



PROJETO DE GRADUAÇÃO

Previsão de Vida de Fadiga de Cabos Condutores submetidos a Vibrações Eólicas utilizando a Ferramenta Espectral

Por,
Camila Tsuchida Nogueira

Brasília, 21 de junho de 2017

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA

PROJETO DE GRADUAÇÃO

Previsão de Vida de Fadiga de Cabos Condutores submetidos a Vibrações Eólicas utilizando a Ferramenta Espectral

POR,

Camila Tsuchida Nogueira

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenharia Mecânica.

Banca Examinadora

Prof. Jorge Luiz de Almeida Ferreira, UnB/ ENM
(Orientador)

Prof. Lucival Malcher, UnB/ ENM

Prof. José Alexander Araújo, UnB/ ENM

Brasília, 21 de junho de 2017

Dedicatória

À minha mãe, Satie Tsuchida.

*“The best way to predict the future is to
create it” (Peter Drucker).*

Camila Tsuchida Nogueira

Agradecimentos

Agradeço à minha mãe, Satie Tsuchida, por ser a minha principal fonte de inspiração, por todo seu apoio e por ter sempre contribuído para que eu superasse os grandes desafios.

Ao Professor e Orientador Jorge Luiz Almeida de Ferreira, pela oportunidade, por todos os seus ensinamentos e pela atenção.

Ao Pedro Schaitl Souza, pelo companheirismo, compreensão e incentivo.

Camila Tsuchida Nogueira.

Como os cabos condutores de energia estão sujeitos a carregamentos aleatórios devido à ação dos ventos, o objetivo desse trabalho é avaliar o tempo adequado de monitoração da resposta vibratória de um condutor de modo a garantir que a sua estimativa de vida de fadiga possua a máxima exatidão. Todo o trabalho consistiu em uma análise computacional feita através de algoritmos desenvolvidos no laboratório da Universidade de Brasília por Watanabe (2014). Duas metodologias foram empregadas para realizar esse cálculo do tempo de vida de fadiga: o método que utiliza os dados no domínio do tempo e o método espectral, que faz o uso dos dados no domínio da frequência. Ao final, os resultados obtidos através das duas metodologias foram comparados entre si a fim de constatar qual das duas exige um menor tempo de amostragem de dados de intensidade eólica e vantagens e desvantagens de cada procedimento.

Palavras chaves: Fadiga, Cabo condutor de energia, Rainflow, Método espectral, Previsão de vida.

ABSTRACT

As conductor cables are submitted to random loads caused by winds, the aim of this work is to assess how long it is necessary to monitor the vibration response of a cable conductor to ensure that the estimate of the fatigue life has the maximum accuracy. The work consisted in a computational analysis through algorithms developed in Matlab software and this analysis was based on results of experimental tests, achieved by Watanabe (2014) in the laboratory of University of Brasília. Two methodologies to predict the fatigue life were applied: the method which uses the data in time domain and the spectral method, which uses the data in frequency domain. In the end, the results obtained over these two methodologies were compared with each other so it could be possible to verify which one demands a shorter sampling time of wind intensity data and advantages and disadvantages of each procedure.

Keywords: Fatigue, Conductor cable of energy, Rainflow, Spectral method, Life prediction.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 CONTEXTO DO DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	1
1.2 OBJETIVOS	4
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	4
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1 FADIGA	5
2.2 CARREGAMENTOS DETERMINÍSTICOS E RANDÔMICOS	6
2.3 PREVISÃO DE VIDA DE FADIGA NO DOMÍNIO DO TEMPO	8
2.3.1 REGRA DE PALMGREN-MINER	8
2.3.2 MÉTODO RAINFLOW DE CONTAGEM DE CICLOS	10
2.4 PREVISÃO DE VIDA DE FADIGA NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA	13
2.4.1 DENSIDADE DE ESPECTRO DE POTÊNCIA – PSD	14
2.4.2 MOMENTOS ESPECTRAIS	17
2.4.3 TAXA DE CRUZAMENTO DE NÍVEL ZERO E DE PICOS E O FATOR DE IRREGULARIDADE	18
2.4.4 FÓRMULA GERAL DE DANO DE FADIGA NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA	20
2.4.5 MODELOS DE ESTIMATIVA DE VIDA DE FADIGA NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA	22
3. FADIGA EM CABOS CONDUTORES DE ENERGIA	24
3.1 CABOS CONDUTORES DE ENERGIA ELÉTRICA	24
3.2 EXCITAÇÃO EÓLICA	25
3.3 METODOLOGIA PARA PROJETO CONTRA FADIGA DE CABOS CONDUTORES	29
3.3.1 VIBRÓGRAFO	29
3.3.2 FÓRMULA DE POFFENBERGER-SWART	30
4. METODOLOGIA	34
4.1 REFERÊNCIA EXPERIMENTAL	34
4.2 ANÁLISE COMPUTACIONAL	37
4.2.1 RECONSTRUÇÃO DO SINAL ALEATÓRIO	37
4.2.2 CÁLCULO DA VIDA DE FADIGA	39
4.2.3 A FERRAMENTA WAFO	42
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
5.1 DESCRIÇÃO BÁSICA DOS ALGORITMOS DESENVOLVIDOS	44
5.2 EXPOSIÇÃO DOS RESULTADOS	44
5.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS	48
6. CONCLUSÕES	52
6.1 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54
ANEXOS	57
ANEXO I – PROGRAMA PRINCIPAL	57
ANEXO II – ANÁLISE NO DOMÍNIO DO TEMPO	60
ANEXO III – ANÁLISE NO DOMÍNIO DO TEMPO – WAFO	61
ANEXO IV – ANÁLISE NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA	62
ANEXO V – ANÁLISE NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA – WAFO	64

ANEXO VI – IDENTIFICAÇÃO DE PICOS E VALES	66
ANEXO VII – CONTAGEM DOS CICLOS RAINFLOW.....	67

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1- Cabo condutor com a maioria dos fios de alumínio rompidos (FURTADO et al., 2003)	2
Figura 2.1 - Curva S-N de um ensaio axial alternado para um aço AISI 4130 (NORTON, 2004).	6
Figura 2.2 - Classificação do processo randômico (Modificado de BENDAT e PIERSOL, 1971)	7
Figura 2.3 - (a) Carregamento de amplitude constante; (b) Carregamento aleatório (JOHANNESSON, 1999).....	7
Figura 2.4 - Previsão de vida de fadiga no domínio do tempo (Modificado de BISHOP, 1999)	8
Figura 2.5 - Carregamento randômico expresso na forma de espectro de amplitudes constantes de tensões alternantes (ARIDURU, 2004)	9
Figura 2.6 - Exemplo de curva S-N, com ciclos de falha e ciclos de serviço indicados para um determinado nível de tensão	9
Figura 2.7 - (a) Gráfico Tensão vs. Tempo (PragTic, 2007); (b) Gráfico Tensão x Tempo girado em 90° no sentido horário (PragTic, 2007); (c) Ilustração de uma casa com um telhado japonês (Pagoda roof)	11
Figura 2.8 - Exemplo de utilização do método Rainflow (Modificado de ASTM E, 1049)	13
Figura 2.9 - Previsão de vida de fadiga no domínio da frequência (Modificado de BISHOP, 1999).....	14
Figura 2.10 - (a) História de um carregamento de amplitude constante no domínio do tempo, (b) História de um carregamento de amplitude constante no domínio da frequência (Modificado de BISHOP, 1999)	14
Figura 2.11 - Densidade espectral de potência de um sinal aleatório (Modificado de SINAIS INGENIERIA, 2013)	15
Figura 2.12 - Distribuição normal de probabilidade (Modificado de MONTGOMERY e RUNGER, 2005).....	16
Figura 2.13 - Extração dos momentos espectrais de uma PSD (Modificado de BISHOP, 1989)	18
Figura 2.14 - Exemplo de cálculo do fator de irregularidade (LEE et al. 2005).....	19
Figura 2.15 - (a) Sinal de banda estreita; (b) Sinal de banda larga (Modificado de BISHOP, 1999).....	20
Figura 2.16 - Representação de uma curva de função de densidade de probabilidade (CESÁRIO, 2012)	21

Figura 2.17 – Limitação da Solução de Banda Estreita para um sinal banda larga (REIS, 2013)	22
Figura 3.1 - Cabo condutor, feito de liga de alumínio (NEXANS, 2009)	24
Figura 3.2 - (a) Escoamento em torno de um cilindro para um baixo número de Reynolds, (b) Escoamento em torno de um cilindro para um alto número de Reynolds (Modificado de SCHLICHTING, 1979)	27
Figura 3.3 - Escoamento em torno de um cilindro circular para diferentes valores do número de Reynolds (Modificado de LIENHARD, 1966)	28
Figura 3.4 - Vibrógrafo do tipo Vibrec (PFISTERER, 2015)	30
Figura 3.5 - Vibrógrafo do tipo Pavica montado em uma linha de transmissão (EPRI, 1979)	30
Figura 3.6 - Esquema montagem cabo/grampo (FADEL, 2010)	31
Figura 3.7 - Curva de limite de Segurança de CIGRÉ (Safe Border Line) (EPRI, 1979)	33
Figura 4.1- Montagem do cabo para ensaio de fadiga	34
Figura 4.2 - Curva S-N obtida para o condutor IBIS (WATANABE, 2014)	35
Figura 4.3 – Curva σ_{eq} - N obtida para o condutor IBIS (WATANABE, 2014)	36
Figura 4.4 - História dos ciclos de carregamento do ensaio 2 (WATANABE, 2014)	38
Figura 4.5 - Função densidade espectral de potência do ensaio 2 (WATANABE, 2014)	38
Figura 4.6 – Fluxograma do trabalho	41
Figura 5.1- Estimativa do tempo de vida de fadiga segundo o tempo de duração do sinal	46
Figura 5.2 – Coeficiente de variação segundo o tempo de duração do sinal	47
Figura 5.3 – Linhas de tendência sobre o gráfico de dispersão dos coeficientes de variação obtidos com o WAFO	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Principais tipos de cabos condutores de energia.....	24
Tabela 3.2 - Comparação entre os três tipos de vibração a que um cabo condutor está sujeito, citado por HENRIQUES (2006) (FURTADO, 2001)	26
Tabela 3.3 - Quadro comparativo técnico dos vibrógrafos Pavica e Vibrec	30
Tabela 3.4 - Constantes da CSBL (CIGRÉ, 1985)	33
Tabela 4.1- Resultados experimentais dos ensaios em banda estreita do condutor IBIS (WATANABE, 2014)	37
Tabela 4.2 - Resultados e propriedades dos ensaios de fadiga banda estreita (WATANABE, 2014)	39
Tabela 4.3 - Funções do WAFO utilizadas	43
Tabela 5.1- Dados do ensaio 2 (WATANABE, 2014).....	44
Tabela 5.2- Tempos médios de vida de fadiga do ensaio 2 utilizando os dados no domínio do tempo.	45
Tabela 5.3 - Tempos médios de vida de fadiga do ensaio 2 utilizando os dados no domínio da frequência.....	45
Tabela 5.4 – RMS médio e desvio padrão.....	47
Tabela 5.5 – Coeficientes de variação obtidos através da simulação computacional e das equações das curvas de tendência	50

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos latinos

D	Valor do dano	
D_{Dirlik}	Dano de Dirlik	
D_{NB}	Dano de Banda Estreita	
D_S	Dano acumulado referente ao sinal amostrado	
dS	Largura de banda	
d_a	Diâmetro dos fios de alumínio	[mm]
d_p	Diâmetro dos fios de alumínio da camada externa do cabo condutor	[mm]
d_s	Diâmetro dos fios de aço	[mm]
d_n	Diâmetro do cabo	
e	Erro padrão	
E	Módulo de elasticidade do material	
E_a	Módulo de elasticidade dos fios de alumínio	
E_s	Módulo de elasticidade dos fios de aço	
E[0 ⁺]	Taxa de cruzamento de nível zero	[Hz]
E[P]	Taxa de picos	[Hz]
f	Frequência	[Hz]
f_s	Frequência de emissão dos vórtices na saída do cilindro	
g	Aceleração da gravidade	[m/s ²]
K	Constante de Poffenberger	[N/mm ³]
m_n	N-ésimo momento espectral	
N	Número de ciclos	
N_p	Número de pontos	
N_t	Número total de ciclos armazenados no histograma de tensão de Rainflow	
n_a	Número de fios de alumínio	
n_b	Número de blocos de carregamento	
n_i	Quantidades de ciclos para uma determinada magnitude de tensão	
n_s	Número de fios de aço	
p(S)	Distribuição de carga Rainflow	
R(τ)	Função de auto correlação	
Re	Número de Reynolds	
S	Tensão	[MPa]
S_t	Número de Strouhal	
$S_x(\omega)$	Densidade espectral two-sided	

T	Período	[s]
T_b	Tempo de duração de cada bloco de carregamento	[s]
T_c	Carga diária de esticamento para a temperatura média durante a medição	[N]
T_s	Tempo de duração do sinal construído	[s]
t	Instante de tempo	[s]
U	Velocidade de escoamento em torno do cilindro	[m/s]
V	Vida de fadiga	[Dias]
$W_x(f)$	Densidade espectral one-sided	
x	Distância entre o último ponto de contato do cabo/grampo e o vibrógrafo	[mm]
$X(\omega)$	Função do carregamento no domínio da frequência – Transformada de Fourier	
$X(t)$	Função do carregamento no domínio do tempo - Transformada inversa de Fourier	
Y_{0-pk}	Amplitude de deslocamento de zero a pico	
Y_b	Amplitude de deslocamento de pico a pico	
Y_{eq}	Amplitude equivalente de pico a pico	
Z	Grau de confiança	

Símbolos gregos

ω	Frequência angular	[rad/s]
Δ	Variação entre duas grandezas similares	
μ_x	Média estatística	
σ_A	Tensão nominal de zero a pico	[MPa]
σ_{eq}	Tensão equivalente de zero a pico	[MPa]
σ_x	Desvio padrão	
σ_x^2	Variância	
τ	Intervalo absoluto de tempo	
γ	Fator de irregularidade	
λ	Largura de banda	
φ	Ângulo de fase	
$\Gamma(.)$	Função gama	

Siglas

ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CSBL	<i>Cigre's Safe Border Line</i>
EDS	<i>Every Day Stress</i>
EPRI	<i>Electric Power Research Institute</i>
IEEE	<i>Institute of Electric and Eletronic Engineers</i>
IFT	<i>Inverse Fourier Transform</i>

PDF *Probability Density Function – Função de densidade de probabilidade*

PSD *Power Spectrum Density – Densidade espectral de potência*

RMS *Root Mean Square – Valor quadrático médio*

S-N *Stress versus Number of cycles – Tensão vs Número de ciclos*

WAFO *Wave Analysis for Fatigue and Oceanography – Análise de Onda para Fadiga e Oceanografia*

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO DO DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

O Brasil, de acordo com o Banco Mundial (2013), já é o sétimo maior consumidor de energia do mundo, de um ranking encabeçado por China e Estados Unidos. O crescimento da população e o desenvolvimento do país levaram a um aumento de demanda de energia, promovendo, conseqüentemente, a ampliação da malha de distribuição de energia elétrica; já que as usinas são situadas longe dos centros consumidores.

A distribuição de energia é feita por linhas de transmissão, LT's, e praticamente todas LT's de alta e extra alta tensão¹, no Brasil, são constituídas por cabos de fios de alumínio encordados sobre uma alma de aço. Com esse tipo de montagem, a alma de aço serve como um reforço ao cabo enquanto que a corrente elétrica é destinada a circular pelos fios de alumínio (LIMA, 2011).

Julgado como o elemento mais importante da rede de distribuição de energia, o cabo condutor está sujeito a ações ambientais, especialmente à ação dos ventos, a qual causará carregamentos dinâmicos e de amplitudes aleatórias sobre ele. Existem três tipos de vibração imposta pelos ventos sobre os cabos condutores: vibração eólica, de subvão e de galope. Devido ao regime de ventos no Brasil, caracterizado por ventos de baixas velocidades (de 1 a 7m/s) e alta frequência (de 3 a 150 Hz), a vibração eólica é o tipo predominante e também a principal causa de falha por fadiga nos cabos condutores de energia (FURTADO, 2001).

No início da década de 80, foi observado um aumento do número de falhas e defeitos atribuídos à vibração eólica, sendo particularmente casos de rompimento por fadiga dos fios de alumínio dos cabos condutores, como pode ser visualizado na Fig. 1.1. Em algumas ocasiões mais severas, o rompimento dos fios de alumínio foi total, o que acarretou no redirecionamento da corrente elétrica para os fios da alma de aço. Dessa forma, a sobrecarga sobre esta alma gerou um aquecimento excessivo, levando ao recozimento do material e, posteriormente, à ruptura total do cabo condutor (FURTADO et al., 2003). Esse tipo de situação indicou uma necessidade de estudar a falha por fadiga em cabos condutores, porque a queda de uma linha de transmissão causa a interrupção do fornecimento de energia elétrica e, por conseguinte, consumidores e serviços são prejudicados.

¹ LT de alta tensão e extra alta tensão são linhas em que a energia é transmitida a tensões nominais de, respectivamente, 69 kV, 138 kV, 230 kV e de 345 kV, 500 kV, 765 kV.

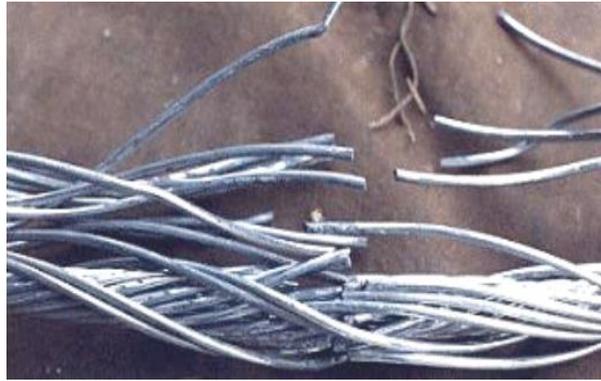


Figura 1.1- Cabo condutor com a maioria dos fios de alumínio rompidos (FURTADO et al., 2003)

Os danos por fadiga são irreversíveis e cumulativos ao longo do tempo. Embora seja certo que a falha do material ocorrerá em algum instante, os estudos nessa área são essenciais para prever quando ela acontecerá. Conforme EPRI (1979), um dos métodos para a detecção prévia de falha em condutores são o uso de gravações de vibração por instrumentos chamados vibrógrafos. Eles são instalados em campo, a 89 mm do último ponto de contato da montagem do cabo com o grampo de suspensão, e captam sinais de vibração de natureza não-estacionária.

Embora possuam uma autonomia relativamente baixa e não gravem o sinal de forma contínua, a importância desse equipamento vem do fato de que a medição dos níveis de vibração eólica proporciona um diagnóstico rápido do cabo condutor com respeito a sua susceptibilidade à fadiga e à vida remanescente que ainda tem. Isso permite que haja uma tomada de decisão de intervir imediatamente para mitigar os efeitos desta vibração ou de adiar o desligamento até a parada programada para a realização da manutenção necessária (CEPEL, 2015).

Os primeiros casos de dano por fadiga em cabos condutores pela ação eólica vêm sendo estudados desde o início do século passado por pesquisadores como Stockbridge (1925), Varney (1926) e Nefzger (1933).

Em 1960, o subcomitê SC6 da CIGRÉ, criado em 1953, apresentou um relatório para investigar as causas de danos por vibrações eólicas em linhas de transmissão, definindo um termo chamado EDS (Every Day Stress), o qual corresponde à maior carga de tração a que um condutor pode ser submetido na temperatura de trabalho estabelecida. Nesse relatório, encontravam-se os valores EDS tabulados para diversos cabos. Se o cabo estivesse tracionado com uma carga abaixo do seu correspondente valor EDS, foi dito que ele não estaria sujeito a danos. Contudo, um grande número de condutores continuou apresentando falhas mesmo dentro da especificação limite.

Dessa forma, foi averiguado que a deformação dinâmica de flexão medida através de extensômetros, localizados na boca dos grampos de suspensão, era o princípio mais próximo relacionado à fadiga de condutores. No entanto, o uso de extensômetros não era o mais adequado para ser aplicado em campo. Por isso, em 1963, Edwards e Boyd propuseram o uso da amplitude de vibração como um parâmetro

relacionado com a deformação de flexão na boca do grampo e essa amplitude seria captada por um gravador instalado sobre a linha.

Em 1965, Poffenberger e Swart formularam uma relação para converter a amplitude de vibração em curvatura dinâmica e tensão de flexão dos fios da camada externa na boca do grampo de suspensão. Um ano mais tarde, o IEEE (Institute of Electrical & Electronic Engineers) recomendou o método da amplitude de flexão como um método prático para avaliar a severidade da exposição à fadiga do condutor aéreo e sugeriu uma equação simples de aproximação para converter a amplitude de flexão em deformação de flexão, baseada na fórmula de Poffenberger-Swart.

Posteriormente, alguns pesquisadores realizaram testes de fadiga de cabos condutores, reproduzindo os efeitos das vibrações eólicas em laboratório. Ramey e Silva (1981) comprovaram que a redução da amplitude de vibração, após o cabo ter sofrido um dano mínimo, não impedia o desenvolvimento de novas quebras. Já Brunair, Ramey e Duncan (1988) realizaram testes para gerar uma curva que relaciona a tensão com o número de ciclos de vida para os cabos, conhecida como curva S-N, e validar a hipótese de dano linear acumulado para os casos de fadiga.

Em 1995, Zhou et al. desenvolveram um aparato experimental para testes de fadiga por fretting dos fios que constituem os cabos condutores e constataram que maiores amplitudes de carga provocavam uma redução à vida do fio.

Henriques (2006) desenvolveu uma bancada experimental para realizar ensaios de fadiga em cabos condutores na Universidade de Brasília. Em 2010, Fadel fez testes em cabos condutores do tipo IBIS, analisando o comportamento deles ao aplicar-lhes cargas de tracionamento mais elevadas, e levantou curvas S-N para o condutor. Em 2014, Watanabe também trabalhou em ensaios experimentais em condutores, com o objetivo de validar a utilização de metodologias espectrais e analisar de forma crítica os meios clássicos de cálculo de previsão de vida de fadiga de cabos condutores.

No que concerne ao cálculo de vida de fadiga no domínio da frequência, em 1964 Bendat desenvolveu o primeiro modelo utilizando essa metodologia, que ficou conhecido como Solução de Banda Estreita. Entretanto, esse modelo era conservador, sendo eficiente apenas para determinadas aplicações. Em função disso, surgiu a necessidade de criar outros modelos para abranger aplicações, tais como as utilizadas nas indústrias offshore e ferroviária.

Nos anos 1980, pesquisadores como Wirsching e Light, Hancock, Chaudhury e Dover, Ortiz e Chen lançaram modelos para resolver o problema do conservadorismo da Solução de banda estreita na indústria offshore. Da mesma forma, Tunna desenvolveu uma equação para os problemas de fadiga na indústria ferroviária. Em 2004, Tovo e Benasciutti criaram um modelo semi-empírico de cálculo do dano de fadiga.

Os pesquisadores mencionados basicamente desenvolveram fatores multiplicadores para corrigir conservadorismo do modelo de Bendat. Por outro lado, Dirlik, em 1985, estabeleceu uma solução empírica para o cálculo do dano de vida de fadiga no domínio da frequência, utilizando a técnica de Monte Carlo, e a sua validação teórica foi feita por Bishop, em 1988.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é verificar a influência do tempo de monitoramento da intensidade de vibração eólica do cabo por um vibrógrafo comercial. Existem duas metodologias para fazer a previsão do tempo de fadiga: uma é feita considerando os dados dos níveis de vibração, captados pelo vibrógrafo, no domínio do tempo, utilizando uma técnica de identificação e contagem de ciclos; e a outra é feita baseando-se em técnicas espectrais, em que o uso dos dados da intensidade de vibração eólica é feito no domínio da frequência. As duas metodologias serão utilizadas, a fim de avaliar qual das duas apresenta melhores condições de análise e resultados, abordando vantagens e desvantagens de cada uma. A expectativa é de que a metodologia espectral exija um menor processamento computacional e um menor tempo de amostragem de dados.

Todo o trabalho será desenvolvido em ambiente computacional, em que algoritmos necessários para a previsão de vida de fadiga serão feitos segundo essas duas metodologias no programa Matlab, tomando como parâmetros os dados e resultados dos ensaios experimentais de fadiga em cabos condutores de energia, realizados por Watanabe (2014), no Laboratório de Fadiga e Integridade Estrutural de Cabos Condutores de Energia, do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está dividido em seis capítulos.

O primeiro capítulo aborda de forma introdutória o contexto do problema, apontando a motivação em que culminou a elaboração da proposta. Adiante, são apresentados os objetivos a serem atingidos ao final e uma revisão bibliográfica a respeito do assunto deste trabalho.

O segundo capítulo é sobre a conceituação teórica, julgada importante para a compreensão do problema e o desenvolvimento do trabalho. Assuntos como fadiga, métodos de estimativa de vida de fadiga no domínio do tempo e no domínio da frequência são explicitados.

O terceiro capítulo tratará da fadiga especificamente em cabos condutores de energia e é descrita a metodologia teórica para realizar um projeto de cabos condutores contra a falha por fadiga.

No quarto capítulo, é apresentada a metodologia adotada para atingir as finalidades deste trabalho. Na primeira seção do capítulo, são expostos os objetivos e os resultados dos ensaios experimentais realizados em cabos condutores de energia por Watanabe (2014). Essa seção é importante, porque os dados obtidos experimentalmente desses ensaios servirão como parâmetros para o desenvolvimento deste trabalho. Na seção seguinte, a metodologia de como o trabalho será feito, em ambiente computacional, é explicada.

No quinto capítulo, é feita uma descrição resumida de como os algoritmos construídos funcionam. Ademais, os resultados são evidenciados, por meio de tabelas e gráficos, assim como uma análise deles.

Por fim, o sexto capítulo aborda as conclusões dos resultados obtidos nesse Projeto de Graduação.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 FADIGA

Frequentemente, observa-se que as falhas em estruturas não ocorrem devido à carregamentos estáticos, mas sim sob a ação de cargas que variam com o tempo. Logo, é comum que, mesmo sendo submetidas a tensões menores do que a própria resistência do material, essas estruturas falhem, porque as tensões foram repetidas por um grande número de vezes. Esse tipo de falha é conhecido por fadiga (SHIGLEY, 2008).

O processo de falha por fadiga ocorre em três estágios: Iniciação de microtrincas; propagação das trincas e fratura do material. As microtrincas, imperceptíveis ao olho nu, surgem em função da deformação plástica cíclica em uma escala microscópica e esse estágio acontece de forma rápida. Em seguida, as microtrincas evoluem para macro trincas, caracterizando o segundo estágio; e, por fim, quando o material remanescente não é capaz de suportar as cargas, a fratura sucede de forma repentina (SHIGLEY, 2008).

Assim, o estudo da previsão de fadiga se tornou essencial ao realizar o projeto de um componente mecânico, com o objetivo de evitar as falhas estruturais e, conseqüentemente acidentes e prejuízos financeiros. Existem três métodos principais de vida de fadiga, que são: o método tensão-vida, deformação-vida e mecânica de fratura linear elástica (SHIGLEY, 2008).

Dos três métodos citados, o mais tradicionalmente usado é o tensão-vida, visto a sua simplicidade e vasta aplicação. Ele surgiu, na Alemanha, em meados de 1850, como resultado do trabalho de August Wöhler, o qual foi o primeiro a investigar cientificamente a falha por fadiga, realizando ensaios em eixos sob flexão rotativa com diferentes amplitudes de carregamento, com o propósito de entender a falha progressiva de eixos de locomotivas. A base do método tensão-vida é a curva S-N ou curva de Wöhler, que relaciona o número de ciclos até que a falha ocorra com um certo nível de tensão (ARIDURU, 2004).

Para estimar a curva S-N, são realizados ensaios em que se submete um corpo de prova a ciclos de tensões alternadas, com amplitude constante, até que o corpo de prova falhe. A tensão média é nula, ou seja, a tensão máxima será equivalente a tensão mínima em módulo. O eixo das abscissas corresponde ao número de ciclos N e o eixo das ordenadas aos níveis de tensão S em escala logarítmica. A relação entre o nível de tensão e o número de ciclos pode ser retratada pela equação 2.1:

$$S = k(N)^m \quad (2.1)$$

Os valores k e m da equação 2.1 são constantes do material e são obtidos após a curva S-N ser levantada experimentalmente. A Fig. 2.1 apresenta um exemplo de uma curva S-N para o aço AISI 4130 submetido a esforços axiais.

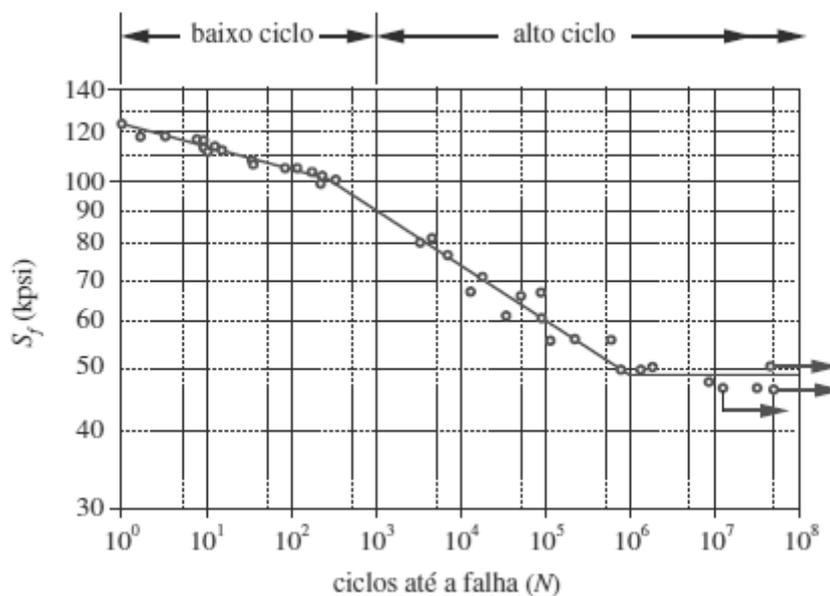


Figura 2.1 - Curva S-N de um ensaio axial alternado para um aço AISI 4130 (NORTON, 2004).

Na Fig. 2.1, a região do gráfico está dividida em duas: baixo ciclo e alto ciclo. A vida de fadiga é classificada em fadiga de baixo ciclo quando o número de ciclos varia de um a 10^3 ; ou em fadiga de alto-ciclo, que ocorre para um número de ciclos maior que 10^3 . Assim, quanto maior for o nível de tensão, menor será a vida do material. Observa-se também na Fig. 2.1 que a curva S-N permanece horizontal após um ponto de inflexão, o qual ocorre em torno de 10^6 ciclos. O nível de tensão em que a inclinação da curva se torna nula corresponde ao limite de fadiga para vida infinita. Quando um material é submetido a cargas abaixo deste limite, isso significa que ele não falhará por fadiga (NORTON, 2004).

A maioria das ligas não ferrosas, por outro lado, não apresenta um limite de fadiga para vida infinita, o que indica que a falha ocorrerá independente da tensão. Assim, estes materiais apresentam uma resposta de fadiga definida como resistência à fadiga (CALLISTER, 2007).

2.2 CARREGAMENTOS DETERMINÍSTICOS E RANDÔMICOS

De acordo com Bishop (1989), um material pode estar sujeito a carregamentos determinísticos ou randômicos. A diferença entre os dois processos é que o determinístico é definido quando estados futuros deste podem ser previstos de forma exata e acurada e é descrito por uma relação matemática. Em contrapartida, com relação a um processo randômico, isso não é possível, pois cada observação do fenômeno será dada de forma única e essas situações serão melhor descritas em termos probabilísticos e estatísticos.

O processo randômico ou processo estocástico pode ser entendido também como um agrupamento de várias amostras de fenômenos aleatórios. Conforme a Fig. 2.2, o processo estocástico é dividido em estacionário e não-estacionário. Um processo randômico estacionário é aquele, cujas propriedades estatísticas médias permanecem as mesmas para qualquer instante de tempo. O processo randômico

estacionário ainda pode ser categorizado em ergódico e não-ergódico. É dito ergódico aquele processo em que uma amostra apresentará a informação estatística do processo todo. (BENDAT e PIERSOL, 1971).

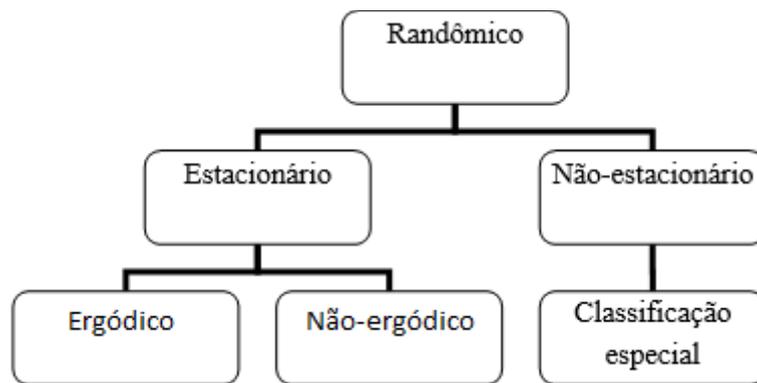


Figura 2.2 - Classificação do processo randômico (Modificado de BENDAT e PIERSOL, 1971)

Contextualizando, ao contrário de, por exemplo, máquinas rotativas, que, ao longo do tempo, estão sujeitas à carregamentos determinísticos (Fig. 2.3 - (a)), componentes estruturais como cabos condutores de energia, pás de turbinas eólicas, plataformas de petróleo, tubulações de petróleo, etc. estão sujeitos a carregamentos aleatórios (Fig. 2.3 - (b)).

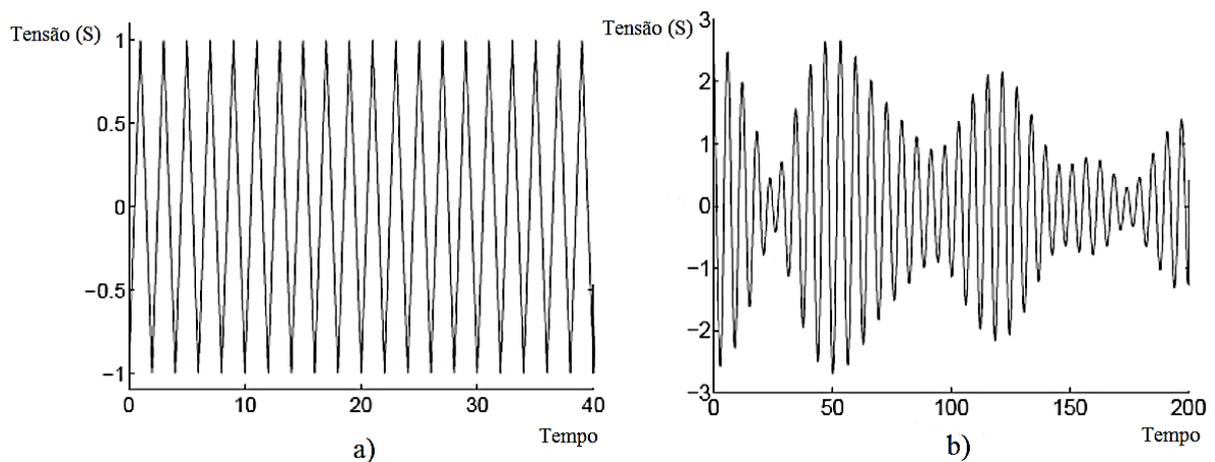


Figura 2.3 – (a) Carregamento de amplitude constante; (b) Carregamento aleatório (JOHANNESSON, 1999)

Percebe-se que a cada instante de tempo, o comportamento da amplitude de tensão é diferente e isso é o que acontece frequentemente na realidade. A grande dificuldade de trabalhar com o carregamento randômico é que ele não pode ser descrito por uma curva S-N, já que esta apresenta a relação entre o número de ciclos e o nível de tensão de um determinado material submetido a apenas carregamentos de amplitude constante. (BISHOP e SHERRAT, 1989).

Para contornar esse problema, foi constatado que o dano por fadiga de um componente ocorre de forma acumulativa, levando-o à fratura. Dessa forma, uma forma de prever a vida de fadiga de materiais

sob carregamentos aleatórios é utilizando a regra de dano acumulativo linear ou Regra de Palmgren-Miner. (LEE et al, 2005).

2.3 PREVISÃO DE VIDA DE FADIGA NO DOMÍNIO DO TEMPO

Ao prever a vida de fadiga de um elemento sujeito a tensões, deve-se primeiro buscar saber que tipo de carregamento este está submetido. Se as tensões forem de amplitude constante, a curva S-N é usada diretamente para a análise de previsão de fadiga. No entanto, na realidade, o carregamento no tempo não costuma ter amplitude constante e, assim, o carregamento é dividido em blocos de tensões de amplitude constante, com o auxílio de um método de contagem de ciclos como o Rainflow. Um histograma das faixas de tensão juntamente com o número de ciclos é realizado, para que, com a aplicação da regra de Palmgren-Miner, a vida de fadiga possa ser estimada (ARIDURU, 2004). A Fig. 2.4 ilustra de forma resumida esse procedimento.

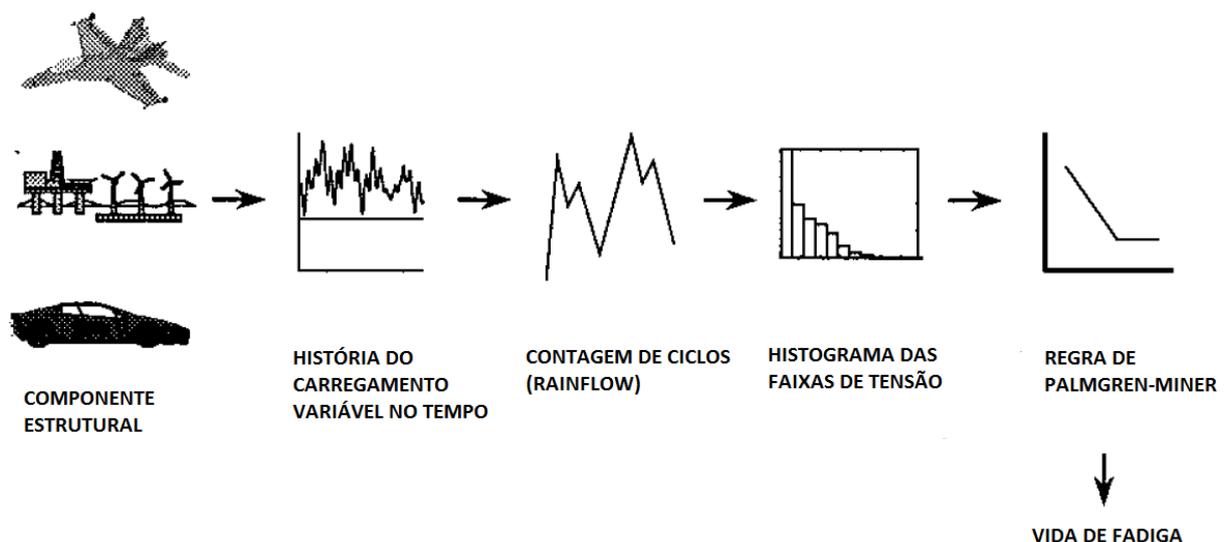


Figura 2.4 - Previsão de vida de fadiga no domínio do tempo (Modificado de BISHOP, 1999)

2.3.1 REGRA DE PALMGREN-MINER

Em 1924, foi proposto o primeiro modelo de dano por Palmgren para aplicação em uma indústria sueca que produzia rolamentos de esferas. Em 1937, enquanto trabalhava na área de geração de energia elétrica na Westinghouse, Langer realizou um trabalho similar, mas independente de Palmgren, para vasos de pressão e componentes de tubulações de aço. Em 1945, Miner aplicou a regra de dano linear em dados de fadiga axial na fuselagem de aviões e obteve resultados condizentes de predição de fadiga em relação aos resultados experimentais. Esse sucesso levou a associação de Miner com o modelo proposto por Palmgren e a regra de acúmulo passou a ser conhecida como regra de Palmgren-Miner (LEE et al. 2005).

A priori, para a utilização da regra de Palmgren-Miner, é necessário que o carregamento seja dividido em blocos de tensões alternantes de amplitude constante (Fig. 2.5) e o objetivo central é estimar quantos blocos de carregamentos são aplicados até que a falha do elemento aconteça. A fim de

transformar o carregamento aleatório em blocos, são utilizados métodos de contagem de ciclo, sendo o Rainflow uma das técnicas mais comumente usada.

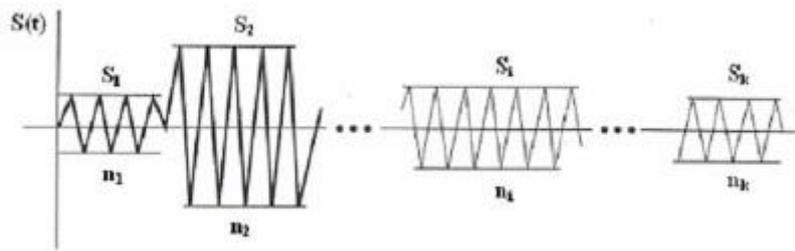


Figura 2.5 - Carregamento randômico expresso na forma de espectro de amplitudes constantes de tensões alternantes (ARIDURU, 2004)

Com o auxílio da curva S-N (Fig. 2.6), verifica-se que, por exemplo, o número de ciclos até a falha de amplitude S_1 seria N_1 , se outras tensões não estivessem presentes. Nesse caso, pode-se dizer que o elemento terá apenas uma fração de dano D_1 quando estiver sujeito a n_1 ciclos de serviço de tensão de amplitude S_1 . Portanto, o dano D_1 é expresso como uma relação de n_1 sobre N_1 .

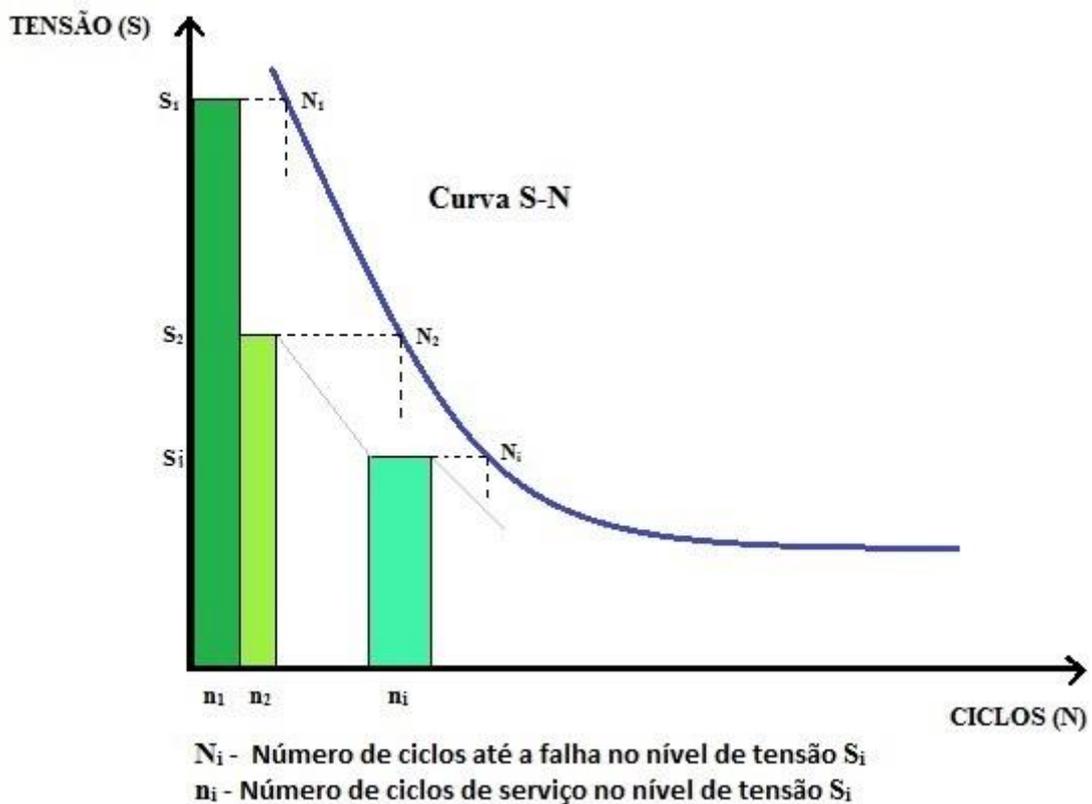


Figura 2.6 – Exemplo de curva S-N, com ciclos de falha e ciclos de serviço indicados para um determinado nível de tensão

A soma de danos D_i , contabilizados para cada nível de tensão S_i , expressa o acúmulo de danos que o elemento sofrerá:

$$D = \sum_{i=0}^k \left(\frac{n_i}{N_i} \right) \quad (2.2)$$

Quando D é nulo, significa que o componente estrutural está com a sua integridade completa. Portanto, a falha ocorrerá quando:

$$D \geq 1 \quad (2.3)$$

De acordo com Juvinal (1967), o somatório do valor dos danos pode variar entre 0,5 e 2, conforme o material e a estrutura. Porém, é comum considerar que, com certa margem de erro, o fim da vida ocorre quando $D = 1$. Logo, o tempo de vida V do material pode ser dito como a razão entre o dano total até a falha (assumido como $D = 1$) e o dano acumulado observado D , como pode ser conferido a seguir:

$$V = \frac{1}{D} \quad (2.4)$$

Caso o valor de V seja menor ou igual a unidade, isso indica que o componente já falhou porque o dano acumulado se igualou ou ultrapassou o dano total. Se V for maior que um, isso indica que ainda há vida remanescente no material.

Conforme Ariduru (2004), a regra de Palmgren-Miner possui algumas limitações e mesmo assim é muito utilizada para estimar a vida de fadiga. Tais limitações podem ser destacadas como:

- i) Linear: Assume-se que todos os ciclos de determinada magnitude causam o mesmo dano, não importando a ordem que são aplicados;
- ii) Não-interativo: A presença de uma tensão de magnitude S_2 etc. não vai interferir no dano causado por uma tensão S_1 ;
- iii) Tensões independentes: Assume-se que dano causado por S_1 e por S_2 etc. são governados pela mesma regra.

2.3.2 MÉTODO RAINFLOW DE CONTAGEM DE CICLOS

Como abordado anteriormente, com o propósito de aplicar a regra linear de dano ou regra de Palmgren-Miner, é preciso que o carregamento seja dividido em blocos de amplitudes constantes e, para isso, utiliza-se o método de contagem de ciclos e, frequentemente, é utilizado o Rainflow.

O método Rainflow foi apresentado por M. Matsuiski e T. Endo em 1968 e é uma técnica de contagem de ciclos, o qual se baseia no trajeto da queda dos pingos de chuva em um telhado tipicamente japonês, o pagoda roof. Essa analogia é visualizada quando o gráfico Tensão vs. Tempo é girado em 90°

no sentido horário, de forma que o eixo positivo do tempo fique apontando para baixo (Fig. 2.7 - (a), (b) e (c)).

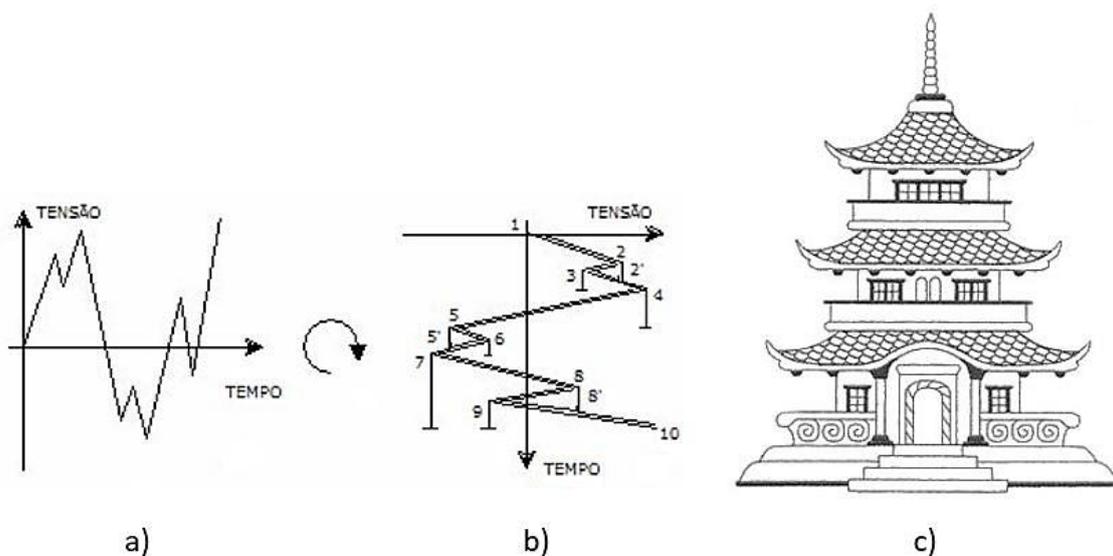


Figura 2.7 - (a) Gráfico Tensão vs. Tempo (PragTic, 2007); (b) Gráfico Tensão x Tempo girado em 90° no sentido horário (PragTic, 2007); (c) Ilustração de uma casa com um telhado japonês (Pagoda roof)

Sabendo que um pico corresponde a um máximo instantâneo, um vale é dito um ponto mínimo instantâneo, faixa é a diferença absoluta entre um pico e um vale e que um ciclo surge de um mínimo, passa por um máximo e finaliza em um mínimo, a norma ASTM E 1049 define os procedimentos para a aplicação do método Rainflow:

Denota-se X o intervalo em questão; Y a faixa anterior adjacente a X e S o ponto de partida na história.

- (1) Leia o próximo pico ou vale. Se estiver fora dos dados, vá para a etapa 6.
- (2) Se houver menos de três pontos, vá para a etapa 1. É necessário formar intervalos de X e Y usando os três picos e vales mais recentes que não tenham sido descartados.
- (3) Compare os valores absolutos dos intervalos de X e Y .
 - a. se $X < Y$, vá para a etapa 1.
 - b. se $X \geq Y$, vá para a etapa 4.
- (4) Se o intervalo Y contém o ponto de partida S , vá para o passo 5; caso contrário, conte o intervalo Y como um ciclo e descarte o pico e o vale de Y ; vá para o passo 2.
- (5) Conte o intervalo Y como um meio ciclo, descarte o primeiro ponto (pico ou vale) no intervalo de Y ; mova o ponto de partida para o segundo ponto no intervalo Y ; e vá para a etapa 2
- (6) Conte cada intervalo que não tenha sido previamente considerado como metade de um ciclo.

Com base na Fig. 2.8, esse procedimento pode ser exemplificado da seguinte forma:

- (1) $S = A$; $Y = |A-B|$; $X = |B-C|$; $X > Y$. Y contém S , que é o ponto A . Conta-se $|A-B|$ como um meio ciclo e descarta-se o ponto A ; $S = B$ (Fig. 2.8 - (b)).
- (2) $Y = |B-C|$; $X = |C-D|$; $X > Y$. Y contém S , que é o ponto B . Conta-se $|B-C|$ como um meio ciclo e descarta-se o ponto B ; $S = C$ (Fig. 2.8 - (c)).
- (3) $Y = |C-D|$; $X = |D-E|$; $X < Y$.
- (4) $Y = |D-E|$; $X = |E-F|$; $X < Y$.
- (5) $Y = |E-F|$; $X = |F-G|$; $X > Y$. Conta-se $|E-F|$ como um ciclo e descarta-se os pontos E e F (Fig. 2.8 - (d)). Nota-se que o ciclo é formado pelo emparelhamento dos intervalos $E-F$ e a porção do intervalo $F-G$.
- (6) $Y = |C-D|$; $X = |D-G|$; $X > Y$, Y contém S , que é o ponto C . Conta-se $|C-D|$ como um meio ciclo e descarta-se o ponto C . $S = D$ (Fig. 2.8 - (e)).
- (7) $Y = |D-G|$; $X = |G-H|$; $X < Y$.
- (8) $Y = |G-H|$; $X = |H-I|$; $X < Y$. Fim dos dados.
- (9) Conta-se $|D-G|$ como um meio ciclo, $|G-H|$ como um meio ciclo, e $|H-I|$ como um meio ciclo (Fig. 2.8 - (f)).
- (10) Fim da contagem.

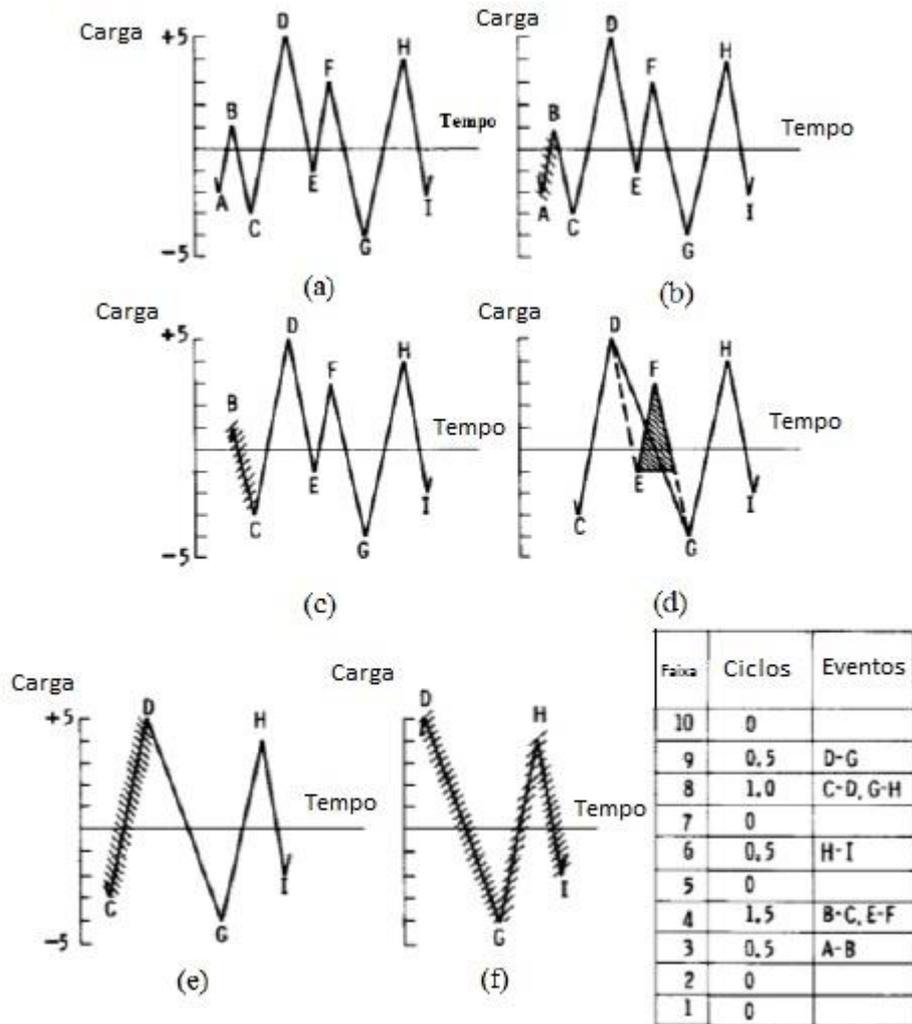


Figura 2.8 - Exemplo de utilização do método *Rainflow* (Modificado de ASTM E, 1049)

2.4 PREVISÃO DE VIDA DE FADIGA NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

Embora as análises de fadiga possam ser determinadas tradicionalmente estudando o comportamento do carregamento no domínio do tempo, há casos em que tais carregamentos não são definidos facilmente no domínio do tempo. Nesse sentido, uma alternativa é realizar o cálculo de vida de fadiga utilizando dados coletados no domínio da frequência.

A análise no domínio da frequência consiste basicamente na representação, por meio da utilização da transformada de Fourier, do carregamento aleatório, a que um componente estrutural está submetido, na forma de densidade de espectro de potência (Power Spectrum Density - PSD). Com base nessa representação, momentos espectrais são extraídos da PSD com o enfoque de representar o carregamento em uma função de densidade de probabilidade (Probability Density Function - PDF). A partir disso, a vida de fadiga é obtida (ARIDURU, 2004) (Fig. 2.9).

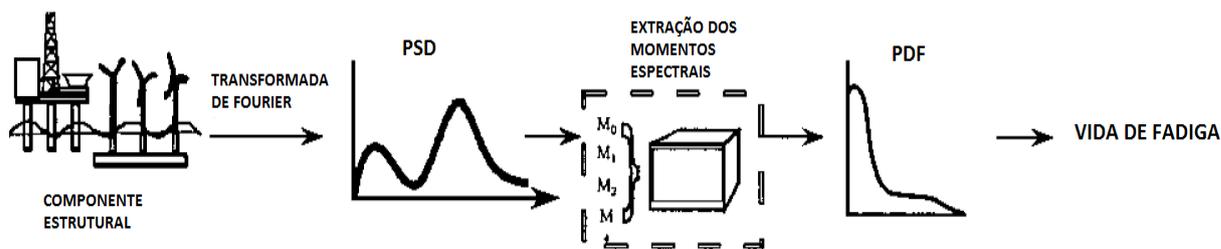


Figura 2.9 - Previsão de vida de fadiga no domínio da frequência (Modificado de BISHOP, 1999)

2.4.1 DENSIDADE DE ESPECTRO DE POTÊNCIA – PSD

Descrever um carregamento no domínio da frequência é representá-lo em um gráfico, cujo eixo das abscissas será dado em termos da frequência do sinal em vez de ser do tempo. O gráfico mencionado é denominado densidade de espectro de potência (PSD) do carregamento.

Inicialmente, de forma simples, a fim de exemplificar esse conceito, a Fig. 2.10 – (a) ilustra um carregamento periódico e de amplitude constante no domínio do tempo. Para representar esse mesmo sinal no domínio de sua frequência (Fig. 2.10 – (b)), a transformada de Fourier é aplicada. Pode-se ver da Fig. 2.10 que a representação do carregamento na PSD aparece como uma única coluna centralizada na frequência da onda senoidal. Bishop (1999) afirma que, em teoria, essa coluna deveria ser infinitamente alta e infinitamente fina para uma onda puramente senoidal. No entanto, como toda onda senoidal é usada, por definição, com um tamanho finito, então ela terá uma altura e largura finitos também.

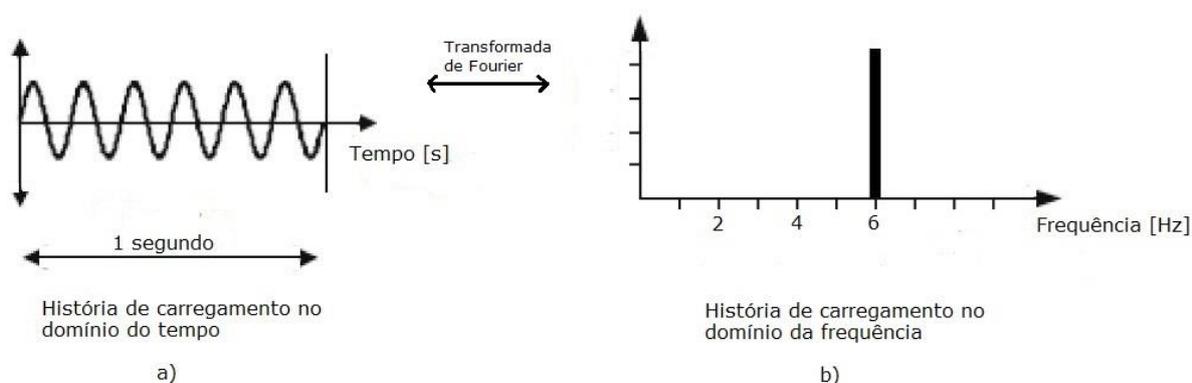


Figura 2.10 – (a) História de um carregamento de amplitude constante no domínio do tempo, (b) História de um carregamento de amplitude constante no domínio da frequência (Modificado de BISHOP, 1999)

Por outro lado, como nem sempre carregamentos determinísticos serão trabalhados, é necessário saber como proceder com um carregamento randômico. Como mostra a Fig. 2.11, um sinal de amplitude variada pode ser dividido em várias ondas senoidais de frequências, amplitudes e fases diferentes. Cada onda senoidal individual pode ser expressa como uma coluna na PSD do sinal aleatório (BISHOP, 1999).

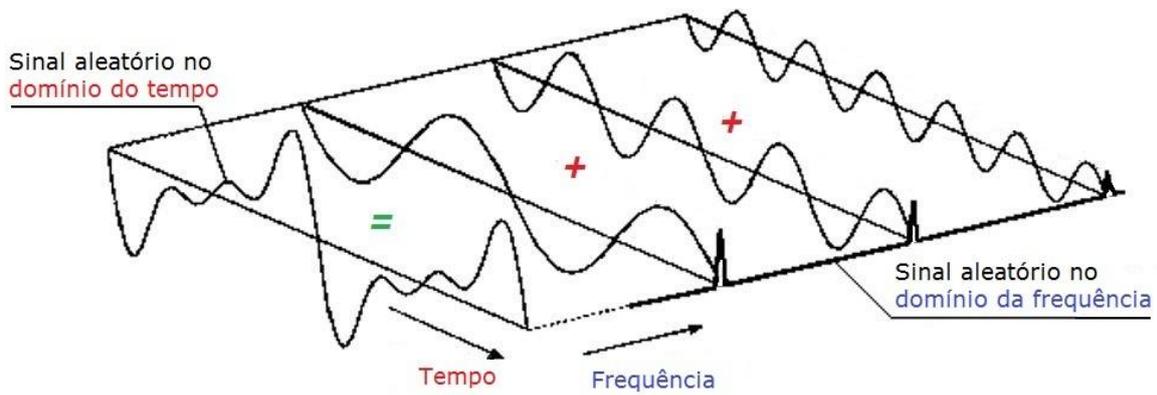


Figura 2.11 – Densidade espectral de potência de um sinal aleatório (Modificado de SINAIS INGENIERIA, 2013)

Na PSD, apenas a amplitude de cada onda senoidal que compõe o sinal aleatório é retida e toda a informação sobre a fase é descartada. Porém, para um processo gaussiano, estacionário e aleatório, foi observado que os ângulos de fase são distribuídos de forma aleatória e, assim, o fato de que a PSD fornece nenhuma informação sobre a relação entre a onda senoidal e a fase representa nenhum problema. Assim sendo, a PSD caracteriza a energia de um sinal, que está inicialmente representado no domínio do tempo, em diferentes frequências, e a área abaixo de cada coluna é a média quadrática de cada onda senoidal em sua respectiva frequência (BISHOP, 1999).

A transformada de Fourier é aplicada no sinal do domínio do tempo para obter a PSD do carregamento enquanto que a transformada inversa de Fourier realiza exatamente o contrário (LEE et al. 2005). Sabendo que $X(t)$ é a função do processo randômico no tempo, este conceito pode ser expresso matematicamente pelo par de equações a seguir:

$$X(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} X(t)e^{-i\omega t} dt \quad (2.5)$$

$$X(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(\omega)e^{i\omega t} d\omega \quad (2.6)$$

A função $X(\omega)$ é a transformada de Fourier da função $X(t)$ e a função $X(t)$ é a transformada inversa de $X(\omega)$. Nas equações, t é o instante de tempo e ω é a frequência angular expressa em rad/s. Mas a variação da frequência angular pode ser escrita também em termos do período T do carregamento:

$$\Delta\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (2.7)$$

A transformada de Fourier também só pode ser utilizada se o sinal considerado for estacionário, randômico e gaussiano, ou seja, se a função de densidade de probabilidade tiver uma distribuição normal (LEE et al. 2005) (Fig. 2.12).

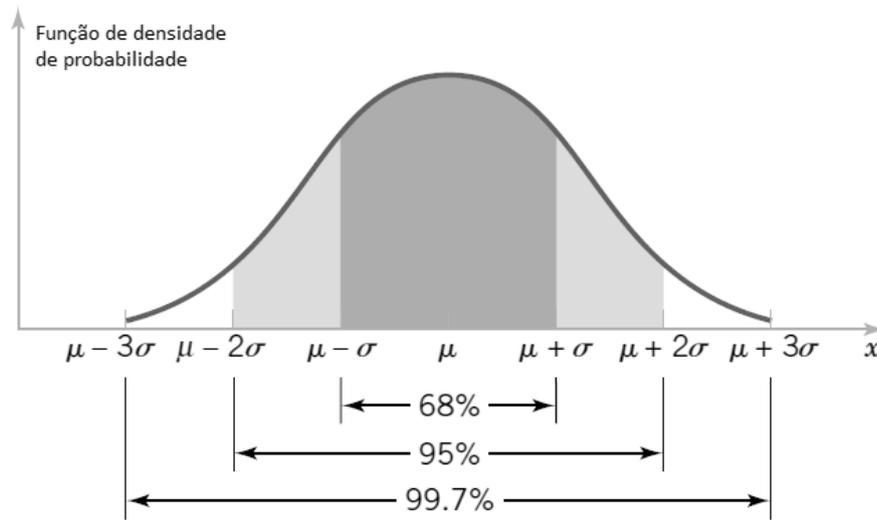


Figura 2.12 - Distribuição normal de probabilidade (Modificado de MONTGOMERY e RUNGER, 2005)

Em se tratando do campo probabilístico, a média e a variância são dois parâmetros importantes. A média (μ_x) é a soma dos valores dividida pela quantidade deles. A variância (σ_x^2) mede a dispersão dos valores em relação ao valor esperado e é definida como o desvio padrão elevado ao quadrado. A média e a variância podem ser expressas, respectivamente, pelas equações a seguir:

$$\mu_x \cong \frac{1}{T} \int_0^T X(t) dt \quad (2.8)$$

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{T} \int_0^T [X(t) - \mu_x]^2 dt \quad (2.9)$$

Quando a média é nula, o valor quadrático médio do carregamento (Root Mean Square - RMS), um outro parâmetro estatístico da amplitude do carregamento, é igual ao desvio padrão (LEE et al. 2005).

A transformada de Fourier existirá se as seguintes condições forem verdadeiras:

- (i) A integral absoluta da função $X(t)$ existe, ou seja, $\int_{-\infty}^{+\infty} |X(t)| dt < \infty$;
- (ii) As descontinuidades são finitas.

Contudo, conforme LEE et al. (2005), a condição (i) geralmente não é atendida em se tratando de um sinal de carregamento estacionário e randômico. Em compensação, a transformada de Fourier da função de auto correlação sempre existe. A função de auto correlação $R(\tau)$, em que $\tau = |t_1 - t_2|$, de um processo $X(t)$ é definida aproximadamente como a média do produto de duas variáveis aleatórias, ou seja:

$$R(\tau) = E[X(t_1)X(t_2)] \quad (2.10)$$

Se o processo estacionário randômico $X(t)$ for normalizado para que se tenha uma média nula, $\mu_x = 0$, então a condição de que a integral absoluta da função de auto correlação existe, ou seja,

$\int_{-\infty}^{+\infty} |R(\tau)| dt < \infty$, é atendida. Portanto, as transformadas direta e inversa de Fourier da função de auto correlação são dadas, nessa ordem, por:

$$S_x(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} R(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (2.11)$$

$$R(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} S_x(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega \quad (2.12)$$

$S_x(\omega)$ é a densidade espectral de um processo aleatório estacionário normalizado. Se o intervalo de tempo absoluto τ for nulo, a área abaixo da curva de densidade espectral de potência é igual ao valor RMS do processo randômico estacionário elevado ao quadrado e a equação 2.12 se reduz a (LEE et al. 2005):

$$R(0) = \int_{-\infty}^{+\infty} S_x(\omega) d\omega = E [X^2] \quad (2.13)$$

Diferentemente do significado matemático, não faz sentido físico a frequência ser negativa. Ou seja, é comum considerar que a frequência varia de zero até o infinito e expressá-la em unidades hertz [1/s]. Por essa razão, uma densidade espectral bilateral (Two-sided) $S_x(\omega)$ pode ser transformada em uma equivalente unilateral (One-sided) $W_x(f)$ ², como pode ser visto a seguir (LEE et al. 2005):

$$E [X^2] = \int_0^{+\infty} W_x(f) df = \sigma_x^2 \quad (2.14)$$

Sendo que:

$$W_x(f) = 4\pi S_x(\omega) \quad (2.15)$$

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (2.16)$$

2.4.2 MOMENTOS ESPECTRAIS

Usualmente, as análises de estimativa de vida de fadiga são feitas com base em algum método de contagem de ciclos de tensão. Como visto anteriormente, no domínio do tempo o método mais comumente utilizado é o Rainflow. Já no domínio da frequência, segundo Bishop (1999), a forma mais conveniente de armazenar os ciclos de amplitude de tensão, do ponto de vista matemático, é por meio de uma função de densidade de probabilidade (PDF).

² Densidade espectral unilateral (One-sided): É uma função em que a frequência é definida nos limites 0 a $+\infty$
Densidade espectral bilateral (Two-sided): É uma função em que a frequência é definida nos limites $-\infty$ a $+\infty$

A fim de obter a função de densidade de probabilidade (PDF) diretamente a partir da densidade espectral da tensão, são extraídos momentos da PSD, os quais contêm toda a informação requerida para estimar a vida de fadiga de um componente estrutural. O n-ésimo momento de uma densidade espectral unilateral é calculado a partir da equação a seguir (BISHOP, 1999):

$$m_n = \int_0^{\infty} W_x(f) \cdot f^n df \quad (2.17)$$

Esse processo de extração dos momentos espectrais é ilustrado pela Fig. 2.13.

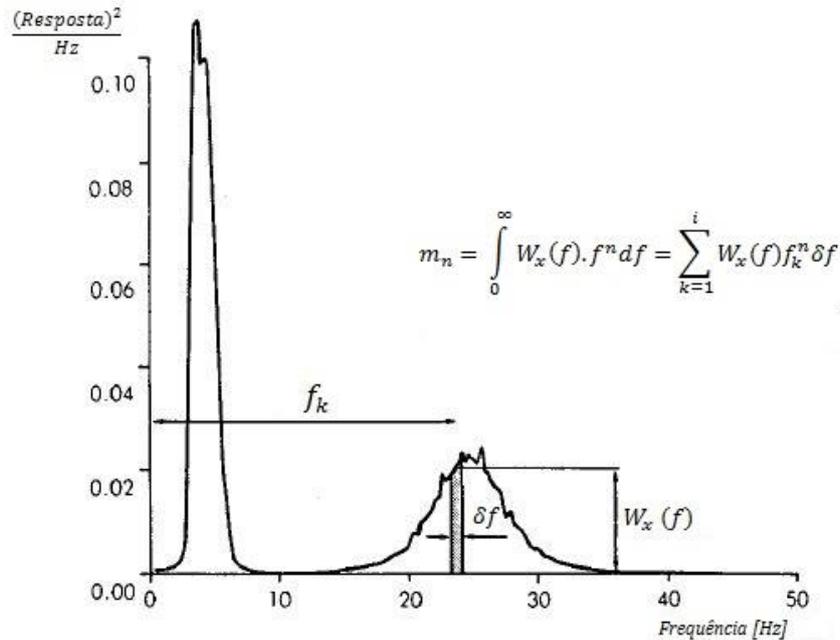


Figura 2.13 - Extração dos momentos espectrais de uma PSD (Modificado de BISHOP, 1989)

Para caracterizar todo o processo randômico de forma mais precisa, seria essencial calcular todos os momentos espectrais possíveis. Porém, de acordo com Bishop (1999), apenas os quatro primeiros momentos, ditos como m_0, m_1, m_2 e m_4 , são o suficiente para computar toda a informação necessária para a análise de fadiga.

Observa-se que o momento espectral zero, m_0 , será equivalente à variância.

2.4.3 TAXA DE CRUZAMENTO DE NÍVEL ZERO E DE PICOS E O FATOR DE IRREGULARIDADE

Dois parâmetros importantes, que são expressos em termos dos momentos espectrais, são a taxa de cruzamento do sinal no nível zero e a taxa de picos que esse sinal tem no domínio do tempo.

A taxa de cruzamento de nível zero:

$$E[0^+] = \sqrt{\frac{m_2}{m_0}} \quad (2.18)$$

E a taxa de picos:

$$E[P] = \sqrt{\frac{m_4}{m_2}} \quad (2.19)$$

Ao fazer uma relação entre a taxa de cruzamento de nível zero com a taxa de picos, obtém-se o fator de irregularidade, definido pela fórmula a seguir:

$$\gamma = \frac{E[0^+]}{E[P]} \quad (2.20)$$

Ou, em função dos momentos espectrais:

$$\gamma = \sqrt{\frac{m_2^2}{m_0 m_4}} \quad (2.21)$$

O fator de irregularidade medirá essencialmente quantos picos um sinal tem para cada vez que ocorre um cruzamento do sinal no nível de tensão zero. Por exemplo, na Fig. 2.14, para uma amostra que dura um tempo T , existem sete picos para quatro cruzamentos de zero. Portanto, o fator de irregularidade é igual a $\gamma = 4/7$.

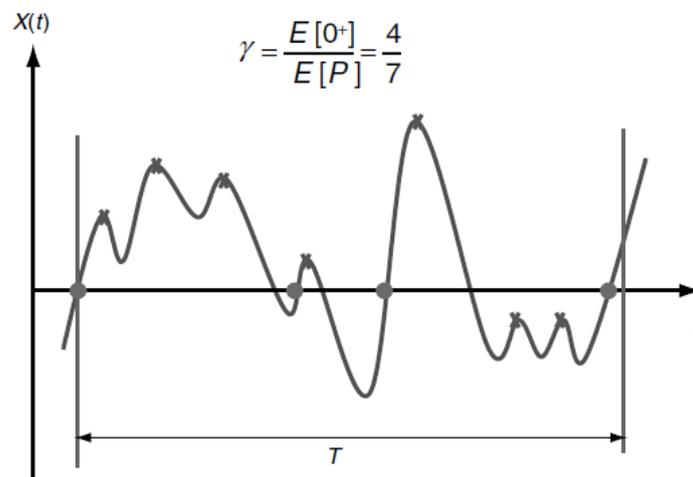


Figura 2.14 - Exemplo de cálculo do fator de irregularidade (LEE et al. 2005)

Com relação a formulação de fator de irregularidade, a abordagem da classificação do sinal quanto a largura de banda se torna importante. A largura de banda pode ser definida de forma simples como a diferença entre a maior e a menor frequência transmitida em um processo.

Quando o fator de irregularidade tende a um, isso significa que para cada pico, haverá aproximadamente um cruzamento em nível de zero e é dito que o processo possui uma largura de banda estreita. No entanto, quando a largura de banda é larga, diz-se que o fator de irregularidade tenderá a zero, ou seja, haverá infinitos picos para cada cruzamento de nível de zero (LEE et. al 2005).

A Fig. 2.15 – (a) ilustra um exemplo para um processo de banda estreita, mostrando que o sinal é composto de ondas senoidais que abrangem um curto espectro de frequência e é mais regular. Por outro lado, conforme a Fig. 2.15 – (b), em se tratando de um sinal de banda larga, a sua composição será de ondas senoidais cobrindo um longo espectro de frequências e o processo será denotado mais irregular (ARIDURU, 2004).

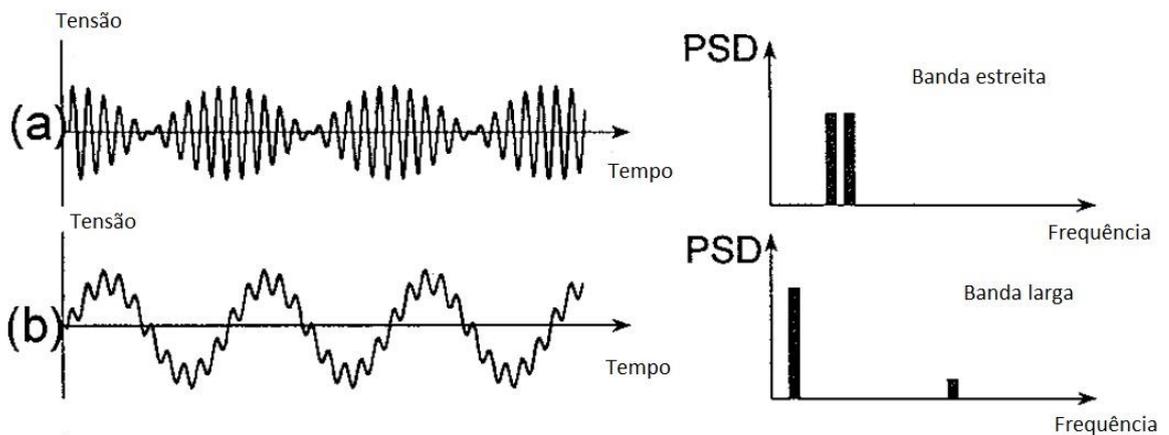


Figura 2.15 - (a) Sinal de banda estreita; (b) Sinal de banda larga (Modificado de BISHOP, 1999)

A largura de banda é representada pela equação 2.22:

$$\lambda = \sqrt{1 - \gamma^2} \quad (2.22)$$

2.4.4 FÓRMULA GERAL DE DANO DE FADIGA NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

De posse da largura de banda, denotada aqui como dS , do processo e do número total de ciclos armazenados no histograma de tensão de rainflow N_t , é possível obter uma PDF, como a que foi representada pela Fig. 2.16. Com base nela, a probabilidade de certa amplitude S_i de tensão ocorrer entre $S_i - \frac{dS}{2}$ e $S_i + \frac{dS}{2}$ é o produto $p(S_i) \cdot dS$ (Equação 2.23).

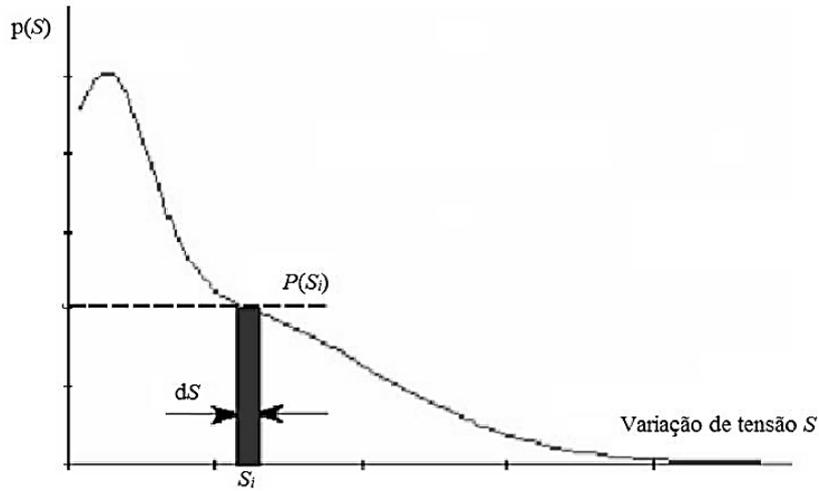


Figura 2.16 – Representação de uma curva de função de densidade de probabilidade (CESÁRIO, 2012)

$$P \left[S_i - \frac{dS}{2} \leq S_i \leq S_i + \frac{dS}{2} \right] = p(S_i)dS \quad (2.23)$$

E o número de ciclos de serviço $n_i(S)$ correspondente a uma tensão S é dado pela equação 2.24.

$$n_i(S) = p(S)dS N_t \quad (2.24)$$

O número total de ciclos até a falha no nível de tensão S , utilizando a curva de Wöhler, pode ser descrito de acordo com a equação a seguir:

$$N(S_i) = kS^{-m} \quad (2.25)$$

Retomando os conceitos da regra de Palmgren-Miner e a equação 2.2, o dano de fadiga utilizando a PDF é dado pela equação 2.26.

$$D = \sum_{i=0}^k \left(\frac{n_i(S)}{N_i(S_i)} \right) = \sum_{i=0}^k \frac{p(S) dS N_t}{k S^{-m}} \quad (2.26)$$

Considerando que o número total de ciclos N_t durante um intervalo de tempo T é dado pela expectativa de picos $E[P]$ multiplicada pelo mesmo período de tempo, então a equação 2.26 é reescrita da seguinte forma:

$$D = \sum_{i=0}^k \frac{p(S) dS E[P] T}{k S^{-m}} \quad (2.27)$$

Por fim, a equação geral para a estimativa do dano de fadiga é representada pela equação 2.28.

$$D = \frac{E[P]}{k} T \int_0^{\infty} S^m p(S) dS \quad (2.28)$$

2.4.5 MODELOS DE ESTIMATIVA DE VIDA DE FADIGA NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

Em 1964, Bendat desenvolveu o primeiro modelo de estimativa de dano de fadiga utilizando a PSD, chamado de Solução de Banda Estreita, e julgava que cada pico é seguido por um vale de mesma amplitude em um histórico de tensão no tempo. No entanto, esse tipo de consideração excluía casos em que havia vales positivos e picos negativos, características presentes em processos de banda larga, como é observado na Fig. 2.17. Conseqüentemente, era interpretado que cada vale positivo tinha o seu correspondente negativo (da mesma forma para picos negativos), gerando mais ciclos de tensão do que o sinal original. Por esse motivo, para processos de banda larga o processo se torna conservador, por indicar falhas em períodos de tempo inferiores ao que se verifica experimentalmente (BISHOP, 1999).



Figura 2.17 – Limitação da Solução de Banda Estreita para um sinal banda larga (REIS, 2013)

A função de distribuição de probabilidade é baseada em uma distribuição Rayleigh, dada pela equação 2.29, e o dano de banda estreita D_{NB} é descrito pela equação 2.30.

$$p(S) = \frac{S}{4 m_0} e^{\frac{-S^2}{8m_0}} \quad (2.29)$$

$$D_{NB} = \frac{E[P]}{k} T \int_0^{\infty} S^m \left[\frac{S}{4 m_0} e^{\frac{-S^2}{8m_0}} \right] dS \quad (2.30)$$

Por causa do conservadorismo da Solução de Banda Estreita, alguns pesquisadores desenvolveram outros modelos para lidar com processos de banda larga, como aqueles estabelecidos por Tunna, Wirsching e Light, Steinberg, Ortiz e Chen, Tovo e Benasciutti, Hamcock, Chaudury e Dover (CESÁRIO, 2012). Dirlik, em contrapartida, lançou uma solução fechada e empírica, que foi obtida por meio de simulações de Monte Carlo, e verificada em 1988 por Bishop. Essa solução talvez seja também a mais famosa aproximação empírica da distribuição de carga Rainflow. No modelo de Dirlik, a distribuição de carga (PDF) é dada pela equação 2.31:

$$p(S) = \frac{1}{2\sqrt{m_0}} \left[\left(\frac{D_1}{Q} e^{-\frac{Z}{Q}} \right) + \left(\frac{D_2 \times Z}{R^2} e^{-\frac{Z^2}{2R^2}} \right) + \left(D_3 \times Z \times e^{-\frac{Z^2}{2}} \right) \right] \quad (2.31)$$

Os termos D_1 , R , D_2 , D_3 , Q e Z são descritos, nessa ordem, a seguir:

$$D_1 = \frac{2 \left[\frac{m_1}{m_0} \sqrt{\frac{m_2}{m_4} - \alpha^2} \right]}{1 + \alpha^2} \quad (2.32)$$

$$R = \frac{\alpha - \frac{m_1}{m_0} \sqrt{\frac{m_2}{m_4} - D_1^2}}{1 - \alpha - D_1 + D_1^2} \quad (2.33)$$

$$D_2 = \frac{1 - \alpha - D_1 + D_1^2}{1 - R} \quad (2.34)$$

$$D_3 = 1 - D_1 - D_2 \quad (2.35)$$

$$Q = \frac{1,25 (\alpha - D_3 - D_2 R)}{D_1} \quad (2.36)$$

$$Z = \frac{S}{2\sqrt{m_0}} \quad (2.37)$$

A fim de obter a intensidade de dano de fadiga de Dirlik D_{Dirlik} , a equação 2.31 é substituída na equação 2.28 e obtém-se a expressão da equação 2.38:

$$D_{Dirlik} = \frac{E[P]}{k} (\sqrt{m_0})^m \left[D_1 Q^m \Gamma(1 + m) + \sqrt{2}^m \Gamma\left(1 + \frac{m}{2}\right) (D_2) |R|^m + D_3 \right] \quad (2.38)$$

Em que $\Gamma(\cdot)$ é a função gama.

Retomando a equação 2.4, o tempo de vida do material será dado pelo inverso do dano acumulado, calculado com o uso da PSD, considerando que a falha ocorrerá quando o dano total é igual a uma unidade.

3. FADIGA EM CABOS CONDUTORES DE ENERGIA

3.1 CABOS CONDUTORES DE ENERGIA ELÉTRICA

Dentro do contexto de transmissão de energia, o cabo condutor de energia é evidenciado como o elemento mais importante de transporte de energia elétrica. Um projeto adequado, considerando as condições adversas a que ele estará exposto, é fundamental para evitar falhas de fornecimento de energia elétrica para os consumidores e, conseqüentemente, prejuízos para empresas e desconforto para as pessoas.

Os cabos de linhas de transmissão são constituídos por camadas de fios metálicos, enrolados de forma helicoidal e estão dispostos de forma concêntrica em relação a um fio central (ou um grupo central de fios), chamado de alma (Fig. 3.1).



Figura 3.1 - Cabo condutor, feito de liga de alumínio (NEXANS, 2009)

Os cabos condutores podem ser classificados conforme o material de composição e a geometria de construção. A tabela 3.1 relaciona os principais tipos de condutores.

Tabela 3.1 - Principais tipos de cabos condutores de energia

Tipo de condutor	Descrição
CA (AAC)	Cabos de Alumínio (All Aluminium Conductor)
CAA (ACSR)	Cabos de Alumínio com Alma de Aço (Aluminium Conductor Steel Reinforced)
CAL (AAAC)	Cabos de Alumínio Liga (All Aluminium Alloy Conductor)
ACAR	Cabos de Alumínio com Alma de Liga de Alumínio (Aluminium Conductor Allor Reinforced)
TW	Fios Trapezoidais (Trapezoizal Wires)

3.2 EXCITAÇÃO EÓLICA

Com relação à falha dos cabos, o principal motivo para causá-la talvez seja a vibração devido à ação dos ventos e, assim, a vida útil do cabo relaciona-se com a ocorrência dessa vibração juntamente com as amplitudes decorrentes. Neste sentido, existe uma dificuldade para prever o comportamento vibratório dos cabos com precisão na fase de projeto da linha de transmissão, o que acaba por limitar alguns parâmetros, como carga de tração dos cabos e o comprimento dos vãos entre as torres (EPRI, 1979).

Existem três tipos de vibração a que um cabo condutor poderá estar sujeito: oscilação de subvão, galope do condutor e vibração eólica.

As oscilações de subvão ocorrem devido à esteira gerada de um condutor adjacente, geralmente abrangem uma baixa faixa de frequência e são causadas por ventos laterais moderados a fortes, com velocidades de 4 a 18 m/s (CIGRÉ, 2007).

As oscilações do tipo galope de condutor acontecem em regiões em que há tempestades de neves, pois, na presença de ventos com velocidades de 7 a 18 m/s, a camada de gelo ou neve que se acumula sobre o cabo forma um perfil aerodinamicamente instável (CIGRÉ, 2007).

Já as vibrações eólicas são consideradas mais perigosas em relação às outras duas, por não serem facilmente detectáveis numa inspeção visual. Apresentam pequenas amplitudes, causadas por ventos fracos a moderados, com velocidades de aproximadamente 0,8 a 8 m/s e são mais frequentes nas linhas de transmissão. Por essas razões, a vibração eólica costuma ser a base para um projeto de linha de transmissão (HENRIQUES, 2006).

Devido à inexistência de acúmulo de gelo nas linhas de transmissão, responsável pela oscilação do tipo galope, esse tipo de excitação é bem raro no Brasil. Porém, os cabos brasileiros podem apresentar massas concentradas, como é o caso das esferas sinalizadoras, e pode vir a acontecer o galope. A oscilação de subvão também é pouco frequente no Brasil em função do regime de ventos brasileiros (FADEL, 2010).

Na tabela 3.2, está exposta uma comparação entre os três tipos de vibração apresentados.

Tabela 3.2 - Comparação entre os três tipos de vibração a que um cabo condutor está sujeito, citado por HENRIQUES (2006) (FURTADO, 2001)

CARACTERÍSTICAS	VIBRAÇÃO EÓLICA	GALOPE	OSCILAÇÃO DE SUBVÃO
Tipo de LT afetada	Todas	Todas	Cabos geminados
Faixa de frequência	3 a 150 Hz	0,08 a 3 Hz	0,15 a 10 Hz
Faixa de amplitude (em rel. ao diâmetro do cabo)	0,01 a 1	5 a 300	Modo corpo rígido: 0,5 a 80; Modo de subvão: 0,5 a 20
Condições de ambiente que favorecem:			
Tipo de vento	Laminar	Laminar	Laminar
Velocidade do vento	1 a 7m/s (3,6 a 25 km/h)	7 a 18 m/s (25 a 65 km/h)	4 a 18 m/s (14 a 65 km/h)
Superfície do cabo	Nua ou com gelo uniforme	Gelo assimétrico	Nua, seca
Condições de projeto que influenciam	Tensão de esticamento, autoamortecimento dos cabos, uso de amortecedores, armaduras	Razão da frequência natural vertical para a de torção, catenária e condições de suporte	Separação dos subcondutores, torção do feixe, arranjo dos subcondutores, distâncias entre espaçadores
Danos			
Tempo aproximado para ocorrência	2 meses a mais de 20 anos	1 a 48 horas	1 mês a mais de 8 anos
Causas diretas	Falha devido à fadiga	Altas cargas dinâmicas	Impacto de condutores, abrasão, desgaste acelerado de ferragens
Componentes mais afetados	Cabos condutores de energia e pára-raios	Condutores, ferragens, isoladores, estruturas	Ferragens de suspensão, espaçadores, amortecedores, cabos

A causa das vibrações causadas pela ação do vento baseia-se na passagem do ar ao redor do condutor. Analisando essa situação no âmbito da mecânica dos fluidos, considera-se que o cabo é modelado como um cilindro de seção transversal circular e é possível classificar o escoamento do ar por ele quanto ao número de Reynolds Re , representado pela fórmula a seguir:

$$Re = \frac{Ud_n}{\nu} \quad (3.1)$$

Na fórmula apresentada, U é a velocidade de escoamento, d_n é o diâmetro do cabo e ν é viscosidade cinemática do ar. O número de Reynolds expressa basicamente a relação entre os efeitos inerciais e os efeitos viscosos.

Quando o número de Reynolds é baixo, ou seja, $Re < 5$ (Fig. 3.2- (a)), as partículas do ar realizam a trajetória completa de D até F, passando pelo ponto E. Em outras palavras, após atingir o ponto D, o ponto em que a pressão é tida como máxima na superfície cilindro, as partículas de ar são aceleradas até o ponto E, onde a pressão será nula e a velocidade máxima. Em seguida, ocorre o processo inverso, isto é, as partículas serão desaceleradas até o ponto F com uma velocidade aproximadamente igual à que tinham no ponto D. Em suma, entre D e E, ocorre uma transformação de energia de pressão em energia cinética e entre E e F, a energia cinética é transformada novamente em energia de pressão. Porém, à medida que o número de Reynolds aumenta, para casos em que $Re > 5$ (Fig. 3.2- (b)), as tensões viscosas aumentam e as partículas passam a não ter energia o suficiente para vencer o gradiente adverso de pressão entre E e F, como ocorria quando $Re < 5$. Assim, a camada limite começa a se descolar dos dois lados do cilindro, aproximadamente no ponto S, o que ocasiona a formação dos vórtices (SCHLICHTING, 1979).

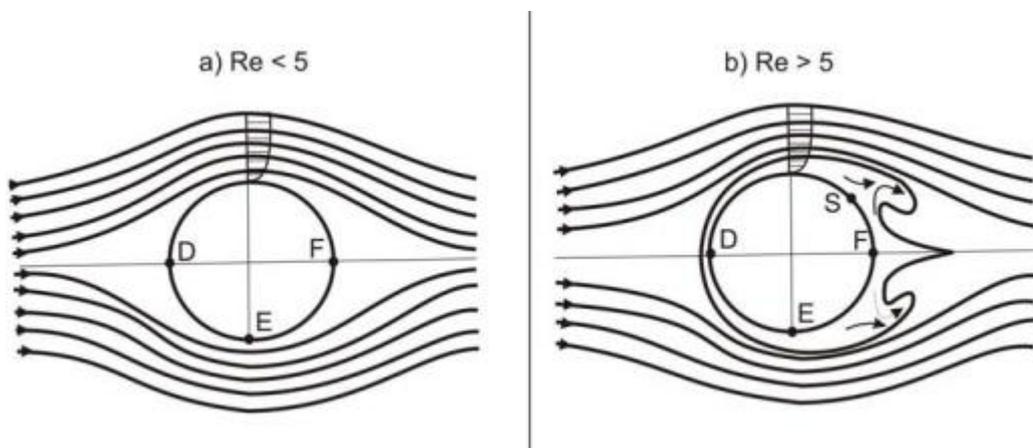


Figura 3.2 - (a) Escoamento em torno de um cilindro para um baixo número de Reynolds, (b) Escoamento em torno de um cilindro para um alto número de Reynolds (Modificado de SCHLICHTING, 1979)

A Esteira de Von Kármán é resultado da formação e do desprendimento de vórtices, que formam zonas de alta e baixa pressão. Desta forma, o cabo é solicitado alternadamente para cima e para baixo, começando a vibrar (HENRIQUES, 2006).

A Fig. 3.3 ilustra como o regime de escoamento de fluido em torno do cilindro varia conforme Reynolds aumenta. O escoamento tende a ficar mais turbulento à proporção que o número de Reynolds atinge níveis mais elevados.

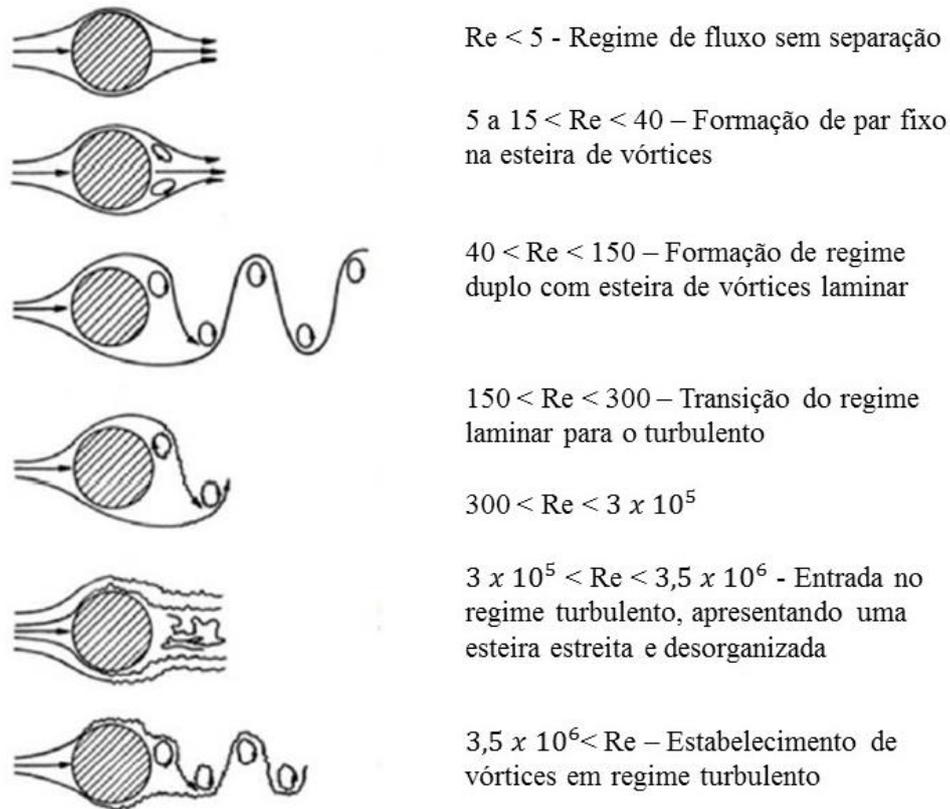


Figura 3.3 - escoamento em torno de um cilindro circular para diferentes valores do número de Reynolds (Modificado de LIENHARD, 1966)

A frequência de despreendimento de vórtices f_s , do cilindro pode ser representada por uma equação que envolve o diâmetro do cabo, a velocidade de escoamento do ar e também um número adimensional, chamado número de Strouhal S_t . Para linhas de transmissão, o número de Strouhal está dentro de uma faixa de 0,15 a 0,25, sendo o valor de 0,18 adotado usualmente (HENRIQUES, 2006). A equação 3.2 apresenta essa relação:

$$f_s = \frac{US_t}{D_n} \quad (3.2)$$

A separação entre as frequências naturais de um cabo condutor é geralmente da ordem de 0,2 Hz. Logo, quando o vento estiver a uma velocidade dentro da faixa de velocidades para a ocorrência de vibração eólica (de 0,8 até 8 m/s), a frequência de despreendimento de vórtices f_s poderá se igualar facilmente a uma das frequências naturais do cabo (HENRIQUES, 2006).

Em associação à ação das vibrações eólicas, o processo de fretting contribui para o surgimento e o crescimento de trincas sobre os fios que constituem o cabo condutor. As falhas ocorrem basicamente em pontos de fixação, especialmente no interior de instrumentos de apoio dos cabos condutores de energia, os grampos de suspensão.

3.3 METODOLOGIA PARA PROJETO CONTRA FADIGA DE CABOS CONDUTORES

A fadiga em cabos condutores de energia é um problema bastante complexo e, a fim de que ele seja melhor analisado, é necessário mensurar a intensidade de vibração eólica a que o cabo está sujeito. Para isso, existem algumas metodologias propostas para garantir a resistência da linha de transmissão: metodologia EPRI, metodologia IEEE e método CIGRÉ WG 22-04.

A metodologia EPRI define como limites de resistência os valores máximos de amplitudes de flexão e de tensão para diferentes tipos de cabos condutores. No entanto, em função das condições variadas de clima e tempo a que o cabo estará sujeito, é difícil controlar os valores de amplitude de flexão e tensão. Consequentemente, os limites propostos pela metodologia EPRI podem ser ultrapassados diversas vezes sem que a integridade do condutor seja comprometida. Por outro lado, a metodologia IEEE sugere limites de extrapolação do limite de resistência, ou seja, é dito que em mais de 5% do total de ciclos, a amplitude de flexão não pode ultrapassar o limite de fadiga. Ademais, 1% do total de ciclos pode ultrapassar 1,5% o limite de fadiga. Assim, os resultados apresentados podem ser excessivamente conservadores (WATANABE, 2014).

A metodologia CIGRÉ WG 22-04, a abordagem mais utilizada, baseia-se no efeito cumulativo de dano causado pelas vibrações eólicas e propõe a aplicação da regra de Palmgren-Miner.

3.3.1 VIBRÓGRAFO

Com o intuito de aplicar a regra de Palmgren-Miner e estimar a vida de fadiga de um cabo condutor, é necessário que haja a coleta de dados relativos a vibrações eólicas atuantes sobre o cabo. Para isso, um instrumento chamado vibrógrafo é montado a uma distância de 89 mm do último ponto de contato entre o cabo e o grampo de suspensão (“Ponto 89”) e ele mede a amplitude de deslocamento Y_B , de pico a pico, nesse ponto. De natureza não-estacionária e com características de banda estreita, o sinal é captado e gravado na memória do medidor.

Dois importantes vibrógrafos comerciais utilizados são o Vibrec (Fig. 3.4) e o Pavica (Fig. 3.5). O primeiro tem a capacidade de medir intensidade de vibração, frequência e temperatura do cabo. Já o Pavica tem as mesmas funcionalidades, além de também registrar o valor do dano acumulado no cabo.



Figura 3.4 - Vibrógrafo do tipo Vibrec (PFISTERER, 2015)



Figura 3.5 - Vibrógrafo do tipo Pavica montado em uma linha de transmissão (EPRI, 1979)

A tabela 3.3 mostra um quadro comparativo das características técnicas desses dois equipamentos.

Tabela 3.3 - Quadro comparativo técnico dos vibrógrafos Pavica e Vibrec

Características	Vibrógrafo Pavica (Roctest)	Vibrógrafo Vibrec (Pfisterer)
Intervalo de registro	10 minutos	15 minutos
Taxa de aquisição de dados	Até 12 segundos	Até 10 segundos
Frequência de aquisição	1 Hz até 1,2 kHz	0,2 Hz a 0,7 kHz
Autonomia	Até 3 meses	Até 12 meses

É possível constatar da tabela 3.3 que ambos vibrógrafos captam o sinal de forma não contínua e, mesmo assim, armazenam um grande volume de informação. Tais fatores juntamente com a temperatura ambiente influenciam na sua autonomia e restringem a sua capacidade máxima de permanência em campo.

3.3.2 FÓRMULA DE POFFENBERGER-SWART

A Fig. 3.6 ilustra um esquema de montagem do cabo no grampo e indica o local de posicionamento do vibrógrafo como o ponto 89.

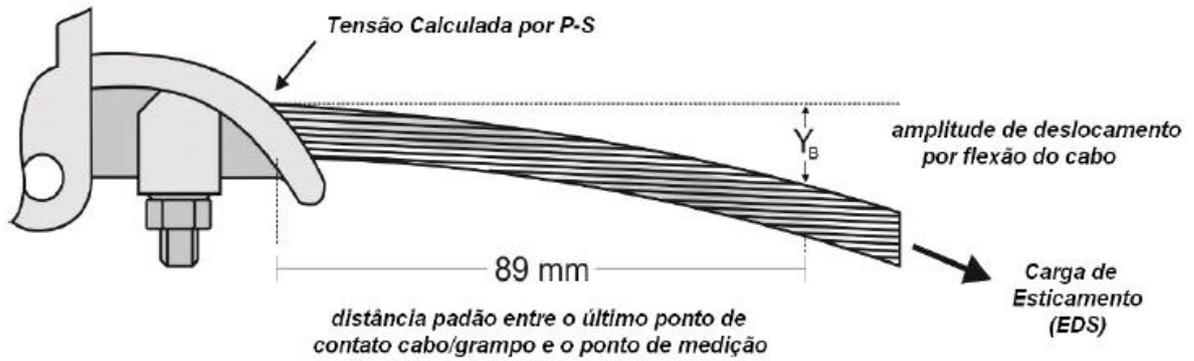


Figura 3.6 - Esquema montagem cabo/grampo (FADEL, 2010)

A fórmula de Poffenberger-Swart é normalmente usada para correlacionar os valores de amplitude de deslocamento Y_B , obtidos através de leituras do vibrógrafo, com a tensão de flexão que o cabo sofre. A fórmula é descrita pela seguinte equação:

$$\sigma_A = KY_b \quad (3.3)$$

A tensão nominal de zero a pico é representada pelo símbolo σ_A e K representa a constante de Poffenberger, dada pela equação 3.4:

$$K = \frac{E(d_p)^2}{4(e^{-px} - 1 + px)} \quad (3.4)$$

Na equação 3.4, o módulo de elasticidade ou módulo de Young é dado por E e o diâmetro dos fios de alumínio da camada externa do cabo é dado por d_p , a distância entre o último ponto de contato entre o cabo e o grampo até a montagem do vibrógrafo é dado por x , cujo valor usualmente usado é 89 mm (Fig. 3.6) e o valor de p é:

$$p = \sqrt{\frac{T_c}{EI}} \quad (3.5)$$

Na equação 3.5, T_c (Fig. 3.6) é a carga diária média de esticamento para uma temperatura média durante a medição e está associada ao EDS – *Every Day Stress*. O EDS é definido como o percentual da carga de ruptura a tração do cabo, o qual é geralmente instalado nas torres de transmissão com um valor de EDS entre 18% e 20%. O outro termo que aparece na equação 3.5 é EI , que indica a rigidez à flexão do cabo. O valor mínimo da rigidez à flexão é dado pela equação 3.6:

$$EI_{min} = n_a E_a \frac{\pi d_a^4}{64} + n_s E_s \frac{\pi d_s^4}{64} \quad (3.6)$$

Na equação 3.6, n , E e d significam, respectivamente, número, módulo de elasticidade e o diâmetro individual dos fios que compõem o cabo. Os símbolos com índice a são relativos aos fios de alumínio e os com índice s são correspondentes aos fios de aço.

É possível obter a amplitude de deslocamento usando os valores de RMS do sinal lido pelo vibrógrafo. Assim, a amplitude equivalente de deslocamento pico a pico Y_{eq} é dada por:

$$Y_{eq} = 2\sqrt{2}RMS \quad (3.7)$$

Portanto, o valor da tensão equivalente σ_{eq} , através da aplicação da fórmula de Poffenberger-Swart, é:

$$\sigma_{eq} = KY_{eq} \quad (3.8)$$

Uma das premissas para aplicar a regra de Palmgren-Miner, segundo Henriques (2006), é ter posse da curva S-N para a montagem do cabo/grampo. Entretanto, pode existir uma dificuldade em levantá-la em laboratório e, assim, recomenda-se utilizar a curva limite de segurança (*Safe Border Line - CSBL*), proposta pelo comitê de estudos WG 22-04 do CIGRÉ. Essa curva é associada com a equação 3.9:

$$\sigma_A = AN^b \quad (3.9)$$

Na equação apresentada, σ_a é a tensão nominal, N é a vida em ciclos e A e b são constantes extraídas da CSBL. A curva de limite de segurança de CIGRÉ é exposta na Fig. 3.7 a seguir. No eixo das ordenadas, encontram-se os valores para a tensão nominal em MPa e no eixo das abscissas os valores para o número de ciclos.

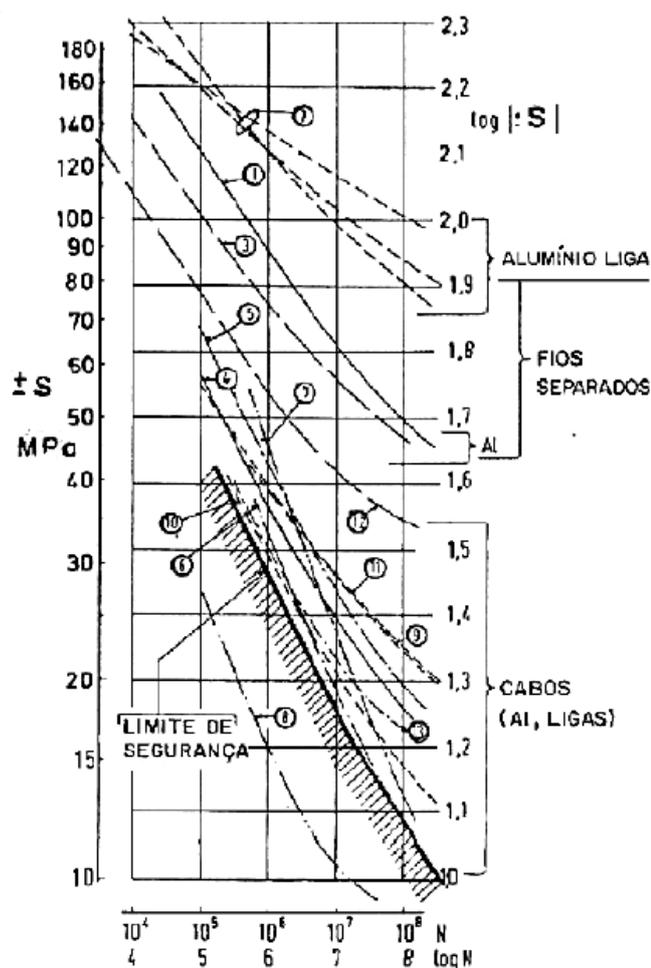


Figura 3.7 - Curva de limite de Segurança de CIGRÉ (Safe Border Line) (EPRI, 1979)

Em diversos laboratórios do mundo, foram realizados ensaios de fadiga com EDS igual a 18%, utilizando fios de alumínio e ligas de alumínio e cabos de alumínio e de liga de alumínio, e, assim um banco de dados foi formado. A partir das curvas traçadas para esses casos, a CSBL foi concebida para ficar abaixo delas, o que pode gerar uma estimativa conservadora da vida útil dos cabos e/ou fios (FADEL, 2010). O número de ciclos necessários para a ruptura de 10% dos fios do cabo ou o de três fios é considerada como a vida útil do cabo.

As constantes A e b da curva CSBL estão na tabela 3.4, sendo relacionadas com o número de camadas de fios de alumínio e o número de ciclos.

Tabela 3.4 - Constantes da CSBL (CIGRÉ, 1985)

Número de camadas de fios de alumínio do cabo condutor	$N < 2 \cdot 10^7$		$N > 2 \cdot 10^7$	
	A	b	A	b
1	730	-0,2	430	-0,168
> 1	450	-0,2	263	-0,168

4. METODOLOGIA

A ideia central desse trabalho é verificar qual é o tempo necessário para monitorar um cabo condutor de energia e coletar dados referentes a vibrações eólicas a que o cabo estará submetido, a fim de que seja possível fazer uma estimativa consistente do seu tempo de vida com relação à falha por fadiga.

O desenvolvimento do presente trabalho será feito integralmente em ambiente computacional, tendo como base principal os ensaios experimentais feitos em cabos condutores de energia em laboratório por Watanabe (2014).

4.1 REFERÊNCIA EXPERIMENTAL

Em 2014, Watanabe apresentou uma tese em que estudava o efeito da aplicação de carregamentos aleatórios sobre a vida de fadiga de cabos condutores. Nesse trabalho, foram realizados ensaios experimentais de fadiga, com condições controladas, em cabos condutores de energia no Laboratório de Fadiga e Integridade Estrutural de Cabos Condutores de Energia, do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília. O objetivo era analisar a forma clássica de previsão de vida em cabos condutores, baseando-se nas curvas de fadiga obtidas através dos experimentos.

Para os experimentos de Watanabe, foi utilizado um cabo do tipo CAA 397, MCM (IBIS), o qual é formado por fios de alumínio e uma alma de aço. O alumínio é um material leve, cuja massa específica é de $2,7 \text{ g/cm}^3$, e um bom condutor térmico e de eletricidade. A importância do aço na constituição do cabo é para lhe conferir uma resistência mecânica adicional.

O cabo foi montado conforme a Fig. 4.1 e, com o auxílio da talha de alavanca, tracionado a uma carga equivalente à EDS de 20%. Foi fixado um shaker eletromecânico para que ele excitasse o cabo até que a quebra do primeiro fio de alumínio ocorresse, que foi o critério de falha por fadiga adotado. Os cabos foram ensaiados em situações diferentes: em uma o cabo foi submetido a carregamentos com amplitudes constantes e em outra a carregamentos com amplitudes variáveis e de banda estreita.

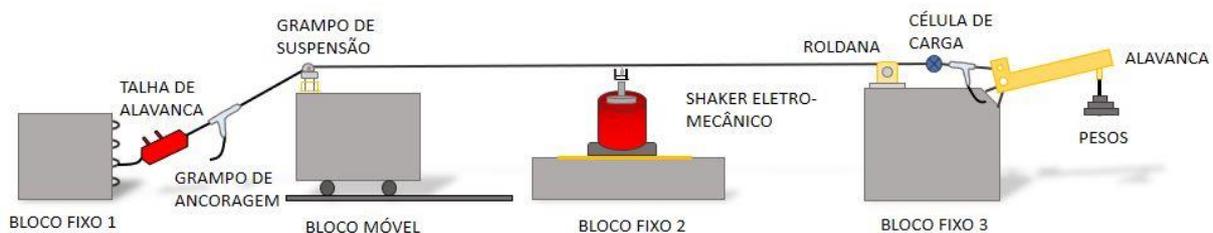


Figura 4.1- Montagem do cabo para ensaio de fadiga

A finalidade de realizar os experimentos com amplitude constante era de melhorar a curva S-N existente para este tipo de cabo. A Fig. 4.2 mostra a curva de tendência para os dados experimentais obtidos, juntamente com os respectivos limites do intervalo de confiança. Para efeito de comparação, a curva CSBL também foi representada no mesmo gráfico.

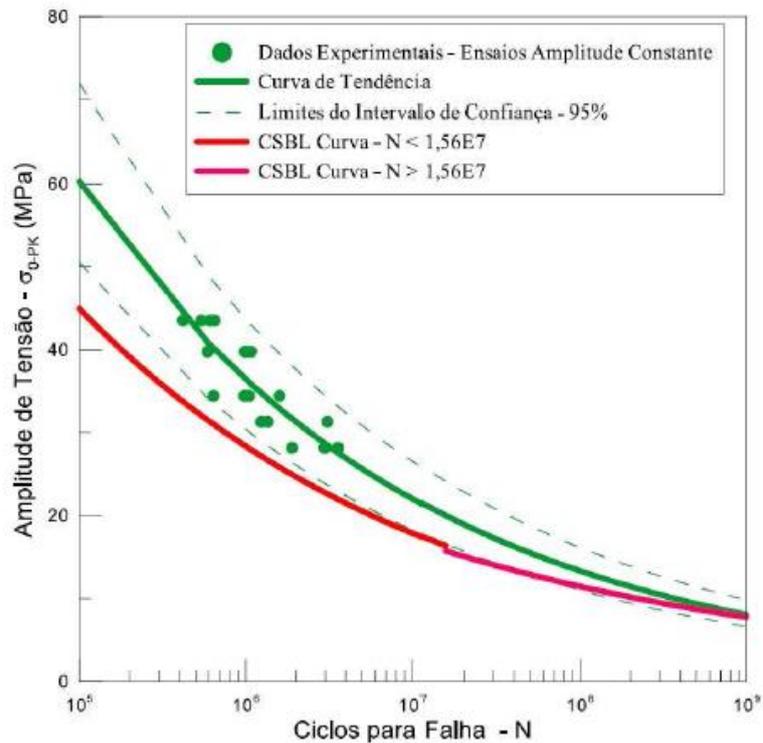


Figura 4.2 - Curva S-N obtida para o condutor IBIS (WATANABE, 2014)

Os experimentos com amplitudes variáveis foram feitos em 13 amostras de cabo. Para cada amostra ensaiada, foi feita uma varredura de frequência de modo a detectar as frequências naturais do cabo, porque quando a frequência de vibração de um componente é igual à natural, o fenômeno da ressonância, caracterizado pelo aumento da amplitude de vibração, ocorrerá e levará o material à ruptura. Portanto, após essa varredura, a frequência de 22 Hz foi selecionada para ser a frequência de excitação do cabo de todos os testes experimentais.

Em todas as amostras, blocos de carregamentos randômicos com uma duração de 30 minutos cada um foram aplicados nos cabos até que eles rompessem. Em cada bloco, o sinal correspondente à amplitude de deslocamento foi gravado por 10 minutos.

Os experimentos foram divididos em três grupos quanto ao nível médio de aceleração do instrumento de excitação eletromecânica. Cinco ensaios foram feitos com um nível médio de aceleração igual a 1,0 g, quatro foram feitos com 0,8 g e outros quatro com 1,5 g, em que g corresponde à aceleração da gravidade, equivalente a aproximadamente 9,81 m/s².

Analogamente aos ensaios de amplitude constante, uma curva de fadiga também pode ser extraída a partir dos testes experimentais com amplitude variável, considerando os pares ordenados que relacionam a amplitude de tensão equivalente (0 até o pico) σ_{eq} com o número de ciclos até a quebra do primeiro fio. Similarmente a Fig. 4.2, na Fig. 4.3 encontra-se a curva de tendência para os dados experimentais obtidos, com os respectivos limites do intervalo de confiança, e também a curva CSBL.

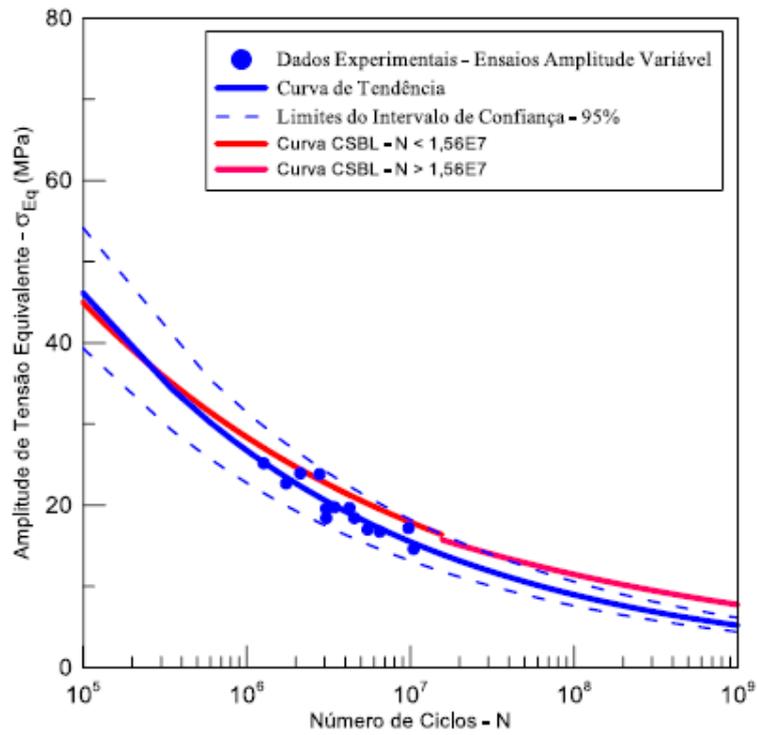


Figura 4.3 – Curva σ_{eq} - N obtida para o condutor IBIS (WATANABE, 2014)

Após realizar os 13 ensaios experimentais, Watanabe (2014) obteve como resultados as vidas experimentais dos cabos e as estimativas de dano acumulado e previsão de vida em ciclos, com base nas curvas de fadiga levantadas S-N e $\sigma_{eq} - N$ e também na CSBL. Esses resultados se encontram na tabela 4.1.

Tabela 4.1- Resultados experimentais dos ensaios em banda estreita do condutor IBIS
(WATANABE, 2014)

Ensaio	Excitação shaker (g)	Vida (Até a 1ª Quebra)		Dano Acumulado			Previsão de Vida (Ciclos) (x10 ⁶)		
		Nº Blocos	Nº Ciclos (x 10 ⁶)	Curva S-N	Curva CSBL	Curva $\sigma_{EQ} - N$	Curva S-N	Curva CSBL	Curva $\sigma_{EQ} - N$
1	1,0	75	3,06	0,48	1,389	1,20	6,33	2,20	2,56
2	1,0	75	3,07	0,47	1,209	1,17	6,47	2,54	2,62
3	1,0	112	4,55	0,75	1,988	1,85	6,08	2,29	2,46
4	0,8	160	6,51	0,79	1,874	1,95	8,22	3,47	3,34
5	0,8	241	9,76	0,93	2,176	2,30	10,45	4,48	4,25
6	0,8	261	10,48	0,63	1,130	1,54	16,62	9,27	6,80
7	0,8	137	5,49	0,53	1,112	1,29	10,43	4,93	4,25
8	1,0	86	3,44	0,44	0,959	1,09	7,74	3,58	3,15
9	1,0	107	4,25	0,72	2,099	1,78	5,90	2,02	2,38
10	1,5	44	1,74	0,45	1,742	1,31	3,88	1,00	1,33
11	1,5	32	1,27	0,51	2,016	1,28	2,48	0,63	0,99
12	1,5	70	2,79	0,89	3,198	2,23	3,12	0,87	1,25
13	1,5	53	2,13	0,66	2,227	1,64	3,22	0,96	1,30
Dano Médio				0,64	1,78	1,59			
Desvio Padrão				0,17	0,62	0,41			
Coeficiente de Variância				26,80%	34,80%	25,70%			

Multiplicando o número total de blocos de carregamento n_b , com a duração T_b de cada um e com a taxa de cruzamento de nível zero $E[0^+]$, o resultado desse cálculo será o número de ciclos de vida N , como pode ser vista na equação 4.1.

$$N = E[0^+]T_b n_b \quad (4.1)$$

4.2 ANÁLISE COMPUTACIONAL

4.2.1 RECONSTRUÇÃO DO SINAL ALEATÓRIO

Ao realizar o ensaio experimental de fadiga em um cabo condutor, a intensidade de vibração eólica foi adquirida por um sistema de instrumentação, composto por um acelerômetro e um software, por 10 minutos a cada 30 minutos, do início do ensaio até a ruptura do primeiro fio de alumínio. A Fig. 4.4 ilustra a história dos ciclos de carregamento do ensaio 2, como um exemplo, que foi formada segundo a

compilação dos dados captados. O eixo das ordenadas é caracterizado pela amplitude de deslocamento do cabo e o eixo das abscissas pela quantidade de ciclos de carregamento (WATANABE, 2014).

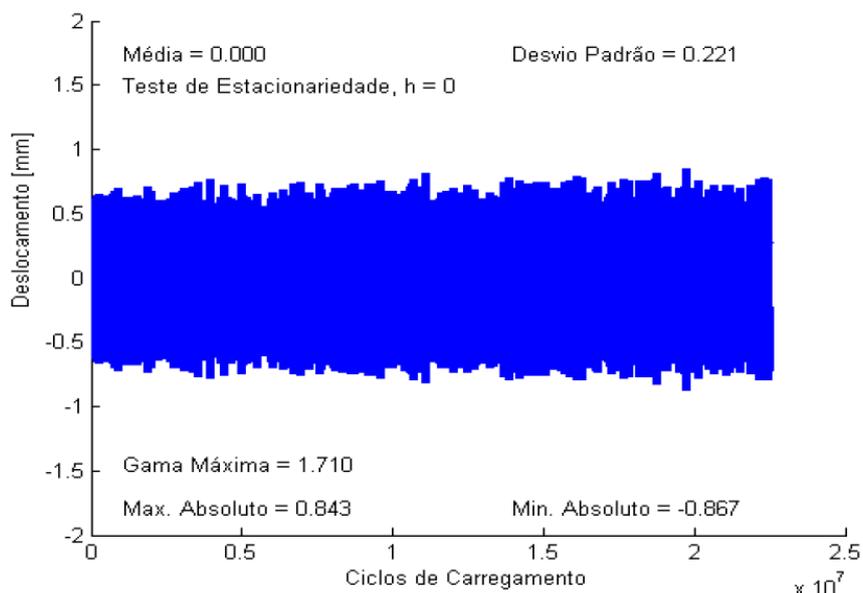


Figura 4.4 - História dos ciclos de carregamento do ensaio 2 (WATANABE, 2014)

A partir dessa história, uma análise espectral dos dados foi feita e um dos resultados obtidos dela foi a função densidade espectral de potência do ensaio, como está representado na Fig. 4.5. Outros resultados, além daqueles referentes ao ensaio 2, estão explicitados na tabela 4.2, como os valores RMS, o fator de irregularidade (FI), o parâmetro de largura de banda (PL), a taxa de cruzamento de zeros e a classificação de cada ensaio (WATANABE, 2014).

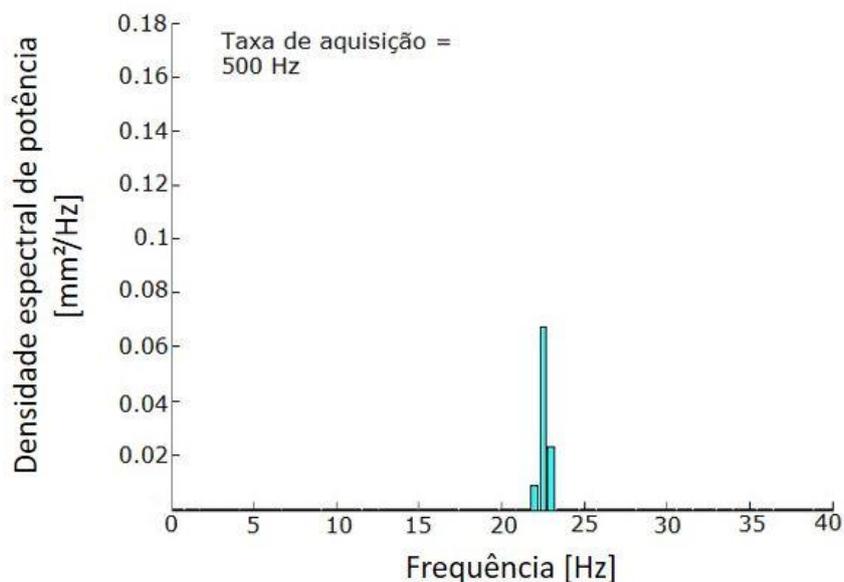


Figura 4.5 - Função densidade espectral de potência do ensaio 2 (WATANABE, 2014)

Tabela 4.2 - Resultados e propriedades dos ensaios de fadiga banda estreita (WATANABE, 2014)

Grupos	Excitação shaker (g)	Vida (Até a 1ª Quebra)		Valores RMS Médio						Afastamento do Parâmetro de Banda		Taxa de Cruzamentos de Zeros			Classificação dos Ensaios
		Nº Blocos	Nº Ciclos ($\times 10^6$)	Temporal	CV	Espectral (Trapézio)	CV	Espectral (Simpson)	CV	FI	PL	Média	Desvio Padrão	CV	
1	0,8	160	6,51	0,202	8,4%	0,202	8,4%	0,189	8,2%	0,76	0,65	22,60	0,07	0,3%	Ergódico
		241	9,76	0,192	12,1%	0,192	12,1%	0,194	12,1%	0,99	0,16	22,49	0,06	0,3%	Ergódico
		261	10,48	0,163	11,0%	0,163	11,0%	0,165	11,9%	0,95	0,33	22,30	0,21	0,9%	Não Estacionário
		137	5,49	0,192	11,6%	0,193	11,6%	0,192	12,4%	0,95	0,31	22,25	0,03	0,1%	Ergódico
2	1,0	75	3,06	0,221	20,6%	0,221	20,6%	0,214	21,1%	0,63	0,74	22,66	1,48	6,5%	Ergódico
		75	3,07	0,221	7,4%	0,221	7,4%	0,208	7,5%	0,81	0,59	22,73	0,04	0,2%	Ergódico
		112	4,55	0,220	10,0%	0,220	10,0%	0,208	9,6%	0,83	0,53	22,55	0,05	0,2%	Ergódico
		86	3,44	0,214	9,1%	0,214	9,1%	0,223	8,4%	0,94	0,12	22,20	0,07	0,3%	Ergódico
		107	4,25	0,228	6,7%	0,227	6,7%	0,232	7,3%	0,98	0,18	22,06	0,13	0,6%	Ergódico
3	1,5	44	1,74	0,264	6,4%	0,264	6,4%	0,256	7,2%	1,00	0,10	22,01	0,16	0,7%	Ergódico
		32	1,27	0,289	8,3%	0,289	8,3%	0,284	7,9%	0,99	0,11	22,06	0,14	0,6%	Ergódico
		70	2,79	0,268	11,1%	0,268	11,1%	0,269	11,8%	0,99	0,11	22,14	0,11	0,5%	Ergódico
		53	2,13	0,270	8,6%	0,270	8,6%	0,275	8,6%	1,00	0,10	22,32	0,08	0,4%	Ergódico

De posse dos dados adquiridos dos ensaios experimentais, como o valor RMS, frequência de excitação do cabo e a largura de banda, o sinal, que relaciona a amplitude deslocamento do cabo Y_{0-PK} (amplitude de zero a pico) para um determinado tempo t , será reconstruído no software Matlab e toda a análise de fadiga será feita baseado nele. A relação de Y_{0-PK} e t é representada pela equação 4.2.

$$Y_{0-PK}(t) = A \cdot \sin(2\pi ft + \varphi) \quad (4.2)$$

Em que $A = RMS\sqrt{2}$; f é a frequência e φ é o ângulo de fase, determinado de forma randômica através de um comando do software Matlab.

A soma dos pares ordenados (Y_{0-PK} , t) formará o sinal aleatório pretendido, possuindo uma característica estacionária e gaussiana, pois a sua média é nula e o desvio padrão é equivalente ao valor RMS.

4.2.2 CÁLCULO DA VIDA DE FADIGA

A partir do sinal construído no software Matlab, a análise de fadiga será feita aplicando diretamente o método Rainflow e a regra de Palmgren-Miner; e também utilizando o método espectral, optando pelo modelo de dano de Dirlik, por ter um bom desempenho e ser mais utilizado. Para ambos os casos, as análises de fadiga serão feitas de duas formas: através de uma rotina própria criada e de uma ferramenta do Matlab, denominada WAFO, que significa Análise de Onda para Fadiga e Oceanografia (“Wave Analysis for Fatigue and Oceanography”).

Um meio de observar por quanto tempo um vibrógrafo deve captar os dados de vibração eólica, para que se possa fazer uma estimativa consistente do tempo de vida de fadiga, foi realizar todo o procedimento de análise de fadiga em sinais construídos com intervalos de tempo de duração diferentes.

Dessa forma, o estudo deste trabalho será feito em sinais que duram 5, 10, 30, 50, 90, 120, 300, 600, 900 e 1800 segundos.

Assim, considerando que a falha por fadiga ocorrerá quando o dano acumulado total for igual a um, o tempo de vida de fadiga V , fazendo a análise dos dados no domínio do tempo, dado em segundos, será calculado pela fórmula 4.3.

$$V = \frac{T_s}{D_s} \quad (4.3)$$

Em que T_s é o tempo de duração do sinal construído no Matlab e D_s é o dano acumulado calculado com base no respectivo sinal.

Para o caso dos dados no domínio da frequência, ou seja, aplicando a metodologia espectral, o tempo de vida de fadiga V será dado apenas pelo inverso do dano acumulado D_s (Equação 4.4).

$$V = \frac{1}{D_s} \quad (4.4)$$

A fim de fornecer uma melhor compreensão do procedimento adotado para a realização deste trabalho, um fluxograma foi feito, como pode ser visto na Fig. 4.6.

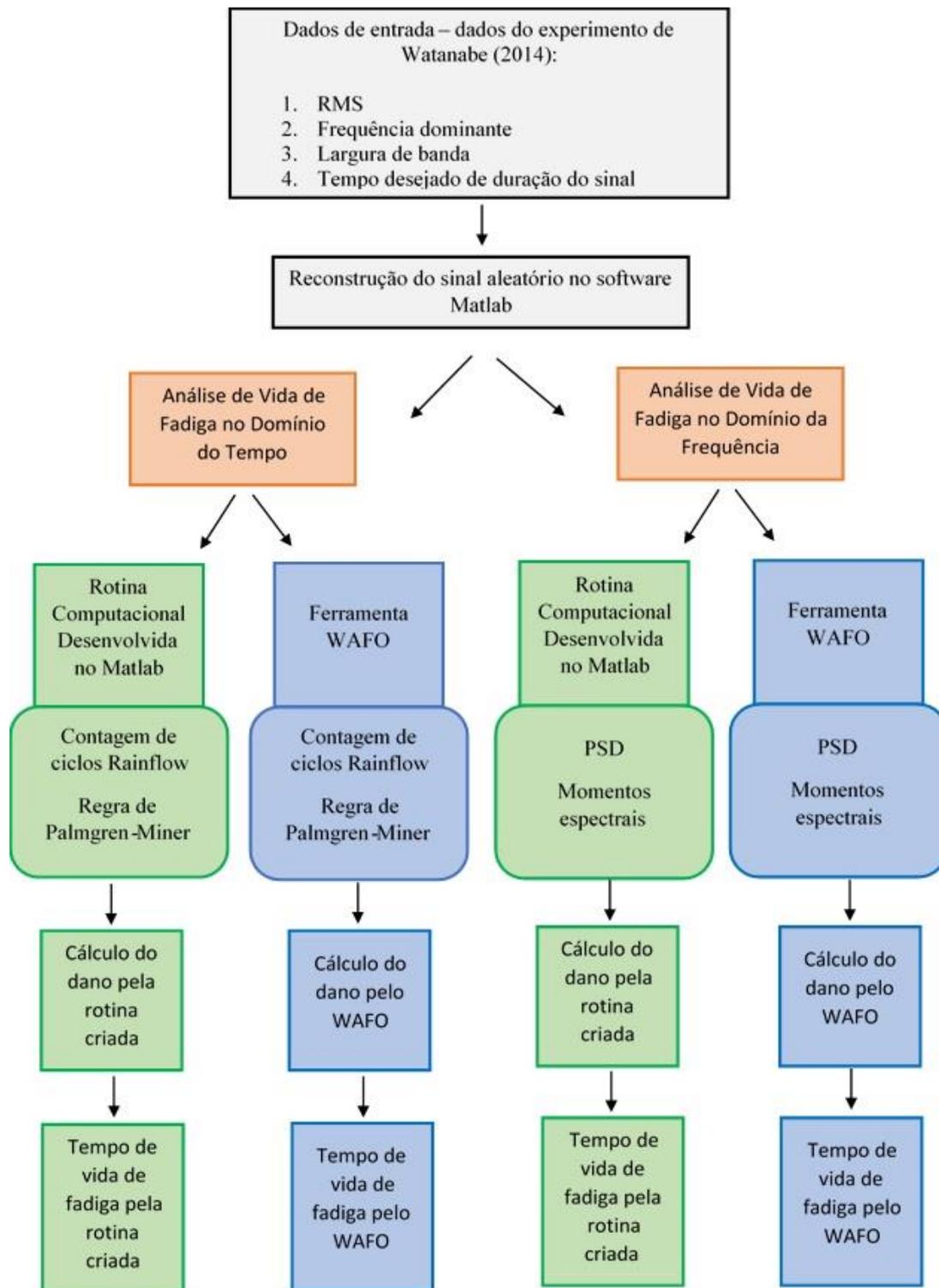


Figura 4.6 – Fluxograma do trabalho

Supõe-se uma situação em que um vibrógrafo, em campo, grave um sinal de intensidade eólica por 10 segundos e, 15 minutos mais tarde, grave outro sinal também de 10 segundos. Ao estimar a vida de fadiga utilizando cada um dos sinais, os dois resultados de vida de fadiga não serão iguais, por causa da

aleatoriedade da resposta vibratória do cabo. Da mesma forma, realizar o procedimento mostrado no fluxograma da Fig. 4.6 apenas uma vez poderia não trazer um resultado confiável de tempo de vida de fadiga.

Com base nos conceitos de distribuição normal de probabilidade e estatística, uma forma de definir quantas vezes a análise de fadiga deve ser feita, com base em um determinado intervalo de tempo de duração de um sinal, é aplicando a fórmula 4.5, que envolve grau de confiança. A ideia é determinar quantos resultados de vida de fadiga devem ser obtidos para calcular uma média e determinar o desvio padrão entre os resultados.

$$c = \left(\frac{Z\sigma_x}{e} \right)^2 \quad (4.5)$$

Em que Z é o grau de confiança desejado, σ_x é o desvio padrão dos resultados de vida de fadiga obtidos utilizando sinais com mesma duração e e é o erro padrão.

Adotando uma confiabilidade de 95%, correspondente a $Z = 1,96$ (Luchesa e Neto, 2011), e assumindo que o erro padrão é 20% do desvio padrão, o número de repetições será $c = 96$. Isso simularia uma situação em que se estivesse “coletando” sinais de amplitude de vibração, todos gravados pelo mesmo intervalo de tempo pelo vibrógrafo, em momentos diferentes, por 96 vezes. Dessa forma, dos 96 valores de tempo de vida de fadiga calculados para cada sinal, a média e o desvio padrão serão analisados considerando a duração do sinal em questão.

4.2.3 A FERRAMENTA WAFO

A metodologia descrita inclui o cálculo do dano de fadiga por meio da criação de códigos no Matlab, seguindo os conceitos de contagem de ciclos e a regra de Palmgren-Miner e do método espectral, e o cálculo do dano utilizando a ferramenta WAFO. Quanto a este último artifício, trata-se de uma ferramenta desenvolvida pela Universidade de Lund, localizada na Suécia, proposta para análises e simulações de ondas e carregamentos aleatórios. Ela consiste em um conjunto de rotinas e requer apenas o programa Matlab para ser executada, sem ferramentas adicionais (WAFO – Group, 2000).

A principal característica do WAFO é o módulo de rotinas para a computação de distribuição estatística de ondas e características de ciclos de um processo gaussiano. É destinada a auxiliar três tipos de profissionais: os engenheiros navais, para que entendam o comportamento das ondas e como os navios respondem a elas; os engenheiros mecânicos, para que trabalhem com carregamentos aleatórios e dano e análise de fadiga; e qualquer pesquisador interessado em análise estatística de processos aleatórios (WAFO – Group, 2000).

Essa ferramenta é oferecida de forma gratuita para download através do site <http://www.maths.lth.se/matstat/wafo/> por meio de um arquivo comprimido. Para a sua instalação, basta descomprimir o arquivo em um local do computador, editar o arquivo “startup.m” e criar uma pasta “WAFO” dentro da pasta “Toolbox” do Matlab, movendo todos os arquivos que foram descomprimidos para ela. Antes de utilizar a ferramenta, deve-se escrever “initwafo” na tela de comando do Matlab para

que ela seja iniciada. Ao digitar o comando “help fatigue” na tela de comando do Matlab, aparece uma lista de funções, e as respectivas descrições, que o WAFO fornece.

As funções utilizadas para realizar este trabalho com o WAFO, juntamente com a descrição de cada uma e os dados de entrada que são requeridos, estão dispostos na tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Funções do WAFO utilizadas

	Função do WAFO	Descrição	Dados de entrada
Domínio do Tempo	dat2tp	Extraí os valores extremos (pico e vale) da história de carregamento	História de carregamento no domínio do tempo
	tp2rfc	Calcula os ciclos Rainflow a partir da sequência de picos e vales	Sequência de picos e vales, obtida com o dat2tp
	cc2dam	Calcula o dano total de acordo com a regra de Palmgren-Miner	Ciclos Rainflow (obtidos com a função tp2rfc) e as constantes da curva S-N
Domínio da Frequência	dat2spec	Estima a densidade espectral unilateral	História de carregamento no domínio do tempo
	spec2mom	Calcula os momentos espectrais	A densidade espectral, obtida com o dat2spec, e a quantidade de momentos desejada (no máximo 4)

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 DESCRIÇÃO BÁSICA DOS ALGORITMOS DESENVOLVIDOS

Em anexo, encontram-se os programas feitos no software Matlab e utilizados para o desenvolvimento da análise computacional do problema proposto.

Através do código PG_principal.m, o sinal aleatório que representa a amplitude de deslocamento no decorrer do tempo é gerado. Para formar o sinal com as características idênticas aos do ensaio experimental escolhido, deve-se inserir os dados de entrada, que são a frequência, largura de banda, valor RMS e o tempo de duração desejado do sinal em segundos.

Além de construir o sinal, esse mesmo código chama quatro funções criadas para realizar a análise de fadiga. As rotinas fadiga_tempo.m e fadiga_tempo_wafo.m são destinadas a calcular o dano de fadiga utilizando os dados no domínio do tempo enquanto que as rotinas fadiga_espectral.m e fadiga_espectral_wafo.m são para fazer o mesmo cálculo, porém utilizando os dados no domínio da frequência. Os algoritmos fadiga_tempo_wafo.m e fadiga_espectral_wafo.m foram escritos para chamar as funções da ferramenta WAFO, descritas na tabela 4.3. Por fim, depois do cálculo do dano pelas quatro rotinas, os resultados finais são os tempos de vida em dias do cabo condutor.

5.2 EXPOSIÇÃO DOS RESULTADOS

O ensaio experimental de Watanabe (2014) escolhido para servir como base para esse trabalho foi o 2. As informações essenciais para reconstruir o sinal de acordo com esse ensaio e o tempo que levou ao cabo falhar por fadiga se encontram na tabela 5.1.

Tabela 5.1- Dados do ensaio 2 (WATANABE, 2014)

RMS [Hz]	Frequência de excitação [Hz]	Largura de banda [Hz]	Tempo real de vida do cabo condutor [Dias]
0,221	22	0,59	1,56

Como mencionado anteriormente, para cada tempo de duração do sinal, os códigos foram rodados 96 vezes, obtendo-se 96 valores de dano acumulado e, conseqüentemente, 96 valores de tempos de vida de fadiga de cada algoritmo executado. Portanto, a partir desses resultados, foram calculados os tempos médios de vida de fadiga, os correspondentes desvios padrão e os coeficientes de variação. Esses resultados foram dispostos nas tabelas 5.2 e 5.3.

Tabela 5.2- Tempos médios de vida de fadiga do ensaio 2 utilizando os dados no domínio do tempo.

Resultados das análises no domínio do tempo						
Tempo de duração do sinal [s]	Rotina fadiga_tempo.m			Rotina fadiga_tempo_wafo.m		
	Tempo médio de vida [Dias]	Desvio padrão [Dias]	Coefficiente de Variação [%]	Tempo médio de vida [Dias]	Desvio padrão [Dias]	Coefficiente de Variação [%]
5	4,89	4,49	91,8%	5,11	4,65	91,0%
10	3,68	2,94	79,9%	3,88	3,11	80,2%
30	2,74	1,14	41,5%	2,91	1,19	41,0%
50	2,42	0,74	30,5%	2,60	0,80	30,8%
90	2,38	0,38	16,0%	2,53	0,40	15,8%
120	2,32	0,30	12,9%	2,50	0,31	12,4%
300	2,33	0,17	7,1%	2,49	0,16	6,6%
600	2,34	0,13	5,6%	2,50	0,13	5,4%
900	2,32	0,15	6,3%	2,48	0,14	5,7%
1800	2,29	0,14	6,0%	2,45	0,14	5,7%

Tabela 5.3 - Tempos médios de vida de fadiga do ensaio 2 utilizando os dados no domínio da frequência.

Resultados das análises no domínio da frequência						
Tempo de duração do sinal [s]	Rotina fadiga_espectral.m			Rotina fadiga_espectral_wafo.m		
	Tempo médio de vida [Dias]	Desvio padrão [Dias]	Coefficiente de Variação [%]	Tempo médio de vida [Dias]	Desvio padrão [Dias]	Coefficiente de Variação [%]
5	5,93	6,06	102,2%	5,19	4,65	89,7%
10	4,20	3,55	84,5%	4,07	3,14	77,3%
30	3,37	1,39	41,2%	3,33	1,35	40,4%
50	3,07	0,93	30,2%	3,09	0,94	30,3%
90	2,99	0,42	14,2%	2,98	0,42	14,2%
120	2,98	0,33	11,0%	2,98	0,32	10,8%
300	2,99	0,13	4,2%	2,99	0,12	4,0%
600	2,98	0,07	2,5%	2,98	0,07	2,4%
900	2,98	0,04	1,5%	2,98	0,04	1,5%
1800	2,98	0,02	0,7%	2,98	0,02	0,7%

A Fig. 5.1 ilustra um gráfico em que constam as curvas de tempos médios de fadiga, calculados pelas quatro rotinas, em função do tempo de duração do sinal. Juntamente a elas, foi traçada uma reta que simboliza o tempo real de vida do cabo condutor, o qual é 1,56 dias.

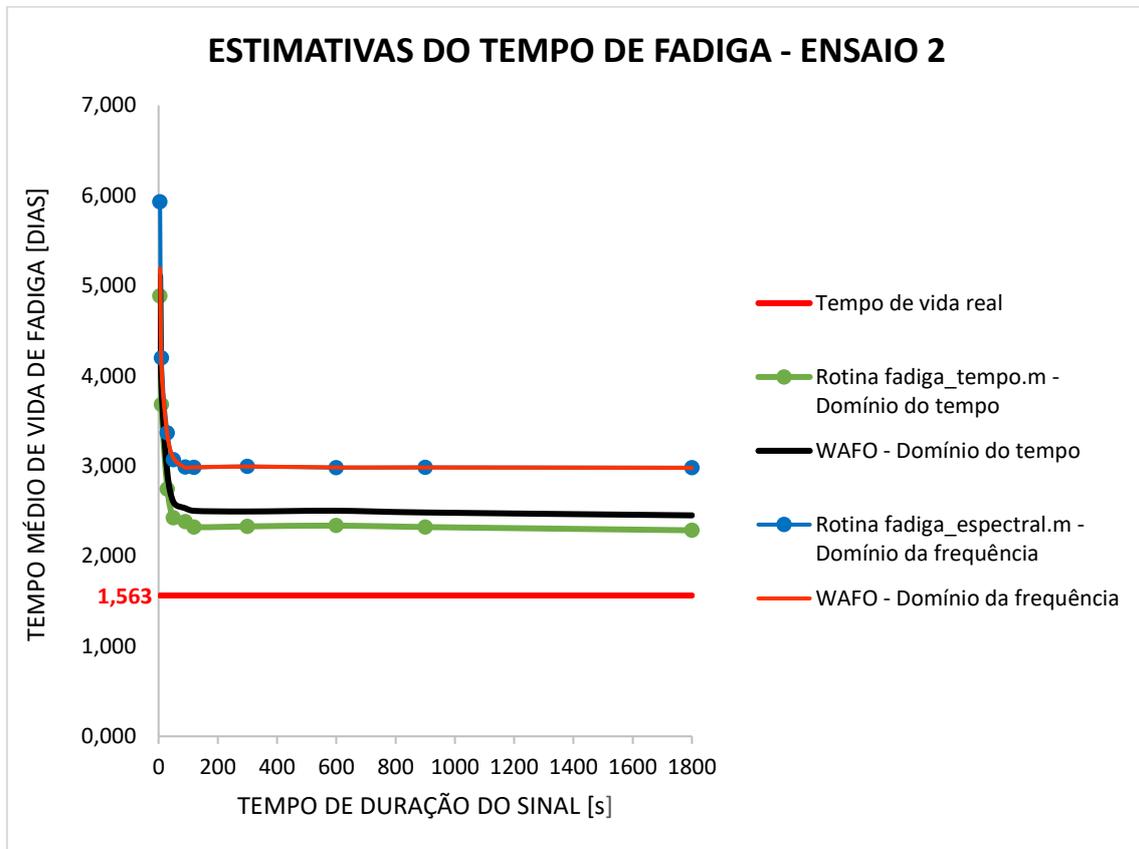


Figura 5.1- Estimativa do tempo de vida de fadiga segundo o tempo de duração do sinal

Os comportamentos dos coeficientes de variação, obtidos pelas quatro rotinas em função do tempo de duração do sinal, são representados no gráfico da Fig. 5.2.

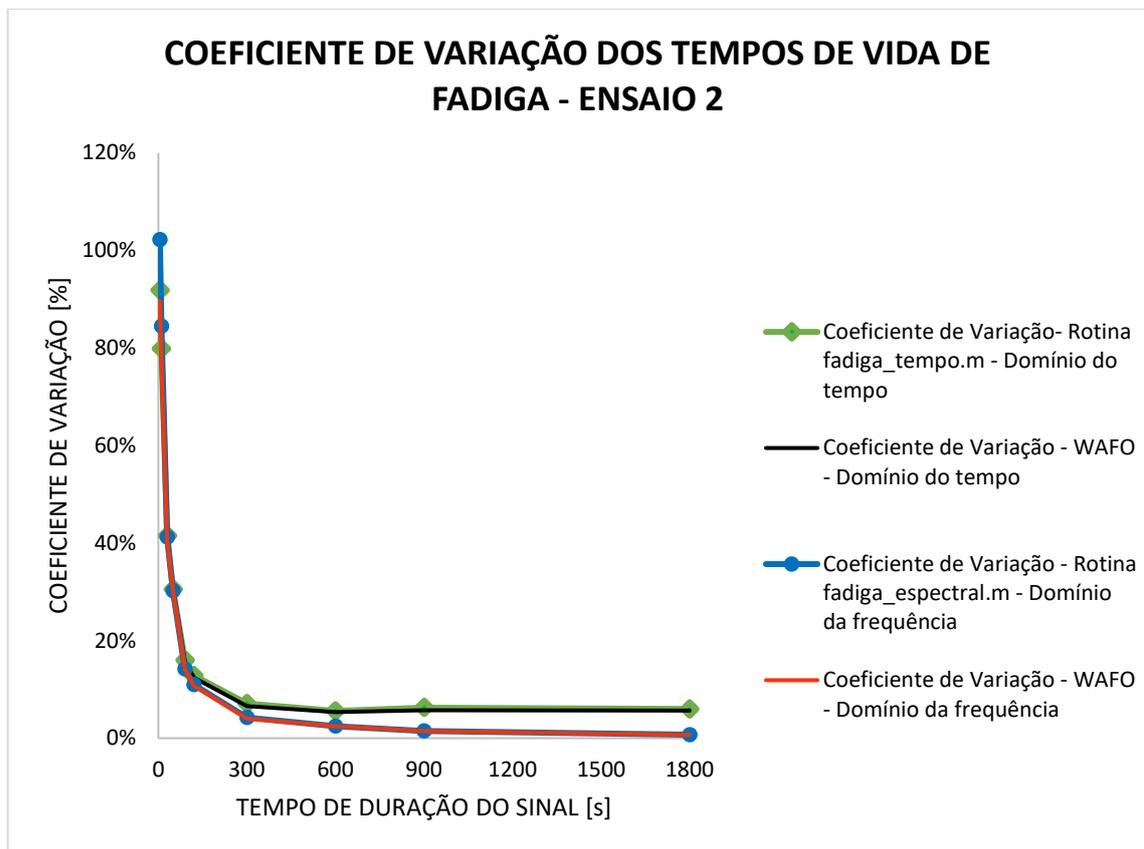


Figura 5.2 – Coeficiente de variação segundo o tempo de duração do sinal

Além do cálculo dos tempos de vida de fadiga, também foi calculado o valor RMS para cada sinal gerado. Os valores médios, desvio padrão do RMS e o coeficiente de variação, referentes a cada tempo de duração do sinal, encontram-se na tabela 5.4.

Tabela 5.4 – RMS médio e desvio padrão

Tempo de duração do sinal [s]	RMS médio [mm]	Desvio padrão [mm]	Coeficiente de Variação [%]
5	0,212	0,0479	22,5%
10	0,221	0,0437	19,8%
30	0,220	0,0241	10,9%
50	0,222	0,0175	7,9%
90	0,222	0,0092	4,2%
120	0,221	0,0064	2,9%
300	0,221	0,0026	1,2%
600	0,221	0,0015	0,7%
900	0,221	0,0009	0,4%
1800	0,221	0,0004	0,2%

5.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Analisando as tabelas 5.2 e 5.3 e a Fig. 5.1, é possível apurar que os resultados obtidos tanto pelas rotinas desenvolvidas quanto pela ferramenta WAFO são similares, existindo uma pequena diferença entre eles. Além disso, foi constatado que a estimativa do tempo de fadiga partindo de um sinal de curta duração não é consistente. Tanto pelos algoritmos próprios desenvolvidos quanto pelo WAFO, o desvio padrão alto indica uma oscilação considerável de tempos de fadiga calculados e conclui-se que não é muito confiável basear em um sinal curto.

No entanto, quanto mais longo for o sinal, observa-se que os tempos de vida de fadiga convergem para um valor, que seria o tempo de vida real do componente estrutural. Essa convergência é constatada pela característica assintótica das curvas da Fig. 5.1. Outro indicador disso é o comportamento do coeficiente de variação à medida que se considera um sinal mais longo. O coeficiente de variação mede o grau de dispersão dos dados relativos ao seu valor médio e é dado pela razão entre o desvio padrão e o valor médio. Portanto, avaliando as colunas das tabelas 5.2 e 5.3 que contém os valores de coeficiente de variação e também a Fig. 5.2, percebe-se que esse grau de dispersão se torna decrescente à proporção que um sinal com tempo de duração maior é considerado.

Segundo Rigonatto [s.d.], se o coeficiente de variação for menor ou igual a 15%, o grau de dispersão é baixo, dando uma característica homogênea aos dados analisados. Partindo desse princípio, verifica-se que é necessário gravar dados de vibração eólica por no mínimo 120 segundos para realizar a análise no domínio do tempo enquanto que necessita de 90 segundos de gravação com a finalidade de fazer a mesma análise no domínio da frequência. Dessa forma, as correspondentes vidas de fadiga obtidas por meio de cálculos no domínio do tempo e da frequência apresentam uma baixa dispersão em relação aos valores médios.

Sabendo que o cabo condutor do ensaio experimental 2 de Watanabe (2014) durou 1,56 dias, um tempo mínimo de amostragem de 120 segundos, para a análise no domínio do tempo, e de 90 segundos, para a análise espectral, representam, nessa ordem, 0,089% e 0,067% do tempo de vida real do cabo.

Conforme a CIGRÉ (1979), a vida útil média do condutor considerada econômica e tecnicamente satisfatória é de cerca de 30 anos. Utilizar um tempo de amostragem de vibração eólica equivalente a 0,089% e 0,067% de 30 anos significa que o vibrógrafo deveria gravar esses dados, respectivamente, por 9,75 dias e 7,31 dias no total. No melhor dos casos, desconsiderando que fatores como intervalo e tempo de gravação e temperatura ambiente interfiram na autonomia de um vibrógrafo, se um gravador comercial da marca Vibrec captar dados de 10 segundos a cada 15 minutos por 12 meses (tabela 3.3), isso daria uma totalidade de 4,05 dias de gravação. Deste modo, a quantidade de dados que um vibrógrafo comercial amostra não é suficiente para estimar um tempo de vida de fadiga, aplicando os dois métodos abordados. Entretanto, 4,05 dias representam 0,037% de 30 anos e isso equivaleria a 50 segundos de gravação para um cabo submetido a experimentos de laboratório que durou 1,56 dias. Pelas tabelas 5.2 e 5.3, o coeficiente de variação associado a 50 segundos de gravação é de cerca de 30%

Como pode ser constatado, há uma necessidade de amostrar a intensidade eólica por um tempo maior ao fazer uma análise considerando os dados no domínio do tempo. Isso ocorre devido ao fato de que esse método leva em conta apenas os extremos locais máximos e mínimos, ou seja, os picos e os vales do sinal. Em função disso, a aquisição de um grande volume de informação implicará em um processamento computacional maior desses dados. Em contrapartida, a técnica espectral necessitou de 0,022% a menos de tempo de monitoração, pois, para que ela fosse aplicada, foram precisos apenas o valor RMS e a largura de banda do sinal e a frequência dominante do processo aleatório. Assim, uma menor quantidade de dados foi manipulada e, conseqüentemente, um menor tempo de monitoramento demandado.

Essa questão de qual método exige uma menor quantidade de dados para ser manipulada é conferida também ao fazer um comparativo dos coeficientes de variação com o tempo de duração do sinal. Percebe-se que o coeficiente de variação decresce mais rapidamente, ao considerar sinais mais longos, adotando o método do domínio da frequência em vez do método do domínio do tempo. Exemplificando essa afirmação, sobre o gráfico de dispersão dos coeficientes de variação obtidos com o WAFO, foram aplicadas linhas de tendência (Fig. 5.3).

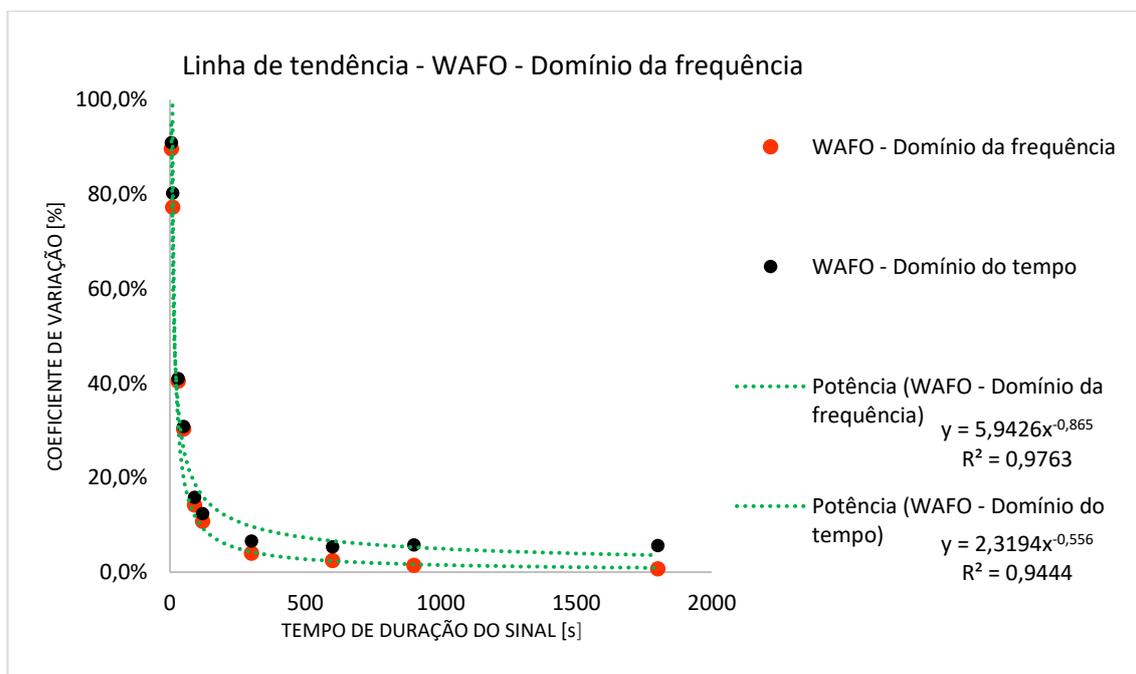


Figura 5.3 – Linhas de tendência sobre o gráfico de dispersão dos coeficientes de variação obtidos com o WAFO

Em seguida, as equações das curvas de tendência foram geradas para que fosse possível produzir a tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Coeficientes de variação obtidos através da simulação computacional e das equações das curvas de tendência

WAFO - Domínio do tempo		WAFO - Domínio da frequência	
Tempo de duração do sinal [s]	Coeficiente de Variação [%]	Tempo de duração do sinal [s]	Coeficiente de Variação [%]
5	91,0%	5	89,7%
10	80,2%	10	77,3%
30	41,0%	30	40,4%
50	30,8%	50	30,3%
90	15,8%	90	14,2%
120	12,4%	120	10,8%
300	6,6%	183	6,6%
600	5,4%	231	5,4%
900	5,7%	213	5,7%
1800	5,7%	217	5,7%
1452	4,0%	300	4,0%
3613	2,4%	600	2,4%
8973	1,5%	900	1,5%
34564	0,7%	1800	0,7%

Os valores que se encontram nas células marcadas de amarelo foram obtidos com as equações das linhas de tendência e os outros são das tabelas 5.2 e 5.3. O objetivo era verificar quantos segundos seriam necessários para atingir um determinado coeficiente de variação, comparando os dois métodos de análise de fadiga. Por exemplo, a fim de alcançar 6,6% de dispersão de dados em relação à média, é preciso 300 segundos adotando a metodologia no domínio do tempo e 1,6 vezes menos ao aplicar a metodologia espectral. Para obter 0,7% de coeficiente de variação, o vibrógrafo precisaria gravar quase 20 vezes mais dados para que fosse possível fazer a análise de vida de fadiga no domínio do tempo em vez de fazer no da frequência. Por se tratar de equações de tendência, em alguns pontos houve divergências, tal como pode-se observar que, com respeito ao domínio do tempo, na tentativa de obter um coeficiente de variação de 4,0%, foi necessário um tempo de duração menor do que para ter um coeficiente de variação de 5,7%. Apesar disso, segundo Bertolo (2012), uma linha de tendência é mais confiável quando o seu valor de R^2 é igual ou próximo de 1. Esses valores de R^2 foram gerados também e se encontram abaixo das equações na Fig. 5.3. Vê-se que para ambos os casos os valores são bem próximos de 1 e, portanto, são ajustes bons aos dados do gráfico.

A última observação a ser feita é que todos os tempos de vida de fadiga tenderam para além da vida real do cabo condutor do ensaio 2, que foi de 1,56 dias (Fig. 5.1). A estimativa do tempo de fadiga não foi conservativa, pois a previsão foi de que o cabo condutor, sob as condições do ensaio 2, teria uma

vida maior do que a real. A explicação para esse fato é o uso da curva S-N levantada por Watanabe (2014) para a realização da análise. Na Fig. 4.2, repara-se que a curva S-N e a CSBL se aproximam quando N cresce e se afastam quando N decresce. Segundo Watanabe (2014), devido ao tempo e custo elevados, geralmente os ensaios de fadiga em cabos condutores são realizados em uma faixa de amplitudes de tensão relativamente elevada, situações que em condições reais ocorrem com pouca frequência. Em função dessa limitação experimental, é comum a extrapolação da curva S-N para além dos dados experimentais.

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho compreendeu em geral no estudo do comportamento dos cabos condutores de energia sujeitos a carregamentos aleatórios causados pela ação dos ventos. Especificamente, o estudo realizado consistiu na determinação do tempo mínimo de amostragem dos dados de vibração eólica para que se possa fazer uma estimativa coerente do tempo de vida de fadiga de cabos condutores. Este trabalho foi realizado através de programas computacionais desenvolvidos no software Matlab e o seu embasamento foi feito sobre os testes experimentais vibratórios em cabos condutores de energia feitos por Watanabe (2014) dentro do Laboratório de Fadiga e Integridade Estrutural de Cabos Condutores de Energia da Universidade de Brasília. Portanto, conclui-se que:

- De posse dos valores RMS, frequência dominante de excitação do cabo, largura de banda do ensaio experimental, foi possível reconstruir o sinal, de natureza estacionária e gaussiana, que relaciona a amplitude de deslocamento de zero a pico no decorrer do tempo;
- Quanto mais longo for o sinal a ser analisado, ou seja, quanto mais informações de vibração eólica forem gravadas, mais precisa será a estimativa do tempo de fadiga. Ao fazer uma pequena amostragem desses dados, a previsão de vida não será consistente. Porém, ao passo que se aumenta o tempo de amostragem, os resultados do cálculo de tempo de vida de fadiga convergirão para o tempo de vida real;
- Ao aplicar a técnica de contagem de ciclos acoplada à regra de Palmgren-Miner para estimar a vida de fadiga, é necessário que haja a gravação de dados de vibração eólica por 0,089% da vida real do cabo condutor de energia. Por outro lado, com o método espectral, utilizando o modelo de Dirlik, o tempo mínimo de aquisição de dados é de 0,067% da vida real do cabo condutor de energia. Supondo que a vida média de um cabo condutor seja de 30 anos, seria necessário um tempo de monitoramento mínimo equivalente a 9,75 dias e 7,31 dias, respectivamente.
- Para conseguir fazer a aquisição desse volume de informações com um erro menor que 15%, um vibrógrafo comercial não teria autonomia o suficiente para permanecer em campo, dadas as suas restrições com respeito aos fatores climáticos e ao intervalo e tempo de gravação. Entretanto, no melhor dos casos, com a sua autonomia, é possível realizar uma estimativa de vida de fadiga com um erro de 30%.
- O método que utiliza os dados no domínio do tempo requer uma taxa de amostragem mais elevada de intensidade eólica, a fim de que seja feita uma identificação de picos e vales suficiente e, conseqüentemente, a vida de fadiga seja estimada de forma consistente. No que tange ao método espectral, foi verificado que a aquisição de histórias é menor, levando a um menor esforço computacional, haja vista que para o cálculo são necessários os valores RMS e as frequências dominantes do processo aleatório.

6.1 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Na análise no domínio do tempo, a observação e contagem dos ciclos é feita de forma direta, o que ocasiona no arquivamento e manipulação de um grande volume de dados, para averiguar o comportamento completo do carregamento ao longo do tempo. Por outro lado, muitas vezes algumas informações estão ocultas a uma simples avaliação visual da história de carregamentos no domínio do tempo e a técnica espectral pode ser um grande auxílio para que isso não ocorra. Embora seja um método feito de forma probabilística, é aceitável de ser empregado. Em suma, realizar esses tipos de análises configura em uma boa ferramenta de manutenção preditiva dos cabos condutores de energia e é importante que os estudos acerca desse assunto sejam continuados.

Para trabalhos futuros, são recomendados:

- i) O estudo da vida de fadiga baseando-se em sinais não-estacionários. Para esse caso, utiliza-se a análise tempo-frequência, em que o conteúdo espectral do sinal é representado no plano tempo-frequência. Dessa forma, ao contrário do que ocorre de forma clássica para sinais estacionários, a transformada de Fourier não é adequada para ser aplicada em sinais não-estacionários e sugere-se o uso de métodos como Short Time Fourier Transform (STFT) e transformada de Wavelet.
- ii) A aplicação dos parâmetros das curvas CSBL e σ_{eq} -N nos cálculos de danos de fadiga, para comparar com os resultados de vida de fadiga deste trabalho, em que os parâmetros da curva S-N, levantada por Watanabe (2014), foram empregados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARIDURU, S. **Fatigue Life Calculation by Rainflow Cycle Counting Method**. Middle East Technical University, 2004.
- ASTM. E 1049 - 85 **Standard Practices for Cycle Counting in Fatigue Analysis**. West Conshohocken, 1997.
- BENASCIUTTI, D. e TOVO, R. **Fatigue analysis of random loadings**. University of Ferrara, 2005.
- BENDAT, J. S., PIERSOL, A. G., **Random Data: Analysis and Measurement Procedures**, Wiley-Interscience, 1971.
- BERTOLO, L.A. **Um Manual de Estatística**. Disponível em < http://www.bertolo.pro.br/AdminFin/StatFile/Manual_Estatistica.htm >. Acesso em 20/04/2017.
- BISHOP, N. W. M. **The Use of Frequency Domain Parameters to Predict Structural Fatigue**, Ph.D. Thesis, University of Warwick, Coventry, England, 1988.
- BISHOP, N. W. M. **Vibration fatigue analysis in the finite element environment**. XVI Encuentro del Grupo Español de Fractura, 1999.
- BISHOP, N. W. M.; SHERRAT, F. **Fatigue life prediction from power spectral density data**, 1989.
- CALLISTER, W. D. **Material Science and Engineering: An introduction**. 7 Ed. John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- CEPEL. **Monitoramento do Desempenho elétrico das Linhas de Transmissão**. 2015. Disponível em < <http://www.cepel.br/linhas-de-pesquisa/menu/monitoramento-do-desempenho-eletrico-e-mecanico-das-linhas-de-transmissao.htm> > Acesso em 06/11/2016.
- CESÁRIO. **Estimativa da Vida em Fadiga de Componentes de Implementos Rodoviários através de Métodos espectrais**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012. 148 p.
- CIGRÉ TFB2.11.06, **State of the Art of Conductor Galloping**. Electra, n. 232, p 21-25, 2007.
- DIRLIK, T. **Application of Computer in Fatigue Analysis**. Tese (Ph.D.). University of Warwick, Coventry, England, 1985. 242 p.
- EPRI – Electrical Power Research Institute. **Transmission Line Reference Book: Wind Induced Conductor Motion**. Palo Alto, CA, 1979.
- FADEL, A.A., **Avaliação do efeito de tracionamento em elevados níveis de EDS sobre a resistência em fadiga do condutor IBIS (CAA 397,5 MCM)**. Tese (Doutorado). Universidade de Brasília, Brasília, 2010. 205 p.
- FURTADO, T.A. **Vibração eólica em Linhas de Transmissão e Subtransmissão, Treinamento Técnico**”, CEMIG, 2001.

FURTADO, T. A. et al. **Diagnóstico do estado da arte em vibração eólica de linhas aéreas de transmissão**. SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2003.

HENRIQUES, A.M.D. **Bancada de Ensaio Mecânicos à Fadiga de Cabos Condutores de Energia**. Tese (Doutorado) - Universidade de Brasília, Brasília, 2006. 162 p.

Hydro Quebec. PAVICA. Quebec, Canadá. Março, 2010.

JOHANNESSON, P. – **Rainflow Analysis of Switching Markov Loads**. Tese (Doutorado). Lund Institute of Technology, 1999.

JUVINAL, R. C., **Engineering Considerations of Stress, Strain and Strength**. New York, McGraw-Hill, 1967.

JUNIOR, R. B. **Análise Numérico-Experimental de componentes sujeitos à fadiga por solicitações aleatórias – Avaliação de modelos**. Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.

LEE, Yung-li et al. **Fatigue Testing and Analysis**. Amsterdam. Boston. Heidelberg. London. New York Oxford. Paris. San Diego. San Francisco. Singapore. Sydney. Tokyo: Elsevier Inc, 2005. 402 p.

LIENHARD, J.H., **Synopsis of lift, drag and vortex frequency for rigid circular cylinders**. College of Engineering Research Division bulletin 300, Techn. Extension Service, Washington State University, 1966.

LIMA, A. C. S., **Componentes de uma Linha de Transmissão**. Notas de Aula – Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), 2011.

LUCHESA, C.J e NETO, A. C.; **Cálculo do tamanho da amostra nas pesquisas de administração**. Centro Universitário Curitiba – Unicuritiba, 2011.

PragTic. **Load history decomposition**. Disponível em <<http://www.pragtic.com/PragTicHelp/files/%7B09F7C9FA-C180-4ADA-8D98-49930DF2124C%7D.htm>>. Acesso em 25/09/2016.

MONTGOMERY, D.C.; RUNGER, G. C., **Applied Statistics and Probability for Engineers**. 3ª ed. John Wiley & Sons, Inc. 2003.

NEXANS. “Nexans fecha contrato de 26 milhões de euros em cabos para linhas aéreas de transmissão de energia no Brasil”. 2009. Disponível em <[http://www.nexans.com.br/eservice/Brazil-pt BR/navigatepub_228648_-19777/Nexans_fecha_contrato_de_26_milh_es_de_euros_em_ca.html](http://www.nexans.com.br/eservice/Brazil-pt_BR/navigatepub_228648_-19777/Nexans_fecha_contrato_de_26_milh_es_de_euros_em_ca.html)> Acesso em 07/10/2016.

NORTON, R. L. **Projeto de Máquinas: Uma Abordagem Integrada**. 4. Ed. - Porto Alegre: Bookman, 2013.

Pfisterer. VIBREC recorders. Lucerna, Suíça. 2015

REIS, C. G. **Estimativa da Vida em Fadiga de Componentes submetidos a Solicitações aleatórias**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

RIGONATTO, M. **Coefficiente de Variação**. Disponível em <<http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/matematica/coeficiente-variacao.htm>>. Acesso em 14/11/2016.

SCHLICHTING, H. **Boundary-Layer Theory**. McGraw-Hill, United States of America, 1979.

SISQUINI, G.R.; FREITAS, M. S. **Avaliação de métodos de estimação da vida residual de estruturas oceânicas baseados na curva S-N e na mecânica da fratura.** Cilance, 2010.

SHIGLEY, J. E.; MISCHKE, C. R.; BUDINAS, R. G.; **Elementos de Máquinas de Shigley.** 8ªed, McGraw-Hill, 2008

SINAIS INGENIERIA. **Transformada de Fourier.** 2013. Disponível em < http://www.sinais.es/Recursos/Curso-vibraciones/fundamentos/transformada_fourier.html > Acesso em 04/04/2017.

WAFO-group (2000). **“WAFO - A Matlab Toolbox for Analysis of Random Waves and Loads - A Tutorial”** Math. Stat., Center for Math. Sci., Lund Univ., Lund, Sweden. ISBN XXXX, URL <http://www.maths.lth.se/matstat/wafo>.

WATANABE, L. **Análise da vida à fadiga de cabos condutores de energia submetidos a carregamentos aleatórios.** Tese (Doutorado) - Universidade de Brasília, Brasília, 2014. 237 p.

ANEXO I – PROGRAMA PRINCIPAL

```
function [t_dias_rain, t_dias_wafo,
t_dias_dirlik_pwelch,t_DK_mom_espec_wafo, rms_sinal] = PG_principal
close all;
clear all;
clc;

%PROJETO DE GRADUAÇÃO: Previsão da Vida de Fadiga de Cabos Condutores
submetidos a Vibrações
%eólicas utilizando a Ferramenta espectral
%Nome: Camila Tsuchida Nogueira
%Matrícula: 11/0009762

%% Dados para a geração do sinal

nb = 75; %Número de blocos
t_real = nb*1800./(3600*24); %[Dias] - Tempo real de vida

%Frequencia dominante [Hz]
Fd1 = 22;
Fd2 = 30;

%Largura de Banda
B1 = 0.59;
B2 = 0.45;

%Valor RMS previsto para cada banda do Sinal [mm]
RMSp_1 = 0.221;
RMSp_2 = 0;

%Constante de Aquisição (relação entre a frequência de aquisição e a máxima
frequencia contida no sinal)
C = 2;

%Número de componentes espectrais
K_1 = 100;
K_2 = 10;

%% Cálculos Preliminares
Fmax_1 = Fd1+B1/2; %(Frequência dominante 1 + largura de banda 1)/2
Faq_1 = C*Fmax_1;
dt_1 = 1/Faq_1;

Fmax_2 = Fd2+B2/2;
Faq_2 = C*Fmax_2;
dt_2 = 1/Faq_2;

dt = min(dt_1, dt_2); Faq = 1/dt; %Frequência de aquisição

%Tamanho da Amostra
tempo_amostra = 50; %[s]
N = ceil((tempo_amostra/dt));
```

```

%RMS = AMPLITUDE/RAIZ DE 2
A_1 = RMSp_1*(2/K_1)^0.5;
A_2 = RMSp_2*(2/K_2)^0.5;

%Amplitudes das componentes espectrais e Vetor Frequencia
for i1=1:K_1
    t1 = (Fd1-B1/2+i1*(B1/K_1));
    f_1(i1)=2*pi()*t1;
    Amp_1(i1) = A_1;
end

for i2=1:K_2
    f_2(i2)=2*pi()* (Fd2-B2/2+i2*(B2/K_2));
    Amp_2(i2) = A_2;
end

rng ('shuffle')
fase_1 = 2*pi()*rand(K_1,1);
fase_2 = 2*pi()*rand(K_2,1);

%% Geração do Sinal - Soma
for n = 1:N
    SINAL(n) = 0;
    T(n) = n*dt;
    for i1=1:K_1
        SINAL(n) = SINAL(n) + Amp_1(i1)*sin(f_1(i1)*T(n)+fase_1(i1));
    end
    for i1=1:K_2
        SINAL(n) = SINAL(n) + Amp_2(i1)*sin(f_2(i1)*T(n)+fase_2(i1));
    end
end

A = [T]; B = [SINAL]; C = [T; SINAL];
end

%% Estimativa de vida de fadiga
for i = 1:1:1
    k(1) = N;
    tempo_de_amostra(i) = k(i).*dt;
    media_sinal(i) = mean(B); rms_sinal(i) = std(B);

%%-----DOMÍNIO DO TEMPO-----%%

disp('Domínio do tempo')

%1ª estimativa de vida de fadiga

d_rainflow(i) = fadiga_tempo(B);
t_dias_rain = tempo_de_amostra(i)./(d_rainflow.*60*60*24);

%%-----WAFO-----%
%2ª estimativa de vida de fadiga
d_wafo(i) = fadiga_tempo_wafo(C);
t_dias_wafo = tempo_de_amostra(i)./(d_wafo.*60*60*24);

fprintf('\nTempo de vida - Rotina própria: %.3f dias \nTempo de vida -
WAFO: %.3f dias\n\n',t_dias_rain, t_dias_wafo )

%%-----DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA-----%%

```

```

disp('Domínio da frequência')

%%-----PWELCH-----%

Danos_pwelch = fadiga_espectral(B, dt, tempo_amostra);

%----- Dirlik -----%

%3ª estimativa de vida de fadiga
DK_pwelch(i) = Danos_pwelch(1);
t_dias_dirlik_pwelch = 1./(DK_pwelch.*60*60*24);

fprintf('\nPWELCH\nTempo de vida (DIRLIK): %.3f\n', t_dias_dirlik_pwelch)

%%%-----WAFO-----%

Danos_wafo = fadiga_espectral_wafo(C);

%-----Dirlik-----%

%4ª estimativa de vida de fadiga
d_DK_mom_espec_wafo = Danos_wafo(1);
t_DK_mom_espec_wafo = 1./(d_DK_mom_espec_wafo.*60*60*24);

fprintf('\nWAFO\nTempo de vida (DIRLIK): %.3f\n', t_DK_mom_espec_wafo)

end

%%-----Gráfico-----%
figure (3)%Sinal no domínio do tempo
plot (T, SINAL)
title ('Amplitude de deslocamento x tempo')
ylabel ('Amplitude de deslocamento [mm]')
xlabel ('Tempo [s]')
end

```

ANEXO II – ANÁLISE NO DOMÍNIO DO TEMPO

```
function [dano_RF] = rainflow(SINAL);
%---ESTIMATIVA DO DANO USANDO RAINFLOW MAIS REGRA DE PALMGREN-MINER---%

%PARAMETROS DA CURVA Ypp-N PICO A PICO
KP = 1.761203*(10^6);
mP = -3.490179;

%PARAMETROS DA CURVA Y0p-N 0 A PICO
KA = 1.567331*(10^-5);
mA = 3.490179;

%Chamada da função que calcula os picos e vales do sinal de amplitude de
%deslocamento
PCV = PICO_VALE(SINAL,0.); %Matriz que contém os valores dos picos e vales
da amplitude de deslocamento
N = length(PCV); %Quantidade de picos e vales (quantidade de extremos
locais)

%ESTIMATIVA DA DISTRIBUIÇÃO DAS GAMAS DE TENSÃO
%Contagem dos ciclos Rainflow - Coluna 1: Pico - vale ou vale - pico Coluna
2: Quantidade de ciclos
AA = RFa(PCV,0.001);
[LINHA, COLUNA] = size(AA); %size = número de linhas, número de colunas
TOLER = 0.001;
j = 1;
for k = 1:LINHA
    if (AA(k,2) == 0.5 && AA(k,1) >= TOLER)
        GAMAS(j) = AA(k,1);
        j = j + 1;
    elseif AA(k,1) >= TOLER
        GAMAS(j) = AA(k,1);
        GAMAS(j+1) = AA(k,1);
        j = j+2;
    end
end
J = j-1;
end
TAM = length(GAMAS);

A = (GAMAS./2).^mA;
D_rainf = KA*sum(A); dano_RF = D_rainf;
end
```

ANEXO III – ANÁLISE NO DOMÍNIO DO TEMPO – WAFO

```
function [d_wafo] = rainflow_wafo (A)
%PARAMETROS DA CURVA Ypp-N PICO A PICO
KP = 1.761203*(10^-6);
mP = 3.490179;

%PARAMETROS DA CURVA Y0p-N 0 A PICO
KA = 1.567331*(10^-5);
mA = 3.490179;

xx = A'; %Matriz com os dados de tempo e amplitude de deslocamento
%Cálculo de picos e vales - Turning points
tp_wafo = dat2tp(xx); %Toolbox wafo

%Cálculo dos ciclos Rainflow
def.res = 'up';
def.asymmetric = 1;
RFC = tp2rfc(tp_wafo, def); %Toolbox wafo

%Uso da regra de Palmgren miner para o cálculo do dano
d_wafo = cc2dam(RFC, mA, KA); %Toolbox wafo
end
```

ANEXO IV – ANÁLISE NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

```
function [Vetor_danos_pwelch] = function_pwelch(SINAL, dt, zeit)
%PARAMETROS DA CURVA Ypp-N PICO A PICO
KP = 1.761203*(10^6);
mP = -3.490179;

%PARAMETROS DA CURVA Y0p-N 0 A PICO
KA = 1.567331*(10^-5);
mA = 3.490179;

mPe = mA;
KPe = 1.567331*(10^5);

%Tamanho do Espectro
TAM_ESPECTRO = 128;
%Informações sobre o Percentual de Sobreposição do sinal
PERCENTUAL = 75;
SOBRE = round(TAM_ESPECTRO*PERCENTUAL/100);
N = ceil((zeit/dt));

1/dt

%-----PWELCH-----%
[Pxx,f] = pwelch(SINAL,TAM_ESPECTRO,SOBRE, TAM_ESPECTRO*8,'onesided',
1/dt);
tam = length(Pxx);
figure(1)
plot (f, Pxx, 'linewidth', 2)
grid
xlabel ('Frequência [Hz]', 'FontSize', 12)
title ('Carregamento no domínio da \bffrequência', 'FontSize', 12)

%Momentos espectrais

for i=1:tam
    G1(i)= Pxx(i)*f(i);
    G2(i)=Pxx(i)*f(i)^2;
    G4(i)=Pxx(i)*f(i)^4;
end
Mom_0_pwelch = simpson(f,Pxx);
Mom_1_pwelch = simpson(f,G1);
Mom_2_pwelch = simpson(f,G2);
Mom_4_pwelch = simpson(f,G4);

fprintf('\nPWELCH: Os momentos são espectrais, respectivamente:\n %.2f,
%.2f, %.2f e %.2f\n', Mom_0_pwelch, Mom_1_pwelch, Mom_2_pwelch,
Mom_4_pwelch)

RMS_pwelch = sqrt(Mom_0_pwelch);
D_pwelch = std(SINAL); %Desvio padrão do sinal

%Razão Esperada de Cruzamentos de Zero
f0_pwelch=sqrt(Mom_2_pwelch/Mom_0_pwelch);

%Razão Esperada de picos
nu0_pwelch=sqrt(Mom_4_pwelch/Mom_2_pwelch);

%Fator de Irregularidade
```

```

alfa_pwelch=f0_pwelch/nu0_pwelch;

%Parâmetro de Largura Espectral
epson_pwelch = sqrt(1-alfa_pwelch^2);

%-----Dirlik-----%

RMS_pwelch = sqrt(Mom_0_pwelch);

Xm_pwelch = (Mom_1_pwelch/Mom_0_pwelch)*sqrt(Mom_2_pwelch/Mom_4_pwelch);
D1_pwelch = 2*(Xm_pwelch-(alfa_pwelch^2))/(1+(alfa_pwelch^2));
R_pwelch = (alfa_pwelch-Xm_pwelch-(D1_pwelch^2))/(1-alfa_pwelch-
D1_pwelch+D1_pwelch^2);
D2_pwelch = (1-alfa_pwelch-D1_pwelch+D1_pwelch^2)/(1-R_pwelch);
D3_pwelch = 1 - D1_pwelch - D2_pwelch;
Q_pwelch = 1.25*(alfa_pwelch-D3_pwelch-D2_pwelch*R_pwelch)/(D1_pwelch);

y1 = ((nu0_pwelch/KPe)*RMS_pwelch^mPe);
y2 = D1_pwelch*gamma(1+mPe)*Q_pwelch^mPe;
y3 = (2^(mPe/2))*gamma(1+mPe/2)*(D2_pwelch*(abs(R_pwelch))^mPe+D3_pwelch);

Dirlik_pwelch = y1*(y2+y3);

Vetor_danos_pwelch = [Dirlik_pwelch];
end

```

ANEXO V – ANÁLISE NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA – WAFO

```
function [Vetor_danos_wafo] = function_wafo(C)
%PARÂMETROS DA CURVA Ypp-N PICO A PICO
KP = 1.761203*(10^6);
mP = -3.490179;

%PARÂMETROS DA CURVA Y0p-N 0 A PICO
KA = 1.567331*(10^-5);
mA = 3.490179;

mPe = mA;
KPe = 1.567331*(10^5);

%-----WAFO-----%%
xx = C';
media = mean(xx(:,2));
sa = std(xx(:,2));
xx(:,2) = xx(:,2) - media;

hold on;
% figure (2)
lc = dat2lc(xx); %Number of upcrossings
plotflag = 1; %Plots the density

%Frequencia média - Média do número de upcrossings por unidade de tempo
t = max(xx(:,1))-min(xx(:,1));
f0 = interp1(lc(:,1),lc(:,2),0)/t;

tp = dat2tp(xx);

hold on;
figure(2)
S = dat2spec(xx);
Sf = ttspec(S,'f'); clf
plotspec(Sf)

%Momentos espectrais
[mom, text] = spec2mom(S, 4, 'y', 0);

mom_0 = mom(1);
mom_1 = mom(2)/(2*pi);
mom_2 = mom(3)/(4*pi^2);
mom_4 = mom(5)/(16*pi^4);

fprintf('\nWAFO: Os momentos espectrais são, respectivamente: \n %.2f,
%.2f, %.2f e %.2f\n', mom_0, mom_1, mom_2, mom_4)

%-----DIRLIK-----%

RMS_wafo0 = sqrt(mom_0);
alfa_wafo0 = (mom_2)/sqrt(mom_0*mom_4);
nu0_wafo0 = sqrt(mom_4/mom_2);

Xm_wafo0 = (mom_1/mom_0)*sqrt(mom_2/mom_4);
D1_wafo0 = 2*(Xm_wafo0-(alfa_wafo0^2))/(1+(alfa_wafo0^2));
R_wafo0 = (alfa_wafo0-Xm_wafo0-(D1_wafo0^2))/(1-alfa_wafo0-
D1_wafo0+D1_wafo0^2);
D2_wafo0 = (1-alfa_wafo0-D1_wafo0+D1_wafo0^2)/(1-R_wafo0);
```

```

D3_wafo0 = 1 - D1_wafo0 - D2_wafo0;
Q_wafo0 = 1.25*(alfa_wafo0-D3_wafo0-D2_wafo0*R_wafo0)/(D1_wafo0);

y10 = ((nu0_wafo0/KPe)*RMS_wafo0^mPe);
y20 = D1_wafo0*gamma(1+mPe)*Q_wafo0^mPe;
y30 = (2^(mPe/2))*gamma(1+mPe/2)*(D2_wafo0*(abs(R_wafo0))^mPe+D3_wafo0);

Dirlik_wafo0 = y10*(y20+y30);

Vetor_danos_wafo = [Dirlik_wafo0];
end

```

ANEXO VI – IDENTIFICAÇÃO DE PICOS E VALES

```
function [RESPOSTA] = PICO_VALE(y,TOL)
%IDENTIFICAÇÃO DE PICOS E VALES
num= length(y);
R = num;
k = 1;
i = 2;
a(1)=y(1);

while i < R
    flag = 1;
    while flag == 1 & i < R
        b = a(k);
        c = y(i);
        d = y(i+1);
        slope1=(c-b);
        slope2=(d-c);
        DELTA = abs(slope1-slope2);
        if ((slope1*slope2)<0 & DELTA > TOL )
            k=k+1;
            a(k)=y(i);
            flag = 0;
        end
        i = i + 1;
    end
end
RESPOSTA = a; %A matriz RESPOSTA dá os valores de pico e vale
end
```

ANEXO VII – CONTAGEM DOS CICLOS RAINFLOW

```
function [RESPOSTA] = RF(a,TOL)
%a - Matriz que contém os picos e vales identificados
pontos = 3;
Npontos = numel(a);%Quantidade de elementos
j = 1;
flag_2 = 'C';

while(pontos < Npontos)
    flag_1 = 1;
    while(flag_1)
        while(pontos < 3 )
            pontos = pontos + 1;
        end
        if pontos > Npontos
            flag_2 = 'A';
            break;
        end

        E = abs(a(pontos - 2) - a(pontos - 1)); D = abs(a(pontos - 1) -
a(pontos));

        if E > D
            pontos = pontos + 1;
        else flag_1 = 0;
        end
    end
    if flag_2 == 'C'
        B(j,1)= E; j = j+1;
    end

    if pontos == 3 && flag_2 == 'C' % Idenficou que o evento está no início
da Contagem (ponto de Start) ou no final da contagem
        B(j-1,2)= 0.5;
        for k = 2:Npontos
            a(k - 1) = a(k);
        end
        Npontos = Npontos - 1;
    elseif flag_2 == 'C'
        % Idenficou que o evento está no meio da contagem
        B(j-1,2)= 1;
        for k = pontos:Npontos
            a(k - 2) = a(k);
        end
        Npontos = Npontos - 2;
        pontos = pontos - 1;
    end
end
end

TAM = length(B); kk = 1;

for k = 1:TAM
    if B(k,1) > TOL
        BB(kk,1) = B(k,1);
        BB(kk,2) = B(k,2); kk = kk+1;
    end
end
end
RESPOSTA = BB;
end
```