

ANÁLISE DINÂMICA DE UM CABO CONDUTOR DE ENERGIA ELÉTRICA

Felipe Farias Cavalcanti,
engenheiroaeroffc@gmail.com¹

Jorge Luiz de Almeida Ferreira,
jorge@unb.br²

^{1,2}Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy
Ribeiro 70910-900 Asa Norte, Brasília-DF
enm.pcmec@unb.br

Resumo. O presente trabalho baseia-se na apresentação de conceitos relevantes para a modelagem de um cabo condutor reto esticado por meio do Método de Elementos Finitos, que extrai as frequências e os modos de vibrar. Os cabos condutores estão propícios ao aparecimento de falhas, estas causam perdas significativas em atividades comerciais e diárias, seja por fadiga ou outros tipos, ocasionando a interrupção da energia elétrica. Esses danos são induzidos por vibrações, seja de vento, galope do condutor ou oscilações da esteira, que amplificam as tensões nas estruturas acessórias e comprometem o sistema. Para reduzir os danos, são utilizados amortecedores - espaçadores, cuja finalidade é apresentada neste estudo. Estudos mostram que fatores geográficos: clima, vegetação e relevo interferem diretamente nos fenômenos vibratórios, sendo a região amazônica um local favorável às vibrações do vento. Neste estudo foram realizadas análises numéricas com dois tipos de elementos, e outras adicionais com a variação das propriedades geométricas do cabo, a fim de avaliar o comportamento das frequências naturais. Observaram-se boas concordâncias entre os dados analíticos e as simulações numéricas para os dois elementos, sendo o elemento LINK 8 mais passível de validação do modelo.

Palavras chave: Cabos. Método. Vibrações. Falhas. Dinâmica.

Abstract. The present work is based on the presentation of relevant concepts for the modeling of a straight conductor cable stretched through the Finite Element Method, which extracts the frequencies and modes of vibration. The conductive cables are prone to the appearance of failures, these cause significant losses in commercial and daily activities, whether due to fatigue or other types, causing the interruption of electrical energy. These damages are induced by vibrations, whether from wind, conductor gallop, or track oscillations, which amplify stresses on accessory structures and compromise the system. To reduce damage, dampers - spacers are used, the purpose of which is presented in this study. Studies show that geographic factors: climate, vegetation, and relief directly interfere in the vibration phenomena, with the Amazon region being a favorable place for wind vibrations. In this study, numerical analyzes were performed with two types of elements, and additional analyzes with the variation of the cable's geometric properties, to evaluate the behavior of natural frequencies. Good agreements were observed between the analytical data and the numerical simulations for the two elements, with the LINK 8 element being more susceptible to model validation.

Keywords: Cables. Method. Vibration. Failures. Dynamics.

1. INTRODUÇÃO

Os cabos são estruturas leves e flexíveis, amplamente utilizadas na engenharia em diversas aplicações, seja para suportar cargas mecânicas e ambientais, transmitir energia, entre outras (TANG, *et al.*, 2020; LEPIDI, GATTULLI e VESTRONI, 2007). Essas estruturas em um projeto mecânico, juntamente com as estruturas acessórias, quando devidamente dimensionadas, evitam a ocorrência de efeitos indesejáveis, como sobrecargas mecânicas e elétricas, nos sistemas aos quais estão acopladas, apresentando maior durabilidade e eficiência (ABOSHOSHA e EL DAMATY, 2014). Em um projeto estrutural, a escolha dos tipos de materiais utilizados nos cabos condutores e estruturas acessórias, o nível de tensões a que estão submetidos e as condições de carga são importantes para o entendimento do processo de falha do sistema e posterior manutenção (REINKE, *et al.*, 2020).

De acordo com (ROLIM, *et al.*, 2013), falhas em condutores causam perdas consideráveis no setor elétrico, promovendo fenômenos indesejáveis que interferem amplamente nos setores industrial e residencial, causando a interrupção das atividades diárias e comerciais. De acordo com (TIAN e LIU, 2021), os efeitos das cargas ambientais

(vento) que afetam o condutor e o depósito de gelo em sua superfície aceleram o processo de concentração de tensões nas estruturas acessórias, que por sua vez reduz a vida útil do sistema, causando colapsos. Com a expansão das redes elétricas, faz-se necessário o uso de equipamentos mais robustos que operem em altas tensões. Para essas tensões, é necessário aumentar o diâmetro dos cabos condutores, a fim de evitar sobrecargas e transmitir energia elétrica com eficiência em toda a extensão territorial (ABOSHOSHA e EL DAMATY, 2014). Esse aumento, por sua vez, altera os custos do projeto. Segundo (POFFENBERGER e SWART, 1965; ABOSHOSHA e EL DAMATY, 2014) uma solução viável para este projeto seria o uso de multicondutores. Essa escolha se justifica pelo fato dos feixes condutores se comportarem como um único condutor, sobrepondo seus campos magnéticos, para evitar gastos desnecessários no projeto, descargas elétricas, perdas por efeito Corona e, conseqüentemente, a redução do gradiente de potencial na superfície. De acordo com (JIAN, *et al.*, 2019), as principais vantagens do uso de cabos multicondutores são: baixa perda de linha de transmissão, alta eficiência de transmissão de energia e economia de investimento e custos operacionais.

Em cabos flexíveis ocorrem fenômenos oscilatórios, devido à ação direta de cargas dinâmicas que provocam sua ruptura em determinado número de ciclos, conseqüentemente afetando as linhas de transmissão. Segundo (WOLF, *et al.*, 2018; JAFARI e SARKAR, 2020) fenômenos externos, assim como a ação direta do vento sobre os condutores de energia, promovem atrito entre os fios dos cabos condutores e o aumento de tensões e deformações nos grampos de suspensão e em estruturas de fixação dos cabos, corroborando em sérios danos a todo o sistema da linha de transmissão elétrica. De acordo com (MATT e CASTELLO, 2007), a energia mecânica é dissipada entre os fios constituintes do condutor (amortecimento estrutural) e devido às perdas aerodinâmicas durante as vibrações de flexão (amortecimento aerodinâmico); em que a energia é dissipada devido ao amortecimento do material e nos grampos condutores. Deve-se notar também que no processo de tensionamento do cabo (corda), o condutor suporta diretamente as ações de tensão axial e carga de torção (JIAN, *et al.*, 2019). Para controlar as altas amplitudes de vibração no sistema e evitar fenômenos de vibração do vento (liberação de vórtices no condutor, na faixa de frequência de 3 a 150 Hz, para velocidades de 1 a 7 m/s), galope do condutor (depósito de gelo na superfície dos condutores, na faixa de frequência entre 0,1 e 3 Hz, para velocidades de 7 a 18 m/s) e oscilações induzidas por esteira (quando um condutor penetra na esteira do outro, na frequência de 0,15 a 10 Hz, com velocidades de 4 a 18 m / s), amortecedores (ABOSHOSHA e EL DAMATY, 2014; ROSSI, *et al.*, 2020) são usados.

Geralmente são utilizados em sistemas onde as variáveis de projeto não podem ser alteradas, funcionando como sistemas secundários que quando acoplados ao sistema primário (linhas de transmissão) absorvem a energia do sistema. De acordo com (VAJA, BARRY e TANBOUR, 2018; NGUYEN e MACDONALD, 2018), os amortecedores comumente usados em linhas de transmissão são do tipo Stockbridge, que são eficazes quando suas frequências naturais são sintonizadas nas frequências de Strouhal. Deve-se notar que o número de Strouhal depende da frequência de excitação do vento, diâmetro do condutor e velocidade do vento (ABOSHOSHA e EL DAMATY, 2014). De acordo com (TIAN e LIU, 2021), estudos experimentais e numéricos são os principais métodos utilizados para estudar as respostas dinâmicas estruturais responsáveis pela ruptura de cabos. De acordo com (MCCLURE e LAPOINTE, 2003), foi mostrado seus estudos que a análise estática estabelece a base para cálculos no projeto estrutural de linhas de transmissão; e a análise dinâmica prevê a resposta transitória da linha de transmissão submetida a cargas externas atuantes no condutor, que podem ser estáticas (gelo) ou quase estáticas (vento estável idealizado), induzindo a falha repentina de componentes. Em concordância com os estudos discutidos acima, (WANG, LI e XIE, 2011) reforçam que as vibrações induzidas pelo vento em cabos condutores submetidos a forças de tensionamento apresentam características não lineares e que a partir da análise dinâmica a equação de movimento do cabo pode ser desacoplada, permitindo soluções no domínios do tempo e espaço, cuja a finalidade é extrair os infinitos autovetores e autofunções. Observe que a tensão dinâmica gerada ao longo de uma linha de transmissão pelo carregamento do vento é decomposta em duas componentes de efeitos estáticos não lineares dependentes da velocidade média do vento e efeitos dinâmicos lineares causados pelo vento turbulento, no plano de equilíbrio.

De acordo com (TAO, *et al.*, 2020) e com base na teoria dinâmica não linear, a parte da carga de vento com maior frequência é considerada como carga dinâmica, enquanto a parte da carga de vento com menor frequência é considerada como carga causada pela média velocidade do vento. De acordo com (TAO, *et al.*, 2020), a influência da carga do vento deve ser bem compreendida, pois provoca uma mudança na força de tração na linha de transmissão e altera a posição de equilíbrio vibratório da linha de transmissão. Outro fator muito importante, segundo (TIAN e LIU, 2021) são as condições geográficas e climáticas que interferem diretamente na vida útil dos cabos condutores. Um estudo indica que os fenômenos de vibração do vento, entre outros, são mais frequentes na região amazônica, onde fatores geográficos: clima, vegetação e relevo, e a falta de proteção das linhas de transmissão, influenciam diretamente na estabilidade do sistema, causando danos por fadiga (ABOSHOSHA e EL DAMATY, 2014).

Ressalta-se também que a quebra de cabos e dispositivos gera perdas em geral, e que a partir da análise dinâmica será possível prever as maiores amplitudes do sistema, reforçando as estruturas para que não ocorra suspensão de energia. O presente trabalho tem como objeto de estudo a análise dinâmica linear de um cabo condutor de linha de transmissão reto submetido a uma força de tensionamento, utilizando *software ANSYS®* (via Método dos Elementos Finitos). Cujos resultados foram posteriormente comparados com dados analíticos (via *software ANSYS®*) para encontrar o erro percentual entre os dois e validar o modelo.

2. METODOLOGIA

Foram realizadas análises dinâmicas lineares em um cabo reto tensionado, que assumem pequenos deslocamentos sem a presença de não linearidades geométricas, utilizando o *software ANSYS*[®], no qual extraem as características dinâmicas (modos naturais e frequências). Este modelo foi validado a partir da solução analítica, calculada utilizando o *software PYTHON*[®]. Modelos numéricos de um único condutor são criados de acordo com as necessidades do projeto. Para simular adequadamente é necessário que a adaptação ou simplificação, intrínseca ao modelo físico, tenha as mesmas condições para que os resultados numéricos representem a realidade com o menor erro possível.

3. RESULTADOS

Para extrair os modos de vibração da corda vibrante, utilizamos as propriedades do material do cabo condutor GROSBREAK 636, apresentadas na Tab. (1).

Tabela 1. Propriedades do cabo condutor (SANTOS, 2008)

N	16167,47 N
ρ	3470,2 Kg/m ³
L	10,56 m
ν	0,3
A	374,33 mm ²
E	74 GPa
$\epsilon_{inicial}$	0,583 mm

Onde N é a força de estiramento, ρ é a densidade linear, L é o comprimento do cabo, ν é o coeficiente de Poisson e A é a área do cabo condutor GROSBREAK 636. Extraíram-se as nove primeiras frequências e autofunções normalizadas analíticas do cabo fixo em ambas as extremidades, a partir das Eq.(1) e Eq.(2), no *software PYTHON*[®]. Na Tab. 2 e na Fig. 1, têm-se as nove primeiras frequências naturais analíticas e os modos de vibração, respectivamente.

$$\omega_r = \frac{r\pi}{L} \sqrt{\frac{N}{\rho}} \quad (r = 1, 2, \dots) \quad (1)$$

$$U_r(x) = \sqrt{\frac{2}{L}} \nu \, \text{sen} \left(\frac{r\pi}{L} x \right) \quad (r = 1, 2, \dots) \quad (2)$$

Tabela 2. Frequências naturais analíticas (Própria autoria, 2022)

ω_1	5,2762 Hz
ω_2	10,5524 Hz
ω_3	15,8286 Hz
ω_4	21,1048 Hz
ω_5	26,381 Hz
ω_6	31,6572 Hz
ω_7	36,9334 Hz
ω_8	42,2096 Hz
ω_9	47,4858 Hz

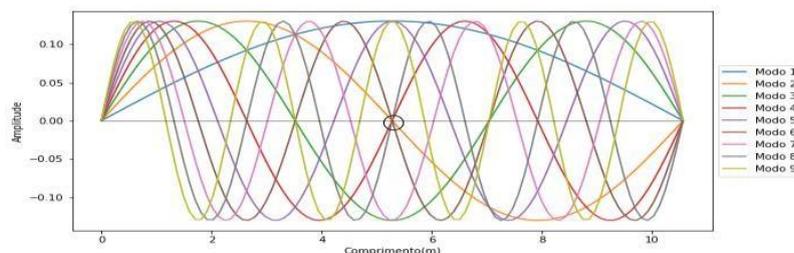


Figura 1. Modos de vibração do cabo (Própria autoria, 2022)

A partir da Fig. 1, observou-se na circunferência em preto um dos nós modais presentes ao longo do cabo. Nos nós modais não ocorre vibração, por esse motivo é indicado fazer a medição de vibração nas extremidades da estrutura, a fim de capturar todos os modos de vibrar. A função resposta em frequência, mostrada na Fig. 3, também foi obtida com o auxílio do *software PYTHON*[®], a partir dos passos do organograma da Fig. 2.

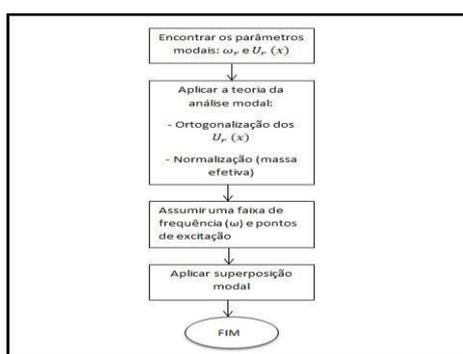


Figura 2. Passos para encontrar a Função Resposta em Frequência do cabo (Própria autoria, 2022)

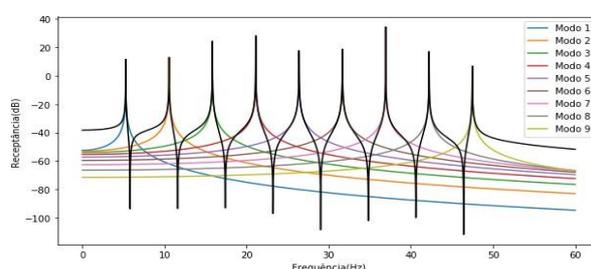


Figura 3. Função resposta em frequência do cabo (Própria autoria, 2022)

Observou-se a partir da Fig. 3, que as curvas coloridas correspondem aos nove primeiros modos naturais desacoplados, e a curva em preto corresponde a função resposta em frequência gerada a partir da superposição modal, onde também são observadas as ressonâncias e antirressonâncias do sistema. Observam-se maiores amplitudes no sétimo modo de vibrar. Para a realização das análises numéricas, utilizaram-se os elementos BEAM 3 e LINK 8, mostrados na Fig. 4.

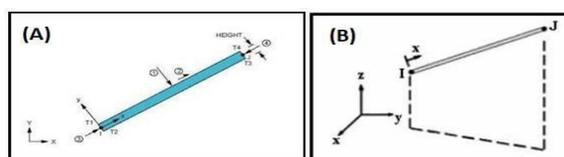


Figura 4. A) Elemento BEAM 3; B) Elemento LINK 8 (SANTOS, 2008)

O elemento BEAM 3 é um elemento linear uniaxial, bidimensional, capaz de atuar em tração, compressão e flexão. O elemento tem 3 graus de liberdade por nó, que são duas translações ao longo dos eixos x e y e uma rotação ao redor do eixo z. Este elemento utiliza da teoria de vigas e barras para sua formulação, com os autovalores dependendo das propriedades e geometria do material. De acordo com (SANTOS, 2008), o elemento LINK 8 é uniaxial em tração e compressão com três graus de liberdade em cada nó: translações nodais nas direções x, y e z., tendo boa aplicação para cabos, molas, dentre outros. Foram realizadas simulações com 16, 32, 64, 128, 256 e 512 elementos, cujos resultados são apresentados nas Tab. 3 e Tab. 4.

Tabela 3. Frequências Naturais numéricas utilizando elementos do tipo BEAM 3 (Própria autoria, 2022)

Modo de Vibrar	Frequência Natural (Hz) 16 elementos	Frequência Natural (Hz) 32 elementos	Frequência Natural (Hz) 64 elementos	Frequência Natural (Hz) 128 elementos	Frequência Natural (Hz) 256 elementos	Frequência Natural (Hz) 512 elementos
1	5,5361	5,5287	5,5281	5,5280	5,5280	5,5280
2	11,147	11,133	11,131	11,131	11,131	11,131
3	16,907	16,884	16,882	16,882	16,882	16,882
4	22,885	22,854	22,851	22,851	22,851	22,851
5	29,148	29,105	29,101	29,101	29,101	29,101
6	35,760	35,696	35,691	35,690	35,690	35,690
7	42,780	42,680	42,673	42,672	42,672	42,672
8	50,268	50,103	50,092	50,091	50,091	50,091
9	58,284	58,006	57,988	57,987	57,987	57,987

Tabela 4. Frequências Naturais numéricas utilizando elementos do tipo LINK 8 (Própria autoria, 2022)

Modo de Vibrar	Frequência Natural (Hz) 16 elementos	Frequência Natural (Hz) 32 elementos	Frequência Natural (Hz) 64 elementos	Frequência Natural (Hz) 128 elementos	Frequência Natural (Hz) 256 elementos	Frequência Natural (Hz) 512 elementos
1	5,2890	5,2816	5,2799	5,2795	5,2794	5,2793
2	10,636	10,577	10,563	10,560	10,559	10,559
3	16,100	15,899	15,853	15,842	15,839	15,838
4	21,739	21,262	21,152	21,126	21,119	21,118
5	27,613	26,680	26,465	26,413	26,401	26,398
6	33,777	32,166	31,794	31,705	31,683	31,678
7	40,276	37,734	37,143	37,002	36,967	36,958
8	47,133	43,399	42,515	42,304	42,252	42,239
9	54,325	49,173	47,914	47,612	47,538	47,520

A partir de TAB. 3 e TAB. 4, constatou-se a convergência em uma malha de 128 elementos, na simulação utilizando o elemento BEAM 3 e 512 elementos para a simulação utilizando o elemento LINK 8 . A partir dos autovalores, encontrados nas Tab. 3 e Tab. 4, tem-se as autofunções associadas nas Fig. 5 e Fig. 6, respectivamente.

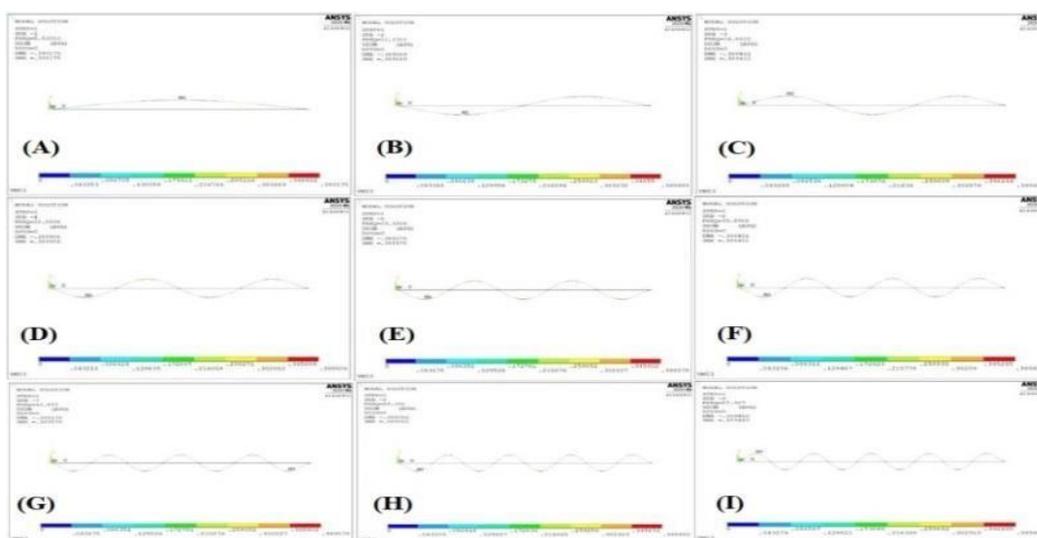


Figura 5. A) Primeiro modo de vibrar; B) Segundo modo de vibrar; C) Terceiro modo de vibrar; D) Quarto modo de vibrar; E) Quinto modo de vibrar; F) Sexto modo de vibrar; G) Sétimo modo de vibrar; H) Oitavo modo de vibrar; I) Nono modo de vibrar para o elemento BEAM 3 (Própria autoria, 2022)

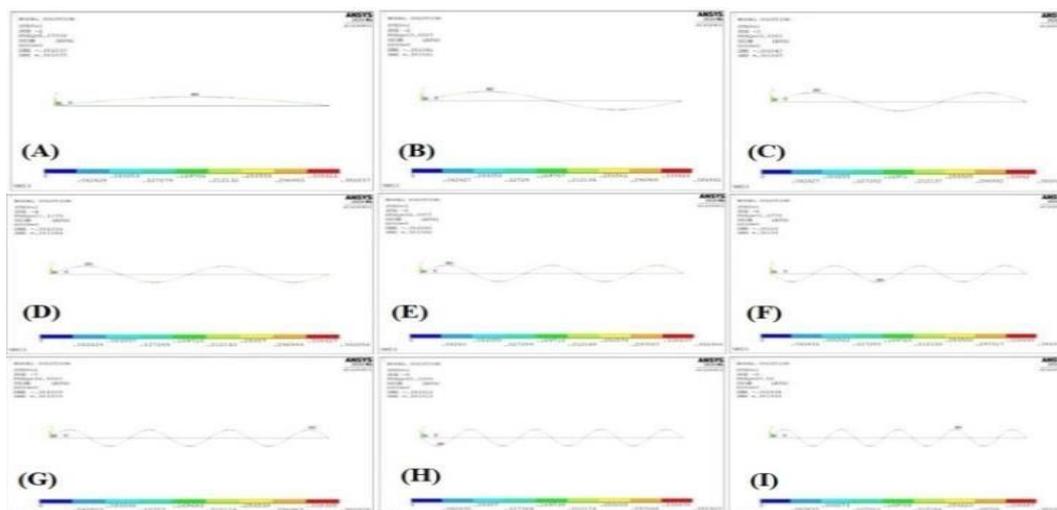


Figura 6. A) Primeiro modo de vibrar; B) Segundo modo de vibrar; C) Terceiro modo de vibrar; D) Quarto modo de vibrar; E) Quinto modo de vibrar; F) Sexto modo de vibrar; G) Sétimo modo de vibrar; H) Oitavo modo de vibrar; I) Nono modo de vibrar para o elemento LINK 8 (Própria autoria, 2022)

Os resultados dos dados numéricos apresentados em Tab. 3 e Tab. 4, para os elementos BEAM 3 e LINK8, respectivamente, foram comparados; com a solução analítica da Tab. 2; resultando nas Tab. 5 e Tab.6; nos quais seus erros são calculados a partir da Eq. 3.

$$Erro(\%) = \frac{|\omega_{aproximada} - \omega_{exata}|}{\omega_{exata}} \cdot 100 \quad (3)$$

Tabela 5. Comparação das frequências numérica e analítica para o elemento BEAM 3 (Própria autoria, 2022)

Modo de Vibração	Frequência Natural Numérica (Hz)	Frequência Natural Analítica (Hz)	Erro (%)
1	5,5280	5,2762	4,77
2	11,131	10,5524	5,48
3	16,882	15,8286	6,66
4	22,851	21,1048	8,27
5	29,101	26,381	10,31
6	35,690	31,6572	12,74
7	42,672	36,9334	15,54
8	50,091	42,2096	18,67
9	57,987	47,4858	22,11

Tabela 6. Comparação das frequências numérica e analítica para o elemento LINK8 (Própria autoria, 2022)

Modo de Vibração	Frequência Natural Numérica (Hz)	Frequência Natural Analítica (Hz)	Erro (%)
1	5,2793	5,2762	0,06
2	10,559	10,5524	0,06
3	15,838	15,8286	0,06
4	21,118	21,1048	0,06
5	26,398	26,381	0,06
6	31,678	31,6572	0,06
7	36,958	36,9334	0,07
8	42,239	42,2096	0,07
9	47,520	47,4858	0,07

Observaram-se para os dois casos, mostrados em Tab. 5 e Tab. 6 valores de erro consideráveis usando os dois elementos, porém os resultados para o elemento LINK8, mostrados em Tab. 6, apresentaram erros bem menores, sendo, portanto o elemento mais confiável para validar a simulação. Para as simulações utilizando os elementos BEAM 3 e LINK 8, foram realizadas as seguintes análises para avaliar o comportamento das frequências naturais.

- Análise 1: Diminuição do diâmetro D e comprimento do cabo L em 10 % ;
- Análise 2: Diminuição do diâmetro do cabo D em 10 %, mantendo o comprimento L fixo;
- Análise 3: Aumento do diâmetro do cabo D em 10 %, mantendo o comprimento L fixo;
- Análise 4: Aumento do diâmetro D e comprimento L do cabo em 10% ;
- Análise 5: Aumento do comprimento do cabo L em 10 % mantendo fixo o diâmetro D;
- Análise 6: Diminuição do comprimento do cabo L em 10 % mantendo fixo o diâmetro D.

Os resultados das análises acima são apresentadas nas Tab. 7 e Tab. 8 para os elementos BEAM 3 e LINK 8, respectivamente.

Tabela 7. Análises das frequências naturais para o elemento BEAM 3 (Própria autoria, 2022)

Modos de Vibração	Frequência Natural Numérica (Hz)	Análise 1	Análise 2	Análise 3	Análise 4	Análise 5	Análise 6
1	5,5280	6,1423	5,5010	5,5555	5,0255	5,0032	6,1762
2	11,131	12,368	11,063	11,202	10,119	10,062	12,456
3	16,882	18,758	16,744	17,028	15,347	15,233	18,938
4	22,851	25,390	22,602	23,116	20,773	20,567	25,718
5	29,101	32,334	28,690	29,541	26,455	26,115	32,879
6	35,690	39,656	35,057	36,370	32,446	31,921	40,498
7	42,672	47,413	41,749	43,663	38,793	38,027	48,641
8	50,091	55,657	48,805	51,468	45,537	44,471	57,363
9	57,987	64,430	56,262	59,830	52,716	51,285	66,713

Tabela 8. Análises das frequências naturais para o elemento LINK8 (Própria autoria, 2022)

Modos de Vibração	Frequência Natural Numérica (Hz)	Análise 1	Análise 2	Análise 3	Análise 4	Análise 5	Análise 6
1	5,2793	5,8659	5,2793	5,2793	4,7994	4,7994	5,8659
2	10,559	11,732	10,559	10,559	9,5988	9,5988	11,732
3	15,838	17,598	15,838	15,838	14,398	14,398	17,598
4	21,118	23,464	21,118	21,118	19,198	19,198	23,464
5	26,398	29,331	26,398	26,398	23,998	23,998	29,331
6	31,678	35,198	31,678	31,678	28,798	28,798	35,198
7	36,958	41,065	36,958	36,958	33,598	33,598	41,065
8	42,239	46,932	42,239	42,239	38,399	38,399	49,932
9	47,520	52,800	47,520	47,520	43,200	43,200	52,800

A partir da Tab. 7, observou-se que com a diminuição do diâmetro D e comprimento do cabo L em 10 % (análise 1), tem-se um aumento das frequências naturais em até 11%. A partir da análise 2, tem-se uma diminuição das frequências em até 3%. Já nas análises 3 e 4, tem-se um aumento de até 3% nas frequências naturais e diminuição de até 9 %, respectivamente. Por último nas análises 5 e 6, as frequências naturais são diminuídas em até 11% e aumentadas em até 15%, respectivamente. Frequências maiores são induzidas com a diminuição do comprimento do cabo L em 10%, mantendo fixo o diâmetro D, ou seja, quanto menor o comprimento L maior serão as frequências naturais, sendo grandezas inversamente proporcionais, mostrada na Eq. 1. O contrário é observado na análise 5, onde a partir do aumento do comprimento do cabo L em 10% mantendo fixo o diâmetro D, constatou-se as frequências naturais mais baixas dentro das análises existentes. Verificou-se também que com a diminuição dos dois parâmetros, D e L, visto na análise 1 são aumentadas as frequências, já o contrário ocorre uma diminuição das frequências naturais. São observados também que o aumento do diâmetro em 10%, mantendo-se fixo o comprimento são encontrados maiores valores para as frequências naturais, já o contrário diminuem-se as frequências naturais.

A partir da Tab. 8, observou-se que com a diminuição do diâmetro D e comprimento do cabo L em 10 % (análise 1), são induzidas maiores frequências naturais. Também se constatou que com a diminuição do diâmetro do cabo D em 10 % e mantendo-se fixo o comprimento L (análise 2) as frequências naturais não são alteradas. Com o aumento do diâmetro do cabo D em 10% e mantendo-se fixo o comprimento L (análise 3), verificou-se a inalteração das frequências naturais. Na análise 4, no qual aumentam-se o diâmetro D e comprimento L do cabo em 10% são notadas uma diminuição das frequências naturais do cabo. Nas análises 5 e 6, no qual na primeira um aumento do comprimento do cabo L em 10% ,mantendo-se fixo o diâmetro D; e na última ocorre uma diminuição do comprimento do cabo L em 10% mantendo-se também fixo o diâmetro D, são observados baixas frequências para a primeira e altas frequências naturais, respectivamente. Com a diminuição do comprimento do cabo L em 10%, mantendo fixo o diâmetro D (análise 6), observaram-se as maiores frequências naturais, já que quanto menor o comprimento L maior serão as frequências naturais pela Eq. 1. O contrário é visto na análise 5.

4. CONCLUSÕES

Conclui-se que em projetos envolvendo cabos estruturais, sejam para aplicações mecânicas, elétricas, entre outras, apresentam um caráter desafiador, nos quais fatores correlacionados a custos de projeto, bem como a escolha adequada de materiais para a fabricação dos cabos e estruturas acessórias, os níveis de tensões a que estão submetidos e as condições de cargas são fundamentais para o entendimento do processo de falha, que deve ser bem analisado a fim de evitar sobrecargas e posteriori ruptura do sistema. Em cabos condutores os principais tipos de vibrações são por vibrações eólicas, galope do condutor e oscilações induzidas por esteira, no qual o primeiro é o tipo mais comum. Foi mostrado também que amortecedores, são uma das soluções para controlar a vibração em cabos condutores, funcionando como sistema secundário, reduzindo as altas amplitudes do sistema primário (cabo). Nesse trabalho foi modelado o cabo esticado reto tensionado como uma corda através do Método dos Elementos Fintos com os elementos BEAM 3 e LINK 8, respectivamente. As simulações com os dois tipos de elementos apresentaram erros consideráveis, sendo o elemento LINK 8, o mais confiável para validar a simulação.

A partir das análises adicionais para os dois elementos, verifica-se que com o aumento do comprimento do cabo, tem-se uma diminuição das frequências naturais, sendo grandezas inversamente proporcionais, caso contrário tem-se o aumento das frequências. Observou-se também que com a diminuição dos dois parâmetros do cabo D e L, para os dois elementos tem-se o aumento das frequências naturais, caso contrário tem-se sua diminuição. Foi também verificado que com a diminuição do diâmetro do cabo D em 10 %, mantendo-se o fixo o comprimento para o elemento BEAM 3, observou-se a redução das frequências naturais, já com o aumento do diâmetro do cabo D em 10 %, mantendo-se L fixo observou-se um aumento das frequências naturais. O mesmo não é aplicado ao elemento LINK 8, no quais ao aumentar e diminuir o diâmetro do cabo em 10 %, mantendo-se fixo o comprimento do cabo, observou-se valores inalterados de frequências naturais.

5. REFERÊNCIAS

- ABOSHOSHA, Haitham; EL DAMATTY, Ashraf. Effective technique to analyze transmission line conductors under high intensity winds. **Wind and Structures**, v. 18, n. 3, p. 235-252, 2014.
- JAFARI, Mohammad; SARKAR, Partha P. Wind-induced response characteristics of a yawed and inclined cable in ABL wind: Experimental-and numerical-model based study. **Engineering Structures**, v. 214, p. 110681, 2020.
- JIAN, Qin et al. Research on contact simulation of strands in large cross-section ACSR. **Electrical Engineering and Computer Science (EECS)**, v. 3, p. 27-30, 2019.
- LEPIDI, Marco; GATTULLI, Vincenzo; VESTRONI, Fabrizio. Static and dynamic response of elastic suspended cables with damage. **International Journal of Solids and Structures**, v. 44, n. 25-26, p. 8194-8212, 2007.
- MATT, C. F.; CASTELLO, D. A. On the numerical identification of the bending stiffness and the damping of transmission line conductors. In: **Proceedings of the XII International Symposium on Dynamic Problems of Mechanics, Ilha Bela, SP, Brazil, February. 2007.**
- MCCLURE, G.; LAPOINTE, M. Modeling the structural dynamic response of overhead transmission lines. **Computers & Structures**, v. 81, n. 8-11, p. 825-834, 2003.
- NGUYEN, Cung H.; MACDONALD, John HG. Galloping analysis of a stay cable with an attached viscous damper considering complex modes. **Journal of Engineering Mechanics**, v. 144, n. 2, p. 04017175, 2018.
- POFFENBERGER, J. C.; SWART, R. L. Differential displacement and dynamic conductor strain. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. 84, n. 4, p. 281-289, 1965.
- REINKE, Gustavo et al. Failure analysis of aluminum wires in all aluminum alloy conductors-AAAC. **Engineering Failure Analysis**, v. 107, p. 104197, 2020.
- ROLIM, Adriana Lima et al. Differential displacement and strain analysis of transmission line cables. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 35, n. 3, p. 327-336, 2013.
- ROSSI, Alvise et al. Combined effects of wind and atmospheric icing on transmission lines. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 204, p. 104271, 2020.
- SANTOS, ASD. Estudo de vibrações eólicas em linhas de transmissão de energia elétrica de alta tensão. **Universidade Federal do Pará, n. Outubro**, p. 195, 2008.
- TANG, Yiwei et al. Vibration control of nonlinear vibration of suspended cables based on quadratic delayed resonator. In: **Journal of Physics: Conference Series**. IOP Publishing, 2020. p. 012005.
- TAO, Yi et al. Effects of Wind Load on the Dynamical Characteristics of Transmission Line. In: **2020 Asia Energy and Electrical Engineering Symposium (AEEES)**. IEEE, 2020. p. 21-27.
- TIAN, Li; LIU, Kaiming. Uncertainty Analysis of the Dynamic Responses of a Transmission Tower-Line System Subjected to Cable Rupture. **Journal of Aerospace Engineering**, v. 34, n. 1, p. 04020088, 2021.
- VAJA, N. K.; BARRY, O. R.; TANBOUR, E. Y. On the modeling and analysis of a vibration absorber for overhead powerlines with multiple resonant frequencies. **Engineering Structures**, v. 175, p. 711-720, 2018.
- WANG, Dahai; LI, Jie; XIE, Qiang. Analytical model for dynamic tension in overhead power transmission lines subject to strong wind. **Advances in Structural Engineering**, v. 14, n. 3, p. 445-456, 2011.
- WOLF, Hinko et al. Numerical aspects of determination of natural frequencies of a power transmission line cable equipped with in-line fittings. **Engineering structures**, v. 160, p. 510-518, 2018.