

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**FAIXAS DE SEGURANÇA DE LINHAS DE TRANSMISSÃO
E SEU MODELO DE DESEMPENHO FRENTE AOS
INCÊNDIOS FLORESTAIS**

TITO RICARDO VAZ DA COSTA

ORIENTADOR: AILTON TEIXEIRA DO VALE

TESE DE DOUTORADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

PUBLICAÇÃO PPGCFL.TD-112.2021

BRASÍLIA/DF: FEVEREIRO – 2021

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

**“FAIXAS DE SEGURANÇA DE LINHAS DE TRANSMISSÃO E SEU MODELO
DE DESEMPENHO FRENTE AOS INCÊNDIOS FLORESTAIS”**

TITO RICARDO VAZ DA COSTA

TESE DE DOUTORADO ACADÊMICO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS, DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL, DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR.

APROVADA POR:

**Prof. Dr. AILTON TEIXEIRA DO VALE (Departamento de Engenharia Florestal – EFL/UnB);
(Orientador)**

**Prof. Dr. AUGUSTO CÉSAR DE MENDONÇA BRASIL (Faculdade do Gama – FGA/UnB);
(Examinador Externo)**

**Prof. Dr. REGINALDO SÉRGIO PEREIRA (Departamento de Engenharia Florestal – EFL/UnB);
(Examinador Interno)**

**Prof. Dr. ALESSANDRO CÉZAR DE OLIVEIRA MOREIRA (Serviço Florestal Brasileiro – SFB);
(Examinador Externo)**

**Prof. Dr. DIVINO ETERNO TEIXEIRA (Serviço Florestal Brasileiro – SFB).
(Examinador Suplente)**

Brasília-DF, 05 de fevereiro de 2021.

FICHA CATALOGRÁFICA

COSTA, TITO RICARDO VAZ DA

Faixas de Segurança de Linhas de Transmissão e seu Modelo de Desempenho Frente aos Incêndios Florestais. 2021, 130p, 210 x 297 mm (EFL/FT/UnB, Tese de Doutorado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Florestal

1. Linhas de Transmissão

2. Queimadas

3. Desligamentos

4. Energia Elétrica

I. EFL/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

COSTA, T. R. V. (2021). Faixas de Segurança de Linhas de Transmissão e seu Modelo de Desempenho Frente aos Incêndios Florestais. Tese de Doutorado em Ciências Florestais, Publicação PPGCFL.TD-112.2021, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 130p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Tito Ricardo Vaz da Costa.

TÍTULO: Faixas de Segurança de Linhas de Transmissão e seu Modelo de Desempenho Frente aos Incêndios Florestais.

GRAU/ANO: Doutor/2021

É concedida à Universidade de Brasília-UnB permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado e para emprestar ou vender tais cópias, com o propósito exclusivamente acadêmico e/ou científico. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa tese de doutorado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Tito Ricardo Vaz da Costa

Endereço eletrônico: titovaz@gmail.com

AGRADECIMENTOS

A minha esposa, Clarissa, pelo apoio, pelas valiosas contribuições e pelo carinho que sempre me dedicou.

A meus pais, Fernando (*in memoriam*) e Suzana, pelo dom da vida e por todo o suporte que me permitiu chegar a esse estágio da vida.

Aos meus irmãos, Marcelina e Rafael, pelos incentivos e pela convivência.

Ao meu orientador, Professor Ailton Teixeira do Vale, pela orientação desta tese – meu reconhecido agradecimento durante essa árdua jornada de desafio, construção e amadurecimento.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Florestal da UnB pelos ensinamentos e pelo tratamento respeitoso durante toda essa jornada.

Aos colegas da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, pelo coleguismo profissional e pela compreensão durante o período de construção deste trabalho.

APRESENTAÇÃO

Esta tese foi escrita em sete capítulos: introdução; revisão de literatura; materiais e métodos; resultados e discussões; conclusões; recomendações; e referências. O capítulo de introdução destaca a temática estudada, objetivo geral, objetivos específicos e hipótese. A revisão de literatura aborda os conceitos utilizados no trabalho, com destaque para os desligamentos de linhas de transmissão provocados por incêndios florestais. O terceiro capítulo descreve a metodologia, incluindo o *locus* da pesquisa, população, amostragem, coleta de dados, análises estatísticas e o plano de trabalho. O plano de trabalho é dividido em quatro etapas: (i) relação entre carga de incêndio e desligamentos de linhas de transmissão; (ii) qualidade da informação; (iii) análise descritiva dos dados; e (iv) construção do modelo matemático. Cada tópico do plano de trabalho é detalhadamente descrito, incluindo a apresentação de fluxogramas específicos. O capítulo dedicado aos resultados e discussões também é dividido em quatro tópicos, de acordo com o plano de trabalho descrito na metodologia. As conclusões do trabalho e as recomendações de estudos futuros são apresentadas em capítulos específicos. Por fim, todas as citações do estudo são referenciadas seguindo o padrão ABNT.

RESUMO

FAIXAS DE SEGURANÇA DE LINHAS DE TRANSMISSÃO E SEU MODELO DE DESEMPENHO FRENTE AOS INCÊNDIOS FLORESTAIS

Autor: Tito Ricardo Vaz da Costa

Orientador: Ailton Teixeira do Vale

Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal

Brasília, Fevereiro de 2021.

Os incêndios florestais são uma das principais causas de desligamentos linhas de transmissão no Brasil. O estudo de fatores que ajudem a compreender esse fenômeno é fundamental para melhorar o desempenho e orientar futuros projetos desse tipo de instalação. Este trabalho buscou construir um modelo para prever se uma linha de transmissão vai ou não sofrer um desligamento quando exposta a um incêndio florestal. Para isso, foram analisadas as informações relacionadas a esse tipo de desligamentos no sistema de transmissão brasileiro, nos anos de 2018 e 2019. Foram analisadas as características dos vãos expostos ao fogo de doze linhas de transmissão em 500 kV no Brasil, totalizando 3.998 km. O trabalho também analisou os inventários florestais da vegetação adjacente a três troncos de linhas de transmissão e calculou suas cargas de incêndio específicas. Isso foi feito a partir das informações de poder calorífico superior, densidade básica e volume saturado das espécies inventariadas. Os valores de carga de incêndio calculados foram comparados com os dados de desempenho das linhas de transmissão. A partir da análise de dados construtivos, focos de incêndio, índice de vegetação, restrição para manutenção de limpeza de faixa, condições climáticas e características de terreno, foi possível identificar as principais características que tornam um determinado vão vulnerável a provocar um desligamento por incêndios florestais. Os resultados demonstraram uma elevada correlação ($R^2 = 0,9877$) entre a carga de incêndio e o número de desligamentos das linhas de transmissão analisadas, evidenciando a influência da vegetação na operação dessas instalações. Foi possível chegar a um modelo, com índice de acerto superior a 73%, para a ocorrência de desligamentos de linhas de transmissão provocados por incêndios florestais. Observou-se que o quantitativo de focos de incêndios, as variáveis climáticas e o tipo de bioma dos vãos são as melhores variáveis previsoras disponíveis. Ficou claro que é possível projetar linhas de transmissão mais resilientes aos incêndios florestais observando os resultados dos modelos preditores na escolha de melhores traçados.

Palavras-chave: Queimadas, desligamentos, energia elétrica.

ABSTRACT

TRANSMISSION LINE SAFETY ZONES AND THEIR PERFORMANCE MODEL REGARDING FOREST FIRES

Author: Tito Ricardo Vaz da Costa

Advisor: Ailton Teixeira do Vale

Graduate Program in Forest Engineering

Brasília, February 2021.

Forest fires are one of the main causes of transmission line outages in Brazil. Studying the factors that can help understand this phenomenon is fundamental to improve performance and guide future projects involving this type of installation. This work sought to build a model to predict whether or not a transmission line will suffer an outage when exposed to a forest fire. To this end, the information was analyzed related to this type of outage in the Brazilian transmission system in the years 2018 and 2019. The characteristics of the spans exposed to fire of twelve 500 kV transmission lines in Brazil were analyzed, totaling 3,998 km. The study also analyzed the forest inventories of vegetation adjacent to three transmission line trunks and calculated their specific fire loads. This was done based on the information on gross calorific value, basic density and saturated volume of the inventoried species. The calculated fire load values were compared with the performance data of the transmission lines. Based on the analysis of construction data, fire outbreaks, vegetation index, restrictions on the cleaning maintenance of the rights-of-way, weather conditions and terrain characteristics, the main characteristics that make a given span vulnerable to an outage caused by forest fires could be identified. The results showed a high correlation ($R^2 = 0.9877$) between the fire load and the number of line outages of the transmission lines under analysis, revealing the influence of vegetation on the operation of these installations. It was possible to arrive at a model with an accuracy rate higher than 73% for the occurrence of transmission line outages caused by forest fires. The amount of fire outbreaks, the climatic variables and the type of biome of the spans were observed to be the best available predictors. It is clear that it is possible to design transmission lines that are more resilient to forest fires by observing the results of the predictive models to choose better routes.

Keywords: Burned, Outages, Electric Power.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivo Geral	2
1.2. Hipótese.....	3
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1. A energia elétrica	4
2.1.1. O que é um sistema elétrico	5
2.1.2. O sistema elétrico brasileiro	6
2.1.3. A governança do sistema elétrico brasileiro	8
2.1.4. A expansão do sistema de transmissão	9
2.1.5. O desempenho do sistema elétrico brasileiro	10
2.2. Os desligamentos provocados por incêndios florestais.....	10
2.2.1. Os esforços da fiscalização da ANEEL para combater os desligamentos provocados por incêndios florestais.....	14
2.3. A combustão da biomassa.....	15
2.3.1. Principais reações químicas	16
2.3.2. As principais características físico-químicas de biomassa	18
2.3.2.1. Massa específica.....	18
2.3.2.2. Teor de umidade.....	19
2.3.2.3. Poder Calorífico	20
2.3.2.4. Densidade energética.....	21
2.3.2.5. Análise elementar	22
2.3.2.6. Análise imediata.....	22
2.4. O potencial de incêndios florestais no bioma cerrado.....	24
2.5. As medidas mitigadoras para a ocorrência de incêndios florestais em linhas de transmissão	25
2.5.1. Limpeza de faixas de segurança	25
2.5.1.1. Adensamento de biomassa	27

2.5.2.	Aceiros	27
2.5.2.1.	Aceiros verdes	28
2.5.2.2.	Aceiros negros.....	30
2.5.3.	O combate ao fogo próximo às linhas de transmissão.....	31
2.5.4.	Diminuição da tensão de operação das linhas.....	32
2.6.	O impacto da carga de incêndio no desempenho de linhas de transmissão	33
2.7.	A qualidade das informações de localização de defeito em desligamentos de linhas de transmissão provocados por incêndios florestais.....	34
2.8.	Características de susceptibilidade de vãos de linhas de transmissão a desligamentos provocados por incêndios florestais	37
2.9.	Modelos Matemáticos	39
2.9.1.	A regressão logística como ferramenta previsora de desligamentos de linhas de transmissão expostas aos incêndios florestais	43
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	47
3.1.	Caracterização do local de estudo	47
3.2.	População e amostragem.....	48
3.3.	Coleta de dados e análises estatísticas.....	49
3.4.	Plano de trabalho.....	49
3.4.1.	Relação entre carga de incêndio e desligamentos.....	52
3.4.2.	Qualidade da Informação	55
3.4.3.	Análise descritiva dos dados.....	56
3.4.4.	Construção do modelo matemático.....	59
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	63
4.1.	O impacto da carga de incêndio específica no desempenho de linhas de transmissão de energia	63
4.2.	Análise de qualidade das informações de localização de defeito em desligamentos de linhas de transmissão provocados por incêndios florestais	70

4.3. Características de susceptibilidade de vãos de linhas de transmissão de 500 kV a desligamentos forçados provocados por incêndios florestais.....	75
4.3.1. Análise estatística das variáveis categóricas.....	79
4.3.2. Análise estatística das variáveis contínuas de vãos localizados em áreas de formação savânica	82
4.4. Modelo predictor de desligamentos de linhas de transmissão expostas aos incêndios florestais	86
4.4.1. Análise de Resíduos.....	98
4.4.2. Novo modelo após a exclusão dos resíduos.....	99
5. CONCLUSÕES.....	103
6. RECOMENDAÇÕES	105
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Troncos e linhas de transmissão selecionados para o modelo (ONS, 2017)	47
Tabela 2 – Variáveis analisadas.....	56
Tabela 3 – Categorias das variáveis biomas, uso do solo e limpeza de faixa	60
Tabela 4 – Espécies com Poder Calorífico Superior (PCS) ou a Densidade Básica (ρ_b) identificadas na literatura.....	63
Tabela 5 – Espécies sem identificação de Poder Calorífico Superior (PCS) e a Densidade Básica (ρ_b) na literatura.....	66
Tabela 6 – Valores médios de Poder Calorífico Superior (PCS) e a Densidade Básica (ρ_b) por tronco de linhas de transmissão.....	66
Tabela 7 – Carga de incêndio específica por tronco de linha de transmissão.	67
Tabela 8 – Quantidade relativa de desligamentos forçados nos troncos de linhas de transmissão analisados.....	67
Tabela 9 – Desligamentos forçados ocorridos no sistema de transmissão brasileiro nos anos de 2018 e 2019.....	70
Tabela 10 – Desligamentos provocados por incêndios florestais nos anos de 2018 e 2019 discriminados por linhas de interesse.	71
Tabela 11 – Classificação dos desligamentos quanto à localização do foco de incêndio ...	73
Tabela 12 – Focos de incêndio nos vãos das doze linhas de transmissão analisadas.....	74
Tabela 13 – Descrição dos dados analisados.....	75
Tabela 14 – Estatística descritiva das variáveis analisadas	76
Tabela 15 – Teste t para igualdade de médias em amostras independentes	78
Tabela 16 – Estatística descritiva das variáveis analisadas para vãos localizados em formações savânicas	83
Tabela 17 – Teste t para igualdade de médias em amostras independentes para vãos localizados em formações savânicas	85
Tabela 18 – Resultados iniciais do modelo sem variáveis previsoras.....	87
Tabela 19 – Modelo Base	87
Tabela 20 – Parâmetros das variáveis fora do modelo no passo 0 de simulação	88
Tabela 21 – Parâmetros das variáveis fora do modelo nos passos 1 a 7 de simulação	89
Tabela 22 – Estatísticas do novo modelo	91
Tabela 23 – Modelos gerados a cada passo.....	92
Tabela 24 – Coeficientes dos modelos gerados.....	93

Tabela 25 – Resíduos padronizados do modelo considerando valores fora do intervalo de $\pm 1,96$	98
Tabela 26 – Novo modelo base após a retirada dos valores atípicos	99
Tabela 27 – Estatísticas do novo modelo	99
Tabela 28 – Percentual de acertos dos novos modelos gerados a cada passo	100
Tabela 29 – Coeficientes dos novos modelos gerados	101

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema de Transmissão – Horizonte 2024 (ONS, 2020).	7
Figura 2 – Rito de expansão da Rede Básica (ANEEL, 2015a).....	9
Figura 3 – Principais causas conhecidas de desligamentos forçados em linhas de transmissão, período de julho/2017 a dezembro/2017 (ONS, 2016b).....	11
Figura 4 – Áreas com maior incidência de incêndios florestais no Brasil, período de agosto/2014 a janeiro/2016 (ANEEL, 2016b).....	12
Figura 5 – Desligamentos forçados provocados por incêndios florestais em todas as linhas de transmissão da Rede Básica e da Rede Complementar no período de 2013 a 2016 (ANEEL, 2016b)	13
Figura 6 – Dinâmica da ocorrência de um desligamento forçado em dois momentos: (a) incêndio florestal ocorrendo na vegetação seca localizada na faixa de segurança e coluna de fumaça e fuligem sendo deslocada pelo vento em direção aos cabos condutores; (b) curto-circuito na linha de transmissão devido à presença da fumaça e fuligem (ANEEL, 2016b)	25
Figura 7 – Execução do aceiro negro entre as bacias dos rios Campo Belo e Aiuruoca (MOTTA, 2019).	30
Figura 8 – Cobertura de detecção de focos de incêndio do Programa Queimadas: (a) visão geral do Brasil; e (b) detalhe da área 220_067 localizada na divisa dos estados da Bahia e Tocantins (INPE, 2020).....	37
Figura 9 – Representação simplificada do processo de modelagem (adaptado de Andrade (2018))	40
Figura 10 – Comparação entre a (a) média e a (b) regressão simples.	41
Figura 11 – Análises estatísticas de acordo com as características das variáveis previstas e previsoras (FIELD, 2017).....	42
Figura 12 – Esquemático das linhas de transmissão estudadas (ONS, 2017)	48
Figura 13 – Resumo do Plano de Trabalho	49
Figura 14 – Representação esquemática das áreas de estudos	50
Figura 15 – Ilustração do cruzamento de dados usando o número do vão como chave identificadora.....	51
Figura 16 – Local de Estudo.....	52
Figura 17 – Metodologia para obtenção da relação entre carga de incêndio e desligamentos	53

Figura 18 – Metodologia para aferição da qualidade dos dados de desligamentos.....	56
Figura 19 – Metodologia para aferição da qualidade dos dados de desligamentos.....	58
Figura 20 – Resumo da metodologia do estudo	61
Figura 21 – Desligamentos de linhas de transmissão por 100 km de linha em função da carga de incêndio.....	68
Figura 22 – Exemplo de análise de focos de incêndio por vão (Fonte: Sistema GGT)	72
Figura 23 – Barras de erro das variáveis analisadas: (a) focos de incêndio; (b) índice NDVI ampliado; (c) largura da faixa de servidão; (d) altura das torres; (e) número de isoladores; (f) dias sem chuva; (g) umidade relativa; (h) temperatura; e (i) velocidade do vento	76
Figura 24 – Áreas em hectares dos vãos analisadas por (a) biomas e (b) tipo de uso do solo	79
Figura 25 – Áreas em hectares dos vãos com incidência de focos de incêndio por (a) biomas e (b) tipo de uso do solo	80
Figura 26 – Áreas em hectares dos vãos com desligamentos por incêndios florestais classificados por (a) biomas e (b) tipo de uso do solo.....	81
Figura 27 – Número de vãos segundo as restrições de limpeza de faixa	82
Figura 28 – Barras de erro das variáveis analisadas para o conjunto de vãos localizados em áreas de formação savânica: (a) focos de incêndio; (b) índice NDVI; (c) largura da faixa de servidão; (d) altura das torres; (e) número de isoladores; (f) dias sem chuva; (g) umidade relativa; (h) temperatura; e (i) velocidade do vento	84
Figura 29 – Dispersão das variáveis do modelo probabilístico identificado no passo 4 da simulação	96

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

%	Percentual
ρ	Densidade
ρ_b	Densidade Básica
η	Coefficiente de Viscosidade do Meio
π	Número pi
Ω	Resistência elétrica
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AQUA	Satélite Aqua
ASV	Autorização de Supressão Vegetal
ATE	Abengoa Transmissora de Energia
B	Expoente B
BA	Bahia
C1	Circuito um
C2	Circuito dois
CF	Teor de Carbono Fixo
CH ₄	Metano
cm	Centímetro
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
Cz	Teor de Cinzas
DE	Densidade Energética
E	Empuxo
e	Número natural
EP _b	Erro padrão do coeficiente de regressão
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
F	Força
F _v	Força viscosa
GGT	Sistema de Gestão Geoespacializada da Transmissão
gl	Grau de Liberdade
GOES	<i>Geostationary Operational Environmental Satellite</i>

h	Hora
H	Teor de Hidrogênio
H ₂	Gás Hidrogênio
H ₂ O	Água
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IBM	<i>International Business Machines Corporation</i>
IBQP	Instituto Brasileiro de Qualidade e Produtividade
IENNE	Interligação Elétrica Norte e Nordeste
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
kg	Quilograma
kJ/m ³	Quilojoule por metro cúbico
km	Quilômetros
kg/m ³	Quilograma por metro cúbico
kV	Quilovolts
LT	Linhas de Transmissão
M	Massa
m	Metro
m/s	Metros por segundo
METOP	<i>Meteorological Operational satellite programme</i>
MJ/kg	Megajoule por quilograma
MJ/Nm ³	Megajoule por Normal Metro Cúbico
mm	Milímetro
MODIS	<i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
M _s	Massa da Madeira Seca
MSG	<i>Meteosat Second Generation</i>
M _u	Massa da Madeira Úmida
MV	Materiais Voláteis
N	Nitrogênio
N ₂	Gás Nitrogênio
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NBR	Normas Brasileiras Regulamentadoras

NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
NPP	<i>Suomi National Polar-orbiting Partnership</i>
°C	Graus Celsius
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
P	Peso
PC	Poder Calorífico
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
PCU	Poder Calorífico Útil
PI	Piauí
PNF	Programa Nacional de Florestas
Prevfogo	Centro Nacional de Prevenção e Combate aos Incêndios Florestais
PSF	Ponto de Saturação das Fibras
Q	Quantidade de Calor
r	Raio
R\$	Real
R^2_{CS}	Estatística-R de Cox e Snell
R^2_N	Estatística-R de Nagelkerke
SAS	<i>Statistical Analysis System</i>
SI	Sistema Internacional
Sig.	Significância
SIN	Sistema Interligado Nacional
SEM	<i>Structural Equation Model</i>
SIPER	Sistema Integrado de Cadastramento de Perturbações -
SPSS	<i>Statistical Package for the Social Sciences</i>
STN	Sistema de Transmissão Nordeste
t/m ³	Toneladas por metro cúbico
t ₀	Temperatura inicial
t ₁	Temperatura final
TED	Termo de Execução Descentralizada
tep	Tonelada Equivalente de Petróleo
TERRA	Satélite Terra
TO	Tocantins

TU	Teor de Umidade
TWh	Terawatt-hora
U	Teor de Umidade
US\$	Dólar
V	Volts
VIIRS	<i>Visible Infrared Imaging Radiometer Suite</i>
VL	Verossimilhança-log
V_{sat}	Volume Saturado
W_w	Equivalente Água do Calorímetro

1. INTRODUÇÃO

É indiscutível a importância da energia para nossa sociedade. É comum associar o desenvolvimento de um país ao seu consumo de energia. A forma como se obtém essa energia é um fator de preocupação mundial.

Dentre as várias formas de energia, a elétrica se destaca por permitir o seu transporte a grandes distâncias e com perdas relativamente baixas. Um sistema elétrico interligado, como o brasileiro, permite que aproveitemos os potenciais energéticos das diferentes regiões do país, considerando as sazonalidades das fontes renováveis. Um exemplo são as bacias hidrográficas dos nossos mananciais, que são submetidas a períodos de cheias e secas. Outro exemplo é o potencial eólico, que se comporta de forma complementar aos períodos de alta pluviosidade na região Nordeste.

Nosso país é um exemplo mundial de aproveitamento sustentável da energia. No entanto, para fazer chegar essa energia ao consumidor final, dependemos de um grande sistema de transmissão interligado, que perpassa todos os estados do país, com exceção de Roraima. Por questões de viabilidade econômica, esse sistema de transmissão é quase totalmente aéreo, o que significa estar exposto a intempéries climáticas e à ação humana como: descargas atmosféricas, vendavais, pássaros, atos de vandalismo e incêndios florestais.

As estatísticas do setor demonstram que as principais causas conhecidas de desligamentos são as descargas atmosféricas e os incêndios florestais (ONS, 2016b). A relevância dos desligamentos provocados por incêndios florestais vem se intensificando nos últimos anos. Isso pode estar associado aos fatores climáticos e até mesmo à expansão do sistema de transmissão para áreas mais susceptíveis a incêndios florestais, áreas de lavoura de cana, entre outros. Há ainda as questões de projetos dessas linhas, que podem ter dado pouca atenção aos riscos de desligamentos por incêndios florestais.

É inegável que a construção e a operação de linhas de transmissão produzem impactos ambientais. Durante a construção, principalmente nas praças de torres, faz-se necessário desmatar áreas consideráveis. Durante a operação, as faixas de floresta sob a linha e nas áreas adjacentes também devem ser monitoradas e, muitas vezes, roçadas ou manejadas, de forma a impedir aproximação da vegetação aos circuitos energizados ou

mesmo a propagação de incêndios florestais sob a linha, podendo provocar o desligamento dessas instalações.

A forma tradicional de prevenir esses desligamentos é por meio da limpeza das faixas de segurança das linhas. Essa é uma atividade considerada de manutenção preventiva que é realizada seguindo os limites técnicos e legais. Somente no ano de 2017, a Agência Reguladora do setor aplicou três penalidades por atrasos ou inadequações nesse tipo de manutenção (ANEEL, 2018). Contudo, não há estatísticas confiáveis que mensurem a efetividade dessas manutenções.

Sabe-se também que a limpeza das faixas de segurança é a atividade de manutenção preventiva mais cara de uma linha de transmissão (GUIDO JR. *et al.*, 2018; RIBEIRO, 2014). O resíduo produzido nessa atividade pode ser aproveitado de forma mais eficiente e, assim, mitigar os custos associados à manutenção.

No caso das linhas de transmissão que perpassam o bioma cerrado, devem-se considerar ainda as espécies da flora que possuem maior resiliência ao fogo, tema já estudado por Souza (2015), dentre outros.

Atualmente, dispomos de diversos dados sobre os desligamentos das linhas de transmissão provocados por incêndios florestais, características construtivas dessas linhas, focos de incêndio geoespacializados, manutenções preventivas realizadas, condições climáticas, entre outros (ECO STAGE, 2019; GUIDO JR. *et al.*, 2018; INPE, 2020b; INPE, 2017; ONS, 2016b). O conjunto desses dados pode lançar luz sobre a influência desses fatores no desempenho técnico das linhas de transmissão.

A melhoria de desempenho das linhas de transmissão é uma iniciativa alinhada com a construção de infraestrutura resiliente e promoção da industrialização inclusiva e sustentável, com fomento à inovação, Objetivo de Desenvolvimento Sustentável – ODS número nove (IBGE, 2020).

1.1. Objetivo Geral

O trabalho proposto tem como objetivo compreender e quantificar a susceptibilidade de uma linha de transmissão de energia elétrica a sofrer desligamentos por

incêndios florestais a partir das suas características técnicas e ambientais, de forma a possibilitar que esses equipamentos se tornem mais resilientes ao fenômeno.

São objetivos específicos do trabalho:

- i. Comparar as ocorrências de desligamentos com as informações disponíveis sobre incêndios florestais, manutenção de limpeza de faixa, índices de vegetação, condições climáticas e características construtivas;
- ii. Avaliar a qualidade energética da vegetação presente nas áreas sob influência das linhas de transmissão;
- iii. Avaliar a qualidade dos dados disponíveis quanto à classificação dos desligamentos de linhas de transmissão e à sua localização;
- iv. Produzir informações a partir dos dados disponíveis utilizando estatística descritiva;
- v. Gerar um modelo matemático preditivo para melhor compreensão dos desligamentos de linhas de transmissão provocados por incêndios florestais;
- vi. Auxiliar o processo de decisão estruturada de traçados de novas linhas de transmissão.

1.2. Hipótese

A qualidade da manutenção das faixas de segurança é um fator determinante para quantificar a vulnerabilidade de uma linha de transmissão a desligamentos intempestivos provocados por incêndios florestais. O conhecimento dos fatores determinantes para ocorrência de desligamentos de linhas de transmissão permite uma operação mais confiável de empreendimentos desse tipo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo, discorreremos sobre os sistemas elétricos e suas características, os modelos matemáticos para desempenho de linhas submetidas a incêndios florestais e a combustão da biomassa. São apresentados dados sobre manutenção de linhas e o seu desempenho frente aos incêndios florestais. Também discutimos sobre o sistema elétrico brasileiro em seus aspectos de governança e planejamento da expansão, e sobre os impactos relacionados aos incêndios florestais.

2.1. A energia elétrica

Para a Física, o trabalho é o resultado do produto de uma força aplicada e o deslocamento produzido. Por sua vez, a energia é definida como a variação de trabalho. O conceito de energia está submetido a uma regra universal que não conhece exceções: a lei da conservação da energia. Segundo essa lei, a energia não se cria, mas se transforma (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016).

A energia é um elemento essencial da sociedade moderna (PAVÃO; LEAL, 2016). Sem a energia, a sociedade como conhecemos não existiria. A energia pode ser encontrada de diversas formas: cinética, potencial, térmica, fotovoltaica, elétrica etc. (REIS, 2011; REIS; SANTOS, 2015). A conversão das várias formas de energia é um fator essencial para nossa civilização.

Embora não a usemos diretamente, a energia na forma elétrica é a que permite um transporte a longas distâncias com perdas mínimas (QUEIROZ, 2010). Devido a essa propriedade, a energia elétrica tem uma elevadíssima importância na nossa sociedade.

O simples ato de ligar uma lâmpada pode demonstrar a complexidade e a importância da energia elétrica. A energia que torna possível o funcionamento da lâmpada certamente está sendo produzida em um ponto distinto, muitas vezes distante, a centenas de quilômetros. A origem da energia pode advir de uma máquina girante que converteu a energia cinética em energia elétrica. Nessa forma, a energia foi guiada por um sistema até

chegar ao seu destino. Isso ocorre de forma praticamente instantânea, pois os elétrons viajam em velocidades muito próximas à da luz¹ (HAYT JR., 1994).

Segundo Daniel Kammen, a rede elétrica que torna isso possível foi considerada a máquina mais complexa que a humanidade já construiu. É a maior, a mais extensa, que tem mais partes e também possui uma magnífica simplicidade (NOVA: EM BUSCA DA SUPERBATERIA, 2017).

2.1.1. O que é um sistema elétrico

Uma rede elétrica é uma coleção de elementos interconectados de maneira específica (JOHNSON D. E. HILBURN, 1994). Essas redes são comumente denominadas de sistema elétrico e se dividem em sistemas de transmissão e sistemas de distribuição.

Os sistemas de transmissão e distribuição distinguem-se entre si pela capacidade de transporte de energia e sua capilaridade. Os sistemas de transmissão são projetados para transportar grandes blocos de energia por longas distâncias (PEREIRA; SPRITZER, 2007). Esse transporte é feito ponto a ponto, com baixa capilaridade. Já os sistemas de distribuição, embora de menor capacidade de transporte, são extremamente capilares, de forma a conectar cada consumidor ao sistema elétrico (GARCIA *et al.*, 2003).

De forma técnica, os sistemas de transmissão e distribuição distinguem-se pelos níveis de tensão em que operam. Dependendo do sistema, esses valores são distintos, mas sempre os níveis de tensão do sistema de transmissão serão superiores ao do sistema de distribuição. No Brasil, as tensões maiores ou iguais a 230 kV são consideradas de transmissão de energia (EPE, 2017). Para fins de comparação, uma residência em Brasília é atendida na tensão de 220 V, mais de mil vezes inferior aos níveis utilizados na transmissão.

Maiores níveis de tensão implicam menores valores de corrente para se transmitir uma mesma potência. As principais perdas dos sistemas de eletricidade, efeito Joule, são proporcionais ao quadrado da corrente (JOHNSON D. E. HILBURN, 1994). Portanto,

¹ Velocidade da luz no vácuo: $2,998 \times 10^8$ m/s

menores correntes significam menores perdas. Assim, para se transmitir grandes blocos de energia, utilizam-se níveis de tensão mais elevados.

Portanto, a função do sistema elétrico, seja ele de transmissão, seja de distribuição, é transportar energia.

2.1.2. O sistema elétrico brasileiro

A forma pela qual a sociedade obtém a energia que demanda para o seu desenvolvimento é fator crucial de sucesso ou fracasso futuro. Para Amado (2017) será sustentável apenas o desenvolvimento que observe a capacidade de suporte da poluição pelos ecossistemas, respeitando a perenidade dos recursos naturais, a fim de manter bons padrões de qualidade ambiental.

A obtenção de energia de forma sustentável passa necessariamente pelo uso de fontes renováveis, e, nesse item, o Brasil destaca-se em nível internacional, uma vez que possui uma média de 41,2% da matriz energética de fontes renováveis, enquanto que a média mundial é de 13,5%, considerando dados consolidados de 2015 (EPE, 2016).

Contudo, o desafio de expandir essa matriz de forma sustentável é imenso. O Brasil é um país em desenvolvimento e deve demandar 34.716 TWh de energia elétrica em 2030. Isso significa um incremento de 180% na capacidade de geração do país, tendo como referência o ano de 2010 (BRASIL, 2007). A forma de atender tal demanda passa necessariamente pela exploração de fontes hidroelétricas. Ocorre, no entanto, que 70% do potencial hidroelétrico brasileiro ainda não aproveitado se encontra nas bacias hidrográficas dos rios Amazonas, Araguaia e Tocantins, a milhares de quilômetros dos centros de carga (BRASIL, 2007). Esse fato indica que, para fazer chegar à energia produzida as unidades consumidoras, torna-se imperativa a construção de novas linhas de transmissão.

As linhas de transmissão têm como função principal transportar grandes blocos de energia entre os centros de geração e os centros de carga (MENEZES, 2015). Para tanto, essas linhas percorrem distâncias que podem variar de alguns quilômetros a milhares de quilômetros.

As linhas também podem ser entendidas como usinas virtuais (DEUS, 2008), uma vez que um bom arranjo de linhas de transmissão pode permitir intercâmbios energéticos de forma que regiões com excedentes de energia a exportem para regiões com déficit energético, evitando assim a construção de novas usinas para atender a área deficitária.

O sistema de transmissão brasileiro pode ser ilustrado pela Figura 1. Até o fim de 2016, esse sistema era composto por 252 contratos distribuídos para 159 concessionários, responsáveis pela manutenção e operação de 130 mil km de linhas de transmissão em tensões que variavam de 138 a 800 kV e cerca de 500 subestações (COSTA *et al.*, 2017; ONS, 2016a) com capacidade de transformação instalada superior a 320 GVA (ANEEL, 2016).

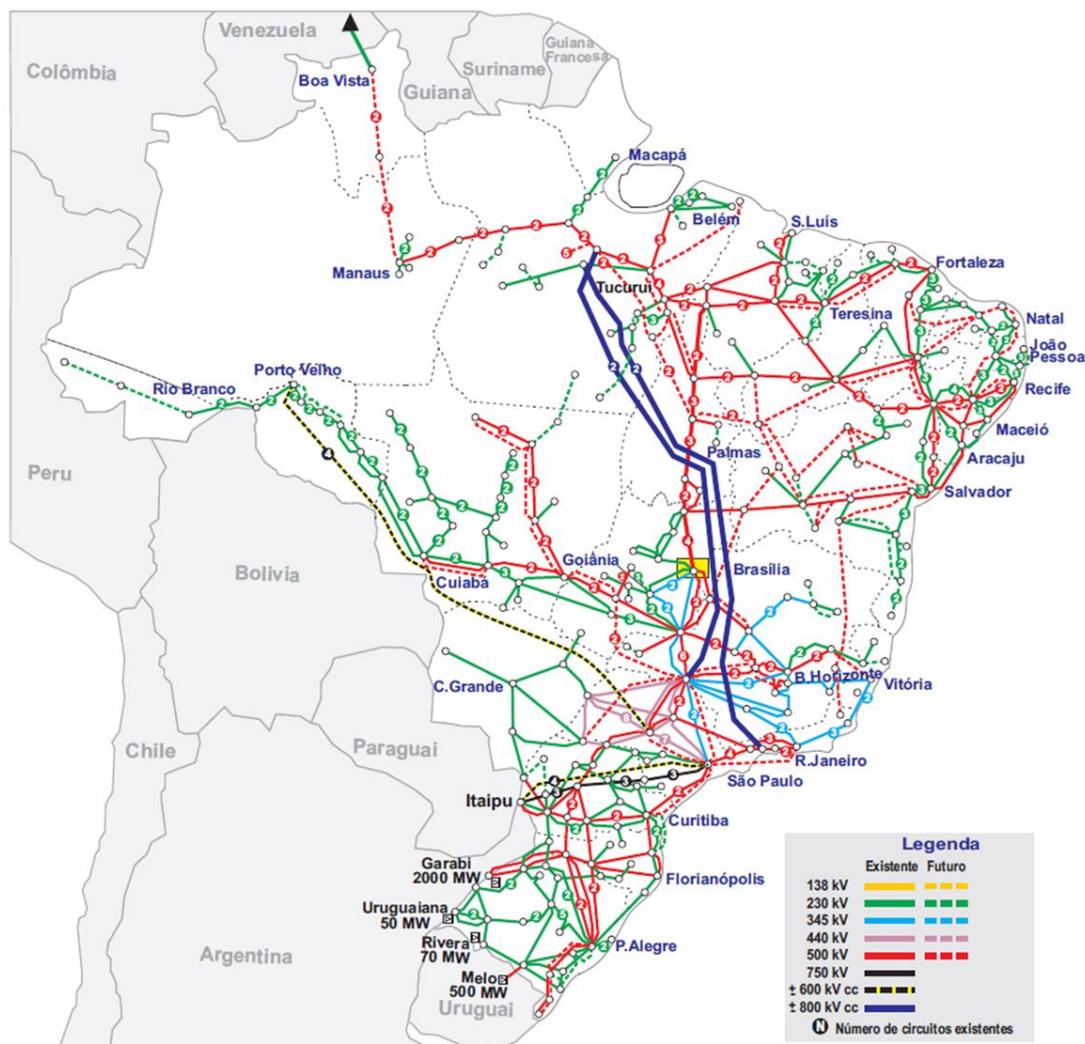


Figura 1 – Sistema de Transmissão – Horizonte 2024 (ONS, 2020).

Para efeito de comparação, a malha rodoviária federal do Brasil possuía, em 2017, uma extensão total de 75,8 mil km (MINISTÉRIO DA INFRAESTRUTURA, 2019). Ou seja, a extensão total das linhas de transmissão representava quase o dobro desse tamanho.

O sistema é o responsável pelo transporte dos grandes blocos de energia entre as centrais geradoras e os centros de consumidores. Para isso, atravessa todas as regiões do Brasil, sendo mais denso nas regiões Sul e Sudeste. Não obstante, a expansão futura do sistema deve se concentrar nas regiões Norte, devido aos novos aproveitamentos hidroelétricos, e Nordeste, devido ao crescente aproveitamento dos potenciais eólicos e fotovoltaicos (EPE, 2018).

2.1.3. A governança do sistema elétrico brasileiro

Conforme o art. 21, inciso XII, alínea b, da Constituição Federal, cabe à União explorar, diretamente ou mediante concessão, os serviços e instalações de energia elétrica. Portanto, trata-se de um serviço público e, como tal, sujeito a uma série de regramentos (BRASIL, 1988).

Como forma de disciplinar o regime das concessões de serviços públicos de energia elétrica, por meio da Lei nº 9.427/1996, foi instituída a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (BRASIL, 1996). A finalidade da autarquia é regular e fiscalizar a produção, a transmissão, a distribuição e a comercialização de energia elétrica, em conformidade com as políticas e diretrizes do governo federal.

Posteriormente, por meio da Lei nº 9.648/1998, estabeleceu-se que as atividades de coordenação e controle da operação da geração e da transmissão de energia elétrica integrantes do Sistema Interligado Nacional – SIN – seriam executadas, pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS –, com fiscalização e regulação da ANEEL (BRASIL, 1998a). O ONS pode ser entendido como um condomínio composto pelos titulares de concessão, permissão ou autorização e consumidores conectados à rede básica (ONS, 2018a).

Por fim, a Lei nº 10.847/2004 criou a Empresa de Pesquisa Energética – EPE, que tem por finalidade prestar serviços na área de estudos e pesquisas destinadas a subsidiar o planejamento do setor energético, tais como energia elétrica (BRASIL, 2004). A EPE é uma empresa pública vinculada à União e não está sujeita à regulação da ANEEL.

Portanto, as atividades de planejamento da expansão do setor elétrico são desenvolvidas diretamente pela União, com o auxílio da EPE, empresa pública criada para esse fim. A operação do sistema elétrico é realizada pelo ONS e a regulação do setor fica a cargo da ANEEL.

2.1.4. A expansão do sistema de transmissão

A expansão da Rede Básica do SIN envolve diferentes atores do setor elétrico e segue um rito ordinário que pode ser resumido pela Figura 2. Após a identificação da necessidade de um empreendimento de transmissão por meio de estudos técnicos, é realizada uma etapa de consolidação e programação de novas outorgas, observando os preceitos técnicos e de modicidade tarifária. Definidos os empreendimentos prioritários, a ANEEL operacionaliza a autorização de reforço na rede existente ou a concessão de novas outorgas, observando a Lei nº 8.987/1995 (ANEEL, 2015a; BRASIL, 1995).

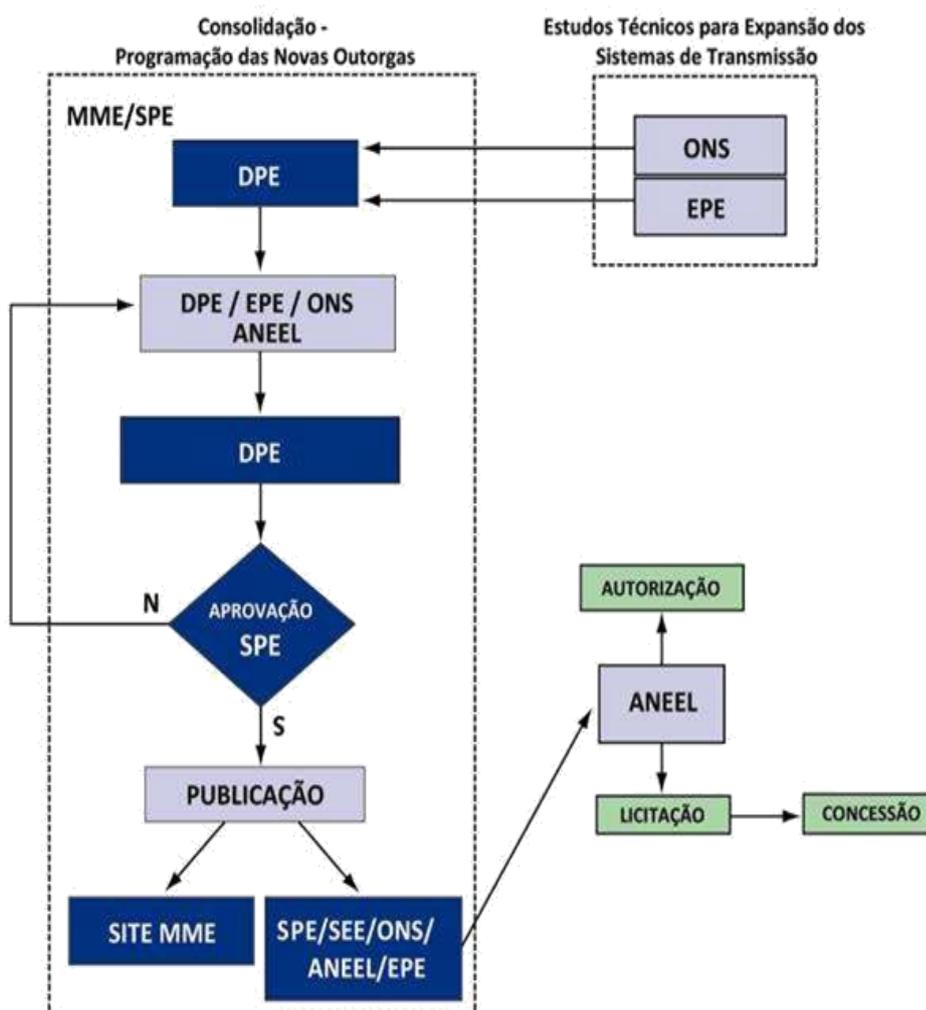


Figura 2 – Rito de expansão da Rede Básica (ANEEL, 2015a)

O Sistema Interligado Nacional – SIN – é projetado para atender o critério de confiabilidade N-1. Isso significa que, mesmo que ocorra uma contingência simples, o sistema deve ser capaz de permanecer operando sem interrupção do fornecimento de energia, perda de estabilidade, violação de padrões de grandezas elétricas (frequência, tensão) e sem atingir limites de sobrecarga de equipamentos e instalações (ONS, 2018b).

Para atender o critério de confiabilidade N-1, é comum encontrar situações em que dois pontos elétricos (subestações) sejam ligados por duas linhas de transmissão distintas. Nessa situação, os conjuntos de linhas que interligam esses pontos elétricos são denominados troncos.

2.1.5. O desempenho do sistema elétrico brasileiro

O desempenho do sistema elétrico brasileiro é monitorado pelo Sistema integrado de cadastramento de perturbações – SIPER –, de propriedade do ONS. Tal sistema faz a coleta, a classificação e a consistência dos dados de desligamentos forçados e perturbações ocorridas no SIN, para fins estatísticos e cálculo de indicadores de desempenho (ONS, 2016).

O SIPER opera desde 2013 e dispõe de bancos de dados valiosos para a análise dos desligamentos ocorridos no sistema de transmissão.

2.2. Os desligamentos provocados por incêndios florestais

Segundo Jian *et al.* (2013), os incêndios florestais sempre provocam a interrupção do funcionamento das linhas de transmissão, por isso o estudo do fenômeno é de suma importância.

Isso ocorre porque as linhas de transmissão aéreas têm seu isolamento reduzido significativamente pela presença de gases em altas temperaturas e material particulado em suspensão que, combinados, provocam o *flashover*² dos circuitos elétricos (YI-SHI YUE *et al.*, 2017).

² Ruptura da rigidez dielétrica do ar (SCHMIDT, 2019)

Pu *et al.* (2015) demonstraram que a temperatura, a condutividade da chama e as cinzas são os principais fatores que levam ao rompimento da rigidez dielétrica do ar. No mesmo trabalho, testes realizados em laboratório demonstraram que a resistividade do ar sob condições de incêndio é reduzida para cerca de 20% daquela sob ar puro.

Fonseca *et al.* (1990) destacaram que mesmo após cessado o incêndio florestal, há depósito de material particulado na superfície dos isoladores, o que pode provocar um aumento indesejado de condutividade, provocando novos desligamentos das linhas de transmissão.

No ano de 2017, 21,3% dos desligamentos em linhas de transmissão no Brasil foram provocados por incêndios florestais (ONS, 2018). Para efeito de comparação, a África do Sul, país com um sistema de transmissão de 28 mil quilômetros, teve, entre 1993 e 2009, 22% dos desligamentos forçados do seu sistema de transmissão provocados por incêndios florestais (MINNAAR; GAUNT; NICOLLS, 2012).

No período de julho a dezembro, considerando a época de seca na maior parte do Brasil, aumenta em grande medida a incidência de incêndios florestais, sendo esta a principal causa conhecida de desligamentos não programados de transmissão de energia no país. A Figura 3 demonstra a relação entre as causas de desligamentos e suas quantidades absolutas no segundo semestre de 2017.

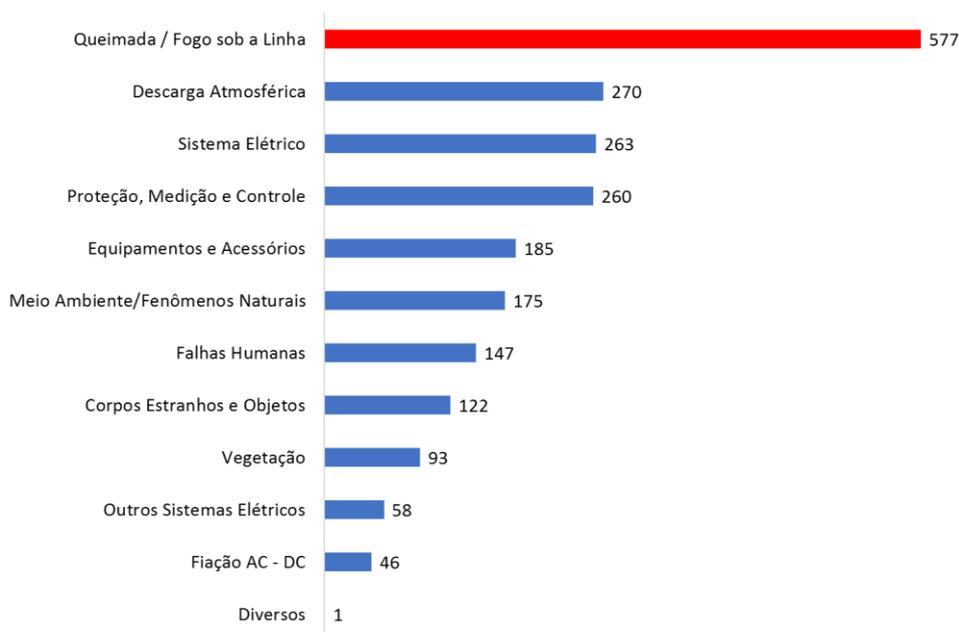


Figura 3 – Principais causas conhecidas de desligamentos forçados em linhas de transmissão, período de julho/2017 a dezembro/2017 (ONS, 2016b)

De acordo com os estudos da fiscalização da ANEEL (2018a) a maior incidência de incêndios florestais se dá nas regiões Nordeste, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil, respectivamente em áreas da Zona da Mata dedicadas ao cultivo da cana-de-açúcar e em áreas de cerrado antropizadas, conforme ilustra a Figura 4.

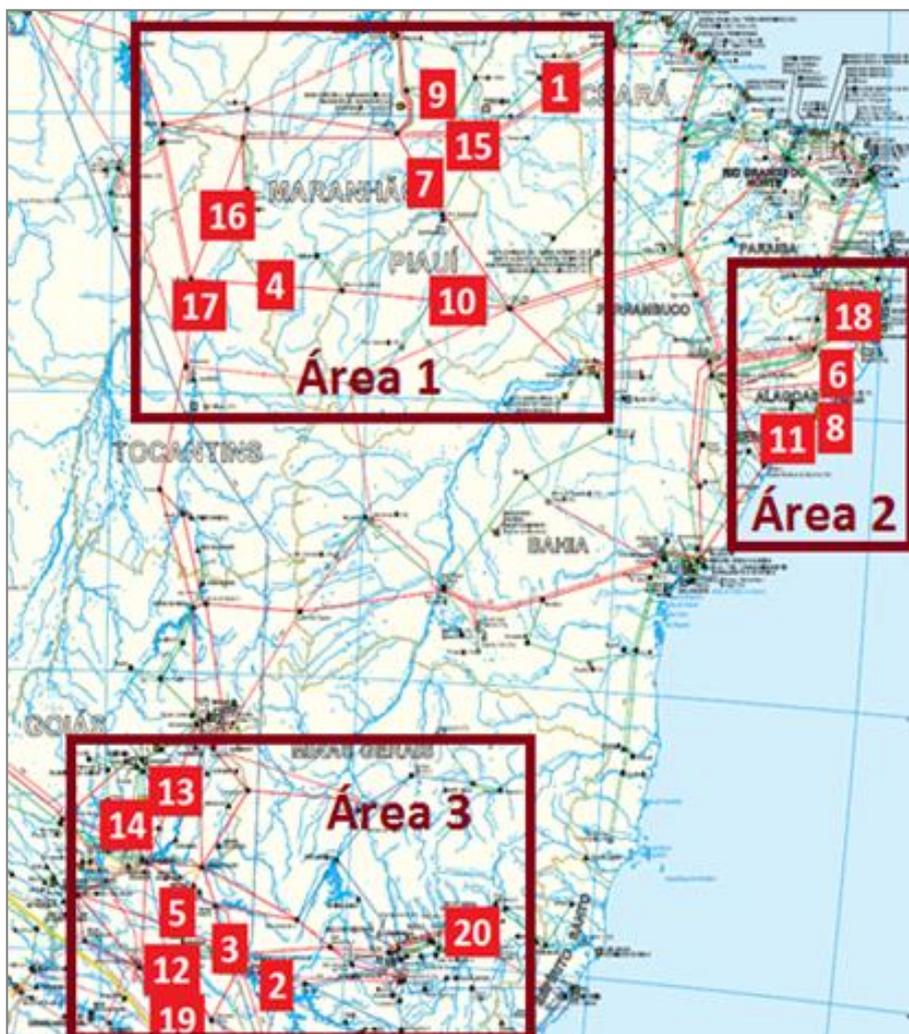


Figura 4 – Áreas com maior incidência de incêndios florestais no Brasil, período de agosto/2014 a janeiro/2016 (ANEEL, 2016b)

São nessas regiões que se encontram importantes conjuntos de linhas de transmissão – Interligações Regionais – responsáveis pela transmissão de grande parte da energia elétrica consumida no país. Na Figura 4 as linhas de transmissão são indicadas pelos números de 1 a 20 e foram agrupadas em três áreas, seguindo um critério regional. Os estudos da fiscalização concluíram que os incêndios florestais das áreas 2 e 3 estariam mais relacionados à colheita das lavouras de cana-de-açúcar (ANEEL, 2018a).

A incidência de incêndios florestais nas faixas de segurança das Interligações Regionais representa um sério risco de desligamentos forçados³ dessas linhas, situação essa que, a depender da configuração e do ponto de operação do sistema elétrico, pode provocar blecautes com sérias consequências para o sistema elétrico. Foi o que aconteceu no dia 28 de agosto de 2013, quando um incêndio florestal de grandes proporções atingiu a faixa de segurança da linha 500 kV Ribeiro Gonçalves / São João do Piauí, integrante da Interligação Norte/Nordeste, e desligou seus dois circuitos simultaneamente, causando um blecaute em toda a região Nordeste e em parte da região Norte do Brasil (GUIDO JR. *et al.*, 2018).

A Figura 5 apresenta a distribuição mensal dos desligamentos forçados das linhas de transmissão provocados por incêndios florestais registrados no período de 2013 a 2016. Observa-se que se trata de um fenômeno sazonal, havendo uma maior concentração de desligamentos forçados entre os meses de julho e dezembro de cada ano (período seco).

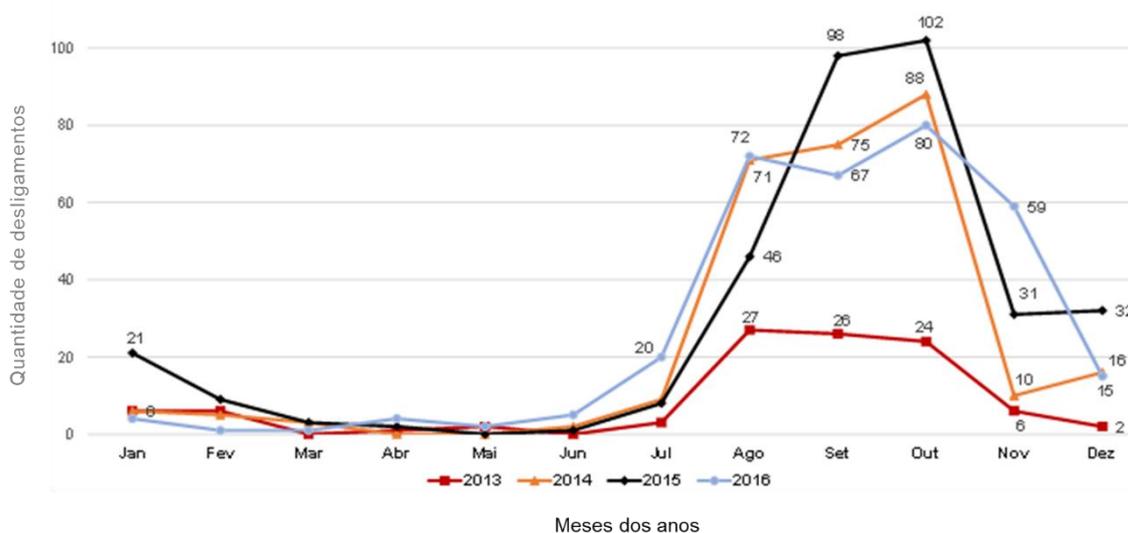


Figura 5 – Desligamentos forçados provocados por incêndios florestais em todas as linhas de transmissão da Rede Básica e da Rede Complementar no período de 2013 a 2016 (ANEEL, 2016b)

Um dos fatores que aumentam significativamente o risco de desligamentos forçados de linhas de transmissão por incêndios florestais é a existência de vegetação de médio/grande porte dentro das faixas de segurança. É obrigação das empresas transmissoras manterem as faixas de segurança em condições adequadas de conservação, observadas as restrições impostas pelos órgãos ambientais. Todavia, em função dos altos custos envolvidos para a realização dessas atividades, nem sempre as limpezas das faixas

³Desligamento de um componente de serviço em condições não programadas (ONS, 2016c)

de segurança (manutenção da vegetação baixa) são realizadas adequadamente, sendo muitas vezes verificados atrasos para a execução dos serviços, fazendo com que as faixas de segurança adentrem o período seco com grandes massas vegetais em seu interior (GUIDO JR. *et al.*, 2018).

Fonseca *et al.* (1990) relataram que, sob condição de incêndio, as distâncias de segurança do condutor para terra em linhas de transmissão de 500 kV deveriam ser ampliadas de 9,5 para 13,5 metros (aumento de 42%) e, em linhas de transmissão de 230 kV, a ampliação deveria ser de 8 para 10 metros (aumento de 25%). No caso das distâncias entre condutores de diferentes fases, a ampliação deveria ser de 9 para 11 metros (aumento de 22%) em linhas de transmissão de 500 kV e de 6,5 para 8 metros (aumento de 23%) em linhas de transmissão de 230 kV.

Para uma linha de transmissão de 70 kV, Martinez *et al.* (1991) aferiram que a rigidez dielétrica do ar é reduzida pela metade sob condições de incêndios florestais, quando comparada à condição de ar puro.

2.2.1. Os esforços da fiscalização da ANEEL para combater os desligamentos provocados por incêndios florestais

Segundo o Relatório de desligamentos de linhas de transmissão provocados por incêndios florestais (ANEEL, 2018a), a fiscalização da ANEEL tem acompanhado os registros de desligamentos das Linhas de Transmissão provocados por incêndios florestais por meio do sistema SIPER (ONS, 2016a) e recebido as informações eletrônicas de manutenções de faixas de servidão enviadas mensalmente pelos agentes de transmissão. Além disso, foi firmado um Termo de Execução Descentralizada – TED com o INPE, para o desenvolvimento de um sistema de gestão geoespacializada das limpezas de faixas. A iniciativa envolveu um investimento de R\$ 750 mil oriundo do orçamento da fiscalização. O sistema permite o acompanhamento mensal das manutenções das faixas de servidão, vão a vão, por meio de imagens de satélite de alta e média resolução, emitindo alertas automáticos.

Foram realizadas reuniões com 16 concessionárias detentoras de concessões de LTs em áreas com elevado risco de incidência de incêndios florestais nos anos de 2017 e 2018.

Além disso, foram solicitados 23 Planos de Melhorias e Providências (ANEEL, 2016b) para redução de desligamentos provocados por incêndios florestais no período.

Também foram realizadas ações fiscalizadoras de campo relacionadas a limpezas de faixas de segurança de Linhas de Transmissão nos anos de 2017 e 2018. As linhas foram selecionadas a partir dos critérios de inteligência analítica oriundos do monitoramento da fiscalização. Somente no ano de 2017, a Agência Reguladora do setor aplicou três penalidades por atrasos ou inadequações nesse tipo de manutenção (ANEEL, 2018). No ano de 2018, as inspeções envolveram cinco LTs.

2.3. A combustão da biomassa

O termo biomassa refere-se ao material biológico proveniente de seres vivos que pode ser convertido em energia. São exemplos de biomassa utilizada para a conversão de energia: milho, cana-de-açúcar, madeira, palha, casca de arroz, estrume, algas e lixo biodegradável. Apesar de o carvão e o petróleo serem igualmente provenientes de seres vivos, não são considerados biomassa, já que resultam de processos geológicos (MALICO, 2008).

A energia da biomassa é, de longe, a maior fonte renovável de energia a nível mundial, com produção de 1.319×10^6 tep, correspondente a 9,7% do suprimento energético mundial (IEA, 2017). No que tange à geração de energia elétrica, a biomassa é a segunda fonte de energia renovável mais utilizada, a seguir à hídrica. Muitas vezes utilizada sob a forma de produção combinada de eletricidade e energia térmica, a chamada cogeração (MALICO, 2008).

O homem utilizou a biomassa muito antes da descoberta do petróleo. Nas antigas civilizações, o homem utilizava a lenha como fonte energética. Trata-se de uma fonte energética renovável, pois a sua decomposição libera CO_2 na atmosfera, que, durante seu ciclo, é transformado em hidratos de carbono, por meio da fotossíntese (LOPES; BARBOZA; SILVEIRA, 2013).

Ainda hoje, em nível mundial, dois terços da biomassa são utilizados na forma de lenha para aquecimento e preparação de alimentos em países em desenvolvimento, sendo a sua utilização, em grande parte, insustentável (MALICO, 2008). No Brasil, não é

diferente, sendo a produção de lenha correspondente a 24.519×10^3 tep em 2015, o que corresponde a 8,6% da matriz energética nacional (EPE, 2016).

Nesse sentido, os combustíveis de origem vegetal têm tido um papel cada vez mais relevante. Combustíveis de origem vegetal ou biocombustíveis são derivados de biomassa renovável que podem substituir, parcial ou totalmente, combustíveis derivados de petróleo e gás natural em motores à combustão ou em outro tipo de geração de energia (VALE, 2017).

Devido às significativas demandas, nacional e mundial, por biocombustíveis líquidos, a energia de biomassa – massa biológica vegetal e animal – tem evoluído nos últimos 30 anos. Ao contrário do que se supõe, no Brasil, as produções do etanol e do biodiesel não competem com a produção de alimentos. O etanol brasileiro provém da cana-de-açúcar e o biodiesel é oriundo, basicamente, da soja, da mamona, do girassol e do dendê. O território brasileiro tem 851 milhões de hectares. Desses, 463 milhões de hectares são áreas da Floresta Amazônica, da Mata Atlântica, do Pantanal. Outros 388 milhões de hectares são áreas tornadas antrópicas e, dessas, 282 milhões são ocupados com agricultura. O cultivo de cana-de-açúcar equivale a 2,3% do território utilizado para agricultura (DURÃES; MACHADO, 2008).

São consideradas vantagens da biomassa: o baixo custo de aquisição, a não emissão de dióxido de enxofre, a menor agressividade das cinzas em relação ao meio ambiente que as provenientes de combustíveis fósseis, a menor corrosão provocada em equipamentos (caldeiras, fornos), o menor risco ambiental e o fato de ser um recurso renovável. As desvantagens da biomassa são: menor poder calorífico, a maior possibilidade de geração de material particulado para a atmosfera e as dificuldades no estoque e no armazenamento de materiais (LOPES; BARBOZA; SILVEIRA, 2013).

2.3.1. Principais reações químicas

A origem da energia química contida na biomassa é o Sol, sendo a fotossíntese o processo pelo qual os seres vivos formam as moléculas orgânicas contidas na biomassa. Podemos dizer que a fotossíntese é a combinação do dióxido de carbono, CO_2 , atmosférico com água, H_2O , e energia radiante para produzir oxigênio, O_2 e carboidratos:



A eficiência da fotossíntese é apenas de cerca de 1% (MALICO, 2008).

Basicamente, existem três processos em que se transforma a biomassa em outras formas de energia, os que envolvem combustão direta, processos termoquímicos (gaseificação, pirólise, liquefação e transesterificação) e processos biológicos (biodigestores).

A combustão direta ocorre com a queima da biomassa em fornos, caldeiras ou fogões. É um processo de baixa eficiência, devido à umidade da biomassa e da baixa densidade energética. Na combustão direta, é praticamente impossível obter a queima completa, o que pode gerar grandes quantidades de emissões atmosféricas.

A biomassa tem de 5 a 60% de umidade, a qual começa a ser removida à temperatura de 100 °C, caracterizando assim a zona de secagem. Em aplicações de gaseificação, a biomassa deve ter valores entre 10 e 20%, sendo que valores em torno de 10% são preferíveis.

A pirólise é também um processo termoquímico e consiste na combustão da biomassa praticamente sem a presença de oxigênio, gerando o carvão. Esse material possui duas vezes mais densidade energética que a biomassa original. Produz alcatrão e ácido pirolenhoso como resíduos que, depois de tratamento prévio, podem ser utilizados como óleo combustível. Há outro tipo de pirólise, mais avançada, que usa temperaturas mais altas e gera como produtos um gás rico em hidrogênio e monóxido de carbono (60%) e apenas 10% de carvão sólido, o que a torna comparável à gaseificação.

Segundo o CETEC (1982), a pirólise ocorre na seguinte sequência: (i) evaporação da água: até 140 °C; (ii) formação de gases: ocorre entre 200 e 450 °C, com produção máxima entre 350 e 400 °C; (iii) formação de pirolenhoso: o pirolenhoso seria formado até cerca de 350 °C, passando por um máximo entre 280 e 300 °C; (iv) formação de alcatrão entre 300 e 450 °C; e (v) outros gases: acima de 400 °C, haveria formação de gases, principalmente o hidrogênio.

A gaseificação é um processo termoquímico que consiste na conversão do combustível sólido em gás através de reações termoquímicas para obtenção da energia. É mais eficiente que a combustão direta, por utilizar um combustível mais puro, além de

produzir emissões atmosféricas mais limpas. O gás obtido a partir desse método pode ser usado em turbinas a gás ou mesmo em motores de combustão interna.

O agente oxidante pode ser o ar, o oxigênio ou mesmo vapor. O gás produzido é um gás de baixo poder calorífico, em torno de 4-7 MJ/Nm³ (se o agente oxidante for ar) ou 10 a 18 MJ/Nm³ (se o agente oxidante for oxigênio ou vapor). Devido a esse baixo poder calorífico, o gás resultante do processo de gaseificação é denominado de gás pobre. Na sua composição, estão presentes CO, CO₂, H₂, CH₄, N₂ (se o agente oxidante for ar), entre outros elementos, e vários contaminantes, como particulados e alcatrão. O gás produzido pode ser usado para acionar um motor de combustão interna, uma turbina a gás, um forno de secagem de revestimento cerâmico, caldeiras etc. (ANDRADE, 2007).

2.3.2. As principais características físico-químicas de biomassa

Os tópicos seguintes são destinados à descrição dos conceitos de massa específica, teor de umidade, poder calorífico, densidade energética, análise elementar e análise imediata.

2.3.2.1. Massa específica

A massa específica, ou densidade da madeira, é considerada uma das propriedades mais importantes das biomassas em geral e representa um parâmetro quantitativo resultante das características anatômicas e de composição química (VALE, 2017).

A densidade de um corpo é definida pela razão entre massa e volume, representada no Sistema Internacional – SI com a unidade kg/m³.

Há ainda a grandeza densidade básica (ρ_b) que representa a relação entre a madeira seca em estufa e o seu volume obtido acima do ponto de saturação das fibras (VALE, 2017).

$$\rho_b = \frac{M_s}{V_{sat}} \quad (1)$$

Onde:

M_s : Massa da madeira seca (0% de umidade);

V_{sat} : Volume saturado.

2.3.2.2. Teor de umidade

O teor de umidade máxima é inversamente proporcional à densidade da madeira, ou seja, quanto maior a quantidade de água, menor a quantidade dos outros elementos químicos da madeira – celulose, hemicelulose e lignina (FOELKEL *et al.*, 1971 *apud* SILVEIRA, REZENDE, & VALE, 2013).

A determinação do teor de umidade e de sua variação no tronco das árvores ou das peças de madeira é de extrema importância no seu desempenho e utilização (OLIVEIRA; HELLMMEISTER; TOMAZELLO FILHO, 2005). A umidade máxima da madeira na árvore pode variar de 31 a 249% no cerne e de 40 a 213% no alburno (FOREST PRODUCTS LABORATORY - USDA, 2010).

O teor de umidade da madeira é definido como a razão entre o peso da água contida no seu interior e o seu peso completamente seco ou úmido (MORESCHI, 2005) *apud* (VALE, 2017). A grandeza pode ser calculada em bases seca e úmida conforme as equações a seguir (VALE, 2017):

$$TU_{seca} = \left(\frac{M_u - M_s}{M_s} \right) \times 100 (\%) \quad (2)$$

$$TU_{úmida} = \left(\frac{M_u - M_s}{M_u} \right) \times 100 (\%) \quad (3)$$

Onde:

TU: Teor de umidade;

M_u: Massa da madeira úmida;

M_s: Massa da madeira seca.

A madeira recém-abatida contém água nos espaços celulares e intercelulares (água livre ou de capilaridade), água impregnada nas paredes celulares (água de impregnação) e água que participa da sua constituição química, denominada água de adsorção (BOM, 2011).

Quando exposta ao meio ambiente, inicialmente evapora-se a água localizada nos vasos, nos canais e no lúmen das células. Permanece na madeira toda a água localizada no interior das paredes celulares, e a umidade correspondente a esse estado é denominada ponto de saturação das fibras (PSF). O teor de umidade no PSF é de 28%, na média, para todas as madeiras. Por outro lado, quando a madeira, previamente seca a 0% de umidade, é exposta ao meio ambiente, ela adsorve a água que está dispersa no ar em forma de vapor. A água assim adsorvida corresponde à água higroscópica ou de adesão e o teor final de umidade alcançado pela madeira é denominado umidade de equilíbrio com o ambiente (UE), o qual é função da temperatura e da umidade relativa do ar (JANKOWSKY, 1990).

2.3.2.3. Poder Calorífico

Segundo a Lei de Hess, o poder calorífico de um combustível orgânico corresponde ao balanço entre a energia absorvida para quebra de ligações do combustível e a energia liberada na formação de novas ligações químicas. Não é trivial medir a diferença entre a energia absorvida e liberada durante cada quebra e formação de ligações. Assim, na prática, mede-se a energia que é liberada para o sistema de forma indireta, através da variação da temperatura da água que envolve o corpo de prova analisado.

Quando há presença de água na madeira em fase líquida, a combustão efetua-se em volume constante e há recuperação da água condensada. O poder calorífico é classificado como Poder Calorífico Superior (PCS), dado pela relação (VALE, 2017):

$$PCS = \frac{W_w \times (t_1 - t_0) - (Q_A + Q_F)}{m} \quad (4)$$

Onde:

W_w : Equivalente água do calorímetro (cal/°C);

t_0 : temperatura inicial da água contida na bomba calorimétrica (°C);

t_1 : temperatura final da água contida na bomba calorimétrica (°C);

Q_A e Q_F : quantidades de calor liberadas na formação do HNO_3 e o calor liberado pela fusão do filamento metálico para ignição da amostra.

O Poder Calorífico Inferior (PCI) representa o Poder Calorífico Superior (PCS) descontado da quantidade de calor necessária para evaporar toda a água de constituição presente na madeira e, portanto, é função do PCS, conforme a Equação (5), enquanto o Poder Calorífico Útil (PCU) é calculado matematicamente a partir do PCI e do teor de umidade (BRITO, 1993), conforme a Equação (6).

$$PCI = PCS - 600 \times \frac{9H}{100} \quad (5)$$

$$PCU = PCI (100 - U) - 600 \times U \quad (6)$$

Onde:

H : teor de hidrogênio;

U : teor de umidade.

O Poder Calorífico Útil (PCU) é inversamente proporcional à umidade da madeira. Isso significa que quanto maior a umidade da madeira, menor será a energia aproveitada durante a queima (LIMA, 2010).

2.3.2.4. Densidade energética

A densidade energética da madeira é obtida pelo produto entre o poder calorífico e a densidade da madeira e tem unidade kJ/m^3 . É uma propriedade que engloba as características químicas e físicas da madeira para produção de energia na forma de calor. Como a densidade energética depende das densidades, pode-se concluir que essa grandeza varia com a umidade (BRITO, 1993). O cálculo pode ser feito pela Equação (7) (VALE, 2017).

$$DE = PC \times \rho \quad (7)$$

Onde:

DE : Densidade Energética (kcal/m^3);

PC : representa o PCS, PCI ou PCU dependendo do teor de umidade para o qual se deseja obter a Densidade Energética (kcal/kg);

ρ : representa a densidade da madeira a um dado teor de umidade (kg/m^3).

2.3.2.5. Análise elementar

A análise elementar tem por objetivo descobrir quais são os elementos que compõem uma amostra (qualitativa) e em qual proporção eles aparecem (quantitativa). No caso dos combustíveis, o interesse é conhecer as concentrações de carbono, hidrogênio, enxofre, oxigênio e nitrogênio (VALE, 2017).

Existem diferentes tipos de analisadores para se efetuar a análise imediata. Em uma análise elementar, efetua-se a combustão completa da amostra para determinação de CO_2 e H_2O . Essa determinação é feita a partir da reação do vapor produzido com cloreto de cálcio, e hidróxido de hidrogênio, por exemplo (VALE, 2017).

Carbono e hidrogênio sob a forma de CO_2 e H_2O , respectivamente, também podem ser calculados utilizando ondas de infravermelho, e o nitrogênio sob a forma de N_2 por meio de condutividade térmica (ABREU *et al.*, 2009).

2.3.2.6. Análise imediata

A maioria dos materiais encontrados na natureza não é uma substância pura, ou seja, não é constituída de um único tipo de partículas ou moléculas; mas, na verdade, trata-se de misturas compostas de duas ou mais substâncias diferentes. A separação dos componentes dessas misturas ou o fracionamento delas são importantes para vários aspectos de nossa vida (FOGAÇA, 2017)

Denomina-se análise imediata o processo de separação de misturas. No caso da madeira, nosso objetivo é conhecer o percentual em massa de carbono fixo, voláteis, cinzas e umidade (VALE, 2017). A análise imediata para madeiras e carvão é feita conforme a NBR 8112 (ABNT, 1986) que, embora revogada, permanece como referência para o tema.

Tradicionalmente, o enxofre e as cinzas são considerados as principais impurezas dos combustíveis (QUIRINO *et al.*, 2005)

Para determinação do teor de cinzas (Cz), utiliza-se a expressão a seguir:

$$Cz = \left(\frac{m_1 - m_0}{m} \right) \times 100 \quad (8)$$

Onde:

Cz : teor de cinzas (%);

m_0 : massa do cadinho (g);

m_1 : massa do cadinho acrescido do resíduo (g);

m : massa da amostra (g).

A determinação do teor de materiais voláteis (MV) é feita conforme a expressão a seguir:

$$MV = \left(\frac{m_2 - m_3}{m} \right) \times 100 \quad (9)$$

Onde:

MV : teor de materiais voláteis em %;

m_2 : massa inicial do cadinho + amostra (g);

m_3 : massa final do cadinho + amostra (g);

m : massa da amostra (g).

O teor de carbono fixo (CF) é determinado por diferença, conforme a expressão:

$$CF = 100 - (Cz + MV) \quad (10)$$

2.4. O potencial de incêndios florestais no bioma cerrado

O fogo é uma das principais características do bioma cerrado, sendo usado como uma ferramenta de gestão durante a estação seca. Conseqüentemente, isso induziu uma longa história de estudos de incêndios florestais na região (MISTRY, 1998).

A frequente ocorrência de incêndios florestais nos cerrados é um dos seus aspectos mais característicos (COUTINHO, 1977). Os incêndios florestais naturais provocados por raios nesse ecossistema, apesar de pouco estudados, são relativamente frequentes, ocorrendo principalmente na transição seca-chuva (FIEDLER *et al.*, 2004). Apesar da alta frequência desses incêndios florestais, eles geralmente não atingem grandes áreas, uma vez que a chuva posterior impede o desenvolvimento de incêndios de maior magnitude.

O cerrado está adaptado a fenômenos de incêndios florestais periódicos, mas, com a chegada dos primeiros humanos (comunidades indígenas), o regime natural de queima foi alterado e, posteriormente, intensificado pelos ciclos de agricultura e pecuária intensivos (FERREIRA *et al.*, 2013). No cerrado, regimes de fogo exercem considerável controle sobre a proporção de plantas lenhosas e herbáceas, tendendo a favorecer as plantas herbáceas à custa de plantas lenhosas. (LOPES; VALE; SCHIAVINI, 2009; NARDOTO *et al.*, 2006)

Segundo Fiedler *et al.* (2004), o fogo colocado, visando a renovação de pastagens e à limpeza de áreas, é em geral realizado sem a mínima preocupação com a segurança, tanto na área a ser queimada quanto no entorno. Nesse caso, devem ser tomados alguns cuidados, como a construção de aceiros, a execução de queima contra o vento e a presença de uma equipe treinada em combate ao fogo em caso de perda do controle da situação.

França (2001) desenvolveu metodologia utilizando dados de sensoriamento remoto e estimou em cerca de 429.000 km² a área de incêndio florestal (entre 404.000 km² e 455.000 km² com intervalo de confiança a 95%) no período de 1º/maio/98 a 30/abril/99, correspondendo a 19% (18 a 20%) da área contínua do cerrado brasileiro. Os dados mostraram que os incêndios florestais de pequeno porte, menores que 0,5 km², embora muito numerosos (53% do total), respondem por cerca de 2% da área de incêndio florestal. Por outro lado, os incêndios florestais de grande porte, maiores que 10 km², são poucos (8%), mas responsáveis por cerca de 74% da área de incêndio florestal no Cerrado.

2.5. As medidas mitigadoras para a ocorrência de incêndios florestais em linhas de transmissão

A seguir, discorreremos sobre as medidas preventivas e corretivas para a ocorrência de incêndios florestais em linhas de transmissão. Quando falamos de medidas corretivas, podemos destacar as limpezas de faixas e a utilização de aceiros. Quando se trata de combate ao fogo, destacaremos as tecnologias existentes para tal. Há ainda as medidas de convivência com o fenômeno, que também descreveremos.

2.5.1. Limpeza de faixas de segurança

Dentre as causas mais frequentes das interrupções no fornecimento de energia elétrica, destaca-se a ocorrência de fogo na vegetação localizada nas áreas das faixas de segurança das linhas de transmissão. Nessas situações, os desligamentos automáticos das linhas são motivados pela atuação dos sistemas de proteção no instante em que a fumaça do incêndio florestal atinge os cabos condutores, provocando curtos-circuitos. A Figura 6 ilustra o exato momento do desligamento de uma linha de transmissão devido à ocorrência de um curto-circuito provocado por um incêndio florestal na faixa de segurança.



Figura 6 – Dinâmica da ocorrência de um desligamento forçado em dois momentos: (a) incêndio florestal ocorrendo na vegetação seca localizada na faixa de segurança e coluna de fumaça e fuligem sendo deslocada pelo vento em direção aos cabos condutores; (b) curto-circuito na linha de transmissão devido à presença da fumaça e fuligem (ANEEL, 2016b)

A manutenção de ativos do sistema de transmissão é regida pela Resolução Normativa nº 669 (ANEEL, 2015), que estabelece os Requisitos Mínimos de Manutenção e o monitoramento da manutenção de instalações de transmissão de Rede Básica. A atividade mínima de manutenção para as linhas de transmissão é a inspeção de rotina, que deve ser realizada, no mínimo, a cada doze meses.

Nas inspeções de rotina, devem ser verificados: o estado geral da linha de transmissão, a situação dos estais, a integridade dos cabos condutores e para-raios, a estabilidade das estruturas, a integridade das cadeias de isoladores, a situação dos acessos às estruturas, a proximidade da vegetação aos cabos e os casos de invasão de faixa de servidão. As concessionárias devem manter cadastro atualizado das linhas de transmissão, contendo as restrições ambientais e as periodicidades de podas e roçadas recomendadas internamente, bem como as dificuldades legais de realização de limpeza de faixa.

A limpeza de faixas de linhas de transmissão é uma atividade de manutenção de alto custo (GUIDO JR. *et al.*, 2018). Essa é uma atividade considerada de manutenção preventiva que é realizada seguindo os preceitos da Licença de Operação (LO) e da Autorização de Supressão Vegetal (ASV), associadas à instalação, e a norma NBR 5422 (ABNT, 1985). Contudo, destaca-se que essa norma foi elaborada objetivando evitar os desligamentos das linhas provocados por aproximações de vegetação, sem levar em conta os riscos de desligamentos provocados por incêndios florestais (ANEEL, 2018a).

O resíduo produzido nessa atividade pode ser aproveitado de forma mais eficiente, por exemplo, com o uso de técnicas de adensamento de biomassa, mitigando os custos associados à manutenção. Por outro lado, a simples realização da manutenção não garante o bom desempenho da linha quanto aos desligamentos provocados por incêndios florestais. Há outros fatores que podem impactar esse desempenho e que precisam ser estudados.

As limpezas de faixas de linhas de transmissão podem demandar maior ou menor área desmatada, dependendo das condições do licenciamento. As características construtivas da instalação podem influenciar esse desempenho. Outros fatores de relevância são as condições climáticas, o nível de antropização, o bioma, entre outros.

A limpeza de faixa refere-se à retirada de vegetação, à limpeza de faixa da linha e ao corte seletivo da vegetação. O volume de trabalho varia de acordo com a região geográfica e é proporcional à área da faixa a ser limpa. No Brasil, essa manutenção tem um custo estimado de R\$ 2,5 milhões para cada 100 km (RIBEIRO, 2014). Destaca-se que essa é uma atividade anual e, por isso, tem grande impacto nos custos globais da concessão.

Para mitigar os custos de manutenção associados à limpeza de faixas, uma das alternativas é o aproveitamento de resíduos. O material vegetal extraído dessas limpezas

de faixa pode ter característica arbustiva (BASTOS *et al.*, 2018; MALINOWSKI *et al.*, 2009). Para esse tipo de material, uma das formas de aproveitamento seria o adensamento de biomassa.

2.5.1.1. Adensamento de biomassa

Descartes de madeira compactados são combustíveis sólidos de excelente qualidade. Em alguns casos, apresentam densidade, poder calorífico e resistência mecânica superiores aos da lenha, além de possuírem baixa umidade. É um produto que pode ser usado como combustível em fornalhas, fornos e caldeiras das indústrias tanto para geração de calor quanto como potência. O briquete, por ter rápida resposta de temperatura e uniformidade de combustão, é usado em panificadoras, pizzarias, olarias, cerâmicas, churrasqueiras ou residências para aquecimento domiciliar (GENTIL, 2008).

Não existem dados precisos da importância social e ambiental do briquete de madeira para a sociedade, mas descartes incômodos e poluentes de serrarias e indústrias madeireiras estão sendo transformados em produto ecológico e de elevado valor, como o briquete (GENTIL, 2008).

De uma forma geral, o processo industrial do briquete de madeira consiste na cominuição dos descartes madeireiros; uso ou produção de serragem; peneiramento; exaustão para resfriamento da matéria-prima; secagem da serragem; briquetagem e resfriamento do briquete. Conforme o país e seu clima, tipo de matéria-prima disponível, tecnologia ou qualificação da mão de obra, tipo de máquinas de adensamento e demandas do mercado, os processos industriais diferem, atendendo à economia e à cultura de cada país. O processo ponta a ponta é caracterizado pela entrada da serragem e pela saída do briquete pronto, esfriado, embalado, pronto para entrega ao cliente (GENTIL, 2008).

2.5.2. Aceiros

Os aceiros são barreiras à propagação do fogo que permitem o controle da queima em uma determinada área (RIBEIRO, 2004).

O Decreto nº 2.661, de 8 de julho de 1998, regulamenta as normas de precaução relativas ao emprego do fogo em práticas agropastoris e florestais. O dispositivo prevê a utilização de aceiros de no mínimo três metros de largura para queima controlada, desde que distantes quinze metros dos limites das faixas de segurança das linhas de transmissão e distribuição de energia elétrica (BRASIL, 1998b).

Quando utilizadas plantas como barreiras à propagação do fogo, os aceiros são denominados verdes.

2.5.2.1. Aceiros verdes

Petriccione (2005) estudou a inflamabilidade de diferentes espécies de plantas, a fim de classificar as espécies presentes no território mediterrâneo de acordo com suas características. O estudo utilizou quatro parâmetros de inflamabilidade: média do tempo de ignição, duração média da combustão, ignição e intensidade da chama. Os resultados mostraram que geralmente a inflamabilidade está relacionada com o tipo de planta, sendo menor em arbustos e geralmente maior em árvores de folhas largas.

Batista e Biondi (2009) consideram características importantes na escolha de espécies para aceiros verdes: plantas com potencial produtivo, tolerantes a seca e sem desfolha no inverno. Ribeiro *et al.* (2007) *apud* Batista e Biondi (2009) testaram muitas espécies para servir como aceiros verdes sob uma linha de transmissão: hibisco, ligustrinho, sansão-do-campo, pingo-de-ouro e amendoim forrageiro. Constataram que apenas o sansão-do-campo e o hibisco foram as espécies que deram melhores resultados com relação à sua eficiência para barrar o fogo. Tanto um quanto outro apresentaram bom desenvolvimento, mesmo em situação de clima drástico, com longos períodos sem chuva.

Batista e Biondi (2009) estudaram a *Ligustrum lucidum* Aiton (Oleaceae), uma das espécies mais plantadas em arborização urbana e em rodovias nas regiões Sul e Sudeste do Brasil. O objetivo dessa pesquisa foi avaliar as características de inflamabilidade de *Ligustrum lucidum* para indicação de seu uso em cortinas de segurança na interface urbana/florestal e nas margens de rodovias com grande risco de incêndios florestais. A avaliação da inflamabilidade foi feita por meio de observações das variáveis velocidade de propagação e intensidade do fogo em queimas experimentais de parcelas de 1 m² constituídas de folhas e ramos de *Ligustrum lucidum* em dois níveis de umidade: umidade

do material recém-coletado da árvore e material seco em estufa a 75 °C por 48 horas. Os resultados indicam que a inflamabilidade da espécie estudada é baixa, mesmo em condições reduzidas de umidade.

Para González-Cabán (2013), o propósito das barreiras verdes, também conhecidas como aceiros verdes, é reduzir a intensidade do fogo, principalmente impedindo-o de se espalhar para as copas das árvores, o que facilita o seu controle e sua supressão. Uma grande dificuldade na implementação de barreiras verdes é identificar espécie adequada para formar essas estruturas. No estudo realizado, foi avaliada a inflamabilidade de algumas espécies arbóreas e arbustivas utilizadas na silvicultura urbana para uso em barreiras verdes na interface rural-urbana de cidades do sul do Brasil. Os resultados dos testes mostraram que a espécie *J. mesnyi* é extremamente inflamável (FV = 5), *M. grandiflora* e *C. sylvestris* são altamente inflamáveis (FV = 4), e as espécies *V. odoratissimum* e *M. champaca* são, respectivamente, moderadamente inflamável (FV = 3) e de baixa inflamabilidade.

Souza (2015) percorreu áreas de incêndios florestais, identificando espécimes relativamente preservados adjacentes à vegetação consumida pelas chamas. Depois, coletou amostras de folhas dessas espécies, *Vochysia thyrsoidea*, *Palicourea rigida* e *Lavoisiera bergii* verdes, e as analisou em laboratório para caracterização, análise imediata, combustão e perda de massa e Análise Termo-Gravimétrica. Concluiu que *V. thyrsoidea*, *P. rigida* e *L. bergii* apresentaram bons índices que as habilitam como espécies de baixa inflamabilidade, com destaque para *P. rigida*, que apresentou elevado teor de umidade (173%), maior espessura (5,6 mm), teor de voláteis de 76%, tempo para início das chamas de 143s, duração das chamas de 72s e temperatura onset de 245 °C.

Kovalsyki et al. (2017) avaliaram a inflamabilidade de *Psidium cattleianum* Sabine., *Ligustrum lucidum* W. T. Aiton., *Schinus terebinthifolius* Raddi. e *Bougainvillea glabra* Choisy., para potencial uso em cortinas de segurança. O *Pinus taeda* L. foi utilizado como referência. Foram analisados: frequência de ignição, tempo para ignição, duração da combustão, índice de combustão, além da determinação do valor de inflamabilidade. *P. taeda* apresentou uma intensidade de combustão muito alta e foi classificado como espécie inflamável. As demais espécies foram consideradas fracamente inflamáveis, sendo que *S. terebinthifolius* e *B. glabra* indicaram uma intensidade de combustão baixa, *L. lucidum*,

média, e *P. cattleianum*, alta. Conclui-se que as espécies avaliadas apresentam potencial para uso em cortina de segurança na prevenção de incêndios florestais.

2.5.2.2. Aceiros negros

Os aceiros negros são faixas de terreno, com largura variável, em que a vegetação é usada para formar uma barreira à propagação do fogo no caso de ocorrência de incêndios florestais (MOTTA, 2019).



Figura 7 – Execução do aceiro negro entre as bacias dos rios Campo Belo e Aiuruoca (MOTTA, 2019).

Devido aos problemas causados pela degradação do ar e às suas consequências para as comunidades vizinhas, os aceiros negros são considerados um último recurso, quando não há possibilidade de usar outras técnicas de retirada parcial da vegetação. Além disso, os aceiros negros só podem ser feitos dentro dos limites da propriedade e com a autorização do órgão executivo licenciador (LACERDA, 2017).

2.5.3. O combate ao fogo próximo às linhas de transmissão

O combate aos incêndios florestais próximos às linhas de transmissão é dificultado muitas vezes pela escassez de água no local e pelo difícil acesso. Além disso, o contato da água com os circuitos energizados pode levar a acidentes.

Para mitigar esses fatores, Lu *et al.* (2016) desenvolveram um sistema de combate a incêndios para aplicações próximas às linhas de transmissão. Foi desenvolvido um conjunto abrangente de equipamentos de combate a incêndios que consistia em um supressor altamente eficaz, um agente extintor com propriedades para evitar reignição do fogo e uma plataforma de combate a incêndio móvel a longas distâncias e recursos de alto bombeamento. No seu estudo, foi demonstrado que o agente extintor melhorou a eficácia da supressão de incêndios e reduziu significativamente o consumo de água. Como o fluxo hidráulico foi reduzido, a pressão hidráulica foi aumentada. Desta forma, o sistema pôde produzir uma pressão hidráulica superior a 120 bar, elevando o agente extintor a alturas superiores a 500 m. Os resultados de experimentos de campo demonstraram que a abordagem proposta é capaz de controlar os incêndios florestais a longas distâncias de forma eficaz.

Outro sistema de combate aos incêndios florestais próximos às linhas de transmissão utiliza névoa à base de água. A névoa pode ser um método altamente eficiente para suprimir incêndios florestais perto de linhas de transmissão elétricas e garante a segurança da rede. O estudo demonstra a segurança elétrica durante o processo de extinção do fogo utilizando névoa de água, incluindo o risco de desligamento das linhas de transmissão e o risco de choque para os usuários. No trabalho, foi analisada a influência da distância da abertura e da condutividade elétrica da solução de água nas características de isolamento de névoa de água. Também foi analisada a névoa de água com aditivos multicomponentes. Demonstrou-se a eficácia desse método com base na redução de desligamentos de linhas de transmissão (LU *et al.*, 2016a).

No Brasil, desde 1989, existe o Centro Nacional de Prevenção e Combate aos Incêndios Florestais (Prevfogo). Trata-se de um Centro Especializado, dentro da estrutura do Ibama, responsável pela política de prevenção e combate aos incêndios florestais em todo o território nacional, incluindo atividades relacionadas com campanhas educativas, treinamento e capacitação de produtores rurais e brigadistas, monitoramento e pesquisa. O

sistema é composto de diversas unidades espalhadas em todo o território nacional (IBAMA, 2018). No entanto, o foco do Prevfogo é a preservação ambiental, e não os incêndios florestais próximos às linhas de transmissão.

As concessionárias de transmissão de energia têm que atuar por conta própria no combate a incêndios florestais. As formas de fazer isso são diversas (PESSIN *et al.*, 2007):

- i. Método direto: usado quando a intensidade do fogo permite uma aproximação suficiente da brigada à linha de fogo. São usadas as seguintes técnicas e materiais: água (bombas costais, baldes ou motobombas); terra (pás); ou batidas (abafadores);
- ii. Método paralelo ou intermediário: usado quando não é possível o método direto e a intensidade do fogo não é muito grande. Consiste em limpar, com ferramentas manuais, uma estreita faixa, próxima ao fogo, para deter o seu avanço e possibilitar o ataque direto;
- iii. Método indireto: usado em incêndios de intensidade muito grande, consiste em abrir aceiros com equipamento pesado (*e.g.* trator, motoniveladora), utilizando ainda um contrafogo, para ampliar a faixa limpa e deter o fogo, antes que chegue ao aceiro;
- iv. Método aéreo: usado nos incêndios de copa, de grande intensidade e área e em locais de difícil acesso às brigadas de incêndio; são usados aviões e helicópteros, especialmente construídos ou adaptados para o combate ao incêndio.

Em todos os casos, a empresa deve dispor de estrutura própria ou contratar serviço particular terceirizado.

2.5.4. Diminuição da tensão de operação das linhas

A presença de fogo sob as linhas provoca a diminuição da rigidez dielétrica do ar, devido à presença de material particulado, entre outros fatores (FONSECA *et al.*, 1990; PU *et al.*, 2015; ROBLEDO-MARTINEZ; GUZMAN; HERNANDEZ, 1991). Para a manutenção do isolamento elétrico entre os cabos energizados e entre a terra, uma das alternativas possíveis é a diminuição da tensão de operação. Tensões menores requerem

menores distâncias de segurança. Por outro lado, a redução da tensão de operação diminui o fluxo de potência na linha.

Yi-Shi Yue et al. (2017) demonstraram que a operação da linha de transmissão $\pm 500\text{kV}$ DC Jiangcheng (China) teve seu desempenho quanto a desligamentos por incêndios florestais muito melhorado quando a tensão de operação foi reduzida em 50%.

2.6. O impacto da carga de incêndio no desempenho de linhas de transmissão

Ainda que dentro de um mesmo bioma, há diferenças significativas de desempenho entre as linhas de transmissão do sistema elétrico brasileiro. Essa diferença de desempenho pode estar associada à carga de incêndio específica das linhas de transmissão. A NBR 14432 (ABNT, 2000) não estabelece valores de referência para carga de incêndio em ambientes florestais, fator que potencializa a relevância deste trabalho. A carga de incêndio pode ser definida como a quantidade de energia existente e que pode ser liberada pela combustão completa de todos os materiais combustíveis em uma determinada área.

O conceito de carga de incêndio já foi utilizado para modelagem de risco de incêndios florestais em zonas afetadas por furacões no México (RODRÍGUEZ-TREJO *et al.*, 2011); para estudos de previsão da intensidade de incêndios florestais na Coreia do Sul (PARK; LEE; OHGA, 2018); para otimização de recursos no combate a incêndios florestais na Califórnia (LEE *et al.*, 2013) e também serviu de parâmetro para calibração de um sistema de classificação de severidade de incêndio utilizando imagens de satélite em operação no oeste da Malásia e Indonésia (DYMOND *et al.*, 2005).

Os parâmetros necessários para cálculo da carga de incêndio específica são o poder calorífico e a massa do material na mesma umidade, e a área considerada. Os inventários florestais fornecem a estimativa de volume verde a ser desmatado para a construção e operação das linhas de transmissão. Neste sentido, conhecendo o volume verde e a densidade básica, é possível estimar a massa seca.

O poder calorífico superior da madeira é definido como a quantidade de calor gerada pela combustão completa de uma unidade de massa incluindo o calor de vaporização da água de constituição. A densidade básica é definida pela razão entre a massa seca da madeira a 0% de umidade e seu volume obtido acima do ponto de saturação das fibras.

Com base nos estudos de inventários florestais, é possível calcular a carga de incêndio de linhas de transmissão e verificar sua influência no desempenho dessas instalações.

2.7. A qualidade das informações de localização de defeito em desligamentos de linhas de transmissão provocados por incêndios florestais

Os sistemas de transmissão são projetados para absorver contingências simples, ou seja, a perda de uma instalação ou equipamento, sem interrupção do fornecimento de energia para o consumidor final (ONS, 2018b). Para atender esse requisito, é comum encontrar situações em que dois pontos elétricos (subestações) sejam ligados por duas linhas de transmissão distintas. Nessa situação, os conjuntos de linhas que interligam esses pontos elétricos são denominados troncos. De uma forma mais abrangente, os troncos podem ser entendidos como um conjunto de linhas de transmissão dispostas em série (SANTIAGO; TAVARES, 2019) ou em paralelo.

O desempenho do sistema de transmissão brasileiro é monitorado por meio de *software* específico, de propriedade do operador de rede nacional. Tal sistema faz a coleta, a classificação e a consistência dos dados de desligamentos forçados e perturbações ocorridas, para fins estatísticos e cálculo de indicadores de desempenho (ONS, 2016).

As concessionárias de transmissão são as responsáveis por fornecer as informações de desligamentos forçados ao operador de rede. As informações devem conter descrição sucinta da perturbação, informando o equipamento desligado, o tipo de defeito, a fase envolvida, a localização do defeito, bem como a causa do desligamento (ONS, 2017b).

A passagem por terrenos acidentados e a operação sob condições climáticas adversas facilitam a ocorrência de falhas nas linhas de transmissão. Essas falhas podem causar a instabilidade do sistema de energia e levar a uma grande perda econômica. A localização e remoção rápidas de falhas nas linhas podem impedir a destruição da estabilidade do sistema de energia (HE *et al.*, 2014). Vários métodos foram propostos para localização de falhas em sistemas de energia (HENG-XU HA; BAO-HUI ZHANG; LV, 2003; IZYKOWSKI; ROSOLOWSKI; MOHAN SAHA, 2004; PEREIRA; ZANETTA, 2004; RAMAR; EISA, 2008).

Silva, Lima e Souza (2012) desenvolveram um sistema de localização de falhas nas linhas de transmissão usando redes neurais de domínio complexo. O caso teste analisou uma linha de transmissão em 400 kV, com 100 km de extensão. Foram feitas diversas simulações com variações de fatores que poderiam afetar a localização do defeito. Os resultados indicaram erros de localização que representam entre 0,55% e 6,82% do comprimento da linha, a depender do cenário. Um espectro de sinal transitório também foi utilizado para estudar a localização de defeitos em uma linha de 240 km, operando em 400 kV. A precisão da localização do defeito variou entre 0,03% e 4,21% do comprimento da linha (MAMIŞ; ARKAN; KELEŞ, 2013). Em ambos os estudos, a precisão da localização de falta decresceu com o aumento da impedância de falta.

Os defeitos provocados por incêndios florestais, tipicamente, têm impedância entre 10 e 70 Ω (SOUSA *et al.*, 2005). As ocorrências por incêndio florestal têm valores de impedância de falta normalmente mais elevados que os provocados por descargas atmosféricas e, normalmente, são sucedidos por religamento automático não satisfatório, acarretando a necessidade de religamento manual e, às vezes, a necessidade de inspeção na linha pela equipe de manutenção (CUNHA, 2010).

No Brasil, existe o Prevfogo, centro especializado, responsável pela política de prevenção e combate aos incêndios florestais (IBAMA, 2018). Para o trabalho de monitoramento, o Prevfogo atua em articulação com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, que dispõe do Programa Queimadas (INPE, 2017). Esse programa recebe recursos do Fundo Amazônia (BNDES; ME; MMA, 2020) e é o principal sistema de detecção de incêndios disponível em nível nacional.

O Programa Queimadas gera e distribui diversos produtos diariamente, como, por exemplo, coordenadas geográficas dos focos, alertas por *e-mail* de ocorrências em áreas de interesse especial, risco de fogo, estimativas de concentração de fumaça e mapeamento de áreas de incêndios florestais. Todos os dados e produtos são divulgados na internet sem custo para o usuário, cerca de três horas após sua geração.

Para a realização do trabalho, o INPE utiliza todos os satélites que possuem sensores⁴ ópticos operando na faixa termal-média de 4 μm ⁵. Atualmente, são utilizadas as imagens AVHRR/3 dos satélites polares NOAA-15, NOAA-18, NOAA-19 e METOP-B, as MODIS dos NASA TERRA e AQUA, as VIIRS do NPP-Suomi e as imagens dos satélites geoestacionários, GOES-13 e MSG-3. Cada satélite de órbita polar produz pelo menos dois conjuntos de imagens por dia, e os geoestacionários geram várias imagens por hora, sendo que, no total, o INPE processa mais de 200 imagens por dia especificamente para detectar focos de queima da vegetação.

O sistema de detecção de focos de incêndio para os satélites em órbita polar consegue captar uma frente de fogo com cerca de 30 m de extensão por 1 m de largura, ou maior. Para os geoestacionários, a frente precisa ter o dobro de tamanho para ser localizada. A resolução espacial da imagem, o "pixel", para os sensores AVHRR (satélites NOAA-18 e 19) e MODIS (satélites AQUA e TERRA) tem 1 km x 1 km. Ou seja, um incêndio florestal de algumas dezenas de m^2 será identificado como tendo pelo menos 1 km^2 (INPE, 2017).

O Programa Queimadas disponibiliza de forma gratuita as informações de focos de incêndio em todas as áreas críticas do território nacional. A Figura 8 exemplifica a área de cobertura e a detecção de focos de incêndio.

⁴ Equipamentos capazes de coletar energia proveniente de um objeto e convertê-la em um sinal passível de ser registrado.

⁵ Comprimento correspondente a onda eletromagnética que incide no sensor, compatível com o infravermelho médio.

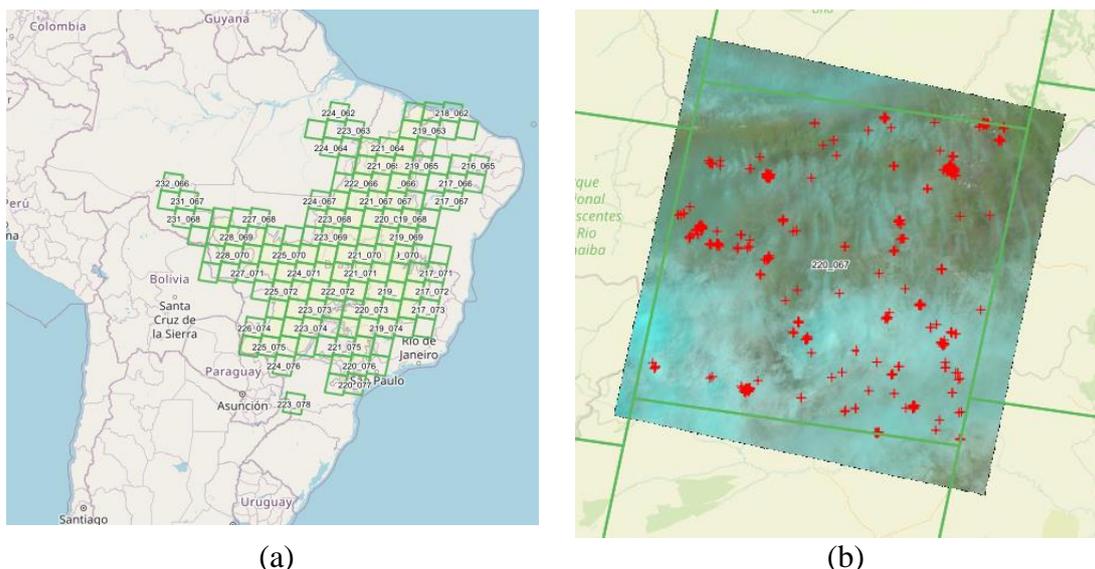


Figura 8 – Cobertura de detecção de focos de incêndio do Programa Queimadas: (a) visão geral do Brasil; e (b) detalhe da área 220_067 localizada na divisa dos estados da Bahia e Tocantins (INPE, 2020).

Na Figura 8 (a), os quadrantes destacados sobre o mapa do Brasil representam um mosaico de imagens correspondentes às áreas monitoradas. A Figura 8 (b) traz o detalhe de uma das cenas do mosaico, com destaque para os focos de incêndio. Nessa imagem, cada cruz representa um ou mais focos de incêndio detectados.

Dessa forma, as concessionárias de transmissão de energia têm à disposição diferentes ferramentas para localização de defeitos provocados por incêndios florestais: os equipamentos localizadores de falta, instalados na própria linha de transmissão; e os sensores ópticos espaciais, utilizados pelo INPE.

2.8. Características de susceptibilidade de vãos de linhas de transmissão a desligamentos provocados por incêndios florestais

Atualmente, dispomos de diversos dados sobre as linhas de transmissão. Essas informações estão disponíveis em diferentes granularidades, resoluções e periodicidades. Considerando o vão da linha de transmissão, que é a área delimitada por duas torres, e a largura da faixa de servidão, é possível obter dados relacionados às suas características construtivas, focos de incêndio geoespacializados, índice de vegetação, restrição para manutenção de limpeza de faixa, condições climáticas e características de terreno. O

conjunto desses dados pode lançar luz sobre a influência desses fatores no desempenho técnico das linhas de transmissão.

Quando submetidas aos incêndios florestais, as linhas de transmissão aéreas têm seu isolamento reduzido significativamente (ROBLEDO-MARTINEZ; GUZMAN; HERNANDEZ, 1991; YI-SHI YUE *et al.*, 2017). Nessas condições, as distâncias de segurança, do condutor para a terra e entre os condutores, podem ser decisivas para ocorrência ou não de um desligamento (FONSECA *et al.*, 1990).

Neste sentido, a altura das torres com relação ao solo e o número de isoladores utilizados são informações que podem influenciar na ocorrência de um desligamento de linha de transmissão provocado por incêndios florestais.

A ocorrência de um incêndio florestal com frente de fogo com cerca de 30 m de extensão por 1 m de largura pode ser captada por satélites polares. Os satélites geoestacionários captam frentes de fogo com o dobro do tamanho. O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE –, por meio do Programa Queimadas (INPE, 2017), disponibiliza diariamente, por exemplo, coordenadas geográficas dos focos de incêndio em todo o país, desde que tenham as proporções mínimas perceptíveis.

Os índices de vegetação gerados a partir de dados oriundos de sensores remotos constituem uma importante ferramenta para o monitoramento de alterações naturais ou antrópicas no uso e na cobertura da terra (LIMA *et al.*, 2013). O índice de vegetação mais difundido é o *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) (ZANZARINI *et al.*, 2013).

O NDVI ou Índice de Vegetação por Diferença Normalizada é calculado pela diferença da refletância entre a faixa do infravermelho próximo e do vermelho, sendo essa diferença normalizada pela soma das faixas do infravermelho próximo e do vermelho. O índice varia numa escala -1 a +1. Quanto mais próximo de 1, maior a densidade de cobertura vegetal; valores negativos representam corpos d'água (ROUSE *et al.*, 1973).

O Sistema de Gestão Geoespacializada de Transmissão – GGT (GUIDO JR. *et al.*, 2018) –, ferramenta utilizada pela fiscalização da ANEEL, utiliza o índice NDVI para monitorar a limpeza de faixa das linhas de transmissão.

Com o passar dos anos, cresceram as restrições para a limpeza de faixa de linhas de transmissão. No método tradicional de limpeza, efetua-se o corte raso da vegetação, utilizando tratores de esteiras. No método seletivo, a supressão é feita com o uso de motosserras e são retiradas apenas as árvores que poderão causar danos às instalações, tendo em vista a distância de segurança entre a copa destas e o campo elétrico formado em torno dos cabos condutores (ABREU *et al.*, 2002). Adicionalmente ao tipo de limpeza, a largura da faixa em que a limpeza pode ser realizada também é uma variável de análise importante.

As condições climáticas são fatores fundamentais para a ocorrência e a intensidade dos incêndios florestais (LEMOS; JUSTINO; ROSSONI, 2012). Tanto é assim que existem diversos índices (ANGSTROM, 1924; NUNES; SOARES; BATISTA, 2006; POTTER, 2018) que utilizam as variáveis dias sem chuva, umidade; temperatura e velocidade do vento para medição do risco de ocorrência de incêndios florestais. Os dados climáticos históricos no Brasil são disponibilizados pelo CPTEC/INPE (INPE, 2020).

Outro fator de influência para a ocorrência de incêndios florestais são as características de terreno. Neste trabalho, essas características se resumem ao tipo de bioma e o uso do solo sob os vãos de linhas analisados. No Brasil, as características de terreno podem ser obtidas por meio do sistema MapBiomas (ECO STAGE, 2019)

Com base nos dados disponíveis sobre as linhas de transmissão, é possível identificar as características de vãos que os tornam mais susceptíveis aos desligamentos provocados por incêndios florestais, utilizando técnicas de estatística descritiva (MANCUSO *et al.*, 2018).

2.9. Modelos Matemáticos

Um sistema real é extremamente complexo pelo fato de o seu comportamento ser influenciado por um número muito grande de variáveis. Muitas vezes, as tomadas de decisão demandam a experimentação prévia de um sistema real. Nesse contexto, o uso de modelos é de grande utilidade (ANDRADE, 2018).



Figura 9 – Representação simplificada do processo de modelagem (adaptado de Andrade (2018))

Um sistema real é reduzido a um subsistema com as variáveis principais e esse subsistema é representado por um modelo. Dessa forma, os modelos representam uma simplificação da realidade, mas também possibilitam as tomadas de decisão de forma estruturada (ANDRADE, 2018).

Segundo Biscuola (2011) os modelos matemáticos podem ser divididos em duas grandes categorias: modelos determinísticos e modelos estocásticos ou probabilísticos. Nos modelos determinísticos, as variáveis envolvidas são conhecidas previamente e há baixíssima aleatoriedade. Nos modelos estocásticos ou probabilísticos, as variáveis são aleatórias e a incerteza representa um papel relevante.

Os incêndios florestais e suas possíveis consequências no desempenho de linhas de transmissão são influenciados por múltiplas variáveis cujos efeitos não são totalmente compreendidos. Portanto, enquadram-se na categoria dos modelos estocásticos ou probabilísticos.

A Matemática oferece um rol de possibilidades metodológicas para a construção de modelos estocásticos ou probabilísticos. Contudo, a técnica adequada dependerá das características das variáveis a serem modeladas.

Um modelo predictor é aquele no qual o comportamento de uma variável pode ser descrito em função de outra variável. A variável a ser prevista é dependente e a variável predictor deve ser independente (COSTA *et al.*, 2013).

Um dos modelos mais simples que existem é a média, que representa um conjunto de dados. A média não precisa ter o valor igual a nenhum dos dados observados (FIELD, 2017).

Quando o fenômeno modelado envolve uma variável dependente e uma variável independente, ambas reais e contínuas, o modelo indicado é a regressão simples. A relação entre a idade e um conjunto de linhas de transmissão é utilizada como exemplo de comparação entre a média e a regressão simples para o mesmo conjunto de dados (Figura 10).

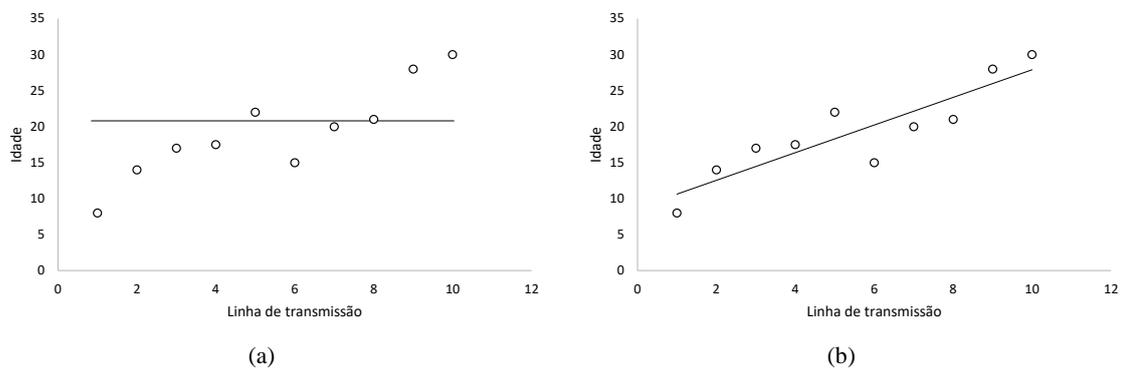


Figura 10 – Comparação entre a (a) média e a (b) regressão simples.

Se há múltiplas variáveis dependentes, reais e contínuas, o modelo predictor indicado é a regressão múltipla (FIELD, 2017). Em um modelo de regressão múltipla, a variável a ser prevista e as variáveis predictoras se relacionam conforme a Equação (11) a seguir:

$$y = K + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n \tag{11}$$

Na equação (11), y representa a variável dependente, x_k representam as variáveis independentes, b_k representam os coeficientes associados aos predictores e K é a constante associada à equação.

Quando temos mais de uma variável de saída ou quando temos a presença de variáveis categóricas ou, ainda, quando temos uma combinação de variáveis contínuas e categóricas, as opções de modelagem são diversas, conforme ilustra a Figura 11.

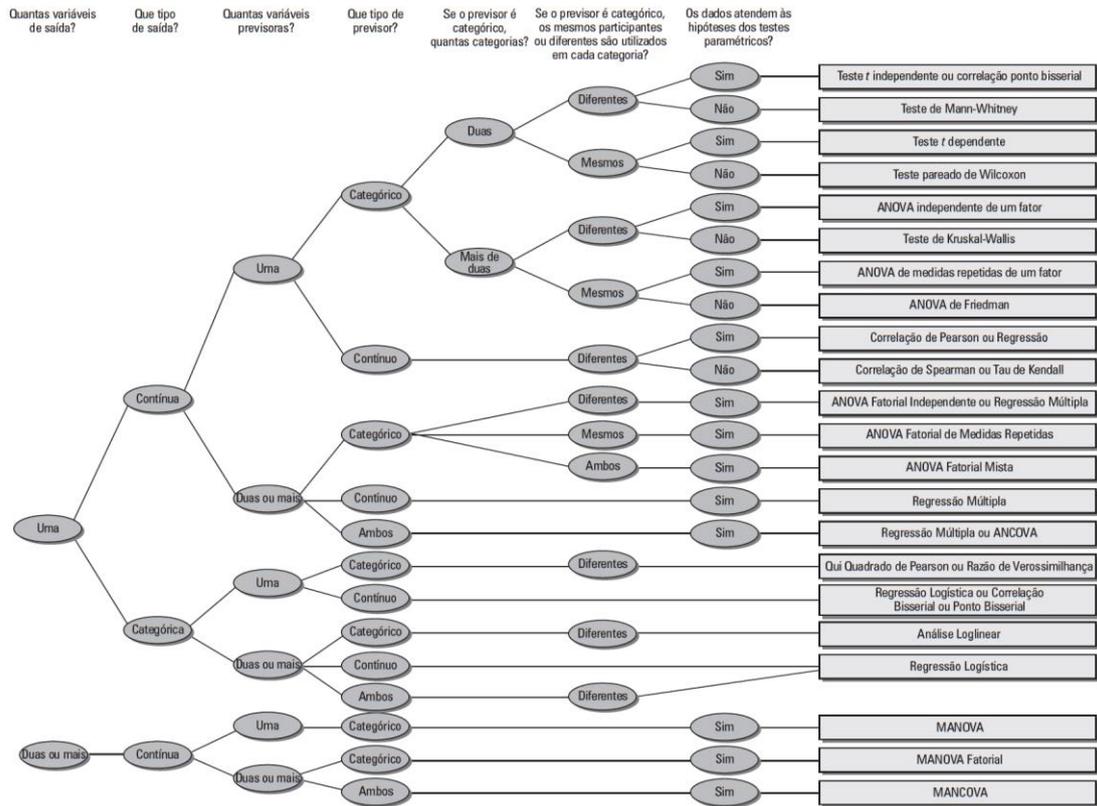


Figura 11 – Análises estatísticas de acordo com as características das variáveis previstas e previsoras (FIELD, 2017).

Uma forma de generalização dos modelos matemáticos são as equações estruturais (*Structural Equation Model – SEM*) (ALEXANDRE; NEVES, 2018). Com base nessa metodologia, qualquer modelo pode ser escrito em termos dos seguintes grupos de equações matriciais (ALBUQUERQUE, 2017):

$$\begin{cases} \eta = \mathbf{B}\eta + \Gamma\xi + \zeta \\ \mathbf{y} = \Lambda_y\eta + \epsilon \\ \mathbf{x} = \Lambda_x\xi + \delta \end{cases} \quad (12)$$

Na equação (12), η é um vetor de variáveis latentes⁶ de dimensão $m \times 1$, ξ é um vetor de variáveis independentes de dimensão $n \times 1$, ζ é um vetor de variáveis residuais de dimensão $m \times 1$, \mathbf{y} e \mathbf{x} são vetores de variáveis manifestas dependentes e independentes, respectivamente. Por fim, ϵ e δ são vetores residuais de dimensão $p \times 1$ e $q \times 1$, respectivamente (ALBUQUERQUE, 2017).

⁶ As variáveis latentes são aquelas não diretamente observáveis.

A primeira linha do modelo SEM ($\eta = \mathbf{B}\eta + \Gamma\xi + \zeta$) estabelece a relação entre as equações estruturais e as variáveis latentes. As variáveis latentes dependentes e independentes são conectadas por meio das matrizes \mathbf{B} e Γ (ALBUQUERQUE, 2017).

A segunda ($\mathbf{y} = \Lambda_y\eta + \epsilon$) e a terceira linha ($\mathbf{x} = \Lambda_x\xi + \delta$) do modelo SEM representam o modelo de mensuração, o qual define as variáveis latentes por meio das variáveis manifestas⁷ dependentes e independentes. Especificamente, a segunda equação liga as variáveis manifestas \mathbf{y} às variáveis latentes dependentes η . Já a terceira equação liga as variáveis manifestas \mathbf{x} às variáveis latentes independentes ξ . O modelo SEM é muito flexível e uma grande variedade de submodelos pode ser formada (ALBUQUERQUE, 2017).

2.9.1. A regressão logística como ferramenta previsora de desligamentos de linhas de transmissão expostas aos incêndios florestais

O estado operativo de uma linha de transmissão submetida a um incêndio florestal varia entre ligada e desligada. Assim, entende-se que o estado operativo da instalação se configura uma variável dicotômica⁸. Para esse tipo de saída, correspondente a uma variável e com múltiplas variáveis predictoras contínuas e dicotômicas, o modelo matemático ideal é a regressão logística (FIELD, 2017).

A regressão logística é um tipo de regressão múltipla, mas com uma variável de saída categórica dicotômica e variáveis predictoras contínuas ou categóricas (FIELD, 2017; NGUFOR; WOJTUSIAK, 2016; SAINANI, 2014). Ou seja, podemos prever a qual de duas categorias uma variável pertence com base em certas informações. Esse tipo de regressão é amplamente utilizado em diversos tipos de estudos (DONG *et al.*, 2011; GONÇALVES; GOUVÊA; MANTOVANI, 2013; KAKADE; KUMARI; DHOLANIYA, 2018; LEITE *et al.*, 2011; ROTAROU, 2018; VIEIRA DA SILVA *et al.*, 2010).

Em uma regressão linear, os dados observados devem ter um relacionamento linear. Contudo, se a variável de saída é do tipo dicotômica, essa hipótese é violada (BERRY, 1993). Uma forma de contornar esse problema é alterar os dados por meio de uma transformação logarítmica (PACKARD, 2013; ZHANG; WANG; LUO, 2015). A equação

⁷ As variáveis manifestas são aquelas diretamente observáveis.

⁸ A variável dicotômica é um tipo de variável categórica que representa a partição de um todo em duas partes.

de regressão logística expressa uma equação de regressão linear múltipla em termos logarítmicos e, dessa forma, resolve o problema da violação da hipótese de linearidade.

Assim, na regressão logística, prevemos a probabilidade de Y ocorrer conhecidos os valores de X ou Xs conforme a Equação (13).

$$P(Y) = \frac{1}{1 + e^{-(b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n + \varepsilon)}} \quad (13)$$

A equação probabilística $P(Y)$ da regressão logística apresenta várias semelhanças com a equação de regressão linear. Na realidade, o expoente do número natural e contém uma expressão idêntica à da regressão múltipla, onde b_0 é o intercepto, b_n corresponde ao coeficiente da variável previsora X_n e ε é o termo de resíduo.

O valor resultante da equação é a uma probabilidade e varia sempre entre 0 e 1 (HEUMANN; SCHOMAKER; SHALABH, 2016) . Um valor próximo de 0 significa que a ocorrência de Y é bastante improvável e um valor próximo de 1, que ela é bem provável.

Na equação logística, cada variável previsora tem seu próprio coeficiente. Esses parâmetros são estimados pelo ajustamento de modelos com base nos dados observados. O modelo escolhido será aquele que, quando os valores das variáveis predictoras forem utilizados, resultará em um valor de Y mais próximo do valor observado. Especificamente, os valores dos parâmetros são calculados utilizando a estimação de máxima verossimilhança (BRANDT, 2014): Uma das principais vantagens desse método é que seus estimadores são consistentes, assintoticamente normais e eficientes (GUERA *et al.*, 2018).

Assim como ocorre para a correlação múltipla, é possível calcular uma versão mais adequada da estatística-R na regressão logística. Essa estatística-R é a correlação parcial entre a variável de saída e cada uma das variáveis predictoras, e pode variar de -1 a 1 , em que valores próximos a zero indicam ausência de correlação, valores positivos representam correlação direta e valores negativos representam correlação inversa. A estatística-R foi proposta por Cox e Snell (COX; SNELL, 2008), representada pelo símbolo R_{CS}^2 , e é baseada na verossimilhança-log (BRANDT, 2014) do modelo, na verossimilhança-log do modelo original e no tamanho da amostra, conforme a Equação (14).

$$R_{CS}^2 = 1 - e^{\left[\frac{-2}{n}(VL(Novo) - VL(Básico)) \right]} \quad (14)$$

Contudo, essa estatística nunca alcança o seu valor teórico máximo, 1. Portanto, Nagelkerke (1991) sugeriu a seguinte correção (R^2 de Nagelkerke), de acordo com a Equação (15).

$$R_N^2 = \frac{R_{CS}^2}{1 - e^{\left[\frac{z(VL(Básico))}{n}\right]}} \quad (15)$$

O SPSS (IBM, 2020) utiliza a estatística-R proposta por Cox e Snell (2008), considerando a correção de Nagelkerke (1991). Os termos do expoente do número natural da Equação (15) vêm da expressão de verossimilhança-log (VL) descrita na Equação (16).

$$VL = \sum_{i=1}^N \{Y_i \ln(P(Y_i)) + (1 - Y_i) \ln[1 - P(Y_i)]\} \quad (16)$$

A Equação (15) está associada às probabilidades oriundas do modelo e dos dados reais. O resultado da equação indica quanta informação não explicada ainda existe após o modelo ter sido ajustado.

O cálculo de médias não faz sentido para variáveis dicotômicas. Assim, o valor básico da verossimilhança-log (VL(Básico)) da Equação (16) corresponde à categoria com o maior número de casos.

Na regressão logística, existe uma estatística, denominada Wald, que apresenta uma distribuição especial conhecida como qui-quadrado (HASTIE; TIBSHIRANI; FRIEDMAN, 2009). A estatística de Wald nos informa se o coeficiente b_n de cada predictor X_n é significativamente diferente de zero (WALD, 1943). Se isso ocorrer, poderemos assumir que o predictor está contribuindo de forma significativa para a previsão da variável de saída. A Equação (17) mostra como a estatística de Wald é calculada e é possível ver que, basicamente, ela é igual à estatística t na regressão linear.

$$Wald = \frac{b}{EP_b} \quad (17)$$

Onde b é coeficiente de regressão e EP_b é o seu erro padrão.

Outra variável importante para a interpretação da regressão logística é o chamado expoente. Esse indicador representa a variação da chance de mudança da probabilidade antes e após a inclusão da variável analisada. Quando o indicador é maior que 1, indica que o aumento do previsor está diretamente relacionado ao aumento da chance de um aumento da variável de saída (FIELD, 2017).

Dessa forma, é possível utilizar a regressão logística com o objetivo de prever se uma linha de transmissão vai ou não sofrer um desligamento por incêndios florestais, dadas as características dos vãos expostos ao fogo.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, descreveremos a caracterização do local de estudo, a população e amostragem, a coleta de dados e análises estatísticas e o plano de trabalho realizado. A descrição do plano de trabalho será subdividida conforme as suas etapas.

3.1. Caracterização do local de estudo

Para o modelo representativo de causas de desligamentos provocados por incêndios florestais, foram selecionados seis troncos de transmissão com desempenho assimétrico no período de janeiro/2013 a junho/2018. Os troncos são compostos por duas linhas de circuitos simples, o que significa que não há compartilhamento de torres e os traçados das linhas são diferentes. Contudo, os pontos de origem e destino das linhas são os mesmos. Os circuitos selecionados estão destacados na Tabela 1.

Tabela 1 – Troncos e linhas de transmissão selecionados para o modelo (ONS, 2017)

Tronco	Instalação	Comprimento (km)	Início da Operação
1	LT 500 kV COLINAS / RIB.GONCALVES C 1 TO/PI	379	11/12/2006
	LT 500 kV COLINAS / RIB.GONCALVES C 2 TO/PI	367	20/12/2010
2	LT 500 kV IMPERATRIZ / COLINAS C 1 MA/TO	343	2/3/1999
	LT 500 kV IMPERATRIZ / COLINAS C 2 MA/TO	343	8/4/2004
3	LT 500 kV IMPERATRIZ / P.DUTRA C 1 MA	388	2/6/2000
	LT 500 kV IMPERATRIZ / P.DUTRA C 2 MA	388	2/6/2000
4	LT 500 kV RIB.GONCALVES / S.JOAO PIAUI C L3 PI	353	01/12/2010
	LT 500 kV RIB.GONCALVES / S.JOAO PIAUI C L4 PI	353	10/12/2006
5	LT 500 kV TERESINA II / P.DUTRA C C9 PI/MA	210	30/4/2003
	LT 500 kV TERESINA II / P.DUTRA C C8 PI/MA	208	10/5/2000
6	LT 500 kV TERESINA II / SOBRAL III C V8 PI/CE	334	01/01/2006
	LT 500 kV TERESINA II / SOBRAL III C V9 PI/CE	332	10/5/2000

Os seis troncos selecionados pertencem à área 1 da Figura 4. As áreas 2 e 3 da Figura 4 representam instalações que cruzam áreas de cultivo de cana-de-açúcar, que têm na sua dinâmica de colheita um forte fator de influência no desempenho das linhas. As linhas que perpassam áreas com essa característica não serão objeto deste estudo.

As linhas estudadas abrangem os estados do Piauí, de Tocantins, do Maranhão e do Ceará, conforme ilustra a Figura 12. Essas linhas cruzam três biomas diferentes (Amazônia, Cerrado e Caatinga) e áreas com diferentes tipos de uso do solo.

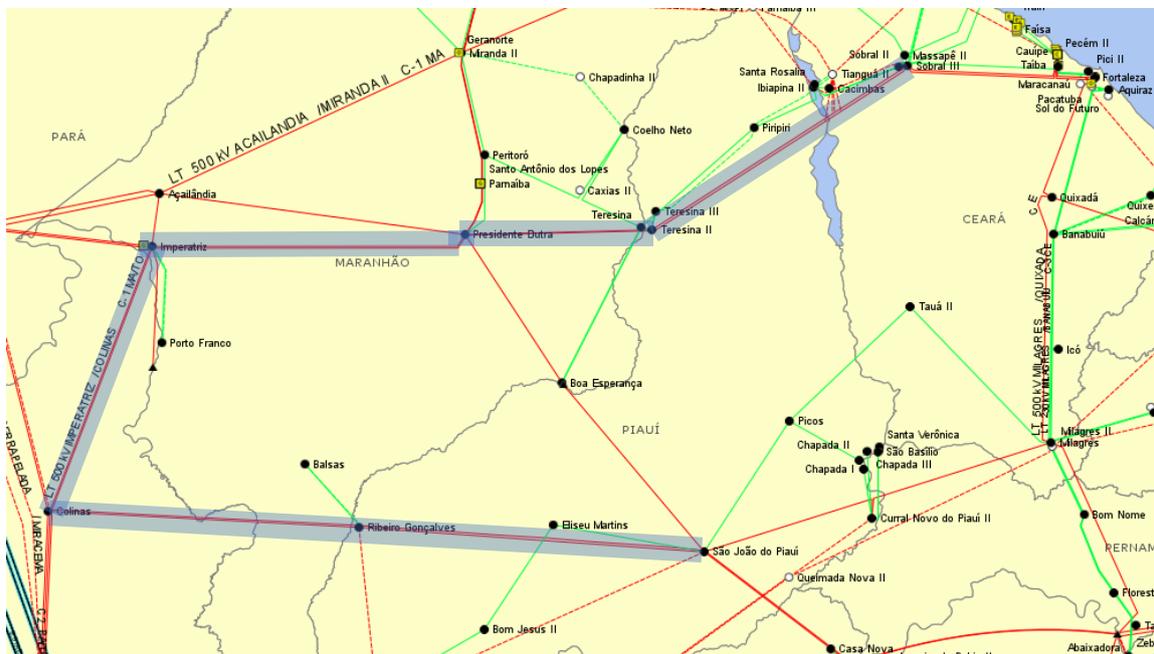


Figura 12 – Esquemático das linhas de transmissão estudadas (ONS, 2017)

No caso da análise de inventários florestais, cuja metodologia está descrita no item 3.4.1, devido à impossibilidade de dissociação das demais instalações, foi incluída a Linha de Transmissão em 500 kV São João do Piauí / Sobradinho C1, com 210 km.

3.2. População e amostragem

Para a obtenção das informações das áreas estudadas sob as linhas de transmissão, foram utilizadas bases de dados governamentais, de organizações da sociedade civil e dos agentes de transmissão.

Os troncos seleccionados corresponderam a doze linhas de transmissão em 500 kV, destacadas na Tabela 1, com um total de 3.998 km. O sistema de transmissão em 500 kV no Brasil, no ano de 2019, corresponde a 51.121 km. Dessa forma, pode-se afirmar que as linhas seleccionadas representam uma amostra correspondente a 7,8% desse sistema. Isso representa um erro amostral de $\pm 1,49\%$ considerando um intervalo de confiança de 95%.

3.3. Coleta de dados e análises estatísticas

A coleta de dados fez uso de diversas fontes, conforme detalhamento apresentado, a seguir, no Plano de Trabalho. As bases de dados foram processadas utilizando os *softwares* Excel (MICROSOFT, 2020) e SAS (SAS, 2020). As análises estatísticas foram realizadas com o uso do *software* SPSS (IBM, 2020). O detalhamento do uso de cada um dos aplicativos será demonstrado no Plano de Trabalho.

3.4. Plano de trabalho

O Plano de Trabalho pode ser resumido na Figura 13.

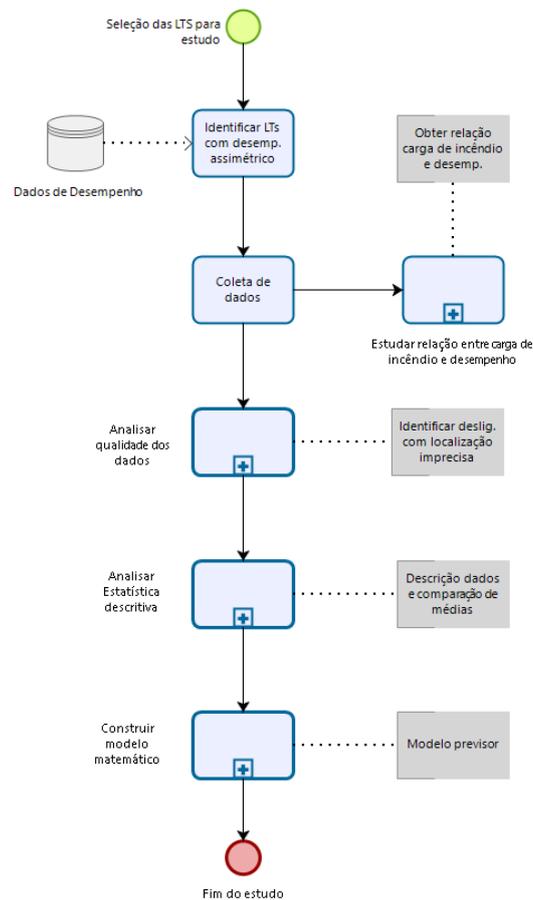


Figura 13 – Resumo do Plano de Trabalho

A partir dos dados de desempenho das linhas de transmissão em 500 kV do sistema elétrico brasileiro, foi realizada uma seleção de doze linhas para estudo. Seleccionadas as

linhas, foi realizada a coleta de dados. A partir dos dados coletados, o trabalho se desenvolveu em quatro etapas específicas, cada uma com seus produtos associados:

- Estudo da relação entre carga de incêndio e desligamentos;
- Análise da qualidade da informação;
- Análise descritiva dos dados;
- Construção do modelo matemático.

Com exceção do estudo da relação entre carga de incêndio e desligamentos, todas as demais etapas estão encadeadas de forma a obter, ao fim do trabalho, um modelo preditor de desligamentos de linhas de transmissão provocados por incêndios florestais. Dada a característica da informação disponível, em granularidade por tronco de linha de transmissão, não será possível uma análise da relação entre carga de incêndio e desligamentos por vão, como as demais análises.

Para o estudo das demais etapas, as linhas de transmissão foram analisadas vão a vão, conforme ilustra a Figura 14.

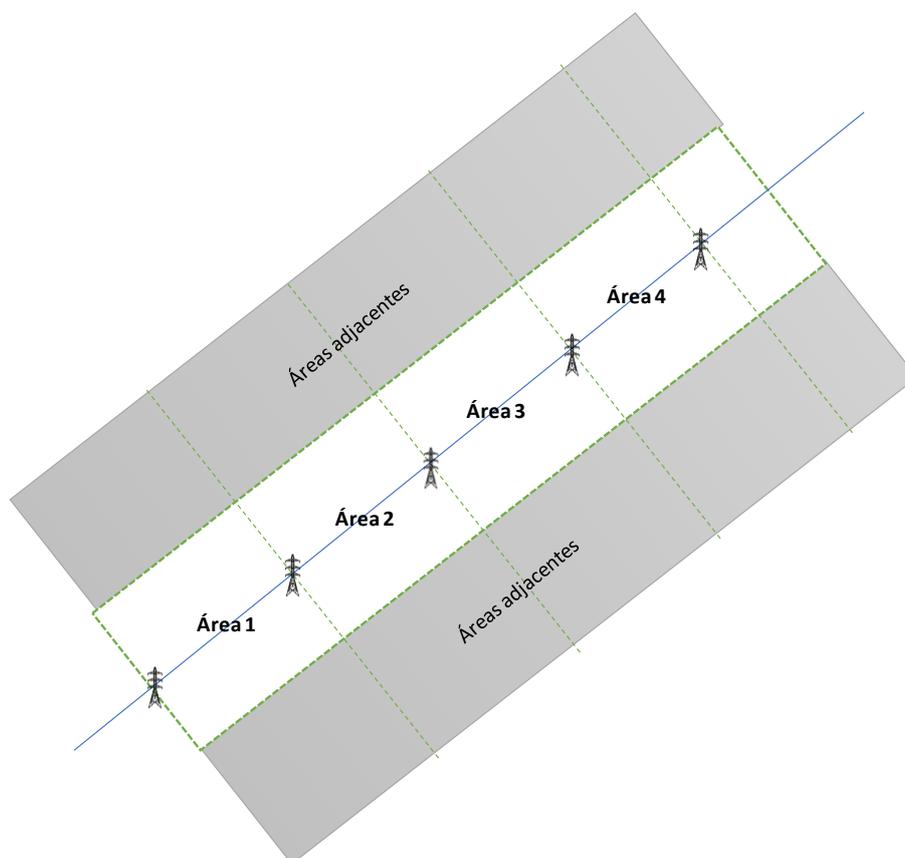


Figura 14 – Representação esquemática das áreas de estudos

Os vãos são limitados por torres e podem ser analisados de acordo com sua área de influência. Cada área é delimitada pela largura da faixa de segurança estabelecida na Licença de Operação e pelas torres da linha de transmissão.

Com o uso de um sistema de informação geográfica, foi possível extrair informações relevantes para cada uma das áreas e formar um banco de dados para execução das análises estatísticas. As fontes primárias de dados e a forma de cruzamento das informações podem ser ilustradas na Figura 15.

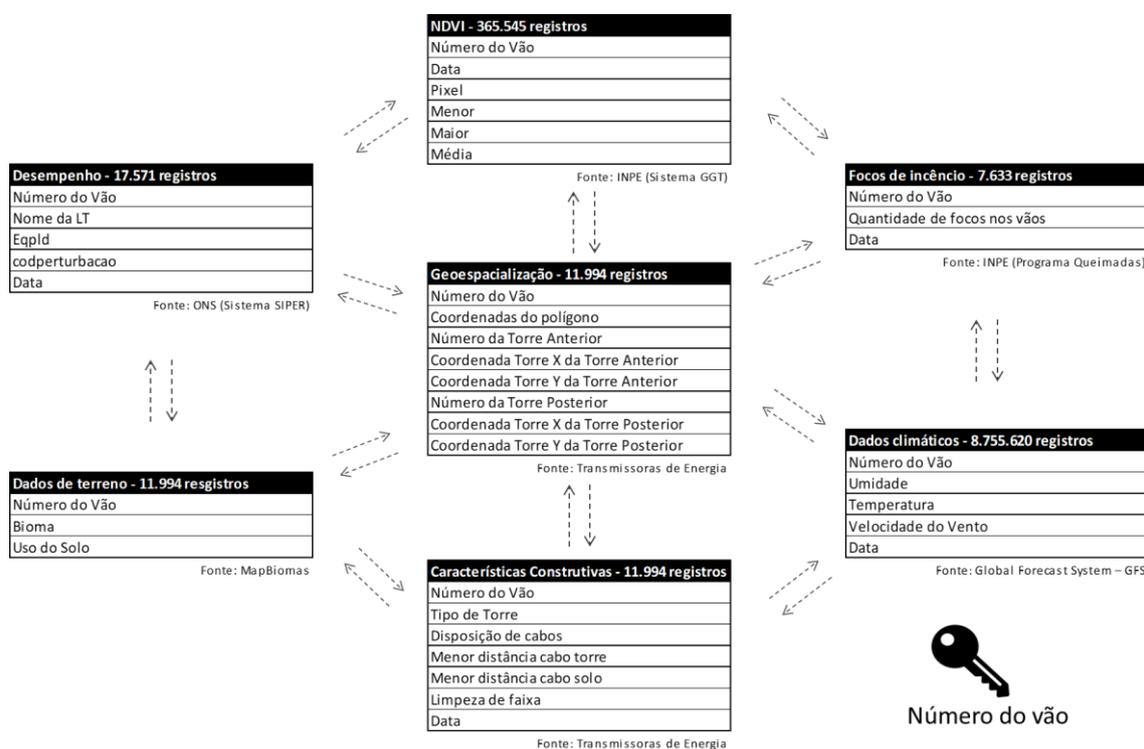


Figura 15 – Ilustração do cruzamento de dados usando o número do vão como chave identificadora

Os dados coletados foram cruzados entre si, usando como chave identificadora o código identificador do vão de linhas de transmissão, criado especificamente para este trabalho. O *software* SAS (SAS, 2020) foi utilizado nesse cruzamento. Por meio dessa técnica, foi possível construir um banco de dados unificado com os campos destacados na Figura 15.

A seguir, descreveremos detalhadamente cada uma das etapas do Plano de Trabalho.

3.4.1. Relação entre carga de incêndio e desligamentos

Por meio da Lei de Acesso à Informação – LAI (BRASIL, 2011) foram obtidos, junto ao órgão executivo licenciador, os estudos de inventários florestais de três troncos de Linhas de Transmissão – LT em tensão de operação de 500 kV:

- Tronco A: LT 500 kV Colinas – Ribeiro Gonçalves – São João do Piauí C2, construída em 2009 pela concessionária IENNE (PEREIRA; TAVARES, 2009);
- Tronco B: LT 500 kV Colinas – Ribeiro Gonçalves – São João do Piauí C1 - Sobradinho, construída em 2005 pela concessionária ATE III (ROCHA *et al.*, 2005);
- Tronco C: LT 500 kV Teresina II – Sobral III C2, construída em 2000 pela concessionária STN, mas com inventário florestal, para o trecho entre as cidades de Teresina/PI e Piripiri/PI, revisado em 2019 (ROCHA *et al.*, 2019).

A seleção dessas linhas de transmissão para a análise se deu tomando por base a localização das instalações. Foram priorizadas LTs com extensão predominante localizada no bioma cerrado. Além disso, outro fator preponderante foi a disponibilidade de estudo de inventário florestal nos acervos do órgão executivo licenciador. Os troncos de LTs analisados estão ilustrados na Figura 16.

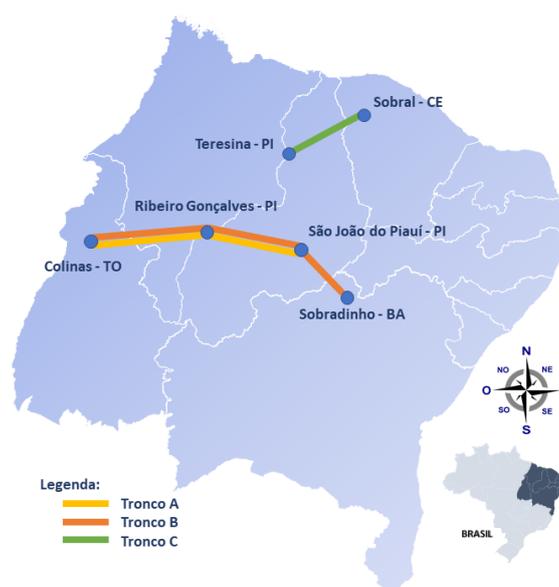


Figura 16 – Local de Estudo

Os dados inventariados foram obtidos de estudos distintos. Esses estudos utilizaram metodologias similares. Nos três casos, foram selecionadas amostras correspondentes às parcelas de áreas ao longo do traçado da linha de transmissão e, no interior dessas parcelas, foi realizado o inventário florestal.

A Figura 17 resume a metodologia aplicada para o estudo.

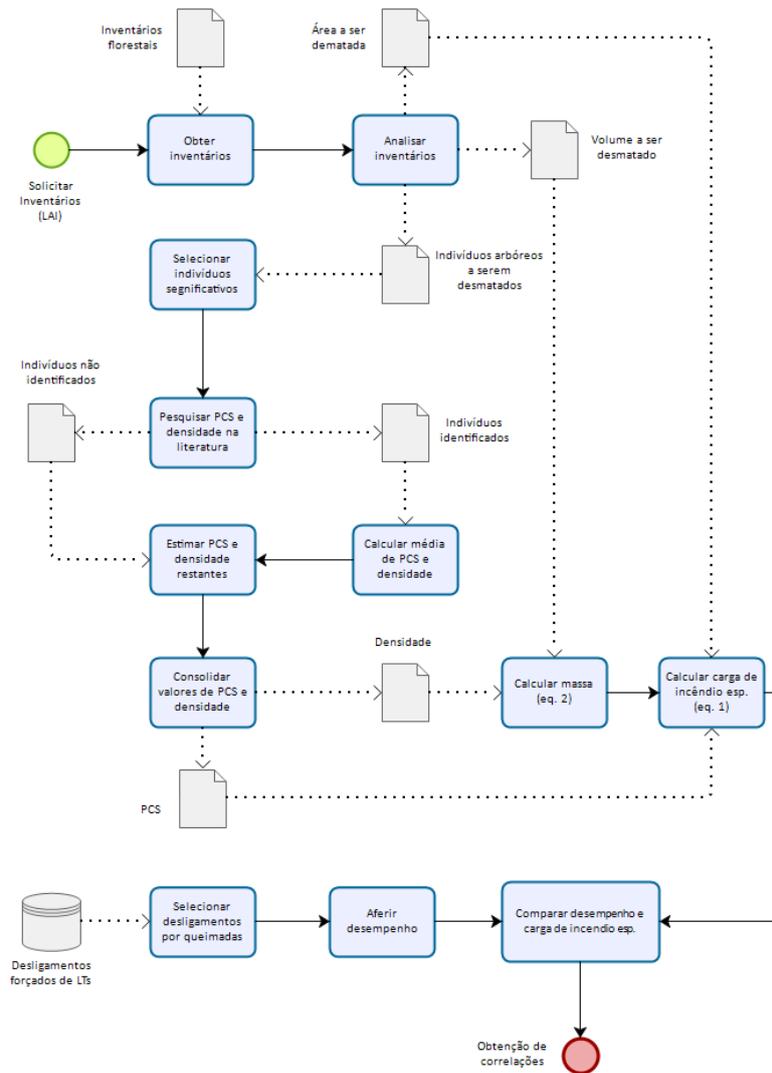


Figura 17 – Metodologia para obtenção da relação entre carga de incêndio e desligamentos

Por meio do inventário, para cada uma dessas LTs, foi identificado o volume de material lenhoso a ser desmatado, as áreas a serem desmatadas e os indivíduos arbóreos catalogados. Utilizando uma análise de Pareto (HARDY, 2010) foram identificadas as espécies com maior representatividade entre os indivíduos inventariados. Para esse

subconjunto de espécies, foi realizada pesquisa na literatura para identificação do Poder Calorífico Superior (PCS) e da Densidade Básica (ρ_b) correspondente.

A partir dos dados de ρ_b e volume, foram calculadas as massas secas correspondentes a cada espécie de madeira utilizando a Equação (18).

$$\rho_b = \frac{M_s}{V_{sat}} \quad (18)$$

Onde:

M_s – Massa da madeira seca, a 0% de umidade (kg);

V_{sat} – Volume saturado (m^3).

Conhecida a massa de madeira seca e o seu PCS, foi possível calcular a carga de incêndio correspondente a cada espécie para cada tronco de linha. A soma das cargas de incêndio individuais por espécie dividida pela área a ser desmatada corresponde à relação da Equação (19), fornecendo como resultado as cargas de incêndio específicas dos troncos de LTs (ABNT, 2000). Nos casos em que não foi possível identificar o PCS e a ρ_b , utilizou-se a média dos dados encontrados.

$$q_i = \frac{\sum M_i PCS_i}{A_i} \quad (19)$$

Onde:

q_i – valor da carga de incêndio específica, (MJ/m^2);

M_i – massa seca total de cada componente i do material combustível (kg);

PCS_i – poder calorífico superior de cada componente i do material combustível (MJ/kg);

A_i – área do espaço considerado (m^2).

3.4.2. Qualidade da Informação

Foram analisados dados de desligamentos forçados ocorridos no sistema de transmissão brasileiro nos anos de 2018 e 2019 e declarados pelas concessionárias de transmissão ao operador de rede nacional (ONS, 2016). Os dados obtidos continham informação de data, hora, instalação, causa de desligamento e localização declarada para o defeito. A partir desses dados, foram selecionados os desligamentos ocasionados por incêndios florestais.

Para os seis troncos de linhas de transmissão destacados na Tabela 1, foram considerados os desligamentos forçados por incêndios florestais ocorridos no período.

A partir do Sistema de Gestão Geoespacializada de Transmissão – GGT (GUIDO JR. *et al.*, 2018) –, foram obtidas as coordenadas geográficas de cada vão entre torres das linhas de transmissão de interesse. A partir do Programa Queimadas (INPE, 2017), foram obtidos dados de focos de incêndio que atingiram os vãos das linhas de transmissão no período de interesse. Os dados de focos de incêndio foram obtidos com resolução de 1 km² (INPE, 2020).

Os dados de focos de incêndio foram confrontados com os dados de desligamentos das linhas de transmissão, com o objetivo de validar a causa do desligamento reportada. Também foram comparadas a localização do defeito e os vãos em que foram identificados focos de incêndio numa mesma data.

Com base nessas informações, foi possível aferir: se os desligamentos reportados por incêndios florestais continham focos de incêndio associados; se a localização reportada do desligamento provocado por incêndio florestal correspondia à localização dos focos de incêndio; e se um determinado foco de incêndio foi capaz ou não de provocar um desligamento de uma linha de transmissão em uma data específica.

A Figura 18 resume a metodologia aplicada para o estudo.

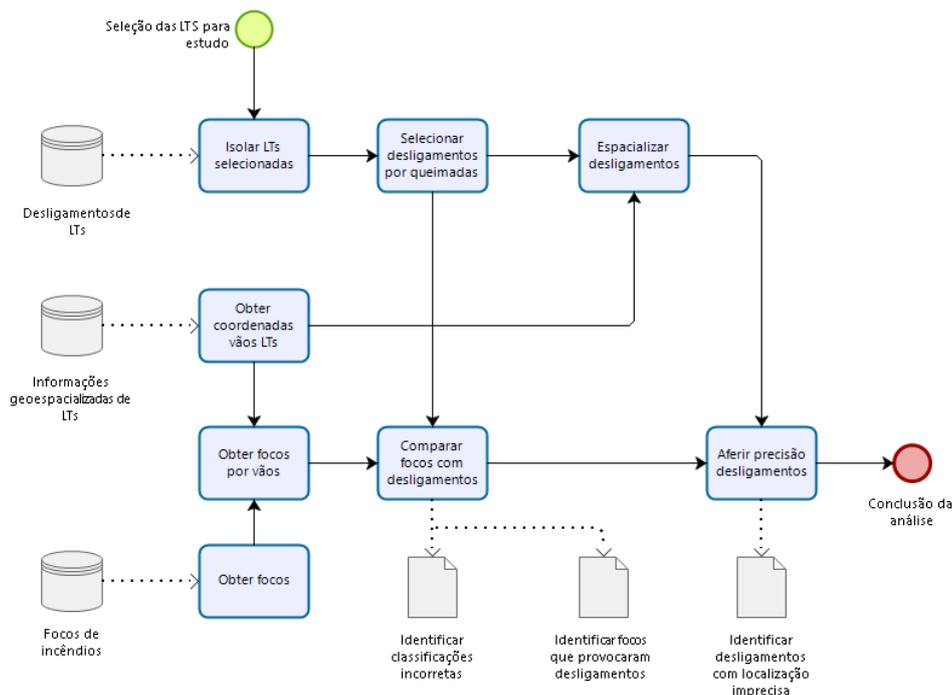


Figura 18 – Metodologia para aferição da qualidade dos dados de desligamentos

Com base nos quantitativos de desligamentos analisados e conhecido seu universo no período de estudo, foi possível estimar, para todo o sistema de transmissão brasileiro, os quantitativos de desligamentos incorretamente classificados como provocados por incêndios florestais e o quantitativo de desligamentos provocados por incêndios florestais cuja localização de defeito estava imprecisa.

3.4.3. Análise descritiva dos dados

Considerando o mesmo conjunto de dados descritos no Item 3.4.2, foram reunidas as informações em granularidade por vãos e destacadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Variáveis analisadas

Variável	Escala de mensuração	Tipo de Característica	Unidade	Origem
Desligamentos	Nominal	Desempenho	Não se aplica	SIPER
Focos	Razão	Desempenho	Quantidade	Programa Queimadas
NDVI	Razão	Desempenho	Adimensional	GGT
Largura	Razão	Construtiva	Metros	GGT
Altura	Razão	Construtiva	Metros	GGT
Isoladores	Razão	Construtiva	Quantidade	GGT
Dias sem chuva	Razão	Climáticas	Não se aplica	INPE
Umidade	Razão	Climáticas	Percentual	INPE
Temperatura	Razão	Climáticas	Graus Celsius	INPE
Vento	Razão	Climáticas	Metros por segundo	INPE

Variável	Escala de mensuração	Tipo de Característica	Unidade	Origem
Bioma	Nominal	Terreno	Não se aplica	MapBiomas
Uso do solo	Nominal	Terreno	Não se aplica	MapBiomas
Limpeza de faixa	Nominal	Desempenho	Não se aplica	GGT

Os dados da Tabela 2 foram classificados segundo as escalas de mensuração postuladas por Stevens (1946). Segundo essa proposição, todas as escalas de medida podem ser classificadas em quatro tipos: nominal, ordinal, intervalar e razão. No estudo relatado, foram utilizados dados nominais e de razão.

Os dados da Tabela 2 também foram classificados quanto ao tipo de característica relatada: desempenho, construtivas, climáticas e terreno.

As características de desempenho estão relacionadas ao dinamismo operativo da linha de transmissão. Os dados de desligamentos forçados foram obtidos junto ao Sistema Integrado de Perturbações – SIPER (ONS, 2016). Os dados de focos de incêndio foram obtidos junto ao Programa Queimadas (INPE, 2017). Os dados de índice NDVI e os dados de limpeza de faixa foram obtidos junto ao Sistema de Gestão Geoespacializada de Transmissão – GGT (GUIDO JR. *et al.*, 2018).

Os dados referentes ao NDVI precisaram ser processados devido à sua forma de aquisição, que ocorre a cada duas semanas. Para uma data específica, foram mantidos os dados da última leitura considerada válida (acima de 25 pixels) até a próxima leitura válida. Os dados de NDVI utilizados nesse trabalho foram ampliados em cem vezes para fins de melhoria de resolução.

As características construtivas são aquelas relacionadas ao projeto das instalações. A largura da faixa de servidão para o vão, a altura das torres nas extremidades do vão e o número de isoladores por cadeia foram obtidos a partir dos dados do Sistema GGT (GUIDO JR. *et al.*, 2018). Embora essas variáveis tenham granularidade por vão, os dados disponíveis refletem valores por trechos das linhas de transmissão.

Os dados climáticos correspondem a umidade, temperatura, velocidade do vento e número de dias sem chuvas, para cada vão analisado. Todas as informações foram obtidas junto ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Estão disponíveis dados desde o ano

2000 em resolução (pixel) de 25 km x 25 km. Os dados são oriundos de modelos meteorológicos do *Global Forecast System* – GFS (INPE, 2020; NOAA, 2020).

Os dados de terreno correspondem ao bioma e ao tipo de uso de solo em que o vão de LT está localizado. Esses dados foram obtidos junto ao MapBiomas (ECO STAGE, 2019) e correspondem à situação mapeada em dezembro/2018.

Os dados coletados foram processados seguindo o fluxo descrito na Figura 19.

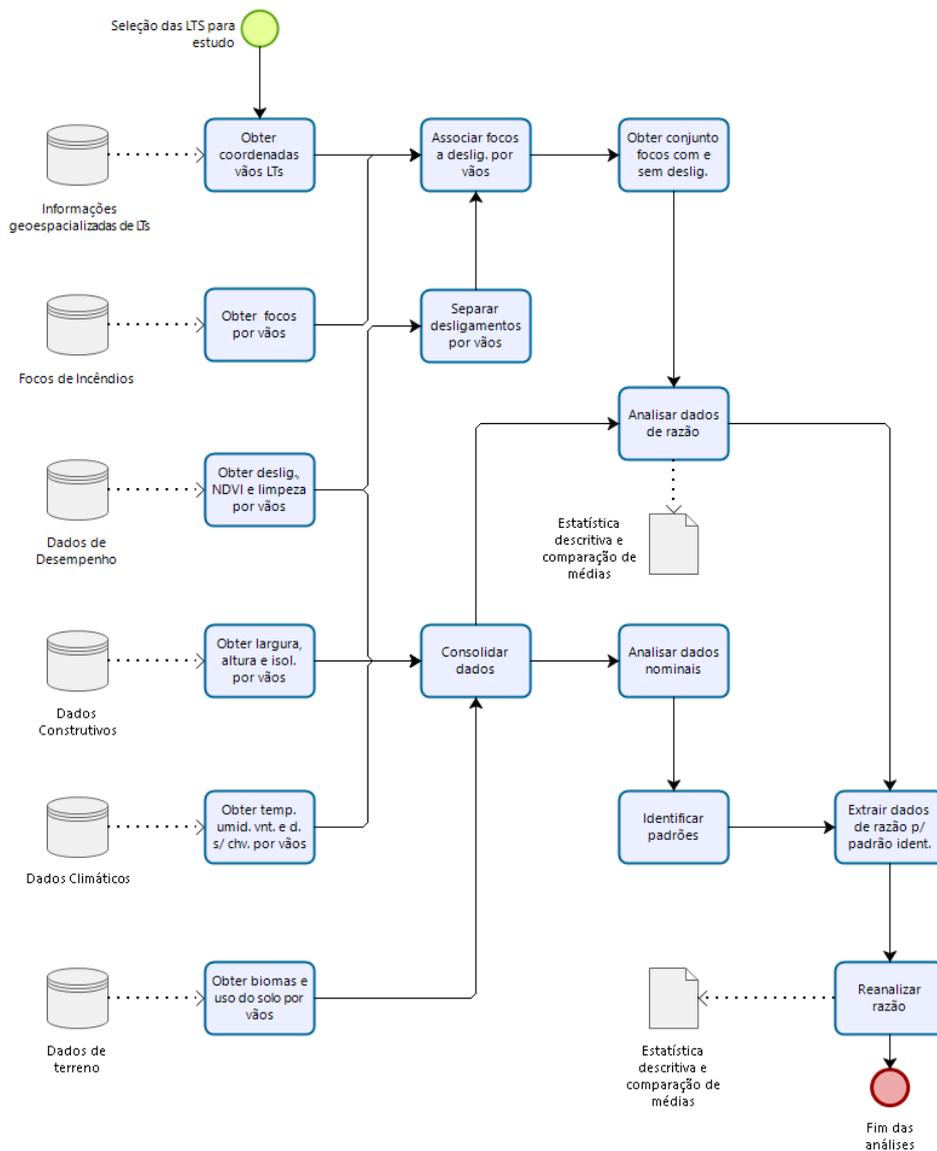


Figura 19 – Metodologia para aferição da qualidade dos dados de desligamentos

A partir de informações do Programa Queimadas (INPE, 2017) e do Sistema GGT (GUIDO JR. *et al.*, 2018) os dados de focos de incêndio foram associados aos vãos das linhas de transmissão no período de interesse.

Considerando os metadados dos focos de incêndio, foi possível associá-los ao desligamento ou não das linhas de transmissão nas datas de ocorrência. A partir dessa classificação, os dados foram divididos em dois conjuntos: aqueles que provocaram desligamentos das LTs quando expostos aos focos de incêndio e aqueles que, sob a mesma condição, não provocaram desligamentos.

Os dados de escala de mensuração de razão da Tabela 2 foram analisados seguindo a comparação de médias dos dois conjuntos definidos, com e sem desligamento. Foi utilizado um teste t independente para comparação de médias (FIELD, 2017). De forma ilustrativa, também foram construídos gráficos de barras de erros comparativos dos conjuntos de dados.

A influência isolada das variáveis em escala de razão quanto ao desligamento ou não das linhas de transmissão foi avaliada utilizando a correlação de Pearson (BENESTY *et al.*, 2009). Os graus de liberdade utilizados no cálculo da correlação foram escolhidos a partir do teste de Levene (LEVENE, 1960).

Os dados de escala de mensuração nominal da Tabela 2 foram explorados na busca de obtenção de padrões relacionáveis com a ocorrência dos desligamentos das linhas de transmissão expostas aos incêndios florestais.

A partir dos padrões identificados, outro subgrupo de dados mensuração de razão foi isolado e as análises de comparação de médias foram repetidas.

3.4.4. Construção do modelo matemático

Considerando o mesmo conjunto de dados descritos no item 3.4.2 foram reunidas as informações em granularidade por vãos, conforme destacado na Tabela 2. As variáveis nominais foram analisadas segundo classificações específicas, conforme demonstra a Tabela 3.

Tabela 3 – Categorias das variáveis biomas, uso do solo e limpeza de faixa

Variável	Representação Dicotômica	Categoria
Bioma	0	Amazônia
	0	Caatinga
	1	Cerrado
Uso do solo	0	Cultura Anual e Perene
	0	Formação Campestre
	0	Formação Florestal
	1	Formação Savânica
	0	Infraestrutura urbana
	0	Mosaico de Agricultura e Pastagem
	0	Outra Área não vegetada
	0	Pastagem
	0	Rio, Lago e Oceano
Limpeza de faixa	1	Autorizado
	0	Autorizado com restrições
	0	Proibido

Frisa-se que as categorias das variáveis citadas na Tabela 3 não são exaustivas, limitando-se àquelas relacionadas no banco de dados utilizado. A representação dicotômica das variáveis é necessária para a utilização nos modelos de regressão logística. O critério de representação dicotômica da Tabela 3 seguiu os resultados das análises estatísticas descritivas do Item 4.3.

Constatou-se que 71% das áreas dos vãos que provocaram desligamentos estão relacionadas ao uso de solo da categoria ‘Formação Savânica’. Portanto, para essa variável, atribui-se o valor 1 para representação dicotômica da categoria ‘Formação Savânica’ e o valor 0 para as demais categorias. Para a variável Bioma, a prevalência de áreas de vãos que provocaram desligamentos está na categoria ‘Cerrado’ (59%). Portanto, a representação dicotômica da categoria ‘Cerrado’ tem valor 1 e as demais categorias têm valor 0. Para a variável limpeza de faixa, a categoria ‘Autorizado’ tem valor 1 e as demais têm valor 0.

Os dados foram processados seguindo o fluxo descrito na Figura 20.

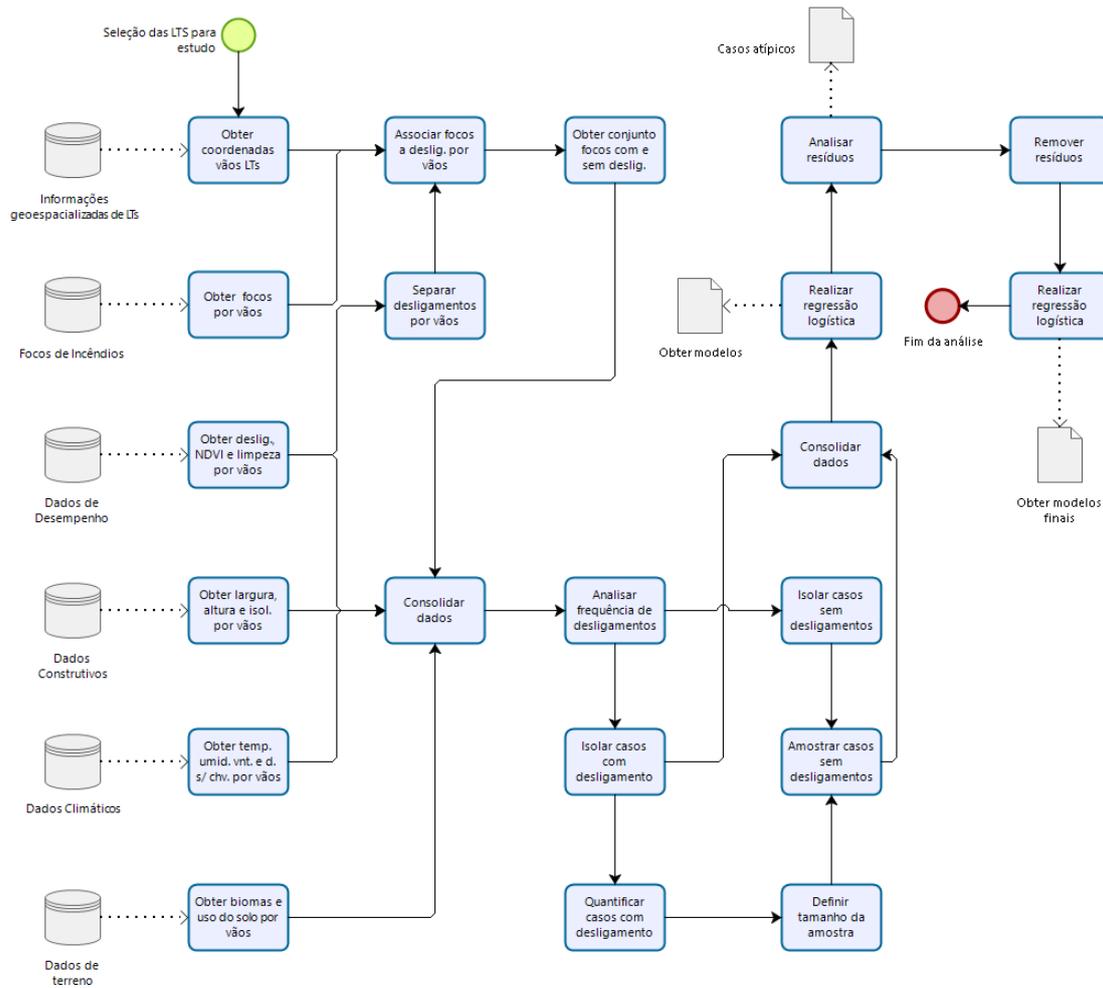


Figura 20 – Resumo da metodologia do estudo

Após a consolidação, os dados foram divididos em dois conjuntos: aqueles que provocaram desligamentos das LTs quando expostos aos focos de incêndio e aqueles que, sob a mesma condição, não provocaram desligamentos.

Na sequência, foi feita uma análise de frequências de vãos associados ou não a desligamentos. Os vãos associados aos desligamentos (menor conjunto) foram utilizados como referência para o tamanho da amostra dos vãos associados à ausência de desligamentos (maior conjunto). Os dois conjuntos de dados foram novamente consolidados, garantindo a simetria entre o número de vãos com e sem desligamentos. Essa análise inicial foi considerada um modelo base, sem a inclusão de nenhuma das variáveis estudadas.

Foi calculada a estatística Wald para as variáveis não inclusas no modelo base. O passo seguinte foi a inclusão da variável significativa de maior pontuação no modelo base.

Esse modelo foi armazenado, sendo calculados seus coeficientes, R^2 e percentuais de acerto.

A seguir, foram calculadas novas estatísticas Wald para as variáveis não incluídas no primeiro passo de simulação. Novamente, a variável significativa de maior pontuação foi selecionada para inclusão no modelo anterior. Um novo passo de simulação foi gerado, sendo calculados, mais uma vez, seus coeficientes, R^2 e percentuais de acerto. Esse processo foi repetido até que não restassem variáveis significativas fora do modelo.

Ao final dos n passos de simulação, foi selecionado o modelo com maiores percentuais de acerto para ocorrência de desligamentos. Também foi realizada uma análise de resíduos, de forma a identificar os valores atípicos com influências indevidas nos modelos. Foram consideradas atípicas as diferenças padronizadas superiores a $\pm 2\sigma$ (desvios padrão). Os valores atípicos foram removidos da base de dados e a análise de regressão logística repetida, obtendo novos modelos probabilísticos.

Foi utilizado o *software* SPSS (IBM, 2020) para a construção dos modelos de regressão logística.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo será dividido em quatro subcapítulos, cada um correspondente a uma etapa do Plano de Trabalho detalhado no Capítulo 3 desta Tese. O primeiro subcapítulo explora a relação entre a carga de incêndio e os desligamentos por incêndios florestais. No segundo subcapítulo, é feita uma análise de consistência dos dados de desligamentos. O terceiro subcapítulo é dedicado à descrição estatística dos dados. O último subcapítulo simula diversos modelos matemáticos capazes de prever a probabilidade de desligamento de uma linha quando exposta aos incêndios florestais.

4.1. O impacto da carga de incêndio específica no desempenho de linhas de transmissão de energia

Conforme descrito na metodologia, foram avaliados os estudos de inventários florestais de três troncos de LTs. Os inventários florestais analisados identificaram 111 espécies, totalizando 4.502 indivíduos arbóreos distintos. Não foi possível identificar três espécies, correspondentes a 245 indivíduos arbóreos.

As 108 espécies identificadas se dividem em 28 famílias botânicas, totalizando 4.257 indivíduos arbóreos inventariados. Para cada espécie, foram pesquisados na literatura o seu Poder Calorífico Superior (PCS) e a Densidade Básica (ρ_b). Foi possível identificar o poder calorífico em 64 espécies e a densidade básica em 67 espécies. As espécies com PCS e ρ_b identificados estão dispostas na Tabela 4. As espécies com os mesmos parâmetros não identificados estão listadas na Tabela 5.

Tabela 4 – Espécies com Poder Calorífico Superior (PCS) ou a Densidade Básica (ρ_b) identificadas na literatura.

Família	Espécie	Indivíduos Arbóreos (und.)	Densidade Básica - ρ_b (g/cm ³)	Poder Calorífico Superior - PCS (MJ/kg)
Anacardiaceae	<i>Anacardiaceae l</i>	21	-	17,40 ^a
	<i>Anacardium humile St. Hilaire</i>	9	0,42 ^b	18,46 ^b
	<i>Anacardium sp</i>	17	0,52 ^c	18,64 ^c
	<i>Astronium fraxinifolium</i>	18	1,13 ^d	-
	<i>Myracrodruom urundeuva</i>	25	0,86 ^{cc}	19,50 ^e
Annonaceae	<i>Annonaceae l</i>	15	0,60 ^d	19,17 ^d
	<i>Xylopia aromatica</i>	32	0,59 ^f	19,17 ^f
	<i>Rollinia sp.</i>	80	0,52 ^g	-

Família	Espécie	Indivíduos Arbóreos (und.)	Densidade Básica - ρ_b (g/cm ³)	Poder Calorífico Superior - PCS (MJ/kg)
Apocynaceae	<i>Aspidosperma pyhfolium</i> Mart.	59	-	20,31 ^h
	<i>Aspidosperma</i> sp.	36	-	19,17 ^h
Arecaceae	<i>Syagrus</i> sp.	81	0,92 ⁱ	18,33 ⁱ
Bignoniaceae	<i>Bignoniaceae</i> 1	13	1,05 ^d	20,74 ^d
	<i>Jacaranda</i> sp.2	27	0,35 ^b	19,65 ^b
	<i>Tabebuia</i>	14	1,05 ^c	20,74 ^c
	<i>Tabebuia impetiginosa</i>	18	0,84 ^{dd}	20,19 ^j
Burseraceae	<i>Protium</i> sp.2	16	0,55 ^k	19,75 ^k
Caryocaraceae	<i>Caryocar coriaceum</i> Wittm.	21	0,61 ^c	20,25 ^c
	<i>Caryocar villosum</i>	18	0,61 ^c	20,25 ^c
Chrysobalanaceae	<i>Hirtella</i> sp 1	14	0,52 ^{jj}	-
Combretaceae	<i>Buchenavia capitata</i> (Vahl.) Mart.	9	-	16,03 ^l
	<i>Combretaceae</i> 1	27	1,05 ^m	18,65 ^m
	<i>Combretum leprosum</i> Mart.	321	1,05 ^m	18,65 ^m
	<i>Thilao glaucocarpa</i> (Mart.) Eichler	136	1,05 ^m	18,65 ^m
Dilleniaceae	<i>Curatella americana</i> L.	93	0,67 ^{jj}	-
Ebenaceae	<i>Diospyros</i> sp1	11	0,64 ⁿ	19,15 ^o
Erythroxylaceae	<i>Erythroxylum</i> sp.	60	0,54 ^p	20,63 ^p
Euphorbiaceae	<i>Croton sonderianus</i> MCII. Arg.	18	-	19,28 ^h
	<i>Croton</i> sp	38	-	19,28 ^h
	<i>Croton zehntneri</i> pax. & K. Hoffm.	42	-	19,28 ^h
Fabaceae	<i>Acacia</i> sp	35	0,52 ^{gg}	19,92 ^h
	<i>Anadenanthera</i> sp.6	21	-	18,76 ^q
	<i>Andira fraxinifolia</i> Benth.	31	0,92 ^d	20,34 ^r
	<i>Andira humilis</i> Mart. ex Benth.	12	0,42 ^{jj}	-
	<i>Bauhinia</i> sp	99	0,71 ^s	18,83 ^s
	<i>Bowdichia virgilioides</i> H, B & K.	16	0,69 ^{jj}	19,97 ^q
	<i>Caesalpinia aff. pyramida</i> 'is Tul.	22	0,98 ^{ee}	17,53 ^t
	<i>Caesalpinia ferrea</i>	24	-	20,68 ^h
	<i>Caesalpinia microphylla</i> Mart.	24	-	17,53 ^t
	<i>Cenostigma gardnerianum</i> Tul.	157	0,80 ⁱⁱ	19,49 ^u
	<i>Cenostigma macrophyllum</i>	203	1,20 ^v	20,27 ^v
	<i>Cenostigma pyramidale</i>	136	-	17,53 ^t
	<i>Copaifera langsdorffii</i> Desf.	27	0,65 ⁱⁱ	18,89 ^h
	<i>Dalbergia</i> sp	157	0,77 ^p	20,48 ^p
	<i>Dimorphandra mollis</i>	18	0,70 ^p	20,67 ^p
	<i>Hymenaea courbaril</i> L.	62	0,88 ^b	20,05 ^b
	<i>Hymenaea stigonocarpa</i>	63	0,78 ^p	20,30 ^p
	<i>Luetzelburgia auriculata</i>	22	0,37 ^m	40,33 ^m
	<i>Machaerium</i> sp.3	36	0,99 ^d	-
	<i>Mimosa acutistipula</i> genth.	14	0,86 ^d	19,46 ^d
<i>Mimosa caesalpinifolia</i> Benth.	21	0,86 ^d	19,46 ^d	
<i>Mimosa tenuiflora</i> (Willd.) poiret	63	0,86 ^m	19,46 ^t	
<i>Piptadenia moniliformis</i> Benth.	387	0,65 ⁱⁱ	19,59 ^h	
<i>Platypodium elegans</i> Vogel	42	0,82 ^d	-	
<i>Sclerolobium aureum</i>	91	0,61 ^{ff}	18,79 ^m	
<i>Sclerolobium paniculatum</i> Vogel	105	0,72 ^m	22,70 ^m	
Flacourtiaceae	<i>Casearia decandra</i>	31	0,63 ^w	-
Liyhraceae	<i>Lafoensia pacari</i>	27	0,74 ^p	20,03 ^p

Família	Espécie	Indivíduos Arbóreos (und.)	Densidade Básica - ρ_b (g/cm ³)	Poder Calorífico Superior - PCS (MJ/kg)
Malpighiaceae	<i>Byrsonima verbascifolia</i>	10	0,48 ^p	19,96 ^p
	<i>Byrsonima sp.</i>	62	0,58 ^p	20,14 ^p
Malvaceae	<i>Guazuma ulmifolia Lam.</i>	12	0,55 ^w	-
	<i>Apeiba tibourbou</i>	12	0,32 ^{jj}	-
	<i>Luehea candicans</i>	24	0,49 ^{jj}	-
Moraceae	<i>Brosimum gaudichaudii</i>	19	0,65 ^{hh}	19,64 ^x
	<i>Campomanesia xanthocarpa</i>	37	0,86 ^d	-
	<i>Eugenia sp</i>	83	-	19,02 ^h
Myrtaceae	<i>Eugenia dysenterica</i>	15	0,66 ^{jj}	-
	<i>Myrcia sp</i>	31	0,68 ^f	19,13 ^f
	<i>Myrcia sp.5</i>	13	0,68 ^f	19,13 ^f
	<i>Psidium sp.1</i>	21	0,20 ^p	20,01 ^p
	<i>Myrtaceae sp.</i>	76	0,45 ^y	18,39 ^z
Opiliaceae	<i>Agonandra brasiliensis</i>	11	0,67 ^{jj}	-
Polygonaceae	<i>Coccoloba sp</i>	11	0,71 ^{aa}	-
Rubiaceae	<i>Posoqueria sp</i>	18	0,71 ^{jj}	-
	<i>Rubiaceae sp.</i>	39	-	21,32 ^{bb}
Sapotaceae	<i>Pouteria ramiflora (Mart) Radlk.</i>	18	0,70 ^p	20,00 ^p
	<i>Pouteria sp.3</i>	12	0,90 ^p	20,41 ^p
Verbenaceae	<i>Aloysia virgata</i>	15	0,60 ⁱⁱ	-
	<i>Qualea grandiflora Mart.</i>	113	0,69 ^m	20,48 ^m
	<i>Qualea parviflora Mart.</i>	78	0,69 ^p	19,71 ^p
Vochysiaceae	<i>Salvertia covallariaeodora</i>	22	0,59 ^{jj}	-
	<i>Simarouba amara</i>	30	0,35 ^b	19,36 ^b

^a(PONTE *et al.*, 2019); ^b(CUNHA, 1989) *apud* (QUIRINO *et al.*, 2005); ^c(QUIRINO *et al.*, 2005); ^d(FILHO; SARTORELLI, 2015); ^e(SILVA *et al.*, 2017); ^f(SILVA, 2014); ^g(ARAUJO, 2002); ^h(IPT, 1937) *apud* (QUIRINO *et al.*, 2005); ⁱ(OLIVEIRA, 2013); ^j(VALE; FELFILI, 2005); ^k(INGA; CASTILLO, 1984); ^l(CASTILHO; ALZOLA, 1988) *apud* (QUIRINO *et al.*, 2005); ^m(MACHADO NETO, 2013); ⁿ(CUNHA, 2019); ^o(CLINE-COLE; LAST; RICHARDS, 1945); ^p(VALE; BRASIL; LEÃO, 2002); ^q(JARA, 1989) *apud* (QUIRINO *et al.*, 2005); ^r(MORI *et al.*, 2003); ^s(KUMAR JAIN, 1992); ^t(JÚNIOR *et al.*, 2015); ^u(BRAND *et al.*, 2016); ^v(ARAÚJO *et al.*, 2018); ^w(COSTA *et al.*, 2014); ^x(MARABOTO *et al.*, 1989); ^y(HSING; PAULA; PAULA, 2016); ^z(HABITZREITER *et al.*, 2020); ^{aa}(MARQUEZ-REYNOSO *et al.*, 2017); ^{bb}(VALE; FIEDLER; SILVA, 2005); ^{cc}(SIQUEIRA *et al.*, 2013); ^{dd}(IPT, 1989); ^{ee}(SILVA *et al.*, 2009); ^{ff}(MACHADO NETO *et al.*, 2015); ^{gg}(VALE; BRASIL; MARTINS, 1999); ^{hh}(NOGUEIRA, 2008); ⁱⁱ(HENNE *et al.*, 2017); ^{e ii}(OLIVEIRA, 2014);

Na Tabela 4, estão 4.017 indivíduos arbóreos com seus respectivos PCS ou a ρ_b identificados; no entanto, não foi possível identificar o PCS e a ρ_b de 240 indivíduos de 11 espécies, ou seja, 5,6%, conforme a Tabela 5.

Tabela 5 – Espécies sem identificação de Poder Calorífico Superior (PCS) e a Densidade Básica (ρ_b) na literatura.

Família	Espécie	Indivíduos Arbóreos (und.)
	Indeterminada 00	135
Indeterminada	Indeterminada 01	88
	Indeterminada 06	22
<i>Arecaceae</i>	<i>Bactris setosa</i>	74
<i>Chrysobalanaceae</i>	<i>Hirtella ciliata Mart. & Zucc.</i>	16
	<i>Fabaceae sp.04</i>	17
<i>Fabaceae</i>	<i>Parkia platycephala Benth.</i>	8
	<i>Swartzia flaemingii Raddi</i>	12
	<i>Vouacapoua sp.1</i>	12
<i>Lamiaceae</i>	<i>Vitex sp</i>	77
<i>Melastomataceae</i>	<i>Mouriri elliptica Mart.</i>	24

Com base nos dados dispostos na Tabela 4 foram calculadas as estatísticas básicas de PCS e ρ_b das espécies encontradas em cada um dos troncos de linhas de transmissão analisados. Os resultados obtidos estão dispostos na Tabela 6.

Tabela 6 – Valores médios de Poder Calorífico Superior (PCS) e a Densidade Básica (ρ_b) por tronco de linhas de transmissão.

Tronco	Trecho	Média ρ_b (kg/m ³)	Desvio Padrão ρ_b (kg/m ³)	Média PCS (MJ/kg)	Desvio padrão PCS (MJ/kg)
A	Colinas - São João	682,24	211,17	19,68	0,99
B	Colinas - Sobradinho	706,35	176,92	19,72	1,11
C	Teresina II - Sobral III	741,29	177,19	20,40	5,26

Foi realizada uma análise de variância (ANOVA) das médias de Densidade Básica e Poder Calorífico Superior encontradas para os três troncos da Tabela 6. Para a densidade básica, foi encontrado um valor estatístico F de 0,78 para um valor crítico de 3,11, ou seja, não houve diferença significativa ($p < 0,05$) entre médias. Quanto ao Poder Calorífico Superior foi encontrado um valor estatístico F de 0,51, inferior ao valor crítico de 3,11, ou seja, também não foi encontrada diferença significativa ($p < 0,05$) entre médias.

Os dados médios de PCS e ρ_b foram utilizados como referência para as espécies da Tabela 5 cujos valores não foram identificados na pesquisa bibliográfica.

Os inventários florestais analisados trazem a informação de volume médio por indivíduo arbóreo catalogado. Com a informação de ρ_b e volume, é possível calcular a massa de madeira por espécie, utilizando a Equação (1). Aplicando a fórmula da Equação

(2) é possível obter a carga de incêndio específica de cada um dos troncos de linhas de transmissão analisados, conforme demonstra a Tabela 7.

Tabela 7 – Carga de incêndio específica por tronco de linha de transmissão.

Tronco	Trecho	Massa (ton)	Poder Calorífico (MJ/kg)	Área (km ²)	Carga de incêndio específica (MJ/m ²)
A	Colinas – São João	16.173,86	19,68	3,58	88,94
B	Colinas – Sobradinho	21.853,17	19,72	12,81	33,65
C	Teresina II – Sobral III	16.671,70	20,40	1,98	171,78

Com o objetivo de avaliar se essa diferença entre os valores de carga de incêndio específica dos troncos de linhas de transmissão analisadas tem relação com o desempenho elétrico da linha, foram analisados os desligamentos forçados provocados por incêndios florestais ocorridos nos três trechos de linhas nos anos de 2018 e 2019. A Tabela 8 demonstra os resultados de desempenho por tronco.

Tabela 8 – Quantidade relativa de desligamentos forçados nos troncos de linhas de transmissão analisados.

Tronco	Linhas de Transmissão em 500 kV	Desliga-mentos	Extensão linha (km)	Desliga-mentos no tronco	Extensão tronco (km)	Deslig./ 100 km
A	Colinas / Rib.Goncalves C2	4	367	17	720	2,50
	Rib.Goncalves / S.Joao Piaui C2	13	353			
	Colinas / Rib.Goncalves C1	4	367			
B	Rib.Goncalves / S.Joao Piaui C1	14	353	18	930	1,72
	S.Joao Piaui / Sobradinho C2	0	210			
C	Teresina II / Sobral III C1	5	152	5	152	3,29

O agrupamento de diferentes linhas em um tronco para análise de desempenho foi necessário devido à forma como foram feitos os inventários florestais analisados. O tronco A abrangeu duas linhas de transmissão em 500 kV, no trecho entre Colinas/TO e São João do Piauí/PI. O tronco B corresponde a três linhas de transmissão em 500 kV, no trecho entre Colinas/TO e Sobradinho/BA. O tronco C corresponde a um trecho de 152 km da LT 500 kV Teresina II – Sobral III, entre as cidades de Teresina/PI e Piri-piri/PI. O tronco C teve seu inventário florestal publicado em 2019, quinze anos após a entrada em operação comercial da linha, em pleito de revisão do licenciamento ambiental junto ao órgão executivo licenciador. A concessionária responsável pela linha tomou essa atitude devido ao mau desempenho da instalação:

“Esta importante linha de transmissão de energia tem sofrido uma elevada quantidade de desligamentos devidos aos incêndios

florestais que atingem sua faixa de servidão administrativa. Nos dois últimos anos registramos 36 desligamentos pondo em risco o abastecimento de energia elétrica da nossa região nordeste. A Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL que acompanha mensalmente os resultados operacionais do sistema elétrico nacional, classificou a LT Teresina II – Sobral II como a linha do SIN – Sistema Interligado Nacional com maior número de desligamentos devido às queimadas e aos incêndios florestais e por esta razão está exigindo providências dessa Transmissora para redução deste índice.” (ROCHA et al., 2019).

O mau desempenho constatado pelo órgão regulador foi observado em períodos anteriores ao ano de 2017. Não obstante, no período analisado neste trabalho, a LT 500 kV Teresina II – Sobral III foi a que apresentou o maior número de desligamentos provocados por incêndios florestais por trecho de 100 km. Uma análise de correlação entre carga de incêndio e o número de desligamentos por 100 km foi realizada e está descrita na Figura 21.

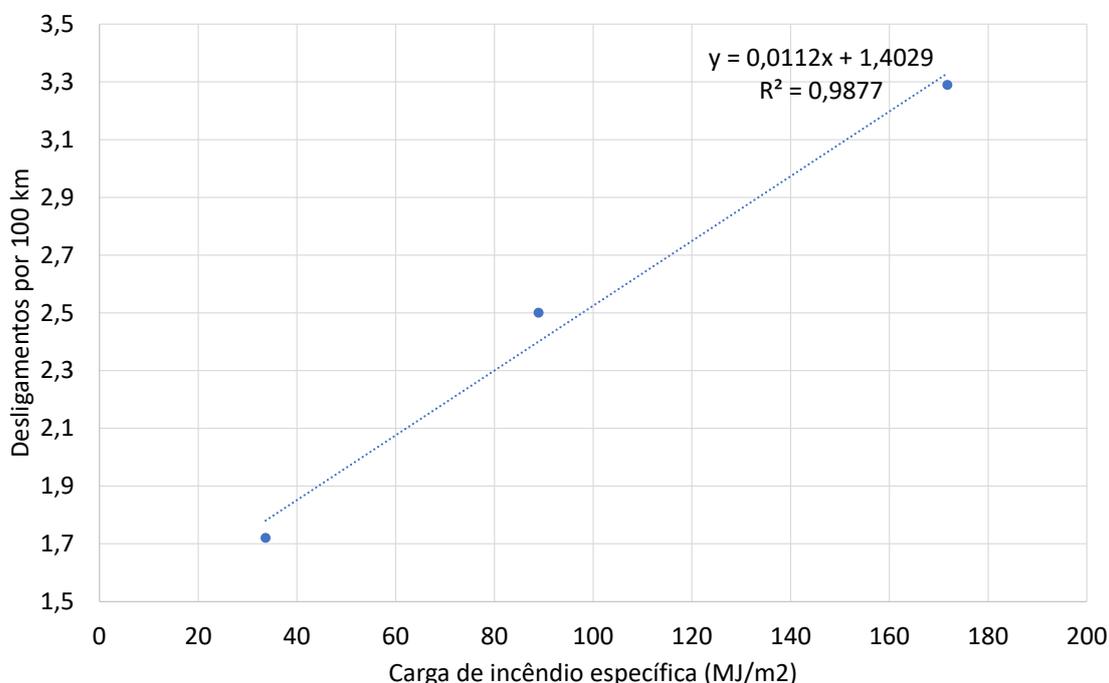


Figura 21 – Desligamentos de linhas de transmissão por 100 km de linha em função da carga de incêndio

A Figura 21 revela que há elevada correlação ($R^2=0,9877$) entre a carga de incêndio específica e o número de desligamentos provocados por incêndios florestais por 100 km

em cada tronco de linha de transmissão. O resultado demonstra que as características dos indivíduos arbóreos perpassados pelas linhas de transmissão têm influência preponderante no desempenho dessas instalações. Tal resultado deixa claro que as escolhas de traçados de novas linhas de transmissão devem evitar trechos de adensamento florestal, não só pelos fatores ambientais, mas também pelo melhor desempenho operacional e menores custos de manutenção da linha de transmissão.

O teste de comparação de médias (ANOVA) de Densidade Básica e Poder Calorífico Superior das espécies madeireiras inventariadas revelou que não há diferença estatística significativa entre os troncos de linhas de transmissão estudados. Observando os dados de massa e as áreas passíveis de desmatamento disponíveis na Tabela 6, percebemos que há diferença significativa nos adensamentos de biomassa entre os diferentes troncos estudados. O motivo pelo qual isso ocorre pode ser explicado pela fisionomia da vegetação existente em cada tronco.

No tronco A, a área total desmatada foi prevista em 3,58 km². Dessa parcela, 8,14% correspondia à caatinga, 38,38% a floresta e 53,48% ao cerrado (PEREIRA; TAVARES, 2009). No tronco B, a previsão de área desmatada foi de 12,81 km², sendo 20,00% correspondente à área de caatinga, 27,18% à área de transição e 52,81% ao cerrado (ROCHA *et al.*, 2005). Por fim, o tronco C tinha uma previsão de supressão de área de 1,98 km² contendo 25,81% de cerrado, 34,67% de área de tensão ecológica e 39,50% de floresta estacional semidecidual (ROCHA *et al.*, 2019).

Percebemos que o tronco C, com maior vulnerabilidade aos desligamentos por incêndios florestais, tem como característica possuir 74,17% da sua área classificada como floresta estacional semidecidual ou área de tensão ecológica. Neste tronco, também foi encontrada a menor proporção de área de cerrado (25,81%), sendo essa fisionomia dominante em mais da metade das áreas correspondentes aos troncos A e B.

Por serem formações menos úmidas (ARAÚJO FILHO, 2020), as florestas estacionais semidecíduais parecem estar mais expostas à ocorrência de incêndios florestais.

Segundo Peixoto *et al.* (2012), as florestas estacionais semidecíduais, quando expostas aos incêndios florestais, podem aumentar a riqueza e a diversidade de espécies. Esse comportamento estaria relacionado à abertura de clareiras, que favorece o

recrutamento de espécies pioneiras e secundárias. Essa característica, ao longo do tempo, pode explicar a maior carga de incêndio observada nessas áreas.

Os fatores climáticos também podem influenciar o desempenho dos troncos frente aos incêndios florestais; no entanto, essas informações não estão disponíveis nos inventários florestais analisados.

4.2. Análise de qualidade das informações de localização de defeito em desligamentos de linhas de transmissão provocados por incêndios florestais

Com base nos dados do ONS, ocorreram 7.439 desligamentos forçados no sistema de transmissão brasileiro entre os anos de 2018 e 2019. Considerando as 12 linhas de transmissão estudadas, o número de desligamentos foi de 165. A classificação resumida das causas desses desligamentos é apresentada na Tabela 9.

Tabela 9 – Desligamentos forçados ocorridos no sistema de transmissão brasileiro nos anos de 2018 e 2019

Classificação	Todo o sistema de transmissão		Sistema estudado	
	Quantidade de desligamentos	Percentual de desligamentos	Quantidade de desligamentos	Percentual de desligamentos
Demais causas	5.611	75,4%	81	49,1%
Indeterminada	933	12,5%	17	10,3%
Incêndios Florestais	895	12,0%	67	40,6%
Total Geral	7.439	100,00%	165	100,00%

A Tabela 9 destaca os desligamentos provocados por incêndios florestais e aqueles sem causa identificada. Considerando todo o sistema de transmissão, no período, 12,0% dos desligamentos foram provocados por incêndios florestais. Quando restringimos as linhas selecionadas para este estudo, o percentual de desligamentos por incêndios florestais atinge 40,6%, sendo a principal causa de desligamentos nesse conjunto.

Os 67 desligamentos provocados por incêndios florestais nas linhas de interesse foram comparados com os dados históricos de focos de incêndio obtidos do INPE. Para cada desligamento, foram procurados focos de incêndio que afetassem ao menos um vão da linha de transmissão na mesma data do evento. Os resultados dessa análise são demonstrados na Tabela 10, com detalhamento por linha de transmissão estudada.

Tabela 10 – Desligamentos provocados por incêndios florestais nos anos de 2018 e 2019 discriminados por linhas de interesse.

Instalação	Desligamentos classificados como provocados por incêndios florestais		
	Total	Validado	Percentual
LT 500 kV Colinas / Rib. Gonçalves C1	3	2	66,7%
LT 500 kV Colinas / Rib. Gonçalves C2	4	4	100,0%
LT 500 kV Imperatriz / Colinas C2	1	1	100,0%
LT 500 kV Imperatriz / P. Dutra C1	7	7	100,0%
LT 500 kV Imperatriz / P. Dutra C2	3	3	100,0%
LT 500 kV Rib. Gonçalves / S. João do Piauí C1	14	12	85,7%
LT 500 kV Rib. Gonçalves / S. João do Piauí C2	19	16	84,2%
LT 500 kV Teresina II/ P. Dutra C1	2	1	50,0%
LT 500 kV Teresina II/ P. Dutra C2	5	5	100,0%
LT 500 kV Teresina II/ Sobral III C1	1	1	100,0%
LT 500 kV Teresina II/ Sobral III C2	8	7	87,5%
Total	67	59	88,1%

Depreendemos pela Tabela 10 que há 8 de 67 desligamentos (11,94%), classificados como incêndios florestais, em que não foi possível identificar focos de incêndio em nenhum vão da linha analisada no dia reportado. Esses desligamentos podem ser considerados falsos positivos para desligamentos por incêndios florestais.

A existência de falsos positivos foi encontrada em 5 de 11 linhas com desligamentos provocados por incêndios florestais reportados. É importante ressaltar que, na LT 500 kV Imperatriz / Colinas C1, não foram reportados desligamentos por incêndios florestais nos anos de 2018 e 2019.

Considerando os 895 desligamentos por incêndios florestais de todo o sistema de transmissão (ver Tabela 9), podemos admitir, com um nível de confiança de 95% e uma margem de erro de $\pm 7,47\%$, que há entre 40 e 174 desligamentos cujas causas foram classificadas como incêndios florestais de forma equivocada.

Considerando a posição indicada da ocorrência do incêndio florestal, comparamos a localização reportada pelos localizadores de falta com os dados geoespacializados dos focos de incêndio capturados pelos satélites. A comparação foi feita por vão para cada linha de transmissão.

Tipicamente, as concessionárias de energia utilizam os dados dos localizadores de falta para reportar a localização dos defeitos numa linha de transmissão. Ocorre, como

descrito em diversos estudos sobre o assunto, que os incêndios florestais são distúrbios de alta impedância e que, nesses casos, o erro dos equipamentos localizadores pode chegar a 6,82% do comprimento da linha (SILVA; LIMA; SOUZA, 2012; MAMIŞ; ARKAN; KELEŞ, 2013; SOUSA *et al.*, 2005). Considerando as linhas de transmissão estudadas, o comprimento médio é de 330 km. Ou seja, para essas linhas, o erro do localizador de falta poderá chegar a 22 km em média.

Assim, no caso da localização reportada, foi considerado erro de 10 km em relação ao ponto central, o que corresponde a uma faixa de 20 km de linha. O ponto central foi obtido a partir do traçado geoespacializado da linha de transmissão e da distância indicada do defeito a partir do localizador de falta.

Para os focos de incêndio, consideramos a resolução de 1km², mesmo para frentes de fogo de apenas 30 m, ou seja, a partir do ponto central da ocorrência de um foco de incêndio, todos os vãos afetados dentro de um raio de 1 km m foram considerados. No caso de vários focos de incêndio contíguos, toda a área afetada foi considerada.

Consideramos coincidentes todos aqueles desligamentos em que ao menos um dos vãos reportados pelo localizador de falta da linha coincide com o vão afetado pelo foco de incêndio na mesma data. A Figura 22 demonstra um exemplo de como foi feita a análise.

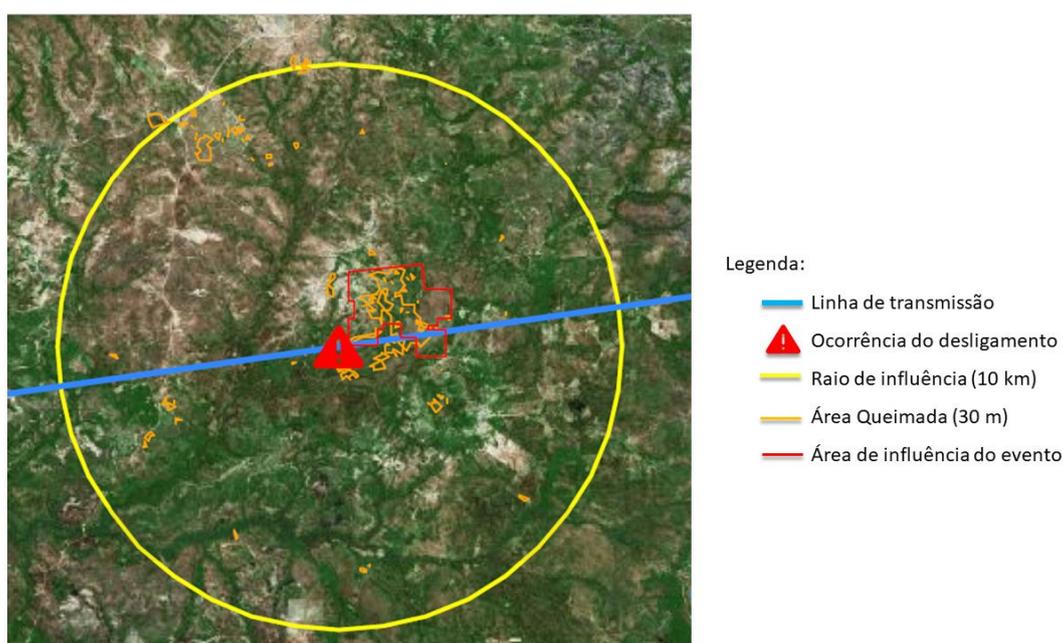


Figura 22 – Exemplo de análise de focos de incêndio por vão (Fonte: Sistema GGT)

Na Figura 22 exemplificamos um desligamento ocorrido na LT 500 kV Rib. Gonçalves / S. João do Piauí C1 no dia 24/9/2018. Considerando a localização reportada do desligamento, foi estabelecido um raio de 10 km. No interior desse raio, foram identificados 19 focos de incêndio que afetaram a instalação. Este foi um dos desligamentos classificados como coincidentes na Tabela 11.

Tabela 11 – Classificação dos desligamentos quanto à localização do foco de incêndio

Instalação	Classificação dos desligamentos		
	Validado	Coincidente	Percentual
LT 500 kV Colinas / Rib. Gonçalves C1	2	2	100,0%
LT 500 kV Colinas / Rib. Gonçalves C2	4	2	50,0%
LT 500 kV Imperatriz / Colinas C2	1	1	100,0%
LT 500 kV Imperatriz / P. Dutra C1	7	0	0,0%
LT 500 kV Imperatriz / P. Dutra C2	3	0	0,0%
LT 500 kV Rib. Gonçalves / S. João do Piauí C1	12	6	50,0%
LT 500 kV Rib. Gonçalves / S. João do Piauí C2	16	7	43,8%
LT 500 kV Teresina II/ P. Dutra C1	1	1	100,0%
LT 500 kV Teresina II/ P. Dutra C2	5	2	40,0%
LT 500 kV Teresina II/ Sobral III C1	1	0	0,0%
LT 500 kV Teresina II/ Sobral III C2	7	1	14,3%
Total	59	22	37,3%

De acordo com os dados da Tabela 11, há apenas 22 desligamentos por incêndios florestais em que foi possível identificar focos de incêndio coincidentes com a localização de falta reportada pelo agente transmissor. Esses 22 casos são os considerados precisos e os demais 37, considerando apenas o conjunto de desligamentos validados da Tabela 10, são considerados imprecisos.

Para os 895 desligamentos por incêndios florestais de todo o sistema de transmissão (ver Tabela 9), podemos aferir, com um nível de confiança de 95% e uma margem de erro de $\pm 10,82\%$, que há entre 504 e 698 desligamentos classificados como incêndios florestais cujas localizações foram reportadas de forma imprecisa.

É importante destacar que tanto o operador de rede quanto as concessionárias do sistema de transmissão têm ferramentas para refinar os dados de localização de defeitos provocados por incêndios florestais em linhas de transmissão, como os dados fornecidos pelo Programa Queimadas (INPE, 2017).

Para efeitos de uma análise por vãos de linhas de transmissão, a utilização das informações de localização de falta se mostrou inadequada. Considerando o fenômeno dos incêndios florestais, uma informação disponível e com precisão adequada para análise por vão são os focos de incêndios.

No período de 2018 e 2019, o INPE aferiu 47.762 focos de incêndio que afetaram as doze linhas de transmissão estudadas. Com base no dia da ocorrência de cada um dos focos, foi feita uma comparação com os desligamentos das linhas de transmissão. A Tabela 12 demonstra os resultados encontrados por linha de transmissão.

Tabela 12 – Focos de incêndio nos vãos das doze linhas de transmissão analisadas

Instalação	Quantidades de focos de incêndio		
	Total	Desligamento	Percentual
LT 500 kV Colinas / Rib. Gonçalves C1	4.200	133	3,2%
LT 500 kV Colinas / Rib. Gonçalves C2	4.432	287	6,5%
LT 500 kV Imperatriz / Colinas C1	1.255	53	4,2%
LT 500 kV Imperatriz / Colinas C2	1.070	8	0,7%
LT 500 kV Imperatriz / P. Dutra C1	4.622	99	2,1%
LT 500 kV Imperatriz / P. Dutra C2	4.735	88	1,9%
LT 500 kV Rib. Gonçalves / S. João do Piauí C1	9.839	2.032	19,8%
LT 500 kV Rib. Gonçalves / S. João do Piauí C2	9.839	3.145	32,0%
LT 500 kV Teresina II/ P. Dutra C1	2.122	544	25,6%
LT 500 kV Teresina II/ P. Dutra C2	2.144	516	24,1%
LT 500 kV Teresina II/ Sobral III C1	1.558	78	5,0%
LT 500 kV Teresina II/ Sobral III C2	1.513	276	18,2%
Total	47.762	7.259	15,2%

Por essa análise, concluímos que houve 7.259 focos de incêndio que provocaram o desligamento de uma das doze linhas de transmissão por qualquer motivo reportado. Os motivos que levam um foco de incêndio a provocar ou não um desligamento serão objeto de discussão nos Itens 4.3 e 4.4. Contudo, percebemos que há uma maior prevalência de causa (foco) e efeito (desligamento) em algumas linhas específicas.

Na LT 500 kV Rib. Gonçalves / S. João do Piauí C2, 32,0% dos focos de incêndio provocaram desligamentos da instalação. Na LT 500 kV Imperatriz / Colinas C2, apenas 0,7% dos focos levaram ao desligamento desta.

Considerando os troncos de linhas de transmissão, notamos que, no trecho entre as subestações Teresina II e Sobral III, houve uma prevalência de 5% de focos que causaram

desligamentos para o circuito 1 (C1) e de 18,2% no circuito 2 (C2), ou seja, 3,6 vezes maior. Considerando que ambas as linhas de transmissão têm pontos de origem e destino iguais e traçados muito semelhantes, devemos estudar outros fatores para explicar tal diferença de desempenho.

4.3. Características de susceptibilidade de vãos de linhas de transmissão de 500 kV a desligamentos forçados provocados por incêndios florestais

A partir dos dados geoespacializados, os focos de incêndio ocorridos nos anos de 2018 e 2019 foram associados a cada vão das linhas de transmissão de acordo com as informações de coordenadas previamente conhecidas.

Com base nos focos de incêndios detectados no interior dos vãos das linhas de transmissão analisadas, foi construída a Tabela 13.

Tabela 13 – Descrição dos dados analisados

Consequência	Focos		Vãos	
	Quantidade	Percentuais	Quantidade	Percentuais
Com desligamento	7.074	15,1%	370	5,2%
Sem desligamento	39.622	84,9%	6.760	94,8%
Total Geral	46.696	100,0%	7.130	100,0%

Com base na Tabela 13, é possível perceber que a maioria dos focos de incêndio e vãos atingidos não causaram desligamento da linha de transmissão associada. Do ponto de vista da linha de transmissão, conforme demonstrado no Item 4.1, já sabemos que a carga de incêndio tem uma grande influência na susceptibilidade a desligamentos provocados por incêndios florestais. No entanto, considerando a granularidade por vãos, há outras variáveis que podemos analisar.

Considerando as variáveis contínuas disponíveis, foi realizada uma análise estatística descritiva dividindo os vãos em dois grupos: aqueles que provocaram desligamentos das LTs quando expostos aos focos de incêndio e aqueles que, sob a mesma condição, não provocaram desligamentos. No total, foram avaliadas nove variáveis, conforme demonstra a Tabela 14.

Tabela 14 – Estatística descritiva das variáveis analisadas

Variável	Desligamento (1-sim/0-não)	N	Média	Desvio padrão	Erro padrão da média
Focos (quantidade)	0	6.760	5,86	10,07	0,12
	1	370	19,12	27,78	1,44
NDVI (adimensional*)	0	6.760	36,53	15,06	0,18
	1	370	34,62	14,55	0,76
Largura (metros)	0	6.760	53,65	27,49	0,33
	1	370	48,18	30,51	1,59
Altura (metros)	0	6.760	33,69	5,79	0,07
	1	370	35,18	3,95	0,21
Isoladores (quantidade)	0	6.760	24,26	1,35	0,02
	1	370	24,60	0,99	0,05
Dias sem chuva (quantidade)	0	6.760	30,62	30,55	0,37
	1	370	47,98	35,67	1,85
Umidade (Percentual)	0	6.760	29,42	11,12	0,14
	1	370	23,79	6,23	0,32
Temperatura (°C)	0	6.760	35,34	2,27	0,03
	1	370	36,33	1,64	0,09
Vento (metros/segundo)	0	6.760	2,73	0,89	0,01
	1	370	2,83	0,95	0,05

*Escala ampliada em cem vezes.

Para uma melhor interpretação dos resultados da Tabela 14, foram construídos os gráficos de barras de erros da Figura 23. Nessa figura, o número zero das abscissas representa o conjunto sem desligamentos e o número um o conjunto com desligamentos. Para as análises, foi utilizado um intervalo de confiança de 95%.

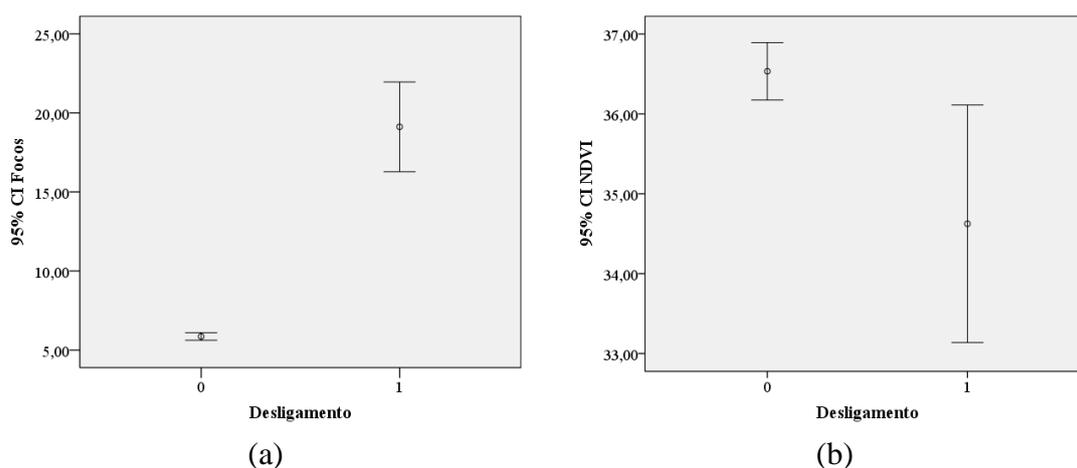


Figura 23 – Barras de erro das variáveis analisadas: (a) focos de incêndio; (b) índice NDVI ampliado; (c) largura da faixa de servidão; (d) altura das torres; (e) número de isoladores; (f) dias sem chuva; (g) umidade relativa; (h) temperatura; e (i) velocidade do vento

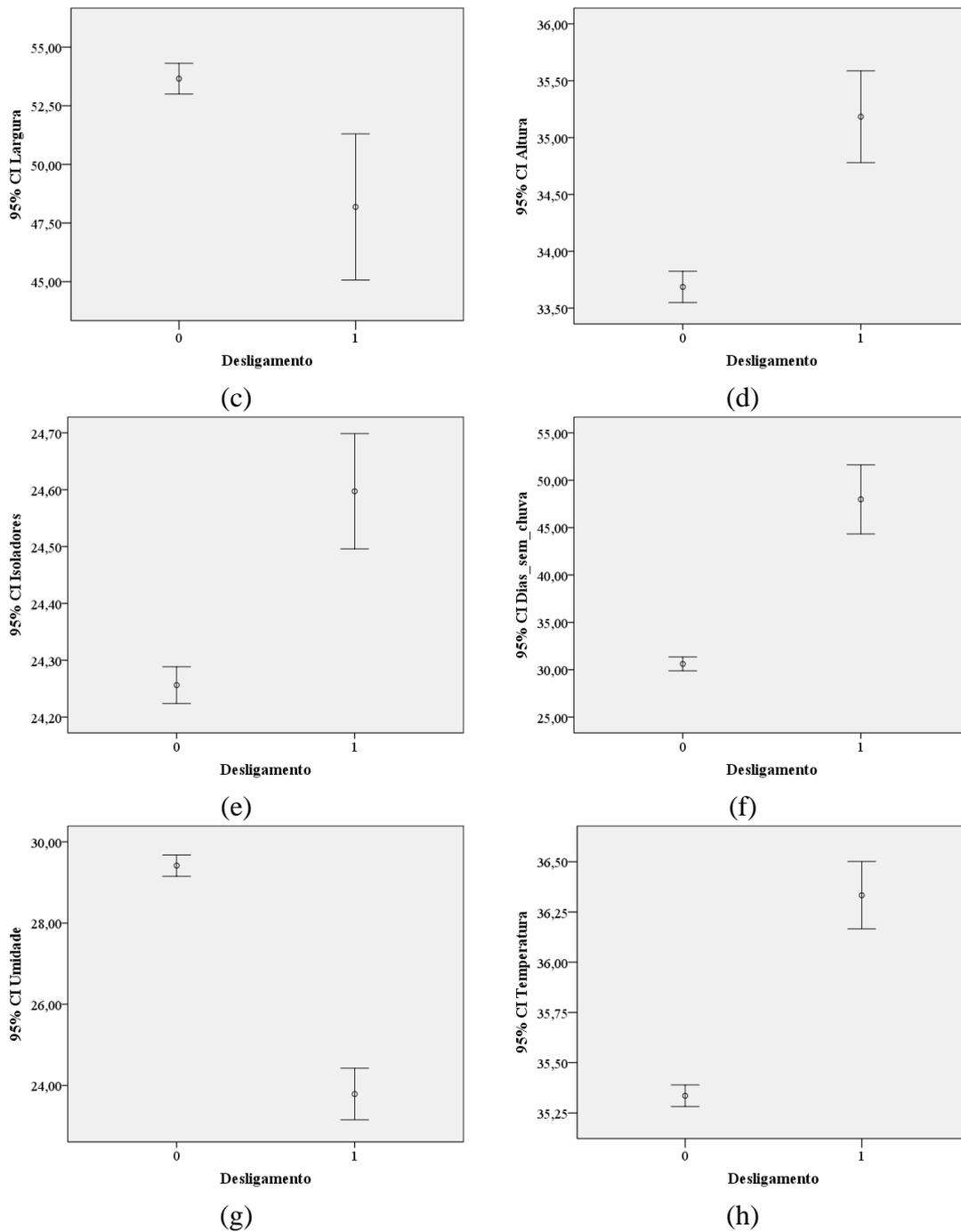


Figura 23 (continuação) – Barras de erro das variáveis analisadas: (a) focos de incêndio; (b) índice NDVI ampliado; (c) largura da faixa de servidão; (d) altura das torres; (e) número de isoladores; (f) dias sem chuva; (g) umidade relativa; (h) temperatura; e (i) velocidade do vento

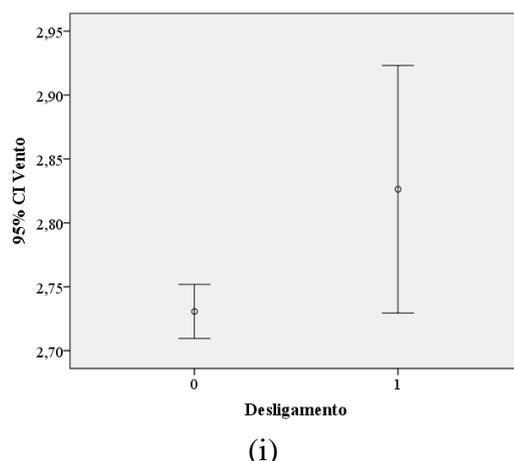


Figura 23 (continuação) – Barras de erro das variáveis analisadas: (a) focos de incêndio; (b) índice NDVI; (c) largura da faixa de servidão; (d) altura das torres; (e) número de isoladores; (f) dias sem chuva; (g) umidade relativa; (h) temperatura; e (i) velocidade do vento

Os gráficos de barras de erro da Figura 23 trazem a informação da média (círculo) e do erro padrão da média (banda entre os traços horizontais) de cada variável analisada. Os resultados indicam sobreposição de bandas de valores médios apenas para a variável velocidade do vento. Não obstante, foi realizado um teste t independente para comparação de médias entre os dois grupos de vãos da Tabela 14. Os resultados dessa análise estão demonstrados na Tabela 15.

Tabela 15 – Teste t para igualdade de médias em amostras independentes

Variável	<i>t</i>	Graus de liberdade	Significância bilateral	Correlação de Pearson <i>r</i>
Focos	-21,29	7.128	0,00	0,24
NDVI	2,45	414	0,01	0,12
Largura	3,71	7.128	0,00	0,04
Altura	-4,91	7.128	0,00	0,06
Isoladores	-4,78	7.128	0,00	0,06
Dias sem chuva	-10,55	7.128	0,00	0,12
Umidade	9,65	7.128	0,00	0,11
Temperatura	-8,35	7.128	0,00	0,10
Vento	-2,01	7.128	0,04	0,02

O teste t da Tabela 15 indica que houve diferença significativa entre as médias ($p < 0,05$) para todas as variáveis analisadas, sendo essas diferenças não aleatórias.

Para a variável NDVI, não foi possível rejeitar a hipótese de que as variâncias encontradas para os grupos com e sem desligamentos são significativamente diferentes

(teste de Levene em $p > 0,05$). Por esse motivo, o grau de liberdade dessa variável é inferior aos das demais na Tabela 15.

Considerando o tamanho das consequências (valor de r), nenhuma das variáveis analisadas isoladamente teve um efeito grande sobre os desligamentos (ESPÍRITO SANTO; DANIEL, 2017). Os maiores efeitos indicados são a quantidade de focos e os dias sem chuva.

4.3.1. Análise estatística das variáveis categóricas

Além das nove variáveis contínuas analisadas, há outras três variáveis categóricas que podem ser analisadas: bioma em que se encontra o vão; uso do solo sob o vão; e restrições de limpeza de faixa de servidão impostas pelo órgão executivo licenciador para o vão.

A Figura 24 fornece um perfil acerca dos biomas e tipos de uso do solo ao longo dos 3.998 km de linhas de transmissão estudados.

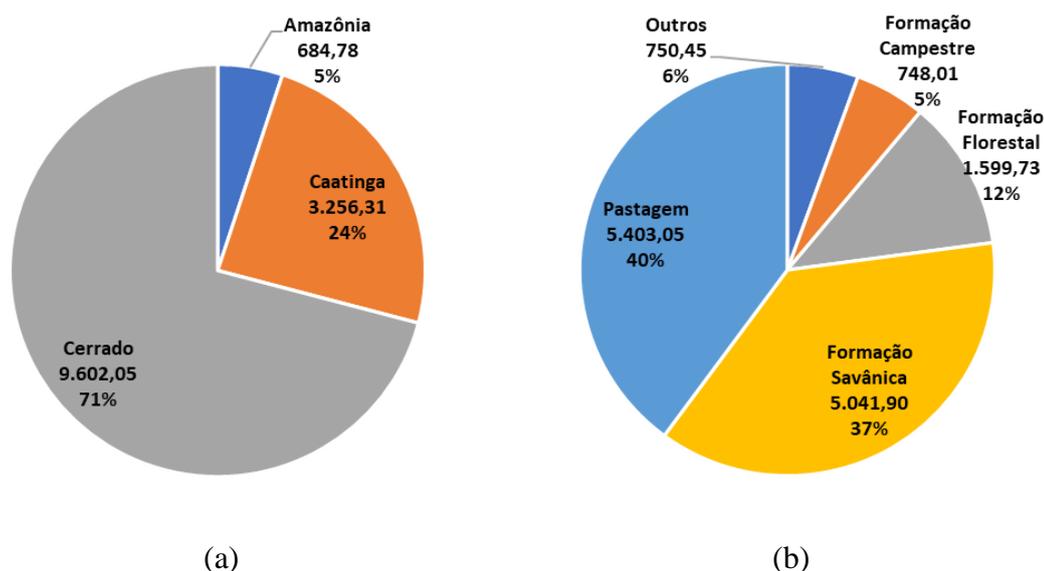


Figura 24 – Áreas em hectares dos vãos analisadas por (a) biomas e (b) tipo de uso do solo

Pela Figura 24, fica demonstrado que a maior parte dos vãos analisados se encontra no bioma cerrado (71%), seguido da caatinga (24%) e Amazônia (5%). O uso do solo concentra-se em pastagens (40%), formação savânica (37%) e formação florestal (12%).

A Figura 25 demonstra a distribuição do tipo de bioma e o uso do solo nos vãos expostos aos focos de incêndio. Nesse caso, é possível que um mesmo vão seja submetido por mais de uma vez a um foco de incêndio. Para os casos de vãos com mais de um tipo de uso do solo ou bioma, consideramos as características majoritárias da área.

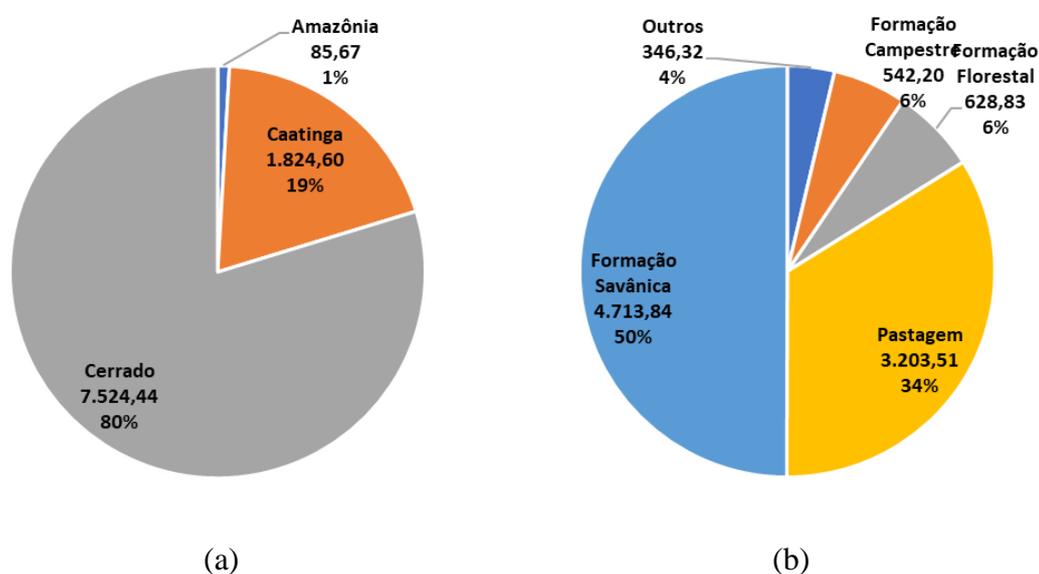


Figura 25 – Áreas em hectares dos vãos com incidência de focos de incêndio por (a) biomas e (b) tipo de uso do solo

Percebe-se uma concentração da ocorrência de focos de incêndio no bioma cerrado. Esse bioma representa 71% da área analisada, mas responde por 80% das áreas atingidas por focos de incêndio. Constatação semelhante é feita para o tipo de uso do solo. As formações savânicas representam 37% da área analisada e 50% das áreas atingidas por focos de incêndio.

Considerando os focos que provocaram desligamentos nas linhas de transmissão, a Figura 26 traz informações sobre os vãos atingidos. As premissas da Figura 25 também foram adotadas para esses gráficos.

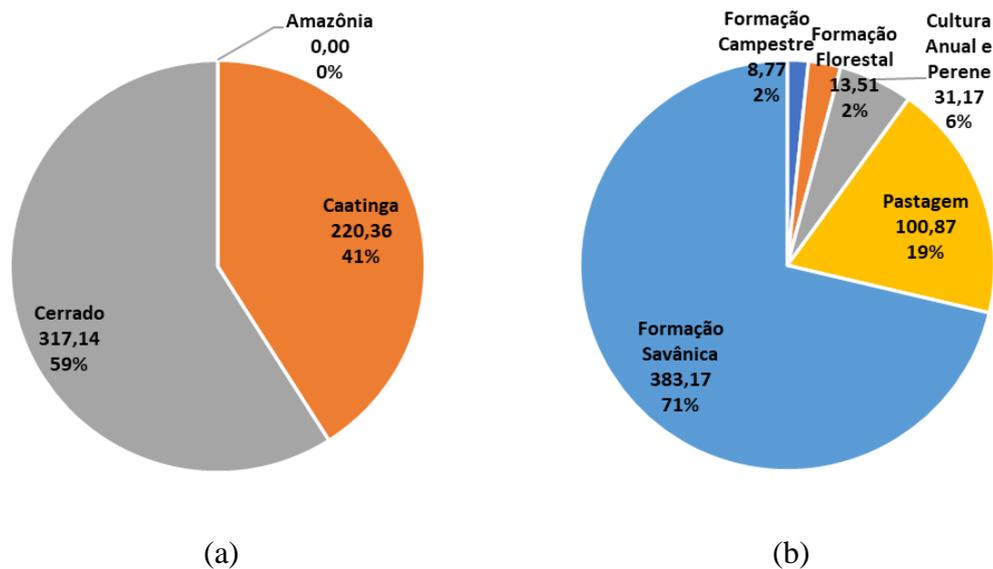


Figura 26 – Áreas em hectares dos vãos com desligamentos por incêndios florestais classificados por (a) biomas e (b) tipo de uso do solo

Considerando-se os biomas, houve desligamentos provocados por incêndios florestais tanto em vãos localizados na caatinga (41%) quanto no cerrado (59%). Considerando o tipo de uso do solo, percebemos uma prevalência de desligamentos nas áreas de formação savânica (71%) e pastagem (19%). Com base nesses resultados, podemos afirmar que as áreas de formação savânica merecem uma maior atenção. Os resultados coincidem com as observações de Hirschberger (2017), que relatou grande incidência de incêndios florestais em áreas de formação savânica na Austrália e na África.

Outra análise foi feita quanto às restrições de limpeza de faixa de servidão impostas pelo órgão executivo licenciador. Nesse caso, cada vão foi analisado quanto à autorização, à autorização com restrições ou à proibição de limpeza de servidão. Os resultados são demonstrados na Figura 27, com detalhamento para os vãos em que foi observado desligamento da linha de transmissão.

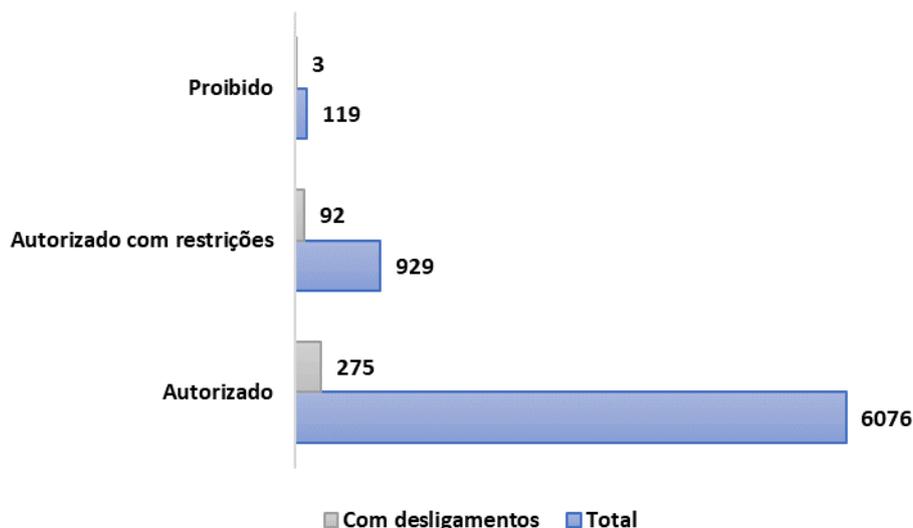


Figura 27 – Número de vãos segundo as restrições de limpeza de faixa

A Figura 27 demonstra que 14,7% (1.048) dos vãos analisados possuíam restrição ou proibição de limpeza de faixa. Considerando o universo dos vãos com focos detectados e que provocaram desligamentos, a Figura 27 demonstra que 25,7% (95) dos vãos analisados possuíam algum tipo de restrição ou proibição de limpeza de faixa.

Os resultados demonstram que 74,3% (275) dos desligamentos ocorreram em vãos sem restrição quanto à limpeza de faixa. Ou seja, as condições de limpeza de faixa impostas pelo licenciamento ambiental não parecem ser fator determinante para a ocorrência de desligamentos de linhas de transmissão provocados por incêndios florestais.

Tendo em vista os resultados observados para as variáveis categóricas, decidimos investigar novamente as variáveis contínuas apenas para os vãos cujo uso do solo foi classificado como formação savânica.

4.3.2. Análise estatística das variáveis contínuas de vãos localizados em áreas de formação savânica

Do total de 7.130 vãos submetidos a focos de incêndio e destacados na Tabela 13, uma parcela de 3.252 (45,6%) vãos estão localizados em áreas de formação savânica. Esses

vãos representam 5.041,9 ha, o que corresponde a 37% da área estudada, conforme ilustrado na Figura 25.

A Tabela 16 demonstra os resultados de estatística descritiva das nove variáveis contínuas, considerando apenas os vãos localizados em áreas de formação savânica.

Tabela 16 – Estatística descritiva das variáveis analisadas para vãos localizados em formações savânicas

Variável	Desligamento (1-sim/0-não)	N	Média	Desvio padrão	Erro padrão da média
Focos (quantidade)	0	3.100	7,26	12,07	0,22
	1	252	19,44	28,97	1,83
NDVI (adimensional*)	0	3.100	35,97	13,35	0,24
	1	252	32,64	12,24	0,77
Largura (metros)	0	3.100	44,11	31,40	0,56
	1	252	42,79	32,08	2,02
Altura (metros)	0	3.100	35,40	5,12	0,09
	1	252	36,35	3,49	0,22
Isoladores (quantidade)	0	3.100	24,59	0,93	0,02
	1	252	24,83	0,73	0,05
Dias sem chuva (quantidade)	0	3.100	36,17	33,08	0,59
	1	252	54,07	36,80	2,32
Umidade (Percentual)	0	3.100	26,68	9,32	0,17
	1	252	22,63	5,15	0,32
Temperatura (°C)	0	3.100	35,55	2,18	0,04
	1	252	36,43	1,54	0,10
Vento (metros/segundo)	0	3.100	7,26	12,07	0,22
	1	252	19,44	28,97	1,83

*Escala ampliada em cem vezes.

A partir dos dados da Tabela 16 e considerando um nível de confiança de 95%, foram elaborados os gráficos de barra de erro da Figura 28. Nessa figura, o número zero das abscissas representa o conjunto sem desligamentos e o número um, o conjunto com desligamentos.

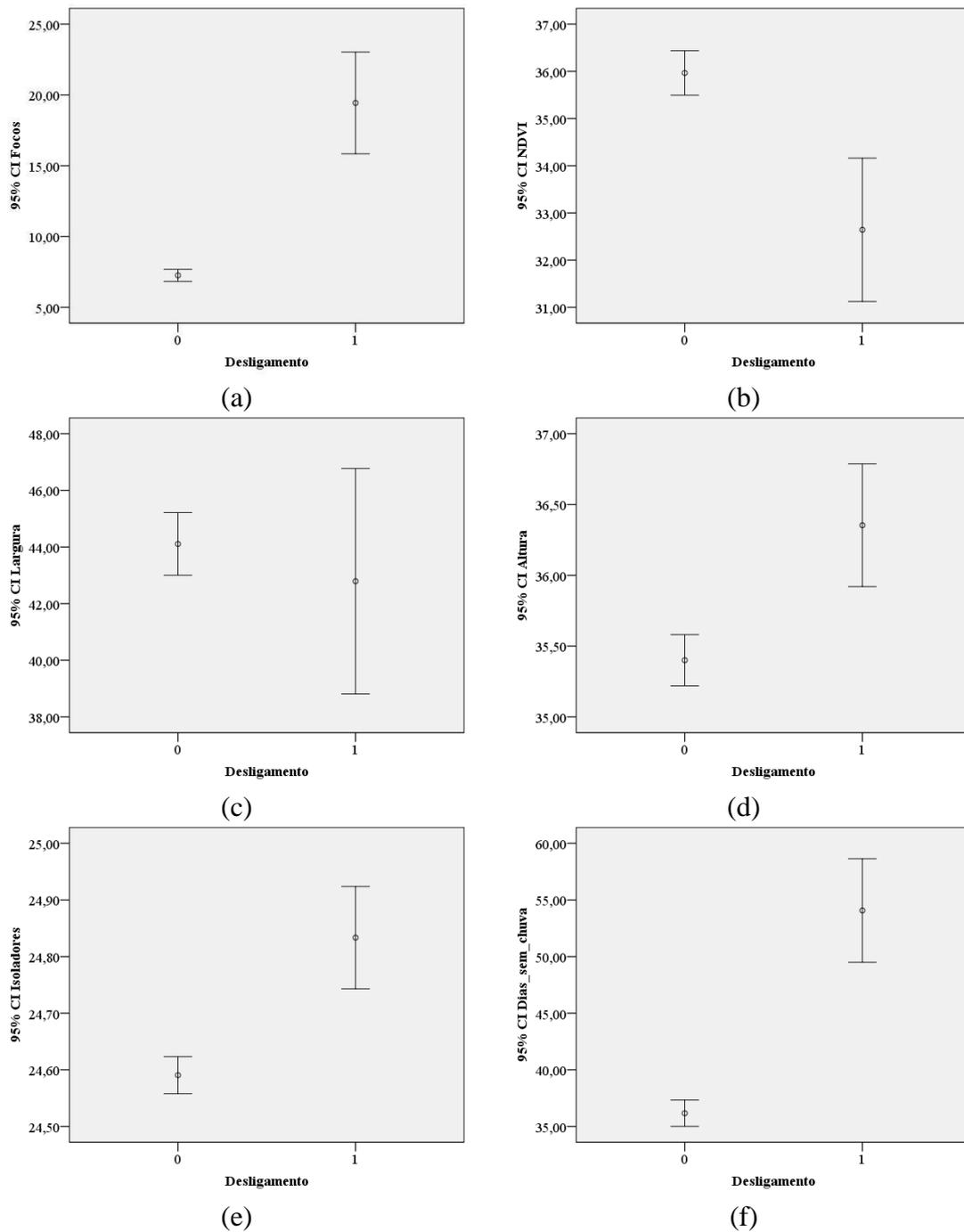


Figura 28 – Barras de erro das variáveis analisadas para o conjunto de vãos localizados em áreas de formação savânica: (a) focos de incêndio; (b) índice NDVI; (c) largura da faixa de servidão; (d) altura das torres; (e) número de isoladores; (f) dias sem chuva; (g) umidade relativa; (h) temperatura; e (i) velocidade do vento

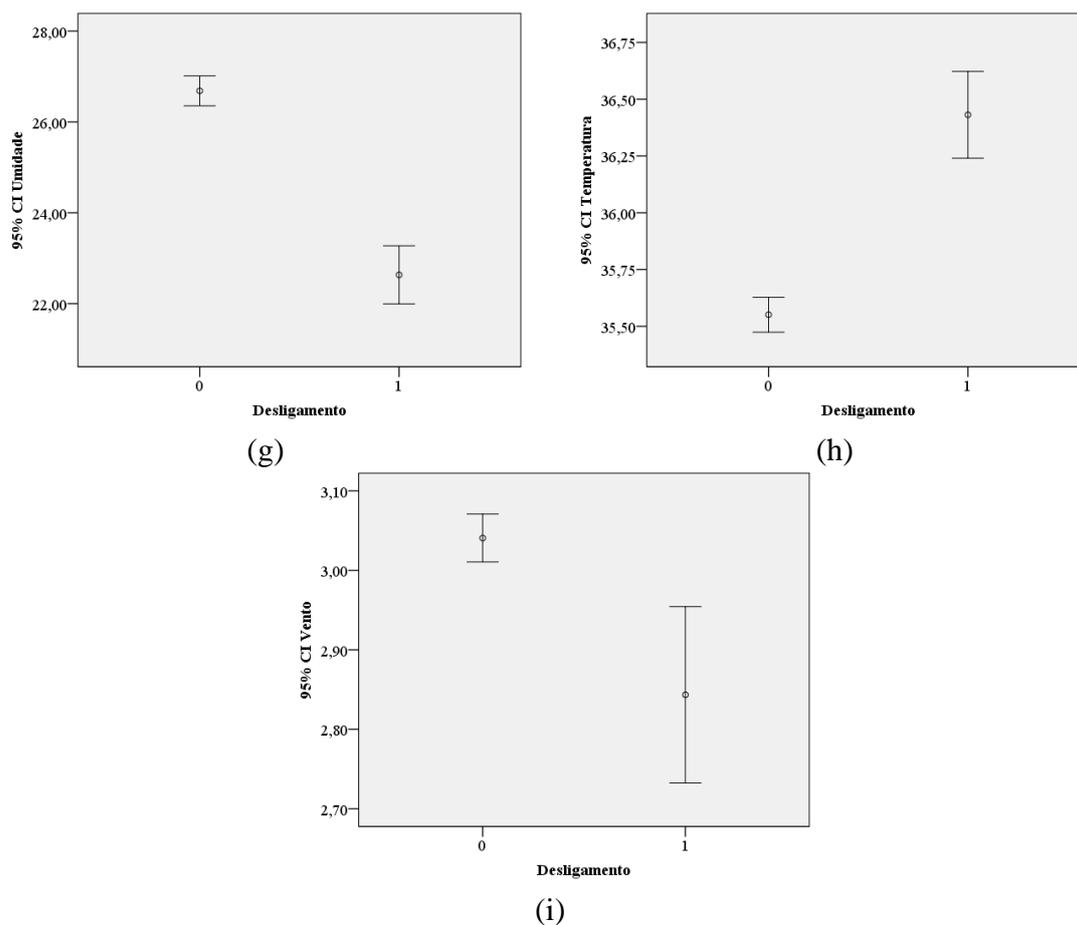


Figura 28 (continuação) – Barras de erro das variáveis analisadas para o conjunto de vãos localizados em áreas de formação savânica: (a) focos de incêndio; (b) índice NDVI; (c) largura da faixa de servidão; (d) altura das torres; (e) número de isoladores; (f) dias sem chuva; (g) umidade relativa; (h) temperatura; e (i) velocidade do vento

A Figura 28 (c) demonstra que a variável largura de faixa teve médias do conjunto sem desligamentos (indicado pelo número 0) totalmente sobrepostas pelo conjunto com desligamentos (indicado pelo número 1).

Da mesma forma que para o caso geral, foi feita uma análise comparativa de médias utilizando o teste t independente. Os resultados dessa análise estão dispostos na Tabela 17.

Tabela 17 – Teste t para igualdade de médias em amostras independentes para vãos localizados em formações savânicas

Variável	<i>t</i>	Graus de liberdade	Significância bilateral	Correlação de Pearson <i>r</i>
Focos	-13,22	3350	0,00	0,22
NDVI	4,11	302	0,01	0,23
Largura	0,63	291	0,53	0,04
Altura	-2,90	3350	0,04	0,05
Isoladores	-4,05	3350	0,00	0,07
Dias sem chuva	-8,18	3350	0,00	0,14

Variável	<i>t</i>	Graus de liberdade	Significância bilateral	Correlação de Pearson <i>r</i>
Umidade	6,82	3350	0,00	0,12
Temperatura	-6,27	3350	0,00	0,11
Vento	3,50	3350	0,00	0,06

Os resultados da estatística *t* indicam que não foram observadas diferenças significativas ($p < 0,05$) entre as médias de larguras de vãos em que os focos de incêndio provocaram ou não o desligamento das linhas de transmissão. Esse resultado valida o que já havia sido observado no gráfico de barras de erro da Figura 28 (c). Em todas as demais variáveis, houve diferença significativa ($p < 0,05$) entre as médias.

Mais uma vez, para a variável NDVI não foi possível rejeitar a hipótese de que as variâncias encontradas para os grupos com e sem desligamentos são significativamente diferentes (teste de Levene em $p > 0,05$). Por esse motivo, o grau de liberdade dessa variável é inferior ao das demais na Tabela 17.

Considerando a correlação de Pearson (*r*), podemos afirmar que os maiores efeitos isolados nos desligamentos são oriundos do número de focos de incêndio observados em cada vão e do índice NDVI. As variáveis ambientais umidade, temperatura e dias sem chuva também apresentaram efeitos isolados com relativo destaque. Contudo, segundo Espírito Santo e Daniel (2017), todas as variáveis têm pequeno efeito isolado nos desligamentos das linhas de transmissão.

Em relação ao caso geral, as análises para o grupo de vãos localizados em áreas de formação savânica mostram uma alteração mais expressiva para a variável índice NDVI, que teve seu valor de *r* praticamente duplicado.

4.4. Modelo predictor de desligamentos de linhas de transmissão expostas aos incêndios florestais

Os resultados iniciais do modelo de regressão logística, quando somente a constante da Equação (13) está incluída, são mostrados na Tabela 18.

Tabela 18 – Resultados iniciais do modelo sem variáveis previsoras

Observados			Previstos		
			Desligamento		Percentual correto
			0	1	
Passo 0	Desligamento	0	0	6.754	100,00
		1	0	370	0,00
	Porcentagem Geral				

Os dados da Tabela 18 indicam que o modelo inicial sem variáveis previsoras tem uma probabilidade de acerto de 94,8%, sempre prevendo a não ocorrência de desligamentos. No entanto, essa saída não tem um significado válido. Ocorre que o número de eventos de focos de incêndios observados sem desligamentos de linhas de transmissão é muito maior que o de eventos com desligamentos. Dessa forma, o modelo considera o evento mais frequente e, simplesmente, associa-o ao valor de saída.

Como forma de evitar que a diferença do número de observações provoque um enviesamento das frequências de observações, os dados disponíveis passaram por uma preparação prévia. Basicamente, o banco de dados contém 370 registros com desligamentos e 6.754 registros sem desligamentos. Para esse segundo conjunto, foi sorteada, de forma aleatória, uma amostra de 370 registros.

Com base nessa consideração, forçamos que as frequências de casos com e sem desligamentos fossem iguais. Conseqüentemente, a probabilidade base de ocorrência de desligamentos torna-se 50% e a probabilidade complementar, da não ocorrência de desligamentos, também se torna 50%. Ou seja, o modelo base torna-se neutro.

Portanto, a primeira estimativa do modelo, quando somente a constante é incluída, foi revisada e descrita na Tabela 19.

Tabela 19 – Modelo Base

Observados			Previstos		
			Desligamento		Percentual correto
			0	1	
Passo 0	Desligamento	0	0	370	0,0
		1	0	370	100,0
	Porcentagem Geral				

Na Tabela 19, os registros com desligamentos são indicados pelo número 1 e os registros sem desligamentos são indicados pelo número 0. Como já era esperado, o modelo conseguiu prever corretamente 50% das ocorrências, dado que as frequências de ocorrências de desligamentos eram iguais. Nesse primeiro passo, o valor da constante utilizada foi zero e os resultados foram não significativos ($p > 0,05$).

As variáveis não consideradas no modelo para o passo 0 são apresentadas na Tabela 20. A estatística geral do modelo (qui-quadrado) foi de 156,83 e foi considerada significativa ($p < 0,05$). Isso significa que as variáveis que não estão no modelo são significativamente diferentes de zero ou, em outros termos, que a adição de uma ou mais dessas variáveis ao modelo irá afetar significativamente o seu poder de previsão.

Tabela 20 – Parâmetros das variáveis fora do modelo no passo 0 de simulação

Variáveis	Pontuação	gl	Sig.
Focos	64,061	1	0,00
NDVI	6,305	1	0,01
Largura	3,065	1	0,08
Altura	18,662	1	0,00
Isoladores	7,830	1	0,01
Dias sem chuva	61,089	1	0,00
Umidade	65,913	1	0,00
Temperatura	45,525	1	0,00
Vento	1,843	1	0,17
Bioma(1)	49,174	1	0,00
Uso(1)	28,831	1	0,00
Autorização(1)	16,520	1	0,00
Estatísticas Gerais	156,830	12	0,00

Os dados de pontuação da Tabela 20 representam a estatística de Wald. Esse é um indicador prévio utilizado pelo SPSS para indicar a ordem de inclusão das variáveis em cada passo de simulação. Para os dados analisados, a estatística de Wald foi não significativa ($p > 0,05$) para as variáveis correspondentes à largura de faixa e à velocidade do vento. As demais variáveis foram consideradas significativas, sendo o maior escore correspondente à variável umidade.

Também na Tabela 20, são mostradas as variáveis predictoras dicotômicas: bioma, uso do solo e autorização de limpeza de faixa. Com base nos resultados da análise estatística descritiva apresentada no Item 4.3, procuramos investigar o efeito do bioma

cerrado no desempenho das linhas de transmissão. Dessa forma, para todos os vãos localizados em áreas de cerrado, atribuímos o valor 1. Para os vãos localizados em outros biomas, atribuímos o valor 0. O mesmo procedimento se repetiu para o uso do solo classificado com formação savânica, que recebeu o valor 1, tendo os demais usos recebido o valor 0. No caso da variável autorização, foram atribuídos valores unitários a todos os vãos sem restrição de limpeza de faixa e 0 para os vãos com restrição parcial ou proibição. As três variáveis dicotômicas analisadas foram consideradas significativas ($p < 0,05$) para o modelo.

A simulação é feita com a inclusão de uma variável por vez, seguindo a ordem imposta pela estatística de Wald apresentada na Tabela 20. Por exemplo, no passo 1, além da constante, a simulação foi feita considerando a variável umidade.

Em cada passo da simulação, os mesmos parâmetros da Tabela 20 são recalculados, sendo a variável com maior estatística de Wald incluída no modelo e as variáveis não significativas ($p > 0,05$) descartadas. A Tabela 21 demonstra o processo para cada passo de simulação.

Tabela 21 – Parâmetros das variáveis fora do modelo nos passos 1 a 7 de simulação

Passo	Variáveis	Pontuação	gl	Sig.
1	Focos	39,58	1,00	0,00
	NDVI	0,57	1,00	0,45
	Largura	0,07	1,00	0,80
	Altura	5,10	1,00	0,02
	Isoladores	1,41	1,00	0,23
	Dias sem chuva	25,60	1,00	0,00
	Temperatura	0,50	1,00	0,48
	Vento	3,92	1,00	0,05
	Bioma(1)	28,27	1,00	0,00
	Uso(1)	10,30	1,00	0,00
	Autorização(1)	5,96	1,00	0,01
	Estatísticas Gerais	94,15	11,00	0,00
	2	NDVI	1,65	1,00
Largura		0,05	1,00	0,83
Altura		2,01	1,00	0,16
Isoladores		0,58	1,00	0,45
Dias sem chuva		23,82	1,00	0,00

Passo	Variáveis	Pontuação	gl	Sig.
	Temperatura	4,54	1,00	0,03
	Vento	5,57	1,00	0,02
	Bioma(1)	21,06	1,00	0,00
	Uso(1)	11,18	1,00	0,00
	Autorização(1)	3,35	1,00	0,07
	Estatísticas Gerais	60,24	10,00	0,00
	NDVI	0,44	1,00	0,51
	Largura	0,69	1,00	0,41
	Altura	0,69	1,00	0,40
	Isoladores	0,05	1,00	0,82
3	Temperatura	5,93	1,00	0,01
	Vento	5,37	1,00	0,02
	Bioma(1)	17,48	1,00	0,00
	Uso(1)	7,15	1,00	0,01
	Autorização(1)	1,27	1,00	0,26
	Estatísticas Gerais	37,32	9,00	0,00
	NDVI	0,28	1,00	0,59
	Largura	1,06	1,00	0,30
	Altura	0,50	1,00	0,48
	Isoladores	0,19	1,00	0,67
4	Temperatura	7,17	1,00	0,01
	Vento	3,54	1,00	0,06
	Uso(1)	2,97	1,00	0,08
	Autorização(1)	0,26	1,00	0,61
	Estatísticas Gerais	20,34	8,00	0,01
	NDVI	0,41	1,00	0,52
	Largura	0,45	1,00	0,50
	Altura	1,96	1,00	0,16
	Isoladores	0,01	1,00	0,93
5	Vento	0,51	1,00	0,47
	Uso(1)	4,26	1,00	0,04
	Autorização(1)	0,95	1,00	0,33
	Estatísticas Gerais	13,53	7,00	0,06
	NDVI	0,49	1,00	0,48
	Largura	0,32	1,00	0,57
	Altura	2,28	1,00	0,13
	Isoladores	0,00	1,00	0,99
6 ^a	Umidade	0,34	1,00	0,56
	Vento	0,08	1,00	0,77
	Uso(1)	4,58	1,00	0,03
	Autorização(1)	1,14	1,00	0,28
	Estatísticas Gerais	13,86	8,00	0,09
7 ^a	NDVI	0,54	1,00	0,46

Passo	Variáveis	Pontuação	gl	Sig.
	Largura	1,21	1,00	0,27
	Altura	0,86	1,00	0,35
	Isoladores	0,21	1,00	0,65
	Umidade	0,03	1,00	0,86
	Vento	0,36	1,00	0,55
	Autorização(1)	0,51	1,00	0,48
	Estatísticas Gerais	9,31	7,00	0,23

a. Variável removida no passo 6: Umidade.

O resumo estatístico dos novos modelos simulados é apresentado na Tabela 22.

Tabela 22 – Estatísticas do novo modelo

Passo	-2 Verossimilhança-log	R² Cox & Snell	R² Nagelkerke
1	951,261 ^a	0,096	0,128
2	896,682 ^b	0,160	0,214
3	872,749 ^b	0,187	0,249
4	855,190 ^b	0,206	0,275
5	847,957 ^b	0,214	0,285
6	848,302 ^b	0,213	0,284
7	843,750 ^b	0,218	0,291

a. A estimativa foi interrompida na iteração número 4 porque as estimativas dos parâmetros mudaram em menos de 0,001.

b. A estimativa foi interrompida na iteração número 4 porque as estimativas dos parâmetros mudaram em menos de 0,001.

Percebemos que, à medida que as variáveis são incluídas, o R² de Nagelkerke aumenta, de forma que, ao final de 7 passos, conseguimos obter o valor de 0,291, numa escala de 0 a 1. Esse resultado demonstra que existem fatores aleatórios representativos que influenciam a probabilidade de ocorrência de desligamentos.

Considerando o percentual de acertos, os resultados a cada passo de simulação são demonstrados na Tabela 23.

Tabela 23 – Modelos gerados a cada passo

Observados		Previstos		
		Desligamento 0	1	Percentual correto
Passo 1	0	186	184	50,27
	1	118	252	68,11
				59,19
Passo 2	0	257	113	69,46
	1	130	240	64,86
				67,16
Passo 3	0	271	99	73,24
	1	131	239	64,59
				68,92
Passo 4	0	271	99	73,24
	1	111	259	70,00
				71,62
Passo 5	0	274	96	74,05
	1	113	257	69,46
				71,76
Passo 6	0	279	91	75,41
	1	113	257	69,46
				72,43
Passo 7	0	284	86	76,76
	1	120	250	67,57
				72,16

Com base na Tabela 23, podemos afirmar que, ao fim de sete passos, chegamos a um modelo que consegue prever corretamente 72,16% dos casos. O melhor resultado médio ocorreu no sexto passo, com 72,43% de acerto. Lembrando que o caso base (Tabela 19) atingiu um percentual de acerto de 50%; podemos afirmar que os modelos gerados conseguiram incrementar a acurácia de previsão de desligamentos em até 44,86%.

No entanto, o objetivo do trabalho é conseguir prever com maior probabilidade de acerto os eventos que vão gerar desligamentos nas linhas de transmissão. De acordo com esse objetivo, o modelo com melhor resultado foi obtido no passo 4, com 70,00% de previsões corretas.

Após apresentados os indicadores estatísticos do modelo, apresentamos os valores dos coeficientes da Equação (13) para cada passo de simulação. Esses resultados são apresentados na Tabela 24.

Tabela 24 – Coeficientes dos modelos gerados

Passo	Variável	B	Erro Padrão	Wald	gl	Sig.	Exp(B)
1 ^a	Umidade	-0,08	0,01	56,19	1,00	0,00	0,92
	Constante	2,12	0,29	54,99	1,00	0,00	8,34
2 ^b	Focos	0,04	0,01	31,52	1,00	0,00	1,04
	Umidade	-0,07	0,01	35,05	1,00	0,00	0,94
	Constante	1,28	0,31	17,51	1,00	0,00	3,61
3 ^c	Focos	0,04	0,01	30,67	1,00	0,00	1,04
	Dias sem chuva	0,01	0,00	22,93	1,00	0,00	1,01
	Umidade	-0,05	0,01	17,26	1,00	0,00	0,95
	Constante	0,35	0,36	0,96	1,00	0,33	1,42
4 ^d	Focos	0,04	0,01	29,69	1,00	0,00	1,04
	Dias sem chuva	0,01	0,00	19,46	1,00	0,00	1,01
	Umidade	-0,04	0,01	13,09	1,00	0,00	0,96
	Bioma(1)	0,79	0,19	17,12	1,00	0,00	2,21
	Constante	0,01	0,37	0,00	1,00	0,97	1,01
5 ^e	Focos	0,04	0,01	31,86	1,00	0,00	1,04
	Dias sem chuva	0,01	0,00	20,66	1,00	0,00	1,01
	Umidade	-0,01	0,02	0,34	1,00	0,56	0,99
	Temperatura	0,18	0,07	7,10	1,00	0,01	1,19
	Bioma(1)	0,83	0,19	18,29	1,00	0,00	2,30
	Constante	-7,20	2,73	6,95	1,00	0,01	0,00*
6 ^e	Focos	0,04	0,01	33,83	1,00	0,00	1,05
	Dias sem chuva	0,01	0,00	23,81	1,00	0,00	1,01
	Temperatura	0,20	0,05	20,26	1,00	0,00	1,23
	Bioma(1)	0,85	0,19	19,36	1,00	0,00	2,34
	Constante	-8,49	1,62	27,37	1,00	0,00	0,00*
7 ^f	Focos	0,04	0,01	35,57	1,00	0,00	1,05
	Dias sem chuva	0,01	0,00	19,88	1,00	0,00	1,01
	Temperatura	0,20	0,05	19,66	1,00	0,00	1,22
	Bioma(1)	0,74	0,20	13,89	1,00	0,00	2,10
	Uso(1)	-0,38	0,18	4,56	1,00	0,03	0,68
	Constante	-8,19	1,63	25,19	1,00	0,00	0,00*

a. Variável adicionada no passo 1: Umidade.

b. Variável adicionada no passo 2: Focos.

c. Variável adicionada no passo 3: Dias sem chuva.

d. Variável adicionada no passo 4: Bioma.

e. Variável adicionada no passo 5: Temperatura.

f. Variável adicionada no passo 7: Uso.

* Valores truncados na segunda casa decimal

Além do coeficiente da variável, a Tabela 24 nos fornece informações do erro padrão associado a cada coeficiente calculado, estatística de Wald, grau de liberdade, nível de significância e expoente B.

Considerando o modelo que melhor se adequou aos objetivos deste trabalho, correspondente ao passo 4, percebemos que este se utiliza das variáveis contínuas focos, dias sem chuva e umidade; da variável dicotômica bioma; e da constante. Ou seja, as condições climáticas, as condições de terreno e o porte do incêndio florestal são determinantes para a ocorrência de desligamentos das linhas de transmissão.

Considerando o expoente B, a variável com maior chance de aumentar a probabilidade de acerto do modelo é o tipo de bioma (2,21). Nessa variável, estudamos a influência no desempenho das linhas de transmissão com vãos localizados no bioma cerrado. Os resultados indicam que esse tipo de bioma tem uma maior probabilidade de provocar desligamentos de linhas de transmissão por incêndios florestais.

Chama a atenção a ausência das variáveis construtivas das linhas de transmissão em todos os modelos gerados. A explicação pode estar na qualidade dos dados disponíveis, com granularidade inadequada para a pesquisa proposta.

Podemos afirmar que a correção do problema de qualidade dos dados está com uma solução estrutural endereçada. A ANEEL editou a Resolução Normativa 861 (ANEEL, 2019) que determina construir, até o fim do ano de 2023, uma base de dados técnicos dos ativos de transmissão, em base georreferenciada e com precisão submétrica. É razoável inferir que uma base com essas características poderá reduzir a aleatoriedade dos modelos (R^2 de Nagelkerke maiores) e aumentar a probabilidade de acerto dos eventos de desligamentos provocados por incêndios florestais.

Os incentivos regulatórios para as transmissoras também podem ser avaliados frente aos resultados. Basicamente, as transmissoras recebem quando estão com o seu sistema disponível. Na ocorrência de desligamentos, há desconto de receita. O mecanismo tem por objetivo garantir a máxima disponibilidade do sistema (ANEEL, 2016).

Atualmente, o regulamento brasileiro trata o fenômeno de incêndios florestais como exceção à regra geral. Os desligamentos provocados por incêndios florestais podem ser isentos de descontos na receita. Tal exceção reflete uma visão do regulador brasileiro

quanto à limitação de capacidade das transmissoras em tomar ações preventivas frente aos incêndios florestais (ANEEL, 2016).

Pode-se dizer que a visão do regulador, em certa medida, foi ratificada pelos resultados obtidos do modelo. À exceção da fase de projetos, quando é definido o traçado da linha e, portanto, os biomas em que essa será inserida, as transmissoras têm um espectro preventivo limitado à ocorrência de desligamentos por incêndios florestais. Basicamente, o modelo nos mostrou que os principais fatores de influência estão relacionados ao clima, portanto alheios a qualquer ação das transmissoras.

Também é interessante perceber que as restrições ambientais oriundas do licenciamento não se mostraram relevantes. Em todos os passos da simulação, a variável largura de faixa foi estatisticamente não significativa ($p > 0,05$) para o modelo (ver Tabela 21). A variável autorização, que representa a existência ou não de restrições à limpeza de faixa no vão, só apresentou significância estatística ($p < 0,05$) no primeiro passo de simulação. Ainda assim, como seu valor de pontuação para estatística Wald foi de 5,96 (ver Tabela 21), sequer entrou no modelo correspondente ao passo simulado.

Também é importante notar que as variáveis temperatura e uso do solo foram consideradas significativas, embora só tenham entrado no modelo a partir do passo 5. Como o passo 4 obteve as melhores probabilidades de acerto, essas variáveis não apareceram no modelo final.

Considerando as variáveis utilizadas no passo 4, construímos os gráficos de dispersão da Figura 29.

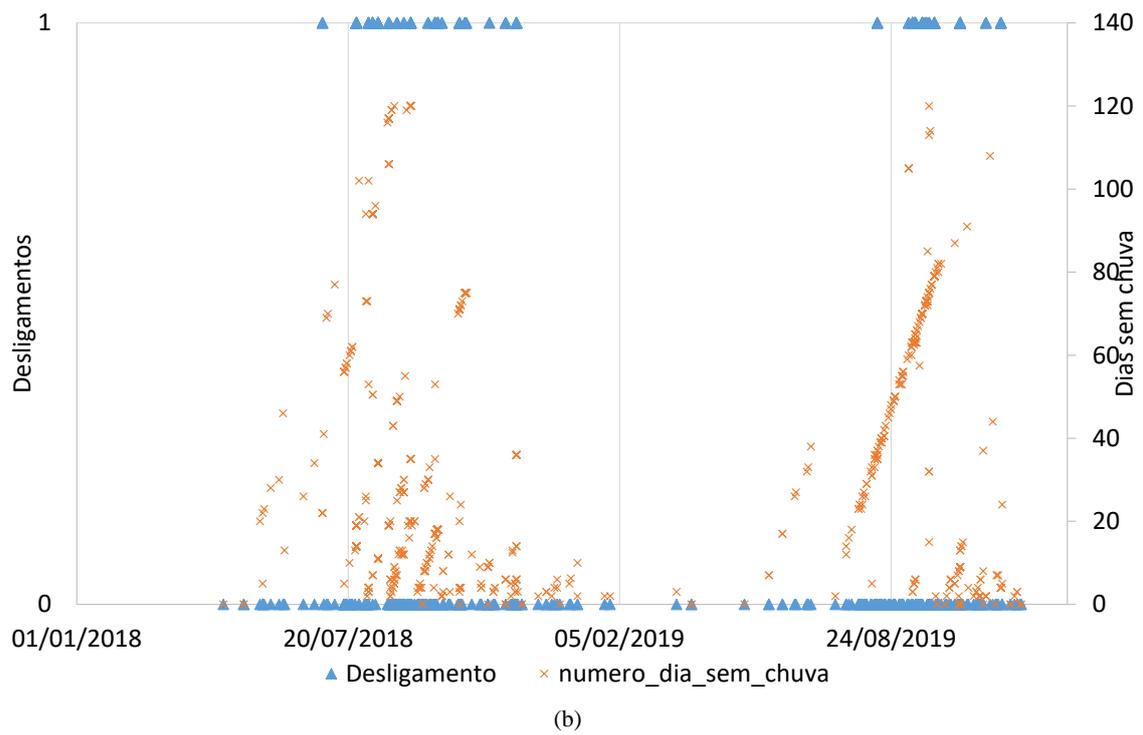
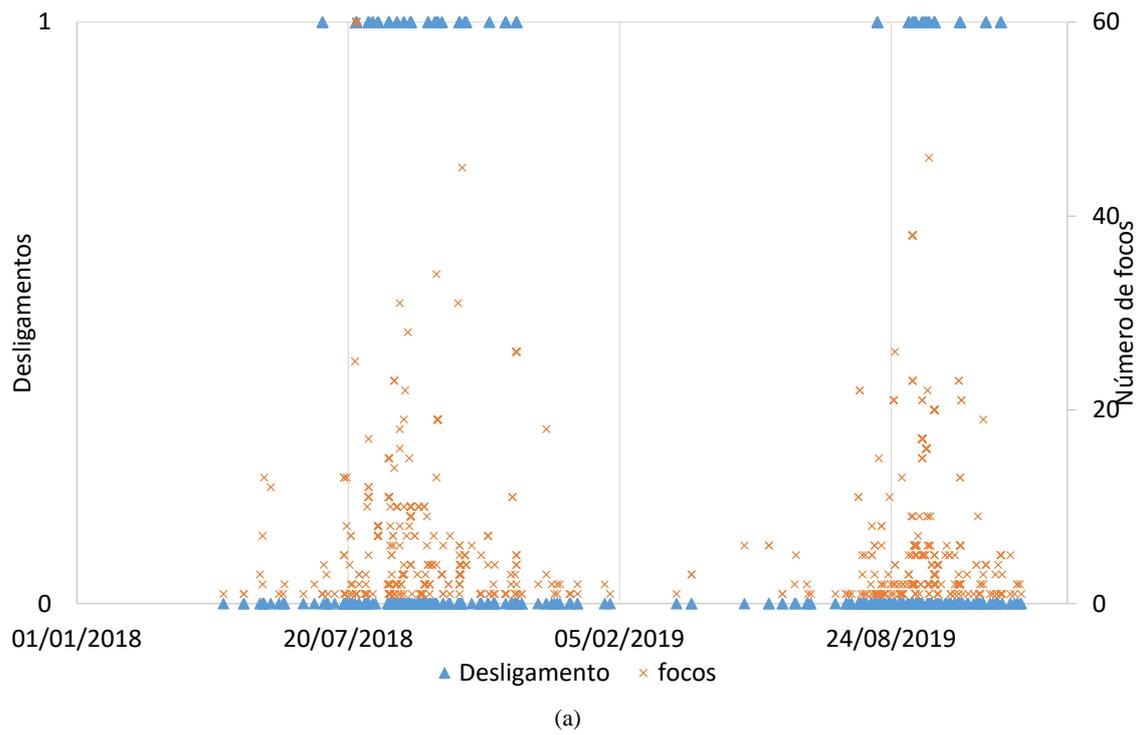


Figura 29 – Dispersão das variáveis do modelo probabilístico identificado no passo 4 da simulação

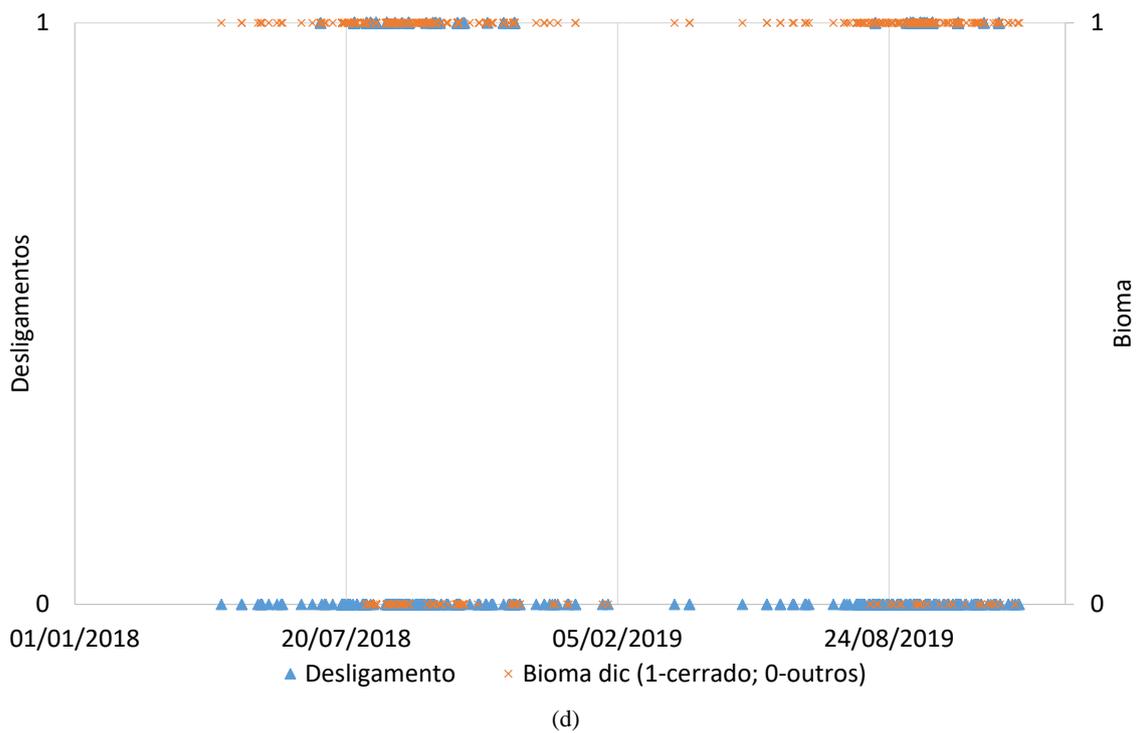
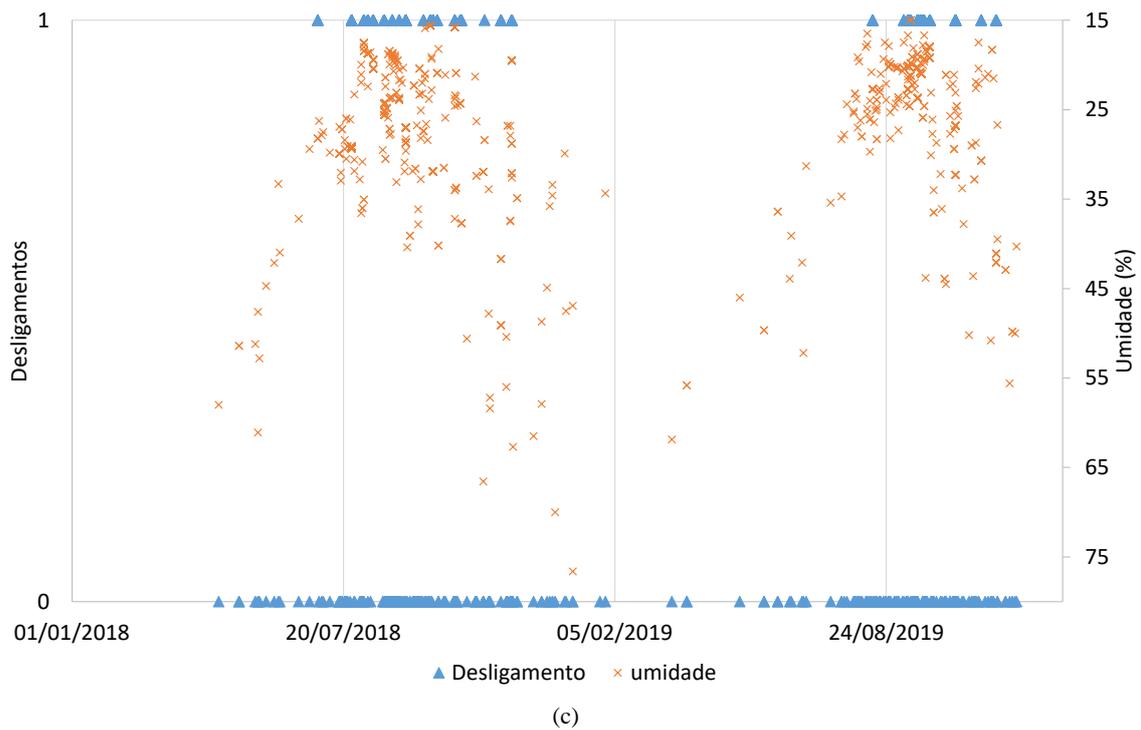


Figura 29 (continuação) – Dispersão das variáveis do modelo probabilístico identificado no passo 4 da simulação

Os gráficos de dispersão da Figura 29 são úteis para se identificar as características de cada variável relatada. Em todos os gráficos, a variável dependente desligamentos está presente. Como a variável é dicotômica, só pode assumir dois valores ao longo do período de análise (0 ou 1), e isso fica evidente nos gráficos.

A Figura 29 (a) representa a relação entre os desligamentos e o número de focos de incêndio. Nesse caso, o número mínimo de focos é igual à unidade e há o indicativo de que um maior número de focos em determinado dia aumenta as chances de ocorrência de desligamentos.

A Figura 29 (b) representa a relação entre os desligamentos e o número de dias sem chuva. Nesse caso, é possível perceber um comportamento acumulativo da variável dias sem chuva ao longo do tempo, indicado pela sequência de pontos em rampa. Também é possível perceber uma maior susceptibilidade aos desligamentos em dias com escore mais elevado.

A Figura 29 (c) exibe o relacionamento entre desligamentos e teor de umidade (%). Nesse caso, a escala de umidade está invertida, de forma a melhor evidenciar a relação inversa entre as variáveis analisadas. Pelo gráfico, fica claro que, em dias de menor umidade, há uma maior concentração de desligamentos.

Por último, a Figura 29 (d) demonstra a relação entre duas variáveis dicotômicas: desligamentos e bioma cerrado. É possível notar que há uma maior quantidade de pontos indicativos de desligamentos (valor 1) sobrepostos em relação aos pontos indicativos de não desligamento (valor 0). Essa observação valida o resultado apontado pelo modelo.

4.4.1. Análise de Resíduos

Foi realizada uma análise de resíduos padronizados. Esses valores são as diferenças padronizadas entre os dados observados e os valores que o modelo prevê. Foram consideradas discrepantes as diferenças superiores a $\pm 2\sigma$ (desvios padrão). O conjunto de dados considerados discrepantes está listado na Tabela 25.

Tabela 25 – Resíduos padronizados do modelo considerando valores fora do intervalo de $\pm 1,96$

Caso	Observado	Previsto	Grupo previsto	Resíduo	Resíduo padronizado
1	1	0,12	0	0,88	2,66
2	1	0,12	0	0,88	2,66
3	1	0,12	0	0,88	2,66
409	0	0,88	1	-0,88	-2,71
423	0	1,00	1	-1,00	-21,26

Caso	Observado	Previsto	Grupo previsto	Resíduo	Resíduo padronizado
551	0	0,93	1	-0,93	-3,78
576	0	0,91	1	-0,91	-3,28
599	0	0,96	1	-0,96	-4,82
600	0	0,99	1	-0,99	-10,67
691	0	0,92	1	-0,92	-3,38

A Tabela 25 nos indica que há dez registros considerados atípicos. Esses registros representam 1,35% da base de dados e foram excluídos, pois estão influenciando indevidamente o modelo.

4.4.2. Novo modelo após a exclusão dos resíduos

As simulações foram repetidas considerando os 730 registros restantes após a exclusão dos valores atípicos. Foram obtidos novos modelos a partir de cinco passos de simulação. O novo modelo base é descrito na Tabela 26 e as estatísticas dos novos modelos estão descritas na Tabela 27.

Tabela 26 – Novo modelo base após a retirada dos valores atípicos

Observados		Previstos			
		Desligamento 0	1	Percentual correto	
Passo 0	Desligamento 0	0	0	363	0,0
	Desligamento 1	1	0	367	100,0
	Porcentagem Geral				50,3

Tabela 27 – Estatísticas do novo modelo

Passo	-2 Verossimilhança-log	R ² Cox & Snell	R ² Nagelkerke
1	883,116a	0,162	0,216
2	834,389a	0,216	0,288
3	802,387a	0,250	0,333
4	776,089a	0,276	0,368
5	770,014a	0,282	0,376

a. A estimativa foi interrompida na iteração número 6 porque as estimativas dos parâmetros mudaram em menos de 0,001.

A Tabela 27 demonstra que a exclusão dos valores atípicos elevou os valores do R² de Nagelkerke. Ou seja, os valores atípicos estavam, de fato, confundindo os modelos.

Considerando os melhores casos antes e após a retirada dos resíduos, podemos afirmar que foi possível elevar o R^2 de Nagelkerke em 29,2% (0,291 para 0,376).

Considerando o percentual de acertos, os novos resultados a cada passo de simulação são demonstrados na Tabela 28.

Tabela 28 – Percentual de acertos dos novos modelos gerados a cada passo

Observados		Previstos		Percentual correto
		Desligamento		
		0	1	
Passo 1	0	296	67	81,5
	1	190	177	48,2
<hr/>				
Passo 2	0	272	91	74,9
	1	126	241	65,7
<hr/>				
Passo 3	0	271	92	74,7
	1	140	227	61,9
<hr/>				
Passo 4	0	271	92	74,7
	1	98	269	73,3
<hr/>				
Passo 5	0	276	87	76,0
	1	102	265	72,2
<hr/>				
				74,1

A Tabela 28 demonstra que, após cinco passos de simulação, chegamos a um modelo que consegue acertar 74,1% das previsões. Isso significa que houve uma melhoria no percentual de acertos da ordem de 2,68% em relação as simulações sem a retirada dos resíduos. Em relação ao novo caso base (Tabela 26), podemos afirmar que os novos modelos gerados conseguiram incrementar a acurácia de previsão de desligamentos em até 47,3%.

No entanto, da mesma forma que a simulação anterior, o modelo que conseguiu o maior índice de acertos para a ocorrência de desligamentos (valor de saída 1) corresponde ao passo 4. A acurácia observada nesse caso foi de 73,3%, ou seja, uma melhoria de 4,71% em relação ao modelo equivalente com a presença de resíduos.

Na sequência, apresentamos os valores dos coeficientes da Equação (13) para cada passo de simulação. Esses resultados são apresentados na Tabela 29.

Tabela 29 – Coeficientes dos novos modelos gerados

Passo	Variável	B	Erro Padrão	Wald	gl	Sig.	Exp(B)
1 ^a	Focos	0,09	0,01	54,78	1,00	0,00	1,09
	Constante	-0,73	0,11	43,66	1,00	0,00	0,48
2 ^b	Focos	0,08	0,01	46,15	1,00	0,00	1,08
	Dias sem chuva	0,02	0,00	44,86	1,00	0,00	1,02
	Constante	-1,33	0,15	82,83	1,00	0,00	0,27
3 ^c	Focos	0,08	0,01	46,29	1,00	0,00	1,08
	Dias sem chuva	0,01	0,00	29,20	1,00	0,00	1,01
	Temperatura	0,26	0,05	29,27	1,00	0,00	1,30
	Constante	-10,51	1,72	37,39	1,00	0,00	0,00*
4 ^d	Focos	0,08	0,01	47,84	1,00	0,00	1,08
	Dias sem chuva	0,01	0,00	22,82	1,00	0,00	1,01
	Temperatura	0,25	0,05	26,66	1,00	0,00	1,29
	Bioma(1)	1,02	0,20	25,31	1,00	0,00	2,78
	Constante	-10,46	1,75	35,79	1,00	0,00	0,00*
5 ^e	Focos	0,08	0,01	50,16	1,00	0,00	1,08
	Dias sem chuva	0,01	0,00	18,97	1,00	0,00	1,01
	Temperatura	0,25	0,05	26,27	1,00	0,00	1,28
	Bioma(1)	0,90	0,21	18,56	1,00	0,00	2,46
	Uso(1)	-0,46	0,19	6,08	1,00	0,01	0,63
	Constante	-10,17	1,76	33,51	1,00	0,00	0,00*

a. Variável adicionada no passo 1: Focos.

b. Variável adicionada no passo 2: Dias sem chuva.

c. Variável adicionada no passo 3: Temperatura.

d. Variável adicionada no passo 4: Bioma.

e. Variável adicionada no passo 5: Uso.

* Valores truncados na segunda casa decimal

Uma diferença importante observada nas novas simulações foi a exclusão da variável umidade no passo 4 e a sua substituição pela variável temperatura. Após a exclusão dos valores atípicos, a variável umidade apresentou valores não significativos ($p > 0,05$) o que implicou na sua desconsideração nas simulações. Também é um destaque o incremento dos valores de expoente B para todas as variáveis. No caso da variável bioma, o valor do expoente B chegou a 2,78, o que reforça a importância dessa informação para o modelo.

O modelo resultante da simulação relatada, Equação (20), e correspondente ao passo 4 pode ser obtido pela substituição dos coeficientes da Equação (13):

$$P(Y) = \frac{1}{1 + e^{-(-10,46+0,08X_1+0,01X_2+0,25X_3+1,02X_4+\varepsilon)}} \quad (20)$$

O resultado da Equação (20) representa uma probabilidade de ocorrência de desligamento por incêndios florestais. Os números 1 a 4 representativos das variáveis previsoras correspondem aos focos, dias sem chuva, temperatura e bioma, respectivamente.

5. CONCLUSÕES

Com base nas análises descritas ao longo do trabalho, foi possível compreender e quantificar a susceptibilidade de uma linha de transmissão a sofrer desligamentos por incêndios florestais a partir das suas características técnicas e ambientais.

Considerando as informações coletadas em diversas fontes e recursos disponíveis, com destaque para a Lei de Acesso à Informação (BRASIL, 2011), foi possível reunir um banco de dados inédito, contendo informações técnicas, de desempenho, climáticas e de terreno, todos geoespacializados e em granularidade correspondente a um vão de linha de transmissão para o período entre os anos de 2018 e 2019.

A partir da análise dos inventários florestais e de estudos científicos pretéritos, foi possível avaliar a qualidade energética da vegetação presente nas áreas sob influência das linhas de transmissão. Verificamos uma elevada correlação ($R^2=0,9877$) entre a carga de incêndio e o número de desligamentos da linha por cem quilômetros, evidenciando a influência da vegetação na operação dessas instalações.

Ao analisar a qualidade dos dados de localização de falta em linhas de transmissão nos anos de 2018 e 2019, constatamos que em 67,16% dos desligamentos declarados como provocados por incêndios florestais, não havia foco de incêndio num raio de 10 km em relação ao ponto indicado pelo localizador de falta. Para uma análise por vãos, os dados de focos de incêndio se mostraram mais confiáveis que os dados fornecidos pelos equipamentos localizadores de falta das linhas de transmissão.

A análise estatística descritiva demonstrou que os vãos localizados em solos com uso classificado como formação savânica possuem mais chances de originar desligamentos de linhas de transmissão por incêndios florestais. Além disso, constatamos que as restrições de licenciamento quanto à limpeza de vãos não são determinantes para a ocorrência de desligamentos por incêndios florestais em linhas de transmissão.

Isoladamente, para os vãos localizados em áreas de formação savânica, o número de focos e o índice NDVI foram as variáveis que apresentaram as maiores influências na ocorrência de desligamentos de linhas de transmissão.

Foi possível construir um modelo de regressão logística que calcula a probabilidade de desligamentos de uma linha de transmissão a partir das características dos vãos expostos aos focos de incêndio. O modelo construído deixou evidente a importância das características ambientais (dias sem chuva e temperatura), de terreno (bioma) e focos de incêndio para os desligamentos por incêndios florestais. As características construtivas das linhas e o índice NDVI mostraram-se ineficientes para a aplicação proposta.

Os resultados deste estudo podem ser considerados em projetos de novas linhas de transmissão, diminuindo as probabilidades de desligamentos provocados por incêndios florestais. Isso pode ser feito buscando aliar as necessidades técnicas dos empreendimentos às características climáticas e de terreno mais favoráveis a não interrupção da operação dessas instalações.

6. RECOMENDAÇÕES

O estudo de modelos preditores de desligamentos pode ser repetido a partir da disponibilização dos dados técnicos de melhor qualidade, o que deve acontecer até o fim de 2023, com a implantação da Base de Dados das Instalações de Transmissão de Energia Elétrica – BDIT (ANEEL, 2019).

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, Allan Ribeiro *et al.* Fatores econômicos relacionados à intervenção na vegetação para a implantação de linhas de transmissão no estado de Rondônia. **Ciência Florestal**, [S. l.], v. 12, n. 1, p. 153, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/198050981709>

ABREU, Cristiane S. *et al.* Avaliação da Análise Elementar de Carbono para Carvões Brasileiros. In: (PUCRS, Org.) 2009, Porto Alegre. **X Salão de Iniciação Científica PUCRS**. Porto Alegre: [s. n.], 2009. p. 1201–1203.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Nota Técnica nº 211/2015, de 26 de novembro de 2015**. Brasília: [s. n.], 2015 a. Disponível em: <http://sicnet2.aneel.gov.br/sicnetweb/v.aspx>.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Resolução Normativa nº 669, de 14 de julho de 2015**. Regulamenta os Requisitos Mínimos de Manutenção e o monitoramento da manutenção de instalações de transmissão de Rede Básica. **Diário Oficial da União - DOU**, Brasil: [s. n.], 2015 b.p. 11. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015669.pdf>

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Relatório de Análise: desligamentos forçados do sistema de transmissão**. Brasília: [s. n.], 2016 a. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/informacoes-tecnicas/-/asset_publisher/CegkWaVJWF5E/content/analise-do-desempenho-de-instalacoes-de-transmissao/656808?inheritRedirect=false&redirect=http%3A%2F%2Fwww.aneel.gov.br%2Finformacoes-tecnicas%3Fp_p_id%3D101_INSTANCE_Cegk.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Nota Técnica nº 31/2015-SFE, de 11 de março de 2016**. Brasília: [s. n.], 2016 b.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Plano de Melhorias e Providências - Avisos e Comunicados - ANEEL**. [s. l.], 2016c. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/avisos-e-comunicados/-/asset_publisher/xVhS2p1F8dhn/content/plano-de-melhorias-para-desligamentos-forcados/656808?inheritRedirect=false&redirect=http%3A%2F%2Fwww.aneel.gov.br%2Favisos-e-comunicados%3Fp_p_id%3D101_INSTANCE_xVhS2p1F8. Acesso em: 22 set. 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Resolução Normativa nº 729, de 28 de junho de 2016.** Estabelece as disposições relativas à qualidade do serviço público de transmissão de energia elétrica, associada à disponibilidade e à capacidade operativa das instalações sob responsabilidade de concessionária de transmissão integrantes da Rede Básica e das instalações de transmissão de energia elétrica destinadas a interligações internacionais que se conectam à Rede Básica, conforme Resolução Normativa nº 442, de 26 de julho de 2011, e dá outras providências. **Diário Oficial da União - DOU**, [S. l.: s. n.].p. 97. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2016729.pdf>. Acesso em: 15 out. 2020d.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Fiscalizações Realizadas Transmissão - Conteúdos de Fiscalização da Transmissão.** [s. l.], 2018a. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/fiscalizacao-da-transmissao-conteudos/-/asset_publisher/agghF8WsCRNq/content/fiscalizacoes-realizadas/656808?inheritRedirect=false&redirect=http%3A%2F%2Fwww.aneel.gov.br%2Ffiscalizacao-da-transmissao-conteudos%3Fp_id%3D101_INSTAN. Acesso em: 27 maio. 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Nota Técnica nº 31/2018-SFE/ANEELDoc SIC nº 48534.001509/2018-00.** Brasília: [s. n.], 2018 b. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/consulta-processual>. Acesso em: 22 set. 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Desligamentos de linhas de transmissão provocados por queimadas.** Brasília: [s. n.], 2018 c. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/656808/0/Relatório+de+monitoramento+-+Queimadas+2018+Setembro.pdf/3ba102e6-d0da-c22f-ea40-1e6e2e608d90>. Acesso em: 22 set. 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Resolução Normativa nº 861, de 26 de novembro de 2019.** Dispõe sobre a definição da Base de Dados das Instalações de Transmissão de energia elétrica e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, [S. l.: s. n.].p. 46. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2019861.pdf>. Acesso em: 15 out. 2020.

ALBUQUERQUE, Pedro H. M. **Análise Multivariada.** Brasília: Universidade de Brasília, 2017.

ALEXANDRE, Jorge; NEVES, Barbosa. **Modelo de equações estruturais: uma introdução aplicada**. 1. ed. Brasília: Enap, 2018. v. 1 *E-book*.

ALVES DA SILVA, Alexandre P.; LIMA, Antonio C. S.; SOUZA, Suzana M. Fault location on transmission lines using complex-domain neural networks. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, [S. l.], v. 43, n. 1, p. 720–727, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.05.046>

AMADO, Frederico Augusto Di Trindade. **Direito Ambiental Esquematizado**. 8. ed. São Paulo: Método, 2017. *E-book*.

ANDRADE, Rubenildo Vieira. **Gaseificação de Biomassa: Uma Análise Teórica e Experimental**. 2007. - Universidade Federal de Itajubá, [s. l.], 2007. Disponível em: <http://saturno.unifei.edu.br/bim/0032784.pdf>. Acesso em: 18 set. 2017.

ANDRADE, Eduardo Leopoldino de. **Introdução à pesquisa operacional: métodos e modelos para análises de decisões**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018. *E-book*.

ANGSTROM, A. Solar and terrestrial radiation. Report to the international commission for solar research on actinometric investigations of solar and atmospheric radiation. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, [S. l.], v. 50, n. 210, p. 121–126, 1924. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/qj.49705021008>

ARAÚJO, Ana Clara Caxito de *et al.* Propriedades energéticas da madeira e do carvão vegetal de *Cenostigma macrophyllum*: subsídios ao uso sustentável. **Pesquisa Florestal Brasileira**, [S. l.], v. 38, n. 1, p. 1–9, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.4336/2018.pfb.38e201701546>

ARAUJO, Henrique José Borges de. **Agrupamento das espécies madeireiras ocorrentes em pequenas áreas sob manejo florestal do Projeto de Colonização Pedro Peixoto (AC) por similaridade das propriedades físicas e mecânicas**. 2002. - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, [s. l.], 2002. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11150/tde-03122002-081639/publico/henrique.pdf>

ARAÚJO FILHO, José Coelho de. **Floresta Estacional Semidecidual**. [s. l.], 2020. Disponível em:

https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/territorio_mata_sul_pernambucana/arvore/CONT000gt7eon7l02wx7ha087apz2x2zjco4.html. Acesso em: 13 nov. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 5422 - Projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, 1985. Disponível em: <http://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=9416>. Acesso em: 27 maio. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 8112 - Carvão vegetal - Análise imediata - Método de ensaio**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnica - ABNT, 1986. Disponível em: <http://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=7339>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 14432 - Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2000. Disponível em: <http://www.abnt.org.br/>. Acesso em: 31 dez. 2019.

BANCO NACIONAL DO DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL - BNDES; MINISTÉRIO DA ECONOMIA - ME; MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA. **Fundo Amazônia**. [s. l.], 2020. Disponível em: <http://www.fundoamazonia.gov.br/pt/home/>. Acesso em: 26 out. 2020.

BASTOS, Erani *et al.* **RIMA - Relatório de Impacto Ambiental - Linhas de Transmissão 230kV Imbirussu – Campo Grande – Rio Brilhante e Dourados II – Ivinhema II - Dourados**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2018. Disponível em: <http://www.imasul.ms.gov.br/wp-content/uploads/2018/03/RIMA.pdf>.

BATISTA, Antonio C.; BIONDI, Daniela. Avaliação da inflamabilidade de *Ligustrum lucidum* Aiton (Oleaceae) para uso potencial em cortinas de segurança na região sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, [S. l.], v. 4, n. 4, p. 435–439, 2009. Disponível em: <http://www.redalyc.org/html/1190/119012569011/>. Acesso em: 25 nov. 2018.

BENESTY, Jacob *et al.* Pearson Correlation Coefficient. *In: Noise Reduction in Speech Processing. Springer Topics in Signal Processing*. 1. ed. Berlin: Springer, 2009. p. 1–4. *E-book*. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-642-00296-0_5

BERRY, William. **Understanding Regression Assumptions**. California: SAGE Publications, 1993. *E-book*. Disponível em: <https://doi.org/10.4135/9781412986427>

BISCUOLA, Vinicius Bertolazzi. **Modelo matemático híbrido determinístico-estocástico para a previsão da macroestrutura de grãos bruta de solidificação**. 2011. - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/T.3.2011.tde-04042011-121401>

BOM, Pedro. **Estrutura da Madeira**. União da Vitória: Centro Universitário de União da Vitória, 2011.

BRAND, Martha Andreia *et al.* Storage of caatinga forest biomass to improve the quality of wood for energy. **Ciência Rural**, [S. l.], v. 46, n. 7, p. 1178–1184, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20130959>

BRANDT, Siegmund. **Data Analysis**. Cham: Springer International Publishing, 2014. *E-book*. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-03762-2>

BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**. Carta Magna do Brasil. **Diário Oficial da União**, [S. l.: s. n.] Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Constituicao/Constituicao.htm. Acesso em: 4 nov. 2018.

BRASIL. **Lei 8.987, de 13 de fevereiro de 1995**. Dispõe sobre o regime de concessão e permissão da prestação de serviços públicos previsto no art. 175 da Constituição Federal, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, [S. l.: s. n.] Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L8987cons.htm. Acesso em: 5 nov. 2018.

BRASIL. **Lei nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996**. Institui a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, disciplina o regime das concessões de serviços públicos de energia elétrica e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasil: [s. n.], 1996. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9427cons.htm

BRASIL. **Lei nº 9.648, de 27 de maio de 1998**. Altera dispositivos das Leis no 3.890-A, de 25 de abril de 1961, no 8.666, de 21 de junho de 1993, no 8.987, de 13 de fevereiro de 1995, no 9.074, de 7 de julho de 1995, no 9.427, de 26 de dezembro de 1996, e autoriza o Poder Executivo a promover a reestruturação da Centrais Elétricas Brasileiras -

ELETROBRÁS e de suas subsidiárias e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, Brasil: [s. n.], 1998 a. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9648cons.htm

BRASIL. **Decreto nº 2.661, de 8 de julho de 1998**. Regulamenta o parágrafo único do art. 27 da Lei nº 4.771, de 15 de setembro de 1965 (código florestal), mediante o estabelecimento de normas de precaução relativas ao emprego do fogo em práticas agropastoris e florestais, e dá outras providências. **DOU**, [S. l.: s. n.] Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/D2661.htm. Acesso em: 25 nov. 2018b.

BRASIL. **Lei 10.847, de 25 de março de 2004**. Autoriza a criação da Empresa de Pesquisa Energética – EPE e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, [S. l.: s. n.] Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2004-2006/2004/Lei/L10.847.htm. Acesso em: 4 nov. 2018.

BRASIL. **Matriz Energética Brasileira 2030**. Brasília: [s. n.], 2007. Disponível em: http://www.mme.gov.br/web/guest/publicacoes-e-indicadores/matriz-energetica-nacional-2030;jsessionid=A58343582BA3947598878EDDB68FCA47.srv155?p_p_id=20&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-1&p_p_col_count=1&_20_struts_action=%2F. Acesso em: 26 maio. 2018.

BRASIL. **Lei 12.527, de 18 de novembro de 2011**. Regula o acesso a informações previsto no inciso XXXIII do art. 5º, no inciso II do § 3º do art. 37 e no § 2º do art. 216 da Constituição Federal; altera a Lei nº 8.112, de 11 de dezembro de 1990; revoga a Lei nº 11.111, de 5 de maio de 2005, e dispositivos da Lei nº 8.159, de 8 de janeiro de 1991; e dá outras providências. [S. l.: s. n.] Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2011/lei/112527.htm. Acesso em: 19 jan. 2020.

BRITO, J. O. Expressão da produção florestal em unidades energéticas. *In*: 1993, Curitiba. **CONGRESSO FLORESTAL PANAMERICANO**. Curitiba: SBEF, 1993. p. 280–282. Disponível em: <http://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/consulta/busca?b=ad&id=299283&biblioteca=vazio&busca=autoria:%22J.O.%22&qFacets=autoria:%22J.O.%22&sort=&pagina=6>. Acesso em: 27 dez. 2020.

CASTILHO, E.; ALZOLA, A. Utilización de biomasa: determinación del poder calorífico de los conos de tres especies forestales cubanas. **Revista Florestal Baracoa**, [S. l.], v. 18, n. 2, p. 117–120, 1988.

CLINE-COLE, Akindele; LAST, Murray; RICHARDS, Paul. The socio-ecology of firewood and charcoal on the Freetown peninsula. In: FYFE, Christopher (org.). **Sierra Leone, 1787-1987: Two Centuries of Intellectual Life**. 1. ed. Manchester: International African Institute, 1945. p. 457–497. *E-book*.

COSTA, Tattiane Gomes *et al.* Qualidade da madeira de cinco espécies de ocorrência no cerrado para produção de carvão vegetal. **Cerne**, [S. l.], v. 20, n. 1, p. 37–45, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0104-77602014000100005>

COSTA, Tito Ricardo Vaz da *et al.* Um panorama sobre as obras de transmissão de energia elétrica no Brasil. In: 2013, Brasília. **XXII SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica**. Brasília: Cigré, 2013. p. 9. Disponível em: <http://www.cigre.org.br/zpublisher/secoes/restrito.asp?topo=XXII SNPTEE %96 XXII Semin%Elrio Nacional de Produ%E7%E3o e Transmis%E3o de Energia El%E9trica>

COSTA, Tito Ricardo Vaz da *et al.* Aplicação da regulação responsiva na fiscalização dos serviços de eletricidade no Brasil. In: 2017, Ciudad del Este. **XVII ENCUENTRO REGIONAL IBEROAMERICANO DEL CIGRE**. Ciudad del Este: Cigré CE-C5, 2017. p. 11. Disponível em: https://eriac.itaipu.gov.py/?page_id=3096. Acesso em: 12 jul. 2017.

COUTINHO, Leopoldo Magno. Aspectos ecológicos do fogo no cerrado. II - As queimadas e a dispersão de sementes em algumas espécies anemocóricas do estrato herbáceo-subarbustivo. **Boletim de Botânica da Universidade de São Paulo**, [S. l.], v. 5, p. 57–63, 1977. Disponível em: <https://doi.org/10.2307/42871365>. Acesso em: 25 nov. 2018.

COX, D. R.; SNELL, E. J. Analysis of Binary Data. In: **The Concise Encyclopedia of Statistics**. New York, NY: Springer New York, 2008. p. 4–5. *E-book*. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-0-387-32833-1_5

CUNHA, Kerolla Morgana Oliveira. **Qualidade do carvão vegetal *Diospyros hispida* DC., *Xylopia aromática* E *Mouriri pusa* Gardner na região sul do Tocantins**. 2019. - Universidade Federal do Tocantins, Gurupi, 2019.

CUNHA, Leandro Veloso. **Desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas: influência do efeito corona na ruptura a meio de vão**. 2010. - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/BUOS-8MCHLM>. Acesso em: 6 jun. 2020.

CUNHA, M. P. S. Estudo químico de 55 espécies lenhosas para geração de energia em caldeiras. *In*: 1989, São Carlos. **ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA**. São Carlos: [s. n.], 1989. p. 93–121. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_nlinks&ref=000095&pid=S0100-6762201200020001800008&lng=pt

DEUS, Marcella Lanzetti Daher de. **Séries Temporais Aplicadas ao Planejamento da Operação do Sistema Interligado Nacional - SIN**. 2008. - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, [s. l.], 2008. Disponível em: https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/14100/14100_1.PDF. Acesso em: 27 maio. 2018.

DONG, Jia Jyun *et al.* Logistic regression model for predicting the failure probability of a landslide dam. **Engineering Geology**, [S. l.], v. 117, n. 1–2, p. 52–61, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.10.004>

DURÃES; MACHADO, Frederico Ozanan. Biocombustíveis Reais questões para a equação Brasil de desenvolvimento sustentável. **Revista de Política Agrícola**, [S. l.], v. 17, n. 1, p. 129–131, 2008. Disponível em: <https://seer.sede.embrapa.br/index.php/RPA/article/view/430/381>. Acesso em: 17 set. 2017.

DYMOND, Caren C. *et al.* Using Satellite Fire Detection to Calibrate Components of the Fire Weather Index System in Malaysia and Indonesia. **Environmental Management**, [S. l.], v. 35, n. 4, p. 426–440, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00267-003-0241-9>

ECO STAGE. **MapBiomias 3.1**. [s. l.], 2019. Disponível em: <http://mapbiomas.org/map#coverage>. Acesso em: 7 jul. 2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Balanco Energético Nacional 2016 - ano base 2015**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2016. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/web/guest/publicacoes-e-indicadores/balanco-energetico->

nacional.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2026**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2017. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-40/PDE2026.pdf>. Acesso em: 23 jun. 2018.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Potencial dos Recursos Energéticos no Horizonte 2050**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2018. Disponível em: www.mme.gov.br. Acesso em: 25 ago. 2019.

ESPÍRITO SANTO, Helena; DANIEL, Fernanda. Calcular e apresentar tamanhos do efeito em trabalhos científicos (2): Guia para reportar a força das relações. **Revista Portuguesa de Investigação Comportamental e Social**, [S. l.], v. 3, n. 1, p. 53–64, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.7342/ismt.rpics.2017.3.1.48>

FERREIRA, Eloisa Aparecida Belleza *et al.* Alterações no $\Delta^{13}C$ da matéria orgânica particulada do solo em um cerrado sentido restrito após proteção contra fogo e pastejo. *In*: 2013, Porto Seguro. **XI Congresso de Ecologia do Brasil**. Porto Seguro: SEB, 2013. p. 1–3. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/978260/1/8282.pdf>. Acesso em: 13 fev. 2021.

FIEDLER, Nilton Cesar *et al.* Efeito de incêndios florestais na estrutura e composição florística de uma área de cerrado sensu stricto na fazenda Água Limpa-DF. **Revista Árvore**, [S. l.], v. 28, n. 1, p. 129–138, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622004000100017>. Acesso em: 25 nov. 2018.

FIELD, Andy. **Discovering Statistics Using IBM SPSS Statistics**. 5. ed. Thousand Oaks: SAGE Publications Inc, 2017. v. 1 *E-book*. Disponível em: <https://us.sagepub.com/en-us/cab/discovering-statistics-using-ibm-spss-statistics/book260423#features>. Acesso em: 15 out. 2020.

FILHO, Eduardo Malta Campos; SARTORELLI, Paolo Alessandro Rodrigues. **Guia de árvores com valor econômico**. [S. l.: s. n.]. *E-book*.

FOGAÇA, Jennifer Rocha Vargas. **Separação de misturas**. [s. l.], 2017. Disponível em: <http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/quimica/separacao-misturas.htm>. Acesso em: 21

maio. 2017.

FONSECA, J. R. *et al.* Effects of agricultural fires on the performance of overhead transmission lines. **IEEE Transactions on Power Delivery**, [S. l.], v. 5, n. 2, p. 687–694, 1990. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/61.53071>. Acesso em: 20 nov. 2018.

FOREST PRODUCTS LABORATORY - USDA. **Wood Handbook: Wood as an Engineering Material**. [S. l.: s. n.]. v. General TeE-book. Disponível em: <https://doi.org/General Technical Report FPL-GTR-190>

FRANÇA, Helena. **Metodologia de Identificação e Quantificação de Áreas Queimadas no Cerrado com Imagens AVHRR/NOAA**. 2001. - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/T.41.2001.tde-11032008-140113>

FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS - CETEC. **Biblioteca Digital do Estado de Minas Gerais**. 1a. ed. Belo Horizonte: Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais, 1982. *E-book*. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.mg.gov.br/consulta/consultaDetalheDocumento.php?iCodDocumento=73148>. Acesso em: 17 set. 2017.

GARCIA, Vinicius Jacques *et al.* GRASP para o problema de planejamento de redes secundárias de distribuição de energia elétrica. *In*: 2003, Natal. **XXXV SBPO**. Natal: [s. n.], 2003. p. 1427–1437. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/267565178>. Acesso em: 25 out. 2020.

GENTIL, Luiz Vicente Bocorny. **Tecnologia e economia do briquete de madeira**. 2008. - Universidade de Brasília - UnB, [s. l.], 2008. Disponível em: <http://repositorio.unb.br/handle/10482/4499>. Acesso em: 17 set. 2017.

GONÇALVES, Eric Bacconi; GOUVÊA, Maria Aparecida; MANTOVANI, Daielly Melina Nassif. Análise de risco de crédito com o uso de regressão logística. **Revista Contemporânea de Contabilidade**, [S. l.], v. 10, n. 20, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.5007/2175-8069.2013v10n20p139>

GONZÁLEZ-CABÁN, Armando. **Proceedings of the fourth international symposium on fire economics, planning, and policy: climate change and wildfires** Gen. Tech. Rep. PSW-GTR-245 (English). Albany, CA: U.S. Department of Agriculture, Forest

Service, Pacific Southwest Research Station. 405 p. [S. l.: s. n.]. Disponível em: <https://doi.org/10.2737/PSW-GTR-245>. Acesso em: 25 nov. 2018.

GUERA, Ouorou Ganni Mariel *et al.* Evolução da distribuição diamétrica em plantios de *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barrett & Golfari. **BIOFIX Scientific Journal**, [S. l.], v. 3, n. 1, p. 161, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.5380/biofix.v3i1.58132>

GUIDO JR., Paschoal *et al.* Sistema de Gestão Geoespacializada da Transmissão – GGT. **Eletro Evolução**, [S. l.], v. 6, n. 91, p. 45–52, 2018.

HABITZREITER, Tiago Luis *et al.* Poder calorífico e análise econômica do uso total ou parcial da biomassa de eucaliptos. **Scientia Agraria Paranaensis**, [S. l.], v. 18, n. 3, p. 282, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.18188/sap.v18i3.21822>

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de Física. Mecânica**. 10. ed. São Paulo: LTC, 2016. *E-book*.

HARDY, Michael. Pareto's Law. **Mathematical Intelligencer**, [S. l.], v. 32, n. 3, p. 38–43, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00283-010-9159-2>

HASTIE, Trevor; TIBSHIRANI, Robert; FRIEDMAN, Jerome. **The Elements of Statistical Learning**. 2. ed. New York, NY: Springer New York, 2009. (Springer Series in Statistics). *E-book*. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/b94608>

HAYT JR., W. H. **Eletromagnetismo**. 4. ed. [S. l.]: LTC, 1994. *E-book*.

HE, Zheng You *et al.* Natural frequency-based line fault location in HVDC lines. **IEEE Transactions on Power Delivery**, [S. l.], v. 29, n. 2, p. 851–859, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2013.2269769>

HENG-XU HA; BAO-HUI ZHANG; LV, Z.-l. A novel principle of single-ended fault location technique for ehv transmission lines. **IEEE Transactions on Power Delivery**, [S. l.], v. 18, n. 4, p. 1147–1151, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2003.817505>

HENNE, Reny Aldo *et al.* Qualidade energética de biomassa proveniente de floresta nativa sob manejo sustentável. In: 2017, Florianópolis. **Anais do III Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira**. Florianópolis: Galoá, 2017. p. 1–13. Disponível em:

<https://proceedings.science/cbctem/papers/qualidade-energetica-de-biomassa-proveniente-de-floresta-nativa-sob-manejo-sustentavel>. Acesso em: 17 maio. 2020.

HEUMANN, Christian; SCHOMAKER, Michael; SHALABH. **Introduction to Statistics and Data Analysis**. Cham: Springer International Publishing, 2016. *E-book*. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-46162-5>

HIRSCHBERGER, Peter. **FORESTS ABLAZE Causes and effects of global forest fires**. Berlin: [s. n.], 2017. Disponível em: <https://mobil.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/WWF-Study-Forests-Ablaze.pdf>. Acesso em: 5 jul. 2019.

HSING, Tseng Yao; PAULA, Nadia Figueiredo de; PAULA, Rinaldo César de. Características dendrométricas, químicas e densidade básica da madeira de híbridos de *Eucalyptus grandis* X *Eucalyptus urophylla*. **Ciência Florestal**, [S. l.], v. 26, n. 1, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509821119>

IBM. **Software IBM SPSS**. [s. l.], 2020. Disponível em: <https://www.ibm.com/br-pt/analytics/spss-statistics-software>. Acesso em: 4 out. 2020.

INGA, Pepe Rivera; CASTILLO, Manuel Uceda. Características físico - químicas de la madera y carbon de once especies forestales de la amazonia peruana. **Revista Forestal del Perú**, [S. l.], v. 14, n. 2, p. 1–8, 1984. Disponível em: <https://doi.org/10.21704/RFP.V14I2.137>

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Indicadores Brasileiros para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. [s. l.], 2020. Disponível em: <https://odsbrasil.gov.br/>.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS - IBAMA. **Centro Nacional de Prevenção e Combate aos Incêndios Florestais (Prevfogo)**. [s. l.], 2018. Disponível em: <https://www.ibama.gov.br/prevfogo>. Acesso em: 25 nov. 2018.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE. **Área Queimada 30m**. [s. l.], 2020a. Disponível em: <http://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/aq30m/>. Acesso em: 6 jun. 2020.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE. **Clima Monitoramento Brasil - CPTEC/INPE.** [s. l.], 2020b. Disponível em: <http://clima1.cptec.inpe.br/monitoramentobrasil/pt>. Acesso em: 28 set. 2020.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE. **Programa de Monitoramento de Queimadas.** [s. l.], 2017. Disponível em: <http://www.inpe.br/queimadas>. Acesso em: 21 set. 2017.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Key World Energy Statistics 2017.** Paris: [s. n.], 2017. Disponível em: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/key-world-energy-statistics-2017.html>. Acesso em: 27 set. 2017.

IPT. **A madeira como combustível.** São Paulo: Boletim nº17, 1937.

IPT. **Informações sobre madeiras - Ipê.** [s. l.], 1989. Disponível em: http://www.ipt.br/informacoes_madeiras/38.htm. Acesso em: 17 maio. 2020.

IZYKOWSKI, J.; ROSOŁOWSKI, E.; MOHAN SAHA, M. Locating faults in parallel transmission lines under availability of complete measurements at one end. **IEEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution**, [S. l.], v. 151, n. 2, p. 268, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1049/ip-gtd:20040163>

JANKOWSKY, Ivaldo Pontes. **Fundamentos de secagem de madeiras.** Piracicaba: Universidade de São Paulo, 1990. Disponível em: uri: <http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br:80/handle/123456789/14473>

JARA, E. R. P. **O poder calorífico de algumas madeiras que ocorrem no Brasil.** São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, 1989.

JIAN, Wang *et al.* Fuzzy comprehensive evaluation of forest fire risk on transmission lines based on entropy weight method. *In:* 2013, **Proceedings of the 2013 International Conference on Advanced Mechatronic Systems.** : IEEE, 2013. p. 666–670. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ICAMEchS.2013.6681725>. Acesso em: 20 nov. 2018.

JOHNSON D. E. HILBURN, J. L. Johnson J. R. **Fundamentos de análise de circuitos elétricos.** [S. l.]: Prentice-Hall do Brasil, 1994. *E-book*.

JÚNIOR, Claudemiro Lima *et al.* Viabilidade Econômica do Uso Energético de Lenha da Caatinga sob Manejo Sustentável (Economic Viability of the Energetic Use of the Wood from Caatinga Under Sustainable Forest Management). **Revista Brasileira de Geografia Física**, [S. l.], v. 8, n. 1, p. 156–166, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v8.1.p156-166>. Acesso em: 19 abr. 2020.

KAKADE, Aishwarya; KUMARI, Baby; DHOLANIYA, Pankaj Singh. Feature selection using logistic regression in case–control DNA methylation data of Parkinson’s disease: A comparative study. **Journal of Theoretical Biology**, [S. l.], v. 457, p. 14–18, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2018.08.018>

KOVALSYKI, Bruna *et al.* Inflamabilidade de espécies arbóreas para uso em cortinas de segurança na prevenção de incêndios florestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, [S. l.], v. 36, n. 88, p. 387, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.4336/2016.pfb.36.88.991>

KUMAR JAIN, Rajendra. Fuelwood characteristics of certain hardwood and softwood tree species of India. **Bioresource Technology**, [S. l.], v. 41, n. 2, p. 129–133, 1992. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0960-8524\(92\)90182-W](https://doi.org/10.1016/0960-8524(92)90182-W)

LACERDA, Maryna. Aceiros negros só podem ser feitos com autorização do Ibram . **Agência Brasília**, Brasília, 12 maio. 2017, p. 1–1. Disponível em: <https://www.agenciabrasilia.df.gov.br/2017/05/12/aceiros-negros-so-podem-ser-feitos-com-autorizacao-do-ibram/>. Acesso em: 13 fev. 2021.

LEE, Yohan *et al.* Deploying initial attack resources for wildfire suppression: spatial coordination, budget constraints, and capacity constraints. **Canadian Journal of Forest Research**, [S. l.], v. 43, n. 1, p. 56–65, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1139/cjfr-2011-0433>

LEITE, Renata Carvalho Macedo *et al.* Utilização de regressão logística simples na verificação da qualidade do ar atmosférico de Uberlândia. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [S. l.], v. 16, n. 2, p. 175–180, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522011000200011>

LEMOS, Carlos Fernando; JUSTINO, Flávio; ROSSONI, Hygor Aristides. Comparação entre métodos de risco de queimadas pelo índice de Haines, Angström, Monte Alegre e o Hidrotermométrico na região de Viçosa-MG no período de 01 a 30 de setembro de 2003 .

Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável, [S. l.], v. 2, n. 2, p. 196–208, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.21206/RBAS.V2I2.179>. Acesso em: 27 set. 2020.

LEVENE, Howard. Robust tests for equality of variances. *In*: STANFORD UNIVERSITY PRESS (org.). **Contributions to Probability and Statistics: Essays in Honor of Harold Hotelling**. 1. ed. Califórnia: [s. n.], 1960. p. 278–292. *E-book*. Disponível em: https://books.google.com.br/books/about/Contributions_to_Probability_and_Statist.html?id=ZUSsAAAAIAAJ&redir_esc=y. Acesso em: 26 set. 2020.

LIMA, Edson Alves. **Alternativa para estimar o preço da madeira para energia**. Colombo: [s. n.], 2010.

LIMA, Gabriela Camargos *et al.* Evaluation of vegetation cover using the normalized difference vegetation index (NDVI). **Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, [S. l.], v. 8, n. 2, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.4136/ambiente-agua.959>

LOPES, Francilene da Silva; BARBOZA, Keyssy; SILVEIRA, Joicy. **Energia da Biomassa Bolsista de Valor**. Campos dos Goytacazes: Essentia Editora, 2013. Disponível em: <http://www.essentiaeditora.iff.edu.br/index.php/BolsistaDeValor/article/view/6722>. Acesso em: 18 set. 2017.

LOPES, Sérgio de Faria; VALE, Vagner Santiago do; SCHIAVINI, Ivan. Efeito de queimadas sobre a estrutura e composição da comunidade vegetal lenhosa do cerrado sentido restrito em Caldas Novas, GO. **Revista Árvore**, [S. l.], v. 33, n. 4, p. 695–704, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622009000400012>

LU, Jiazheng *et al.* Research and Application of Fire Forecasting Model for Electric Transmission Lines Incorporating Meteorological Data and Human Activities. **Mathematical Problems in Engineering**, [S. l.], v. 2016, p. 1–10, 2016 a. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2016/9828676>. Acesso em: 20 nov. 2018.

LU, JiaZheng *et al.* A multi-additive suppressant agent–based low-flow and long-distance firefighting approach for suppressing wildfires near electrical transmission lines. **Journal of Fire Sciences**, [S. l.], v. 34, n. 5, p. 398–415, 2016 b. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0734904116659499>. Acesso em: 20 nov. 2018.

MACHADO NETO, A. P. *et al.* Densidade e Poder Calorífico como Base para Prevenção de Incêndios Florestais sob Linhas de Transmissão. **Nativa**, [S. l.], v. 3, n. 1, p. 10–15, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.14583/2318-7670.v03n01a02>

MACHADO NETO, Arlindo de Paula. **Parâmetros climáticos e da vegetação em áreas de caatinga e cerrado, como base para prevenção de incêndios florestais, sob linhas de transmissão de energia**. 2013. - Universidade Federal Rural de Pernambuco, [s. l.], 2013. Disponível em: <http://www.tede2.ufrpe.br:8080/tede2/handle/tede2/5451>

MALICO, Isabel. **Energia da Biomassa** **Geoboletim**. Évora: [s. n.], 2008. Disponível em: <http://dspace.uevora.pt/rdpc/bitstream/10174/5983/1/GeoboletimJan2008.pdf>. Acesso em: 17 set. 2017.

MALINOWSKI, Adriana *et al.* **Estudo de Impacto Ambiental - Linha de Transmissão 525 kV Foz do Iguazu - Cascavel Oeste**. Curitiba: [s. n.], 2009. Disponível em: http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/EIA_RIMA/LT_525/EIA_LT_Cascavel_Foz_do_Iguacu.pdf. COPEL

MAMIŞ, Mehmet Salih; ARKAN, Müslüm; KELEŞ, Cemal. Transmission lines fault location using transient signal spectrum. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, [S. l.], v. 53, p. 714–718, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2013.05.045>

MANCUSO, Aline Castello Branco *et al.* Estatística descritiva: perguntas que você sempre quis fazer, mas nunca teve coragem. **Clinical & Biomedical Research**, [S. l.], v. 38, n. 4, p. 414–418, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.4322/2357-9730.89242>

MARABOTO, M. T. *et al.* Poder calorífico de dez espécies florestais da Amazônia Brasileira – Peruana. In: 1989, São Carlos. **III Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeiras**. São Carlos: [s. n.], 1989. p. 7–29.

MARQUEZ-REYNOSO, Mirna Ivett *et al.* Purpose, preferences and fuel value index of trees used for firewood in El Ocote Biosphere Reserve, Chiapas, Mexico. **Biomass and Bioenergy**, [S. l.], v. 100, p. 1–9, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.03.006>

NOVA: EM BUSCA DA SUPERBATERIA. Direção: Daniel McCabe. Estados Unidos da

América: Public Broadcasting Service, 2017. Disponível em: <https://www.netflix.com/search?q=nova&jbv=80991272&jbp=3&jbr=0>

MENEZES, Victor Prangiel de. **Linhas de Transmissão de Energia Elétrica: Aspectos Técnicos, Orçamentários e Construtivos**. 2015. - UFRJ/ Escola Politécnica, [s. l.], 2015. Disponível em: <http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10015383.pdf>. Acesso em: 27 maio. 2018.

MICROSOFT. **Microsoft Excel - Planilha Eletrônica**. [s. l.], 2020. Disponível em: <https://www.microsoft.com/pt-br/microsoft-365/excel>. Acesso em: 17 out. 2020.

MINISTÉRIO DA INFRAESTRUTURA. **Rodovias Federais**. [s. l.], 2019. Disponível em: <https://antigo.infraestrutura.gov.br/rodovias-brasileiras.html>. Acesso em: 13 fev. 2021.

MINNAAR, U. J.; GAUNT, C. T.; NICOLLS, F. Characterisation of power system events on South African transmission power lines. **Electric Power Systems Research**, [S. l.], v. 88, p. 25–32, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2012.01.015>

MISTRY, Jayalaxshmi. Fire in the cerrado (savannas) of Brazil: an ecological review. **Progress in Physical Geography: Earth and Environment**, [S. l.], v. 22, n. 4, p. 425–448, 1998. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/030913339802200401>

MORI, Fábio Akira *et al.* Utilização de eucaliptos e de madeiras nativas no armazenamento da aguardente de cana-de-açúcar. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, [S. l.], v. 23, n. 3, p. 396–400, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0101-20612003000300018>

MOTTA, Marcelo. **Aceiros Negros**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2019. Disponível em: https://www.icmbio.gov.br/parnaitatiaia/images/stories/o-que-fazemos/2019/Nota_site_aceiros_negros_2019.pdf.

NAGELKERKE, N. J. D. A Note on a General Definition of the Coefficient of Determination. **Biometrika**, [S. l.], v. 78, n. 3, p. 691, 1991. Disponível em: <https://doi.org/10.2307/2337038>

NARDOTO, Gabriela Bielefeld *et al.* Nutrient use efficiency at ecosystem and species level in savanna areas of Central Brazil and impacts of fire. **Journal of Tropical Ecology**,

[S. l.], v. 22, n. 2, p. 191–201, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/S0266467405002865>

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION - NOAA. **National Centers for Environmental Information (NCEI) formerly known as National Climatic Data Center (NCDC)**. [S. l.], 2020. Disponível em: <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forecast-system-gfs>. Acesso em: 28 set. 2020.

NGUFOR, Che; WOJTUSIAK, Janusz. Extreme logistic regression. **Advances in Data Analysis and Classification**, [S. l.], v. 10, n. 1, p. 27–52, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11634-014-0194-2>. Acesso em: 26 out. 2020.

NOGUEIRA, Euler Melo. **Densidade de madeira e alometria de árvores em florestas do arco do desmatamento: implicações para biomassa e emissão de carbono a partir de mudanças de uso da terra na amazônia brasileira**. 2008. - Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, 2008. Disponível em: <https://bdtd.inpa.gov.br/handle/tede/1190>. Acesso em: 17 maio. 2020.

NUNES, José Renato Soares; SOARES, Ronaldo Viana; BATISTA, Antonio Carlos. FMA+ - UM NOVO ÍNDICE DE PERIGO DE INCÊNDIOS FLORESTAIS PARA O ESTADO DO PARANÁ, BRASIL. **FLORESTA**, [S. l.], 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.5380/rf.v36i1.5509>

OLIVEIRA, Gabriel Marcos Vieira. **Densidade da madeira em Minas Gerais: amostragem, espacialização e relação com variáveis ambientais**. 2014. - UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS, Lavras, 2014. Disponível em: <http://repositorio.ufla.br/jspui/handle/1/4880>. Acesso em: 17 maio. 2020.

OLIVEIRA, José Tarcísio da Silva; HELLMEISTER, João Cesar; TOMAZELLO FILHO, Mário. Variação do teor de umidade e da densidade básica na madeira de sete espécies de eucalipto. **Revista Árvore**, [S. l.], v. 29, n. 1, p. 115–127, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622005000100013>

OLIVEIRA, Maria Beatriz Farias de. **Estudo integrado da espécie palmeira ouricuri**. 2013. - Universidade Federal de Alagoas, [S. l.], 2013.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO - ONS. **Submódulo 18.2 - Relação**

dos sistemas e modelos computacionais. Brasil: [s. n.], 2016 a. Disponível em: <http://ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/procedimentos-de-rede/vigentes>.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO - ONS. **Avaliação da Operação Eletroenergética do SIN.** Rio de Janeiro: [s. n.], 2016 b.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO - ONS. **Sistemas ONS.** [s. l.], 2016c. Disponível em: <http://www.ons.org.br/agentes/sistemasons.aspx>. Acesso em: 3 ago. 2017.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO - ONS. **Submódulo 20.1 - Glossário de termos técnicos** Brasil: [s. n.], 2016 d.p. 47. Disponível em: <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/procedimentos-de-rede/vigentes>

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO - ONS. **SINDAT.** [s. l.], 2017a. Disponível em: <http://betasindat.ons.org.br/SINDAT/Home/ControleSistema>. Acesso em: 1 set. 2017.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO - ONS. **Submódulo 22.7 Síntese Gerencial das Principais Perturbações do SIN.** Rio de Janeiro: [s. n.], 2017 b. Disponível em: <http://www.ons.org.br>. Acesso em: 5 jun. 2020.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO - ONS. **O que é o ONS.** [s. l.], 2018a. Disponível em: <http://ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/o-que-e-ons>. Acesso em: 4 nov. 2018.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO - ONS. **Qualidade do Suprimento.** [s. l.], 2018b. Disponível em: <http://ons.org.br/paginas/resultados-da-operacao/qualidade-do-suprimento>. Acesso em: 4 nov. 2018.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO - ONS. **Principais Causas de Perturbações em Linhas de Transmissão da Rede Básica.** [s. l.], 2018c. Disponível em: <http://ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/qualidade-do-suprimento-paineis.aspx>. Acesso em: 27 maio. 2018.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO - ONS. **ONS - Conheça o Sistema - Mapas do SIN.** [s. l.], 2020. Disponível em:

http://www.ons.com.br/conheca_sistema/mapas_sin.aspx. Acesso em: 25 out. 2020.

PACKARD, Gary C. Is logarithmic transformation necessary in allometry? **Biological Journal of the Linnean Society**, [S. l.], v. 109, n. 2, p. 476–486, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/bij.12038>

PARK, Young-Ju; LEE, Si-Young; OHGA, Shoji. A Study on Fire Characteristic of Cork Oaks for Forest Fire Identification in Korea. **J. Fac. Agr., Kyushu Univ.**, [S. l.], v. 63, n. 2, p. 259–264, 2018. Disponível em: <http://hdl.handle.net/2324/1955392>. Acesso em: 25 abr. 2020.

PAVÃO, Fábio Biasi; LEAL, Rogério Gesta. O problema da prestação de serviço público essencial enquanto direito social fundamental e sua contraprestação em face da incapacidade financeira do usuário. **Revista Thesis Juris**, [S. l.], v. 5, n. 1, p. 33–52, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.5585/rtj.v5i1.257>

PEIXOTO, Karine da Silva *et al.* Dinâmica da comunidade arbórea em uma floresta estacional semidecidual sob queimadas recorrentes. **Acta Botanica Brasilica**, [S. l.], v. 26, n. 3, p. 697–708, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0102-33062012000300020>

PEREIRA, C. E. M.; ZANETTA, L. C. Fault Location in Transmission Lines Using One-Terminal Postfault Voltage Data. **IEEE Transactions on Power Delivery**, [S. l.], v. 19, n. 2, p. 570–575, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2004.824391>

PEREIRA, Marcos Paulo S.; TAVARES, Gabriela. **LT 500 KV Colinas – São João do Piauí - Inventário Florestal Madeireiro**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2009.

PEREIRA, Roberto Martins; SPRITZER, Ilda Maria de Paiva Almeida. Automação e digitalização em subestações de energia elétrica: um estudo de caso. **Revista Gestão Industrial**, [S. l.], v. 3, n. 4, p. 147–160, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.3895/S1808-04482007000400012>

PESSIN, Gustavo *et al.* Utilizando Agentes Autônomos com Aprendizado para a Identificação e Combate de Incêndios em Áreas Florestais. *In*: 2007, Blumenau. **Anais do XVI Seminário de Computação**. Blumenau: [s. n.], 2007. p. 19–30. Disponível em: <http://pessin.googlepages.com/robombeiros>. Acesso em: 25 nov. 2018.

PETRICCIONE, Maria. **Infiammabilità della lettiera di diverse specie vegetali di ambiente mediterraneo**. 2005. - Università Degli Studi di Napoli Federico II, [s. l.], 2005. Disponível em: http://www.fedoa.unina.it/1355/1/Petriccione_-_Biologia_applicata.pdf. Acesso em: 25 nov. 2018.

PONTE, Marcelo Rodrigues *et al.* Blendas de bagaço de cana-de-açúcar, podas de mangueira e cajueiro: caracterização das propriedades e investigação de seus potenciais energéticos. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [S. l.], v. 24, n. 2, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1517-707620190002.0687>

POTTER, Brian. The Haines Index – it's time to revise it or replace it. **International Journal of Wildland Fire**, [S. l.], v. 27, n. 7, p. 437, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1071/WF18015>

PU, Zi-heng *et al.* Study on the breakdown characteristics of the transmission line gap under forest fire conditions. **International Transactions on Electrical Energy Systems**, [S. l.], v. 25, n. 11, p. 2731–2744, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/etep.1988>. Acesso em: 20 nov. 2018.

QUEIROZ, Leonardo Mendonça Oliveira de. **Estimação e análise das perdas técnicas na distribuição de energia elétrica**. 2010. - Universidade Estadual de Campinas, [s. l.], 2010. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/documents/656835/14876412/Tese_Leonardo_Queiroz.pdf/b4b30c33-6c79-4008-80f0-16a35ca66fb9. Acesso em: 26 maio. 2018.

QUIRINO, Waldir Ferreira *et al.* Poder calorífico da madeira e de resíduos lignocelulósicos. **Revista da Madeira**, [S. l.], v. 89, n. 1, p. 100–106, 2005. Disponível em: <http://www.lippel.com.br/dados/download/05-05-2014-10-46poder-calorifico-da-madeira-e-de-materiais-ligno-celulosicos.pdf>

RAMAR, K.; EISA, A. A. A. NEW FAULT LOCATION ALGORITHMS FOR TRANSMISSION LINES IN INTERCONNECTED POWER SYSTEMS. **International Journal of Power and Energy Systems**, [S. l.], v. 28, n. 3, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.2316/Journal.203.2008.3.203-3531>

REIS, Lineu Belico dos. **Geração de energia elétrica**. 1. ed. Barueri: Manoele, 2011. *E-book*.

REIS, Lineu Belico dos; SANTOS, Eldis Camargo. **Energia elétrica e sustentabilidade: Aspectos tecnológicos, socioambientais e legais**. 1. ed. Barueri: Manoeli, 2015. *E-book*.

RIBEIRO, Guido Assunção. Estratégias de prevenção contra os incêndios florestais. **Floresta**, [S. l.], v. 34, n. 2, p. 243–247, 2004. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/floresta/article/viewFile/2403/2011>. Acesso em: 25 nov. 2018.

RIBEIRO, Mário Guerreiro. **Metodologia de cálculo de custos em linhas de transmissão no Brasil**. 2014. - Universidade Federal do Rio de Janeiro, [s. l.], 2014. Disponível em: <http://www.monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10010721.pdf>. Acesso em: 25 nov. 2018.

ROBLEDO-MARTINEZ, A.; GUZMAN, E.; HERNANDEZ, J. L. Dielectric characteristics of a model transmission line in the presence of fire. **IEEE Transactions on Electrical Insulation**, [S. l.], v. 26, n. 4, p. 776–782, 1991. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/14.83702>. Acesso em: 20 nov. 2018.

ROCHA, Francisco das Chagas *et al.* **LT 500 KV Teresina II/ Sobral III/ Fortaleza II - C2 - Inventário Florestal Trecho: Teresina II / Piripiri**. Teresina: [s. n.], 2019.

ROCHA, Maria Amélia da *et al.* **LT 500 KV Colinas - Sobradinho - Levantamento Florestal**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2005.

RODRÍGUEZ-TREJO, Dante A. *et al.* Modeling forest fire danger in the zones affected by hurricane Dean. **Agrociencia**, [S. l.], v. 45, n. 5, p. 593–608, 2011. Disponível em: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?frbrVersion=3&script=sci_arttext&pid=S1405-31952011000500006&lng=en&tlng=en. Acesso em: 31 dez. 2019.

ROTAROU, Elena S. Does Municipal Socioeconomic Development Affect Public Perceptions of Crime? A Multilevel Logistic Regression Analysis. **Social Indicators Research**, [S. l.], v. 138, n. 2, p. 705–724, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11205-017-1669-2>. Acesso em: 26 out. 2020.

ROUSE, J. W. *et al.* **Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation** Progress Report RSC 1978-1. Houston: [s. n.], 1973. Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19730017588>.

SAINANI, Kristin L. Logistic Regression. **PM&R**, [S. l.], v. 6, n. 12, p. 1157–1162, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pmrj.2014.10.006>. Acesso em: 26 out. 2020.

SANTIAGO, Javier; TAVARES, Maria Cristina. Analysis of half-wavelength transmission line under critical balanced faults: Voltage response and overvoltage mitigation procedure. **Electric Power Systems Research**, [S. l.], v. 166, p. 99–111, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2018.10.002>

SAS. **Software de Business Analytics e Business Intelligence - SAS**. [S. l.], 2020. Disponível em: https://www.sas.com/pt_br/home.html. Acesso em: 5 out. 2020.

SCHMIDT, Walfredo. **Materiais Elétricos - Vol. 2 Isolantes e Magnéticos**. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2019. *E-book*.

SILVA, Carlos José da. **Densidade básica e potencial energético de espécies lenhosas do cerrado do estado de Tocantins**. 2014. [S. l.], 2014.

SILVA, Lazaro Benedito da *et al.* Anatomia e densidade básica da madeira de *Caesalpinia pyramidalis* Tul. (Fabaceae), espécie endêmica da caatinga do Nordeste do Brasil. **Acta Botanica Brasilica**, [S. l.], v. 23, n. 2, p. 436–445, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0102-33062009000200015>

SILVA, Lázaro Lavoisier Honorato da *et al.* Características Dendrométricas, Físicas e Químicas da *Myracrodruon urundeuva* e da *Leucaena leucocephala*. **Floresta e Ambiente**, [S. l.], v. 24, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2179-8087.002216>

SILVEIRA, Livia Helena Carrera; REZENDE, Alba Valéria; VALE, Ailton Teixeira do. Teor de umidade e densidade básica da madeira de nove espécies comerciais amazônicas. **Acta Amazonica**, [S. l.], v. 43, n. 2, p. 179–184, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0044-59672013000200007>

SIQUEIRA, Humberto Fauller de *et al.* Determinação da densidade básica de *Myracrodruon urundeuva* | Galoá Proceedings. In: 2013, Campinas. **Anais do Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira 2013**. Campinas: Galoá, 2013. Disponível em: <https://proceedings.science/cbcm-2013/trabalhos/determinacao-da-densidade-basica-de-myracrodruon-urundeuva?lang=pt-br#>. Acesso em: 17 maio. 2020.

SOUSA, Weber Melo de *et al.* Sistema de localização automática de faltas em linhas de transmissão utilizando dados de dois terminais-experiência da Cemig. *In:* 2005, Curitiba. **Anais do XVIII SNPTEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica.** Curitiba: [s. n.], 2005. p. 1–8. Disponível em: <https://www.cgti.org.br/publicacoes/sistema-de-localizacao-automatica-de-faltas-em-linhas-de-transmissao-utilizando-dados-de-dois-terminais-experiencia-da-cemig/>. Acesso em: 6 jun. 2020.

SOUZA, Michel Aquino de. **Levantamento de plantas de baixa inflamabilidade em áreas queimadas de cerrado no Distrito Federal e análise das suas propriedades físicas.** 2015. - Universidade de Brasília, [s. l.], 2015. Disponível em: http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/18997/1/2015_MichelAquinodeSouza.pdf. Acesso em: 25 nov. 2018.

STEVENS, S. S. On the Theory of Scales of Measurement. **Science**, [S. l.], v. 103, n. 2684, p. 677–680, 1946. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/science.103.2684.677>

VALE, Ailton Teixeira do. **Características de combustíveis de origem vegetal.** Brasília: [s. n.], 2017.

VALE, Ailton Teixeira do; BRASIL, Maria Aparecida Mourão; LEÃO, Alcides Lopes. Quantificação e caracterização energética da madeira e casca de espécies do cerrado. **Ciência Florestal**, [S. l.], v. 12, n. 1, p. 71, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/198050981702>

VALE, Ailton Teixeira do; BRASIL, Maria Aparecida Mourão; MARTINS, Ildeu Soares. Variação axial da densidade básica da madeira de *Acacia mangium* Willd aos sete anos de idade. **Ciência Florestal**, [S. l.], v. 9, n. 2, p. 85, 1999. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/19805098386>

VALE, Ailton Teixeira do; FELFILI, Jeanine Maria. Dry biomass distribution in a cerrado sensu stricto site in Brazil central. **Revista Árvore**, [S. l.], v. 29, n. 5, p. 661–669, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0100-67622005000500001>

VALE, Ailton Teixeira do; FIEDLER, Nilton César; SILVA, Gilson Fernandes da. Avaliação energética da biomassa do cerrado em função do diâmetro das árvores. **Ciência Florestal**, [S. l.], v. 12, n. 2, p. 115, 2005. Disponível em:

<https://doi.org/10.5902/198050981686>

VIEIRA DA SILVA, Wesley *et al.* LEALDADE DE ESTUDANTES: UM MODELO DE REGRESSÃO LOGÍSTICA. **Revista de Administração FACES Journal**, [S. l.], v. 9, n. 4, p. 129–151, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.21714/1984-6975FACES2010V9N4ART194>. Acesso em: 26 out. 2020.

WALD, Abraham. Tests of Statistical Hypotheses Concerning Several Parameters When the Number of Observations is Large. **Transactions of the American Mathematical Society**, [S. l.], v. 54, n. 3, p. 426, 1943. Disponível em: <https://doi.org/10.2307/1990256>

YI-SHI YUE *et al.* Study on the flashover characteristics of $\pm 500\text{kV}$ DC transmission lines caused by forest fire under reduced-voltage operation. *In*: 2017, **2017 EPTC Power Transmission and Transformation Technology Conference**. : Institution of Engineering and Technology, 2017. p. 27 (5 pp.)-27 (5). Disponível em: <https://doi.org/10.1049/cp.2017.0567>. Acesso em: 20 nov. 2018.

ZANZARINI, Fabricio V. *et al.* Correlação espacial do índice de vegetação (NDVI) de imagem Landsat/ETM+ com atributos do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [S. l.], v. 17, n. 6, p. 608–614, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013000600006>

ZHANG, Yao; WANG, Jianxue; LUO, Xu. Probabilistic wind power forecasting based on logarithmic transformation and boundary kernel. **Energy Conversion and Management**, [S. l.], v. 96, p. 440–451, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.03.012>