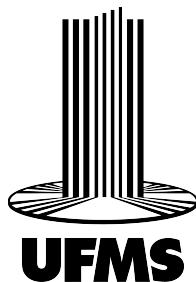


UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Impactos da NBR 5422 no equilíbrio entre o desenvolvimento e a preservação ambiental

Nikolas Kappes Fajardo

Campo Grande - MS
26 de Outubro de 2024



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Impactos da NBR 5422 no equilíbrio entre o desenvolvimento e a preservação ambiental

Nikolas Kappes Fajardo

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como exigência para obtenção do grau de Ba-
charelado em Engenharia Elétrica da Universi-
dade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS.

Orientador: Prof. Dr. Jeferson Meneguín Ortega

Campo Grande - MS
26 de Outubro de 2024

Impactos da NBR 5422 no equilíbrio entre o desenvolvimento e a preservação ambiental

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como exigência para obtenção do grau de Bacharelado em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Jeferson Meneguín Ortega

Prof. Dr. Jair de Jesus Fiorentino

Prof. Dr. Paulo Irineu Koltermann

Campo Grande - MS
26 de Outubro de 2024

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a Deus pela força, sabedoria e resiliência para enfrentar os desafios ao longo deste percurso.

Aos pais, Jean Carlos Fajardo e Rosimeri Kappes, pelo amor, paciência e suporte durante essa trajetória. Pessoas as quais respeito e amo profundamente.

Ao meu irmão Enzo, que de forma similar aos meus pais, sempre esteve presente, servindo como fonte de alegria e motivação.

Aos familiares, tios, primos e avós pelo carinho e apoio transmitidos apesar da distância.

Agradeço ao Professor Jeferson Meneguín Ortega pela sua dedicação e orientação durante a elaboração deste trabalho. E aos demais professores que participaram da minha formação.

Aos colegas de trabalho, pela contribuição e conhecimentos, que possibilitaram a realização desse estudo.

Aos amigos de graduação, que direta e indiretamente contribuíram para a minha formação e evolução como pessoa.

E por fim, aos meus amigos, que partilharam de jornadas semelhantes a minha, e que estiveram presentes de forma constante.

Resumo

A NBR 5422 desempenha um papel crucial no planejamento e construção de linhas de transmissão no Brasil, estabelecendo diretrizes técnicas que visam garantir a segurança, eficiência e adequação às necessidades do setor elétrico. Este trabalho avalia como a norma aborda os impactos ambientais, discutindo suas causas e efeitos. A pesquisa identifica os principais fatores associados aos impactos ambientais de linhas de transmissão, com destaque para a faixa de segurança, além de avaliar a incorporação de novos critérios ambientais e metodologias que aprimoram a precisão dos cálculos técnicos. Para exemplificar os impactos e avanços proporcionados pelas alterações na metodologia de cálculo da faixa de segurança, foi realizado um estudo de caso simulando uma linha de transmissão conectando as capitais Campo Grande e Cuiabá. Os resultados obtidos através do estudo de caso e da análise dos novos métodos de uso e ocupação de solo destacam a relevância da revisão normativa como ferramenta para a mitigação de impactos ambientais, evidenciando a importância de uma abordagem integrada entre critérios técnicos e sustentabilidade.

Palavras-chaves: Linhas de Transmissão, Impactos Ambientais, Faixa de Segurança.

Abstract

The NBR 5422 (Brazilian Standard) has a crucial role in the planning and construction of transmission lines in Brazil, establishing technical guidelines that aim to ensure safety, efficiency and suitability to the needs of the sector. This paper evaluates how this standard addresses environmental impacts, discussing their causes and effects. The research identifies the main factors associated with the environmental impacts of transmission lines, with emphasis on the right of way, in addition to evaluating the incorporation of new environmental criteria and methodologies that improve the accuracy of technical calculations. To exemplify the impacts and advances provided by the changes in the methodology for calculating the right of way, a case study was carried out simulating a transmission line connecting the capitals of Campo Grande and Cuiabá. The results obtained through the case study and the analysis of new methods of land use and occupation highlight the relevance of the normative as a tool for mitigating environmental impacts, evidencing the importance of an integrated approach between technical criteria and sustainability.

Keywords: Transmission Line, Environmental Impacts, Right of Way.

Lista de ilustrações

Figura 1 –	Matriz Energética - Brasil x Mundo.	11
Figura 2 –	Oferta Interna de Energia Por Fonte.	12
Figura 3 –	Consumo de Energia.	12
Figura 4 –	Poste Metálico.	17
Figura 5 –	Poste Concreto.	18
Figura 6 –	Torres.	18
Figura 7 –	Cabos Condutores.	19
Figura 8 –	Cabos Optical Ground Wire (OPGW).	20
Figura 9 –	Disposição dos Cabos.	20
Figura 10 –	Estrutura de Ancoragem.	21
Figura 11 –	Estrutura de Suspensão.	22
Figura 12 –	Tipos de Isoladores.	23
Figura 13 –	Flecha.	29
Figura 14 –	Fator de efetividade.	30
Figura 15 –	Relação entre as velocidades médias a 10 m de altura.	32
Figura 16 –	Fator de efetividade.	34
Figura 17 –	Exemplo de LT.	39
Figura 18 –	Estações Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para o tra- çado.	40
Figura 19 –	Velocidade do vento pela progressiva.	42
Figura 20 –	Temperatura mínima pela progressiva.	43
Figura 21 –	Projeção do balanço ao solo.	45
Figura 22 –	Zoneamento da faixa de passagem.	50
Figura 23 –	Temperatura coincidente (°C).	56
Figura 24 –	Velocidade básica do vento (m/s).	57
Figura 25 –	Parâmetro alfa da distribuição estatística de Gumbel (m/s)–1.	58
Figura 26 –	Parâmetro beta da distribuição estatística de Gumbel (m/s).	59

Lista de tabelas

Tabela 2	–	Coefficientes de rugosidade do terreno.	32
Tabela 3	–	Valores de n para correção da velocidade do vento em função da altura.	32
Tabela 4	–	$K_{T,n}$	35
Tabela 4	–	$K_{T,n}$	36
Tabela 5	–	K_{tur}	36
Tabela 6	–	K_{int30s}	37
Tabela 7	–	Valores de α para K_{alt}	37
Tabela 8	–	Valores para cálculo da parcela horizontal de segurança	38
Tabela 9	–	Velocidades de vento por estação.	41
Tabela 10	–	Velocidade do vento corrigida por estação.	41
Tabela 11	–	Dados iniciais para o calculo da faixa de segurança	46
Tabela 12	–	Resultados do estudo de caso	48

Abreviações

ACCC	Aluminum Conductor Composite Core
ACSR	Aluminium Conductor Steel-Reinforced
AIA	Avaliação de Impacto Ambiental
CAA	Cabo de Alumínio com Alma de Aço
CONAMA	Coneselho Nacional do Meio Ambiente
DUP	Declaração de Utilidade Pública
EIA	Estudo de Impacto Ambiental
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Natu- rais Renováveis
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
LT	Linha de Transmissão
OPGW	Optical Ground Wire
PNMA	Política Nacional do Meio Ambiente
RIMA	Relatório de Impacto Ambiental
SIN	Sistema Interligado Nacional

Sumário

Abreviações	8
1 Introdução	11
1.1 Estado da Arte	13
1.2 Objetivos	15
1.2.1 Objetivo Geral	15
1.2.2 Objetivos Específicos	15
2 Revisão Bibliográfica	17
2.1 Conceitos Básicos de uma Linha de Transmissão	17
2.1.1 Estruturas	17
2.1.2 Cabos Condutores	19
2.1.3 Cabos Para-Raios	20
2.1.4 Isoladores e Ferragens	22
2.1.5 Fundações	23
2.1.6 Aterramento	24
2.2 Normativas Ambientais	24
3 Metodologia	26
4 Resultados	28
4.1 NBR 5422/1985 Definições da Faixa de Segurança	28
4.2 NBR 5422/2024 Definições da Faixa de Segurança	33
4.3 Estudo de caso da faixa de segurança pela NBR 5422/2024	39
4.3.1 Velocidades do Vento	39
4.3.2 Obtenção do Ângulo de Balanço	42
4.3.3 Projeção da Faixa de Segurança	44
4.4 Estudo de caso da faixa de segurança pela NBR 5422/1985	45
4.4.1 Faixa para 10 anos	45
4.4.2 Faixa para 50 anos	47
4.5 Uso e ocupação do solo	48
Conclusão	53
Referências	54

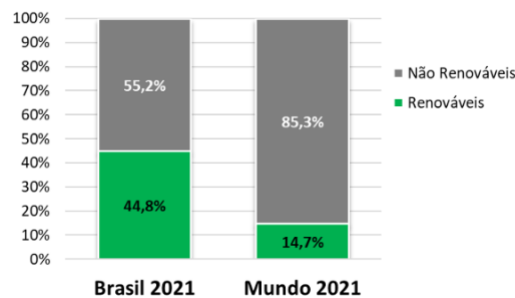
Anexos	55
ANEXO A Figuras.	56

1 Introdução

A demanda energética é um tema que, com o passar do tempo, torna-se cada vez mais relevante. O avanço tecnológico e a transição para fontes renováveis, em substituição aos combustíveis fósseis, figuram entre os principais fatores que impulsionam o aumento dessa demanda.

As fontes de geração de energia desempenham um papel crucial ao converter diferentes formas de energia presentes na natureza em energia elétrica. Conforme ilustrado na Figura 1, o Brasil apresenta uma matriz energética significativamente mais sustentável do que a média mundial, com 44,8% da energia proveniente de fontes renováveis, enquanto o mundo registra apenas 14,7%. Esse destaque brasileiro deve-se, em grande parte, à utilização de usinas hidrelétricas, parques eólicos e usinas solares, que desempenham um papel fundamental na promoção de um futuro mais sustentável.

Figura 1 – Matriz Energética - Brasil x Mundo.



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética - Matriz Energética e Elétrica.

Cada uma dessas fontes possui características específicas, que determinam o local ideal para a instalação dos equipamentos. Os parques eólicos, por exemplo, precisam ser instalados em regiões com ventos constantes e de velocidade adequada para garantir a eficiência na geração de energia elétrica.

Os consumidores, por sua vez, representam o destino final da energia gerada. Ela é essencial para alimentar eletrodomésticos nas residências, máquinas e equipamentos no comércio e na indústria, além de garantir a iluminação de parques, vias públicas e muitos outros usos. Diferente das fontes geradoras, que possuem localizações restritas, os consumidores estão espalhados por praticamente todo o território nacional.

Desta forma, para que a energia gerada seja enviada para o local de uso, é necessária uma conexão física entre as duas extremidades. As linhas de transmissão cumprem essa função essencial, superando obstáculos naturais e terrenos de difícil acesso para levar energia elétrica a diversas regiões. Elas não apenas garantem a distribuição de energia, mas também promovem o desenvolvimento econômico e social das áreas conectadas.

A Figura 2 apresenta a oferta interna de energia por fonte no Brasil ao longo dos anos. Embora fontes tradicionais, como o petróleo, ainda dominem a matriz, observa-se uma diversificação relevante, alinhada ao movimento global de transição energética.

Figura 2 – Oferta Interna de Energia Por Fonte.

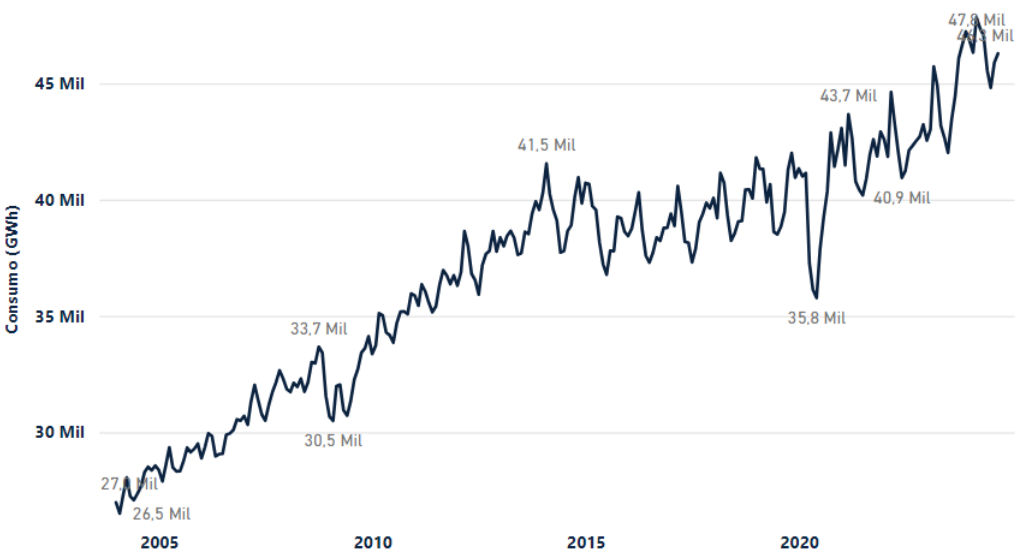
											%
FONTES	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	SOURCES
PETRÓLEO, GÁS NATURAL E DERIVADOS	51,9	52,7	50,8	48,7	48,9	46,5	46,3	44,6	47,5	46,1	OIL, OIL PRODUCTS AND NATURAL GAS
CARVÃO MINERAL E DERIVADOS	5,6	5,7	5,9	5,5	5,7	5,6	5,2	4,8	5,6	4,6	COAL AND COAL PRODUCTS
HIDRÁULICA E ELETRICIDADE	12,5	11,4	11,3	12,5	11,9	12,5	12,3	12,5	10,9	12,5	HYDRAULIC AND ELECTRICITY
LENHA E CARVÃO VEGETAL	8,4	8,2	8,3	8,1	8,4	9,0	8,9	9,1	9,0	9,0	FIREWOOD AND CHARCOAL
PRODUTOS DA CANA	16,0	15,7	16,9	17,4	16,9	17,2	17,9	19,0	16,3	15,4	SUGAR CANE PRODUCTS
EÓLICA	0,2	0,3	0,6	1,0	1,2	1,4	1,6	1,7	2,1	2,3	WIND
SOLAR	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1,2	SOLAR
OUTRAS ¹	5,3	5,6	6,0	6,6	6,7	7,4	7,2	7,7	7,8	8,9	OTHERS ¹
TOTAL	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	TOTAL

1. Inclui Outras Fontes Primárias Renováveis e Urânio / ¹ Includes Others Renewable Energy And Uranium

Fonte: Empresa de Pesquisa Energética - Balanço Energético Nacional 2023.

Paralelamente, a Figura 3 evidencia o constante aumento do consumo de energia elétrica no país. Esse crescimento reflete o aumento populacional e avanço tecnológico, reforçando a necessidade de expansão da infraestrutura de geração e transmissão de energia.

Figura 3 – Consumo de Energia.



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética - Painel de Monitoramento do Consumo de Energia Elétrica.

Considerando essa crescente demanda de energia elétrica na sociedade contemporânea, associado fato da localização das gerações, especialmente em um país como o Brasil,

torna-se essencial a conexão entre os novos consumidores e a rede do [Sistema Interligado Nacional \(SIN\)](#). O sistema opera em equilíbrio dinâmico, onde toda a energia gerada deve ser consumida em tempo real para evitar falhas e garantir a integridade do sistema. Para isso, é necessário um sistema de transmissão altamente confiável.

No entanto, o avanço à fontes renováveis perde sua eficiência, se durante o processo de conexão da fonte-carga os impactos ambientais forem negligenciados. Cada [Linha de Transmissão \(LT\)](#) possui um impacto diferente causado, isso se deve as características construtivas básicas de cada projeto. Mesmo assim, impactos mínimos não devem inviabilizar projetos que conectem regiões isoladas à rede elétrica, pois a energia promove desenvolvimento, qualidade de vida e novas oportunidades ([TOBOUTI; SANTOS, 2014](#)).

Além de que conforme mencionado por Anne Pereira (2014):

Dois importantes grupos de impactos são esperados para esse empreendimento. O primeiro refere-se aos impactos decorrentes do aumento da circulação de veículos e pessoas, interferências geradas pelas atividades das obras sobre assentamentos e localidades rurais, bem como os transtornos gerados pela perda ou interdição de áreas de produção agrícola em função do estabelecimento da faixa de servidão. Já o segundo, agrega os impactos decorrentes da supressão da vegetação para implantação das torres e faixa de serviço, que além de promover a redução de ambientes naturais e fragmentação da vegetação, gera efeitos sobre a fauna local ([PEREIRA, 2014](#)).

A partir dessa constatação, podemos concluir que a faixa de servidão, é um ponto crítico ao se tratar de impactos ambientais. Desta forma é fundamental a compreensão e avaliação adequada das fontes de impactos e suas consequências, buscando o balanço entre o desenvolvimento energético e tecnológico do país e a preservação ambiental. Promovendo um crescimento sustentável.

1.1 Estado da Arte

Nos últimos anos, as discussões sobre o impacto ambiental das linhas de transmissão de energia elétrica têm ganhado relevância, especialmente devido à necessidade de conciliar o desenvolvimento da infraestrutura energética com a preservação ambiental.

Por definição, a faixa de segurança de uma [LT](#) é fundamental para garantir a operação segura e a integridade do sistema. Entretanto, a presença de vegetação de médio e grande porte nessas áreas aumenta significativamente o risco de incêndios, o que pode impactar tanto a operação da linha, resultando em desligamentos, quanto o ecossistema local ([COSTA, 2021](#)). Isso demonstra a importância do dimensionamento adequado das

faixas de segurança e de um manejo apropriado, que deve incluir a manutenção regular e a limpeza contínua. No entanto, a limpeza das faixas pode causar a fragmentação dos habitats, criando barreiras artificiais que isolam espécies e comprometem a integridade ecológica local.

Além disso, a faixa ocupada por linhas de transmissão é transformada em [Declaração de Utilidade Pública \(DUP\)](#), o que permite que o empreendimento seja considerado de interesse comum para a sociedade. De acordo com ([COBRA et al., 2020](#)) a concessionária pode utilizar a terra sem a necessidade de aquisição por meio da [DUP](#) e da instituição da servidão administrativa. Entretanto, a supressão de vegetação para a implementação dessas linhas resulta em impactos diretos e indiretos sobre a flora e a fauna, principalmente alterando os habitats naturais.

Durante a fase de estudos, é realizada uma estimativa do quantitativo de vegetação impactada, e, com base nesses dados, são estabelecidas medidas de controle, como mitigação e compensação ambiental. A compensação, muitas vezes, ocorre por meio de programas de reposição florestal, que obrigam o empreendedor a restaurar a vegetação nativa nas áreas impactadas ([COBRA et al., 2020](#)). Cobra (2020) ressalta que a reposição florestal frequentemente enfrenta desafios, como a dificuldade de encontrar áreas disponíveis para plantio. Além disso, a fragmentação dos habitats e a remoção em larga escala de vegetação podem isolar espécies e comprometer a biodiversidade, o que exige um planejamento cuidadoso e medidas que vão além da simples compensação, priorizando a integridade ecológica.

A NBR 5422, que regula aspectos técnicos e de segurança na construção de linhas de transmissão, desempenha um papel fundamental ao definir diretrizes que visam proteger tanto o sistema elétrico quanto o meio ambiente. Contudo, apesar de sua importância, essa norma, criada em 1985, vem sendo complementada por uma série de regulamentações ambientais mais recentes, que refletem uma maior preocupação com os impactos ecológicos causados pela construção e operação dessas linhas.

Uma das atualizações mais significativas na regulamentação ambiental foi a introdução de diretrizes mais rigorosas para o licenciamento ambiental de empreendimentos, como as estabelecidas na Resolução [Conselho Nacional do Meio Ambiente \(CONAMA\)](#) de 1986 e outras legislações que impõem exigências específicas para a supressão de vegetação e mitigação de impactos ambientais. Essas normas exigem que concessionárias que operam linhas de transmissão conduzam Estudos de Impacto Ambiental (EIA) e apresentem Relatórios de Impacto Ambiental (RIMA), detalhando os impactos potenciais e propondo medidas de mitigação e compensação para minimizar os danos.

De acordo com Cobra (2020), o processo de licenciamento ambiental, além de determinar a necessidade de compensação florestal, também introduz requisitos para a restauração ecológica das áreas impactadas, especialmente em biomas sensíveis como a

Mata Atlântica. A autora destaca que as normas atuais exigem não apenas a compensação das áreas desmatadas, mas também um planejamento mais estratégico para garantir que a reposição florestal contribua para a recuperação de ecossistemas fragmentados, evitando a criação de corredores ecológicos artificiais que possam isolar populações de espécies.

Com a crescente demanda por energia elétrica e a expansão da infraestrutura de transmissão, essas atualizações normativas visam equilibrar o desenvolvimento econômico com a preservação ambiental. Apesar disso, como apontado por Cobra (2020), o cumprimento dessas normas ainda enfrenta desafios, principalmente devido à dificuldade em encontrar áreas adequadas para a reposição florestal e à falta de clareza em algumas regulamentações, o que impede uma implementação mais eficaz das medidas compensatórias.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Em 1985, foi publicada a primeira versão da NBR 5422, com o propósito de formalizar, padronizar e servir como referência para projetos de linhas de transmissão. Amplamente utilizada por décadas, a norma tornou-se um marco no setor elétrico brasileiro. Entretanto, com o tempo, identificou-se a necessidade de maior rigor e abrangência para tratar de situações específicas não contempladas originalmente. Para suprir essas lacunas, o setor passou a adotar também normas internacionais, como as da IEC, IEEE e brochuras do CIGRE, além de normativas internas desenvolvidas por operadores.

A revisão da NBR 5422, concluída em 2024, incorporou avanços significativos, integrando dados da versão original e referências internacionais, bem como aprimorando critérios técnicos.

Paralelamente, a crescente relevância das questões ambientais ao longo das últimas décadas influenciou diretamente a revisão da norma, que incorporou novos critérios e revisou definições para atender às demandas contemporâneas.

Este trabalho tem como objetivo analisar as alterações introduzidas na NBR 5422 e avaliar os impactos dessas mudanças na faixa de segurança de linhas de transmissão. Os pontos de alterações estão relacionados à obtenção e tratamento dos dados climatológicos, bem como ao cálculo das distâncias elétricas de segurança. A pesquisa busca compreender como as mudanças impactam o planejamento e a construção de linhas de transmissão, com foco nos efeitos ambientais associados.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para fins de compreensão dos métodos serão realizados os aspectos da de 1985 e 2024 da NBR 5422, e por meio deles concluir os objetivos:

- Calcular a faixa de segurança;
- Calcular o comportamento do balanço sob ação do vento;
- Realizar um estudo de caso para ambas as versões da NBR 5422;
- Compreender os critérios de uso e ocupação do solo.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Conceitos Básicos de uma Linha de Transmissão

As linhas de transmissão, em sua grande maioria, são compostas dos seguintes elementos: cabos condutores, para-raios, estruturas, ferragens, isoladores, aterramento e fundação.

2.1.1 Estruturas

A parte mais visível de uma linha são as estruturas, responsáveis por manter os cabos elevados a uma distância segura do solo e outros obstáculos. Essas estruturas podem assumir diferentes formas, como torres ou postes (FUCHS, 1979).

Os postes, que geralmente são metálicos ou de concreto, são mais comuns em áreas urbanizadas, onde o espaço disponível é limitado, conforme apresentado nas Figuras 4 e 5. Podendo assim respeitar as diretrizes urbanísticas das cidades. Todavia, este fato não restringe seu uso em áreas rurais.

Figura 4 – Poste Metálico.



Fonte: Imagem extraída do software Google Street View® em 31 ago. 2024.

Figura 5 – Poste Concreto.



Fonte: Imagem extraída do software Google Street View® em 31 ago. 2024.

As torres são metálicas e tem como principal aplicação os ambientes rurais. Elas podem variar em altura e formato, de acordo com a característica do terreno a ser atravessado, como exemplificado na Figura 6. Possuindo modelos específicos para montanhas, rios e outros obstáculos naturais.

Figura 6 – Torres.



Fonte: <https://www.canarymedia.com/articles/transmission/the-us-is-building-power-lines-faster-but-not-fast-enough>.

Existem diversos fatores que determinam qual tipo de geometria de estrutura deve ser utilizada. Entre esses fatores, destacam-se a distância entre fases, disposição dos circuitos, quantidades de circuitos, aplicação em ângulos ou alinhamento. Todos esses aspectos são considerados em vista do custo de produção da torre e da necessidade de otimização do projeto, de forma a garantir que não apresente riscos operacionais para linha e para o ambiente no entorno (FUCHS, 1979).

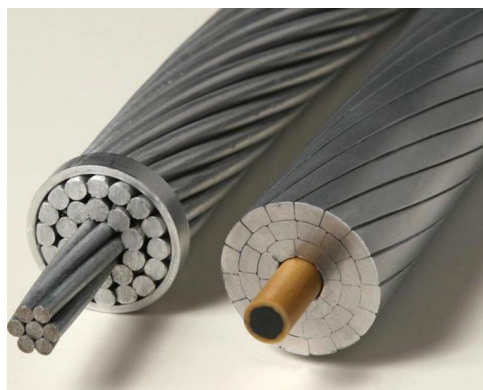
2.1.2 Cabos Condutores

Como segundo ponto em uma LT temos os cabos condutores, que são os responsáveis pela passagem de corrente elétrica. O sistema nacional adota o circuito trifásico para corrente alternada, ou seja, em uma linha de circuito simples existem três fases simultaneamente, na quais cada uma das fases é composta por um ou mais condutores. As linhas em uma mesma estrutura podem ser compostas também por circuito duplo, onde seis fases são utilizadas.

Estes cabos são compostos, de forma geral, por alumínio puro ou liga. Além de que para aproveitar o efeito pelicular existente na corrente alternada, alguns modelos de cabos possuem um núcleo de outro material, comumente utiliza-se aço, que proporciona maior resistência e sustentação. Existem também outros tipos de núcleos, como os de materiais compósitos, que combinam alta resistência e leveza (FUCHS, 1979).

Na Figura 7, a esquerda, um condutor **Aluminium Conductor Steel-Reinforced (ACSR)** que consiste em um cabo condutor de alumínio com alma de aço, onde os fios que compõem o cabo são circulares. À direita um cabo **Aluminum Conductor Composite Core (ACCC)**, que possui um núcleo em compósito de carbono, tornando-se resistente e leve, além de adotar uma geometria otimizada que elimina o ar dentro da seção do cabo, garantindo uma melhor efetividade para este condutor. Sendo esses alguns dos exemplos de cabos existentes.

Figura 7 – Cabos Condutores.

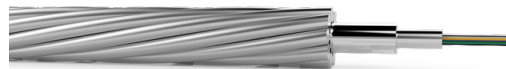


Fonte: https://en.m.wikipedia.org/wiki/File:ACSR_and_ACCC.JPG.

2.1.3 Cabos Para-Raios

Os cabos para-raios, também conhecidos como cabo guarda, estão posicionados no topo das linhas de transmissão. Sua principal função é proteger a linha contra descargas atmosféricas, além de atuar como condutores de corrente de curto-circuito para o sistema de aterramento (LABEGALINI et al., 1992). O material utilizado varia de acordo com a necessidade da linha, sendo um dos fatores principais a capacidade de corrente. Esses cabos, são conectados à malha de aterramento, fechando o circuito entre a linha e as subestações. Em regiões onde o índice de incidência de raios é mínimo, existe a possibilidade da não utilização desse cabo. Para áreas onde esse índice é alto, modelos como o OPGW, são amplamente utilizados. A Figura 8 demonstra um exemplo de cabo OPGW, que de acordo com a fabricante “... utilizado em linhas de transmissão de energia para proteção contra descargas atmosféricas e transmissão de dados, atendendo a demanda por comunicação de alta capacidade” (FURUKAWA, Online). Sua composição inclui fios de aço-alumínio e tubos de aço inoxidável e alumínio.

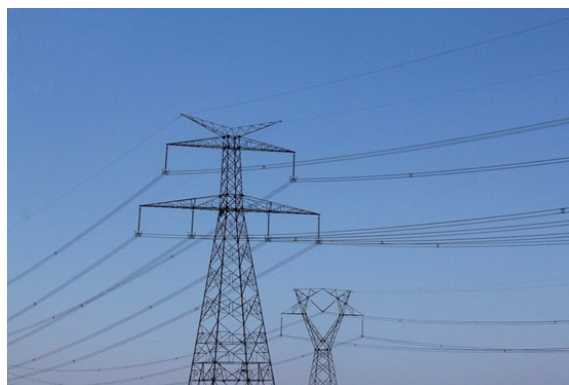
Figura 8 – Cabos OPGW.



Fonte: <https://www.furukawalatam.com/pt-br/catalogo-de-produtos-detalhes/cabo-opgw-dual-ds1097141—115mm2>.

A disposição dos cabos condutores pode variar, mas sempre deve respeitar o ângulo de blindagem do cabo para-raios (LABEGALINI et al., 1992), assim como na Figura 9, em circuito duplo e disposição triangular, para manter a blindagem dois para-raios foram empregados na parte superior da torre.

Figura 9 – Disposição dos Cabos.



Fonte: <https://eletricanaredecom.wordpress.com/2018/07/17/transposicao-da-linha-de-transmissao/>.

É importante destacar que existem dois principais tipos de estruturas, a de ancoragem e a de suspensão. As estruturas de ancoragem são responsáveis pela fixação física dos cabos, onde a tração é aplicada. Estas estruturas são utilizadas principalmente no início e fim da linha e em ângulos no traçado. Essas estruturas são mais robustas e resistentes, projetadas para suportar grandes diferenças de tração. Contudo, o seu uso é feito apenas nos casos de necessidade, já que essas estruturas possuem um custo elevado e maior complexidade (FUCHS, 1979).

A torres de ancoragem realizam a fixação dos cabos por meio de grampos especializados, tensionando-os conforme as especificações de projeto. Na Figura 10 é apresentado uma torre de ancoragem em alinhamento com múltiplos cabos condutores por fase, o cabo para-raios também é ancorado (FUCHS, 1979).

Por outro lado, as estruturas de suspensão são projetadas para suportar o peso dos cabos, mantendo-os suspensos ao longo do traçado ou em ângulos pequenos. Essas estruturas têm como função principal sustentar os cabos sem transmitir esforços significativos de tração para a torre. menos robustas e de custo reduzido e desta forma não suportam grandes diferenças de tração (FUCHS, 1979).

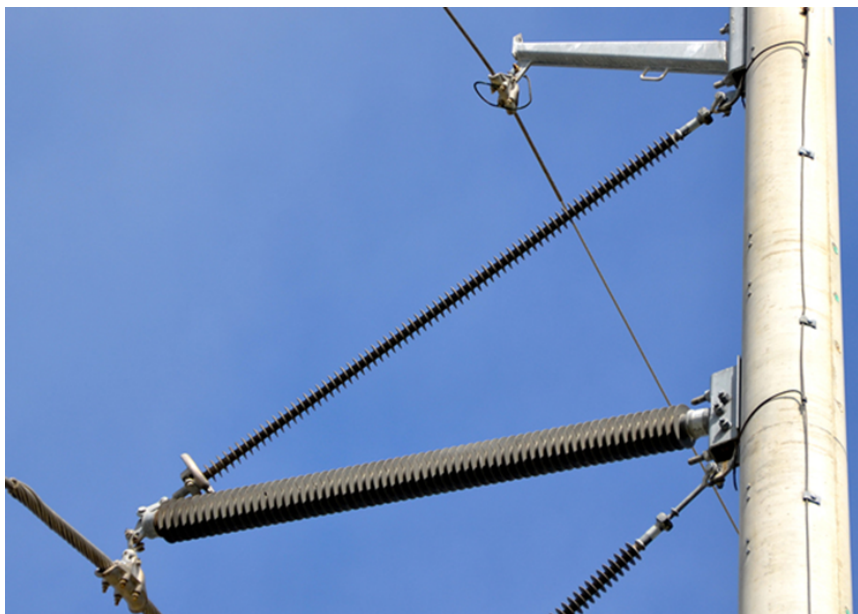
Figura 10 – Estrutura de Ancoragem.



Fonte: <http://www.ngk-insulators.com/en/product/long-rod-insulator.html>.

A Figura 11 ilustra uma estruturas de suspensão, neste caso em um poste, a suspensão é feita a partir de um isolador do tipo pilar com base inclinada, ou line-post. O braço para o para-raios é necessário para que o ângulo de blindagem seja atingido, de acordo com o projeto da estrutura.

Figura 11 – Estrutura de Suspensão.



Fonte: <https://www.ngk-insulators.com/en/product/long-rod-insulator.html>.

2.1.4 Isoladores e Ferragens

A composição de isoladores e ferragens são os responsáveis pela fixação dos cabos à estrutura, de forma que exista um bloqueio elétrico entre o ponto de conexão ao cabo e a estrutura. Esse bloqueio impede que a corrente percorra outro caminho que não seja o condutor designado (FUCHS, 1979).

Os cabos para-raios, por sua vez, não possuem isoladores. Eles são fixados diretamente à estrutura por meio de ferragens específicas que garantem sua estabilidade e conexão com a malha de aterramento (LABEGALINI et al., 1992). Em postes, por exemplo, a conexão ao aterramento é realizada utilizando um cabo que percorre a estrutura, seja por dentro ou por fora, na Figura 11 é possível observar este cabo que conecta as ferragens e o para-raios ao aterramento. Nas torres esse procedimento é realizado pelo corpo metálico da estrutura, sem a necessidade de um cabo.

A escolha do arranjo adequado para a LT depende de diversos fatores, como o tipo de estrutura (poste ou torre), sua aplicação (ancoragem ou suspensão), a tensão da linha, a geometria da estrutura e as condições ambientais. Além disso, aspectos como o nível de poluição local e exigências normativas específicas também devem ser considerados.

O tipo exato do grampo de fixação (ferragem que conecta diretamente ao cabo) depende também do tipo de cabo, na qual cada tipo de cabo condutor contempla um grampo especificado pelos fabricantes, de forma que a integridade do produto seja garantida. Para cabos para-raios, por exemplo, esse critério varia de acordo com o tipo do cabo utilizado, em cabos OPGW existe a preocupação com a fibra ótica.

Para os isoladores, três principais tipos são amplamente utilizados em linhas de

transmissão: vidro, cerâmico e polimérico, como demonstrado na Figura 12. Cada material apresenta um custo de fabricação diferenciado, um peso, e uma capacidade. Além de ser vital a escolha de um material adequado com o local de implantação, seja ele em cidades ou em campos, de uma maneira que a manutenção do equipamento possa ser realizada fácil e precisamente (LABEGALINI et al., 1992).

Figura 12 – Tipos de Isoladores.



Fonte: Compilação do autor.¹

2.1.5 Fundações

Para garantir a estabilidade das estruturas, que precisam suportar o peso dos cabos e demais equipamentos é indispensável uma fundação adequada.

De forma semelhante aos arranjos, as fundações variam de acordo com as aplicações e tipos de estruturas, sejam postes, torres de ancoragem ou de suspensão. A escolha do modelo de fundação depende principalmente das características do solo, que influenciam diretamente sua capacidade de carga e durabilidade ao longo do tempo.

A composição do solo é um dos fatores mais críticos na definição do tipo de fundação, sendo necessário realizar estudos geotécnicos detalhados para determinar o método mais apropriado.

¹ Montagem a partir de imagens coletadas nos sites: <https://umek.pro/products/iec-standard/standard-profile/hv-glass-suspension-insulator-u160bl-2>, <https://www.acabine.com.br/bastao-polimerico> e <https://xhinsulator1998.en.made-in-china.com/product/UElpHOnBZyhC/China-ANSI-52-4-Clevis-89kn-porcelain-Ceramic-Disc-Suspension-Insulator.html>.

2.1.6 Aterramento

O aterramento desempenha um papel fundamental na segurança e funcionamento das linhas de transmissão. Conectado ao cabo para-raios, o sistema de aterramento garante o fechamento da malha, auxiliando na dissipação de correntes provenientes de falhas e descargas atmosféricas. A resistência do pé da torre, também chamada de resistência final do aterramento, é um parâmetro essencial e geralmente é determinada de acordo com normativas específicas (ABNT, 2023).

O aterramento de uma LT é composto por hastes e cabos, cuja quantidade e disposição são definidas de acordo com o projeto. Esses elementos dependem da resistividade do solo da região, sendo necessário adequar o sistema de aterramento de acordo com as características geográficas do local de instalação.

2.2 Normativas Ambientais

A Lei Federal de número 6.938, que dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA), definiu como competência do CONAMA a determinação da necessidade de realizar estudos e relatórios de impacto ambiental, no caso de obras ou atividades de significativa degradação ambiental (BRASIL, 1981).

Por meio destas definições o CONAMA publicou, no Diário Oficial da União, a resolução CONAMA nº1, de 23 de janeiro de 1986, os critérios básicos para a Avaliação de Impacto Ambiental (AIA), servindo como instrumento da PNMA. Estabelecido também nesta resolução a definição de impacto ambiental "[...] alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas [...]" (BRASIL, 1986). A partir dessas diretrizes o tipo de estudo a ser realizado foi definido:

Art. 2º - Dependerá de elaboração de estudo de impacto ambiental e respectivo relatório de impacto ambiental - RIMA, a serem submetidos à aprovação do órgão estadual competente, e do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) em caráter supletivo, o licenciamento de atividades modificadoras do meio ambiente, tais como: [...] VI - Linhas de transmissão de energia elétrica, acima de 230KV [...]. (BRASIL, 1986)

Após a definição desta normativa o decreto Nº 99.274, de 6 de junho de 1990, responsável pela regulamentação da Lei Federal Nº 6.938, no artigo 17 diz que:

A construção, instalação, ampliação e funcionamento de estabelecimento de atividades utilizadoras de recursos ambientais, consideradas efetiva ou

potencialmente poluidoras, bem assim os empreendimentos capazes, sob qualquer forma, de causar degradação ambiental, dependerão de prévio licenciamento do órgão estadual competente integrante do Sisnama, sem prejuízo de outras licenças legalmente exigíveis.

§ 1º Caberá ao Conama fixar os critérios básicos, segundo os quais serão exigidos estudos de impacto ambiental para fins de licenciamento, contendo, entre outros, os seguintes itens:

- a) diagnóstico ambiental da área;
- b) descrição da ação proposta e suas alternativas; e
- c) identificação, análise e previsão dos impactos significativos, positivos e negativos.

2º O estudo de impacto ambiental será realizado por técnicos habilitados e constituirá o Relatório de Impacto Ambiental Rima, correndo as despesas à conta do proponente do projeto.

3º Respeitada a matéria de sigilo industrial, assim expressamente caracterizada a pedido do interessado, o Rima, devidamente fundamentado, será acessível ao público. (BRASIL, 1990, s.p.)

O Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e Relatório de Impacto Ambiental (RIMA) se tornaram ferramentas fundamentais para o AIA, sendo realizado para todos os projetos que se enquadram nas definições. O EIA deve avaliar as etapas de implantação e operação da atividade, definindo os limites da área a ser afetada, podendo haver definições e diretrizes extras a depender da localidade e característica do projeto a ser instalado, sendo este um estudo multidisciplinar. O RIMA se baseia nos dados e conclusões do EIA, e por meio deste, sintetiza os resultados, apontando os níveis de impactos, efeitos, medidas mitigadores e recomendações.(BRASIL, 1986)

3 Metodologia

Uma linha de transmissão pode ser descrita como um empreendimento causador de impactos em várias frentes, sejam elas, sociais, econômicas ou ambientais. Para uma análise voltada para o âmbito ambiental, a etapa de implantação e execução de um projeto é o elemento principal.

Por meio de um estudo de caso realizado na região Amazônica é possível observar a dimensão dos impactos causados por tal infraestrutura:

O EIA/Rima estima a área total sujeita à supressão vegetal em 800 ha. Essa previsão inclui todos os fatores geradores de desmatamento aqui apresentados (faixa de servidão, base de torres, praças de lançamento e acessos), já considerando as características da vegetação ao longo do traçado da linha de transmissão e as ações propostas para minimizar a necessidade de remoção de vegetação que serão apresentadas a seguir (CAMPOS, 2010).

A partir deste estudo, existe a percepção de que um ponto relevante para a compreensão dos impactos da linha é a faixa de servidão, comumente referida como faixa de segurança, faixa de passagem ou faixa de domínio. A NBR 5422/2024 define os corretos nomes para a determinação das faixas, de acordo com a sua utilidade. A faixa de passagem é a área de terra, obtida pela projeção no plano horizontal, da largura necessária para a construção, operação, manutenção e inspeção de uma LT. A faixa de segurança é a área de terra que projeta no plano horizontal a largura necessária para a linha de transmissão, determinada pelo balanço dos cabos, efeitos elétricos, estruturas e outros elementos da linha, sendo necessária para todos os atos de construção, operação, manutenção e inspeção. Faixa de servidão é a faixa de passagem legalmente constituída em favor da concessionária, a qual se impõe restrições ao uso e gozo, permanecendo, porém, sob o domínio do proprietário.

Partindo destas definições é possível entender que, para cada etapa do projeto uma determinada área é necessária, afetando a flora e fauna de diversos modos, seja pela remoção da vegetação, redução dos número de indivíduos na região e impactos no solo, dado a todos os processos de aterros e escavações realizados.

Na faixa de segurança da linha a maior parte da vegetação encontrada é removida, a instalação das fundações e estruturas necessita, com que, o terreno no entorno seja aberto, liberando desta forma espaço para todo e qualquer tipo de equipamento e maquinário, além das profundas escavações realizadas para o suporte de grandes torres metálicas. Em

ambientes rurais, o tipo de aterramento mais apresentado é o lançamento de cabos de cobre, contrapesos, por grandes extensões da faixa, sendo assim, necessário, uma outra etapa de poda e remoção de vegetação, percorrendo dezenas de metros a partir de cada estruturas, a depender da resistividade do solo no local.

Com a necessidade de proteção da linha, devido a possíveis desligamentos, e das matas e florestas, por conta de possíveis incêndios, o balanço dos cabos é crucial para a determinação de uma superfície de poda, podendo ser realizada em formato de escada, dado o aumento da distância das árvores em relação ao eixo da [LT](#). Porém não podemos negligenciar a possibilidade da remoção total da vegetação no entorno, devido a grande dificuldade de poda com uma elevada distância do solo. Árvores de grande porte, mesmo que localizadas fora da faixa de segurança, podem também apresentar podas inevitáveis, dado a possibilidade de queda nos cabos condutores ou estruturas. Sendo identificada como a área adjacente à faixa de passagem, necessária para manter o fornecimento de energia, tendo em vista a poda ou corte de qualquer árvore, cujo tombamento ou aproximação aos cabos condutores possam causar danos ou provocar desligamentos da linha ([ABNT, 2024](#)).

Como um todo, a instalação de uma linha de transmissão é um feito que devasta a natureza ao seu redor. Por este motivo a conservação e a consciência ambiental são fundamentais, para que as obras atuais e futuras sempre busquem o menor impacto possível.

Para determinação da faixa de segurança serão utilizados cálculos conforme as fórmulas apresentadas na NBR 5422, que serão apresentadas ao decorrer das Seções [4.1](#) e [4.2](#). Os dados climatológicos desempenham um papel fundamental nesse processo, influenciando o comportamento dos cabos por meio das velocidades de vento e temperatura, informações cruciais para entender o balanço dos cabos. Na primeira edição da norma, esses valores eram obtidos por meio de mapas disponíveis nos anexos. Já na segunda edição, foi desenvolvido pelo autor deste trabalho um programa computacional capaz de coletar dados diretamente do [INMET](#) e, com base nesses dados, gerar gráficos contendo as informações desejadas. Neste trabalho ambos os métodos serão utilizados, de acordo com cada normativa.

4 Resultados

Este capítulo explora os cálculos e análises que embasam a definição da faixa de segurança, proporcionando uma visão de ambas as versões da NBR 5422. Com base nessas informações, dois estudos serão desenvolvidos, permitindo discutir os resultados obtidos. Por fim, será abordado o tema do uso e ocupação do solo dentro da faixa de segurança determinada, destacando os critérios estabelecidos por cada versão da norma e analisando sua relação com a preservação do meio ambiente.

4.1 NBR 5422/1985 Definições da Faixa de Segurança

A largura deve ser determinada considerando balanço dos condutores sob ação de vento, efeitos de campos elétricos e magnéticos, radiointerferência e ruído audível (ABNT, 1985).

A faixa de segurança da LT representa o tamanho mínimo a ser adotado, desta forma, a faixa de passagem adotada pode ser igual ou maior que a faixa de segurança calculada.

O ângulo de balanço dos cabos é calculado a partir de alguns fatores: velocidades de vento na região, geometria da torre, peso do cabo e tamanho dos vãos. Existem também, é claro, considerações pontuais que podem influenciar.

Neste trabalho será abordado a metodologia de cálculo para a faixa de segurança. Focando na análise e compreensão do balanço dos cabos, uma das principais componentes que determinam a largura de faixa. Deve ser mantida uma distância segura entre os condutores externos, durante o balanço, e o limite da faixa de passagem. A força do vento sobre o condutor para o cálculo de flecha e balanço deve levar em consideração a temperatura do condutor igual a ambiente, altura média das fases no suporte e a velocidade de vento com período de retorno de 10 anos e tempo de integração de 30s.

A flecha é a distância vertical entre o ponto do colo do cabo com a linha que liga os dois pontos de fixação, de acordo com a Figura 13. Fator de grande relevância para a faixa, já que, um condutor mais "folgado" ocupa um maior espaço quando em situação de balanço. Podendo ser calculada conforme a Equação 4.1, (LABEGALINI et al., 1992).

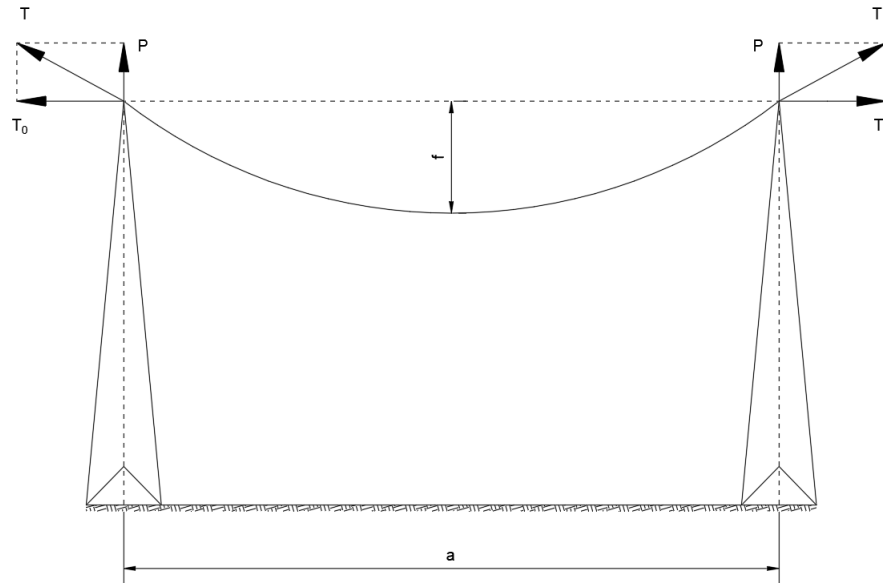
$$f = \frac{a^2 \cdot p_{cond}}{8T_0} \quad (4.1)$$

onde:

f é a flecha do condutor, expresso em metros (m);

p_{cond} é o peso linear do cabo, expresso em newton por metro (N/m);

Figura 13 – Flecha.



Fonte: Autor.

a é o vão, expresso em metros (m);

T_0 é a tração horizontal, expressa em newton (N).

O ângulo de balanço das cadeias de isolador deve ser considerado igual ao do condutor, este fator é relevante em estruturas de suspensão, na qual, o cabo se encontra suportado por uma cadeia vertical. Para a determinação deste ângulo deve se utilizar a Equação 4.2 (ABNT, 1985).

$$\beta = \text{tg}^{-1} \left(K \frac{q_0 \cdot d \cdot L_m}{p_{\text{cond}} \cdot L_p} \right) \quad (4.2)$$

onde:

β é o ângulo de balanço médio, expresso em graus;

q_0 é a pressão dinâmica, expressa em newton por metro quadrado (N/m²);

d é o diâmetro do cabo, expresso em metros (m);

L_m é o vão médio, expresso em metros (m);

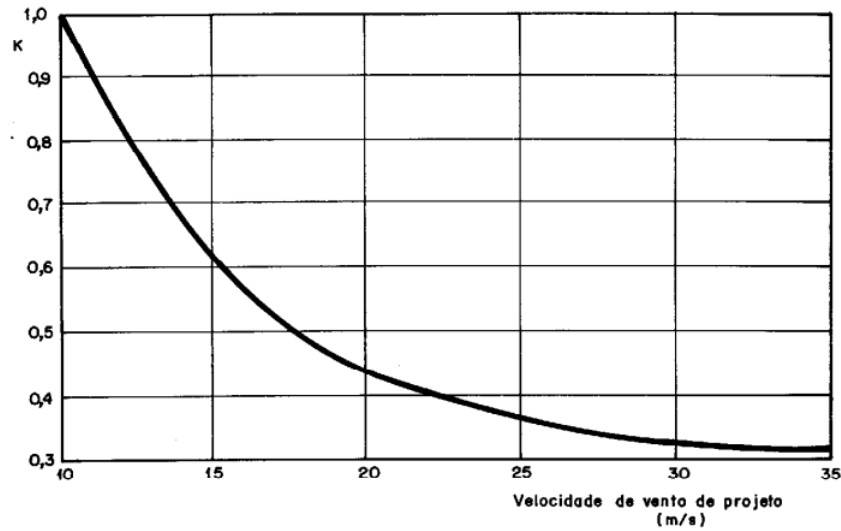
p_{cond} é o peso linear do cabo, expresso em newton por metro (N/m);

L_p é o vão gravante, expresso em metros (m);

K é o fator de efetividade, conforme a Figura 14.

O vão gravante e o vão médio são dependentes da exata configuração da linha. O vão médio, também chamado de vão de vento, é a média aritmética dos vãos adjacentes a um suporte. O vão gravante, também chamado de vão de peso, é a distância entre os pontos com tangente horizontal das catenárias dos vãos adjacentes ao suporte, ou seja, é a distâncias entre os dois pontos de flecha máxima dos vãos adjacentes (ABNT, 1985).

Figura 14 – Fator de efetividade.



Fonte: Figura 7 - NBR 5422/85.

A pressão de vento dinâmica é calculada conforme:

$$q_0 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_P^2 \quad (4.3)$$

onde:

q_0 é a pressão dinâmica, expressa em pascal (Pa);

ρ é a massa específica do ar, expressa em quilogramas por metro cúbico (kg/m³);

V_P é a velocidade do vento para projeto, expressa em metros por segundo (m/s).

A massa específica do ar é dada por:

$$\rho = \frac{1,293}{1 + 0,00367 \cdot t} \cdot \frac{16000 + 64 \cdot t - ALT}{16000 + 64 \cdot t + ALT} \quad (4.4)$$

onde:

ρ é a massa específica do ar, expressa em quilogramas por metro cúbico (kg/m³);

t é a temperatura coincidente, expressa em graus Celsius (°C);

ALT é a altitude média da região, expressa em metros (m/s).

A temperatura coincidente faz referência ao valor médio das temperaturas mínimas diárias, contando com suposto coincidente da velocidade de vento do projeto (ABNT, 1985). Podendo ser determinada por meio da Figura 23, localizada no Anexo A.

Pelas definições da normativa a velocidade de vento de projeto V_P é obtida a partir da velocidade básica de vento V_b , corrigida com o fator de rugosidade do terreno na região, o intervalo de tempo necessário para que o obstáculo responda à ação de vento, a altura dele e o período de retorno adotado. Através da Figura 24, no Anexo A, a velocidade básica de vento é obtida.

Nos cálculos do ângulo de balanço o período de retorno deve ser igual ou superior

a 10 anos e o período de integração de 30s. A velocidade V_b é referida a 50 anos e 10min, ou seja, tornando necessário a conversão de ambos os períodos.

Para o período de retorno a conversão é realizada pela equação

$$V_T = \hat{\beta} - \frac{\ln[-\ln(1 - \frac{1}{T})]}{\hat{\alpha}} \quad (4.5)$$

onde:

V_T é a velocidade de vento referida a um período de retorno T , expressa em metros por segundo (m/s);

T período de retorno desejado, expresso anos;

$\hat{\beta}$ estimador do fator de posição da distribuição de Gumbel, obtido por meio da Figura 26, Anexo A;

$\hat{\alpha}$ estimador do fator de escala da distribuição de Gumbel, obtido por meio da Figura 25, Anexo A.

Realizado a definição da velocidade de acordo com o período de retorno desejado a velocidade de projeto pode ser determinada, por meio da Equação 4.6, que permite a conversão do período de integração e aplica fatores para a rugosidade do terreno e altura dos cabos.

$$V_p = K_r \cdot K_d \cdot \left(\frac{H}{10}\right)^{\frac{1}{n}} \cdot V_T \quad (4.6)$$

onde:

V_p representa a velocidade de vento corrigida e aplicável ao projeto, expressa em metros por segundo (m/s);

K_r é o fator de correção de acordo com a rugosidade do terreno, obtido por meio da Tabela 2;

K_d é o fator de correção do período de integração, obtido por meio da Figura 15;

H altura na qual é desejado obter a velocidade de vento, expresso em metros (m);

n coeficiente para a correção da velocidade de vento em função da altura, de acordo com a Tabela 3;

V_T é a velocidade de vento referida a um período de retorno T , expressa em metros por segundo (m/s).

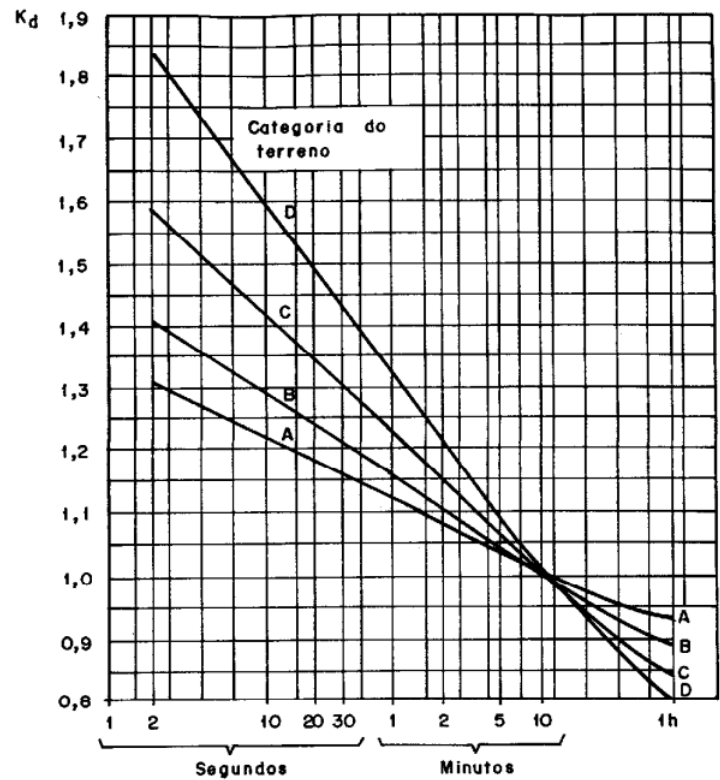
O tempo indicado na definição de n é referente ao período de integração.

Tabela 2 – Coeficientes de rugosidade do terreno.

Categoria do terreno	Características do terreno	Coeficiente de rugosidade Kr
A	Vastas extensões de água, áreas planas costeiras; desertos planos	1,08
B	Terreno aberto com poucos obstáculos	1,00
C	Terreno com obstáculos numerosos e pequenos	0,85
D	Áreas urbanizadas; terrenos com muitas árvores altas	0,67

Fonte: Tabela 1 - NBR 5422.

Figura 15 – Relação entre as velocidades médias a 10 m de altura.



Fonte: Figura 1 - NBR 5422/85.

Tabela 3 – Valores de n para correção da velocidade do vento em função da altura.

Categoria do terreno	n	
	t = 2s	t = 30s
A	13	12
B	12	11
C	10	9,5
D	8,5	8

Fonte: Tabela 2 - NBR 5422.

Com a velocidade de vento e o ângulo de balanço dos cabos a obtenção da projeção horizontal do condutor devido ao vento pode ser obtida, e com isso, a largura de faixa

determinada conforme Equação 4.7 (ABNT, 1985).

$$L = 2 \cdot (b + d + D) \quad (4.7)$$

onde:

L é a largura mínima da faixa de segurança, expressa em metros (m);

b é a distância horizontal do eixo do suporte ao ponto de fixação do condutor mais afastado, expresso em metros (m);

d é a soma das projeções horizontais da flecha, em metros;

D é $D_U/150$, no mínimo igual a 0,5m, onde D_U é o valor em metros numericamente igual à tensão máxima de operação em kV.

4.2 NBR 5422/2024 Definições da Faixa de Segurança

O período de retorno se refere a probabilidade de um evento ocorrer a cada ano, ou seja, para um evento com período de retorno de 50 anos existe 2% de chance de ocorrer a cada ano. O período de integração é o tempo de amostragem de um parâmetro climático (ABNT, 2024).

O ângulo de balanço das cadeias de isolador deve ser considerado igual ao do condutor, este fator é relevante em estruturas de suspensão, na qual, o cabo se encontra suportado por uma cadeia vertical. Para a determinação deste ângulo deve se utilizar a Equação 4.8 (ABNT, 2024).

$$\beta = tg^{-1} \left(K \frac{q_0 \cdot d \cdot L_m}{p_{cond} \cdot L_p} \right) \quad (4.8)$$

onde:

β é o ângulo de balanço médio, expresso em graus;

q_0 é a pressão dinâmica, expressa em pascals (Pa), calculado para 30s;

d é o diâmetro do cabo, expresso em metros (m);

L_m é o vão médio, expresso em metros (m);

p_{cond} é o peso linear do cabo, expresso em newtons por metro (N/m);

L_p é o vão gravante, expresso em metros (m);

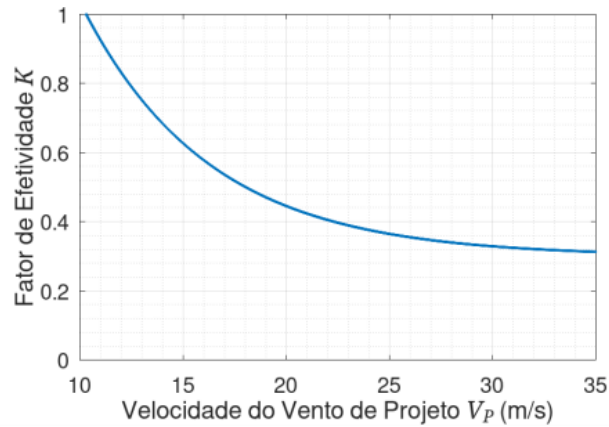
K é o fator de efetividade, conforme a Figura 16.

O vão gravante e o vão médio são dependentes da exata configuração da linha. O vão médio é a média aritmética dos vãos adjacentes a um suporte. O vão gravante, também chamado de vão de peso, é a distância entre os pontos com tangente horizontal das catenárias dos vãos adjacentes ao suporte, ou seja, é a distâncias entre os dois pontos de flecha máxima dos vãos adjacentes (ABNT, 2024).

A pressão de vento dinâmica é calculada conforme:

$$q_0 = \frac{1}{2} \cdot \mu \cdot V_P^2 \quad (4.9)$$

Figura 16 – Fator de efetividade.



Fonte: Figura 22 - NBR 5422.

onde:

q_0 é a pressão dinâmica, expressa em pascal (Pa);

μ é a massa específica do ar, expressa em quilogramas por metro cúbico (kg/m³);

V_P é a velocidade do vento para projeto, expressa em metros por segundo (m/s).

A massa específica do ar é calculada conforme:

$$\mu = 1,225 \cdot \frac{288,15}{t + 273,15} \cdot \exp(-1,2 \cdot 10^{-4} \cdot alt) \quad (4.10)$$

onde:

μ é a massa específica do ar, expressa em quilogramas por metro cúbico (kg/m³);

t é a temperatura do ar¹, expressa em grau Celsius (°C);

alt é a altitude média da região, expressa em metros (m).

A velocidade do vento para projeto deve ser obtida a partir de um grupo de critérios:

As velocidades de projeto usadas para cálculo da ação mecânica do vento sobre os componentes da linha de transmissão, conforme a Seção 8, são calculadas a partir da velocidade de referência V_R , definida como a velocidade com um período de retorno T , período de integração 10 min, referida a 10 m de altura e em terreno de categoria B. (ABNT, 2024)

Conciderando o texto citado e outros pontos da Seção 4.9 da referida norma, temos que as velocidades de ventos são definidas por meio de distriuições estatísticas. Para cálculos mecânicos, são utilizadas velocidades de vento de séries de máximos anuais, que

¹ De acordo com a NBR 5422 para o cálculo da Equação 4.10 deve ser utilizado a temperatura média das mínimas.

devem ser coletadas por no mínimo 10 anos, e por meio da distribuição estatística de valores máximos de Gumbel, a série é definida.

A categoria de terreno B se refere a Tabela 1 da norma, na qual este tipo de terreno é descrito como: Terreno aberto com poucos obstáculos.

Os dados de vento medidos podem ser obtidos por meio das estações do [INMET](#), coletados de forma horária, com período de integração de 10 min e com equipamentos instalados a 10 m de altura. Respeitando os critérios definidos.

Com a série de máximas anuais das estações, o tratamento dos dados pode ser realizado, seguindo as instruções definidas no Anexo A da NBR 5422. Para a definição do ângulo de balanço deve se encontrar o vento para 50 anos de período de retorno, seguindo a metodologia dos máximos de Gumbel. A conversão dos valores de ventos coletados para o ano desejado deve ser feita conforme a Equação 4.11.

$$v_T = \bar{v} + K_{T,n} \cdot s \quad (4.11)$$

onde:

v_T é a velocidade do vento com período de retorno T, expresso em metros por segundo (m/s);

$\bar{v}$ é a média da série de máximos, expressa em metros por segundo (m/s);

s é o desvio padrão da série de máximos, expresso em metros por segundo (m/s);

$K_{T,n}$ é o fator de frequência, que depende do número de anos da série e do período de retorno.

O $K_{T,n}$ pode ser obtido a partir da Tabela 4, na qual apresenta os valores da seguinte forma:

Tabela 4 – $K_{T,n}$

Número de anos	Período de retorno (anos)					
	2	10	30	50	150	250
7	-0.127	2.026	3.322	3.914	5.178	5.763
8	-0.13	1.953	3.207	3.779	5.002	5.568
9	-0.133	1.895	3.116	3.673	4.863	5.415
10	-0.136	1.848	3.042	3.587	4.751	5.291
11	-0.138	1.809	2.981	3.516	4.659	5.188
12	-0.139	1.777	2.93	3.456	4.58	5.101
13	-0.141	1.748	2.886	3.405	4.513	5.027
15	-0.142	1.724	2.814	3.321	4.404	4.906
16	-0.143	1.703	2.784	3.286	4.359	4.855

Fonte: Tabela A.2 - NBR 5422.

Tabela 4 – $K_{T,n}$

Número de anos	Período de retorno (anos)					
	2	10	30	50	150	250
17	-0.144	1.683	2.757	3.255	4.318	4.811
18	-0.145	1.666	2.733	3.227	4.282	4.77
19	-0.146	1.651	2.711	3.202	4.249	4.734
20	-0.147	1.637	2.692	3.179	4.219	4.701
21	-0.148	1.625	2.674	3.158	4.191	4.67
22	-0.148	1.613	2.657	3.138	4.166	4.64
23	-0.149	1.603	2.642	3.12	4.143	4.617
24	-0.15	1.593	2.628	3.104	4.121	4.593
25	-0.15	1.584	2.614	3.089	4.101	4.571
30	-0.151	1.575	2.56	3.026	4.019	4.48
35	-0.153	1.541	2.52	2.979	3.958	4.412
40	-0.154	1.515	2.489	2.943	3.911	4.36
45	-0.155	1.495	2.464	2.913	3.873	4.318
50	-0.156	1.479	2.443	2.889	3.842	4.283
100	-0.157	1.466	2.341	2.77	3.686	4.111

Fonte: Tabela A.2 - NBR 5422.

A partir do valor de velocidade de vento de referência com o período de retorno corrigido é preciso realizar as últimas correções de fatores, de acordo com a seção 8.2.1 da NBR 5422.

Para o cálculo da faixa de segurança o período de integração necessário é de 30s. Quatro coeficientes são utilizados para essa conversão, o K_{tur} que representa o fator de conversão de conversão da turbulência, a depender da região do Brasil, K_{int30s} que representa o fator de conversão do período de integração de 10min para 30s, K_{rug} responsável por aplicar o fator de rugosidade do terreno (ABNT, 2024). Apresentados respectivamente na Tabela 5, 6 e 2, no qual o coeficiente de rugosidade aplicado é o mesmo em ambas as versões da normativa. E por fim o K_{alt} que realiza a correção para a altura média do cabo, obtido por meio da Equação e Tabela 7

Tabela 5 – K_{tur}

Região	K_{tur}
Sul	1,08
Sudeste e Centro-Oeste	1,12
Norte e Nordeste	1,16

Fonte: Tabela 8 - NBR 5422/2024.

Tabela 6 – K_{int30s}

Categoria do terreno	K_{int30s}
A	1,17
B	1,22
C	1,30
D	1,48

Fonte: Tabela 9 - NBR 5422/2024.

$$K_{alt} = \left(\frac{z}{10} \right)^\alpha \quad (4.12)$$

onde:

K_{alt} é o fator de conversão de altura;

z é a altura da medição, expressa em metros (m);

α é definido por meio da tabela 7.

Tabela 7 – Valores de α para K_{alt}

Categoria do terreno	α
A	0,11
B	0,16
C	0,22
D	0,28

Fonte: Tabela 3 - NBR 5422/2024.

A partir da metodologia descrita a projeção ao solo do ângulo de balanço pode ser obtida, e por meio desta à largura da faixa considerando apenas o balanço. De forma complementar a essa largura uma distância horizontal de segurança deve ser definida, considerando parcelas fixas e elétricas, o cálculo desta distância horizontal foge do escopo deste trabalho, no entanto, alguns pontos que compõem a sua dimensão são relevantes ao se considerar a preservação e impactos ambientais. Esses fatos serão abordados ao decorrer do trabalho.

Compreendido os efeitos de ações mecânicas no dimensionamento da faixa, a componente restante é 'D', na qual representa uma distância horizontal de segurança, levando como consideração parcelas básicas de seguranças e elétricas, a depender da situação. Caso exista obstáculos ao longo da linha, componentes básicas são adicionadas a distância horizontal de segurança calculada. Como por exemplo, em casos de vegetação de preservação permanente 'D' recebe um adicional de 3m (ABNT, 2024). Para a componente elétrica a Equação 4.13 é utilizada, sendo referente as distâncias mínimas fase-terra, para sobretensões de frente lenta (ABNT, 2024).

$$d_{ft,fl} = 2,174 \left[\exp \left(\frac{K_{CS} \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot U_S \cdot F_{Sfl}}{1080 \cdot k_{alf} \cdot k_{zfl} \cdot K_g} \right) - 1 \right] \quad (4.13)$$

onde:

$d_{ft,fl}$ é a distância mínima fase-terra para sobretensões de frente lenta, expressa em metros (m);

K_{CS} é o fator de coordenação estatístico, demonstrado no Anexo C da NBR 5422/2024, para faixa de segurança pode ser considerado igual a 1,35;

U_S é a tensão entre fases nominal eficaz da linha, expressa em quilovolts (kV);

F_{Sfl} é o fator de sobretensão de frente lenta;

k_{alf} é o fator de correção das condições atmosféricas para sobretensão de frente lenta;

k_{zfl} é o fator de desvio para frente lenta, definido por $1 - 1,3 \cdot z_{fl}$;

z_{fl} é o coeficiente de variação da distribuição de probabilidades da suportabilidade da distância em ar considerada, para sobretensões de frente lenta σ_{fl}/U_{50fl} , cujo valor pode ser considerado igual a 0,06;

K_g é o fator de espaçamento fase-terra, demonstrado no Anexo C da NBR 5422/2024, para faixa de segurança é considerado igual a 1,28.

Esta componente $d_{ft,fl}$ é substituta da componente D da antiga norma, encontrada na equação 4.7. Para a versão de 1985 o fator era determinado unicamente a partir da tensão da linha de transmissão. Na nova normativa a aplicação das parcelas elétricas na faixa de segurança exige um estudo aprofundado nas características da linha a ser construída. Considerando efeitos de sobretensão, variações estatísticas gerais, que consideram efeitos adversos que podem vir a ocorrer durante a operação da LT e também apresenta correções devido a condições atmosféricas, incorporando componentes como a umidade e densidade do ar, para a região específica da linha.

Considerando apenas essas diferenças é observável como a versão de 2024 torna o cálculo mais robusto, introduzindo diversos efeitos adicionais, entendendo que a região na qual a linha de transmissão é implantada afeta diretamente nas distâncias de segurança. Mas conforme mencionado anteriormente, ainda existem distâncias adicionais dependente de obstáculos, demonstrados na Tabela 8. O fator adicional para vegetações de preservação permanente é um caso extremamente relevante, na qual a norma trás uma garantia adicional de que a linha não impactará na vegetação, em coerência com os maiores cuidados com a preservação que a nova versão adota.

Tabela 8 – Valores para cálculo da parcela horizontal de segurança

Obstáculo próximo à linha	Parcela básica (m)
Edificações	4,0
Veículos rodoviários e ferroviários	1,1
Vegetação de preservação permanente	3,0

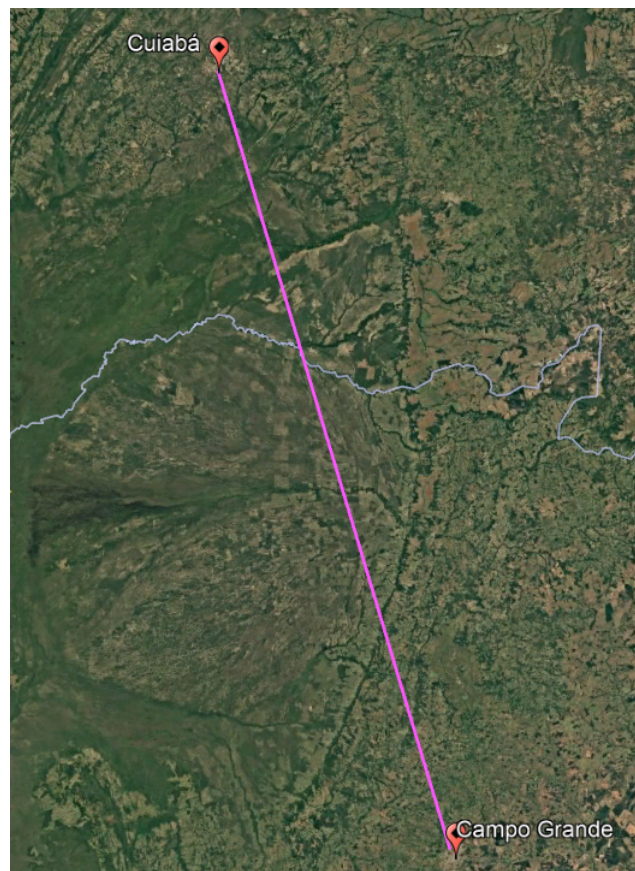
Fonte: Tabela 7 - NBR 5422/2024.

4.3 Estudo de caso da faixa de segurança pela NBR 5422/2024

4.3.1 Velocidades do Vento

Considerando uma suposta [LT](#), que realize a conexão dos municípios de Campo Grande e Cuiabá, localizados no Estado de Mato Grosso do Sul e Mato Grosso respectivamente, de forma semelhante ao apresentado na Figura 17. Em linha reta esta linha possuiria aproximadamente 548 km de extensão.

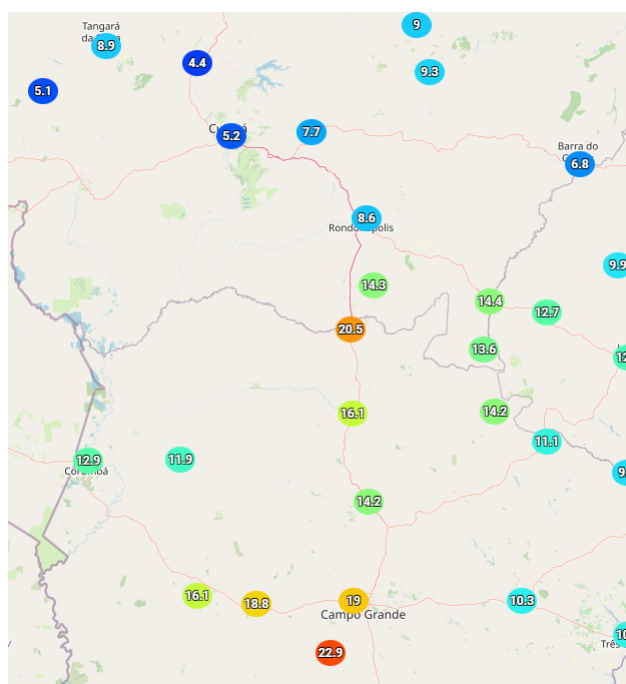
Figura 17 – Exemplo de LT.



Fonte: Imagem extraída do software Google Earth® em 17 set. 2024.

Como próximo passo é preciso ser identificado as estações meteorológicas da região, sendo feito através do mapa de estações convencionais do [INMET](#), para esta região temos as estações conforme a Figura 18.

Figura 18 – Estações INMET para o traçado.



Fonte: <https://mapas.inmet.gov.br/>.

Seguindo o traçado em linha reta apenas duas estações passam por ele, a de Campo Grande e a de Cuiabá, para melhorar o banco de dados de cálculo será adotado outras estações que se aproximam do traçado, e que atendam os critérios de 10 anos de coleta. Desta forma a lista final de estações utilizadas são: Campo Grande, Cuiabá, Coxim, São Gabriel do Oeste e Sidrolândia. Após a filtragem dos dados de máximos anuais, desconsiderando anos com grande perda de coleta de dados, obtemos a série conforme a Tabela 9.

As estações de Coxim e São Gabriel do Oeste possuem mais de 10 anos de coletas de dados, no entanto considerando um critério onde cada ano de coleta deve possuir uma maioria dos dados validos, fez com que, parte dos dados de ambas as estações fossem descartados, com o intuito de não afetar negativamente a série.

Tabela 9 – Velocidades de vento por estação.

Ano	Velocidade do vento (m/s)				
	Campo Grande	Cuiabá	Coxim	São Gabriel do Oeste	Sidrolândia
2003	-	9,5	-	-	-
2004	12,9	9,4	-	-	-
2005	12,6	8,6	-	-	-
2006	11,7	10,6	-	-	-
2007	12,5	9,5	7,4	13,0	-
2008	11,1	-	8,7	13,4	-
2009	11,5	-	10,7	12,3	8,8
2010	12,1	-	-	-	10,6
2011	-	-	-	-	10,5
2012	11,2	8,4	-	-	9,2
2013	11,8	6,8	-	-	9,4
2014	12,5	6,8	-	-	11,2
2015	10,1	7,2	-	-	-
2016	12,1	6,3	-	-	-
2017	12,2	7,0	-	-	-
2018	11,2	4,9	-	-	7,7
2019	10,3	-	-	16,2	8,4
2020	13,2	8,0	-	10,3	8,3
2021	-	8,4	-	-	-
2022	-	5,6	-	-	8,5
2023	9,2	-	9,1	16,5	9,0

Fonte: Banco de dados do INMET.

Para o tratamento dos dados será utilizado a Equação 4.11, com o período de retorno de 50 anos. A partir desta equação, considerando categoria de terreno B e tempo de integração de 30s, é possível a equação que aplica os fatores de correções necessários, de acordo com a Equação 4.14.

$$v_{50min/30s} = (\bar{v} + K_{T,n} \cdot s) \cdot K_{tur} \cdot K_{int30s} \quad (4.14)$$

Para este caso será considerado nenhum coeficiente de rugosidade do terreno, que dependem da sua categoria, já que a utilizada é B.

Com o cálculo individual para cada estação o resultado obtido pode ser observado na Tabela 10.

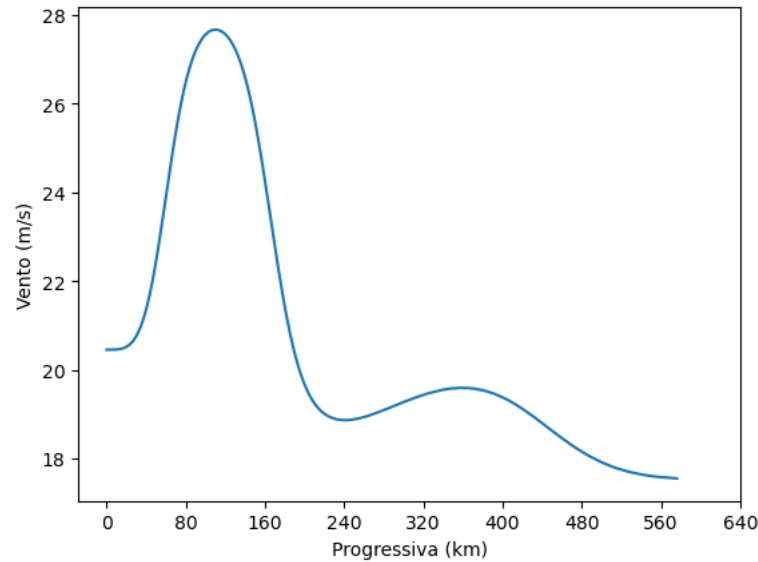
Tabela 10 – Velocidade do vento corrigida por estação.

Velocidade do vento 50 anos 30s (m/s)				
Campo Grande	Cuiabá	Coxim	São Gabriel do Oeste	Sidrolândia
20,45	17,50	18,06	28,72	17,30

Dado a velocidade de vento de cada estação, com posição conhecida, é possível computar a velocidade final para cada ponto do traçado, de 50 anos 30s. Por meio do

método de interpolação do Inverso da Potência da Distância. Chegando a um gráfico que relaciona a progressiva da LT com o vento estimado no local, demonstrado na Figura 19.

Figura 19 – Velocidade do vento pela progressiva.



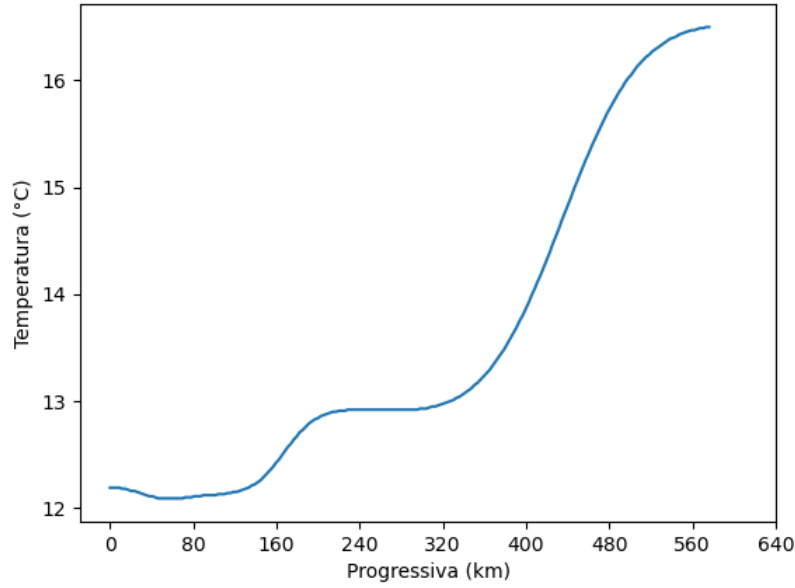
Fonte: Autor.

4.3.2 Obtenção do Ângulo de Balanço

Como exemplo de cabo a ser utilizado para a determinação da flecha será escolhido o [Cabo de Alumínio com Alma de Aço \(CAA\)](#) 954 MCM RAIL 45/7. A seleção deste condutor se deve ao seu uso em linhas de 500kV, como exemplo a LT 500kV Ribeirão Preto-Estreito-Jaguara ([Biodinâmica Rio, 2007](#)). O cabo RAIL possui 1,598kgf/m de peso unitário, aproximadamente 29,61mm de diâmetro e 11812kgf de carga de ruptura, considerando uma tração aplicada de 20% desta carga, resultando em 2362,4kgf. Nesta mesma linha foi utilizado estruturas que suportam vãos acima de 500m, valor este que servirá para a resolução das equações.

Como passo seguinte é realizado a determinação da massa específica do ar, por meio da Equação 4.10, para a resolução desta equação é fundamental a obtenção da média das temperaturas mínimas na região. Este valor por definição deve ter a probabilidade de 2% de vir a ocorrer anualmente ([ABNT, 2024](#)). Através das estações do [INMET](#) essa série de dados é obtida, e de forma semelhante ao vento, por meio de interpolação do Inverso da Potência da Distância é obtido um gráfico, como na Figura 20.

Figura 20 – Temperatura mínima pela progressiva.



Fonte: Autor.

A partir da Figura 19 a maior velocidade de vento medida para a linha é de aproximadamente 28m/s, nas proximidades do quilômetro 120. Neste ponto temperatura mínima é de aproximadamente 12,1°C, segundo a Figura 20. A altitude neste ponto é de 184m, informação retirada do software Google Earth®. Com estes resultados a Equação 4.10 traz a massa específica de ar igual a 1,2104kg/m³, evidenciado na Equação 4.15.

$$\mu = 1,225 \cdot \frac{288,15}{12,1 + 273,15} \cdot \exp(-1,2 \cdot 10^{-4} \cdot 184) = 1,2104 \text{ kg/m}^3 \quad (4.15)$$

Na obtenção da pressão de vento, a velocidade de vento deve ser ajustada para a altura do objeto de estudo, para a LT 500kV considerada, será utilizado uma altura de 34,5 metros, valor média considerando as informações do relatório de referência. (Biodinâmica Rio, 2007). Com estas informações a pressão dinâmica dada pela Equação 4.9 pode ser resolvida, aplicando juntamente a Equação 4.12. Resultando em 705,226 Pa, em conformidade com a Equação 4.16.

$$q_0 = \frac{1}{2} \cdot 1,2104 \cdot \left(28 \cdot \left(\frac{34,5}{10} \right)^{0,16} \right)^2 = 705,226 \text{ Pa} \quad (4.16)$$

Como passo final, o ângulo de balanço da Equação 4.8 pode ser determinado. O fator K relacionado para a velocidade de 28m/s é igual a aproximadamente 0,34, analisando a Figura 16. Para isto será considerando um vão de 500m, como referência a suportabilidade das estruturas da LT 500kV (Biodinâmica Rio, 2007). O vão médio e vão gravante serão considerados iguais, simulando uma linha com estruturas em mesmo nível e em vãos constantes. Resultando em um ângulo de 24,37°, solucionado na Equação 4.17.

$$\beta = \operatorname{tg}^{-1} \left(0,34 \cdot \frac{705,226 \cdot 0,02961 \cdot 500}{1,598 \cdot 9,807^1 \cdot 500} \right) = 24,37^\circ \quad (4.17)$$

4.3.3 Projeção da Faixa de Segurança

Para a projeção no solo da faixa mínima, considerando apenas o ângulo de balanço, o cálculo da flecha é essencial. Considerando as características da linha 500kV Ribeirão Preto como exemplo, a flecha para um vão de 500m e um suposta tração de 2362,4kgf é igual a 21,14m, como na Equação 4.18.

$$f = \frac{500^2 \cdot 1,598 \cdot 9,807}{8 \cdot 2362,4 \cdot 9,807} = 21,14m \quad (4.18)$$

Para a projeção do espaço no solo que o cabo em balanço ocupa, é utilizado o seno do ângulo de balanço, como na Equação 4.19, resultando em 6,16m de ocupação. A Figura 21 apresenta um exemplo das distâncias de projeção. Para estruturas de suspensão o comprimento da cadeia é adicionado a flecha, ambos os elementos devem possuir o mesmo balanço (ABNT, 2024). Com a distância 'd' o último fator para a composição da faixa é a distância 'b', como exemplo utilizando uma das estruturas da LT 500kV (Biodinâmica Rio, 2007), esse valor do eixo da estrutura até o ponto de fixação do cabo mais afastado é de 12,4m, para a estrutura terminal tipo T.

$$d = \sin 24,37^\circ \cdot 21,14 = 8,72m \quad (4.19)$$

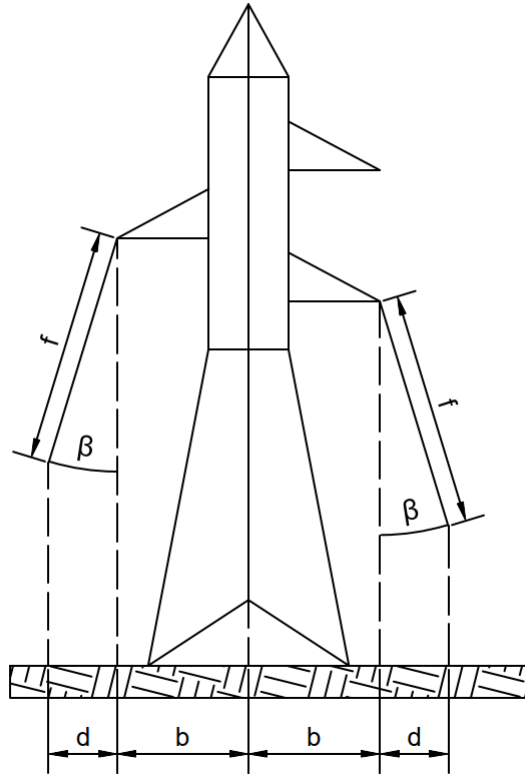
Para o exemplo trabalhado a largura mínima total da faixa, considerando apenas o ângulo de balanço, seria de 37,13m, obtido a partir da Equação 4.20.

$$L = 2 \cdot (b + d) = 2 \cdot (12,4 + 8,72) = 42,25m \quad (4.20)$$

Levando em consideração que este valor é dependente da tração utilizada no cabo condutor, para trações menores a largura da faixa aumentará. Diferentes estruturas resultarão em alteração deste comprimento, em linhas de extra alta tensão a distância entre o eixo e o condutor mais afastado tende a aumentar, desta forma, tornando-se ainda mais essencial o calculado preciso da largura de faixa, considerando exatamente a locação e características do projeto a ser implantado.

¹ Aceleração da gravidade utilizada para converter kgf/m em N/m

Figura 21 – Projeção do balanço ao solo.



Fonte: Autor.

4.4 Estudo de caso da faixa de segurança pela NBR 5422/1985

Seguindo com o exemplo da sessão anterior, para a linha 500kV Ribeirão Preto, a faixa de segurança pela antiga norma tem como o primeiro passo as leituras dos mapas. Para fins comparativos a faixa de segurança calculada nessa sessão será tanto para o vento com período de retorno de 10 anos quanto 50 anos, seguindo o mínimo definido na antiga normativa e o mínimo na atual, respectivamente.

Os valores coletados nos mapas das Figuras 23, 24, 25 e 26 serão escolhidos em um ponto próximo a progressiva utilizada na sessão anterior, no quilômetro 120 da LT. Para as demais informações as Tabelas 2 e 3 e Figura 15 serão utilizadas. Os dados podem ser observados na Tabela 11.

4.4.1 Faixa para 10 anos

Considerando que a velocidade básica V_b é fornecida com período de retorno de 50 anos, é obrigatório a realização da conversão deste período de tempo, para isso a Equação 4.5 deve ser aplicada. Resultando em 21,5 m/s, apresentado na Equação 4.21.

$$V_T = 14 - \frac{\ln[-\ln(1 - \frac{1}{10})]}{0,3} = 21,5 \text{ m/s} \quad (4.21)$$

Tabela 11 – Dados iniciais para o calculo da faixa de segurança

Parâmetros	Valores
$\hat{\beta}$	14
$\hat{\alpha}$	0,3
V_b	28 m/s
Temp. Coin.	19 °C
n	11
K_r	1
K_d	1,21

Fonte: Informações coletadas da NBR 5422/1985.

Para o V_p a altura de torre considerada será de 34,5 metros, uma altura média considerando as informações da LT 500kV (Biodinâmica Rio, 2007). A partir disto a Equação 4.6 pode ser solucionada, reforçando que a categoria de terreno selecionada é a B e o tempo de integração de 30s. Resultando em 29,12 m/s, representado na equação 4.22

$$V_p = 1 \cdot 1,21 \cdot \left(\frac{34,5}{10} \right)^{\frac{1}{11}} \cdot 21,5 = 29,12 \text{ m/s} \quad (4.22)$$

Como último item antecedendo a pressão de vento, a massa específica do ar é definida conforme Equação 4.4, com a altitude de 184m. Por meio da Equação 4.23 ρ é determinado igual a 1,18 kg/m³.

$$\rho = \frac{1,293}{1 + 0,00367 \cdot 19} \cdot \frac{16000 + 64 \cdot 19 - 184}{16000 + 64 \cdot 19 + 184} = 1,18 \text{ kg/m}^3 \quad (4.23)$$

E desta forma, por meio dos resultados anteriores, a pressão de vento dinâmica da Equação 4.24 é solucionada, resultando em 501,53 Pa, referente a Equação ??

$$q_0 = \frac{1}{2} \cdot 1,18 \cdot 29,12^2 = 501,53 \text{ Pa} \quad (4.24)$$

Por meio deste resultado, e dos demais fatores apresentados na sessão anterior, o ângulo de balanço pela antiga norma pode ser obtido, utilizando a Equação 4.2, no entanto, para este caso o Fator de efetividade K é referido a velocidade 29,12m/s, assim, sendo igual a aproximadamente 0,32. Resultando em 16,87°, como validado na Equação 4.25

$$\beta = \text{tg}^{-1} \left(0,32 \frac{501,53 \cdot 0,02961 \cdot 500}{1,598 \cdot 9,807 \cdot 500} \right) = 16,87^\circ \quad (4.25)$$

Tendo o ângulo de balanço a projeção no solo é obtida de forma semelhante ao aplicado na Equação 4.19 e considerando a mesma flecha de 21,14m, à vista disso, para

o caso dos ventos de 10 anos a projeção é de 6,13m. Para uma linha de 500kV, como a selecionada, a distância D é obtida considerando 5% de tensão máxima na LT, ou seja, 525kV que resulta em uma distância D de 3,5m.

Mediante os resultados a largura total da faixa resulta em 37,07m, determinado na Equação 4.26, considerando a distância do eixo ao ponto de fixação do condutor de 12,4.

$$L = 2 \cdot (b + d + D) = 2 \cdot (12,4 + 6,13 + 3,5) = 44,07m \quad (4.26)$$

4.4.2 Faixa para 50 anos

Tomando como base a metodologia apresentada e já aplicada anteriormente neste trabalho, o vento para 50 anos de retorno se iguala ao V_b , ou seja, para este caso 28m/s. Mediante este fato, a velocidade de projeto é estipulada por meio da Equação 4.27.

$$V_p = 1 \cdot 1,21 \cdot \left(\frac{34,5}{10}\right)^{\frac{1}{11}} \cdot 28 = 37,92m \quad (4.27)$$

Com este resultado e a massa específica do ar de 1,18 kg/m³ anteriormente definida, a pressão dinâmica de vento é solucionada, através da Equação 4.28

$$q_0 = \frac{1}{2} \cdot 1,18 \cdot 37,92^2 = 850,52Pa \quad (4.28)$$

E desta forma o novo ângulo de balanço resulta em 25,74°, resultado apresentado na Equação 4.29. Para esta situação o fator K tende a 0,3 atribuído por meio da Figura 14.

$$\beta = tg^{-1} \left(0,3 \frac{850,52 \cdot 0,02961 \cdot 500}{1,598 \cdot 9,807 \cdot 500} \right) = 25,74^\circ \quad (4.29)$$

Este ângulo apresenta uma projeção no solo de 9,18m e a distância D em 3,5m, a largura de faixa para este caso é de 50,16m, reforçado pela Equação 4.30.

$$L = 2 \cdot (b + d + D) = 2 \cdot (12,4 + 9,19 + 3,5) = 50,16m \quad (4.30)$$

Com base no estudo realizado sobre o comportamento da faixa de segurança foi possível ver a evolução da norma no tema, atualizando a obtenção dos dados de ventos, componente crítica para o seu dimensionamento, de uma forma que os dados estão em constante atualização e de forma específica para cada região do país. Desta forma observa-se que o nível de critério foi elevado, tendo em vista o constante aumento e evolução do setor elétrico brasileiro, conforme resultados compilados na Tabela 12.

Um ponto de interessante análise é como apesar da versão de 2024 utilizar um período de retorno de 50 anos, a largura de faixa calculada pelo balanço dos cabos ainda é inferior a de 10 anos da versão de 1985. Caso a componente D da faixa de segurança seja desconsiderada - valor esse que simula de forma simplória uma distância elétrica de segurança - os resultados se tornam mais próximos. Isso apresenta como a antiga versão era conservadora nos cálculos de faixa de segurança, onde ventos com 10 anos de retorno se assemelham a ventos de 50 anos no período atual. Esse conservadorismo pode ter contribuído para a definição de faixas mais largas ao longo dos últimos anos. Hoje, a "distância D" é substituída por uma distância elétrica de segurança mínima, definida com base em critérios mais rigorosos e adaptados às necessidades de cada projeto.

Tabela 12 – Resultados do estudo de caso

Componentes	NBR 5422/1985 10 anos	NBR 5422/1985 50 anos	NBR 5422/2024 50 anos
Velocidade Base	28	28	28
Pressão de vento	501,53	850,52	705,225512
Ângulo de balanço	16,87	25,74	24,37222168
Faixa de segurança (sem parcela D)	37,07	43,16	42,25
Faixa de segurança (com parcela D)	44,07	50,16	-

Fonte: Resultados obtidos pelo autor nos estudos de caso.

Os resultados na Tabela 12 foram obtidos a partir das equações e metodologias descritas nas Sessões 4.1 e 4.2, com os cálculos apresentados nas Sessões 4.4 e 4.3.

4.5 Uso e ocupação do solo

Ao analisar a norma de 1985 o capítulo 13 - Limpeza de Faixa apresenta alguns critérios referentes aos cuidados com o impacto ambiental. Citando que o desmatamento da faixa, quando necessário, deve ser reduzido ao mínimo, aplicando métodos seletivos e criando níveis de corte, na qual a vegetação próxima a linha é cortada a uma altura consideravelmente menor do que vegetações distantes (ABNT, 1985). Para a determinação desse critério de corte a norma apresenta uma simples fórmula, que depende unicamente da tensão da linha de transmissão, de forma semelhante a Equação 4.31 (ABNT, 1985).

$$\begin{cases} H = 4,0 + 0,01 \cdot \left(\frac{D_U}{\sqrt{3}} - 50 \right) , & \text{se } U > 87 \text{ kV} \\ H = 4,0 , & \text{se } U \leq 87 \text{ kV} \end{cases} \quad (4.31)$$

A vegetação rasteira é sempre recomendada a ser mantida, com o fim de evitar erosão, e esse mesmo critério deve ser avaliado para qualquer outro caso. Existe também o cuidado com possíveis quedas de árvores, para que em nenhum momento a distância da mesma seja inferior ao limite de $0,5 + 0,00025D_u$ (ABNT, 1985).

Fora esses critérios de desmatamento e limpeza, a norma permite o uso da faixa para culturas, considerando que a distância do condutor a cultura não seja inferior ao calculado pela Equação 4.31 (ABNT, 1985).

Na antiga NBR a preocupação com o meio ambiente era básica, afinal a data de publicação dela é bem próxima com a data de implementação da necessidade de estudos de impactos ambientais, promovidos pelo [CONAMA](#).

Com a atualização da principal normativa no setor, uma melhor definição do uso e ocupação do solo foi realizada, e para isto a definição de zonas. Sendo elas: Zona A, Zona B, Zona C e Zona C'.

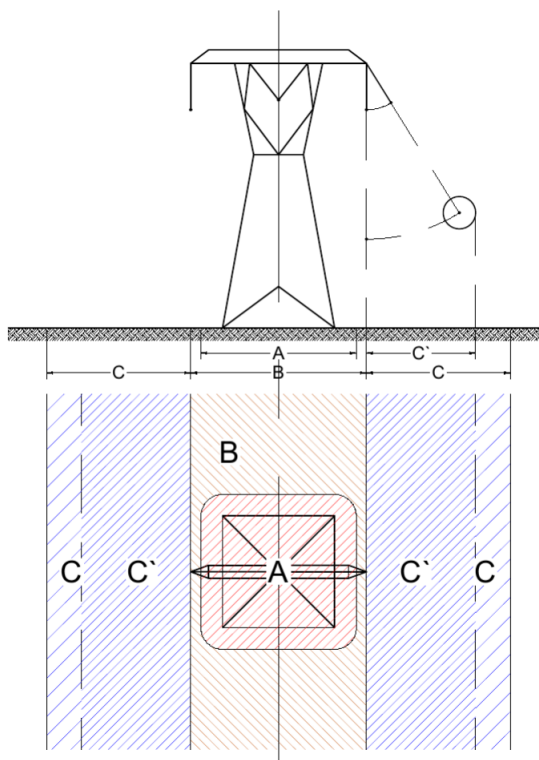
ZONA A: Localiza-se no entorno dos suportes da linha de transmissão e se destina a permitir o acesso do pessoal da manutenção com seus respectivos veículos e equipamentos e servir para colocação de proteção contra abalroamentos aos suportes. É definida por uma área no entorno do piquete central da estrutura que contemple ao menos o limite da superfície de arrancamento da fundação da sua perna ou estai mais afastado;

ZONA B: É a faixa de terreno, excluída a zona A, entre as projeções verticais dos cabos mais afastados do eixo, em repouso, ao longo da linha de transmissão;

ZONA C: É a porção da faixa de passagem cujos limites externos são os limites da faixa de passagem, excluindo-se as zonas A e B;

ZONA C': É a porção da Zona C a ser excluída de compartilhamento envolvendo estradas, rodovias, ferrovias, ruas e avenidas, associada às projeções no solo dos cabos mais afastados do eixo, para condição de balanço máximo [...]. ([ABNT, 2024](#), p. 81)

Figura 22 – Zoneamento da faixa de passagem.



Fonte: NBR 5422.

Interpretando as definições e a Figura 22, é possível concluir que as Zonas A e B realizam referência as estruturas utilizadas na obra, variando de acordo com seu tamanho e necessidades de estais. A Zona C é o espaçamento total da faixa de passagem. Já a Zona C' refere-se ao espaço definido pela faixa de segurança, por este motivo existe a exclusão do compartilhamento com outros empreendimentos.

O sistema de zoneamento é útil para a compreensão do manejo de vegetação, para as zonas de suportes o corte é fundamental, nas demais zonas o critério é definido por distâncias de segurança verticais, horizontais e diretas, levando em consideração situações como incêndios. Como demonstrado por Tito todo o sistema de transmissão possui 12 % dos desligamentos relacionados a incêndios, estes, vindo de diversas fontes (COSTA, 2021), impactando diretamente a operação da linha e causando um nível altíssimo de degradação ambiental. Tendo esse ponto de vista múltiplos itens na NBR foram dedicados ao assunto, com instruções de manejo para regiões de alto risco de incêndio (ABNT, 2024).

Para as zonas B e C a norma restringe o uso e ocupação para diversas atividades, para culturas a restrição é quanto as distâncias de segurança em relação aos cabos condutores ou ao alto poder de queima do material cultivado (ABNT, 2024). Refletindo de forma direta, como abordado por Tobouti e dos Santos:

Isso porque durante a operação da linha há restrições para a terra no

entorno da faixa de servidão, podemos citar: o plantio de árvores de médio e grande porte, silvicultura, culturas frutíferas ou não, utilização de arado ou qualquer outro implemento agrícola que possua mais de 50 cm; construções e benfeitorias sejam de alvenaria ou de madeira, como galpões, depósitos, aviários, estábulos, barracos de madeira, chiqueiros, etc. Há ainda a utilização da queimada como forma de preparo do campo que ainda é muito recorrente em regiões pouco desenvolvidas [...](TOBOUTI; SANTOS, 2014, p. 195).

Nesta versão os critérios impostos de manutenção são maiores, para isso a norma afirma a necessidade de elaboração de documentos que descrevam as ações necessárias a depender do local e da legislação vigente. Na qual todas as etapas, desde projetos até a manutenção, devem ser avaliadas de forma criteriosa, principalmente na implantação e manutenção. Relatando cuidados para situações de corte que possam causar impactos físicos ao solo da região (ABNT, 2024), podendo acelerar processo de erosão e alteração do escoamento de águas na região.

Um ponto de grande importância, que é utilizado até mesmo como argumentos em estudos e avaliações de impactos ambientais, é a possibilidade de ganhos sociais e econômicos, que devem se equilibrar com a preservação. Até mesmo por que a grande maioria dos impactos possui alguma forma de minimização ou até mesmo compensação, demonstrando que uma linha apesar de causar um significativo dano desenvolve economias e possibilita uma melhora para a população afetada pela obra (TOBOUTI; SANTOS, 2014).

Conclusão

Ao longo desse trabalho, foram abordadas as principais mudanças trazidas pela atualização da NBR 5422, enfatizando suas implicações ambientais e na forma como a norma busca equilibrar o desenvolvimento da infraestrutura de transmissão de energia com a preservação do meio ambiente. Evidenciando a constante necessidade de conciliar a expansão da rede e a conservação ambiental.

Este trabalho teve como objetivo compreender as novas metodologias aplicadas na norma, analisando suas implicações no planejamento de linhas de transmissão. Através dos estudos de caso realizados, foi possível concluir o cálculo da faixa de segurança e ângulo de balanço do cabo condutor, utilizando critérios técnicos que consideram tanto características construtivas da linha de transmissão quanto os dados climatológicos da região em análise.

Adicionalmente, o estudo dos novos pontos abordados na norma possibilitou a compreensão das atualizações nos critérios de uso e ocupação de solo. Essa abordagem garantiu uma correta manipulação do ambiente encontrado nas proximidades de uma linha de transmissão, além de trazer ações que garantem a qualidade de operação da linha.

Um dos pontos críticos e detalhados na norma é faixa de segurança, que passou a ter um rigor elevado, trazendo metodologias de cálculos mais precisas, principalmente em respeito a obtenção das pressões de vento. A faixa é responsável por garantir a integridade operacional da linha, porém, se destaca por seu potencial de impacto ambiental, uma vez que envolve intervenções diretas no solo e na vegetação. A NBR 5422 detalha as restrições e cuidados para a manutenção da faixa, abordando temas como o controle da supressão vegetal e a prevenção de incêndios, o que contribui de forma significativa para a preservação do ecossistema no entorno da linha de transmissão.

Além disso, a versão de 2024 amplia os métodos em práticas de manejo sustentável, atribuindo mais responsabilidades em casos de impacto. A obrigatoriedade de estudos como o [EIA](#), [RIMA](#) e [AIA](#) refletem diretamente a importância do planejamento detalhado, de forma que todos os possíveis impactos estejam contemplados. Essas exigências demonstram um avanço, trazendo uma visão integrada e ambientalmente responsável, na qual os cuidados deixam de ser apenas uma exigência legal, e sim uma prática essencial para a manutenção da biodiversidade e dos ecossistemas.

No entanto, mesmo com uma normatização mais rigorosa e com diretrizes claras, os desafios para a implantação sustentável de linhas de transmissão permanecem. Questões como a complexidade de manter habitats conectados para evitar o isolamento de espécies

continuam sendo obstáculos. Por isso, é necessário que as concessionárias e o setor elétrico, em geral, continuem a estudar abordagens e invistam em tecnologias que possibilitem reduzir os impactos ambientais, minimizando o desmatamento e favorecendo a recuperação das áreas afetadas.

Com base na compreensão inicial da forma física de uma linha de transmissão, nas normas e leis aplicáveis, e nos resultados obtidos ao longo deste trabalho, foi possível evidenciar como a atualização da NBR 5422 contribui diretamente para uma abordagem mais sustentável na construção e operação de linhas de transmissão. A análise dos dados revelou que as metodologias de cálculo atualizadas e os novos critérios para faixas de segurança impactam positivamente na preservação dos ecossistemas, reduzindo os riscos de desmatamento e contribuindo para uma melhor integração com o meio ambiente. Este estudo reforça a importância de uma norma que atenda tanto às necessidades do setor elétrico quanto às exigências ambientais.

O trabalho também ressalta a importância de uma regulamentação robusta que acompanha o desenvolvimento do setor e da sociedade. Assim a NBR 5422 se posiciona como um instrumento para a compatibilização entre crescimento do país e a preservação ambiental, reforçando o compromisso do setor com a sustentabilidade.

Este trabalho se destaca como um estudo pioneiro na análise da nova versão da NBR 5422, sendo um dos primeiros a investigar as implicações e os impactos ambientais dessa atualização normativa. Essa análise inicial oferece uma referência valiosa para futuras pesquisas e aprimoramentos normativos, consolidando-se como uma contribuição na compreensão dos efeitos da nova NBR 5422.

Para estudos futuros, além de explorar o comportamento das distâncias elétricas fase-terra, sugere-se a análise de estudos regionais de impacto da nova norma em áreas ambientalmente sensíveis. Tais pesquisas poderiam aprofundar a aplicação prática dos novos critérios e oferecer mais dados para sustentar as próximas revisões normativas.

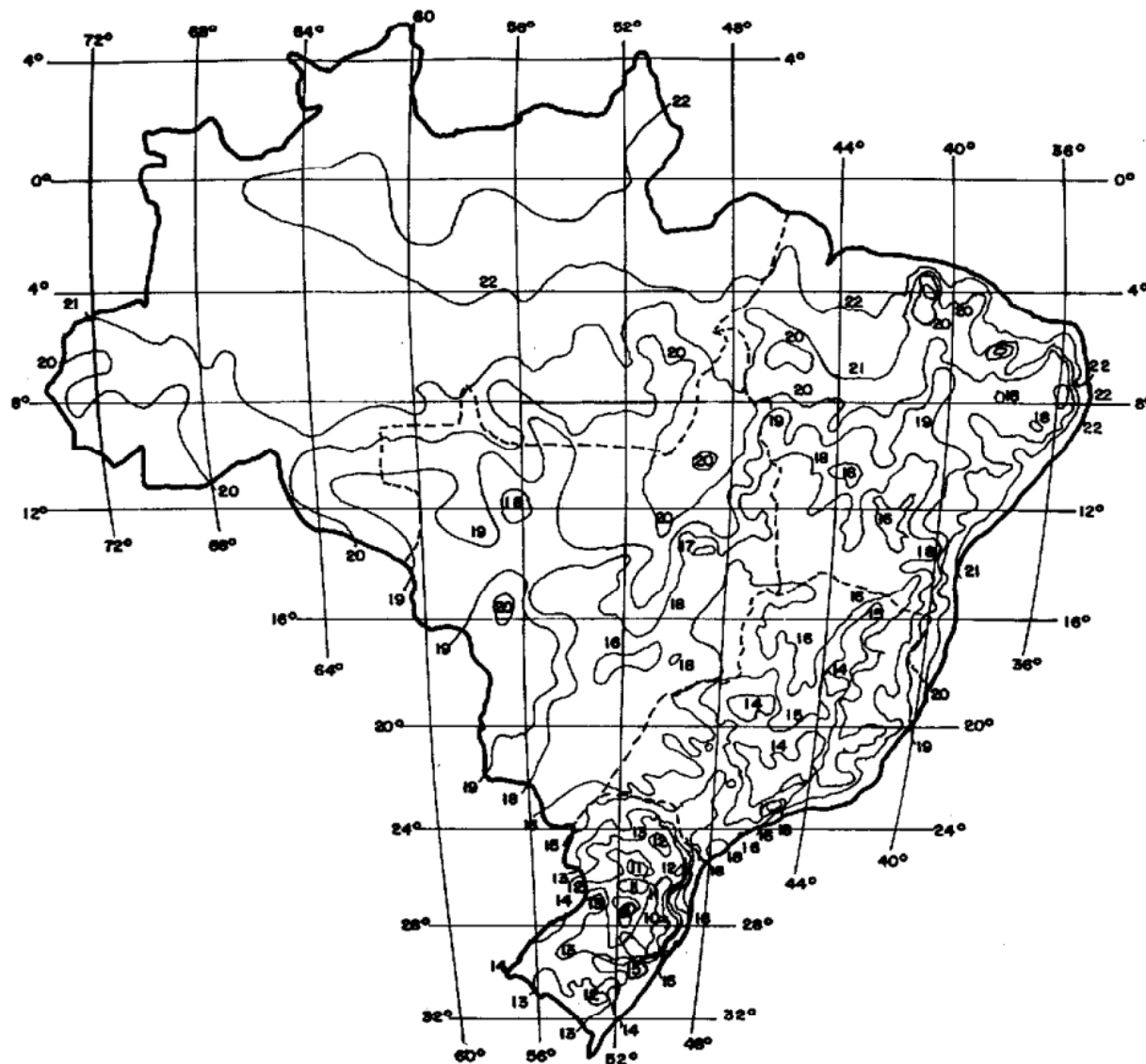
Referências

- ABNT. *Projeto de linhas aéreas de energia elétrica*. [S.l.]: ABNT NBR 5422, 1985.
- ABNT. *Aterramento de estruturas e dimensionamento de cabos para-raios de linha de transmissão aérea de energia elétrica*. [S.l.]: ABNT NBR 17140, 2023.
- ABNT. *Projeto de linhas aéreas de energia elétrica - Critérios técnicos*. [S.l.]: ABNT NBR 5422, 2024.
- Biodinâmica Rio. *Estudo de Impacto Ambiental LTs 500kV Ribeirão Preto Estreito Jaguara e Ribeirão Preto Poços de Caldas*. 2007. Disponível em: https://ibamagovbr.sharepoint.com/sites/EstudosAmbientais/Documents%20Compartilhados/Forms/AllItems.aspx?ga=1&id=%2Fsites%2FEstudosAmbientais%2FDocumentos%20Compartilhados%2FLicenciamento%2FLinhadeTransmissao%2FLT%20500kV%2ERibeirao_Preto-Estreito-Jaguara%2FEIA&viewid=31a7340a-614e-461e-922e-6875b27185de.
- BRASIL. *Resolução CONAMA N° 001, de 23 de janeiro de 1986*. Brasília, DF: Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), 1986.
- BRASIL. *Decreto n° 99.274, de 6 de junho de 1990. Regulamenta a Lei n° 6.902, de 27 de abril de 1981, e a Lei n° 6.938, de 31 de agosto de 1981, que dispõem, respectivamente sobre a criação de Estações Ecológicas e Áreas de Proteção Ambiental e sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, e dá outras providências*. Brasília, DF, 1990.
- CAMPOS, O. L. Estudo de caso sobre impactos ambientais de linhas de transmissão na região amazônica. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2010.
- COBRA, P. d. P. A. et al. Licenciamento ambiental e linhas de transmissão de energia elétrica: um estudo sobre a restauração florestal da mata atlântica. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2020.
- COSTA, T. R. V. d. Faixas de segurança de linhas de transmissão e seu modelo de desempenho frente aos incêndios florestais. 2021.
- FUCHS, R. D. *Transmissão de energia elétrica: linhas aéreas; teorias das linhas em regime permanente*. [S.l.]: Livros Técnicos e Científicos, 1979.
- LABEGALINI, P. R. et al. *Projetos mecânicos das linhas aéreas de transmissão*. [S.l.]: Editora Blucher, 1992.
- PEREIRA, A. L. d. A. B. Análise crítica dos impactos ambientais ocasionados pela linha de transmissão 500 kv miracema-sapeaçu e subestações associadas. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.
- TOBOUTI, A. K.; SANTOS, V. L. P. dos. Impactos ambientais causados na implantação de linhas de transmissão no brasil/environmental impacts caused the establishment of transmission lines in brazil. *Meio Ambiente e Sustentabilidade*, v. 4, n. 3, p. 184–199, 2014.

Anexos

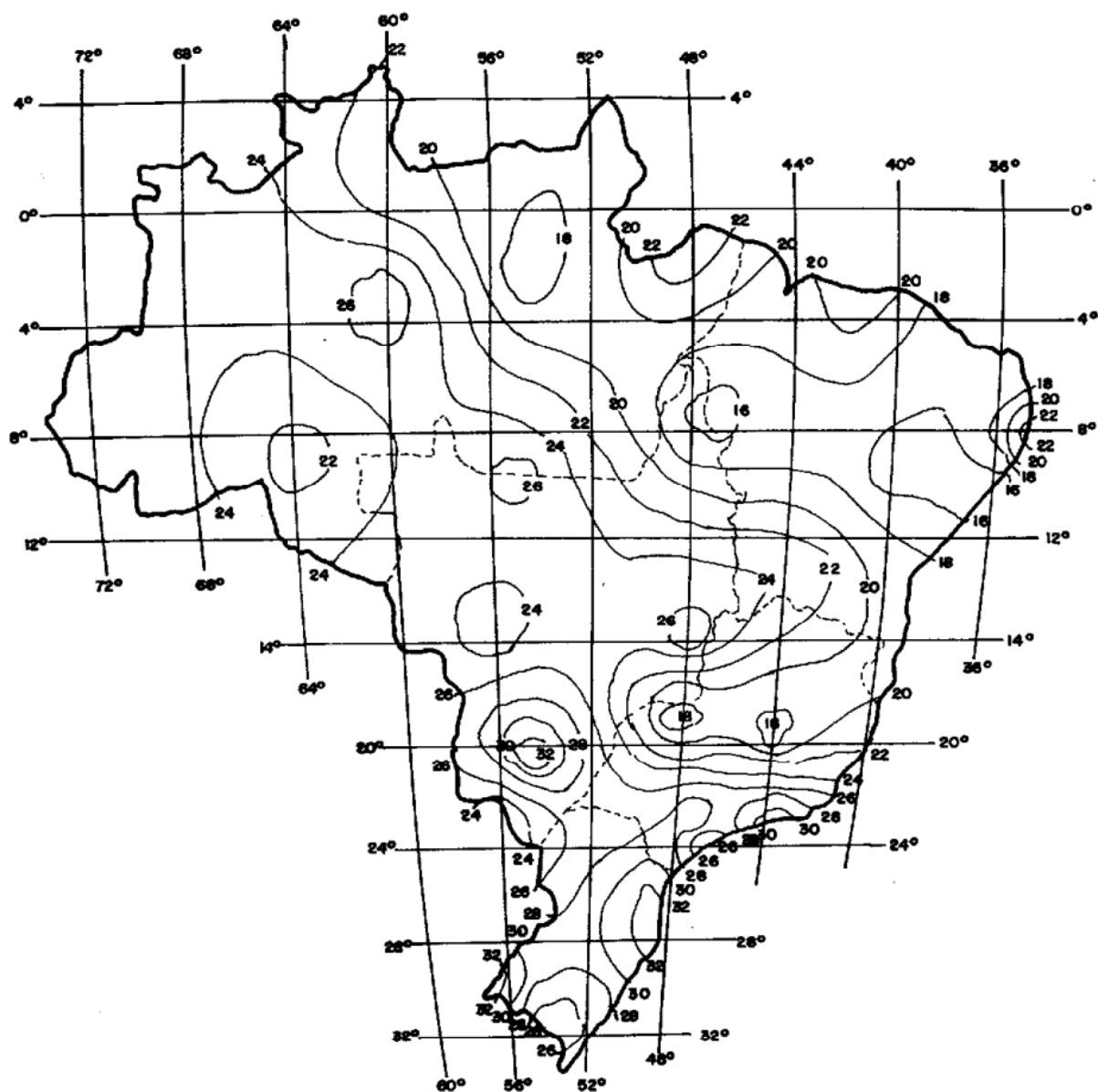
ANEXO A – Figuras.

Figura 23 – Temperatura coincidente (°C).



Fonte: Figura 27 - NBR 5422/85.

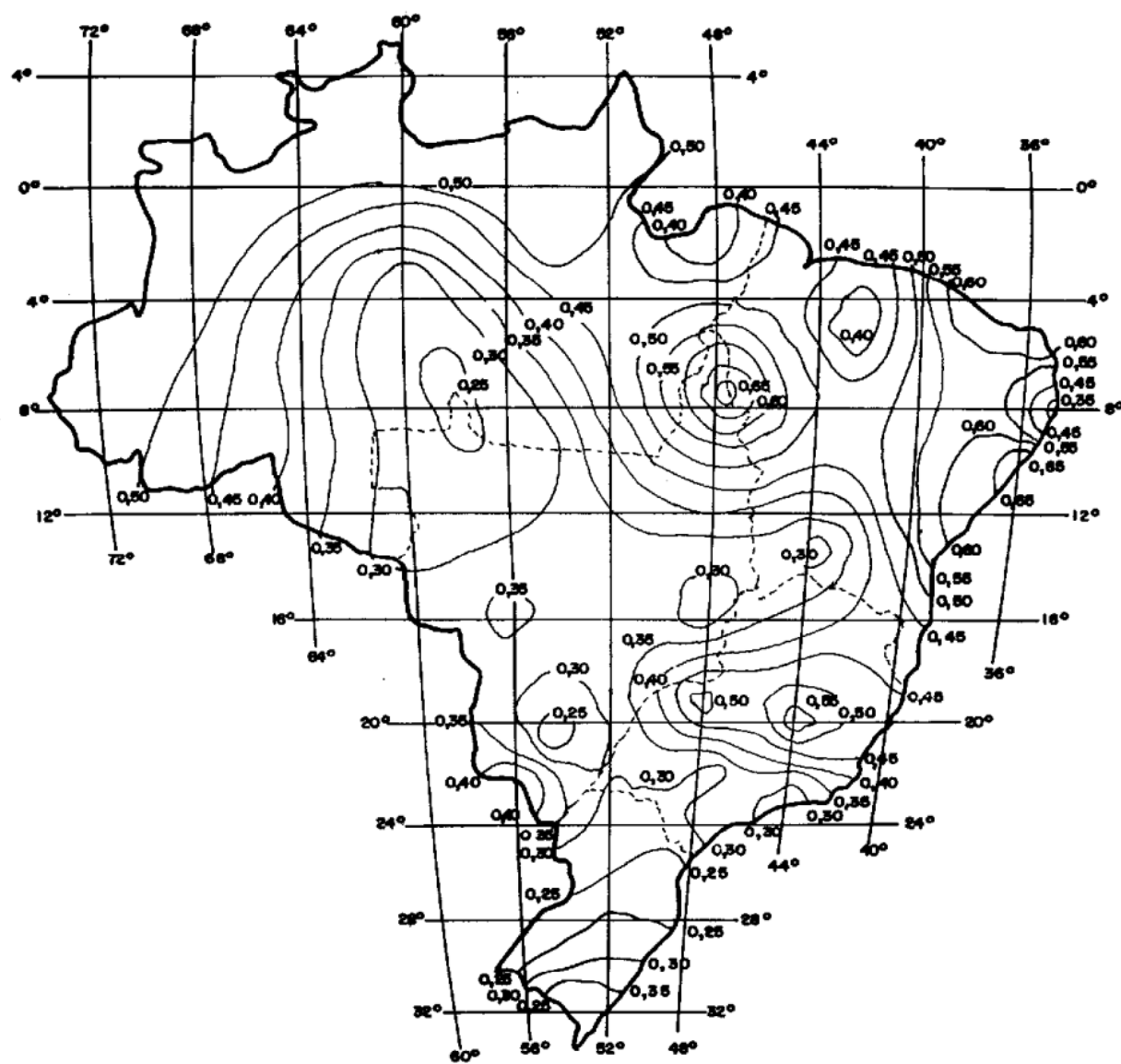
Figura 24 – Velocidade básica do vento (m/s).



- tempo de integração da média: 10 min
- período de retorno: 50 anos
- a 10 m de altura
- terreno de categoria B

Fonte: Figura 28 - NBR 5422/85.

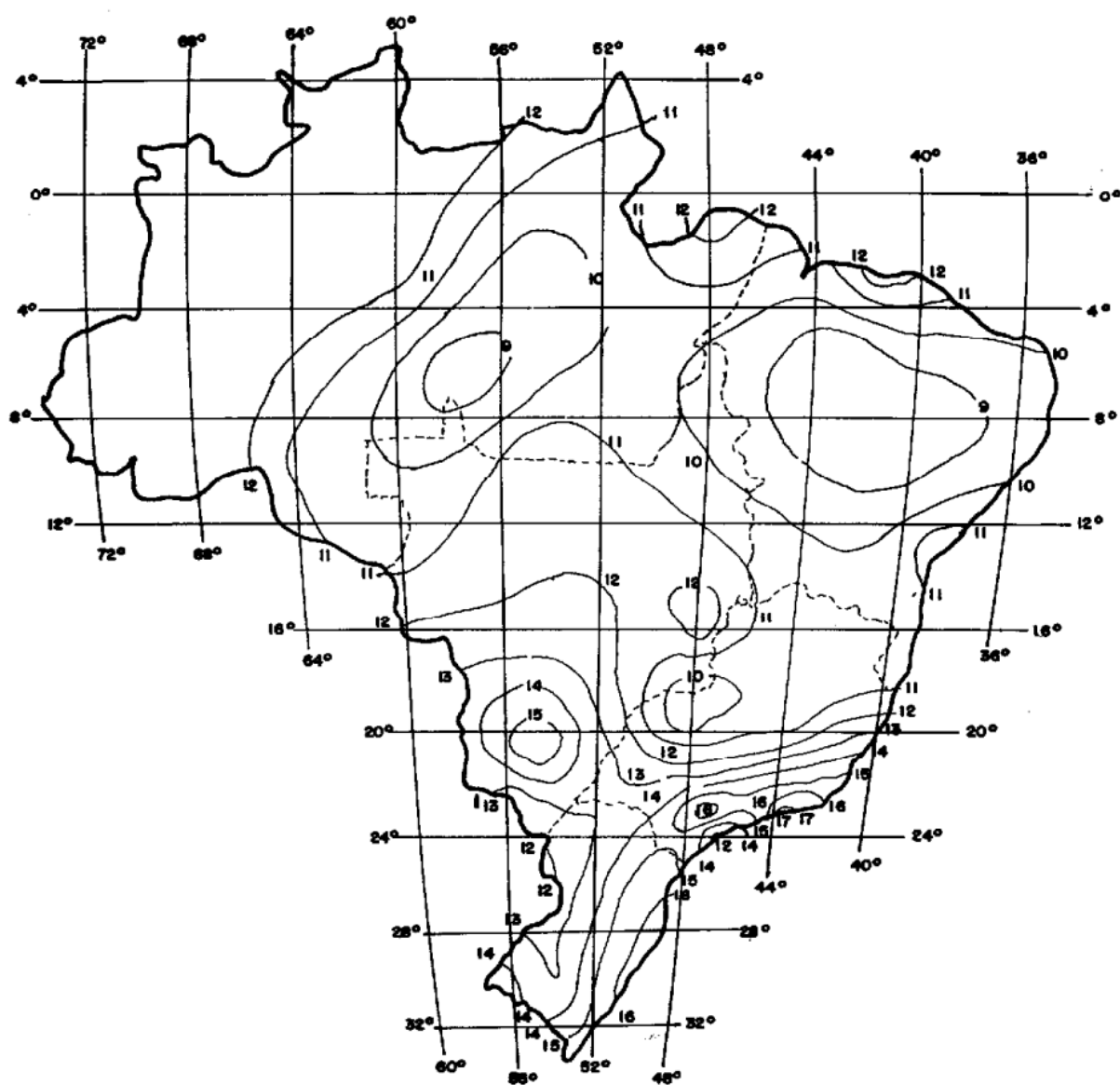
Figura 25 – Parâmetro alfa da distribuição estatística de Gumbel (m/s)–1.



- período de integração da média: 10 min
- a 10 m de altura
- terreno com grau de rugosidade B

Fonte: Figura 29 - NBR 5422/85.

Figura 26 – Parâmetro beta da distribuição estatística de Gumbel (m/s).



- período de integração da média: 10 min
- a 10 m de altura
- terreno com grau de rugosidade B

Fonte: Figura 30 - NBR 5422/85.