*, Beijing, China, 2018.
- [73] D. J. M. N. P. Sarajcev, "Wide & Deep Machine Learning Model for Transformer Health Analysis," em *4th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech)*, Split, Croatia, 2019.
- [74] L. S. N. L. Q. Huang, "Dynamic Detection of Transmission Line Outages Using Hidden Markov Models," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, nº 3, pp. 2026-2033, 2016.
- [75] P. D. O' Connor e A. Kleyner, *Practical Reliability Engineering*, Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons, 2012.
- [76] R. Billinton e R. N. Allan, *Reliability Evaluation of Engineering Systems: Concepts and Techniques*, New York: Springer Science Business Media, 1992.
- [77] INMET - Instituto Nacional de Meteorologia, "Dados Meteorológicos," [Online]. Available: <https://mapas.inmet.gov.br/>. [Acesso em 15 Fevereiro 2021].



- [78] U. B. Mielniczuk, J. Mielniczuk, R. Obrosiak e W. Przystupa, "A Comparison of Some Interpolation Techniques for Determining Spatial Distribution of Nitrogen Compounds in Groundwater," *International Journal of Environmental Research*, vol. 13, pp. 679-687, 2019.
- [79] A. S. A. d. Silva, *Ferramentas para Modelagem e Interpolação de Dados Ambientais em Escala Regional*, Recife, 2015.
- [80] Climatempo, "SMAC - Sistema de Monitoramento e Alerta Climatempo," 2021. [Online]. Available: <https://smac.climatempo.com.br/>. [Acesso em 15 Fevereiro 2021].
- [81] IEC - International Electrotechnical Commission, IEC 60826: Design Criteria of Overhead Transmission Lines, Geneva, Switzerland, 2003.
- [82] CIGRÉ WG 22.07, Technical Brochure 206: The Design of Transmission Line Support Foundations - An Overview, Paris, 2002.
- [83] C. P. B. Azevedo, *Fundações para Linhas de Transmissão: Dimensionamento e Execução*, Belo Horizonte, MG: Fundac, 2011.
- [84] SAE Towers, "Towers Brochure," 2020. [Online]. Available: [http://www.saetowers.com/Resources/Tower\\_Brochure\\_P.pdf](http://www.saetowers.com/Resources/Tower_Brochure_P.pdf). [Acesso em 23 Maio 2020].
- [85] IEEE Overhead Lines Subcommittee Working Group on Insulator Performance and Applications, "Evaluation of and Replacement Strategies for Aged High-Voltage Toughened Glass-Suspension Insulators," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, nº 3, pp. 1145-1152, June 2015.
- [86] R. N. Wazen, *Avaliação da Suscetibilidade de Falhas em Estruturas Metálicas de Linhas de Transmissão*, Curitiba, 2011.

# APÊNDICE I – TEXTO DA ÁRVORE DE DECISÃO

Decision tree for classification

```
1 if TensokV in {88 138 345} then node 2 elseif TensokV in {230 440} then node 3 else 1
2 if CorrosoMuitoSevera<0.20346 then node 4 elseif CorrosoMuitoSevera>=0.20346 then node 5
else 0
3 if Comprimentokm<21.8779 then node 6 elseif Comprimentokm>=21.8779 then node 7 else 1
4 if Comprimentokm<70.8076 then node 8 elseif Comprimentokm>=70.8076 then node 9 else 1
5 if Atributo8<82.3125 then node 10 elseif Atributo8>=82.3125 then node 11 else 0
6 if Comprimentokm<7.42742 then node 12 elseif Comprimentokm>=7.42742 then node 13 else 1
7 if Comprimentokm<51.2964 then node 14 elseif Comprimentokm>=51.2964 then node 15 else 1
8 if Regional=BAURU then node 16 elseif Regional in {CABREÚVA SÃO PAULO TAUBATÉ}
then node 17 else 1
9 if Regional=CABREÚVA then node 18 elseif Regional in {BAURU TAUBATÉ} then node 19
else 0
10 class = 1
11 class = 0
12 if Comprimentokm<2.4233 then node 20 elseif Comprimentokm>=2.4233 then node 21 else 1
13 if TensokV=230 then node 22 elseif TensokV=440 then node 23 else 1
14 if Comprimentokm<41.6494 then node 24 elseif Comprimentokm>=41.6494 then node 25 else 1
15 if Atributo7<300.998 then node 26 elseif Atributo7>=300.998 then node 27 else 1
16 if Atributo4<677 then node 28 elseif Atributo4>=677 then node 29 else 1
17 if CorrosoModerada<0.0594071 then node 30 elseif CorrosoModerada>=0.0594071 then node 31
else 0
18 if Atributo12<60 then node 32 elseif Atributo12>=60 then node 33 else 0
19 if Idade<37.5 then node 34 elseif Idade>=37.5 then node 35 else 0
20 if Atributo12<98 then node 36 elseif Atributo12>=98 then node 37 else 0
21 if Atributo8<76.9583 then node 38 elseif Atributo8>=76.9583 then node 39 else 1
22 if Atributo10<87.6353 then node 40 elseif Atributo10>=87.6353 then node 41 else 0
23 if QuantidadedeCircuitos=1 then node 42 elseif QuantidadedeCircuitos=2 then node 43 else 1
24 if Atributo7<281.752 then node 44 elseif Atributo7>=281.752 then node 45 else 1
25 if Idade<35.5 then node 46 elseif Idade>=35.5 then node 47 else 1
26 if Idade<55.5 then node 48 elseif Idade>=55.5 then node 49 else 1
27 class = 0
28 if TensokV=88 then node 50 elseif TensokV=138 then node 51 else 1
29 if Atributo10<88.3311 then node 52 elseif Atributo10>=88.3311 then node 53 else 0
30 if Comprimentokm<15.375 then node 54 elseif Comprimentokm>=15.375 then node 55 else 0
31 if Atributo11<94.2992 then node 56 elseif Atributo11>=94.2992 then node 57 else 1
32 class = 1
33 if Atributo8<144.625 then node 58 elseif Atributo8>=144.625 then node 59 else 0
34 if Atributo6<232.045 then node 60 elseif Atributo6>=232.045 then node 61 else 1
35 if Atributo11<94.155 then node 62 elseif Atributo11>=94.155 then node 63 else 0
36 class = 1
37 class = 0
38 class = 0
39 if CorrosoMuitoSevera<0.615385 then node 64 elseif CorrosoMuitoSevera>=0.615385 then node
65 else 1
40 class = 1
41 if Atributo13<0.5 then node 66 elseif Atributo13>=0.5 then node 67 else 0
```

42 if Idade<12.5 then node 68 elseif Idade>=12.5 then node 69 else 1  
 43 class = 1  
 44 if Atributo1<56.5 then node 70 elseif Atributo1>=56.5 then node 71 else 1  
 45 class = 0  
 46 if Atributo11<94.1553 then node 72 elseif Atributo11>=94.1553 then node 73 else 1  
 47 if Regional=BAURU then node 74 elseif Regional in {CABREÚVA SÃO PAULO TAUBATÉ}  
 then node 75 else 0  
 48 if Atributo4<22 then node 76 elseif Atributo4>=22 then node 77 else 1  
 49 class = 1  
 50 if Idade<12.5 then node 78 elseif Idade>=12.5 then node 79 else 1  
 51 if Idade<39.5 then node 80 elseif Idade>=39.5 then node 81 else 1  
 52 if Idade<22.5 then node 82 elseif Idade>=22.5 then node 83 else 0  
 53 class = 1  
 54 if Atributo4<63 then node 84 elseif Atributo4>=63 then node 85 else 1  
 55 if CorrosoModerada<0.00342466 then node 86 elseif CorrosoModerada>=0.00342466 then node  
 87 else 0  
 56 if Idade<30.5 then node 88 elseif Idade>=30.5 then node 89 else 1  
 57 if CorrosoLevementeAlta<0.211065 then node 90 elseif CorrosoLevementeAlta>=0.211065 then  
 node 91 else 1  
 58 class = 0  
 59 class = 1  
 60 if Atributo11<94.118 then node 92 elseif Atributo11>=94.118 then node 93 else 0  
 61 if Idade<10.5 then node 94 elseif Idade>=10.5 then node 95 else 1  
 62 if Atributo10<87.7831 then node 96 elseif Atributo10>=87.7831 then node 97 else 1  
 63 if TensokV=88 then node 98 elseif TensokV=138 then node 99 else 0  
 64 class = 1  
 65 if Atributo6<256.973 then node 100 elseif Atributo6>=256.973 then node 101 else 0  
 66 if Idade<1.5 then node 102 elseif Idade>=1.5 then node 103 else 0  
 67 class = 1  
 68 if Atributo9<8.5 then node 104 elseif Atributo9>=8.5 then node 105 else 0  
 69 if Atributo9<97.5 then node 106 elseif Atributo9>=97.5 then node 107 else 1  
 70 if QuantidadedeCircuitos=1 then node 108 elseif QuantidadedeCircuitos=2 then node 109 else 1  
 71 if Atributo1<60 then node 110 elseif Atributo1>=60 then node 111 else 1  
 72 class = 1  
 73 if TensokV=230 then node 112 elseif TensokV=440 then node 113 else 1  
 74 class = 0  
 75 if Atributo12<141 then node 114 elseif Atributo12>=141 then node 115 else 1  
 76 class = 0  
 77 if Comprimentokm<115.993 then node 116 elseif Comprimentokm>=115.993 then node 117 else  
 1  
 78 class = 1  
 79 if Idade<57.5 then node 118 elseif Idade>=57.5 then node 119 else 1  
 80 if Comprimentokm<50.1225 then node 120 elseif Comprimentokm>=50.1225 then node 121 else  
 1  
 81 if Comprimentokm<62.4868 then node 122 elseif Comprimentokm>=62.4868 then node 123 else  
 0  
 82 class = 0  
 83 if Atributo1<19 then node 124 elseif Atributo1>=19 then node 125 else 0  
 84 class = 0  
 85 if Atributo9<201.5 then node 126 elseif Atributo9>=201.5 then node 127 else 1

86 if Atributo6<225.732 then node 128 elseif Atributo6>=225.732 then node 129 else 0  
87 class = 0  
88 if Atributo1<17 then node 130 elseif Atributo1>=17 then node 131 else 0  
89 if Atributo11<94.2656 then node 132 elseif Atributo11>=94.2656 then node 133 else 1  
90 if Atributo1<91 then node 134 elseif Atributo1>=91 then node 135 else 1  
91 if Atributo1<19 then node 136 elseif Atributo1>=19 then node 137 else 0  
92 if Atributo1<9.5 then node 138 elseif Atributo1>=9.5 then node 139 else 0  
93 class = 0  
94 class = 0  
95 if Atributo4<596.5 then node 140 elseif Atributo4>=596.5 then node 141 else 1  
96 if Regional=BAURU then node 142 elseif Regional=TAUBATÉ then node 143 else 1  
97 if Atributo9<19.5 then node 144 elseif Atributo9>=19.5 then node 145 else 0  
98 if Atributo4<195.5 then node 146 elseif Atributo4>=195.5 then node 147 else 0  
99 class = 0  
100 class = 0  
101 class = 1  
102 class = 1  
103 if Atributo8<72.9375 then node 148 elseif Atributo8>=72.9375 then node 149 else 0  
104 class = 0  
105 class = 1  
106 class = 1  
107 class = 0  
108 if CorrosoLevementeAlta<0.0833333 then node 150 elseif CorrosoLevementeAlta>=0.0833333  
then node 151 else 1  
109 if Atributo1<9 then node 152 elseif Atributo1>=9 then node 153 else 1  
110 class = 0  
111 if CorrosoLevementeAlta<0.0833333 then node 154 elseif CorrosoLevementeAlta>=0.0833333  
then node 155 else 1  
112 if Atributo10<88.5817 then node 156 elseif Atributo10>=88.5817 then node 157 else 1  
113 if Atributo11<94.217 then node 158 elseif Atributo11>=94.217 then node 159 else 1  
114 if Atributo6<262.521 then node 160 elseif Atributo6>=262.521 then node 161 else 1  
115 class = 0  
116 if Comprimentokm<110.432 then node 162 elseif Comprimentokm>=110.432 then node 163 else  
1  
117 if Atributo8<60.6458 then node 164 elseif Atributo8>=60.6458 then node 165 else 1  
118 class = 1  
119 if Atributo1<9.5 then node 166 elseif Atributo1>=9.5 then node 167 else 1  
120 if Atributo11<94.1581 then node 168 elseif Atributo11>=94.1581 then node 169 else 1  
121 if Atributo9<133.5 then node 170 elseif Atributo9>=133.5 then node 171 else 1  
122 if Atributo1<28 then node 172 elseif Atributo1>=28 then node 173 else 1  
123 class = 0  
124 class = 1  
125 class = 0  
126 if Atributo4<152 then node 174 elseif Atributo4>=152 then node 175 else 1  
127 class = 0  
128 if Regional=CABREÚVA then node 176 elseif Regional in {SÃO PAULO TAUBATÉ} then  
node 177 else 1  
129 if Atributo11<94.7641 then node 178 elseif Atributo11>=94.7641 then node 179 else 0  
130 class = 1  
131 if Atributo6<272.726 then node 180 elseif Atributo6>=272.726 then node 181 else 0

132 if Idade<45.5 then node 182 elseif Idade>=45.5 then node 183 else 1  
133 class = 0  
134 if Idade<45.5 then node 184 elseif Idade>=45.5 then node 185 else 1  
135 class = 0  
136 class = 0  
137 class = 1  
138 if Comprimentokm<73.654 then node 186 elseif Comprimentokm>=73.654 then node 187 else 0  
139 class = 1  
140 if Comprimentokm<76.9718 then node 188 elseif Comprimentokm>=76.9718 then node 189 else  
1  
141 class = 1  
142 class = 1  
143 class = 0  
144 if Atributo10<87.9873 then node 190 elseif Atributo10>=87.9873 then node 191 else 0  
145 if Atributo6<230.655 then node 192 elseif Atributo6>=230.655 then node 193 else 1  
146 if Atributo10<88.4342 then node 194 elseif Atributo10>=88.4342 then node 195 else 1  
147 if Atributo1<73 then node 196 elseif Atributo1>=73 then node 197 else 0  
148 class = 1  
149 class = 0  
150 class = 1  
151 if Atributo9<73.5 then node 198 elseif Atributo9>=73.5 then node 199 else 1  
152 class = 0  
153 if Atributo6<189.435 then node 200 elseif Atributo6>=189.435 then node 201 else 1  
154 if Atributo6<236.306 then node 202 elseif Atributo6>=236.306 then node 203 else 1  
155 class = 0  
156 class = 1  
157 class = 0  
158 class = 0  
159 class = 1  
160 if Atributo6<259.296 then node 204 elseif Atributo6>=259.296 then node 205 else 1  
161 class = 1  
162 if Atributo11<94.8379 then node 206 elseif Atributo11>=94.8379 then node 207 else 1  
163 if Idade<12.5 then node 208 elseif Idade>=12.5 then node 209 else 1  
164 class = 1  
165 if Atributo8<67.1458 then node 210 elseif Atributo8>=67.1458 then node 211 else 1  
166 class = 0  
167 if Atributo6<234.729 then node 212 elseif Atributo6>=234.729 then node 213 else 1  
168 if Atributo6<228.254 then node 214 elseif Atributo6>=228.254 then node 215 else 0  
169 if Atributo12<231.5 then node 216 elseif Atributo12>=231.5 then node 217 else 1  
170 if Atributo11<94.0321 then node 218 elseif Atributo11>=94.0321 then node 219 else 1  
171 class = 0  
172 if Atributo4<398 then node 220 elseif Atributo4>=398 then node 221 else 1  
173 if Atributo8<106.313 then node 222 elseif Atributo8>=106.313 then node 223 else 0  
174 class = 1  
175 if Atributo6<254.309 then node 224 elseif Atributo6>=254.309 then node 225 else 1  
176 class = 1  
177 class = 0  
178 if Atributo11<94.603 then node 226 elseif Atributo11>=94.603 then node 227 else 0  
179 if Regional in {CABREÚVA SÃO PAULO} then node 228 elseif Regional=TAUBATÉ then  
node 229 else 1

180 if Atributo12<301 then node 230 elseif Atributo12>=301 then node 231 else 0  
181 class = 1  
182 if Atributo9<87 then node 232 elseif Atributo9>=87 then node 233 else 1  
183 class = 0  
184 if Atributo11<94.8901 then node 234 elseif Atributo11>=94.8901 then node 235 else 1  
185 class = 0  
186 class = 1  
187 class = 0  
188 if Atributo4<393.5 then node 236 elseif Atributo4>=393.5 then node 237 else 0  
189 if Atributo11<94.0179 then node 238 elseif Atributo11>=94.0179 then node 239 else 1  
190 class = 0  
191 if Atributo8<89.4792 then node 240 elseif Atributo8>=89.4792 then node 241 else 0  
192 class = 0  
193 if Atributo10<88.0634 then node 242 elseif Atributo10>=88.0634 then node 243 else 1  
194 class = 1  
195 class = 0  
196 class = 0  
197 class = 1  
198 class = 1  
199 class = 0  
200 class = 0  
201 class = 1  
202 class = 0  
203 class = 1  
204 if Atributo4<114 then node 244 elseif Atributo4>=114 then node 245 else 1  
205 class = 0  
206 if Atributo5<30 then node 246 elseif Atributo5>=30 then node 247 else 1  
207 class = 0  
208 class = 0  
209 if Atributo10<87.7451 then node 248 elseif Atributo10>=87.7451 then node 249 else 1  
210 if Atributo8<66.9375 then node 250 elseif Atributo8>=66.9375 then node 251 else 1  
211 class = 1  
212 class = 0  
213 class = 1  
214 class = 1  
215 if Idade<33 then node 252 elseif Idade>=33 then node 253 else 0  
216 if Atributo8<97.9167 then node 254 elseif Atributo8>=97.9167 then node 255 else 1  
217 if Idade<24.5 then node 256 elseif Idade>=24.5 then node 257 else 1  
218 if Atributo4<591.5 then node 258 elseif Atributo4>=591.5 then node 259 else 1  
219 if Atributo1<7.5 then node 260 elseif Atributo1>=7.5 then node 261 else 1  
220 if Atributo4<153.5 then node 262 elseif Atributo4>=153.5 then node 263 else 1  
221 class = 1  
222 if Atributo7<272.172 then node 264 elseif Atributo7>=272.172 then node 265 else 0  
223 class = 1  
224 if Atributo8<133.021 then node 266 elseif Atributo8>=133.021 then node 267 else 1  
225 class = 0  
226 if Atributo4<79.5 then node 268 elseif Atributo4>=79.5 then node 269 else 0  
227 if Atributo10<89.2208 then node 270 elseif Atributo10>=89.2208 then node 271 else 0  
228 class = 1  
229 class = 0

230 if Atributo4<52.5 then node 272 elseif Atributo4>=52.5 then node 273 else 0  
 231 class = 0  
 232 if Atributo9<25 then node 274 elseif Atributo9>=25 then node 275 else 1  
 233 class = 1  
 234 class = 1  
 235 if Atributo11<94.9178 then node 276 elseif Atributo11>=94.9178 then node 277 else 1  
 236 if Atributo9<8 then node 278 elseif Atributo9>=8 then node 279 else 0  
 237 class = 1  
 238 if Atributo7<247.179 then node 280 elseif Atributo7>=247.179 then node 281 else 0  
 239 if Atributo5<32 then node 282 elseif Atributo5>=32 then node 283 else 1  
 240 class = 1  
 241 class = 0  
 242 class = 1  
 243 class = 0  
 244 class = 0  
 245 class = 1  
 246 if Atributo9<11.5 then node 284 elseif Atributo9>=11.5 then node 285 else 1  
 247 if QuantidadedeCircuitos=1 then node 286 elseif QuantidadedeCircuitos=2 then node 287 else 1  
 248 class = 0  
 249 class = 1  
 250 class = 1  
 251 class = 0  
 252 if Idade<10 then node 288 elseif Idade>=10 then node 289 else 0  
 253 class = 1  
 254 class = 1  
 255 if Atributo1<41.5 then node 290 elseif Atributo1>=41.5 then node 291 else 1  
 256 if Atributo9<13 then node 292 elseif Atributo9>=13 then node 293 else 1  
 257 if Comprimentokm<16.3523 then node 294 elseif Comprimentokm>=16.3523 then node 295 else  
 0  
 258 if Atributo9<9.5 then node 296 elseif Atributo9>=9.5 then node 297 else 1  
 259 class = 0  
 260 if Atributo11<94.4016 then node 298 elseif Atributo11>=94.4016 then node 299 else 1  
 261 class = 1  
 262 class = 1  
 263 if Atributo9<1.5 then node 300 elseif Atributo9>=1.5 then node 301 else 0  
 264 class = 0  
 265 class = 1  
 266 if Comprimentokm<7.1224 then node 302 elseif Comprimentokm>=7.1224 then node 303 else 1  
 267 class = 0  
 268 if Atributo6<240.158 then node 304 elseif Atributo6>=240.158 then node 305 else 1  
 269 if CorrosoMuitoSevera<0.00699301 then node 306 elseif CorrosoMuitoSevera>=0.00699301  
 then node 307 else 0  
 270 class = 0  
 271 class = 1  
 272 class = 1  
 273 class = 0  
 274 if CorrosoAlta<0.240319 then node 308 elseif CorrosoAlta>=0.240319 then node 309 else 1  
 275 if Comprimentokm<6.30617 then node 310 elseif Comprimentokm>=6.30617 then node 311 else  
 0  
 276 class = 0

277 class = 1  
278 class = 1  
279 class = 0  
280 if Atributo9<12.5 then node 312 elseif Atributo9>=12.5 then node 313 else 0  
281 class = 1  
282 if Atributo1<9.25 then node 314 elseif Atributo1>=9.25 then node 315 else 1  
283 class = 0  
284 if Atributo8<99.9792 then node 316 elseif Atributo8>=99.9792 then node 317 else 1  
285 class = 1  
286 class = 1  
287 class = 0  
288 class = 1  
289 class = 0  
290 if Atributo4<196.5 then node 318 elseif Atributo4>=196.5 then node 319 else 0  
291 class = 1  
292 class = 0  
293 class = 1  
294 class = 1  
295 class = 0  
296 class = 0  
297 class = 1  
298 if Atributo6<235.551 then node 320 elseif Atributo6>=235.551 then node 321 else 1  
299 class = 0  
300 class = 1  
301 if Comprimentokm<43.8643 then node 322 elseif Comprimentokm>=43.8643 then node 323 else 0  
302 if Comprimentokm<5.77188 then node 324 elseif Comprimentokm>=5.77188 then node 325 else 1  
303 class = 1  
304 class = 1  
305 if Idade<36.5 then node 326 elseif Idade>=36.5 then node 327 else 1  
306 if Atributo8<102.167 then node 328 elseif Atributo8>=102.167 then node 329 else 0  
307 if CorrosoMuitoSevera<0.0325032 then node 330 elseif CorrosoMuitoSevera>=0.0325032 then node 331 else 1  
308 if Comprimentokm<29.4677 then node 332 elseif Comprimentokm>=29.4677 then node 333 else 1  
309 class = 0  
310 class = 1  
311 if CorrosoAlta<0.151617 then node 334 elseif CorrosoAlta>=0.151617 then node 335 else 0  
312 if Atributo12<80 then node 336 elseif Atributo12>=80 then node 337 else 0  
313 class = 1  
314 if Comprimentokm<101.106 then node 338 elseif Comprimentokm>=101.106 then node 339 else 1  
315 if Atributo6<264.965 then node 340 elseif Atributo6>=264.965 then node 341 else 1  
316 class = 1  
317 if Regional=BAURU then node 342 elseif Regional=CABREÚVA then node 343 else 1  
318 class = 1  
319 class = 0  
320 class = 0  
321 class = 1



```

322 class = 1
323 if Atributo12<133 then node 344 elseif Atributo12>=133 then node 345 else 0
324 class = 1
325 class = 0
326 if CorrosoExtremamenteSevera<0.993007 then node 346 elseif
CorrosoExtremamenteSevera>=0.993007 then node 347 else 1
327 if Atributo1<9.5 then node 348 elseif Atributo1>=9.5 then node 349 else 0
328 if Atributo9<33.5 then node 350 elseif Atributo9>=33.5 then node 351 else 0
329 if Comprimentokm<23.6633 then node 352 elseif Comprimentokm>=23.6633 then node 353 else
0
330 class = 1
331 if Atributo9<4 then node 354 elseif Atributo9>=4 then node 355 else 0
332 if Idade<34.5 then node 356 elseif Idade>=34.5 then node 357 else 1
333 class = 1
334 if Atributo10<87.8033 then node 358 elseif Atributo10>=87.8033 then node 359 else 0
335 class = 1
336 class = 1
337 class = 0
338 if Atributo6<248.485 then node 360 elseif Atributo6>=248.485 then node 361 else 1
339 class = 0
340 if Atributo6<237.49 then node 362 elseif Atributo6>=237.49 then node 363 else 1
341 class = 0
342 class = 0
343 if Idade<50.5 then node 364 elseif Idade>=50.5 then node 365 else 1
344 class = 0
345 if Atributo10<88.0667 then node 366 elseif Atributo10>=88.0667 then node 367 else 0
346 if Idade<14.5 then node 368 elseif Idade>=14.5 then node 369 else 1
347 class = 0
348 if Atributo1<6.5 then node 370 elseif Atributo1>=6.5 then node 371 else 1
349 class = 0
350 if Idade<30.5 then node 372 elseif Idade>=30.5 then node 373 else 0
351 if Atributo9<62.5 then node 374 elseif Atributo9>=62.5 then node 375 else 0
352 class = 0
353 if Atributo6<269.241 then node 376 elseif Atributo6>=269.241 then node 377 else 0
354 class = 0
355 class = 1
356 class = 1
357 if Atributo10<88.2272 then node 378 elseif Atributo10>=88.2272 then node 379 else 0
358 class = 1
359 class = 0
360 if Atributo6<246.725 then node 380 elseif Atributo6>=246.725 then node 381 else 1
361 class = 1
362 class = 1
363 if Atributo8<83.2708 then node 382 elseif Atributo8>=83.2708 then node 383 else 1
364 if Atributo6<246.403 then node 384 elseif Atributo6>=246.403 then node 385 else 1
365 class = 0
366 class = 1
367 class = 0
368 class = 0
369 if Atributo12<157.5 then node 386 elseif Atributo12>=157.5 then node 387 else 1

```

```

370 class = 0
371 class = 1
372 if Comprimentokm<34.4776 then node 388 elseif Comprimentokm>=34.4776 then node 389 else
0
373 if Comprimentokm<46.7329 then node 390 elseif Comprimentokm>=46.7329 then node 391 else
1
374 class = 0
375 if Atributo4<420 then node 392 elseif Atributo4>=420 then node 393 else 0
376 if Atributo9<11.5 then node 394 elseif Atributo9>=11.5 then node 395 else 0
377 class = 1
378 class = 1
379 class = 0
380 if Atributo1<1.5 then node 396 elseif Atributo1>=1.5 then node 397 else 1
381 class = 0
382 class = 0
383 class = 1
384 class = 0
385 class = 1
386 if Comprimentokm<51.8667 then node 398 elseif Comprimentokm>=51.8667 then node 399 else
1
387 if Comprimentokm<50.9974 then node 400 elseif Comprimentokm>=50.9974 then node 401 else
0
388 if Atributo10<88.3557 then node 402 elseif Atributo10>=88.3557 then node 403 else 1
389 if Idade<20.5 then node 404 elseif Idade>=20.5 then node 405 else 0
390 if Atributo9<20.5 then node 406 elseif Atributo9>=20.5 then node 407 else 0
391 if Comprimentokm<49.0696 then node 408 elseif Comprimentokm>=49.0696 then node 409 else
1
392 class = 1
393 class = 0
394 class = 0
395 if Atributo6<261.857 then node 410 elseif Atributo6>=261.857 then node 411 else 0
396 class = 0
397 if Atributo8<99.9167 then node 412 elseif Atributo8>=99.9167 then node 413 else 1
398 if Atributo4<38.5 then node 414 elseif Atributo4>=38.5 then node 415 else 1
399 class = 0
400 class = 0
401 class = 1
402 class = 0
403 class = 1
404 if Comprimentokm<49.3658 then node 416 elseif Comprimentokm>=49.3658 then node 417 else
0
405 class = 0
406 if Atributo7<267.026 then node 418 elseif Atributo7>=267.026 then node 419 else 0
407 if Atributo4<412.5 then node 420 elseif Atributo4>=412.5 then node 421 else 1
408 class = 1
409 if Atributo10<88.0722 then node 422 elseif Atributo10>=88.0722 then node 423 else 1
410 if Idade<25.5 then node 424 elseif Idade>=25.5 then node 425 else 0
411 class = 1
412 class = 1
413 class = 0

```

```

414 class = 0
415 if Atributo4<76.5 then node 426 elseif Atributo4>=76.5 then node 427 else 1
416 class = 1
417 class = 0
418 if Idade<48 then node 428 elseif Idade>=48 then node 429 else 0
419 class = 1
420 if Regional=CABREÚVA then node 430 elseif Regional=TAUBATÉ then node 431 else 1
421 class = 0
422 if Comprimentokm<53.7435 then node 432 elseif Comprimentokm>=53.7435 then node 433 else
0
423 if Comprimentokm<62.2381 then node 434 elseif Comprimentokm>=62.2381 then node 435 else
1
424 if Atributo9<13.5 then node 436 elseif Atributo9>=13.5 then node 437 else 0
425 if Atributo5<18.5 then node 438 elseif Atributo5>=18.5 then node 439 else 0
426 class = 1
427 class = 0
428 class = 0
429 if Atributo12<62.5 then node 440 elseif Atributo12>=62.5 then node 441 else 0
430 if Atributo9<28 then node 442 elseif Atributo9>=28 then node 443 else 1
431 class = 0
432 class = 1
433 class = 0
434 if Atributo6<238.337 then node 444 elseif Atributo6>=238.337 then node 445 else 1
435 class = 1
436 class = 1
437 class = 0
438 if Atributo8<107.396 then node 446 elseif Atributo8>=107.396 then node 447 else 0
439 if Atributo4<415 then node 448 elseif Atributo4>=415 then node 449 else 1
440 class = 1
441 if Atributo4<149.5 then node 450 elseif Atributo4>=149.5 then node 451 else 0
442 class = 1
443 class = 0
444 class = 1
445 if Atributo10<88.3994 then node 452 elseif Atributo10>=88.3994 then node 453 else 0
446 if Atributo6<246.577 then node 454 elseif Atributo6>=246.577 then node 455 else 0
447 if Atributo8<148.146 then node 456 elseif Atributo8>=148.146 then node 457 else 0
448 class = 1
449 class = 0
450 class = 0
451 if Atributo4<420.5 then node 458 elseif Atributo4>=420.5 then node 459 else 0
452 class = 1
453 class = 0
454 class = 0
455 class = 1
456 if Atributo6<247.124 then node 460 elseif Atributo6>=247.124 then node 461 else 0
457 class = 1
458 class = 0
459 class = 1
460 if Atributo8<133.229 then node 462 elseif Atributo8>=133.229 then node 463 else 0
461 class = 0

```

462 class = 0  
463 class = 1