

NBR 5422:2024
Guia de Aplicação
v.0.0.1

© Autores¹

26 de fevereiro de 2024

¹<https://github.com/carloskleber/nbr5422>

Sumário

1	Histórico	3
2	Dados básicos	5
3	Referências complementares	6
4	Fluxo de trabalho	7
4.1	Metodologia	7
4.2	Elementos meteorológicos (seção 4 e Anexo A)	7
4.3	Temperatura do condutor (seções 5, 6 e 21, Anexo B)	7
4.4	Distâncias verticais de segurança (seção 7)	8
4.5	Projeto de isolamento (seção 9 e Anexo C)	8
4.6	Ação mecânica do vento (seção 8)	9
4.7	Distâncias horizontais de segurança (seção 7)	9
4.8	Projeto mecânico de cabos, suportes e fundações (seções 11, 12 e 13)	9
4.9	Faixa de passagem (seções 10, 17 e 18)	10
4.10	Aterramento (seção 15)	10
4.11	Projeto executivo	10
4.12	Projeto de travessias (seção 20)	10
4.13	Aplicação de vento de projeto (seção 4) no cálculo detalhado.	11
4.14	Manutenção de faixa de passagem (seção 19)	11
5	Referências	12

Introdução

A norma NBR 5422 apresenta uma série de critérios para assegurar a qualidade de um projeto, porém não é um texto didático.

Este texto, inspirado em publicações semelhantes (Fuchs1982, Labegalini1992), procura esclarecer a aplicação da norma.

Convenções

O texto nestas caixas são informações importantes para a aplicação da seção

Capítulo 1

Histórico

O desenvolvimento da versão atual da NBR 5422 foi abordado ao longo dos anos em diversos artigos de congresso:

1. A. A. Menezes Jr., J. I. Silva Filho e C. E. O. Coutinho, "Velocidades máximas de vento no Brasil - Análise estatística e mapeamento de isótopas,"VII SNPTEE, GLT-05, Brasília, 1984.
2. O. Régis Jr, "Novos critérios estatísticos para cálculo de ampacidade de LT's,"IX SNPTEE, Belo Horizonte, 1987.
3. FT GCPS/ GCOI, "Ampacidade estatística de linhas aéreas de transmissão com cabos alumínio/aço,"XII SNPTEE, GLT-19, Recife, 1993.
4. C. Kosmann, "Avaliação de ampacidade estatística da LT 138 kV Joinville/ Eletrosul – Joinville IV,"XIV SNPTEE, Belém, 1997.
5. J. I. Silva Filho, V. H. G. Andrade, J. B. S. Borges e C. E. O. Coutinho, "Considerações sobre o vento no projeto e recapacitação de linhas de transmissão,"XVI SNPTEE, Campinas, 2001.
6. A. P. Ruffier, J. I. Silva Filho, L. F. Estrella Jr. e E. F. A. Lisboa, "Uma avaliação da influência do método de cálculo da carga de vento para o dimensionamento de estruturas de linhas de transmissão,"XVII SNPTEE, GLT-16, 2003.
7. A. A. Menezes Jr., A. L. Tan e D. Fernandes, "Velocidade de vento de elevada intensidade ocorridas em Florianópolis e Passo Fundo – Um enfoque estatístico e meteorológico para projetos de LTs,"XVII SNPTEE, GLT-14, 2003.
8. R. M. Azevedo, J. I. Silva Filho, V. H. G. Andrade e C. E. O. Coutinho. "Fatores de correção atmosféricos aplicados ao dimensionamento de Isolamentos em ar – nova metodologia de cálculo,"XVII SNPTEE, GLT-13, 2003.
9. C. P. R. Gabaglia, C. M. F. de Oliveira, J. I. Silva Filho, F. S. Moreira e A. P. Ruffier. "Ampacidade estatística - medições em laboratório e de campo,"XVIII SNPTEE, GLT-06, Curitiba, 2005.
10. A. O. Silva et al, "Coeficientes de arrasto aerodinâmico em estruturas treliçadas de linhas de transmissão,"XVIII SNPTEE, GLT-17, Curitiba, 2005'.
11. J. I. Silva Filho, A. A. Menezes Jr., A. P. Ruffier, L. F. Estrella Jr. e J. L. G. Dias, "Esforços devidos ao vento sobre componentes de LTs e fatores de correção normativos compatíveis com a realidade brasileira," XVIII SNPTEE, GLT-19, Curitiba, 2005.
12. J. I. Silva Filho, L. A. M. C. Domingues, A. P. Ruffier e A. A. Menezes Jr. "Assessment of environmental statistics as an accessible breakthrough to improve OHTLs design,"Cigre Session, B2-201, Paris, 2006.
13. A. Consentino, C. Kosmann, S. Colle e R. N. Fontoura Filho, "Carregamentos de LTs na região serrana de Santa Catarina - Comparação de resultados obtidos com a NBR 5422 atual e proposta,"XII ERIAC, Foz do Iguaçu, 2007.
14. J. I. Silva Filho e A. A. Menezes Jr., "Determinação da velocidade de vento de projeto por meio de métodos alternativos aos vigentes e uso de técnicas mais adequadas a redes anemométricas com coletas escassas,"XXIX SNPTEE, GLT-12, Rio de Janeiro, 2007.

15. A. Consentino, C. Kosmann, S. Colle e R. Hass, "Análise estatística da ampacidade sazonal da LT 525 kV Areia – Campos Novos, utilizando-se técnicas de downscaling de dados meteorológicos, com apoio em mapeamento a laser," XIX SNPTEE, GLT-24, Rio de Janeiro, 2007.
16. R. G. C. Furtado. Métodos estatísticos aplicados ao cálculo da ampacidade e risco térmico de linhas aéreas de transmissão. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Juiz de Fora, 2008, <http://repositorio.ufjf.br/jspui/bitstream/ufjf/3001/1/ronangustavocarvalhofurtado.pdf>
17. C. Kosmann, A. Consentino e J. N. Hoffmann, "Análise de projetos de linhas de transmissão sob a ótica da ampacidade estatística proposta na revisão da norma NBR 5422," XIII ERIAC, Argentina, 2009, https://www.researchgate.net/publication/374287920_Analise_de_Projetos_de_Linhas_de_Transmissao_sob_a_Otica_da_Ampacidade_Estatistica_Proposta_na_Revisao_da_Norma_NBR_5422.
18. A. Consentino et al, "Análise estatística das capacidades operativas sazonais de linhas de transmissão utilizando curvas de carga," XIV ERIAC, Paraguai, 2011.
19. R. D. Machado et al, "A utilização da climatologia virtual na análise de carregamentos em linhas de transmissão: um estudo de caso comparando dados simulados contra medidos," XXII SNPTEE, GLT-06, Brasília, 2013.
20. A. O. Silva, "Uma análise do critério H/w," XXIII SNPTEE, GLT-18, Foz do Iguaçu, 2015.
21. C. C. de Oliveira, H. Carvalho e V. R. V. Mendes. "Avaliação das forças devidas ao vento em cabos de linhas aéreas de transmissão," XVIII ERIAC, Foz do Iguaçu, 2019, https://www.researchgate.net/publication/333293434_AVALIACAO_DAS_FORCAS_DEVIDAS_AO_VENTO_EM_CABOS_DE_LINHAS_AEREAS_DE_TRANSMISSAO_SEGUNDO_DIFERENTES_METODOLOGIAS
22. A. Mpalantinos Neto et al, "A nova norma NBR 5422 – Projetos de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica – principais avanços e mudanças," XXVI SNPTEE, GLT-27, Rio de Janeiro, 2022, https://www.researchgate.net/publication/360867174_A_nova_norma_NBR_5422_-_Projeto_de_linhas_aereas_de_transmissao_de_energia_eletrica_-_principais_avancos_e_mudancas

Alguns artigos podem ser obtidos nos acervos técnicos:

* <https://xxviisnp tee.com.br/its/> * <https://web.archive.org/web/20181228173249/https://www.xxvsnp tee.com.br/acervo-tecnico/>

Os artigos abordaram modelos em trabalho na época da sua publicação, que podem diferir do que foi efetivamente implementado no texto da norma, mas cabe como registro histórico.

A norma aplica-se a linhas aéreas CA a partir de 38 kV e CC. Alguns aspectos apresentados neste guia serão sobre linhas do Sistema Interligado Brasileiro (SIN), regidas sob o sistema de concessões do Governo Federal, logo com regras específicas tais como os leilões de transmissão e os procedimentos de rede do ONS. O guia na medida do possível terá uma aplicação ampla, podendo abordar as particularidades de projeto de linhas para o SIN.

Capítulo 2

Dados básicos

Um projeto de linha pressupõe uma proposta inicial, com tensão, correntes e geometria de suportes e cabos, além de um traçado, no qual se implica nos dados de terreno e climatológicos.

A finalidade neste ponto é chegar a um projeto básico - um perfil de torre típica. O projeto executivo

Cabe observar que a NBR 5422 não se aplica somente a linhas de transmissão do Sistema Interligado Nacional (SIN) - assim como na sua versão anterior, a norma vale para qualquer linha aérea com tensão nominal acima de 38 kV.

Capítulo 3

Referências complementares

Para a devida aplicação da NBR 5422 no projeto de uma linha, outras referências devem ser aplicadas:

* Uma base de dados meteorológicos, como INMET (<https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>) * Um modelo de cálculo de flecha, como por exemplo do Cigre (Cigre WG 22.12, "The thermal behaviour of overhead conductors", Electra 144, 1992), conforme adotado pela REN ANEEL 905 de 2020, Anexo II (revoga REN 191 2005).

Capítulo 4

Fluxo de trabalho

A concretização de um projeto de linha aérea passa por algumas etapas. Especificamente na transmissão do Sistema Interligado Nacional (SIN), algumas etapas são realizadas pela EPE através de seus relatórios técnicos.

1. Planejamento da transmissão (Relatório R1 EPE) 2. Estudos elétricos (Relatório R2 EPE) 3. Definição preliminar da rota e impacto socioambiental (Relatório R3 EPE) 4. Custos fundiários (Relatório R5 EPE) e compartilhamento de instalações (Relatório R4 EPE) 5. Licenciamento 6. Definição final da rota 7. Construção 8. Energização

4.1 Metodologia

4.1.1 Segurança do projeto

Definições de risco de falha de um projeto

4.1.2 Elementos solicitantes

Histórico - Labegalini (p. 97)

Ver artigos recentes

4.2 Elementos meteorológicos (seção 4 e Anexo A)

4.2.1 Desenvolvimento

Histórico da versão 1985 - mapas

4.2.2 Aplicação

Tratamento de dados

Vento de projeto

4.3 Temperatura do condutor (seções 5, 6 e 21, Anexo B)

4.3.1 Desenvolvimento

Ampacidade estatística

4.3.2 Aplicação

Cálculo das temperaturas no condutor para cada risco térmico, associada a uma distribuição estatística.

Regime de corrente são divididos em nominal e sobrecorrente: um situação temporária, não habitual e não repetitiva, decorrente a uma contingência. Recomenda-se que este regime não ultrapasse 4 dias ininterruptos, ou no total 5

A parte do regime de corrente, define-se o risco térmico, no qual a corrente do condutor é excedida devido a corrente e fatores externos, e o risco de falha de uma descarga em qualquer um dos espaçamentos presentes na linha.

Regime	Condição	Risco térmico	Risco de falha	Símbolo	Fórmula	K_{cs} típico
Nominal	Típica	15%	10^{-6}	$D_{Vtip,n}$	$P_{bV} + 0,90 + P_{etip,n}$	1,35
	Limite	1%	10^{-4}	$D_{Vlim,n}$	$P_{bV} + 0,60 + P_{elim}$	1,25
Sobrecorrente	Típica	5%	10^{-4}	$D_{Vtip,s}$	$P_{bV} + 0,60 + P_{etip,s}$	1,35
	Limite	1%	10^{-4}	$D_{Vlim,s}$	$P_{bV} + P_{elim}$	1,25

As figuras do Anexo B foram geradas a partir de um exemplo processado pelo Claudionor. A ideia é ter no futuro uma rotina interna calculando a temperatura, para uma dada localização (vinculada a uma base de dados INMET).

A partir do risco térmico, extrai-se as temperaturas para 15

O cálculo das flechas em regime permanente pode ser obtido a partir do equilíbrio térmico, como no modelo do Cigre ([1992](Cigre1992)):

$$P_j + P_M + P_S + P_i = P_c + P_r + P_w$$

Cálculo da flecha inicial - Tração inicial do cabo (seção 11)

O cálculo tradicional da flecha é obtido pela fórmula da catenária:

$$f = \frac{T_0}{p} \left[\cosh \left(\frac{Ap}{2T_0} \right) - 1 \right]$$

Ou pela sua aproximação da parábola:

$$f = \frac{pA^2}{8T_0}$$

Sendo estas fórmulas válidas para vãos isolados e nivelados.

A NBR 5422:1985 estipulava um critério de tração relativo ao percentual da EDS do cabo (entre 14 a 21

O novo critério é baseado na brochura técnica 273 do Cigre ([2005](CigreTB273)), no qual condutores singelos sem qualquer dispositivo de proteção contra vibrações eólicas são limitados pela razão H/p. Para cabos com dispositivos, ou feixes de condutores, estudos específicos devem ser realizados, como discutido na brochura.

A partir da temperatura obtida, soluciona-se a equação de mudança de estado de forma iterativa a fim de obter a tração final T_{02} :

$$\Delta t = \frac{1}{\alpha_t} \left[\left(\frac{C_2 \sinh \frac{A}{2C_2}}{C_1 \sinh \frac{A}{2C_1}} - 1 \right) - \frac{1}{ES} (T_{02} - T_{01}) \right]$$

As correntes podem ser estabelecidas para cada período climático - mas isso já seria implícito no cálculo geral? No final haverá uma temperatura/ distância determinante do projeto.

4.4 Distâncias verticais de segurança (seção 7)

4.4.1 Desenvolvimento

Histórico, comparação com a versão 1985

4.4.2 Aplicação

Distâncias verticais

Definição da altura básica do suporte

4.5 Projeto de isolamento (seção 9 e Anexo C)

4.5.1 Desenvolvimento

Histórico da formulação

4.5.2 Aplicação

Distâncias mínimas fase-terra e entre fases.

4.6 Ação mecânica do vento (seção 8)

4.6.1 Desenvolvimento

Semelhanças com IEC 60826 e particularidades na NBR

Fator de turbulência.

O fator K_{tub} foi inicialmente apresentado por Silva Filho et al ([2005](Silva2005)), demonstrando que os esforços devidos ao vento, comparados ao modelo IEC, apresentavam uma variação entre 8

Relação com a NBR 8850

Modelos de ângulo de balanço foram comparados com o modelo da NBR 5422:1985.

1. MORS, H. Wind Pressure on Overhead Transmission Line Conductors – Hornsgrinde Testing Station. CIGRE Report 220, 1956. 2. CIGRE WG 22.06. Probabilistic Design of Overhead Transmission Lines, Technical Brochure 178, February 2001.

![Fator de efetividade do vento](figuras/balanco1.png) Comparação do fator de efetividade em algumas metodologias

![Comparação de ângulos de balanço](figuras/balanco2.png) Comparação do ângulo de balanço em algumas metodologias

Por falta de consenso, manteve-se o modelo de 1985, ficando evidente a necessidade de desenvolvimentos conclusivos para uma amostragem representativa de cabos e vãos.

4.6.2 Aplicação

Esforços nos elementos.

Ventos de alta intensidade

Cálculo dos ângulos de balanço.

Balanço assíncrono

4.6.3 Pesquisa posterior

Artigos de referência para pesquisa em ventos de alta intensidade:

1. Aboshosha, H., El Damatty, A. Effective technique to analyze transmission line conductors under high intensity winds. Wind and Structures, 18(3), 235-252, 2014. 2. El Damatty, A., Elawady, A. Development of Code Provisions for Transmission Lines under Downbursts Using Numerical Modeling and WindEEE Testing. Advances in Civil, Environmental and Materials Research (ACEM16), Jeju Island, Korea, 2016. 3. Elawady, A. Development of design loads for transmission line structures subjected to downbursts using aero-elastic testing and numerical modeling. Ph.D. Thesis, The University of Western Ontario, Canada, 2016. 4. Aboshosha, H. Response of transmission line conductors under downburst wind. Ph.D. Thesis, The University of Western Ontario, Canada, 2014. 5. Aboshosha, H., Bitsuamlak, G., El Damatty, A. Turbulence characterization of downbursts using LES. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 136, 44-61, 2015.

4.7 Distâncias horizontais de segurança (seção 7)

Considerações quanto ao balanço.

Distância entre linhas em um corredor compartilhado.

Consideração entre linhas paralelas com tensões distintas (entre condutores em suportes diferentes).

A NBR 5422:1985 determina como condição uma das linhas em balanço e a outra em repouso, e a diferença fasorial entre os condutores ou a tensão fase-terra do circuito de maior tensão, o que obtiver a maior distância.

Na NBR 5422:2024...

4.8 Projeto mecânico de cabos, suportes e fundações (seções 11, 12 e 13)

Critérios e hipóteses de carregamento.

4.8.1 Hipóteses mínimas para cabos

Critério H/p (ou originalmente H/w)

Hipótese	Condição	Vento	Temperatura
Temperatura mínima	Inicial	Sem vento	Mínima
Temperatura média das mínimas diárias do mês mais frio	Inicial	Sem vento	Média
Vento de projeto de 10 min	Inicial	Sem vento	Média das mínimas
Vento de projeto de 3 s	Inicial	Sem vento	Média das mínimas
	Temperatura típica do condutor	Final	Sem vento
	Temperatura limite do condutor	Final	Sem vento
	Balanço do condutor	Final	

Hipótese		Coeficientes para estado limite			
		Permanente		Transiente	
		Vento	Vento	Vertical	Trânsito
Vento de projeto de 10 min	Transversal, componente vertical máxima tração nos cabos	1,15	1,0	1,15	
	Transversal, carga vertical reduzida	1,15	1,0	0,87	
	Oblíquo, carga vertical máxima	1,15	1,0	1,15	
Vento de projeto de 3 s	Transversal	1,15	1,0	1,15	
	Oblíquo	1,15	1,0	1,15	
	Transversal, pernas inclinadas	1,15	1,0	1,15	
	Oblíquo, pernas inclinadas	1,15	1,0	1,15	
	Transversal, suportes suspensão	1,15	1,0	1,15	
	Longitudinal, suportes suspensão	1,15	1,0	1,15	
	Transversal, monomastro suspensão	1,15	1,0	1,15	
	Longitudinal, monomastro suspensão	1,15	1,0	1,15	
Contenção de falha	Desequilíbrio longitudinal para-raios	1,15	0,0	1,15	
	Desequilíbrio longitudinal condutor	1,15	0,0	1,15	
Construção e manutenção		1,5	0,0	1,5	

4.8.2 Hipóteses mínimas para suportes

Os coeficientes para estado limite de utilização são iguais a 1.

4.9 Faixa de passagem (seções 10, 17 e 18)

Cálculo da largura de faixa por critérios elétricos (seção 10) e mecânicos (balanço)

Os critérios elétricos podem ser divididos em fenômenos lineares (campo elétrico e magnético) e os relativos ao efeito corona (ruído audível e radiointerferência). O cálculo dos campos elétrico e magnético podem ser obtidos pelas equações do eletromagnetismo, considerando respectivamente os potenciais e correntes nas linhas nas condições operativas máximas, além da sua posição geométrica mais provável (notadamente, as flechas).

A NBR 5422 não define limites, e a rigor estas já eram estabelecidos por leis e resoluções de agências, ficando ao texto da norma esclarecimentos quanto a sua aplicação.

Os fenômenos oriundos do efeito corona podem ser obtidos por modelos empíricos. O modelo seminal foi desenvolvido por Peek, no qual determina o campo elétrico crítico em um cilindro, em kV/cm:

$$E_c = 30\delta m \left(1 + \frac{0,3}{\sqrt{\delta r}} \right)$$

4.10 Aterramento (seção 15)

Aplicação da norma NBR 17140.

4.11 Projeto executivo

Algumas seções da norma somente serão aplicadas na etapa do projeto executivo.

4.12 Projeto de travessias (seção 20)

Distância de segurança entre linhas

- 4.13 Aplicação de vento de projeto (seção 4) no cálculo detalhado.
- 4.14 Manutenção de faixa de passagem (seção 19)

Capítulo 5

Referências