

A monitorização dinâmica na estimativa da vida útil à fadiga de um condutor de uma linha elétrica aérea de muito alta tensão

Using dynamic monitoring system to estimate the lifetime due to fatigue of a conductor from an overhead high-voltage transmission line

Raphael Faria de Mendonça
Elsa Caetano

Resumo

Este artigo apresenta os resultados de um estudo sobre a fadiga num cabo condutor de uma linha elétrica aérea de muito alta tensão (LMAT). Submetidos à ação turbulenta do vento, os cabos das LMAT são suscetíveis às designadas vibrações eólicas, sendo frequente a observação de danos nos cabos condutores, nos cabos de guarda e mesmo nos isoladores. Com o objetivo de investigar tais efeitos, um sistema de monitorização dinâmica contínua foi desenvolvido e instalado num vão de uma LMAT desativada. A fim de validar a metodologia corrente de avaliação dos efeitos de fadiga baseada nas diretrizes do CIGRÉ, através da qual se estima a vida útil dos cabos condutores com base numa monitorização esparsa do deslocamento relativo medido numa secção destes elementos, é efetuada a monitorização em contínuo da aceleração numa secção de um condutor. Através da integração do sinal medido e da consideração de tempos de registo variáveis, é analisada a estimativa de vida útil, sendo evidenciada a insuficiência da monitorização esparsa do condutor correntemente recomendada.

Abstract

This article presents the results of a fatigue study of a conductor of a high-voltage transmission line. Turbulent wind loads are in the origin of vibrations, namely aeolian vibrations, inducing damage to the cable conductors, guard cables and accessories. To investigate such effects, a continuous dynamic monitoring system was developed and installed in a span of a de-activated transmission line. To assess the fatigue methodology presently recommended by CIGRÉ to estimate the remaining life of conductors based on sparse monitoring of relative displacement at a section close by their support, the acceleration at a section of a conductor is measured continuously for a certain period. By integration of the recorded signals to displacements, the CIGRÉ methodology is applied considering different periods of measurement and the estimated lifetime of the conductor is compared, evidencing the insufficiency of the present recommendation to accurately predict the conductor remaining life.

Palavras-chave: Vibrações eólicas / Fadiga em condutores / Vida útil / Monitorização dinâmica / Rotura de cabos

Keywords: Aeolian vibrations / Conductors fatigue / Conductor remaining lifetime / Dynamic monitoring / Cable failure

Raphael Faria de Mendonça

Estudante de Doutoramento
CONSTRUCT – ViBest, Faculdade de Engenharia
da Universidade do Porto
Porto, Portugal
raphael.mendonca@fe.up.pt

Elsa Caetano

Professora Associada com Agregação
CONSTRUCT – ViBest, Faculdade de Engenharia
da Universidade do Porto
Porto, Portugal
ecaetano@fe.up.pt

Aviso legal

As opiniões manifestadas na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The views expressed in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

MENDONÇA, R. [et al.] – A monitorização dinâmica na estimativa da vida útil à fadiga de um condutor de uma linha elétrica aérea de muito alta tensão . **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 16. ISSN 2183-8488. (julho 2021) 15-24.

1 Introdução

Apesar do alto nível de padronização atualmente existente no projeto de linhas aéreas de muito alta tensão (LMAT), ainda existe uma considerável falta de conhecimento dos efeitos do vento turbulento no comportamento estrutural dos condutores. A ocorrência de avarias e colapsos em LMATs não é invulgar, tanto em termos de condutores e isoladores, como dos postes, do que podem resultar distúrbios na distribuição de energia elétrica com repercussões económicas significativas. Por outro lado, as dificuldades relacionadas com a instrumentação de linhas elétricas ativas têm limitado a caracterização experimental do comportamento dessas estruturas.

A disponibilidade de acesso a uma linha desativada permitiu ao Laboratório de Vibrações e Monitorização Estrutural (ViBest) da FEUP conceber um sistema de monitorização dinâmica contínua e implementá-lo num tramo representativo de uma LMAT. Entre outros objetivos deste projeto, está o da validação de uma metodologia utilizada habitualmente na caracterização da vida útil de condutores de LMAT que assenta na monitorização destes através de um dispositivo de medição autónomo instalado na linha por um período de três meses e que, ao longo desse período, regista os deslocamentos relativos numa secção junto do apoio durante intervalos de tempo de 10 s em cada 15 minutos.

A oportunidade de realizar medições em contínuo permitiu avaliar a qualidade da estimativa da vida útil com base neste período de tempo.

Neste artigo apresenta-se uma breve descrição do sistema de monitorização contínuo e alguns resultados do estudo mencionado, considerando em particular a avaliação da fadiga do condutor antes e após a instalação de amortecedores do tipo Stockbridge.

2 Caracterização da LMAT

2.1 Localização

O vão monitorizado faz parte da Linha Riba de Ave – Vermoim 1, que se desenvolve ao longo dos concelhos de Vila Nova de Famalicão, Santo Tirso e Valongo e se encontra atualmente desativada. Este vão tem uma extensão aproximada de 595 m, atravessando uma área de características rurais com vegetação esparsa e baixa densidade de construção. Imagens deste vão e do poste instrumentado são mostradas na Figura 1. No que diz respeito ao vão, a sua escolha foi feita procurando-se que este tivesse uma fixação de amarração nas duas extremidades, comprimento superior a 500 metros e se localizasse fora de zonas urbanas, possuindo uma boa exposição à ação do vento.



Figura 1 LRA.VM1: a) vão e b) poste instrumentado

2.2 Cabos

Os cabos condutores do vão monitorizado são do tipo ACSR (*Aluminum Conductors Steel Reinforced*), constituídos por fios de alumínio com núcleo de reforço com fios de aço. A instrumentação foi aplicada a um cabo condutor com diâmetro de 24 mm e referência BEAR - ACSR 325. Com o objetivo de posterior calibração do modelo numérico, foi realizado um levantamento topográfico que permitiu definir a tração instalada e o perfil do cabo. Esta informação é sistematizada na Figura 2.

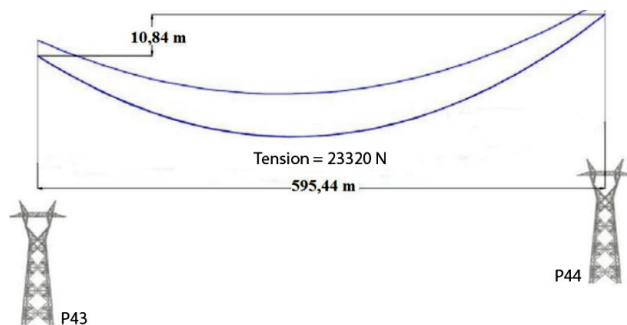


Figura 2 Perfil do cabo e força de tração instalada

2.3 Postes

Os postes P43 e P44 que suportam o vão monitorizado da LMAT (Figura 2) são iguais e designados como T1-29, sendo pertencentes à família de postes "T" com 29 m de altura útil. Trata-se de estruturas metálicas treliçadas convencionais constituídas por cantoneiras de abas iguais e ligadas entre si diretamente ou por parafusos e chapas de ligação.

2.4 Sistema de monitorização estrutural

O sistema de monitorização instalado na linha apresentado esquematicamente na Figura 3 incluiu a instrumentação do topo do poste com dois acelerómetros, em duas direções horizontais, e a instrumentação de um cabo condutor em duas secções, uma junto à amarração, com dois acelerómetros, e outra a 10 m, com outros dois acelerómetros. Imagens dos acelerómetros instalados no poste e no cabo são mostradas na Figura 4.

Com a intenção de utilizar o sistema de monitorização numa linha ativa, a tecnologia de fibra ótica foi incorporada no sistema por meio de um conjunto de sensores do tipo Bragg instalados em cinco secções do cabo conforme representação da Figura 3.

Finalmente, para caracterizar a ação do vento no condutor e no poste, um anemómetro sónico foi instalado no topo do poste.

O sistema de monitorização esteve ativo por um período de dois anos. Para avaliar o desempenho dos amortecedores Stockbridge, foi projetada e implantada uma solução de amortecimento convencional para o vão, que permitiu a monitorização do condutor dotado de amortecedores por um período de 6 meses.

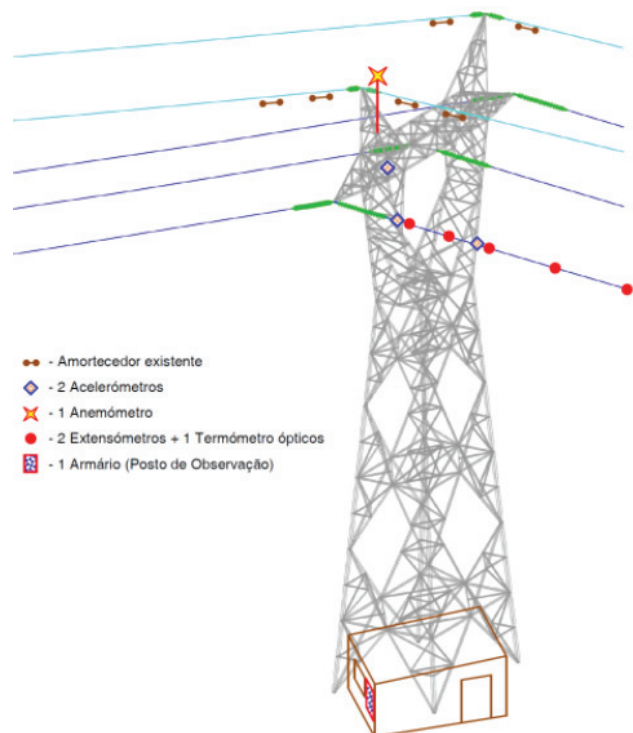
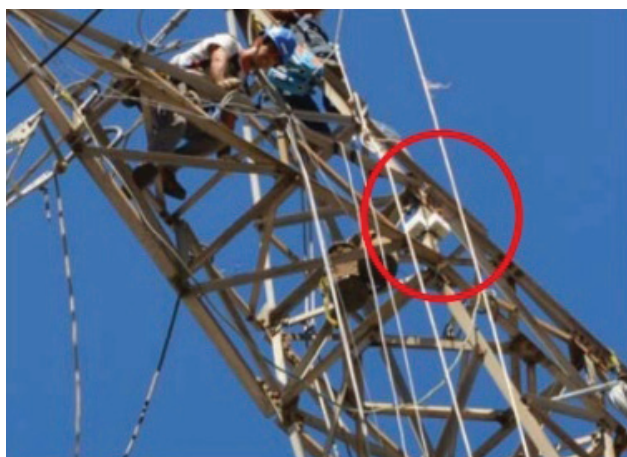


Figura 3 Localização das secções instrumentadas no vão P43-P44 da linha LRA.VM1



a)



b)

Figura 4 Acelerómetros instalados: a) do tipo piezoelétrico (poste) e b) MEMS (condutor)

3 Fadiga, amortecedores e dispositivos de medição de vibrações

3.1 Fadiga nos cabos condutores

Numa linha elétrica aérea, os cabos condutores representam até 40% do investimento total. Deste modo, e dado o impacto de danos nestes elementos estruturais, é essencial a sua manutenção. A fadiga por atrito é um dos problemas mecânicos mais complexos e responsável por um grande número de ocorrências de dano, devendo-se ao atrito no movimento relativo entre os fios internos do condutor e no contacto com grampos e amortecedores. Em LMATs, este fenómeno ocorre principalmente devido às vibrações eólicas. Estas vibrações ocorrem para determinadas velocidades do vento e são devidas à formação de vórtices alternados na parte superior e inferior do condutor, induzindo um movimento vertical do cabo que resulta em flexão na amarração ou ponto de suspensão próximo ao poste. A associação de esforços de flexão e tração no cabo pode levar à fadiga dos fios.

As vibrações eólicas em cabos condutores ocorrem para baixas velocidades de vento, de 0,5 m/s a 10 m/s, num intervalo de frequências de 3 Hz a 150 Hz, em que as amplitudes de vibração, expressas em função do diâmetro do condutor, têm valores de 0,01 a 1 diâmetro [1].

3.2 Curvas S-N e Curva de Segurança do CIGRÉ (CSBL)

A caracterização do desempenho à fadiga de um material é comumente realizada usando o método *stress-life* com o auxílio de curvas S-N (curvas de Wöhler), que fornecem a variação da tensão cíclica (S) com o número de ciclos até à falha (N) durante um teste de laboratório. Os critérios de paragem do teste são a falha de 10% dos fios do cabo, ou de um número específico de fios, geralmente escolhido como 3. Devido à difícil execução e aos altos custos envolvidos neste tipo de teste, o Conselho Internacional de Grandes Sistemas Elétricos (CIGRÉ) forneceu uma curva segura, denominada *Safe Border Line*, ou Curva de Segurança, a fim de facilitar às empresas a determinação da vida útil dos condutores sem necessidade de realizarem um investimento substancial. A Fig.5 mostra a curva CSBL em comparação com outros resultados de testes para uma variedade de cabos [1].

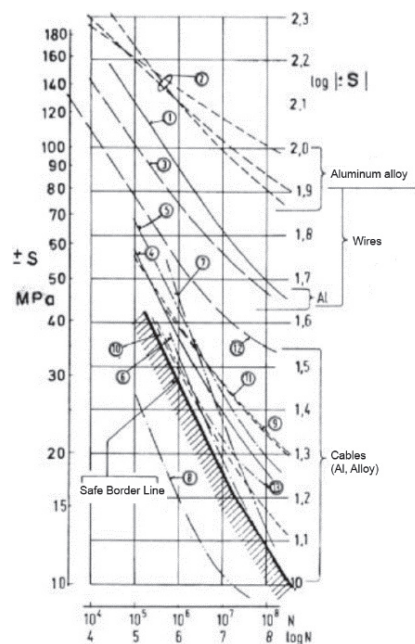


Figura 5 CIGRÉ Safe Border Line e curvas S-N [1]

A curva de segurança do CIGRÉ é dada pela expressão

$$\sigma_a = A \cdot N_i^B \quad (1)$$

As constantes A e B estão relacionadas com o número de ciclos de fadiga N_i para um determinado nível de tensão e número de camadas de fios de alumínio do condutor. A amplitude da tensão é designada como σ_a e expressa em MPa. A Tabela 1 mostra os valores desses parâmetros de acordo com [1].

Tabela 1 Constantes A e B para a curva CSBL

# de camadas	N < 2 × 10 ⁷		N > 2 × 10 ⁷	
	A	B	A	B
1	730	-0,2	430	-0,17
> 1	450	-0,2	263	-0,17

3.3 Every Day Stress (EDS) e o conceito de tensão de flexão

A Every Day Stress (EDS) é a resistência à tração estabelecida pelo CIGRÉ como uma parte da resistência à tração nominal do condutor do cabo (RTS). Em geral, em linhas de transmissão aéreas de muito alta tensão, os valores de EDS variam num intervalo de 15% a 20% da RTS. Embora a falha por fadiga em condutores esteja intimamente ligada a altos valores de EDS, a crescente procura de energia tem levado as empresas a utilizarem valores de EDS crescentes, que podem chegar a 35%.

A avaliação precisa da tensão e da deformação nos condutores é uma tarefa difícil. Poffenberger e Swart [2] desenvolveram uma formulação analítica que estabelece uma relação entre a tensão de flexão dinâmica (σ_{ps}) na camada externa dos fios e a amplitude de vibração pico a pico (Y_B), dada por

$$\sigma_{ps} = K \cdot Y_B \quad (2)$$

A constante K nesta equação converte em tensão de flexão (0 a pico) a amplitude vertical medida a 89 mm do último ponto de contato (UPC), como mostrado na Fig.6, e é definida como

$$K = \frac{E_a \cdot d \cdot \rho^2}{4 \cdot (e^{-\rho \cdot x} - 1 + \rho \cdot x)} \left[\text{N/mm}^3 \right] \quad (3)$$

onde E_a é o módulo de elasticidade do alumínio, expresso em MPa, d é o diâmetro do fio na camada externa, expresso em mm, x é a distância entre o ponto de medição e o UPC, geralmente adotado igual a 89 mm, e o parâmetro ρ é definido por

$$\rho^2 = \frac{T}{EI} \quad (4)$$

Na equação (4), T é a força de tração instalada no condutor calculada usando o EDS, expressa em N, e EI é a rigidez à flexão mínima do condutor em N.mm², dada pela seguinte equação

$$EI_{\min} = n_a \cdot E_a \cdot \frac{\pi d_a^4}{64} + n_s \cdot E_s \cdot \frac{\pi d_s^4}{64} \quad (5)$$

onde n_a é o número de fios de alumínio, e d_a é o diâmetro do fio de alumínio. Os parâmetros n_s , d_s e E_s representam o número de fios de aço, o seu diâmetro e o módulo de elasticidade do aço, respetivamente.

Quando o sensor não é instalado exatamente a 89 mm do último ponto de contacto (UPC), um fator de correção de distância deve ser usado para transportar os deslocamentos medidos do local do sensor para a posição de referência. A constante K é extremamente sensível à secção de medição x e pode conduzir a maus resultados se não for avaliada adequadamente, pois pode originar o aumento

ou diminuição das tensões de flexão no ponto de ancoragem, resultando numa estimativa incorreta da vida útil do condutor. O fator de correção definido em [3] é dado por

$$fd = \left(\frac{89}{xb} \right)^2 \quad (6)$$

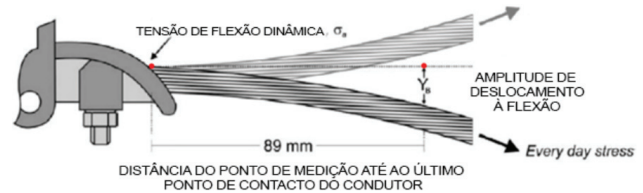


Figura 6 Representação esquemática do grampo de suspensão do condutor e do ponto de medição da amplitude de vibração

O efeito da utilização de um ponto de medição situado a uma distância do braço de alavanca distinto de 89 mm pode ser corrigido de forma aproximada multiplicando-se todas as amplitudes registadas por fd , sendo xb a distância real da posição do sensor expressa em milímetros. De acordo com a recomendação do CIGRÉ [3], a distância de 89 mm foi selecionada para obter um deslocamento mensurável mantendo o sensor numa zona do condutor cuja forma, durante a vibração, é governada apenas pelo efeito de rigidez e não pelas forças inerciais atuando nos ciclos de vibração.

3.4 Amortecedores Stockbridge

Os amortecedores do tipo Stockbridge são os dispositivos mais usados para mitigação das vibrações eólicas. Em geral, estes dispositivos são constituídos por duas massas conectadas nas extremidades de um cabo de aço, designado como *mensagemiro*. Uma abraçadeira garante a conexão entre o amortecedor e o condutor. Esta conexão permite a transmissão de deslocamentos do condutor para o amortecedor (Figura 7). As massas inerciais fixas ao cabo mensagemiro induzem a sua flexão, causando dissipação de energia por fricção devida aos movimentos relativos entre os fios do cabo. A dissipação de energia ocorre num intervalo de frequências em torno das suas frequências naturais [4]. Se a soma da energia dissipada pelo condutor e pelo amortecedor Stockbridge for maior que a energia fornecida pelo vento, o condutor vibrará com menos amplitude e por menos tempo.

Porém, para garantir a eficiência do sistema, é essencial que os amortecedores sejam colocados na posição correta ao longo do cabo, geralmente nos pontos do cabo com maior amplitude de vibração mais próximos dos pontos de ancoragem. Instalar os amortecedores Stockbridge em posições incorretas pode resultar num aumento da sobrecarga mecânica no cabo, o que levará a uma vida útil reduzida. Teoricamente, um amortecedor Stockbridge deve ser colocado a uma distância de $\lambda/4$ do ponto fixo, conforme mostrado na Figura 8, onde λ é o comprimento de onda do modo a ser mitigado.

Porém, tendo em consideração que as frequências naturais do conjunto cabo-amortecedor são diferentes das frequências naturais

do cabo isolado, o CIGRÉ recomenda a instalação do amortecedor à distância [5]

$$x = 0,85 \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (7)$$

Onde o comprimento de onda é dado por:

$$\lambda = \frac{1}{f_n} \cdot \sqrt{\frac{T}{m}} \quad (8)$$

Na equação (8), f_n é a frequência natural do cabo em Hz, T é a força de tração e m é a massa do cabo por unidade de comprimento.

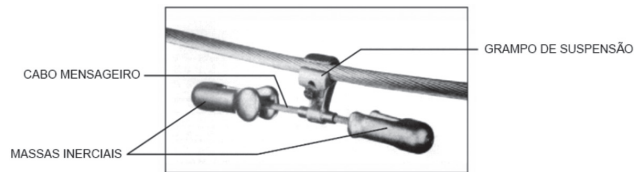


Figura 7 Amortecedor Stockbridge conectado ao cabo condutor [4]

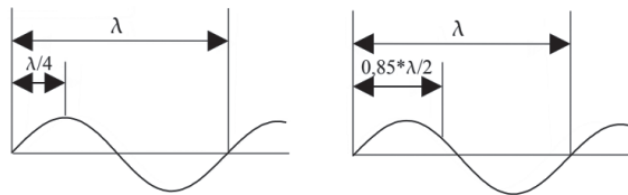


Figura 8 Distância teórica e recomendada para a instalação do amortecedor Stockbridge

O fenómeno de ressonância ocorre quando a frequência de excitação do vento se aproxima da frequência natural do cabo. Esta frequência é dependente do número de Strouhal, considerado igual a 0,185 (número recomendado para o caso específico de cabos em linhas aéreas de transmissão de alta tensão), sendo dada pela expressão

$$f = \frac{0,185 \cdot U}{d} \quad (9)$$

em que U é a velocidade do vento expressa em m/s e d é o diâmetro do condutor em m .

3.5 Dispositivo VIBREC500

Na avaliação das vibrações eólicas em cabos de linhas de transmissão elétrica são frequentemente usados dispositivos para medir amplitudes de vibração e calcular a vida útil do condutor. Neste trabalho, foi utilizado o dispositivo VIBREC500-WT (Figura 9), fabricado pela Pfisterer Sefag para medir as vibrações eólicas, registando amplitudes pico a pico, frequências de vibração e temperatura. A massa do VIBREC é de cerca de 0,7 kg, incluindo a bateria, que tem autonomia de aproximadamente um ano, dependendo da temperatura ambiente e do intervalo de tempo de aquisição. O dispositivo foi desenvolvido para cabos suportados por pinças de suspensão. Assim, o VIBREC é geralmente instalado próximo destas secções, e o sensor de medição fica localizado a uma distância de 89 mm do grampo de fixação.



Figura 9 VIBREC500-WT e grampo de fixação

Dada a necessidade de gerir a vida útil da bateria e a memória do aparelho, o VIBREC500-WT não grava dados continuamente. A aquisição padrão consiste no armazenamento de 10 segundos de dados de tempo ativo em cada intervalo de 15 minutos de inatividade, seguindo a recomendação do CIGRÉ, que determina um período mínimo de monitorização de três meses. Supondo o dispositivo ativo durante três meses, seriam registadas apenas 24,8 horas de dados, o que equivale a 0,3% do período de um ano. Esta baixa percentagem de tempo de monitorização efetiva é o motivo da realização deste trabalho, que visa caracterizar a qualidade das estimativas da vida útil dos cabos com base num período de amostragem tão curto. A Tabela 2 mostra algumas especificações do VIBREC500-WT.

Através de um software auxiliar, o VIBREC500-WT fornece uma estimativa da vida útil do condutor. A análise realizada pelo software segue os mais recentes padrões IEEE [5] e CIGRÉ [3]. Em particular, as amplitudes de pico-a-pico medidas são convertidas em tensões de flexão, usando a equação de Poffenberger-Swart (2).

Em relação à contagem de ciclos de tensão, o manual do VIBREC500-WT afirma que o dispositivo armazena automaticamente o número de meio-ciclos numa matriz de dados e o software converte os dados em vários ciclos completos.

Tabela 2 Especificações da aquisição de dados do VIBREC500-WT

Tempo Ativo de Aquisição	1 – 10s
Tempo ativo + Período de Inatividade	15s – 60 min
Velocidade do Vento	0 – 30 m/s
Gama de Frequências	0,2 – 200 Hz
Amplitude de Vibração	0 – 2 mm

Os dados são expressos por meio de uma curva S-N relacionando cada bloco de tensão com o número de ciclos, e o dano acumulado no condutor D é determinado usando a regra de Palmgren-Miner, definida pela expressão

$$D = \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{M_{fi}} \quad (10)$$

e o procedimento esquematizado na Figura 10. A curva S-N obtida com os dados registados é comparada com a Safe Border Line do CIGRÉ [1], obtendo-se o valor final do dano, que é extrapolado para o período de um ano, utilizando o fator de extrapolação F_e , definido pela expressão (11), onde t_{ano} é o período de tempo de 1 ano em segundos (3153600 s) e t_{ativo} é o tempo ativo total em que ocorreram as medições, também em segundos.

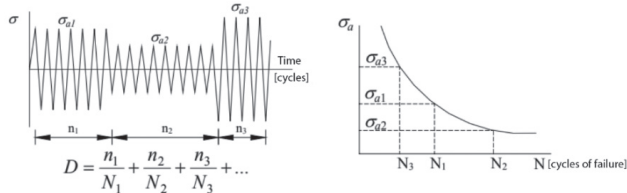


Figura 10 Regra de Palmgren-Miner

$$F_e = \frac{t_{ano}}{t_{ativo}} \quad (11)$$

Finalmente, o tempo de vida restante V , expresso em anos, é dado através de

$$V = \frac{1}{D} \quad (12)$$

4 Método de estimativa da vida útil do condutor

Com o objetivo de verificar se o tempo de aquisição do sinal estipulado pelo VIBREC é suficiente para caracterizar o fenómeno da fadiga em cabos condutores, o presente trabalho propõe um método de cálculo do tempo de vida por fadiga utilizando dados de monitorização contínua da estrutura.

4.1 Período de análise

Para utilizar os mesmos conceitos e formulações utilizados pelo VIBREC500-WT, um acelerómetro microeletro-mecânico (MEM#3) foi instalado próximo do ponto de ancoragem do condutor para simular a posição do dispositivo. Este sensor mede a aceleração vertical do cabo. Para efeito de comparação dos resultados, também foram utilizados os dados relativos ao acelerómetro instalado numa secção mais distante da amarração (MEM#1).

Da base de dados de monitorização contínua foram considerados dois períodos de análise com a duração de três meses durante o mesmo período de inverno, um antes e outro após a instalação dos amortecedores Stockbridge. As Figuras 11 e 12 mostram a representação dos valores eficazes da aceleração vertical em função da velocidade média do vento num período de 120 segundos em ambos os períodos de análise. Observa-se, nestas figuras, que houve uma redução significativa da aceleração vertical após a instalação dos Stockbridge para velocidades médias inferiores a 3 m/s.

O cálculo da vida útil do condutor foi então realizado considerando diferentes durações dos registos, começando com 5 s em cada período de 15 minutos, e terminando com o período completo de 15 minutos.

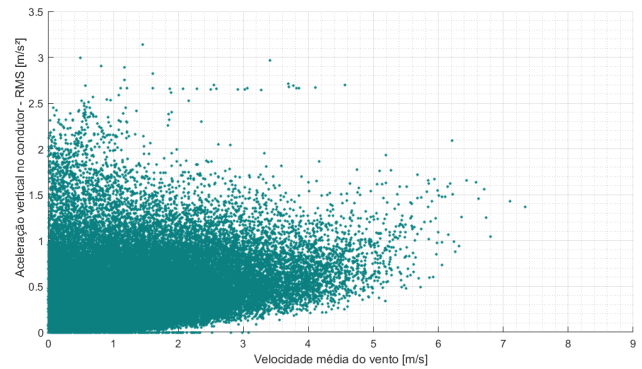


Figura 11 Valores eficazes da aceleração vertical vs velocidade média do vento para intervalos de 120 segundos durante os meses de inverno (dez/2017 e jan/fev/2018)

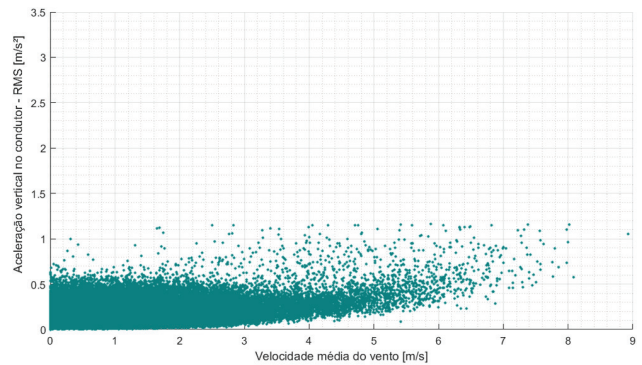


Figura 12 Valores eficazes da aceleração vertical vs velocidade média do vento para intervalos de 120 segundos durante os meses de inverno (dez/2018 e jan/fev/2019)

4.2 Processamento dos sinais de aceleração

De forma a efetuar o cálculo da vida útil à fadiga, é necessário realizar um conjunto de operações de processamento das séries colhidas de aceleração. Em primeiro lugar, são eliminados o offset, "outliers" e registos com valores ausentes. Numa segunda fase, o sinal é filtrado de modo a remover o conteúdo em frequência fora do intervalo de interesse do ponto de vista das vibrações eólicas do cabo. No presente caso, esse intervalo é determinado usando a equação (9) e considerando como relevante uma variação de velocidade de vento de 0,5-7 m/s

$$f = \frac{0,185 \cdot [0,5; 7]}{0,02345} \approx [4 \text{ Hz}; 60 \text{ Hz}] \quad (13)$$

O filtro aplicado foi do tipo Butterworth com 8 pólos e uma frequência de corte de 4 Hz a 60 Hz. Numa terceira fase e, dado que a determinação da tensão de flexão no cabo segue a equação (2), torna-se necessário efetuar uma dupla integração das séries de aceleração medidas. Esta integração é realizada no domínio da frequência de modo a evitar erros numéricos. A Tabela 3 mostra os parâmetros utilizados na equação de Poffenberger-Swart (2) considerando as características do condutor em análise.

Após conversão do sinal de deslocamento num sinal de tensão, o método Rainflow de contagem de ciclos é aplicado e a regra de Palmgren-Miner é usada para determinar a vida útil do condutor.

Tabela 3 Parâmetros da equação de Poffenberger-Swart no caso de estudo

Módulo de Elasticidade do Alumínio, E_a	70000 MPa
Módulo de Elasticidade do Aço, E_s	200000 MPa
Diâmetro do fio de alumínio, d_a	3,35 mm
Diâmetro do fio de aço, d_s	3,35 mm
Número de fios de alumínio, n_a	30
Número de fios de aço, n_s	7
Rigidez à flexão do condutor, El_{min}	$2,163 \times 10^7$ N/mm ²
Tensão do Cabo, T	23 320 N
Constante de Poffenberger-Swart, K	31,981 N/mm ³
Distância ao UPC, x	89 mm

5 Estimativa da vida útil do condutor

5.1 Análise do período de 3 meses de dados de monitorização contínua

Mostram-se na Figura 13 e na Tabela 4 (colunas 2 e 3) os resultados do cálculo da vida útil do condutor considerando registos de aceleração de duração variável entre 5 s e 600 s em cada período de 15 minutos, tomando como referência os períodos de 3 meses análogos de inverno, antes e após a introdução dos amortecedores Stockbridge.

Tabela 4 Constantes A e B para a curva CSBL

Aquisição [s]/15 min	LMAT					
	Vida [anos] – 1.ª análise		Vida [anos] – 2.ª análise		Dif. (%)	
	Antes Amort.	Depois Amort.	Antes Amort.	Depois Amort.	Antes Amort.	Depois Amort.
5	10,1	200	9,9	248	1,1%	24,0%
10	7,7	167	7,9	152	2,2%	9,0%
30	6,1	136	6,2	141	1,0%	3,7%
60	5,9	132	6,1	123	4,3%	6,8%
90	5,9	127	5,7	122	2,0%	3,9%
120	5,58	124	5,7	127	1,0%	2,4%
180	5,5	126	5,6	123	0,0%	2,4%
300	5,6	123	5,4	123	0,7%	0,0%
600	5,3	119	5,4	123	2,7%	3,4%

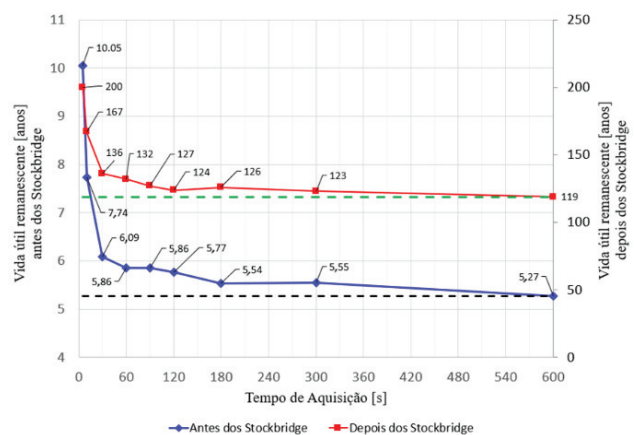


Figura 13 Vida útil vs Tempo de aquisição

A observação da Tabela 4 e da Figura 13 mostra que a vida útil do condutor tende para 5 anos com o aumento do tempo de aquisição no cabo antes da instalação dos amortecedores Stockbridge. Por outro lado, as análises do cabo com amortecedores mostram um aumento considerável da vida útil, que tende para 119 anos. Isso ocorre devido à energia dissipada pelos amortecedores, reduzindo a amplitude de vibração e, consequentemente, reduzindo as tensões no ponto de ancoragem. Na Figura 13 é possível observar que o tempo de aquisição de 10s para 15 minutos de intervalo utilizado por padrão no VIBREC500-WT não é suficiente para uma estimativa razoável do tempo de vida, e menos ainda para intervalos de tempo menores que 10s, valores estes permitidos na configuração do dispositivo. Pode-se observar também que os valores de tempo de vida obtidos para a condição sem amortecimento e com amortecimento para os diferentes períodos de análise dos dados apresentam uma variação assintótica após um período de 60s / 15min de aquisição de dados. Assumindo a recomendação do CIGRÉ de aquisição de dados usando o tempo de 10 s/15 min, ao final de 3 meses, a quantidade de dados analisados é de 86400s em comparação com os 518 400 s usando 60 s/15 min. Usualmente, o tempo de vida é expresso em anos e os dados são extrapolados para este período. Considerando o período de aquisição do VIBREC500-WT, este representa 0,27% do ano. Como afirmado anteriormente, este tempo não é suficiente para caracterizar o fenómeno da fadiga devido às vibrações eólicas. Considerando os resultados obtidos com este condutor específico, recomenda-se realizar a análise no domínio do tempo usando pelo menos 120 s/15 min para uma estimativa confiável da vida útil de um cabo condutor, tempo este, que representa 1036800 s ou 3,3% do ano. A Figura 14 mostra a comparação da curva de dano acumulado com a CIGRÉ Safe Border Line para registos de 120 s sem e com amortecedor, permitindo concluir da segurança à fadiga no caso de não serem instalados amortecedores Stockbridge no cabo condutor.

Com o intuito de validar o algoritmo desenvolvido, foi repetida a análise descrita com um segundo conjunto de dados extraídos por desfasamento dos registos colhidos. A Figura 15 mostra os resultados obtidos através deste segundo conjunto de cálculos, que são também apresentados nas colunas 4 e 5 da Tabela 4.

Nota-se que os resultados obtidos na segunda análise são muito próximos dos obtidos no estudo inicial com o primeiro conjunto de dados, de acordo com o evidenciado nessa tabela.

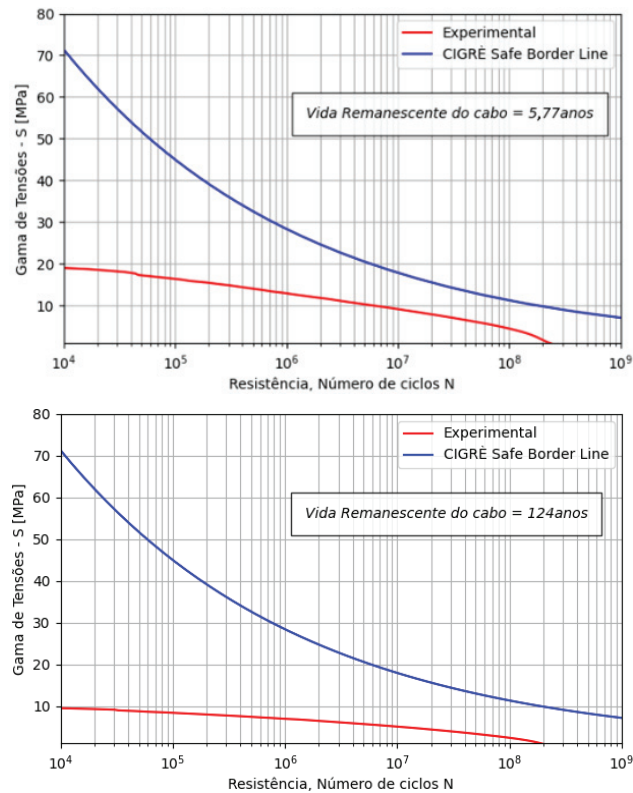


Figura 14 Dano acumulado vs CIGRÉ Safe Border Line, antes (em cima) e após (em baixo) instalação de amortecedores Stockbridge

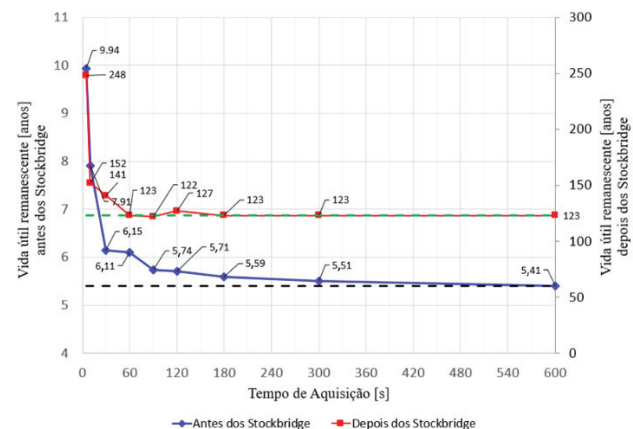


Figura 15 Vida útil vs Tempo de aquisição, resultados do cálculo com o segundo conjunto de dados

As duas análises acima descritas foram realizadas numa gama de frequências de 4 a 60 Hz, compatível com as velocidades do vento que dão origem às vibrações eólicas num intervalo de 0,5 a 7 m/s. Entretanto, pode ser observado nos gráficos da Figura 11 e Figura 12 que os valores das velocidades médias do vento no período de 120 s superam o valor de 7 m/s utilizados anteriormente como limite superior do filtro Butterworth. Desta forma, para incorporar os efeitos das velocidades de vento até 10m/s, decidiu-se modificar o filtro aplicado às séries temporais, ampliando a gama de frequências até 80 Hz. Em resultado dessa alteração, foi detetada uma redução da vida útil do cabo condutor. Este resultado já era esperado, uma vez que, ampliando-se a gama de frequências dos sinais, incorporam-se também os danos associados às frequências mais elevadas. Neste estudo específico, a diferença média nos resultados é de cerca de 4%, como se pode constatar na Tabela 5 para o período antes e após a instalação dos amortecedores.

Tabela 5 Comparação entre resultados com diferentes velocidades

Aquisição [s]	LMAT					
	Vida [anos] – 3 meses				Antes Depois	
	Antes Amort.		Depois Amort.		Amort.	Amort.
	até 7 m/s	até 10 m/s	até 7 m/s	até 10 m/s	Dif. (%)	Dif. (%)
5	10,5	9,68	200	195	3,8%	2,4%
10	7,4	7,63	167	164	1,5%	2,1%
30	6,09	5,94	136	131	2,5%	3,5%
60	5,86	5,60	132	126	4,6%	4,4%
90	5,86	5,59	127	120	4,7%	6,1%
120	5,77	5,44	124	117	6,1%	6,4%
180	5,54	5,16	126	116	7,3%	8,3%
300	5,55	5,11	123	112	8,5%	9,6%
600	5,27	5,11	119	113	3,1%	5,3%

5.2 Análise da representatividade do período de monitorização contínua

Uma segunda questão levantada no presente estudo prende-se com a validade da adoção de um período de monitorização de 3 meses no cálculo da vida útil de um condutor proposta pelo CIGRÉ. Tirando proveito da extensa base de dados colhida, realizou-se uma análise da fadiga considerando um período de monitorização de 6 meses. A Tabela 6 mostra os resultados para 3 e 6 meses de dados analisados antes da instalação dos amortecedores Stockbridge, permitindo concluir que, embora percentualmente variáveis, no presente caso não existe uma diferença significativa na vida do cabo nos períodos analisados, que é da ordem de 5 anos. Deste modo, parece ser pertinente a recomendação do CIGRÉ de monitorização por 3 meses.

Tabela 6 Comparação entre resultados com diferentes períodos de análise

Aquisição [s]/15 min	LMAT					
	Vida [anos] – 3 meses		Vida [anos] – 6 meses		Dif. (%)	
	Antes Amort.	Depois Amort.	Antes Amort.	Depois Amort.	Antes Amort.	Depois Amort.
5	10,5	200	11,45	235	2,0%	17,5%
10	7,74	167	8,12	175	8,5%	4,8%
30	6,09	136	6,44	152	7,2%	11,8%
60	5,86	132	6,23	133	10,2%	0,8%
90	5,86	127	5,66	121	3,8%	4,7%
120	5,77	124	5,51	119	0,4%	4,0%
180	5,54	126	5,51	118	5,3%	6,3%
300	5,55	123	5,51	118	3,6%	4,1%
600	5,27	119	5,51	118	5,9%	0,8%

6 Conclusões

A instalação de um sistema de monitorização numa linha LMAT permitiu a observação contínua da aceleração junto da secção de amarração de um condutor e a análise automática da resposta do cabo com o objetivo de avaliar a recomendação atual do CIGRÉ em relação ao período de monitorização necessário para estimar a vida útil à fadiga de um condutor em linhas elétricas aéreas de muito alta tensão. Foram testados diferentes períodos de aquisição intermitente de dados num tempo global de monitorização de 3 meses e ensaiaram-se dois intervalos de frequência associados a diferentes intervalos de velocidades de vento com potencial para originarem vibrações eólicas. Concluiu-se que, no caso presente, o tempo de vida útil no cabo condutor não foi praticamente modificado com a modificação do intervalo de frequências analisado, de 4 Hz a 60 Hz. Em contrapartida, foi possível observar uma variação assintótica da estimativa da vida útil do cabo ao aumentar o tempo de amostragem de 5 s por cada 15 minutos de tempo para o total de 15 minutos. Concluiu-se que a recomendação do CIGRÉ da utilização de 10 s de dados origina estimativas de vida útil dos condutores não conservativas e muito distintas do valor assintótico, o qual pode ser obtido de forma aproximada com cerca de 120 s de dados.

Em contrapartida, foi possível verificar que a extensão do tempo de monitorização de 3 meses para 6 meses não levou a estimativas de tempo de vida do condutor substancialmente diferentes, sendo neste aspeto validada para o caso presente a recomendação do CIGRÉ.

Além disso e, dado que foram colhidos sinais antes e após a instalação de amortecedores Stockbridge, foi possível avaliar a sua grande contribuição em termos de acréscimo da vida útil do cabo.

Embora mais estudos devam ser realizados para validar o uso dos sinais de aceleração obtidos a partir da monitorização contínua em alternativa à monitorização de deslocamentos relativos, esta pode ser uma boa alternativa para avaliar a vida útil de um condutor, particularmente numa solução baseada em sensores óticos que possam ser instalados numa linha ativa.

Agradecimentos

Este trabalho foi apoiado financeiramente por: Financiamento Base - UIDB / 04708/2020 e Financiamento Programático – UIDP / 04708/2020 da CONSTRUCT – Instituto de I&D em Estruturas e Construções – financiado com fundos nacionais através da FCT / MCTES (PIDDAC), e pelo Projeto PTDC / ECM-EST / 2110/2014 - POCI-01-0145-FEDER-016877 – financiado com fundos FEDER através do COMPETE2020 – Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (POCI) e com fundos nacionais através da FCT – Fundação para Ciência e Tecnologia, IP. É também reconhecido o apoio financeiro concedido pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) ao primeiro autor através da bolsa de doutoramento 2020.07461.BD. Agradece-se ainda à Rede Elétrica Nacional (REN) o apoio concedido à concretização deste projeto, nomeadamente em termos do auxílio à montagem de instrumentação na linha.

Referências

- [1] EPRI – EPRI Transmission Line Reference Book: *Wind-Induced conductor Motion*. Palo Alto, CA: 2006. 1012317.
- [2] POFFENBERGER, J.C.; SWART, R.L. – *Differential Displacement and Dynamic Conductor Strain*. IEEE Transactions Paper, Vol. PAS-84, 1965, pp. 281-289.
- [3] CIGRE SCB2-08 WG30 TF7 2007 – “*Fatigue endurance capability of conductor Conductor/Clamp Systems-update of Present Knowledge*.” CIGRE-TB 332, 2007.
- [4] GUEDES, A.V.; MATT, C.F.; CAVALCANTI, E.S.C. – *Experimental Investigation of The Dynamic Behavior of Stockbridge Dampers*. 18th International Congress of Mechanical Engineering. Ouro Preto/MG, 2005.
- [5] IEEE – “*Guide for Aeolian Vibration Field Measurements of Overhead Conductors*.” std 1368, 2006.
- [6] CAETANO, E; BASTOS, F; ROCHA, D. – *Projeto de Monitorização de Linha Elétrica Aérea de Muito Alta Tensão- Fase 2*. Relatório Laboratório de Vibrações e Monitorização de Estruturas, fevereiro 2016.