

VIBRAÇÃO EÓLICA E FADIGA EM CONDUTORES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO: UMA ANÁLISE DOS MECANISMOS DE EXCITAÇÃO E DOS CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO DE ESPAÇADORES E AMORTECEDORES

Irina Calderon Gulmaneli

(SADEL Indústria Metalúrgica Ltda., São José dos Campos, SP, Brasil) E-mail: irina.calderon@hotmail.com.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3328-4420>. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/9350100671511777>.

Resumo: As falhas de condutores em linhas de transmissão ligadas a esforços dinâmicos raramente vêm de uma sobrecarga isolada. Elas resultam do acúmulo de ciclos de flexão de baixa amplitude ao longo de anos de operação. Este artigo revisa os mecanismos de excitação eólica que atuam sobre condutores e feixes múltiplos e os relaciona aos critérios normativos de dimensionamento de espaçadores e amortecedores. São discutidas a vibração eólica, ligada ao desprendimento de vórtices de von Kármán e ao fenômeno de lock-in, e a oscilação de subvãos, uma instabilidade aeroelástica própria dos feixes. O trabalho parte de um princípio já consolidado na área, uma abordagem baseada no balanço de energia: o dano por fadiga vem do equilíbrio entre a energia que o vento injeta no sistema e a energia dissipada pelo condutor e pelos dispositivos se estabelecer em amplitudes altas o bastante para produzir solicitações cíclicas prejudiciais, não de um desequilíbrio permanente. A contribuição está em usar esse princípio como fio condutor para sistematizar o papel das normas IEC 61854, CIGRÉ Technical Brochure 273 (2005), CIGRÉ Technical Brochure 277 (2005) e IEEE Std 1368 no projeto e na verificação em campo, aproximando a física dos fenômenos das decisões práticas de engenharia. Conclui-se que o posicionamento de espaçadores e amortecedores é uma decisão de projeto que define a vida útil da linha, não um detalhe construtivo.

Palavras-chave: linhas de transmissão; vibração eólica; fadiga; espaçadores; feixe múltiplo.

WIND-INDUCED VIBRATION AND FATIGUE IN TRANSMISSION LINE CONDUCTORS: AN ANALYSIS OF EXCITATION MECHANISMS AND DESIGN CRITERIA FOR SPACERS AND DAMPERS

Abstract: Conductor failures in transmission lines associated with dynamic loads rarely result from a single overload. They come from the accumulation of low-amplitude bending cycles over years of operation. This paper reviews the wind-induced excitation mechanisms acting on conductors and bundled conductors and relates them to the normative criteria for the design of spacers and dampers. Aeolian vibration, linked to von Kármán vortex shedding and the lock-in phenomenon, and subspan oscillation, an aeroelastic instability specific to bundles, are discussed. The paper builds on a principle already established in the field, the energy balance method: fatigue damage comes from the balance between the energy injected by the wind into the system and the energy dissipated by the conductor and by the devices being established at amplitudes high enough to produce damaging cyclic stresses, rather than from a permanent imbalance. The contribution lies in using this principle as a guiding thread to systematize the roles of standards IEC 61854, CIGRÉ Technical Brochure 273 (2005), CIGRÉ Technical Brochure 277 (2005) and IEEE Std 1368 in design and field verification, bringing the physics of the phenomena closer to practical engineering decisions. It is concluded that the positioning of spacers and dampers is a design decision that defines the service life of the line, not merely a constructive detail.

Keywords: transmission lines; aeolian vibration; fatigue; spacers; conductor bundle.

1. Introdução

O dimensionamento de linhas de transmissão costuma ser associado à verificação de resistência mecânica dos condutores e das estruturas frente às cargas de projeto. Essa verificação é necessária, mas deixa de fora um dos principais mecanismos de deterioração desses sistemas: a fadiga induzida por vibrações de origem eólica. Na maior parte dos casos observados em campo, as falhas de condutores não resultam de um evento isolado de sobrecarga. Elas vêm da degradação lenta provocada por milhões de ciclos de flexão de baixa amplitude, concentrados nas regiões onde o movimento do cabo é restringido, como grampos de suspensão e espaçadores.

O problema fica mais complexo nos feixes múltiplos, arranjo em que dois ou mais subcondutores operam em paralelo por fase. Além da vibração eólica comum a qualquer condutor esticado, os feixes ficam sujeitos à oscilação de subvãos, uma instabilidade aeroelástica que surge da interação aerodinâmica entre os subcondutores. Nos dois casos, o que

governa o dano é a quantidade de energia que o escoamento transfere à estrutura e a eficiência com que essa energia é dissipada, não a magnitude do carregamento.

A importância do tema cresce com a expansão do sistema elétrico e com a exigência de maior confiabilidade das linhas existentes. Uma falha de condutor por fadiga traz custo de reparo, interrupção de fornecimento e risco à segurança, e sua prevenção depende de decisões tomadas ainda na fase de projeto, quando se define o arranjo dos dispositivos de controle de vibração. Entender os mecanismos físicos por trás dessas falhas é o que permite separar um projeto ajustado apenas ao custo inicial de um projeto pensado para durar décadas.

O objetivo deste artigo é revisar os mecanismos de excitação eólica que atuam sobre condutores e feixes múltiplos e relacioná-los aos critérios normativos de dimensionamento de espaçadores e amortecedores. A abordagem se justifica pela distância entre a prática corrente de projeto, muitas vezes apoiada em recomendações consolidadas de fabricante, e a compreensão dos fenômenos físicos que sustentam essas recomendações. O critério que serve de fio condutor, o balanço entre energia eólica injetada e energia dissipada, não é uma proposta original deste trabalho: trata-se de uma abordagem já consolidada na literatura de vibração de condutores (EPRI, 2009). A contribuição do artigo está em outro plano: reunir os diferentes mecanismos e dispositivos em torno desse critério e usá-lo para sistematizar o papel das principais normas aplicáveis, aproximando a física dos fenômenos das decisões de projeto. O texto apresenta primeiro a metodologia adotada na seleção e na análise das fontes, segue com uma fundamentação teórica dos mecanismos de vibração e do processo de fadiga, reúne esses elementos numa seção dedicada ao critério de balanço energético e ao quadro normativo, e encerra com as conclusões.

2. Metodologia

Este trabalho caracteriza-se como uma revisão técnico-normativa, com o objetivo de sistematizar os mecanismos de excitação eólica em condutores de linhas de transmissão e relacioná-los aos critérios de dimensionamento de espaçadores e amortecedores presentes na normalização técnica da área.

A seleção das fontes partiu dos documentos normativos e técnicos de referência consolidados no dimensionamento de linhas de transmissão frente à vibração eólica: as normas IEC 61854:2020 e IEEE Std 1368-2006, as brochuras técnicas CIGRÉ TB 273 e TB 277, e o EPRI Transmission Line Reference Book. Esses documentos foram escolhidos por constituírem a base normativa e de referência efetivamente empregada na prática de projeto desses sistemas. A eles somaram-se trabalhos seminais que fundamentam os fenômenos físicos discutidos, como a relação de Poffenberger-Swart para a estimativa de deformação dinâmica, a formulação do desprendimento de vórtices e o autoamortecimento de condutores.

O critério de inclusão priorizou documentos normativos vigentes, recomendações técnicas de entidades reconhecidas e trabalhos de referência da área. A análise foi conduzida de forma comparativa, buscando identificar as relações entre os mecanismos de excitação descritos na literatura e os critérios de dimensionamento e verificação estabelecidos pelos documentos técnicos, com ênfase na abordagem do balanço de energia como fio condutor da sistematização.

3. Fundamentação teórica

Os movimentos que o vento induz em condutores de linhas de transmissão se espalham por uma ampla faixa de frequências e amplitudes, e classificá-los ajuda a separar os fenômenos e os dispositivos de controle de cada um. Em uma ponta está a vibração eólica, de alta frequência e baixa amplitude, ligada ao desprendimento de vórtices e crítica para a fadiga. Em posição intermediária, restrita aos feixes múltiplos, está a oscilação de subvãos, de origem aeroelástica. Na outra ponta está o galope, de baixa frequência e amplitude elevada, associado à assimetria

aerodinâmica que o gelo ou o depósito de neve impõem ao condutor; por ter mecanismo e mitigação próprios, o galope não é tratado aqui. Esta seção trata dos dois primeiros mecanismos, os mais ligados ao dimensionamento de espaçadores e amortecedores, e do processo de fadiga que resulta deles.

3.1 Vibração eólica e o desprendimento de vórtices

Quando o vento incide sobre um corpo rombudo, como um condutor cilíndrico, ocorre o desprendimento alternado de vórtices em suas faces, formando a esteira conhecida como rua de vórtices de von Kármán. Esse desprendimento gera forças transversais periódicas sobre o condutor, e a frequência dessas forças pode ser estimada em função da velocidade do vento e do diâmetro do cabo por meio do número de Strouhal, um parâmetro adimensional que liga essas três grandezas. Para condutores de linhas de transmissão na faixa de ventos de interesse, esse mecanismo produz vibração de alta frequência e baixa amplitude, com deslocamentos da ordem de uma fração do diâmetro do cabo.

O número de Strouhal relaciona essas grandezas pela expressão $f = St \cdot V/D$, em que f é a frequência de desprendimento de vórtices, V a velocidade do vento, D o diâmetro do condutor e St o próprio número de Strouhal. Para cilindros lisos, St permanece próximo de 0,18 na faixa de número de Reynolds entre 350 e 35000, típica de condutores com diâmetro entre 5 mm e 50 mm sob ventos de 1 m/s a 10 m/s, que cobre a maior parte das condições de vento relevantes para vibração eólica em linhas de transmissão (EPRI, 2009). Condutores encordoados, porém, não correspondem exatamente a cilindros lisos: a rugosidade superficial imposta pelo encordoamento pode produzir desvios em relação a esse valor.

A baixa amplitude não significa baixa severidade. Como a frequência de excitação cresce com a velocidade do vento, um condutor esticado percorre ao longo da operação uma ampla faixa de frequências, e diferentes trechos do cabo passam a responder em diferentes modos de vibração. O ponto crítico aparece quando a frequência de excitação se aproxima de uma das frequências naturais do condutor, não quando a força de excitação é alta.

Nessa condição surge o lock-in: a frequência de desprendimento dos vórtices se sincroniza com a frequência natural da estrutura e passa a ser governada por ela dentro de uma faixa de velocidades de vento, em vez de variar livremente com o escoamento. Durante o lock-in, a transferência de energia do fluido para o sistema aumenta de forma acentuada e atinge seu valor máximo dentro da faixa de sincronização, cujo nível depende do amortecimento estrutural e das características aerodinâmicas do condutor. Pequenas quantidades de energia são transferidas de forma contínua e elevam a amplitude de vibração ciclo após ciclo, até que a energia dissipada pelo próprio cabo e pelos dispositivos de amortecimento iguale a energia introduzida. É esse equilíbrio, e não a amplitude instantânea, que fixa a amplitude de regime e o nível de solicitação cíclica imposto aos fios.

3.2 Oscilação de subvãos em feixes múltiplos

A oscilação de subvãos difere da vibração eólica convencional. A excitação da vibração eólica está no desprendimento de vórtices em um condutor isolado; a da oscilação de subvãos está numa instabilidade aeroelástica entre os subcondutores de um feixe. Segundo o EPRI Transmission Line Reference Book, quando o vento incide sobre o conjunto, o condutor a sotavento gera uma esteira aerodinâmica que altera o campo de pressões sobre o condutor a sotavento. Essa excitação induzida pela esteira é o ponto de partida do fenômeno, mas não o explica sozinha: a instabilidade depende ainda do acoplamento aerodinâmico entre subcondutores, da fase relativa do movimento, da geometria do feixe e do amortecimento aerodinâmico, que pode se tornar negativo. Da combinação desses fatores resultam oscilações autoexcitadas, cuja severidade aparece menos no deslocamento visível e mais nas solicitações

cíclicas impostas ao sistema.

O acoplamento entre subcondutores é autoexcitado, o que o separa da vibração eólica forçada. Na vibração eólica, a excitação vem de fora, do desprendimento de vórtices; na oscilação de subvãos, o próprio movimento relativo dos condutores realimenta a instabilidade, pela esteira que o condutor a barlavento projeta sobre o de sotavento. Por isso a oscilação de subvãos costuma ocorrer em frequências mais baixas e amplitudes maiores que a vibração eólica, e seu controle depende da geometria que os espaçadores impõem ao feixe.

Cada espaçador instalado divide o feixe em subvãos, e cada subvão tem frequências naturais próprias, definidas pelo seu comprimento, pela tração e pela massa linear do condutor. Quando os subvãos têm comprimentos iguais, respondem na mesma faixa de frequência, e em certas condições de vento os modos coincidem e se reforçam, em vez de a energia se distribuir entre modos distintos. Vale notar que o espaçador não injeta nem amplifica energia por si: ele fixa as condições de contorno do feixe, e é a resposta dinâmica resultante dessa geometria que pode concentrar, em vez de espalhar, a energia introduzida pelo vento. Um arranjo mal escolhido de subvãos, portanto, deixa de atenuar e passa a favorecer a amplificação. É daí que vem a prática do escalonamento dos subvãos, tratada na seção 4.

3.3 Fadiga como critério determinante

Nos dois mecanismos, a falha deixa de ser governada por critérios de tensão máxima e passa a depender do dano acumulado ao longo do tempo. Uma tensão relativamente baixa, repetida milhões de vezes, caracteriza o regime de fadiga de alto ciclo e pode ser mais crítica que uma tensão alta aplicada poucas vezes. Os condutores sofrem ciclos sucessivos de flexão que levam à fadiga dos fios, sobretudo perto de grampos de suspensão e espaçadores, onde a restrição ao movimento cria pontos de concentração de deformação e descontinuidade de rigidez.

Medir essa solicitação em campo esbarra numa dificuldade prática: a tensão de flexão nos fios próximos ao grampo não pode ser medida diretamente. Usa-se então um parâmetro indireto, a amplitude de flexão, que é o deslocamento vertical do condutor medido a uma distância padronizada do último ponto de contato do grampo. Esse deslocamento se relaciona à tensão dinâmica na camada externa de fios pela relação de Poffenberger-Swart, que envolve a rigidez à flexão e a tração do condutor e permite estimar o dano a partir de uma grandeza que se consegue medir em campo. É esse o fundamento dos procedimentos de medição tratados adiante, entre eles os do IEEE Std 1368.

Em termos matemáticos, a relação de Poffenberger-Swart escreve a tensão dinâmica de flexão σ_a na camada externa de fios conforme a Eq. (1).

$$\sigma_a = \frac{E d p^2 Y_b}{4(e^{-pA} - 1 + pA)} \quad (1)$$

em que E é o módulo de elasticidade do material do fio externo, d é o diâmetro do fio, Y_b é a amplitude de flexão medida à distância padronizada A do último ponto de contato do grampo (usualmente 89 mm), e $p = \sqrt{(T/EI)}$, com T a tração do condutor e EI a rigidez à flexão (POFFENBERGER; SWART, 1965). Todas as grandezas seguem o Sistema Internacional: σ_a e E em pascals (Pa), d e Y_b em metros (m), e p em metros⁻¹ (m⁻¹); A é fixo em 0,089 m. Y_b corresponde ao deslocamento pico a pico nessa posição, e não à amplitude simples: chamando de y a amplitude simples medida a partir da posição de repouso, tem-se $Y_b = 2y$ (POFFENBERGER; SWART, 1965; EPRI, 2009). A rigidez EI é tomada como a soma das rigidezes individuais dos fios, sem atrito entre eles, hipótese que se aproxima melhor do comportamento real em amplitudes maiores, quando já há escorregamento entre camadas, e perde precisão para pequenas amplitudes e para condutores multicamada (EPRI, 2009). A equação vem de tratar o condutor como uma viga sob tração e carregamento transversal

senoidal, e sua utilidade prática está em converter um deslocamento que se mede em campo, a amplitude de flexão, numa tensão que não se consegue medir diretamente.

Nas interfaces de contato entre fios e ferragens, o fretting agrava o processo. O micro-deslizamento entre superfícies em contato, imposto pela flexão cíclica, rompe a camada passivadora do alumínio, expõe o metal à oxidação contínua e forma partículas abrasivas que aceleram a nucleação de trincas. A combinação de fretting e fadiga reduz a vida do componente bem abaixo do que se estimaria olhando só para a flexão. A degradação é silenciosa e progressiva, e por isso as falhas quase nunca são anunciadas por sinais claros de sobrecarga: quando a trinca chega a um tamanho crítico, boa parte da vida útil do fio já foi consumida. A análise dinâmica, então, não serve só para verificar se a linha vibra, mas para estimar vida útil e confiabilidade.

3.4 Dispositivos de controle: espaçadores e amortecedores

O controle da vibração eólica e da oscilação de subvãos se apoia em dois dispositivos que se complementam. O amortecedor, cujo tipo mais difundido é o Stockbridge, dissipa a energia da vibração eólica antes que ela se acumule nas seções críticas. Na sua forma clássica, ele é feito de massas presas nas pontas de um cabo mensageiro flexível; quando o condutor vibra, o cabo mensageiro flexiona e dissipa energia por atrito interno entre os fios. Sua eficiência depende de onde ele é instalado em relação ao grampo, porque precisa ficar num ponto em que a amplitude de vibração seja suficiente para mobilizá-lo ao longo da faixa de frequências de interesse, e não num ponto de mínimo da onda estacionária, onde ele quase não trabalha. Um critério genérico de posicionamento situa o amortecedor a uma distância P do grampo equivalente a 70% a 80% do comprimento da onda estacionária correspondente à velocidade máxima de vento considerada no projeto, o que pode ser estimado por $P = 0,31 \cdot d \cdot \sqrt{(H/w)}$, para vento de projeto de 7 m/s, ou $P = 0,22 \cdot d \cdot \sqrt{(H/w)}$, para vento de 10 m/s, em que d é o diâmetro do condutor, em metros, H a tração, em newtons, e w a massa do condutor por unidade de comprimento, em quilogramas por metro (kg/m); trata-se de grandeza distinta do peso por unidade de comprimento usado adiante na razão H/w da tração de projeto. Os coeficientes 0,31 e 0,22 valem especificamente para essas duas velocidades de vento de projeto; para outras velocidades, o coeficiente muda e deve ser obtido na fonte original ou com o fabricante do amortecedor. Quando é preciso um segundo amortecedor na mesma extremidade, ele costuma ficar a uma distância do primeiro entre 80% e 100% dessa mesma distância P .

O amortecedor Stockbridge funciona como um sistema massa-mola: cada uma das duas massas na ponta do cabo mensageiro forma, junto com a flexibilidade desse cabo, um oscilador com frequência de ressonância própria. É comum usar massas de tamanhos diferentes nas duas pontas para que o amortecedor tenha duas frequências de ressonância distintas, cobrindo uma faixa mais larga do espectro de vibração eólica em vez de responder bem só a uma frequência isolada. Essa sintonia, mais do que a massa total do dispositivo, é o que determina sua eficiência ao longo da faixa de frequências em que o condutor efetivamente vibra.

O espaçador cumpre no feixe múltiplo duas funções. Ele mantém a separação geométrica entre subcondutores, exigida por razões elétricas, e controla a resposta dinâmica do conjunto ao dividir o vão em subvãos. Os espaçadores-amortecedores acrescentam elementos elásticos ou de atrito nas articulações, o que soma à função geométrica alguma capacidade de dissipação. É sobre esses componentes que recaem os requisitos de qualificação mecânica e de resistência à fadiga da IEC 61854, já que eles próprios sofrem o carregamento cíclico que ajudam a controlar.

A Tabela 1 resume as diferenças entre os mecanismos de movimento induzido pelo vento discutidos até aqui, incluindo o galope como referência de contraste, e associa a cada um o dispositivo de mitigação correspondente.

Característica	Vibração eólica	Oscilação de subvãos	Galope
Frequência	Alta (3 a 150 Hz)	Intermediária (0,15 a 10 Hz)	Muito baixa (0,08 a 3 Hz)
Amplitude	Baixa (0,01 a 1 diâmetro, pico a pico)	Moderada a elevada (0,5 a 20 diâmetros, modo subvão)	Elevada (5 a 300 diâmetros)
Velocidade do vento	1 a 7 m/s	4 a 18 m/s	7 a 18 m/s
Natureza da excitação	Forçada (desprendimento de vórtices)	Autoexcitada (acoplamento aeroelástico)	Autoexcitada (assimetria por gelo/vento)
Restrição	Qualquer condutor esticado	Apenas feixes múltiplos	Sobretudo com depósito de gelo
Dispositivo de mitigação	Amortecedor (Stockbridge)	Espaçadores / espaçadores-amortecedores	Dispositivos antigalope (fora do escopo)

Tabela 1 – Mecanismos de movimento induzido pelo vento e dispositivos de mitigação

Fonte: elaborada pela autora (2026), com faixas de frequência, amplitude e velocidade do vento adaptadas de EPRI (2009).

Estudos recentes reforçam a atualidade da abordagem do balanço de energia e, ao mesmo tempo, apontam suas limitações. Yang et al. (2024) reafirmam o Princípio do Balanço de Energia como o procedimento mais aceito para estimar a severidade da vibração eólica, estabelecendo o equilíbrio entre a energia transmitida pelo vento e a dissipada pelo autoamortecimento do condutor e pelos amortecedores. Liu et al. (2022) mostram por simulação numérica que o método tende a superestimar as amplitudes de vibração, por não incorporar a não linearidade geométrica nem a influência do comprimento do vão, o que delimita as condições em que suas estimativas são conservadoras.

4. O balanço energético como critério de projeto

Os mecanismos da seção anterior têm origem física diferente, mas seguem o mesmo princípio. A vibração eólica é forçada e a oscilação de subvãos é autoexcitada, e as duas podem ser lidas como transferência de energia do escoamento para a estrutura. Nas duas, a amplitude de regime vem do equilíbrio entre a energia que o vento injeta e a energia que o sistema dissipa, seja pelo amortecimento interno do próprio condutor, seja pela ação dos dispositivos de controle. O dano por fadiga não decorre de um desequilíbrio permanente, já que em regime a amplitude se estabiliza; ele decorre do equilíbrio se estabelecer em amplitudes altas o bastante para que a solicitação cíclica, repetida por muito tempo, consuma a vida útil dos fios. Quando a capacidade de dissipação dos amortecedores e espaçadores é baixa frente à energia injetada, esse equilíbrio se dá em amplitudes elevadas, e a fadiga passa a ser questão de tempo.

Por isso, projetar uma linha confiável exige entender bem o balanço energético. A verificação de resistência estática continua necessária, mas ela não responde ao problema da durabilidade: sob a perspectiva da fadiga, a pergunta que passa a orientar o projeto é quanta energia entra no sistema e como ela é dissipada, não qual a tensão máxima atuante. A mudança de ênfase tem efeito prático: dois projetos que atendem igualmente aos critérios de resistência estática podem ter vida útil muito diferente, dependendo de como tratam o problema dinâmico.

A prática do escalonamento dos espaçadores vem direto desse raciocínio. As recomendações do CIGRÉ Technical Brochure 277 (2005) apontam, como orientação de projeto, para subvãos menores junto às extremidades, onde os grampos já restringem o movimento, e maiores na região central. Como referência numérica, a razão entre subvãos adjacentes fica em torno de 0,85 a 0,9, e a razão entre o subvão de extremidade e o subvão vizinho, entre 0,55 e 0,65. O comprimento máximo de subvão depende do vento e do terreno do local: em sítios de vento médio a forte, acima de 20 a 25 m/s, com razão entre separação do feixe e diâmetro do condutor

da ordem de 15 a 17, esse limite fica perto de 65 m, podendo chegar a cerca de 80 m em condições menos severas. A recomendação prática de evitar razões inteiras simples entre os comprimentos dos subvãos, para que dois subvãos não voltem a compartilhar modos apesar de tamanhos diferentes, tem caráter empírico e consolidado, não o de um princípio físico universal. A ideia é impedir que os subvãos respondam em fase e favoreçam a amplificação, espalhando a resposta dinâmica entre modos distintos.

A decisão não é livre. Cada espaçador a mais dá mais controle sobre a geometria do feixe, mas insere uma descontinuidade de rigidez adicional, ou seja, um novo ponto de concentração de esforços e de fretting nas interfaces de contato. O arranjo ideal depende do equilíbrio entre resposta dinâmica, durabilidade das ferragens, desempenho elétrico e custo de instalação, não existe uma solução única.

Além do arranjo dos dispositivos, o balanço energético depende de uma variável operacional definida ainda na montagem: a tração do condutor, usualmente expressa como percentual da carga de ruptura. O amortecimento próprio do cabo, que dissipa parte da energia eólica por atrito interno entre os fios, tende a diminuir à medida que a tração aumenta (RAWLINS, 2009). Uma linha esticada com tração alta reduz a flecha e economiza altura de estrutura, mas dissipa menos energia por conta própria e transfere aos amortecedores e espaçadores uma parcela maior da carga dinâmica. Por isso, os limites de tração recomendados para condições de vibração são um dos parâmetros centrais do problema, e as normas e guias de projeto estabelecem faixas para essa relação. Esse é justamente o objeto do CIGRÉ Technical Brochure 273 (2005), dedicado à definição de uma tração de projeto segura frente à vibração eólica (safe design tension with respect to aeolian vibrations), documento que liga o nível de tração adotado na montagem ao autoamortecimento do condutor discutido acima. Para condutores simples não protegidos, o TB 273 recomenda a tração admissível pela razão H/w entre a tração horizontal inicial e o peso do condutor por unidade de comprimento (aqui, w designa peso, não massa; é grandeza distinta da massa por unidade de comprimento usada na fórmula de posicionamento do amortecedor, na seção 3.4), calculada na temperatura média do mês mais frio: de $H/w \leq 1000$ m, em terreno aberto e sem obstruções, a $H/w \leq 1425$ m, em terreno urbanizado com árvores, conforme a categoria de rugosidade do terreno. Para feixes com espaçadores não amortecedores, mais próximos do escopo deste artigo, o documento aponta $H/w = 2100$ m como seguro em terreno de categoria intermediária, com limite absoluto de $H/w = 2500$ m adotado para qualquer categoria de terreno.

Formalmente, o critério de balanço energético compara duas potências: a potência que o vento injeta no condutor, P_v , função da velocidade do vento e da frequência de vibração, e a potência dissipada pelo sistema, P_d , função da amplitude de vibração e do amortecimento total, próprio do cabo somado ao dos dispositivos instalados. A amplitude de regime é aquela em que $P_v(f, V) = P_d(f, Y)$, o ponto de equilíbrio entre as duas curvas de potência. Como P_v cresce com a velocidade do vento e P_d cresce com a amplitude de vibração (relação válida no regime de sincronização, o lock-in, quando a frequência de vibração acompanha a frequência de desprendimento de vórtices, e para razões entre amplitude e diâmetro do condutor de 0,01 a 0,6, conforme dados do EPRI, 2009), um aumento na energia injetada desloca esse equilíbrio para uma amplitude maior, e é essa amplitude de regime, não a potência isolada, que determina a solicitação cíclica responsável pela fadiga.

Em termos dimensionais, a potência injetada pelo vento e a dissipada pelo condutor por autoamortecimento são grandezas por unidade de comprimento, expressas em watts por metro; já a potência dissipada pelos amortecedores instalados é uma grandeza concentrada, expressa em watts, referida ao dispositivo, e não ao metro de condutor. A potência injetada pelo vento, P_v , vem do trabalho que a força de sustentação flutuante, gerada pelo desprendimento de

vórtices, realiza sobre o deslocamento do condutor a cada ciclo; ensaios em túnel de vento mostram que P_v pode ser escrita em função da densidade do ar, do diâmetro do condutor, da frequência de vibração e de uma função empírica que cresce com a razão entre a amplitude no antinó e o diâmetro do cabo, dentro de uma faixa limitada dessa razão (EPRI, 2009). A potência dissipada, P_d , soma duas parcelas de natureza distinta: o autoamortecimento do condutor, por unidade de comprimento, ligado ao atrito interno entre os fios e obtido em ensaios de bancada pela razão entre a energia dissipada por ciclo e a energia cinética máxima do vão, e a potência absorvida pelos amortecedores instalados, uma grandeza concentrada em watts, medida diretamente numa mesa vibratória pela força e pelo deslocamento no ponto de fixação do dispositivo. É do confronto entre essas parcelas de dissipação e a potência injetada que se obtém a amplitude de equilíbrio, base para estimar a sollicitação cíclica e, pela relação de Poffenberger-Swart, o risco de fadiga.

Esse equilíbrio se apoia num conjunto de documentos de naturezas distintas, entre normas técnicas, recomendações, brochuras técnicas e obras de referência, que atuam em etapas diferentes do projeto e da operação. A Tabela 2 resume o papel de cada um sob a ótica do balanço energético, identifica sua natureza documental e mostra o que cada documento estabelece.

Documento	Natureza	Objeto	O que estabelece
IEC 61854	Norma técnica	Espaçadores e espaçadores-amortecedores	Requisitos e ensaios mecânicos de qualificação, incluindo resistência à fadiga e desempenho sob carregamento cíclico.
CIGRÉ Technical Brochure 273 (2005)	Recomendação / brochura técnica	Tração de projeto segura frente à vibração eólica	Recomendações para a definição da tração de projeto de condutores com respeito à vibração eólica (safe design tension with respect to aeolian vibrations). Define a tração admissível pela razão H/w (tração horizontal inicial sobre peso do condutor por unidade de comprimento): de 1000 m a 1425 m para condutores simples não protegidos, conforme a categoria de terreno, e até 2500 m para feixes com espaçadores não amortecedores.
CIGRÉ Technical Brochure 277 (2005)	Recomendação / brochura técnica	Arranjo de espaçadores e spacer dampers	Recomendações para o escalonamento dos subvãos, com subvãos menores nas extremidades e maiores na região central, evitando razões inteiras simples entre comprimentos.
IEEE Std 1368	Guia técnico	Medição em campo	Procedimentos de medição da amplitude de flexão, parâmetro usado para avaliar se os níveis de vibração ficam dentro de limites aceitáveis.
EPRI Transmission Line Reference Book	Obra de referência técnica	Comportamento aeroelástico do feixe	Base conceitual da oscilação de subvãos e do balanço entre energia eólica injetada e energia dissipada.

Tabela 2 – Documentos normativos e técnicos aplicáveis ao dimensionamento e à verificação de espaçadores e amortecedores, por natureza documental

Fonte: elaborada pela autora (2026).

Lidos em conjunto, os documentos da Tabela 2 desenham o ciclo de vida do projeto. O EPRI dá a base conceitual do fenômeno; o CIGRÉ Technical Brochure 273 (2005) orienta a definição da tração de projeto frente à vibração eólica; o CIGRÉ Technical Brochure 277 (2005) orienta

a decisão de arranjo; a IEC 61854 qualifica o componente frente ao carregamento cíclico; e o IEEE Std 1368 verifica em campo se a solução adotada mantém a vibração dentro de limites aceitáveis. Nenhum deles, sozinho, garante a durabilidade da linha; é o encaixe entre eles que transforma o critério de balanço energético em prática de engenharia.

A verificação em campo com o IEEE Std 1368 complementa o que foi definido em projeto. Vale registrar que esse guia foi formalmente inativado pelo IEEE em 25 de março de 2021, por não ter passado por revisão em dez anos, sem norma substituta publicada até o momento (IEEE, 2006). Ainda assim, continua sendo referenciado na literatura e na prática de projeto como guia de medição de amplitude de flexão em campo. Medir a amplitude de flexão em operação permite comparar as hipóteses de projeto com o comportamento real da linha e revela quando a energia injetada foi subestimada ou a capacidade de dissipação, superestimada. Essa realimentação entre projeto e medição importa porque a energia eólica injetada depende de condições locais de vento e de topografia que nem sempre são bem conhecidas na fase de projeto. O critério de balanço energético continua valendo depois do dimensionamento inicial, no acompanhamento da linha ao longo da vida útil.

5. Conclusão

Este artigo revisou os principais mecanismos de excitação eólica que atuam sobre condutores e feixes múltiplos de linhas de transmissão e os relacionou aos critérios normativos de dimensionamento de espaçadores e amortecedores. A vibração eólica, ligada ao desprendimento de vórtices e ao lock-in, e a oscilação de subvãos, própria dos feixes, seguem o mesmo princípio: o dano por fadiga é resultado do equilíbrio entre a energia eólica injetada no sistema e a energia dissipada se estabelecer em amplitudes altas o bastante para que a solicitação cíclica, repetida por muito tempo, consuma a vida útil dos fios, e não de um desequilíbrio permanente.

Com o balanço energético como fio condutor, o papel das normas se organiza de forma coerente ao longo do projeto, da base conceitual à qualificação de componentes e à verificação em campo. Reunir os fenômenos físicos, os critérios normativos e as decisões de projeto sob um mesmo princípio evidencia que, na literatura e nas recomendações técnicas revisadas, o posicionamento de espaçadores e amortecedores é tratado como decisão que define a vida útil da linha, não como detalhe construtivo, e que a análise dinâmica funciona como ferramenta de estimativa de vida útil e confiabilidade, indo além da simples verificação de que há vibração. Depreende-se dessas fontes que duas linhas dimensionadas para as mesmas cargas podem ter durabilidades muito distintas conforme tratem o problema energético, e que é nessa etapa, e não na verificação estática, que se decide boa parte da confiabilidade da linha. Como desdobramento, fica a pergunta de quanto do arranjo de espaçadores, na prática de projeto, vem de análise modal caso a caso e quanto se apoia em prática consolidada de fabricante.

Do ponto de vista prático, as inferências extraídas da literatura e das recomendações técnicas revisadas apontam que decisões de projeto apoiadas somente em prática consolidada de fabricante poderiam ganhar precisão ao incorporar de forma explícita o balanço entre energia injetada e capacidade de dissipação, sobretudo em linhas com vãos longos ou terrenos abertos, onde a energia eólica disponível tende a ser maior. Cabe registrar que este trabalho é uma revisão bibliográfica e técnico-normativa e não apresenta ensaios experimentais, simulações, estudos de caso ou medições próprias que permitam demonstrar ou quantificar esses ganhos de precisão, durabilidade e confiabilidade: as relações aqui reunidas devem ser lidas como sistematização das fontes analisadas, e não como resultados obtidos neste trabalho. À luz dessas fontes, a escolha da tração de operação, o escalonamento dos espaçadores e a posição dos amortecedores deixam de ser parâmetros ajustados de forma isolada e passam a ser variáveis de um mesmo problema de otimização energética.

Como direção de trabalho futuro, vale investigar o quanto a variabilidade real das condições de vento em campo, incluindo turbulência e direção variável, afeta a energia injetada estimada em projeto, e até que ponto os modelos de balanço energético hoje usados capturam essa variabilidade. Também parece útil comparar, para um mesmo trecho de linha, o desempenho de diferentes arranjos de espaçadores previstos em projeto com o comportamento medido em campo pelos procedimentos do IEEE Std 1368, o que forneceria dados para calibrar melhor os critérios normativos discutidos neste artigo.

Referências

COMITÉ INTERNATIONAL DES GRANDS RÉSEAUX ÉLECTRIQUES. Technical Brochure 273: Overhead conductor safe design tension with respect to Aeolian vibrations. Paris: CIGRÉ, 2005.

COMITÉ INTERNATIONAL DES GRANDS RÉSEAUX ÉLECTRIQUES. Technical Brochure 277: State of the art survey on spacers and spacer dampers. Paris: CIGRÉ, 2005.

ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE. Transmission Line Reference Book: Wind-Induced Conductor Motion. 2. ed. Palo Alto: EPRI, 2009.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE Std 1368-2006: Guide for Aeolian Vibration Field Measurements of Overhead Conductors. New York: IEEE, 2006. Status atual: Inactive-Reserved desde 25 mar. 2021, sem norma substituta publicada. Disponível em: <https://standards.ieee.org/findstds/standard/1368-2006.html>. Acesso em: 24 ago. 2026.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 61854: Overhead lines – Requirements and tests for spacers. Geneva: IEC, 2020.

LIU, Jiaqiong; YAN, Bo; MOU, Zheyue; GAO, Yingbo; NIU, Getu; LI, Xiaolin. Numerical study of aeolian vibration characteristics and fatigue life estimation of transmission conductors. PLOS ONE, v. 17, n. 1, e0263163, 2022. Disponível em: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0263163>. Acesso em: 23 ago. 2026.

POFFENBERGER, J. C.; SWART, R. L. Differential displacement and dynamic conductor strain. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. PAS-84, p. 281-289, 1965.

RAWLINS, C. B. Flexural self-damping in overhead electrical transmission conductors. Journal of Sound and Vibration, v. 323, p. 232-244, 2009.

YANG, S.; CHOUINARD, L.; LANGLOIS, S.; VAN DYKE, P. Statistical study of aeolian vibration characteristics of overhead conductor. In: Dynamics and Aerodynamics of Cables (ISDAC 2023). Springer, 2024. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-47152-0_9. Acesso em: 23 ago. 2026.