



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”**

**FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

PATRÍCIA GABRIEL VIEIRA

**SELEÇÃO DA FAIXA DE FREQUÊNCIA USANDO WAVELETS
PARA DETECÇÃO DE DANOS EM SISTEMAS SHM BASEADOS
NO PRINCÍPIO DA EMI**

Ilha Solteira
2016



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”**

**FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

PATRÍCIA GABRIEL VIEIRA

**SELEÇÃO DA FAIXA DE FREQUÊNCIA USANDO WAVELETS
PARA DETECÇÃO DE DANOS EM SISTEMAS SHM BASEADOS
NO PRINCÍPIO DA EMI**

Dissertação apresentada à Faculdade
de Engenharia de Ilha Solteira -
UNESP como parte dos requisitos
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Elétrica.

Área de conhecimento: Automação.

Orientador:

Prof. Dr. Jozue Vieira Filho

Ilha Solteira
2016

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

V658s Vieira, Patrícia Gabriel.
Seleção da faixa de frequência usando wavelet para detecção de danos em sistemas SHM baseados no princípio da EMI / Patrícia Gabriel Vieira. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2016
69 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia . Área de conhecimento: Automação, 2016

Orientador: Jozue Vieira Filho
Inclui bibliografia

1. SHM. 2. Impedância eletromecânica. 3. Transformada wavelet packet.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Seleção da faixa de frequência usando wavelets para detecção de danos em sistemas SHM baseados no princípio da EMI

AUTORA: PATRÍCIA GABRIEL VIEIRA

ORIENTADOR: JOZUE VIEIRA FILHO

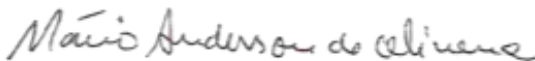
Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em ENGENHARIA ELÉTRICA, área: AUTOMAÇÃO pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. JOZUE VIEIRA FILHO
Coordenadoria Executiva / UNESP - Câmpus de São João da Boa Vista



Profa. Dra. SUELY CUNHA AMARO MANTOVANI
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. MÁRIO ANDERSON DE OLIVEIRA
Departamento de Eletro-eletrônica / Instituto Federal de Mato Grosso

Ilha Solteira, 19 de dezembro de 2016

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, a nossa senhora Aparecida minha intercessora, por terem me sustentado a cada dia desta jornada.

Agradeço aos meus pais, José e Maria, minha irmã Lidiane por estarem comigo, me apoiando e ajudando a vencer os obstáculos da vida, pois sem eles não teria chegado até aqui.

A todos os professores pelas valiosas contribuições na minha formação acadêmica, com seus ensinamentos. Em especial agradeço aos professores Jozue Vieira Filho, por ter me orientado neste trabalho com paciência, incentivo e dedicação, e Marco Aparecido Queiroz Duarte, que esteve presente em meu mestrado desde o início, me norteando e colaborando para minha formação como pesquisadora.

A doutora Mari, pelo apoio e carinho que teve comigo, sempre me motivando com seus sábios conselhos.

Aos meus amigos, a Natalia, e aos demais colegas do grupo de *wavelets* e do Laboratório de Processamento de Sinais e Instrumentação (LabPSI - FEIS -UNESP), que estiveram comigo em momentos de turbulências e em momentos de alegria, trocando conhecimentos, experiências e dando forças para continuar.

Por fim, a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro concedido.

RESUMO

Neste trabalho aplica-se a Transformada Wavelet Packet para a identificação de faixas de frequência para detecção de danos em sistemas de monitoramento de integridade estrutural baseados no princípio da impedância eletromecânica no domínio do tempo. Assim, foram verificadas e determinadas as faixas de frequências que melhor representam as variações no conjunto PZT/estrutura por meio de informações obtidas da Transformada Wavelet Packet aplicada no sinal de resposta do conjunto PZT/estrutura, obtendo uma metodologia viável, fácil e simples para escolher a faixa mais sensível para a detecção de danos. Os resultados indicam que a entropia dos coeficientes wavelet é uma importante referência na seleção da banda mais apropriada para a detecção de danos.

Palavras-chave: SHM. Impedância eletromecânica. Transformada wavelet packet.

ABSTRACT

This work applies the Wavelet Packet Transform in the identification of frequency bands for damage detection in structural health monitoring systems based on the principle of electromechanical impedance in the time domain. Thus, the frequency bands that best represent the variations in the set PZT/structure were obtained and determined by means of the information obtained from the Wavelet Packet Transform applied to response signal obtained from PZT/structure, which is an easy, simple and viable methodology for choosing the more sensitive frequency bands for damage detection. Results indicate that the entropy of wavelet coefficients is an important reference in selecting the most appropriate band for damage detection.

Keywords: SHM. Electromechanical impedance. Wavelet packet transform.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama de processos inerentes de SHM.....	18
Figura 2 - Representação esquemática da conversão de energia no efeito piezelétrico.	20
Figura 3 - Modelo eletromecânico do tipo massa-mola.....	21
Figura 4 - Impedância do PZT: <i>baseline</i> e dano a 10 cm do transdutor.	22
Figura 5 - Analisadores de Impedância: a) HP4192A, b)HP4194A.....	24
Figura 6 - Diagrama do analisador de impedância.	25
Figura 7 - Circuito de excitação e captação do sinal de resposta do PZT/estrutura.	28
Figura 8 - Diagrama de blocos do sistema global.....	31
Figura 9 - Exemplo de método para escolha da faixa de frequência.	32
Figura 10 - Árvore de decomposição da DWT, em três níveis, e o sinal após a DWT.	37
Figura 11 - Árvore de decomposição da WPT, em três níveis, e o sinal após a WPT. .	38
Figura 12 - Análise dos sinais: a) Domínio do tempo b) Domínio da frequência.	43
Figura 13 - Exemplo de tamanho de banda dos coeficientes da árvore da WPT.	44
Figura 14 - Fluxograma da metodologia para seleção de faixa.....	45
Figura 15 - Comparação das entropias das sub-bandas <i>baseline</i> e com dano.....	46
Figura 16 - Comparação entre curvas: a) Energia b) Módulo da Entropia.	47
Figura 17 - Comparação entre curvas: a) Sensibilidade. b) Entropia.	49
Figura 18 - Sistema no domínio do tempo baseado na impedância eletromecânica.	51
Figura 19 - Esquema PZT/estrutura usada no procedimento experimental.	51
Figura 20 - Sinal de resposta <i>baseline</i> decomposto pela WPT.	53
Figura 21 - Entropia das sub-bandas no 3º nível da WPT.	55
Figura 22 - Entropia das sub-bandas no 4º nível da WPT.	55
Figura 23 - Entropias da WPT: (a) sensor 1 e (b) sensor 2.	57
Figura 24 - Impedância do PZT: <i>baseline</i> e dano a 10 cm do transdutor.	59
Figura 25 - Índices CCDDM usando: (a) a parte real (b) a parte imaginária.	60
Figura 26 - Índices: (a) CCDDM e (b) RMSD usando o valor absoluto da impedância. .	60
Figura 27 - CCDDM _{wpt} para os coeficientes da WPT.	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de entropia e percentual de energia.	47
Tabela 2 - Valores das métricas de aproximação para o sinal de resposta.....	52
Tabela 3 - Larguras das bandas para o sinal de resposta <i>baseline</i>	54
Tabela 4 - Sub-bandas da WPT e suas respectivas faixas de frequência.	54
Tabela 5 - Sub-bandas da WPT e suas respectivas faixas de frequência.	56
Tabela 6 - Sub-bandas da WPT e suas respectivas faixas de frequência.	58
Tabela 7 - Entropias das sub-bandas no 3º nível da WPT em quatro danos.	59

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CAD	Conversor Analógico-Digital
CCDM	Correlation Coefficient Deviation Metric – Desvio do coeficiente de correlação
CCDM _{wpt}	Correlation Coefficient Deviation Metric - Wavelet Packet - Desvio do coeficiente de correlação usando wavelet packet.
CDA	Conversor Digital-Analógico
CWT	Continuous Wavelet Transform - Transformada Wavelet Contínua
DAQ	Data Acquisition – Dispositivo de aquisição de dados
DSP	Digital Signal Processor – Processador digital de sinais
DFT	Discrete Fourier Transform – Transformada de Fourier discreta
DWT	Discrete Wavelet Transform - Transformada Wavelet Discreta
EMI	Electromechanical Impedance - Impedância Eletromecânica
FFT	Fast Fourier Transform – Transformada rápida de Fourier
FRF	Função de Resposta em Frequência – Frequency Response Function
HP4192A	Analisador de Impedância do Hewlet Packard - 4192A
HP4194A	Analisador de Impedância do Hewlet Packard - 4194A
IDFT	Inverse Discrete Fourier Transform - Transformada de Fourier discreta inversa
LabVIEW	Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench
NDE	Non-Destructive Evaluation – Avaliação não destrutiva
PC	Personal Computer – Computador pessoal
PZT	Pb-Lead Zirconate Titanate – Titanato zirconato de chumbo
RMSD	Root Mean Square Deviation – Desvio da raiz quadrática média
SHM	Structural Health Monitoring – Monitoramento de integridade estrutural
USB	Universal Serial Bus
WPT	Wavelet Packet Transform - Transformada Wavelet Packet
WT	Wavelet Transform - Transformada Wavelet

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	CONTRIBUIÇÃO DO TRABALHO E OBJETIVOS	14
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	15
2	MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL.....	16
2.1	SISTEMAS SHM.....	16
2.1.1	Implementação de um sistema SHM	17
2.2	TÉCNICA DA IMPEDÂNCIA ELETROMECHANICA	19
2.2.1	Sistemas de medição de impedância	23
2.2.2	Índices de detecção de dano em SHM.....	25
2.3	SISTEMAS SHM NO DOMÍNIO DO TEMPO.....	28
2.4	SELEÇÃO DA FAIXA DE FREQUÊNCIA PARA DETECÇÃO DE DANOS	31
3	TRANSFORMADA WAVELET.....	34
3.1	TRANSFORMADA WAVELET PACKET	34
3.1.1	Definições	35
3.1.2	Transformada wavelet contínua (CWT)	35
3.1.3	Transformada wavelet discreta (DWT).....	36
3.1.4	Transformada wavelet packet (WPT)	37
3.2	ENTROPIA DO NÓ DA WAVELET PACKET.....	39
3.3	SELEÇÃO DA FUNÇÃO WAVELET.....	40
4	SELEÇÃO DA FAIXA DE FREQUÊNCIA ÓTIMA USANDO WAVELET PACKET	42
4.1	METODOLOGIA PROPOSTA.....	42
4.2	PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS E RESULTADOS	50
4.2.1	Experimento 1	50
4.2.2	Experimento 2	56
4.2.3	Experimento 3	57

5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	64
	REFERÊNCIAS.....	66

1 INTRODUÇÃO

O monitoramento de integridade estrutural (SHM - *Structural Health Monitoring*) é definido na literatura como a aquisição, validação e análise de dados técnicos para facilitar as decisões de gestão durante o ciclo de vida de uma estrutura (FARRAR; WORDEN, 2013). Portanto, o SHM consiste em detectar danos e fornecer informações que possam estimar o tempo de vida útil de uma determinada estrutura.

Um dos campos de aplicação de SHM mais focados na atualidade é a indústria aeronáutica. Embora o projeto e os critérios de certificação de uma aeronave já garantam um elevado nível de segurança, um sistema de SHM poderia reduzir significativamente os custos de reparo e manutenção que representam, segundo Kessler et al. (2002), 27 % do custo de seu ciclo de vida. Por um lado, os custos diretos, relacionados com o reparo, poderiam ser reduzidos com um sistema que permita a detecção de danos em um estágio inicial. Por outro lado, os custos indiretos também seriam reduzidos, pois as paradas para manutenção programada da aeronave teriam uma menor frequência (BAPTISTA, 2010).

Existem diferentes e variadas técnicas que podem ser exploradas em sistemas SHM. Algumas técnicas que têm se mostrado eficientes são baseadas na impedância eletromecânica (EMI - *Electromechanical Impedance*) (GIURGIUTIU; ROGERS, 1997; LIANG et al., 1994). As técnicas baseadas na EMI podem ser implementadas de diferentes maneiras, mas um ponto comum e fundamental em qualquer uma delas é a escolha da faixa de frequência de análise, de modo que se tenha melhor sensibilidade para detecção do dano e boa repetitividade entre as medidas. Uma das possibilidades de exploração da EMI é a análise no domínio do tempo, o que permite a aplicação de uma variedade de técnicas de processamento de sinais, incluindo a Transformada Wavelet.

O monitoramento de integridade estrutural usando a Transformada Wavelet Packet (WPT - *Wavelet Packet Transform*), tem recebido muita atenção nos últimos anos. A literatura mostra que a WPT tem contribuído muito em sistemas SHM e que existe uma variedade de artigos utilizando wavelets. Em Shinde e Zhikun (2004), por exemplo, foi desenvolvida uma decomposição do sinal usando wavelet packet baseado em um processo de filtragem para monitoramento de estruturas, onde os componentes de mono frequência eram examinados pela energia contida nos componentes wavelet packet do sinal e bons resultados foram obtidos em estudos comparativos feitos para

avaliar o desempenho da abordagem proposta com outras técnicas SHM disponíveis, a saber, a técnica que utiliza o método de decomposição de modo empírico e os que utilizam a Transformada Wavelet Contínua, em diferentes cenários de danos e condições de ruído.

No trabalho de Sun e Chang (2002), os coeficientes da WPT forneciam informações sensíveis a danos estruturais resultantes de impacto de uma determinada carga com a estrutura e os resultados mostraram que a energia dos componentes extraídos do WPT era sensível à mudança de propriedades estruturais e insensíveis ao ruído de medição.

1.1 CONTRIBUIÇÃO DO TRABALHO E OBJETIVOS

A determinação da melhor faixa de frequência para detecção de danos em sistemas SHM baseados na EMI tem sido realizada, normalmente, de forma empírica. Como os processadores de sinais possuem armazenamento limitado, é necessário que se tenha uma metodologia que evite o carregamento de dados desnecessários e obtenha uma faixa que forneça bons resultados com as métricas para conseguir identificar o dano. Por isso, neste trabalho, o objetivo foi encontrar uma metodologia para facilitar esta seleção, que fosse feita de forma analítica, usando a análise de tempo-frequência da WPT para determinar em sinais no domínio do tempo qual seria faixa mais apropriada dos sinais no domínio da frequência, de forma a contribuir para os sistemas SHM, principalmente no monitoramento online.

Assim, tendo como base, técnicas baseadas no princípio da EMI, implementadas no domínio do tempo, este trabalho propõe-se uma metodologia baseada na WPT para a seleção a faixa mais sensível que irá contribuir para melhorar o desempenho das técnicas de detecção de dano baseadas no princípio da EMI. A proposta é baseada na entropia das sub-bandas obtidas pela decomposição da WPT aplicada aos sinais obtidos do conjunto PZT/estrutura. Os resultados indicam que é possível determinar as faixas mais sensíveis para a detecção de danos com as informações extraídas da WPT de forma simples, eficiente e de fácil aplicação.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Para facilitar a compreensão da proposta, o trabalho foi organizado em cinco capítulos. No primeiro, tem-se uma introdução geral que permite entender o contexto do trabalho. Além dessa, no segundo capítulo é feita também uma introdução aos conceitos básicos sobre o estudo de monitoramento em SHM baseado no princípio da impedância eletromecânica e suas aplicações no domínio do tempo, criando assim subsídios necessários para a compreensão da necessidade de se realizar a seleção de faixas de frequência viáveis para detecção de danos. No terceiro capítulo são apresentados os conceitos básicos da Transformada Wavelet e como ela pode contribuir para determinar a faixa de frequência mais sensível em sinais obtidos de sistemas descritos no terceiro capítulo. No quarto capítulo são apresentados a metodologia proposta, os procedimentos experimentais e os resultados obtidos. Por fim, no quinto capítulo são apresentadas as considerações finais algumas sugestões para trabalhos futuros.

2 MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL

Neste capítulo é apresentada uma introdução aos sistemas de monitoramento de integridade estrutural e seus processos de implementação, visando compreender os fundamentos e as principais características da técnica da impedância eletromecânica, que se destaca por sua simplicidade e pelo baixo custo ao utilizar transdutores piezelétricos. Neste sentido, são apresentados também os princípios básicos do efeito piezelétrico, as vantagens das cerâmicas de PZT, os sistemas de medição de impedância, os índices de detecção de danos e algumas metodologias de sistemas SHM baseados na técnica da EMI existentes na literatura, dando enfoque para sistemas SHM no domínio do tempo. Por fim, é apresentada uma revisão bibliográfica sobre o processo de seleção da faixa ótima para detecção de danos.

2.1 SISTEMAS SHM

Os sistemas SHM podem ser definidos como um conjunto de uma ou mais técnicas de detecção e caracterização de danos que tem como objetivos básicos monitorar e garantir a segurança de diferentes tipos de estruturas (FRISWELL; PENNY, 2002).

Assim, o objetivo básico de qualquer sistema SHM é detectar, em tempo real ou não, danos estruturais. Porém, segundo Rytter (1993), um sistema SHM completo e avançado é constituído de cinco etapas, que permite:

- 1) Detectar a existência de dano;
- 2) Localizá-lo na estrutura;
- 3) Identificar o seu tipo;
- 4) Avaliar a sua extensão;
- 5) Determinar o tempo restante de vida útil da estrutura.

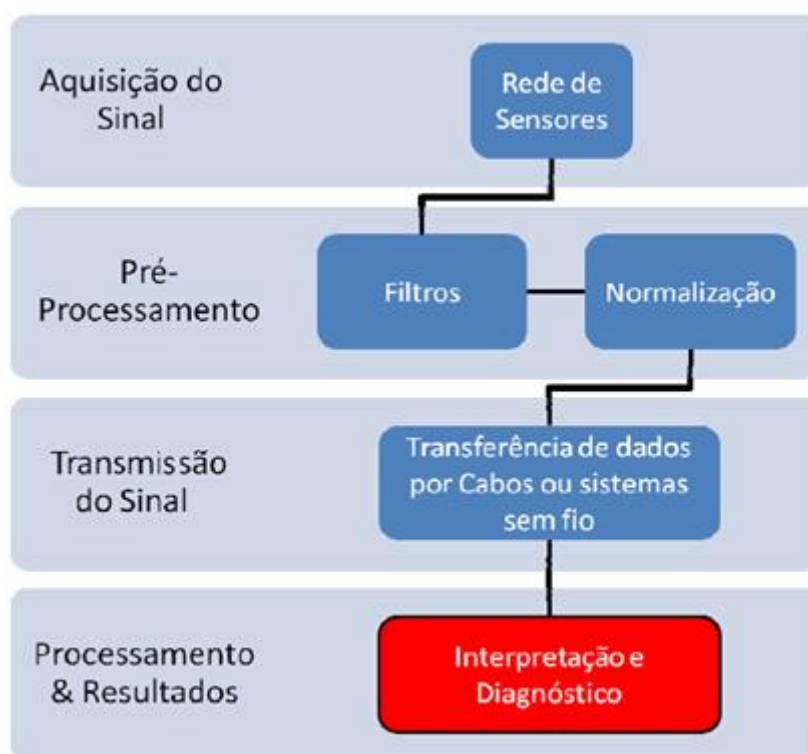
Em sistemas SHM, o dano é entendido como qualquer alteração da estrutura que pode afetar seu desempenho atual ou futuro. A partir desse conceito, a identificação do dano é feita na comparação entre dois estados da estrutura, que é a íntegra (*baseline*), ou seja, sem danos e a estrutura com dano.

Dentre as diversas alterações que um dano pode causar a uma estrutura, algumas podem estar, por exemplo, na massa, na dissipação de energia, na impedância mecânica, etc. Consequentemente, tais mudanças podem resultar na alteração da resposta dinâmica da estrutura. Desta forma, existem as técnicas baseadas na Função de Resposta em Frequência (FRF), onde é feita a coleta dos dados para avaliação da estrutura enquanto a mesma se encontra em condição dinâmica por meio de excitação natural ou forçada. A excitação natural ocorre quando a vibração produzida pelo ambiente em condições normais de operação da estrutura é aproveitada, como por exemplo, a vibração de uma ponte devido ao tráfego de veículos. Por outro lado a excitação forçada é feita de forma controlada por atuadores como transdutores. Na técnica baseada na EMI, cada transdutor permite a excitação forçada da estrutura e, simultaneamente, a medição da impedância elétrica. (BAPTISTA, 2010).

Muitas técnicas utilizadas em sistemas SHM, são oriundas dos métodos de avaliação não destrutiva (NDE - *Non-Destructive Evaluation*), como por exemplo, a técnica da EMI, que é uma técnica NDE baseada na FRF. Os métodos de NDE avaliam as propriedades de um material, seus componentes e o sistema, sem causar danos, sendo feita com o objetivo de conseguir certo grau de segurança e confiabilidade do sistema mecânico, mesmo durante ou depois de seu uso. São também exemplos de técnicas oriundas dos métodos NDE: emissão acústica, vácuo comparativo, ondas de *Lamb*, correntes de *Eddy*, fibra óptica e inspeção por partícula magnética.

2.1.1 Implementação de um sistema SHM

A implementação de um sistema SHM depende da técnica de monitoramento a ser utilizada. Porém, de forma genérica, é possível organizar qualquer técnica em quatro etapas básicas: aquisição do sinal, pré-processamento, transmissão do sinal, processamento e resultados, como mostrado no diagrama da Figura 1.

Figura 1 - Diagrama de processos inerentes de SHM.

Fonte: Simões (2011).

A etapa da aquisição dos sinais é ampla e tem relação direta com a metodologia a ser utilizada. Nesta etapa são definidos os tipos de sensores e o sistema de excitação da estrutura a ser monitorada, quando necessário.

Na segunda etapa é realizado o pré-processamento dos dados obtidos diretamente da rede de sensores. Nesta fase podem ser utilizados filtros para reduzir o nível de ruído registrado e técnicas de processamento de sinais que contribuam para melhora da qualidade dos sinais obtidos, o que podem incluir a normalização de dados ou até mesmo a extração de atributos dos dados que possam melhorar a interpretação dos dados e aumentar a eficiência do sistema.

A terceira etapa está relacionada à transmissão do sinal e o objetivo é transferir os dados medidos para os sistemas que realizarão a sua interpretação. Muitas vezes os sistemas de processamento ou de interpretação não estão fisicamente próximos ao sistema de medição, por isso, nesta etapa é definida a forma de comunicação, seja ela com fio (via cabos metálicos e/ou ópticos) ou sem fio (via dispositivos de transmissão por ondas de rádios, entre outros).

Por fim, a quarta e última etapa, que em alguns sistemas é considerada a etapa mais importante, pois nela são empregados algoritmos de classificação e interpretação dos dados. Dentre os vários algoritmos que podem ser usados para detectar efetivamente se houve ou não danos à estrutura têm-se os baseados em estatísticas, redes neurais, lógica *Fuzzy*, etc.

Nesta última etapa, também podem ser gerados resultados que caracterizem por completo o dano, como seu tipo, localização e nível. A partir desta caracterização é possível verificar se a estrutura deve ser reparada de imediato ou não, e fazer um prognóstico de durabilidade ou definir uma estratégia de monitoramento futuro.

2.2 TÉCNICA DA IMPEDÂNCIA ELETROMECHANICA

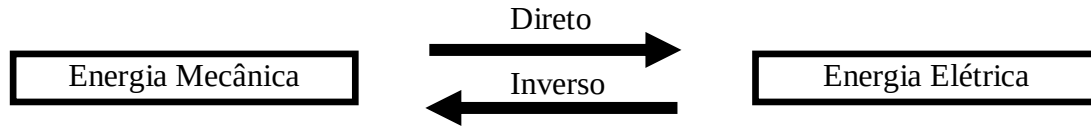
Proposta inicialmente por Liang, Sun e Rogers (1994), a técnica de SHM baseada na impedância eletromecânica (EMI) consiste basicamente em monitorar a variação da impedância mecânica da estrutura causada pela presença de um dano. Esta técnica é baseada na Função Resposta e Frequência (FRF) e é uma forma de avaliação não destrutiva (NDE - *Non-Destructive Evaluation*). A base desta técnica são os sensores de cerâmicas PZT (*Pb-Lead Zirconate Titanate* - Titanato zirconato de chumbo) revestidos por um filme metálico que serve como eletrodo em ambas as faces da placa. Quando comparadas com outros materiais piezelétricos, as cerâmicas de PZT apresentam as seguintes vantagens: bom acoplamento eletromecânico, boa estabilidade, alta rigidez, resposta linear para campo elétrico de baixa intensidade e baixo custo (LIN; GIURGIUTIU, 2006). Dentre os vários tipos de materiais piezelétricos, o PZT é o mais eficiente que se conhece até hoje, sendo capaz de converter 80% da energia mecânica aplicada a ele em energia elétrica.

Na implementação desta técnica, os transdutores PZT são colados na estrutura a ser monitorada por meio de um adesivo de alta rigidez – normalmente uma simples cola instantânea a base de cianoacrilato ou uma resina de epóxi. Devido ao efeito piezelétrico, é estabelecida uma relação entre as propriedades mecânicas da estrutura e a impedância elétrica do transdutor. Logo, é possível monitorar variações dessas propriedades através da medição da impedância elétrica do PZT (CAWLEY, 1984).

O efeito piezelétrico pode ser definido como a conversão de energia mecânica em energia elétrica (efeito direto) ou a conversão de energia elétrica em energia

mecânica (efeito inverso), como representados na Figura 2. Os dois efeitos foram descobertos por Jacques e Pierre Curie em 1880-1881. O termo piezelétrico vem do grego *piezein*, que significa pressionar.

Figura 2 - Representação esquemática da conversão de energia no efeito piezelétrico.



Fonte: Adaptado de Cortez (2012).

De forma simplificada, o efeito piezelétrico pode ser descrito, desconsiderando a simetria do material, pelas seguintes equações matriciais:

$$[D] = [d][T] + [\epsilon^T][E] \quad (\text{efeito direto}), \quad (1)$$

$$[S] = [S^E][T] + [d]^T[E] \quad (\text{efeito inverso}). \quad (2)$$

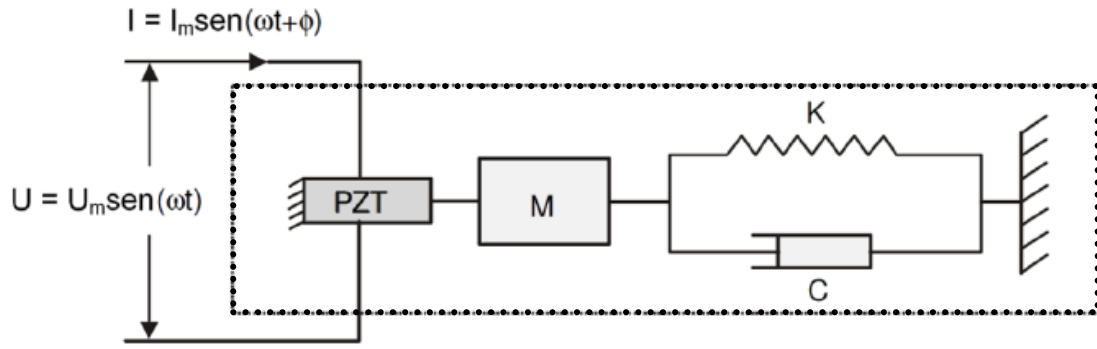
Nas Equações (1) e (2), D é o vetor de deslocamento elétrico, S é o tensor de tensão, s^E é a constante elástica do material, T o tensor de deformação, E o campo elétrico, d a constante dielétrica do material, e ϵ^T é a constante de permissividade dielétrica (BAPTISTA; VIEIRA FILHO, 2010).

Nas técnicas baseadas na EMI, a excitação forçada da estrutura é feita através do transdutor e, simultaneamente, o mesmo transdutor capta a resposta dinâmica da estrutura, o que permite medir a impedância elétrica. Esta atuação conjunta é, de fato, uma aplicação simples dos efeitos reverso (PZT como atuador) e direto (PZT como sensor).

Entretanto, de acordo com Baptista e Vieira Filho (2010), o termo atuador não é muito adequado para os casos em que a estruturas maiores são excitadas, pois geralmente atuadores e estrutura têm a mesma ordem de grandeza em termos de dimensão, o que não ocorre com as cerâmicas de PZT em sistemas de SHM, uma vez que elas são muito menores do que a estrutura monitorada.

Na Figura 3 ilustra-se um transdutor de PZT e a estrutura monitorada que são representados por um modelo eletromecânico do tipo massa-mola com um único grau de liberdade.

Figura 3 - Modelo eletromecânico do tipo massa-mola.



Fonte: Liang, Sun e Rogers (1994).

Nesta Figura 3, C é o coeficiente de amortecimento, K é a constante elástica da mola e M é a massa. O transdutor é excitado por uma fonte de tensão senoidal U, sendo U_m a amplitude e ω a frequência angular ($\omega = 2\pi f$), produzindo uma corrente I com amplitude I_m e fase ϕ . A frequência f é o inverso do período:

$$f = \frac{1}{T} \text{ (Hz)}. \quad (3)$$

De acordo com Liang, Sun e Rogers (1994), a solução do sistema apresentado na Figura 3 em termos da impedância elétrica do transdutor é dada pela Equação (4).

$$Z_E(\omega) = \frac{U}{I} = \frac{1}{j\omega a} \left(\bar{\epsilon}_{33}^T - \frac{Z(\omega)}{Z(\omega) + Z_a(\omega)} d_{3x}^2 \hat{Y}_{xx}^E \right)^{-1}, \quad (4)$$

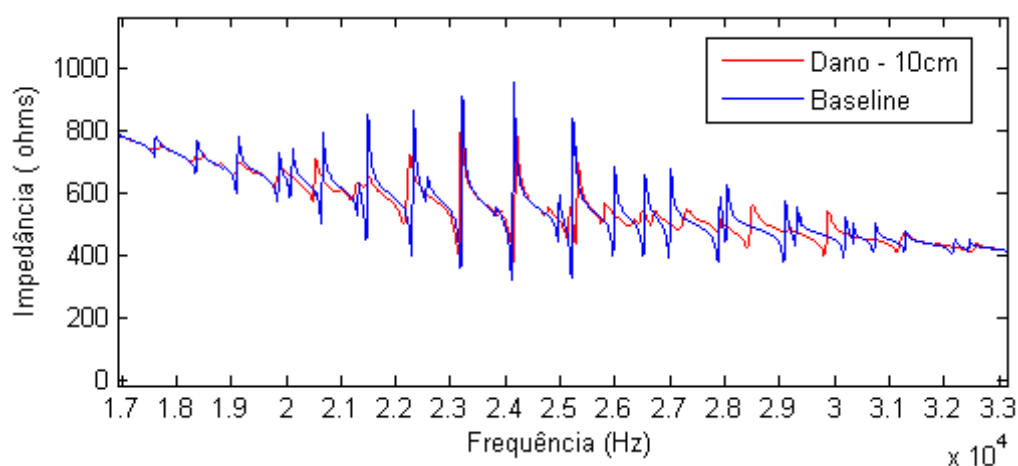
sendo:

- j a unidade imaginária,
- Z_E a impedância elétrica,
- Z_a a impedância mecânica do transdutor,
- Z a impedância mecânica da estrutura monitorada,
- a uma constante geométrica,
- $\bar{\epsilon}_{33}^T$ a constante dielétrica a uma tensão mecânica constante,
- $\hat{Y}_{xx}^E$ o módulo de Young a um campo elétrico constante,
- d_{3x} a constante piezelétrica.

Levando em consideração que as propriedades do transdutor sejam invariáveis no tempo, qualquer alteração na estrutura irá afetar o valor da impedância do sistema.

A impedância do conjunto PZT-estrutura é denominada impedância eletromecânica e sua análise é feita por meio da função de impedância que é uma função complexa da frequência, geralmente representada em gráficos por suas partes real e imaginária *versus* frequência, ou magnitude e fase *versus* frequência, (BITTENCOURT, 2009). Um exemplo do sinal de impedância elétrica de uma estrutura íntegra, denominado *baseline*, e de um sinal de impedância obtido para um dano a 10 cm do transdutor são mostrados na Figura 4. A estrutura utilizada foi uma barra de alumínio de 500 mm x 30 mm x 2 mm.

Figura 4 - Impedância do PZT: *baseline* e dano a 10 cm do transdutor.



Fonte: Elaboração da própria autora.

No gráfico da Figura 4 são comparadas as impedâncias elétricas do transdutor de PZT medidas quando a estrutura é encontrada com dano e quando a estrutura está íntegra (*baseline*) para a faixa de frequência mais sensível ao dano.

A parte imaginária da impedância é mais sensível à variação de temperatura, pois a constante dielétrica do PZT é sensível à temperatura e afeta apenas a parte imaginária da função. Desta forma, a parte real é a mais utilizada nas aplicações de monitoramento (PARK et al., 2003), evitando assim problemas na interpretação do sinal.

Em Park e Inman (2005) são apresentadas diversas vantagens encontradas na técnica da impedância eletromecânica em relação a outras técnicas de ensaio não destrutivo (NDE), resumidas como seguem:

- Ao contrário da maioria das técnicas baseadas nas respostas vibratórias, a técnica baseada na impedância eletromecânica utiliza altas frequências de

excitação, o que possibilita a identificação de pequenas variações na integridade da estrutura, ou seja, danos que ainda estão em seu estágio inicial;

- Ao contrário dos testes que utilizam ultrassom, o método da impedância possibilita o monitoramento da estrutura de forma autônoma, sem necessidade de pessoas com grande experiência para avaliar os dados provenientes do monitoramento;
- Diferentemente da técnica que utiliza emissão acústica, a limitação da área sensível do método da impedância ajuda no isolamento de variações no sinal da impedância decorrentes de condições normais de operação da estrutura como carga adicionada e vibrações normais de operação.

Park e Inman (2005) também apresentaram, com relação a outros métodos de identificação de danos, algumas vantagens com a técnica da impedância, a saber:

- A técnica não é baseada em modelos, e com isso pode ser facilmente utilizada em estruturas complexas;
- A técnica utiliza pequenos atuadores não intrusivos, adequados para monitorar locais de difícil acesso o que é impossível em outras técnicas;
- Os dados resultantes das medições podem ser interpretados facilmente;
- A técnica pode ser utilizada para monitoramento de estruturas em tempo real (monitoramento *on-line*);
- A técnica possibilita o monitoramento contínuo de estruturas, o que promove uma melhor avaliação do estado atual da mesma, fazendo com que a manutenção seja baseada em suas condições ao invés de ser baseada em seu tempo de utilização.

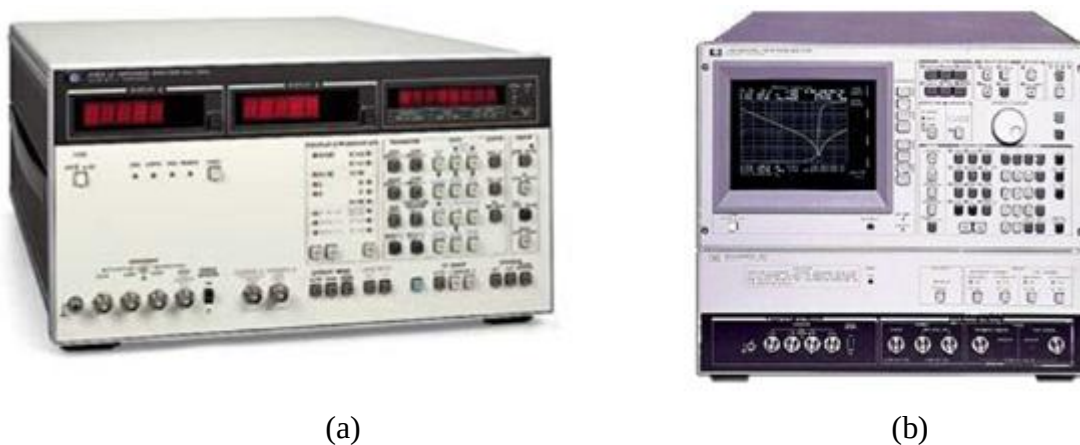
2.2.1 Sistemas de medição de impedância

Um analisador de impedância é um aparelho que gera um sinal de excitação, adquire um sinal de resposta e processa os dois sinais. Entretanto, algumas características como peso e volume impossibilitam a utilização destes aparelhos em aplicações de monitoramento estruturais em serviço, principalmente no monitoramento *online*.

No entanto, pesquisadores vêm propondo métodos para minimizar ou resolver esses inconvenientes. Um exemplo ocorre em Peairs, Park e Inman (2004), onde foi desenvolvido um método que utiliza um pequeno circuito de baixo custo e um analisador de sinais com a Transformada Rápida de Fourier (FFT - *Fast Fourier Transform*), sendo um instrumento portátil e que pode ser facilmente montado em laboratórios de pesquisa.

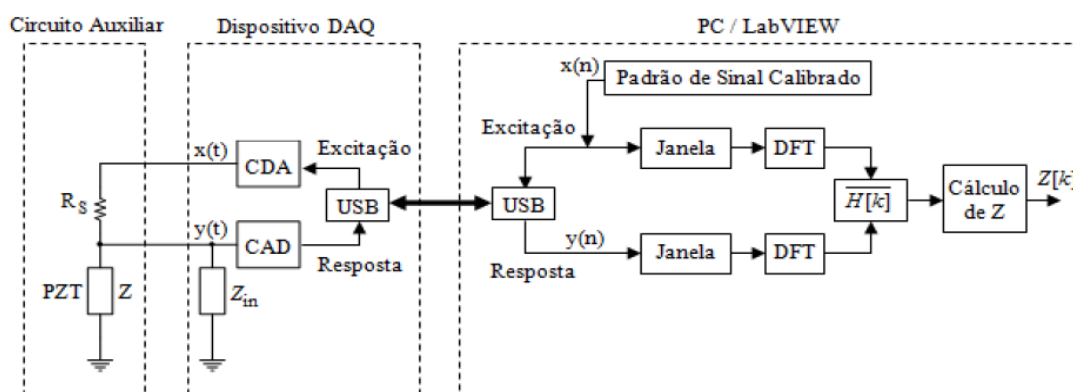
Os analisadores de impedâncias comerciais mais utilizados em pesquisas no meio acadêmico são os HP4192A, HP4194A da *Hewlett-Packard*, Figura 5.

Figura 5 - Analisadores de Impedância: a) HP4192A, b)HP4194A.



Fonte: Cortez (2012).

Baptista e Vieira Filho (2010) propuseram um sistema de medição de impedância com o princípio básico de operação baseada na FRF obtida através da Transformada de Fourier Discreta (DFT - *Discrete Fourier Transform*), dos sinais de excitação e reposta de um circuito auxiliar que foi utilizado para a conexão do transdutor de PZT. Assim, a partir da FRF e considerando os parâmetros do circuito, é obtida, com precisão, a impedância do transdutor. O sistema completo é apresentado na Figura 6.

Figura 6 - Diagrama do analisador de impedância.

Fonte: Baptista e Vieira Filho (2010).

No diagrama da Figura 6, $x(t)$ e $x(n)$ representam o sinal de excitação na forma contínua e discreta, respectivamente, assim como $y(t)$ e $y(n)$ representam o sinal de resposta do transdutor na forma contínua e discreta, respectivamente. O dispositivo DAQ é multifuncional, isto é, permite tanto a aquisição do sinal de resposta $y(t)$ através do CAD (conversor analógico-digital) como também a geração do sinal de excitação $x(t)$ através do CDA (conversor digital-analógico), ambos com resolução de 16 bits.

Geralmente, na técnica da EMI, o sinal utilizado na excitação da estrutura faz uma varredura em uma faixa de frequência variável que pode variar entre valores próximos de 0 kHz até acima de 150 kHz (PARK et al., 2003).

2.2.2 Índices de detecção de dano em SHM

Para mensurar o dano são utilizados índices que fornecem resultados da comparação entre duas medidas e atribuem uma quantidade escalar por meio de parâmetros estatísticos.

Assim, uma vez que a avaliação dos gráficos da impedância fornece as informações qualitativas sobre a integridade da estrutura, ou seja, se a estrutura está ou não danificada, as informações quantitativas a respeito do dano ocorrido é fornecido pelas denominadas métricas de dano.

Existem varias métricas para detecção de danos, algumas fazem o uso de parâmetros modais e outras utilizam comparações espectrais das curvas de resposta em frequência. Alguns exemplos dessas métricas são:

1) Índices Modais

- Variação Relativa das Frequências Naturais (VRFN)
- Variação do Coeficiente de Acoplamento Eletromecânico (VEMCC)

2) Índices Baseados na Resposta em Frequência

- Desvio da Raiz Quadrática Média (RMSD)
- Desvio Médio Absoluto Percentual (MAPD)
- Covariância (COV)
- Desvio do Coeficiente de Correlação (CCDM)
- Desvio do Coeficiente de Correlação ao Cubo (CCD3)
- Norma Infinita (Hinf)
- Norma Quadrada ou Euclidiana (H2)

Os índices que são calculados a partir das Funções de Resposta em Frequência (FRF) associam um valor escalar para a comparação entre a amplitude dos espectros de frequência da estrutura com e sem dano.

Estes índices, baseados em FRF, fornecem informações qualitativas, podendo até obter informações quantitativas com base em métodos, como o da impedância, sendo possível indicar a presença, a localização e a severidade do dano.

Um dos índices mais empregados em SHM é o desvio da raiz quadrática média (RMSD - *Root Mean Square Deviation*), baseado na norma euclidiana (GIURGIUTIU; ROGERS, 1998) dado por:

$$RMSD = \sum_n^N \sqrt{\frac{(Z_{n,d} - Z_{n,h})^2}{Z_{n,h}^2}}. \quad (5)$$

Na Equação (5), $Z_{n,d}$ e $Z_{n,h}$ representam as impedâncias elétricas do transdutor com a estrutura podendo estar danificada, mas não necessariamente, e a *baseline* com a estrutura íntegra, respectivamente, ambas medidas na frequência n , com N sendo o número total de amostras.

O índice RMSD decorre do desvio do valor quadrático médio (RMS), também conhecido como valor eficaz ajustado dos espectros de frequência. Para a identificação do dano é feita uma comparação entre a impedância elétrica medida com a estrutura em

condição inicial (íntegra) e a impedância medida após a estrutura ter sofrido um possível dano.

Desta forma, quanto maior for o valor numérico do índice RMSD, maior diferença terá entre os sinais medidos entre as estruturas com e sem defeito, ou seja, maior será o dano na estrutura.

Na literatura também é bastante utilizado o índice estatístico CCDM (*Correlation Coefficient Deviation Metric*), obtido por (MARQUI et al., 2008).

$$CCDM = 1 - \left| \frac{\sum_n^N (Z_{n,h} - \bar{Z}_h)(Z_{n,d} - \bar{Z}_d)}{\sqrt{\sum_n^N (Z_{n,h} - \bar{Z}_h)^2} \sqrt{\sum_n^N (Z_{n,d} - \bar{Z}_d)^2}} \right|. \quad (6)$$

Na Equação (6), $\bar{Z}_h$ e $\bar{Z}_d$ representam as médias dos sinais com a estrutura na íntegra (*baseline*) e ao ser possivelmente danificada, respectivamente, dadas por:

$$\bar{Z}_h = \frac{1}{N} \sum_n^N Z_{n,h}, \quad (7)$$

$$\bar{Z}_d = \frac{1}{N} \sum_n^N Z_{n,d}. \quad (8)$$

Nas Equações (7) e (8), Bhalla, Naidu e Soh (2003) recomendam o uso da parte real da impedância, mas ainda não há um consenso na literatura de qual dos componentes da impedância é mais adequado. Por isso, os cálculos podem ser feitos tanto com o módulo da parte real (resistência) ou imaginária (reatância) da impedância elétrica do transdutor. Neste sentido, muitos trabalhos fazem o uso de diferentes índices na tentativa de extrair um número relevante de atributos, melhorando assim as avaliações e classificações realizadas.

Para os índices RMSD e CCDM é de suma importância que os cálculos sejam feitos em uma faixa de frequência que contenha as frequências naturais mais sensíveis ao dano e que garanta uma boa repetitividade entre as medidas.

Além disso, as frequências dessa faixa devem ser altas o suficiente para que estas tenham um comprimento de onda menor do que o tamanho do dano que se deseja

detectar (STOKES; CLOUD, 1993). Frequências elevadas, entretanto, limitam a região de sensibilidade do transdutor (PARK et al., 2003), mas podem ser vantajosas para a localização de danos em sistemas que utilizam rede de transdutores.

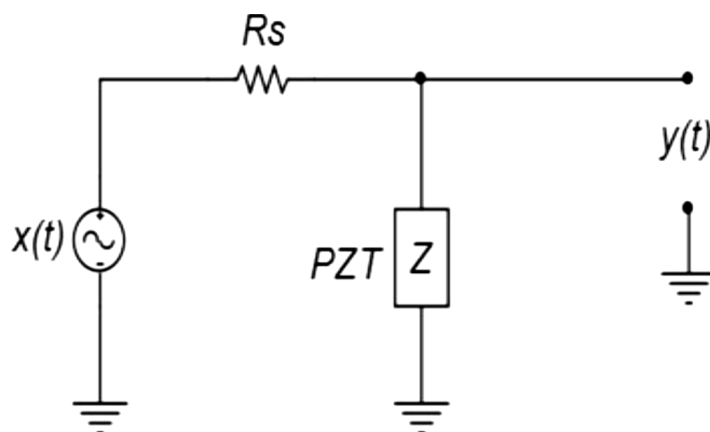
2.3 SISTEMAS SHM NO DOMÍNIO DO TEMPO

Recentemente alguns pesquisadores têm desenvolvido metodologias de análise da integridade estrutural com sinais diretamente no domínio do tempo. Uma dessas metodologias é baseada no princípio da impedância eletromecânica, no qual faz uso de técnicas de processamento de sinais para a detecção do dano no domínio do tempo por meio de transdutores PZT acoplados na estrutura monitorada, sem a necessidade de modelos matemáticos da estrutura. Um exemplo dessas metodologias pode ser encontrado em Oliveira e Inman (2016), que aborda um novo método que baseia-se numa faixa de excitação de alta frequência para avaliação de danos estruturais com base na técnica da EMI aplicada a estruturas compostas, para superar as dificuldades causadas quando os modos de baixa vibração são excitados.

Entretanto, existem poucos trabalhos aplicados em sistemas de SHM que fazem análises no domínio do tempo. Porém, em termos de sensibilidade na detecção de danos estruturais, esses trabalhos têm apresentado resultados superiores quando comparados com os métodos baseados na FRF/EMI.

Um exemplo de análise no domínio do tempo pode ser feito considerando o circuito de excitação do conjunto PZT/estrutura proposto por Baptista e Vieira Filho (2010), Figura 7.

Figura 7 - Circuito de excitação e captação do sinal de resposta do PZT/estrutura.



Fonte: Baptista e Vieira Filho (2010).

Segue que a análise no domínio do tempo pode ser feita considerando a função de transferência do circuito dado, por:

$$y(t) = \frac{Z}{Z + R_s} x(t) . \quad (9)$$

Na Equação (9), Z representa a impedância do PZT/estrutura e R_s é um resistor de precisão usado para limitar a corrente através do PZT. A resposta temporal $y(t)$ pode ser obtida com a Transformada Inversa de Laplace ou a Transformada de Fourier, considerado um sinal de excitação senoidal $x(t)$.

Outra forma de análise do circuito, partindo da definição de impedância elétrica é dada pela Equação (10):

$$Z(\omega) = \frac{V_y(\omega)}{I(\omega)} . \quad (10)$$

Na Equação (10), $Z(\omega)$ representa a impedância do conjunto PZT/estrutura, $V_y(\omega)$ a tensão de resposta, $I(\omega)$ a corrente no PZT e ω a frequência angular de excitação.

Considerando a fase Ψ , a impedância pode ser escrita pela Equação (11) (FINZI NETO et al., 2011):

$$Z(\omega) = \frac{V_y}{I} \cos(\Psi) + j \frac{V_y}{I} \sin(\Psi) . \quad (11)$$

Onde j representa a unidade imaginária.

Considerando a resistência R_s , pode ser demonstrado que a impedância pode ser escrita pelas Equações (12) e (13) (FINZI NETO et al., 2011).

$$Z_{Re} = R_s \frac{V_y}{(V_x - V_y)} \cos(\Psi) , \quad (12)$$

$$Z_{Im} = R_s \frac{V_y}{(V_x - V_y)} \sin(\Psi) , \quad (13)$$

onde Z_{Re} e Z_{Im} representam a parte real e imaginária da impedância, respectivamente.

Analisando a Equação (12), pode ser visto que a tensão de excitação é constante, em fase e pico, bem como o resistor R_s . Logo a tensão de resposta (V_y) se correlaciona diretamente com a variação de impedância Z_{Re} . De maneira análoga a análise pode ser realizada com a parte imaginária da impedância.

Outra forma de fazer a análise a partir das Equações (12) e (13) é usando o módulo da impedância, dado na Equação (14):

$$|Z| = \frac{V_y}{(V_x - V_y)} R_s . \quad (14)$$

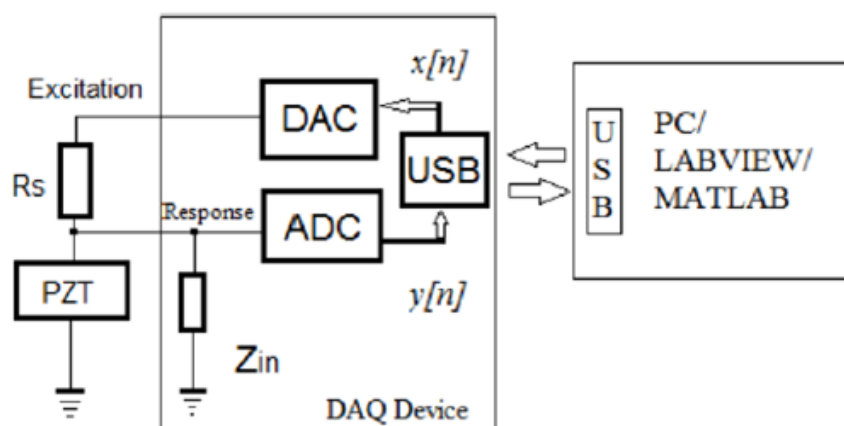
Pelas Equações (12), (13) e (14) é possível detectar danos estruturais utilizando apenas os sinais de resposta do conjunto PZT/estrutura, sem calcular a EMI de fato, pois estes sinais estão correlacionados com a impedância eletromecânica.

Desta forma, a análise usando sinais de respostas medidos no domínio do tempo torna todo o processo de detecção de dano mais sensível e objetivo, eliminando a necessidade de estimação da FRF ou da Impedância Eletromecânica, além de não exigir qualquer tipo de transformação inversa de Laplace/Fourier.

Em Vieira Filho, Baptista e Inman (2011a) também é apresentado uma nova abordagem para analisar os sinais de resposta de um sensor/atuador PZT eletromecânico em SHM, baseado na EMI, na qual a resposta no domínio do tempo do sensor PZT é diretamente analisada.

Os resultados de Vieira Filho, Baptista e Inman (2011a) foram comparados com outros métodos clássicos de resposta em frequência e foi mostrado que a resposta no domínio do tempo é suficiente para obter qualquer variação na condição da estrutura. A implementação do método proposto, utiliza o sistema global ilustrado na Figura 8, para obter a impedância elétrica no domínio do tempo.

Figura 8 - Diagrama de blocos do sistema global.



Fonte: Vieira Filho, Baptista e Inman (2011a).

Na Figura 8, o transdutor é excitado e apenas o sinal de resposta no tempo é analisado usando a Transformada Wavelet, assim, por meio novas medidas usadas para calcular o RMSD e o CDDM, é feito a detecção e quantificação do dano.

2.4 SELEÇÃO DA FAIXA DE FREQUÊNCIA PARA DETECÇÃO DE DANOS

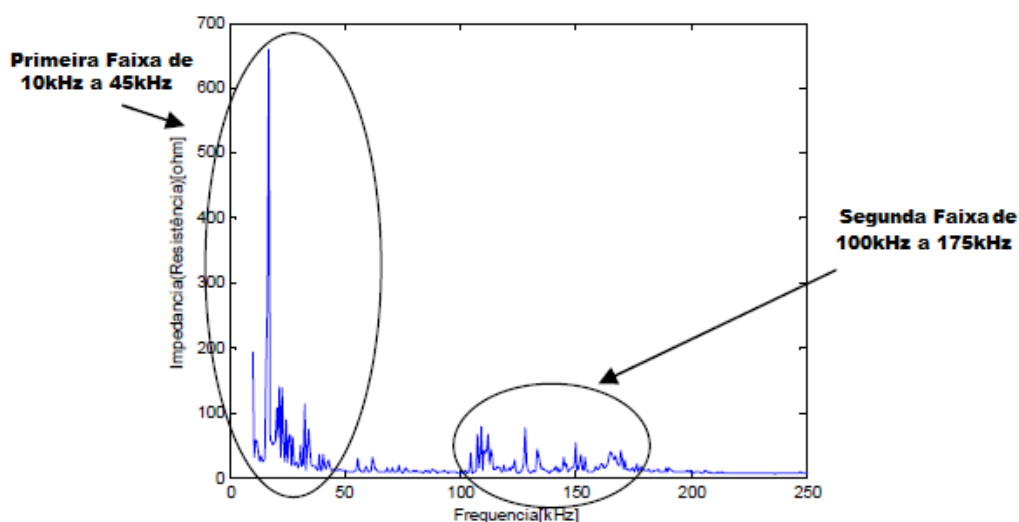
Os sistemas SHM baseados na técnica da EMI, principalmente os sistemas portáteis e sem fio têm uma etapa muito importante, que é a seleção da faixa de frequência para o cálculo dos índices para detectar a ocorrência de falhas.

Geralmente, nesses sistemas, o hardware possui armazenamento e transmissão de dados limitados, o que torna difícil e inviável o processamento de dados em uma faixa de frequência ampla.

Um exemplo da necessidade de fazer uma boa seleção da faixa de frequência, pode ser encontrado no sistema proposto por Kim et al. (2007), que é baseado em um processador digital de sinais (DSP - *Digital Signal Processor*) e usa um novo algoritmo que elimina o uso de CAD e CDA. Entretanto, a faixa e o passo de frequência em que a impedância pode ser analisada são limitados pela pouca memória do DSP. Por isso é necessário escolher uma faixa de frequência que ofereça a melhor sensibilidade para a detecção do dano e uma boa repetitividade entre as medidas.

Comumente, a seleção da faixa de frequência apropriada é feita pelo método de tentativa e erro, dependendo das particularidades da estrutura monitorada, do tipo do dano, condições de fronteira, etc. Entretanto, estudos feitos por Moura Junior e Steffen Junior (2003) demonstram que as faixas de frequências com múltiplos picos são mais favoráveis, contendo mais informações sobre as condições estruturais. Assim, faixas de frequências com picos de 20 a 30 picos são geralmente escolhidas. Como exemplo, na Figura 9, são destacadas duas faixas de frequência onde é observado um maior número de picos (10 kHz a 45 kHz e 100 kHz a 175 kHz) de uma resposta dinâmica apresentada na faixa de 10 kHz a 250 kHz.

Figura 9 - Exemplo de método para escolha da faixa de frequência.



Fonte: Adaptado de Palomino (2008).

As faixas de frequência mais baixas cobrem uma região de sensoriamento maior, enquanto que faixas de frequência mais altas podem localizar o dano (SUN et al., 1995). Deste modo, as faixas com frequência maior do que 200 kHz são mais favoráveis para obter falhas localizadas, enquanto que frequências abaixo de 70 kHz conseguem abranger uma área maior.

Baptista e Vieira Filho (2010) propuseram uma metodologia para determinar as faixas de frequências por meio de transdutores piezelétricos que são mais sensíveis para detecção de danos. Os resultados se mostraram úteis como referência para seleção, apesar da escolha da faixa de frequência correta depender das propriedades da estrutura e do tipo de dano.

Em Lopes (2013) foi proposto um modelo que avalia o desempenho do sistema para diversas faixas de frequência, tornando vantajoso monitorar uma faixa específica ou utilizando toda a banda de acordo com o mais adequado. Assim a escolha da faixa de frequência seria feita após aplicar um banco de filtros, porém o modelo não foi implementado, ficando somente como sugestão, sem apresentar resultados.

Porém, é notado que na literatura ainda não se tem um método prático que determine a melhor faixa de frequência para a detecção de danos, utilizando as características do próprio sinal diretamente no domínio do tempo, viabilizando assim, seu uso. Também, é notável que a seleção da faixa de frequência seja uma área pouco explorada e que pode ser melhorada a fim de facilitar e otimizar o processo de detecção de danos em sistemas SHM.

3 TRANSFORMADA WAVELET

Para obter informações adicionais úteis sobre os parâmetros estruturais e danos que não estão evidenciados no sinal bruto (puro) gerado, são utilizadas ferramentas de processamento de sinais, tais como transformadas matemáticas. Uma das mais conhecidas transformadas matemáticas é a Transformada de Fourier (FT - *Fourier Transform*), que se aplica em sinais estacionários. Entretanto ao se determinar todas as componentes de frequência de um sinal, não é possível saber o instante que elas estão presentes no sinal, perdendo a identidade temporal.

Buscando contornar este problema, diversas soluções têm sido desenvolvidas, como uma adaptação da FT conhecida como Transformada de Gabor, que torna possível uma análise em uma pequena seção do sinal no tempo com a técnica chamada de janelamento do sinal. Sendo que provavelmente a mais moderna e eficiente ferramenta para superar essa deficiência seja a Transformada Wavelet (VALENS, 1999). Além disso, diferentemente da FT, que fornece uma representação global do sinal, a Transformada Wavelet apresenta representações locais no domínio do tempo e da frequência de um dado sinal. (SANTOSO et al., 1996).

A Transformada Wavelet (*Wavelet Transform* - WT) surgiu na década de 1980, sendo capaz de suprir as deficiências das Transformadas de Fourier e de Gabor, com uma boa representação e resolução tanto no tempo como na frequência, se mostrando assim uma ferramenta muito eficiente na análise de tempo-frequência para dados não estacionários e, portanto pode ser efetivamente aplicada para monitoramento de integridade estrutural. A Transformada Wavelet Packet é uma dessas ferramentas de análise de frequência de tempo, que leva o sinal a um domínio que contém tanto informações no tempo como na frequência (COIFMAN; WICKERHAUSER, 1992).

3.1 TRANSFORMADA WAVELET PACKET

Antes de descrever a metodologia proposta, serão apresentados os conceitos sobre Transformada Wavelet, com o enfoque para as definições de Transformada Wavelet Unidimensional e Transformada Wavelet Packet.

3.1.1 Definições

Para que uma função $\psi(t)$ seja considerada uma wavelet é preciso satisfazer as seguintes condições básicas e necessárias:

- a) $\psi(t) \in L^2(\mathbb{R})$, ou seja, a função pertence ao espaço das funções de quadrado integrável ou, ainda, o espaço das funções de energia finita, no sentido que:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\psi(t)|^2 dt < \infty . \quad (15)$$

- b) Transformada de Fourier $\hat{\psi}(\omega)$ satisfaça a condição de admissibilidade (DAUBECHIES, 1992):

$$C_\psi = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty . \quad (16)$$

Da condição de admissibilidade tem-se:

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} \hat{\psi}(\omega) = 0 . \quad (17)$$

Assim, se $\hat{\psi}(\omega)$ é contínua então, $\hat{\psi}(0) = 0$, ou seja,

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 . \quad (18)$$

3.1.2 Transformada wavelet contínua (CWT)

Introduzida por Grossman e Morlet (1984), a Transformada Wavelet Contínua (*Continuous Wavelet Transform* - CWT) de um sinal $f(t)$, é definida como:

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot \hat{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt , \quad (19)$$

onde $\hat{\psi}$ é o conjugado da uma função wavelet mãe ψ , a é parâmetro de dilatação ou escala e b o parâmetro de translação, ambos os parâmetros são reais e a deve ser positivo.

3.1.3 Transformada wavelet discreta (DWT)

A implementação da Transformada Wavelet Discreta (*Discrete Wavelet Transform* - DWT) reduz o custo computacional de executar a CWT, pois na DWT os parâmetros de dilatação e de translação são discretizados usando a escala diádica da seguinte forma, (20)

$$a = 2^j, b = k \cdot 2^j,$$

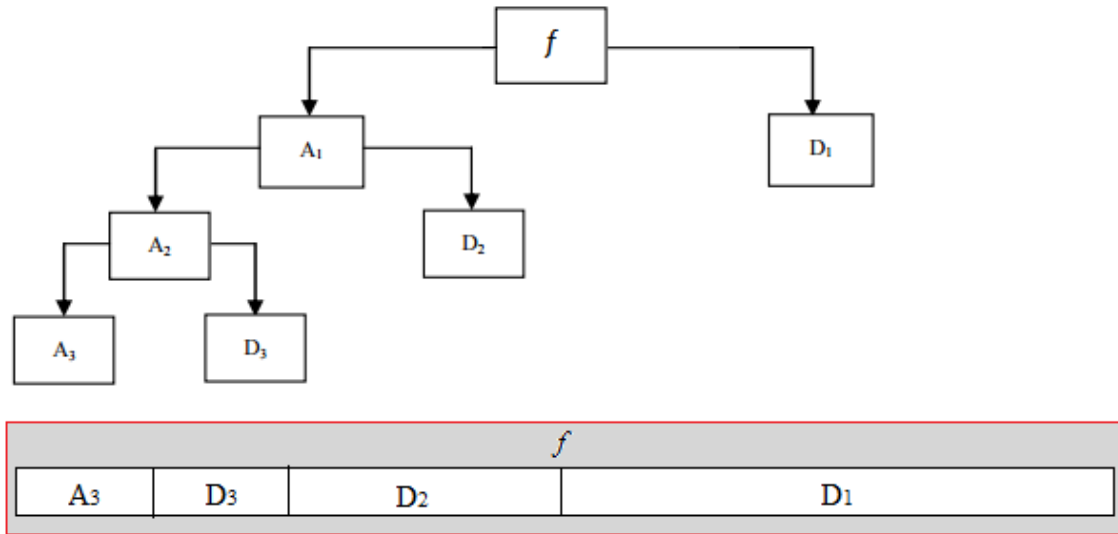
sendo j e k inteiros positivos. Wavelets diádicas permitem a caracterização de um sinal $f(t)$ sem redundâncias (DAUBECHIES, 1992).

A DWT pode ser vista como uma operação de filtragem que analisa o sinal através do filtro wavelet em uma banda particular de frequência, que vai deslocando ao longo do eixo de tempo. A banda de frequência do filtro depende do nível de decomposição, sendo possível realizar o exame local do sinal pelo deslocamento no domínio do tempo. Assim, o sinal pode ser decomposto em uma estrutura de árvore e ser representado pelos coeficientes de detalhes wavelet e aproximações wavelet em vários níveis, como segue,

$$f(t) = \left(\sum_{i=1}^j D_i(t) \right) + A_j(t). \quad (21)$$

Na Equação (21), $D_i(t)$ representa os detalhes wavelet e $A_j(t)$ a aproximação wavelet no j -ésimo nível, respectivamente. Desta forma, por exemplo, se $j = 2$, $f(t) = D_1(t) + D_2(t) + A_2(t)$. Uma representação gráfica da decomposição de um sinal S em três pela DWT é mostrada na Figura 10.

Figura 10 - Árvore de decomposição da DWT, em três níveis, e o sinal após a DWT.



Fonte: Elaboração da própria autora.

3.1.4 Transformada wavelet packet (WPT)

Conforme Wickerhauser (1994), uma wavelet packet é representada como uma função $\psi_{j,k}^i(t)$, onde i é o parâmetro de modulação, j é o parâmetro de dilatação e k o parâmetro de translação.

$$\psi_{j,k}^i(t) = 2^{-j/2} \psi^i(2^{-j}t - k), \quad i = 1, 2, \dots, j^n, \quad (22)$$

sendo n é o nível de decomposição na árvore do wavelet packet.

A wavelet ψ^i é obtida pelas relações recursivas das Equações (23) e (24):

$$\psi^{2i}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(k) \psi^i\left(\frac{t}{2} - k\right). \quad (23)$$

$$\psi^{2i+1}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{k=-\infty}^{\infty} g(k) \psi^i\left(\frac{t}{2} - k\right). \quad (24)$$

Onde ψ^i é conhecida como a wavelet mãe e os filtros discretos $h(k)$ e $g(k)$ são filtros espelhados de quadratura associados à função de escala e a função wavelet mãe, respectivamente (COIFMAN; WICKERHAUSER, 1992).

Os coeficientes do wavelet packet $c_{j,k}^i$, correspondentes para o sinal $f(t)$, podem ser obtidos pela Equação (25), que fornece os coeficientes wavelet que satisfazem a condição de ortogonalidade.

$$c_{j,k}^i = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_{j,k}^i(t) dt. \quad (25)$$

A componente wavelet packet do sinal em um nó particular pode ser obtida pela Equação (26).

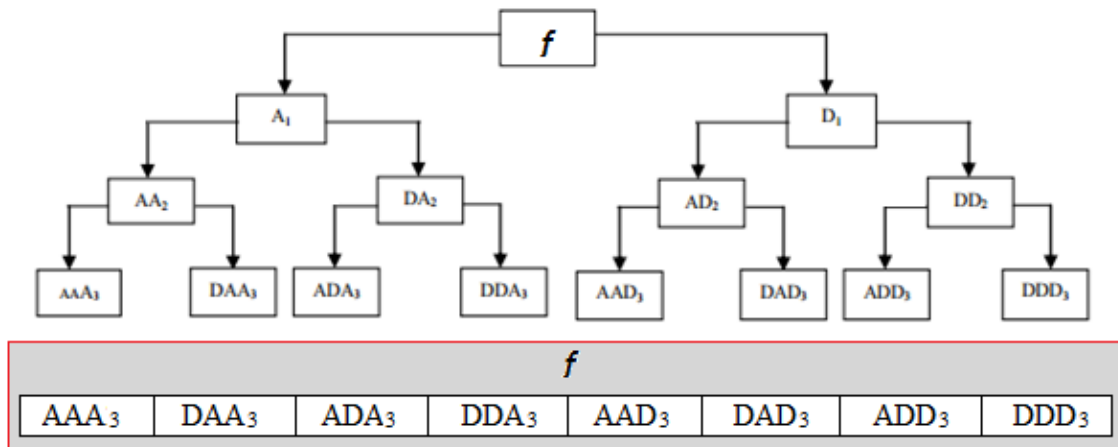
$$f_j^i(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_{j,k}^i \psi_{j,k}^i(t). \quad (26)$$

Após realizar a decomposição wavelet packet até o j -ésimo nível, o sinal original pode ser representado como uma soma de todos os componentes wavelet no nível j como mostrado na Equação (27).

$$f(t) = \sum_{i=1}^{2^j} f_j^i(t). \quad (27)$$

Uma representação gráfica da árvore de decomposição da WPT, em três níveis é mostrada na Figura 11.

Figura 11 - Árvore de decomposição da WPT, em três níveis, e o sinal após a WPT.



Fonte: Elaboração da própria autora.

Assim, a WPT pode ser visto como um banco de filtros. Um banco de filtros é um arranjo de filtros passa-faixa que decompõem o sinal em diversos componentes, cada um carregando apenas uma sub-banda de frequência do sinal original (DINIZ et al., 2004). Portanto, a WPT pode isolar os diferentes componentes de frequência de um sinal, fazendo com que as frequências mais importantes sejam codificadas em uma resolução maior.

3.2 ENTROPIA DO NÓ DA WAVELET PACKET

A entropia "E" é uma função de custo aditivo tal que $E(0) = 0$. A entropia indica a quantidade de informação armazenada no sinal, ou seja, quanto maior a entropia maior é a informação armazenada no sinal e vice-versa. Existem várias definições de entropia na literatura especializada (COIFMAN; WICKERHAUSER, 1992).

A entropia de energia do nó da wavelet packet em um determinado nó n da árvore wavelet packet de um sinal é um caso especial para $P = 2$ da entropia P – *norma* que é definida:

$$E_n = \sum_k |c_{j,k}^i|^P, \quad P \geq 1. \quad (28)$$

Na Equação (28), $c_{j,k}^i$ são os coeficientes WPT em determinado nó da árvore wavelet packet. O que demonstra que a energia do nó da wavelet packet tem um maior potencial para uso na classificação do sinal em comparação com o uso apenas de seus coeficientes (YEN; LIN, 2000).

A energia do nó da wavelet packet representa a energia armazenada em uma faixa de frequência específica e é usada principalmente para extrair os componentes de frequência dominantes do sinal.

Neste trabalho foi utilizada a entropia de Shannon, que é definida pela Equação (29).

$$E_n = -\sum_k (c_{j,k}^i)^2 \log [(c_{j,k}^i)^2]. \quad (29)$$

Este critério pode ser utilizado para escolher a melhor wavelet mãe entre um grupo de wavelets mãe ortogonais que se pretende utilizar na Transformada Wavelet Discreta de um sinal (LI et al., 2009).

Além da escolha da melhor função wavelet, também foi estudado neste trabalho, como a entropia de Shannon aplicada nos coeficientes da WPT poderia influenciar no processo de escolha da melhor sub-banda para análise do sinal.

3.3 SELEÇÃO DA FUNÇÃO WAVELET

Devido a WT possuir várias possíveis funções de decomposição, a aplicação WPT nos sinais de SHM pode ser otimizada de acordo com a seleção da função wavelet mais adequada para o processamento. A função wavelet também é conhecida como wavelet mãe.

Assim, quando se trabalha com Transformada Wavelet, primeiro é preciso escolher qual a wavelet mãe a ser usada. Existem na literatura especializada alguns métodos como CBWS - *Correlation Based Wavelet Selection* - proposto por Ma, Zhou e Kemp (2002) e o método EBWS - *Energy Based Wavelet Select*- proposto por Li, Jiang e Grzybowski (2010), porém estes métodos são passíveis a critica.

Ainda que não exista um critério definido para a seleção das wavelets. A melhor escolha é uma wavelet que caracterize o fenômeno ou o problema a ser estudado (VALINS, 2005).

Neste trabalho, a escolha da função wavelet é feita utilizando o critério baseado na entropia de Shannon. Assim, foram calculadas as entropias da decomposição da Tranformada Wavelet para o sinal estudado em várias funções wavelet.

Partindo do conceito que a escolha da função wavelet busque ajustar as curvas ao conjunto de dados, além do critério de entropia para seleção da função wavelet, também foram utilizadas neste trabalho métricas de qualidade de aproximação a fim de assegurar a melhor escolha da função wavelet.

O objetivo ao aplicar essas métricas foi baseado no fato de que quanto menor for a diferença entre o sinal original e o sinal reconstruído, após ter sido aplicada a WT, melhor terá sido a escolha da wavelet mãe, significando que a função wavelet se assemelha ao conjunto de dados.

Foram utilizadas quatro métricas de qualidade de aproximação, sendo elas: relação sinal de pico ruído (PSNR), erro médio quadrático (MSE), erro máximo absoluto (MAXERR) e a razão de normas quadrado (L2RAT).

O erro médio quadrático (MSE) é o quadrado da diferença entre os dados $X(n)$ e a aproximação $X_{app}(n)$, dividido pelo número de elementos, Equação (30),

$$MSE = \frac{\sum_n [X(n) - X_{app}(n)]^2}{n}. \quad (30)$$

PSNR é a relação sinal de pico-por-ruído em decibéis (dB). A PSNR só é significativa para os dados codificados em termos de bits por amostra, ou bits por pixel, Equação (31),

$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{255^2}{MSE}. \quad (31)$$

MAXERR é o desvio quadrado absoluto máximo dos dados, $X(n)$, a partir da aproximação, $X_{app}(n)$, Equação (32),

$$MAXERR = \| X(n) - X_{app}(n) \|^2. \quad (32)$$

L2RAT é a razão entre a norma quadrado do sinal de aproximação, $X_{app}(n)$, ao sinal de entrada, $X(n)$, Equação (33),

$$L2RAT = \frac{\| X_{app}(n) \|^2}{\| X(n) \|^2}. \quad (33)$$

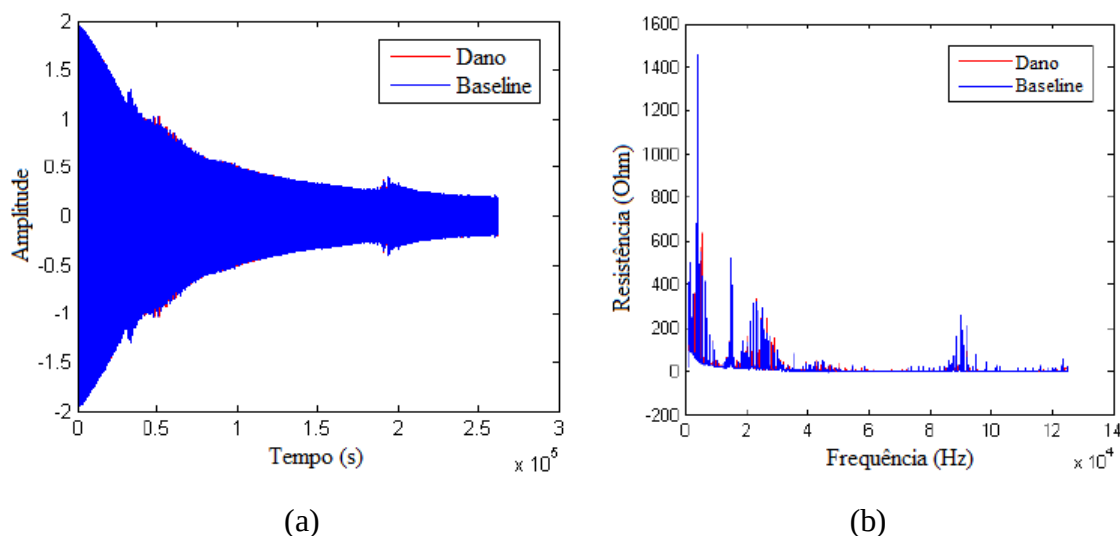
4 SELEÇÃO DA FAIXA DE FREQUÊNCIA ÓTIMA USANDO WAVELET PACKET

A metodologia que será proposta neste capítulo utiliza a entropia wavelet da WPT para determinar a faixa de frequência mais apropriada para detecção de danos. Os testes foram aplicados em sinais no domínio tempo, mas visando encontrar boas faixas no domínio da frequência por meio da análise de tempo-frequência da WPT e embora a seleção dependa das particularidades da estrutura, condições de contorno e do tipo do dano que se busca detectar, os resultados indicam que a entropia wavelet é uma importante referência na seleção da faixa mais adequada em sistemas SHM, baseados no princípio da EMI.

4.1 METODOLOGIA PROPOSTA

Os sistemas SHM baseados na técnica da EMI fazem uma análise das variações das impedâncias elétricas no domínio da frequência. Já os sistemas SHM que somente utilizam o princípio da EMI, fazem análises dos sinais no domínio do tempo, sem a necessidade de aplicar Transformada de Fourier, sendo os mais vantajosos, principalmente no ponto de vista computacional. Na Figura 12 é mostrado um exemplo de um sinal de reposta no domínio do tempo e o sinal da resistência elétrica (parte real da impedância) no domínio da frequência, ambos em modo *baseline* e com um dano simulado. Outras informações sobre o experimento do exemplo mostrado na Figura 12 são apresentadas em Vieira et al. (2016) e nos procedimentos experimentais da Seção (4.2.1) deste trabalho.

Figura 12 - Análise dos sinais: a) Domínio do tempo b) Domínio da frequência.



Fonte: Elaboração da própria autora.

A análise dos sinais obtidos de sistemas SHM no domínio do tempo é dificultada pelo tamanho da banda dos sinais e pelo fato de algumas informações não estarem visíveis em tal domínio. Portanto, seria de grande contribuição para esses sistemas, se fosse possível encontrar a melhor faixa diretamente no domínio do tempo, selecioná-la por um processo, sem ser visualmente ou por métodos de tentativas e erros, e, além disso, poder fazer o estudo no domínio da frequência com a faixa mais adequada para detecção em um tamanho de faixa menor.

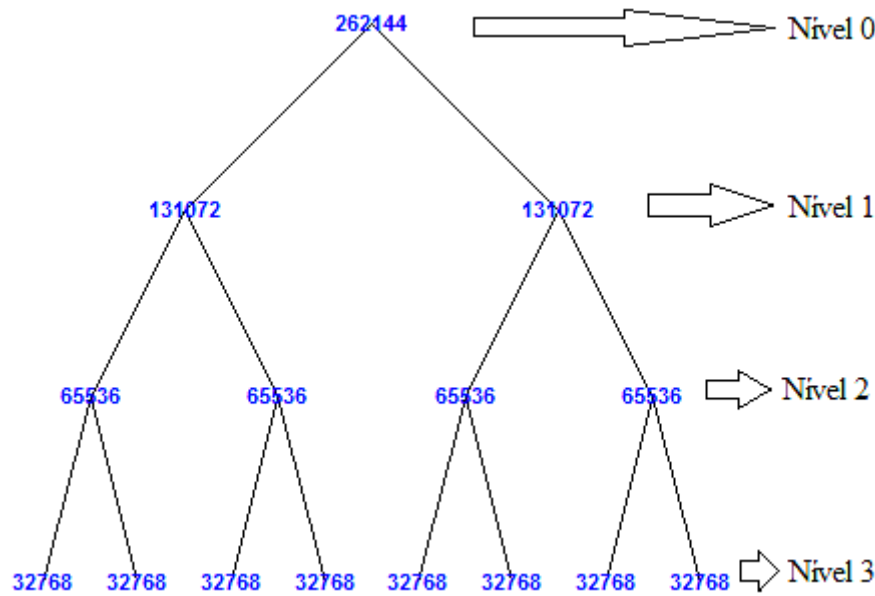
Em Wu e Du (1996), foi utilizado a wavelet packet para o monitoramento de máquinas por meio de extração de características baseado na energia de cada nó da árvore da decomposição wavelet. Assim a representação do sinal no domínio wavelet, permitia que cada nível de decomposição tivesse uma determinada informação do sinal em diferentes células tempo - frequência.

Desta forma, a proposta deste trabalho buscou solucionar o problema de se obter a faixa mais adequada por meio da Transformada Wavelet Packet. Então na determinação da melhor faixa foi utilizada a entropia dos coeficientes da árvore da WPT.

Assim, o melhor nó da árvore da WPT, com máxima entropia, representa a melhor banda do sinal para uma posterior análise de detecção de danos em SHM. A função wavelet mais apropriada para os sinais também foi selecionada por meio do critério de seleção da wavelet mãe usando a entropia de Shannon.

Levando em consideração o funcionamento da WPT, é possível escolher a quantidade de faixas, 2^n por nível e, consequentemente, o tamanho da faixa pretendida com as divisões dos níveis. Um exemplo do funcionamento da WPT em relação ao tamanho das sub-bandas é apresentado na Figura 13 para um sinal com tamanho de banda de 262144 amostras.

Figura 13 - Exemplo de tamanho de banda dos coeficientes da árvore da WPT.

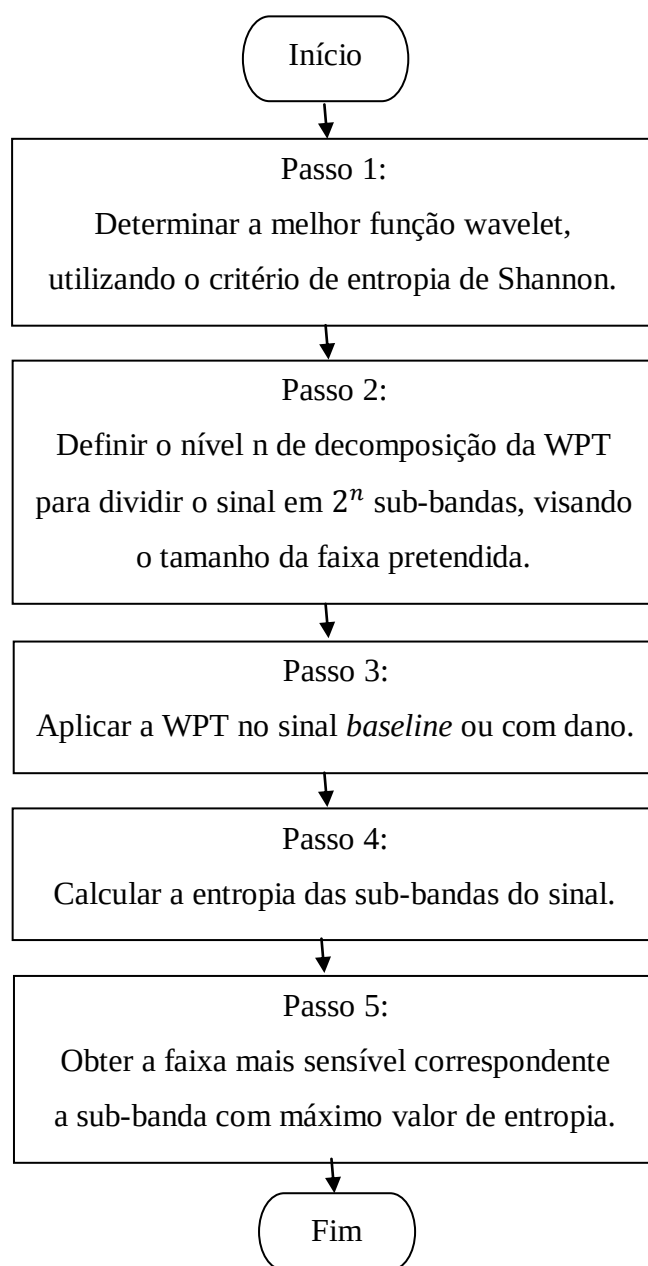


Fonte: Elaboração da própria autora.

Cada nível da WPT corresponde a uma faixa de frequência, então os limites das faixas de frequência que cada coeficiente cobre depende da frequência de amostragem. Assim, para uma frequência de amostragem F_s , tem-se que o primeiro detalhe vai da metade da frequência de amostragem até um quarto dela. De forma geral, se J denota o nível da WPT e F_s é a frequência de amostragem, os nós terminais das sub-bandas possuirão frequência no intervalo de $\left[\frac{n.F_s}{2^{j+1}}, \frac{(n+1).F_s}{2^{j+1}}\right)$ para $n=0,1,\dots, 2^j - 1$.

Para facilitar a compreensão da metodologia proposta neste trabalho um resumo do algoritmo empregado é mostrado na Figura 14. Neste trabalho foi adotado o termo ‘sub-bandas’ para referir-se aos coeficientes dos nós terminais da WPT e não aos índices dos nós da árvore da WPT.

Figura 14 - Fluxograma da metodologia para seleção de faixa.



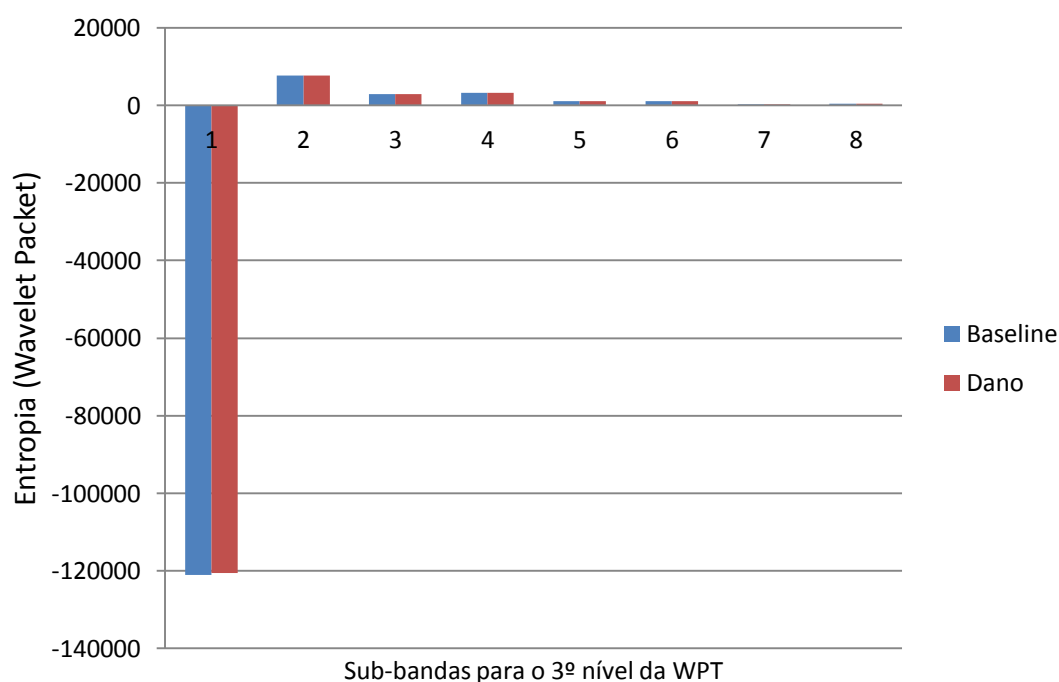
Fonte: Elaboração da própria autora.

Tanto para escolha da função wavelet como para seleção da faixa foram aplicados não somente a entropia, mas diferentes índices, tais como, métricas de aproximação para seleção da função wavelet, sensibilidade dos coeficientes das sub-bandas *baseline* e com dano para seleção da faixa, na tentativa de extrair um número relevante de atributos, melhorando assim as avaliações e classificações realizadas.

É importante ressaltar que para determinar a melhor faixa, não há necessidade de aplicar a WPT nos dois sinais, com e sem dano, basta somente aplicar em um. Na

Figura 15 é notável que as entropias das sub-bandas *baseline* e com dano para o terceiro nível da WPT possuem valores muito próximos. Desta forma é possível determinar a faixa ótima do sinal sem a necessidade de se comparar com o sinal *baseline* e nas próximas seções deste texto, será mostrado que isso válido para os sistemas SHM baseados no princípio da EMI, independentemente do nível da WPT escolhido.

Figura 15 - Comparação das entropias das sub-bandas *baseline* e com dano.



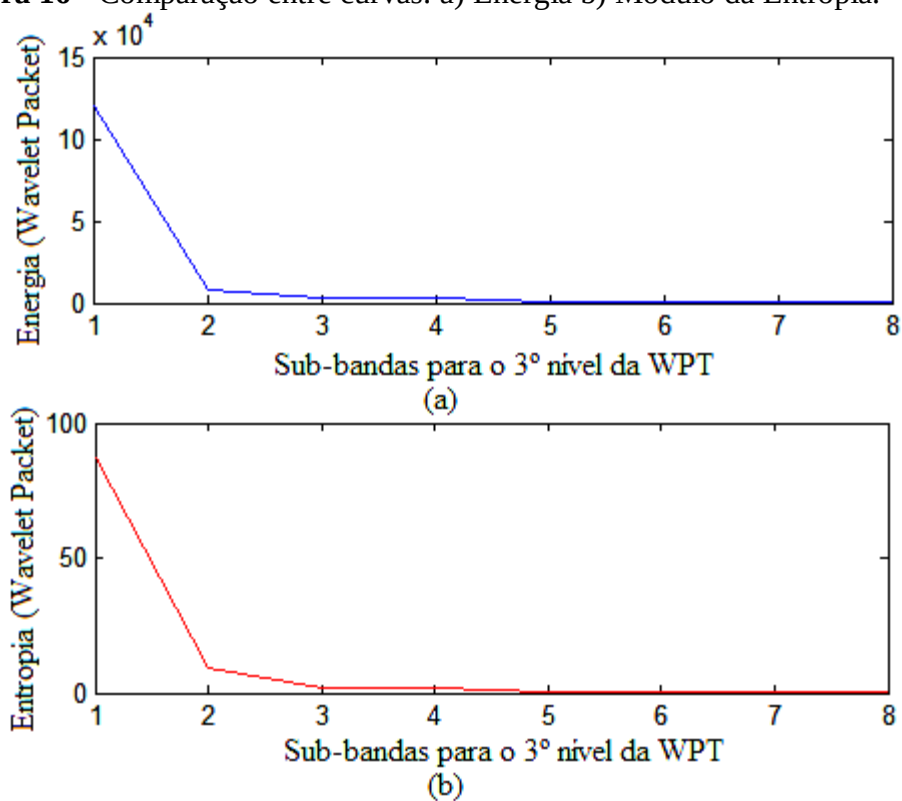
Fonte: Elaboração da própria autora.

Observou-se que o vetor com as percentagens de energia correspondente para os nós terminais da árvore WPT apresentou resultados semelhantes aos da entropia em relação aos pontos de mínimos e máximos das sub-bandas para terceiro nível da WPT, diferenciando somente pelo primeiro nó, como segue na Tabela 1. Entretanto ao considerar o módulo da entropia, as curvas se assemelham inclusive no primeiro nó terminal, conforme se verifica na Figura 16.

Tabela 1 - Valores de entropia e percentual de energia.

Sub-bandas para 3 níveis da WPT	Percentagem de energia	Entropia
1	86,7897	-1.2099e+05
2	8,9792	7.6968e+03
3	1,5529	2.9281e+03
4	1,7541	3.2091e+03
5	0,3691	1.0451e+03
6	0,3680	1.0651e+03
7	0,0387	168,8102
8	0,1483	483,7016

Fonte: Elaboração da própria autora.

Figura 16 - Comparação entre curvas: a) Energia b) Módulo da Entropia.

Fonte: Elaboração da própria autora.

Vale ressaltar que o primeiro nó sempre será o que concentra mais energia, isto ocorre pelo nó ser referente à aproximação (passa baixa) e estar nas frequências iniciais quando o sinal sofre uma variação pela aplicação da vibração externa de baixa frequência na estrutura para a coleta, sendo assim corresponde à faixa mais suscetível a distúrbios externos.

Isto é observado também no modelo para detectar faixas utilizando a sensibilidade do transdutor de Baptista (2010), no qual a sensibilidade era maior em frequências abaixo de 50 kHz.

Além disso, frequências mais altas permitem a detecção de danos menores. Portanto, é conveniente que faixas adequadas em torno de pontos de máximo locais em frequências mais altas sejam pesquisadas (BAPTISTA, 2010).

Entretanto, ao utilizar o critério de entropia da WPT, embora a concentração de energia nas primeiras sub-bandas seja maior, em valor absoluto, elas aparecem em valores negativos, não influenciando assim na determinação da faixa mais sensível, uma vez que, a seleção é feita considerando o valor máximo de entropia. Desta forma, não há a necessidade de desprezar as bandas iniciais manualmente, fazendo com que o critério de seleção da faixa baseado na entropia da WPT seja mais eficiente.

Ao buscar métricas que indicassem e confirmassem que a faixa mais adequada fosse a escolhida pela entropia das sub-bandas da WPT, foi obtida uma métrica que estimasse a sensibilidade dos coeficientes das sub-bandas da WPT.

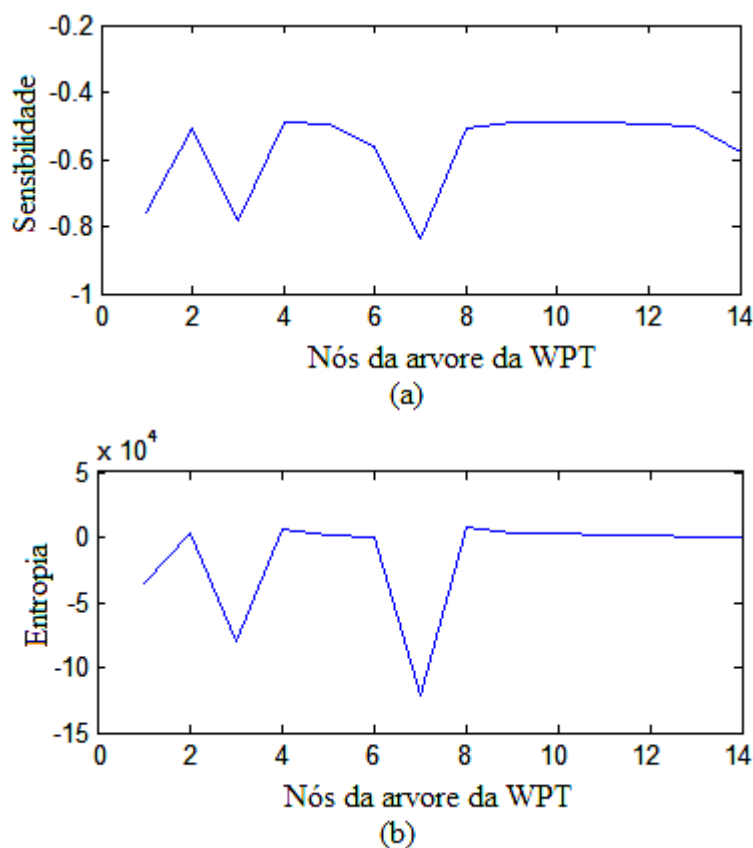
A estimação da sensibilidade dos coeficientes da WPT proposta neste trabalho é obtida comparando os coeficientes *baseline* C_B e com dano C_D através da expressão 34,

$$\lambda = \frac{||C_D| - |C_B||}{C_B}. \quad (34)$$

Na Equação (34), λ representa a variação dos coeficientes da WPT devido a uma alteração no sinal de reposta da estrutura monitorada.

Na Figura 17, é apresentada uma comparação entre os valores de entropia com os valores obtidos na sensibilidade dos quatorze primeiros nós da árvore da WPT para o sinal de resposta *baseline* e nestes gráficos é mostrado que os resultados se assemelham em pontos de máximos e de mínimos dos nós da árvore da WPT.

Figura 17 - Comparação entre curvas: a) Sensibilidade. b) Entropia.



Fonte: Elaboração da própria autora.

No gráfico da Figura 17 a curva da sensibilidade é a que melhor se aproxima da curva da entropia e considerando as oito sub-bandas (nós terminais) do terceiro nível da WPT correspondentes aos nós de 7 a 14 da Figura 17, os valores da sensibilidade dos coeficientes indicam as mesmas faixas de frequências ótimas apontadas anteriormente na Figura 15.

Caso não se queira calcular a entropia da WPT, poderá utilizar a sensibilidade dos coeficientes da WPT para identificar a melhor faixa para detecção de danos, porém para esse caso necessitará trabalhar também com o sinal com dano e com relação a isso a entropia da WPT possui vantagem.

4.2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS E RESULTADOS

A fim de verificar a eficácia da metodologia proposta na Seção (4.1), foram realizados alguns testes em sinais fornecidos pelo Laboratório de Processamento de Sinais e Instrumentação (LabPSI) - FEIS - UNESP.

Todo processo de análise deste trabalho foi aplicado em sinais obtidos de três resultados experimentais do sistema de SHM descrito no trabalho de Cortez (2012) no qual consistia em realizar medições em LabVIEW[®] (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*), software desenvolvido por (BAPTISTA; VIEIRA FILHO, 2009).

4.2.1 Experimento 1

Para o primeiro experimento foi utilizada como sensor/atuador, uma cápsula piezelétrica, modelo 7BB-27-4 da Murata, aderida a uma barra de alumínio de 500 mm x 30 mm x 2 mm.

O sistema geral utilizado por Cortez (2012) é representado no diagrama da Figura 6 do Capítulo 2 e foi implementado usando um dispositivo de dados (DAQ - *Data Acquisition*) multifuncional USB-6259 da *National Instruments* que por meio do software LabVIEW[®] gerou um sinal de excitação chirp $x(t)$ usando as seguintes opções de configuração:

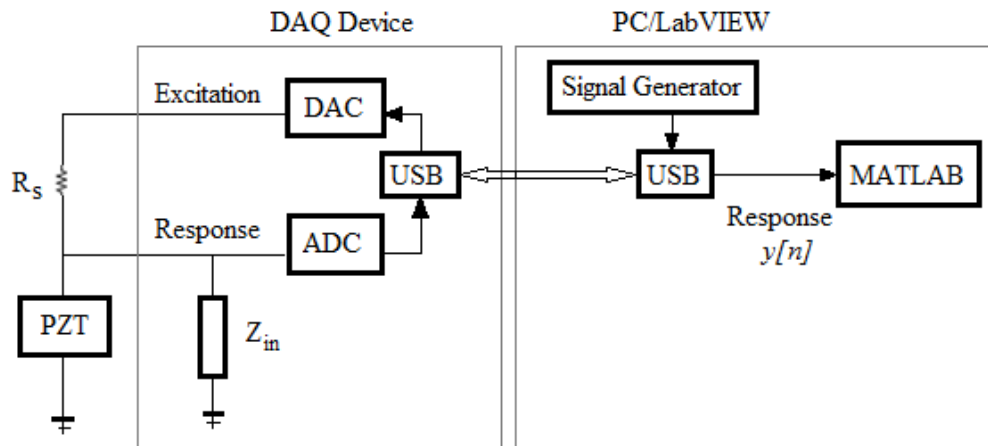
- Resistor externo: 1k Ω ;
- Frequência inicial: 1 kHz;
- Frequência final: 125 kHz;
- Amplitude: 2,1 V;
- Taxa de amostragem: 1 MSample/s;
- Número de amostras: 262144;
- Resolução de frequência: 4 Hz.

É importante considerar que o sinal de resposta deve ser amostrado com uma taxa de pelo menos $2 \cdot F_{x_{max}}$, sendo $F_{x_{max}}$ a frequência máxima no espectro de $x(t)$.

Para aplicar a metodologia proposta neste trabalho, que é determinar a faixa diretamente no domínio do tempo, foi considerado o sistema no domínio do tempo baseado no princípio da impedância eletromecânica desenvolvido por Vieira Filho,

Baptista e Inman (2011b), Figura 18, mostrando que não há a necessidade de calcular a Transformada de Fourier Discreta (DFT) para passar do domínio do tempo para o domínio da frequência ou vice-versa. A conexão entre o dispositivo e o PC é feita através de uma porta USB (*Universal Serial Bus*), proporcionando uma melhor versatilidade ao sistema.

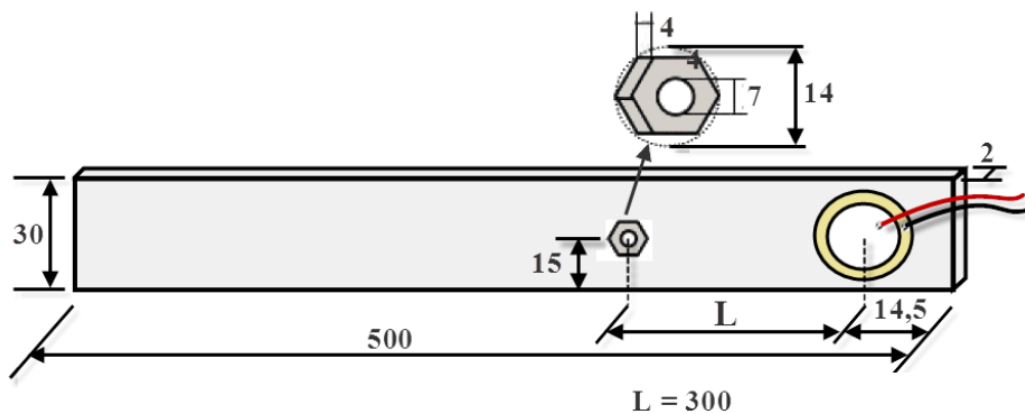
Figura 18 - Sistema no domínio do tempo baseado na impedância eletromecânica.



Fonte: Vieira Filho, Baptista e Inman (2011b).

A seguir, foi simulado um dano localizado a $L = 300$ mm de distância da cápsula, colando sobre a placa de alumínio uma porca de aço de 14 mm x 4 mm e 2 gramas. Todas as medições foram feitas com a estrutura na configuração livre-livre, isto é, com os dois lados suspensos por elásticos, sob uma temperatura ambiente de aproximadamente 25 °C. A disposição do PZT e do dano simulado estão ilustrados na Figura 19, onde as medidas são dadas em milímetros.

Figura 19 - Esquema PZT/estrutura usada no procedimento experimental.



Fonte: Cortez (2012).

A fim de selecionar a melhor função wavelet para o propósito de filtragem, foram realizados testes no software MATLAB® com as famílias wavelets de Daubechies (db), Symlet (sym), Coiflet (coif), Biorthogonal (bior), Reverse Biorthogonal (rbio) e Discrete Approximation of Meyer wavelet (dmey). Para cada uma dessas famílias, foram investigados os valores de entropia de Shannon até o máximo nível de decomposição da WT. Os melhores resultados usando o critério de entropia Shannon foram obtidos para as wavelets db1 (haar), db4, bior 1.1, rbio 1.1, rbio 1.3, rbio 3.1, rbio 3.3. Na busca de confirmar esses resultados foram aplicadas as métricas de qualidade de aproximação (PSNR, MSE, MAXERR, L2RAT), tornando possível determinar com mais precisão a melhor função wavelet que seria utilizada na Transformada Wavelet.

Foram testadas ao todo 50 funções wavelets, as que apresentaram melhores resultados para o sinal estudado foi a db1 (haar), db4, bior 1.1, rbio 1.1, rbio 1.3. Na Tabela 2 são apresentados os valores das métricas aplicadas no sinal de resposta do conjunto PZT/estrutura para as sete funções wavelets consideradas melhores pelo critério de entropia de Shannon.

Tabela 2 - Valores das métricas de aproximação para o sinal de resposta.

Wavelets	L2RAT	MAXERR	MSE	PSNR
Db1 (Haar)	1.0000000000000000	6.661338147750939e-16	7.348170444593677e-33	3.694690113943338e+02
Db4	0.999999999999539	6.434297539215095e-13	5.585110622767832e-26	3.006604858137835e+02
Bior1.1	1.0000000000000000	6.661338147750939e-16	7.348170444593677e-33	3.694690113943338e+02
Rbio1.1	1.0000000000000000	6.661338147750939e-16	7.348170444593677e-33	3.694690113943338e+02
Rbio1.3	1.0000000000000000	8.881784197001252e-16	8.492144081733670e-33	3.688406300686581e+02
Rbio3.1	1.0000000000000000	1.554312234475219e-15	2.416031100791456e-32	3.642997784034963e+02
Rbio3.	1.0000000000000000	1.332267629550188e-15	1.214623269254703e-32	3.672863876396601e+02

Fonte: Elaboração da própria autora.

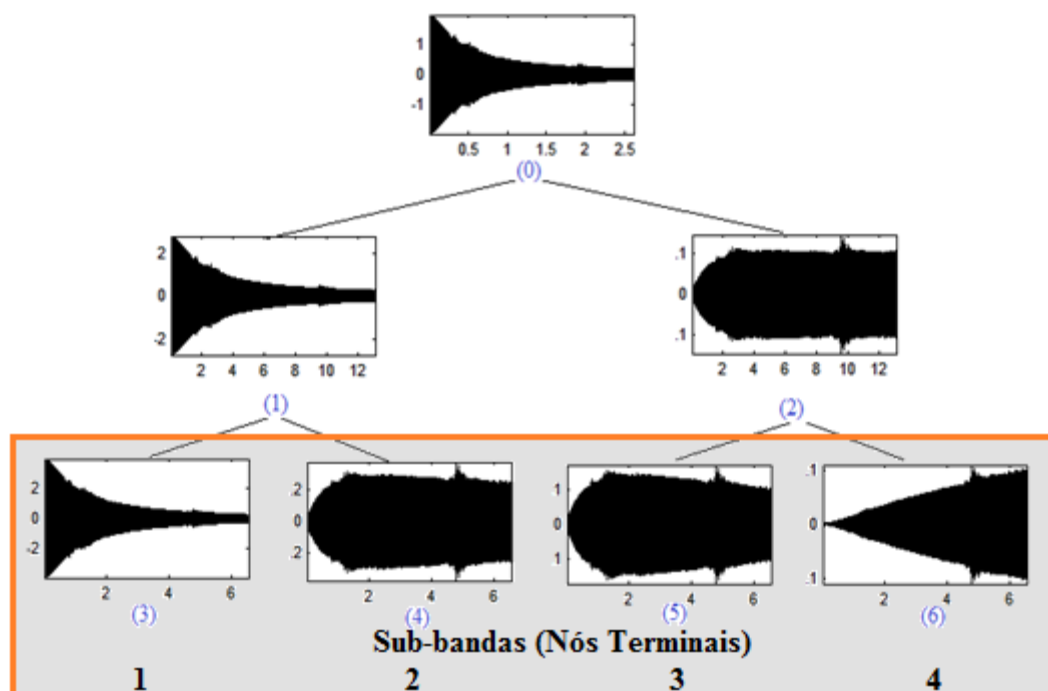
Foi observado na Tabela 2 que as wavelet de Haar, bior1.1 e rbio1.1 apresentaram resultados semelhantes devido as três funções preservarem a simetria.

Levando em consideração que na literatura voltada para SHM a wavelet simétrica é preferida como uma wavelet mãe no processo para garantir componentes simétricos e regulares em forma decomposta, foi utilizada neste trabalho a wavelet de

Haar, pela fácil construção dos coeficientes de filtro e suas propriedades, tais como a ortogonalidade, visto que com a wavelet biortogonal não é possível uma análise ortogonal.

A seguir, foi iniciada uma análise do sinal de resposta *baseline* do conjunto PZT/estrutura decomposto pela Transformada Wavelet Packet com a função wavelet de Haar. Vieira Filho, Baptista e Inman (2011b) demonstraram experimentalmente que o sinal de resposta fornece assinaturas (alguns padrões nos elementos gráficos que são próprios daquele tipo de sinal) excelentes e que são muito sensíveis para danos. Na Figura 20 é mostrado como se comporta os coeficientes até o segundo nível em seus respectivos nós da árvore da WPT para o sinal estudado.

Figura 20 - Sinal de resposta *baseline* decomposto pela WPT.



Fonte: Elaboração da própria autora.

A WPT foi aplicada ao sinal até o terceiro nível, dividindo em oito faixas para uma possível verificação da metodologia comparando com o trabalho de Cortez (2012) que utilizou largura de faixa de aproximadamente 16 kHz para o domínio da frequência.

Desta forma, como a largura de banda total do sinal é de 262144 amostras no domínio do tempo e consequentemente de 125 kHz para o domínio da frequência, se sua banda for dividida em oito sub-bandas pela decomposição da WPT até o terceiro nível,

estas sub-bandas terão largura de faixa de 15,625 kHz, como mostrado na Tabela 3 e os intervalos de faixas no domínio da frequência serão definidos como segue na Tabela 4.

Tabela 3 - Larguras das bandas para o sinal de resposta *baseline*.

Níveis da WPT	Largura da banda no domínio do tempo (Amostras)	Largura da banda no domínio da frequência
0	262144	125 kHz
1	131072	62,500 kHz
2	65536	31,250 kHz
3	32768	15,625 kHz

Fonte: Elaboração da própria autora.

Tabela 4 - Sub-bandas da WPT e suas respectivas faixas de frequência.

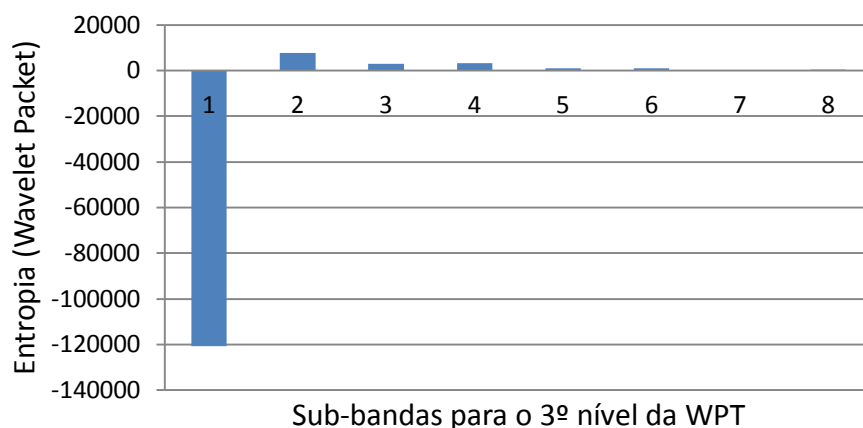
Sub-bandas (nós terminais) para 3 níveis da WPT	Faixa de frequência (kHz)
1	0 - 15,625
2	15,625 - 31,250
3	31,250 - 46,875
4	46,875 - 62,500
5	62,500 - 78,125
6	78,125 - 93,750
7	93,750 - 109,375
8	109,375 - 125

Fonte: Elaboração da própria autora.

Os resultados dos testes aplicando a metodologia proposta se mostraram úteis para seleção da melhor faixa, como pode se observar na Figura 21, a melhor sub-banda será a que concentra o maior valor de entropia. É importante destacar que a primeira sub-banda deve ser desprezada, mas para fins de comparação entre os níveis da WPT, os

valores de entropia da WPT na primeira sub-banda também foram apresentados nas Figuras 21 e 22.

Figura 21 - Entropia das sub-bandas no 3º nível da WPT.

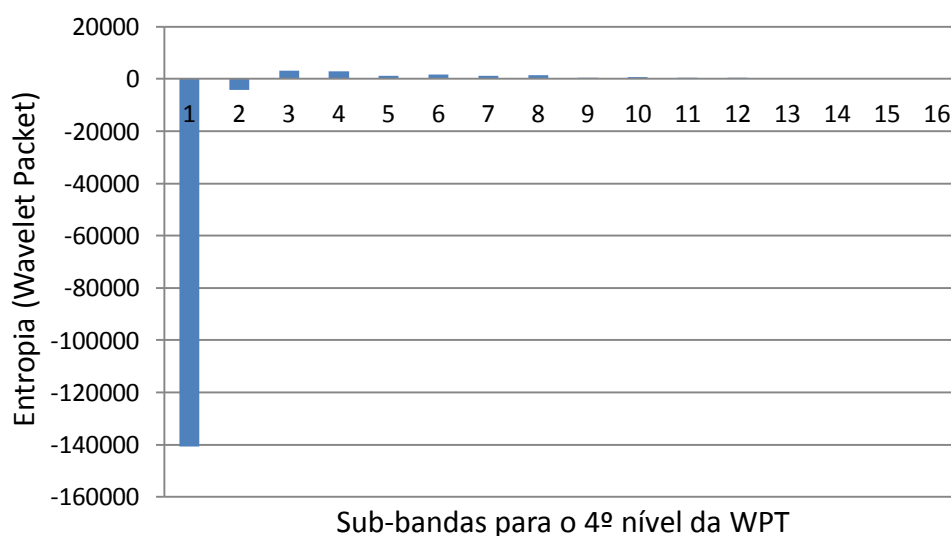


Fonte: Elaboração da própria autora.

Logo uma boa faixa seria a segunda sub-banda correspondente à faixa de 15,625 kHz a 31,250 kHz. A faixa selecionada se aproxima com a escolha visual da melhor faixa feita em laboratório, por Cortez (2012), onde a faixa considerada como mais sensível ao dano foi à faixa de 17 kHz - 33 kHz.

Também foi verificada a entropia para o caso de quatro níveis da WPT, com objetivo de visualizar o que acontece com sub-bandas com largura de faixa menor, ilustrado na Figura 22.

Figura 22 - Entropia das sub-bandas no 4º nível da WPT.



Fonte: Elaboração da própria autora.

Na Figura 22 é visto que as melhores sub-bandas são a terceira e quarta, que correspondem à faixa de 15,625 kHz a 31,250 kHz e 23,437 kHz a 31,250 kHz, respectivamente, ou seja, fazendo a união das duas faixas acaba obtendo a mesma faixa de 15,625 kHz a 31,250 kHz, obtida anteriormente para três níveis da WPT.

Então caso pretenda realizar um estudo no domínio da frequência a faixa de 15 kHz a 31 kHz é indicada como mais adequada para detecção de danos.

Após os resultados obtidos do experimento 1, o trabalho foi direcionado em verificar e confirmar a metodologia proposta para diferentes faixas de frequência e condições de dano.

4.2.2 Experimento 2

Com o intuito de observar o que acontece ao calcular a entropia da WPT em estruturas que tivessem mais de um sensor e com um tamanho maior de faixa de frequência, foi realizado o experimento 2, cujos procedimentos e opção de configuração do sinal de excitação foram semelhantes a do experimento 1, exceto a frequência inicial de 1 kHz e frequência final de 250 kHz, onde o tamanho da faixa é maior que a do experimento 1.

Para o experimento 2 foram utilizados dois sensores colados simetricamente (nas pontas de cada lado) na mesma estrutura de barra de alumínio utilizada no experimento 1 e simulado um dano a 30 cm do sensor do lado direito da barra. A seguir, foi aplicado a WPT no sinal de resposta *baseline* e no sinal com dano até o terceiro nível dividindo os mesmos em oito sub-bandas, como mostra a Tabela 5.

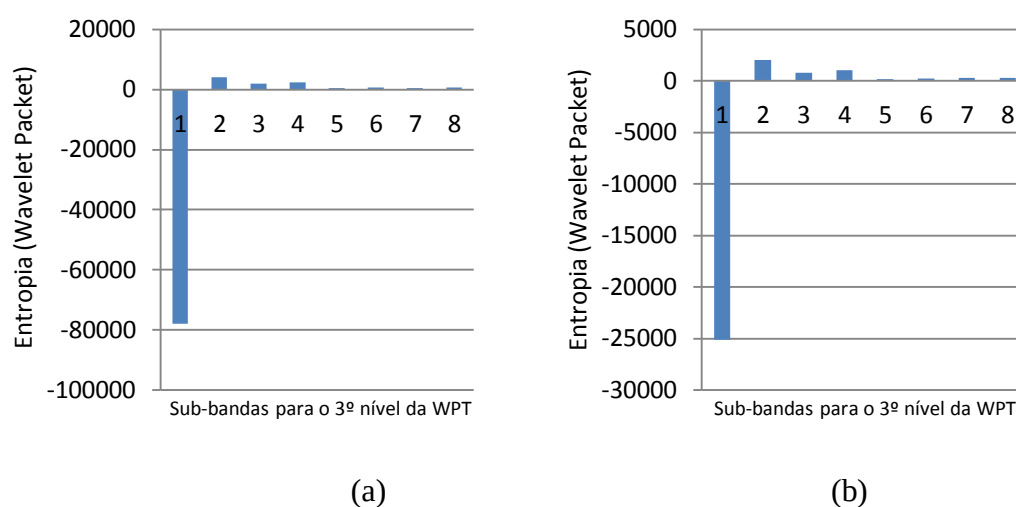
Tabela 5 - Sub-bandas da WPT e suas respectivas faixas de frequência.

Sub-bandas (nós terminais) para 3 níveis da WPT	Faixa de frequência (kHz)
1	0 - 31,25
2	31,25 - 62,50
3	62,50 - 93,75
4	93,75 - 125,00
5	125,00 - 156,25
6	156,25 - 187,50
7	187,50 - 218,75
8	218,75 - 250

Fonte: Elaboração da própria autora.

Ao aplicar a WPT foi verificado, como já era de se esperar, que as entropias da WPT para o sinal *baseline* e com dano obteriam valores muito próximos, tornando prático trabalhar somente com um sinal, inclusive para cada sensor as entropias da WPT indicaram que as melhores faixas em ambos os sensores são as mesmas, como mostrado nos seguintes resultados ao calcular a entropia da WPT no sinal *baseline* em cada sensor, como segue na Figura 23.

Figura 23 - Entropias da WPT: (a) sensor 1 e (b) sensor 2.



Fonte: Elaboração da própria autora.

Pela Figura 23, a segunda sub-banda (31,25 - 62,5kHz) é a melhor em ambos os sensores, por isso independente dos sensores a melhor faixa identificada pela entropia da WPT será a mesma.

4.2.3 Experimento 3

Para verificar a metodologia proposta em opções de configuração diferentes e com mais danos foram feitos testes com o experimento 3 e também foi feita uma comparação entre a entropia da WPT nos sinais de resposta no domínio do tempo com os índices CCDD e RMSD nos sinais de impedância no domínio da frequência.

No experimento 3 foi utilizado o mesmo sistema no domínio do tempo baseado na impedância eletromecânica de Baptista e Vieira Filho (2009) e as opções de configuração do sinal de excitação *chirp* foram:

- Resistor externo: 1k Ω ;
- Frequência inicial: 3 kHz;
- Frequência final: 35,6 kHz;
- Amplitude: 2,1 V;
- Taxa de amostragem: 250 KSample/s;
- Número de amostras: 65536;
- Resolução de frequência: 3,8147 Hz.

No experimento 3 foi utilizada a mesma de barra de alumínio de 500 mm x 30 mm x 2 mm do experimento 1, Figura 19, porém com mais danos simulados, sendo eles em diferentes localizações, L = 100, 200, 300 e 400 mm de distância da cápsula.

Visando observar o que acontece com os diferentes tamanhos de faixas de frequência, nota-se pelas opções de configuração do experimento 3 que o tamanho do sinal é menor que as dos experimento 1 e 2.

A seguir, foi aplicada a WPT nos sinais de resposta *baseline* e nos quatro sinais com os danos simulados até o terceiro nível dividindo os mesmos em oito sub-bandas, como mostrado a Tabela 6.

Tabela 6 - Sub-bandas da WPT e suas respectivas faixas de frequência.

Sub-bandas (nós terminais) para 3 níveis da WPT	Faixa de frequência (kHz)
1	3,000 - 7,075
2	7,075 - 11,150
3	11,150 - 15,225
4	15,225 - 19,300
5	19,300 - 23,375
6	23,375 - 27,450
7	27,450 - 31,525
8	31,525 - 35,600

Fonte: Elaboração da própria autora.

Ao aplicar a entropia da WPT tanto no sinal *baseline* como nos sinais com diferentes tipos/localizações do dano foi verificado que a entropia da WPT apresentou valores muito próximos entre os sinais, mostrando assim que entropia da WPT pode ser aplicada apenas em um sinal, seja *baseline* ou com dano, pois as sub-bandas indicadas nos quatro danos simulados coincidiram, Tabela 7.

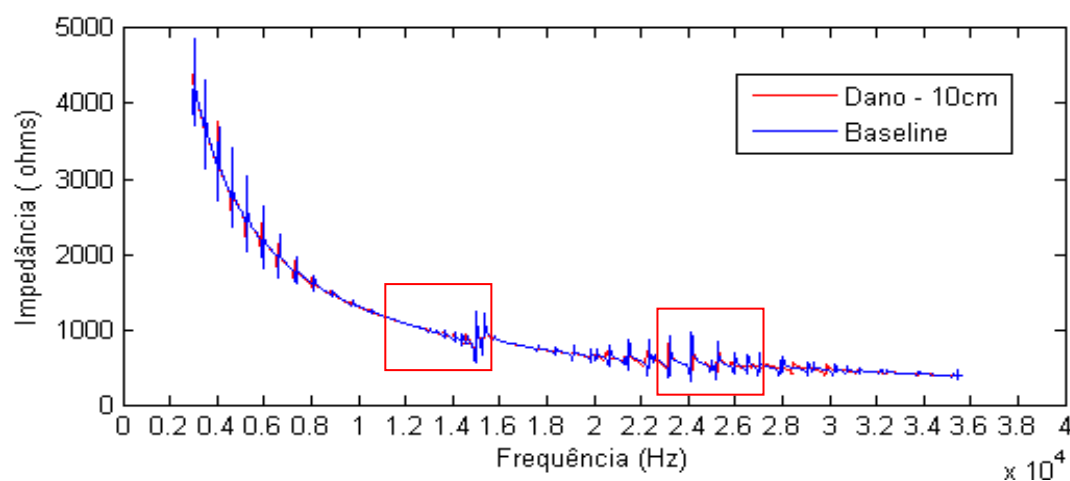
Tabela 7 - Entropias das sub-bandas no 3º nível da WPT em quatro danos.

Sub-bandas para 3 níveis da WPT	Entropia da WPT			
	Dano a 10 cm	Dano a 20 cm	Dano a 30 cm	Dano a 40 cm
1	-65172,9	-65162,9	-65134,9	-65115,6
2	-11355,6	-11357,0	-11468,4	-11362,0
3	1521,0	1518,3	1513,5	1513,7
4	117,4	109,6	92,2	89,4
5	943,8	942,3	943,5	940,7
6	1479,9	1478,3	1478,4	1477,1
7	284,6	284,7	284,6	284,6
8	981,3	981,1	982,3	980,1

Fonte: Elaboração da própria autora.

Observando a Tabela 7, os resultados indicam que a terceira sub-banda que corresponde de 11,15 kHz a 15,225 kHz no domínio da frequência é a melhor faixa para posteriores análises e cálculos dos índices para detecção de danos. Há também valores significativos para a sexta sub-banda (23,375 kHz - 27,45 kHz) que também seria uma boa faixa para detecção de danos.

Ao comparar visualmente os resultados da entropia da WPT com a Figura 24, na qual aparece o valor absoluto do sinal da impedância *baseline* e o com dano a 10 cm do sensor, foi observado ao dividir esses sinais manualmente em oito faixas e desprezar a primeira faixa, que a terceira e a sexta faixa, destacadas na Figura 24, concentram as maiores variações.

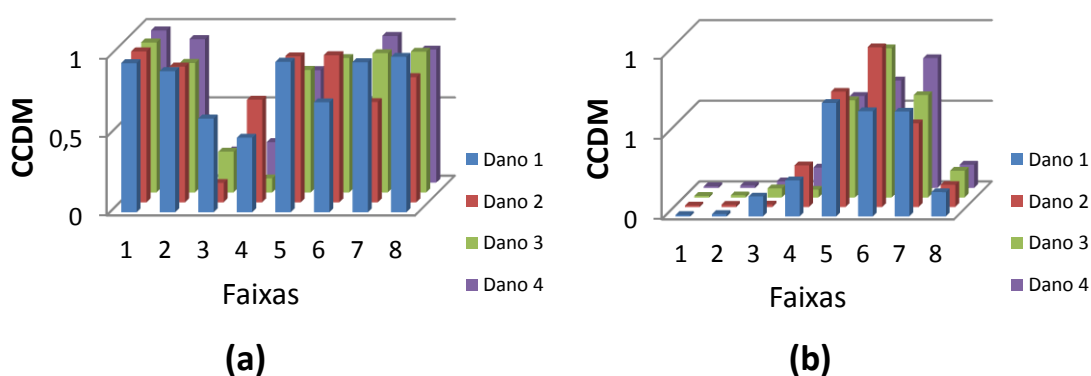
Figura 24 - Impedância do PZT: *baseline* e dano a 10 cm do transdutor.

Fonte: Elaboração da própria autora.

A fim de verificar o que acontece ao utilizar as métricas para detectar danos no domínio da frequência nas oito faixas para os sinais de impedância, foram aplicados os índices RMSD e CCDM, considerando como referência o sinal *baseline*, cujas faixas foram definidas manualmente seguindo as divisões dadas pela decomposição da WPT no terceiro nível, Tabela 6 e os danos 1, 2, 3 e 4 estão localizados a 10 cm, 20 cm, 30 cm do sensor, respectivamente. Os resultados desses índices são apresentados nas Figuras 25 e 26.

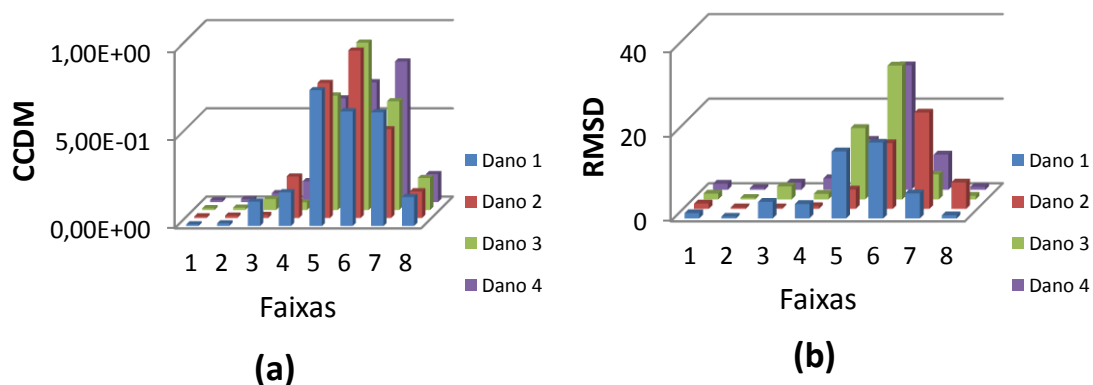
Foi considerado que embora em termos de valores absolutos os índices CCDM sejam menores que os dos índices RMSD, os valores relativos com a estrutura íntegra são bem melhores nos índices CCDM do que nos índices RMSD.

Figura 25 - Índices CCDM usando: (a) a parte real (b) a parte imaginária.



Fonte: Elaboração da própria autora.

Figura 26 - Índices: (a) CCDM e (b) RMSD usando o valor absoluto da impedância.



Fonte: Elaboração da própria autora.

Nas Figuras 25 e 26, foi observado ao comparar os resultados que os índices tanto para a parte imaginária como para o valor absoluto da impedância, são maiores nas faixas 5, 6 e 7, com destaque para a sexta faixa (23,375 kHz - 27,45 kHz).

Na Figura 26, apesar dos gráficos dos índices CCDDM e RMSD diferirem em algumas faixas, eles ainda indicam que as faixas 5, 6 e 7 possuem valores muito significativos para os quatro tipos de dano.

Assim, com esses resultados é possível validar a entropia da WPT, que também indicou que a sexta faixa no domínio da frequência era mais sensível para detecção de danos, mesmo trabalhando com o sinal no domínio do tempo. Isso pode viabilizar o sistema, diminuindo o tempo de processamento e o armazenamento do sinal com tamanho original fazendo com que trabalhe com uma pequena faixa ótima no domínio da frequência.

Nos estudos finais deste trabalho é proposta a métrica $CCDM_{wpt}$ (*Correlation Coefficient Deviation Metric - Wavelet Packet*) utilizando a WPT, Equação (35), dada na Equação (35), que foi baseada no trabalho de Vieira Filho, Baptista e Inman (2011b), que utilizou a DWT para detecção de danos em uma adaptação do CCDDM.

$$CCDM_{wpt} = 1 - \left| \frac{\sum_n^J (W_{n,h} - \bar{W}_h)(W_{n,d} - \bar{W}_d)}{\sqrt{\sum_n^J (W_{n,h} - \bar{W}_h)^2} \sqrt{\sum_n^J (W_{n,d} - \bar{W}_d)^2}} \right|. \quad (35)$$

Na Equação (35), $W_{n,d}$ e $W_{n,h}$ são os n coeficientes da WPT nos nós terminais com a estrutura danificada e a íntegra, respectivamente, com J sendo o nível. As $\bar{W}_h$ e $\bar{W}_d$ representam as médias dos coeficientes dos nós terminais da WPT da estrutura íntegra e da estrutura danificada, respectivamente, e são dadas pelas Equações (36) e (37).

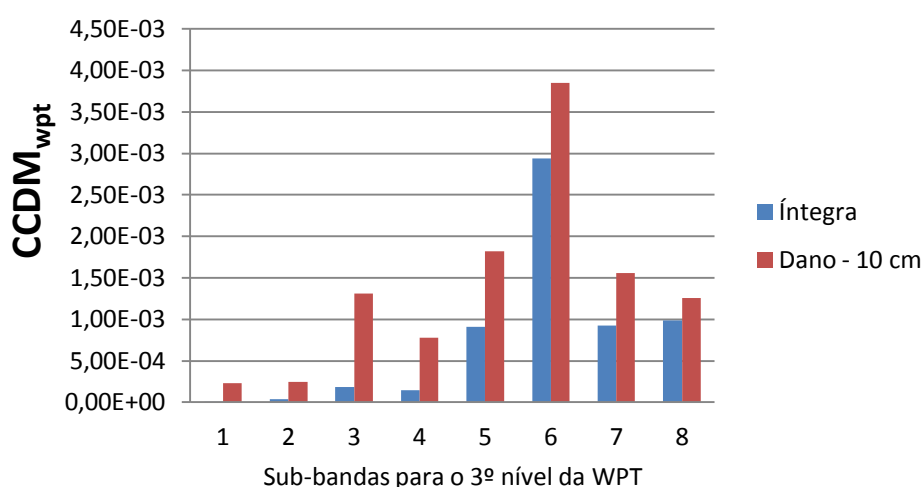
$$\bar{W}_h = \frac{1}{J} \sum_n^J W_{n,h}, \quad (36)$$

$$\bar{W}_d = \frac{1}{J} \sum_n^J W_{n,d}. \quad (37)$$

A nova métrica proposta, em um estudo inicial com somente um tipo de dano, se mostrou útil, tanto para detectar a ocorrência do dano, bem como localizar a faixa. Há a necessidade de verificar o $CCDM_{wpt}$ para diferentes tipos de danos e localizações, e também de investigar o que ocorre ao aplicar o RMSD nos coeficientes da WPT, porém estes estudos ficarão como sugestões para trabalhos futuros.

Os resultados utilizando o $CCDM_{wpt}$ para o sinal com um dano a 10 cm do sensor, tendo como referência o sinal *baseline*, são apresentados na Figura 27.

Figura 27 - $CCDM_{wpt}$ para os coeficientes da WPT.



Fonte: Elaboração da própria autora.

Com base na Figura 27, conclui-se que é possível fazer a identificação de dano em uma estrutura no domínio do tempo e que o índice de falha $CCDM_{wpt}$ pode ser considerado sensível para detecção de dano.

Levando em consideração a identificação do dano, embora os índices $CCDM$ e $RMSD$ sejam altos nas faixas 5, 6 e 7, elas podem não serem as melhores faixas para detecção de danos, pois a diferença entre os valores para os índices na íntegra e os valores dos índices com dano poderá ser menor com relação a outras faixas. Isso pode ser constatado comparando a Figura 27, em que a sub-banda 6 apresenta valores de índices mais altos que o da sub-banda 3, entretanto a diferença entre o índice $CCDM_{wpt}$ do sinal sem dano e o $CCDM_{wpt}$ do sinal com dano é muito maior na sub-banda 3. O que significa que para melhor identificar se houve ou não dano a sub-banda 3 é considerada mais sensível.

Embora o $CCDM_{wpt}$ necessite de um estudo mais detalhado para detecção de danos, ele é uma boa métrica, pois apresenta resultados semelhantes ao $RMSD$ e $CCDM$

e conta com a vantagem de ser feito no domínio do tempo, mas para somente selecionar a melhor faixa, que é foco deste trabalho, a entropia é a indicada, pois neste caso ela apresenta a vantagem de não precisar usar dois sinais (*baseline* e com dano) para o cálculo.

Em resumo, os resultados dos experimentos 1, 2 e 3 indicam para estruturas como a barra de alumínio, que as faixas localizadas entre 10 kHz a 30 kHz são propícias para detecção de danos, por isso valores de máximo da entropia da WPT se concentram nessa região. Esses resultados também podem ser comparados com o trabalho de Baptista (2010), onde houve uma concentração de pontos máximos globais na faixa de frequência entre 0 kHz e 50 kHz, indicando que a sensibilidade é máxima e quase constante em função da impedância mecânica da estrutura. O que justifica também, os bons resultados experimentais obtidos por Moura Junior e Steffen Junior (2003) em faixas de 15 kHz a 33 kHz.

É importante ressaltar que neste trabalho foi aplicado a WPT até o terceiro nível justamente para comparar o funcionamento da metodologia proposta em diferentes situações, mas é livre a escolha do nível n que consequentemente indicará a quantidade de bandas (2^n), com nível máximo de $L = \log_2 N$, sendo N o número de amostras.

Assim, de acordo com os resultados, utilizando a WPT como um banco de filtros e a entropia das sub-bandas como critério para seleção da faixa mais adequada é possível determinar faixas bem menores, evitando trabalhar com faixas muito largas, desprezando partes da faixa que não apresentará eficiência na detecção de danos.

Portanto, considerando os sinais obtidos neste estudo, a entropia dos nós terminais da WPT é um importante parâmetro a ser considerado ao selecionar a faixa mais adequada para a detecção de danos e mesmo que a faixa de frequência correta dependa de particularidades do tipo de dano, a metodologia proposta pode servir como um auxílio na seleção.

Entretanto, uma investigação da validade da metodologia proposta com outras estruturas ainda é necessária.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi proposta uma metodologia para selecionar a faixa de frequência mais sensível para detecção de danos em sistemas SHM baseados na impedância eletromecânica. A metodologia tem como base decompor sinais no domínio do tempo utilizando o banco de filtros da Transformada Wavelet Packet e aplicar o critério de entropia da WPT nos coeficientes obtidos após a decomposição, objetivando selecionar o melhor nó da árvore da WPT (chamado de sub-banda neste trabalho), que consequentemente indicaria a faixa de frequência mais sensível para detecção de danos por meio da análise de tempo - frequência da WPT. Para validar a metodologia proposta foi verificado se a melhor faixa indicada forneceria bons resultados ao aplicar métricas para identificar o dano. Embora não fosse o foco deste trabalho, ao fim dos estudos apresentados, foi proposta uma nova métrica para detecção de danos, porém ainda é necessário realizar mais testes para validação.

É importante ressaltar que a técnica da EMI é eficiente e possui diversas vantagens em relação a outras técnicas, além de se mostrar adequada para o monitoramento contínuo de estruturas em serviço. Também existem as metodologias utilizadas para detecção de danos no domínio do tempo baseadas no princípio da EMI, que em termos de sensibilidade, têm sido semelhantes e até melhores do que a tradicional EMI, pois não necessitam do cálculo da FRF ou da EMI, uma vez que a análise é feita diretamente no domínio do tempo.

Geralmente nesses sistemas, a escolha da faixa mais adequada para a detecção de danos é feita utilizando metodologias que realizam uma quantidade considerável de testes e com o intuito de superar esse desafio para que a técnica seja adotada pelas indústrias, a correta seleção da faixa de frequência foi explorada neste trabalho, visando contribuir na detecção de danos em sistemas SHM baseados no princípio da impedância eletromecânica. Desta forma este trabalho buscou selecionar a faixa de frequência para esses sistemas com análises feitas no domínio do tempo, ou seja, buscar uma boa faixa no domínio da frequência sem perder a identidade temporal.

A principal contribuição deste trabalho considera que a metodologia proposta é simples, rápida e prática para determinação das faixas, trabalhando com o sinal diretamente no domínio do tempo, além de não ter a necessidade de se trabalhar com dois sinais por meio da comparação do sinal na íntegra e após ter ocorrido o dano,

tornando possível um trabalho feito somente com um sinal para determinar a faixa mais sensível na detecção de danos estruturais, evitando assim a análise e o armazenamento de dados desnecessários. Outra vantagem é que mesmo para sinais com tamanhos de banda maiores, é possível realizar vários níveis de decomposição e encontrar faixas bem menores concentrando informações relevantes sobre as falhas ocorridas na estrutura.

Desta forma, a entropia da WPT das sub-bandas foi analisada como parâmetro na identificação e seleção da sub-banda mais adequada, consequentemente, a faixa de frequência mais sensível para ser feita a detecção do dano.

Foi verificado que a metodologia proposta neste trabalho permite que faixas com boa sensibilidade sejam selecionadas analiticamente de forma simples e prática. Houve uma boa correspondência entre os resultados deste trabalho com os experimentos feitos em trabalhos anteriores e também com os resultados dos índices CCDM e RMSD aplicados para as faixas de frequência pré-definidas. Também foi observado que as melhores faixas indicadas pela entropia da WPT, concentravam-se entre faixas de 10 kHz a 30 kHz, para diferentes localizações de dano para o tipo de estrutura utilizada.

Portanto, embora a determinação dependa de características da estrutura e do dano a serem detectados, os resultados indicam que a metodologia sugerida pode servir como auxílio na seleção da faixa mais adequada.

As sugestões para trabalhos futuros são: analisar a entropia da WPT observando seu comportamento em estruturas diferentes e mais complexas, realizar mais testes utilizando a métrica $CCDM_{wpt}$ para detecção de danos no domínio do tempo, comparar a métrica proposta neste trabalho com outras existentes na literatura, investigando sua sensibilidade em diversos experimentos, com diferentes tipos de dano e variações da temperatura ambiente. Como a ferramenta da WPT tem se mostrado útil para fornecer informações importantes sobre a estrutura, outra sugestão é trabalhar com os coeficientes da WPT até seu nível máximo de decomposição para localizar o dano na estrutura, e obter graus de severidade do dano.

REFERÊNCIAS

BAPTISTA, F. G. **Uma contribuição aos sistemas de monitoramento de integridade estrutural baseados na impedância eletromecânica**. 2010. 91 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)- Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira. 2010.

BAPTISTA, F. G.; VIEIRA FILHO, J. A new impedance measurement system for PZT based structural health monitoring. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, New York, v. 58, n. 10, p. 3602-3608, 2009.

BHALLA, S.; NAIDU, A. S. K.; SOH, C. K. Influence of structure-actuator interactions and temperature on piezoelectric mechatronic signatures for NDE. In: SPIE CONFERENCE, 2003, Bangalore. **Proceedings...** Bangalore: SPIE Digital Library, 2003. v. 5062, p. 263-269.

BITTENCOURT, T. F.; JÚNIOR, V. S. **Monitoramento de integridade estrutural de aeronaves**. 2009. 18 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização)- Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.

CAWLEY, P. The impedance method of non-destructive inspection. **NDT International**, Ann Arbor, v. 17, n. 2, p. 59-65, 1984.

COIFMAN, R.; WICKERHAUSER, M. Entropy based algorithms for best basis selection, **IEEE Trans. Information Theory**, Piscataway, v. 38, n. 2, p. 713-718, 1992.

CORTEZ, N. E. **Desenvolvimento e implementação de um sistema para detecção de falhas em estruturas usando microcontrolador**. 2012. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)- Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista-UNESP, de Ilha Solteira, 2012.

DAUBECHIES, I. **Ten lectures on wavelets**. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1992. 377 p. ISBN: 0-89871-274-2.

DINIZ, P. S. R.; SILVA, E. A. B.; NETTO, S. L. **Digital signal processing:** system analysis and design. Cambridge: Bookman, 2004. 970 p. ISBN: 978-0-0521-88775-5.

FARRAR, C. R.; WORDEN, K. **Structural health monitoring:** a machine learning perspective. Chichester: John Wiley and Sons, 2013. 654 p. ISBN: 978-1119994336.

FINZI NETO, R. M.; STEFFEN, V.; RADE, D. A.; GALLO, C. A.; PALOMINO, L. V. A low-cost electromechanical impedance-based SHM architecture for multiplexed piezoceramic actuators. **Structural Health Monitoring**, London, v. 10, n. 4, p. 391-402, 2011.

FRISWELL, M. I.; PENNY, J.E. Crack modeling for structural health monitoring. **Structural Health Monitoring**, Londres, v. 1, n. 2, p. 139-148, 2002.

GIURGIUTIU, V.; ROGERS, C. A. Recent advancements in the electro-mechanical (E/M) impedance method for structural health monitoring and NDE. In: ANNUAL INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SMART STRUCTURES AND MATERIALS, 5., 1998, San Diego. **Proceedings...** San Diego: SPIE, 1998. v. 3329. p. 536-547.

GROSSMAN A., MORLET J. Decomposition of hardy functions into square integrable wavelet of constante shape. **SIAM J. Math. Anal.**, USA, v. 15, n. 4, p. 723-736, 1984.

KESSLER, S. S.; SPEARING, S. M.; ATALA, M. J.; CESNIK, C. E. S.; SOUTIS, C. Damage detection in composite materials using frequency response methods. **Composites Part B: Engineering**, Oxford, v. 33, n. 1, p. 87-95, 2002.

KIM, J.; GRISSO, B. L.; HA, D. S.; INMAN, D. J. A system-on-board approach for impedance-based structural health monitoring. In: SENSORS AND SMART STRUCTURES TECHNOLOGIES FOR CIVIL, MECHANICAL, AND AEROSPACE SYSTEMS, 14., 2007, San Diego. **Proceedings...** San Diego: SPIE, 2007. v. 6529. p. 18-22.

LI, J., JIANG, T., GRZYBOWSKI, S. Scale dependent wavelet selection for de-noising of partial discharge detection. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, Windsor, v. 17, n. 6, p. 1705 –1714, dec. 2010. ISSN: 1070-9878. doi: 10.1109/TDEI.2010.5658220

LI, F., MENG, G.; KAGEYAMA, K.; SU, Z; YE, L. Optimal mother wavelet selection for lamb wave analyses. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, Londres, n. 1, p. 1-16. 2009.

LIANG, C.; SUN, F.; ROGERS, C. A. Coupled electro-mechanical analysis of adaptive material systems - determination of the actuator power consumption and system energy transfer. **Journal Intelligent Material Systems and Structures**, London, v. 5, n. 1, p. 12-20, 1994.

LIN, B.; GIURGIUTIU, V. Modeling and testing of PZT and PVDF piezoelectric wafer active sensors. **Smart Materials and Structures**, Bristol, v. 15, n. 4, p. 1085-1093, 2006.

LOPES, L. A. R. **Sistemas inteligentes aplicados em monitoramento de estrutura aeronáutica**. 2013. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica)- Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2013.

MA, X.; ZHOU, C.; KEMP, I. Automated wavelet selection and thresholding for PD detection. **Electrical Insulation Magazine IEEE**, Piscataway, v. 18, n. 2, p. 37–45, march-april 2002. ISSN: 0883-7554. doi: 10.1109/57.995398.

MARQUI, C. R.; BUENO, D. D.; BAPTISTA, F. G.; VIEIRA FILHO, J.; SANTOS, R. B.; LOPES JUNIOR, V. External disturbance effect in damage detection using electrical impedance. In: INTERNATIONAL MODAL ANALYSIS CONFERENCE, 26., 2008, Orlando. **Proceedings...** Orlando: SEM, 2008. p. 286-286.

MOURA JUNIOR, J. R. V.; STEFFEN JUNIOR, V. **Avaliação das bandas de frequência para o método de monitoramento estrutural baseado em Impedância**. In: SIMPÓSIO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA

MECÂNICA-POSMEC, 13., 2003, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia: FEMEC/UFU, 2003. p. 1-10.

OLIVEIRA, M. A.; INMAN, D. J. Simplified fuzzy ARTMAP network-based method for assessment of structural damage applied to composite structures, **Journal of Composite Materials**, Los Angeles, v. 50, n. 25, p. 3501–3514, 2016.

PALOMINO, LIZETH V. **Análise das métricas de dano associadas à técnica de impedância eletromecânica para o monitoramento de integridade estrutural**. 2008. 117 f. Dissertação (Mestrado)- Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, 2008.

PARK, G. ; INMAN, D. J. Impadance-based structural health monitoring. In: **Damage prognosis for aerospace, civil and mechanical system**. Inglaterra: Wyle, 2005. 449 p.

PARK, G.; SOHN, H.; FARRAR, C.; INMAN, D. J. Overview of piezoelectric impedance-based health monitoring and path forward. **Shock and Vibration Digest**, Londres, v. 35, n. 6, p. 451 - 463, 2003.

PEAIRS, D. M.; PARK, G.; INMAN, D. J. Improving accessibility of the impedance based structural health monitoring method. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, Lancaster, v. 15, n. 2, p. 129-139, 2004.

RYTTER, A. **Vibration based inspection of civil engineering structures**. 1993. 193 f. Thesis (Doctor)- Dep. of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University, Denmark, 1993.

SANTOSO, S.; POWERS, E. J.; GRADY, W. M. Power quality assessment via wavelet transform analysis. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Edmonton, v. 11, n. 2, p. 924-939, 1996.

SHINDE, A.; ZHIKUN, H. A wavelet packet based sifting process and its application for structural health monitoring, **American Control C.**, Boston, v. 5, p. 4219-4224, 2004.

SIMÕES, T. B. **Monitoramento de risers flexíveis com sensores a fibra óptica**. 2011. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)– Faculdade de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2011.

SUN, Z.; CHANG, C.C. Structural damage assessment based on wavelet packet transform. **Journal of Structural Engineering ASCE**, Reston, v. 128, n. 10, p. 1354–1361, 2002.

SUN, F. P.; CHAUDHRY, Z.; LIANG, C.; ROGERS, C. A. Truss structure integrity identification using PZT Sensor-Actuator. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, London, v. 6, n. 1, p. 134-139, 1995.

VALENS, C. **A really friendly guide to wavelets**. Boston: Birkhauser, 1999. Disponível em: <<http://perso.wanadoo.fr/polyvalens/clemens/wavelets/wavelets.html>>. Acesso em: 14 jun 2016.

VIEIRA FILHO, J.; BAPTISTA, F. G.; FARMER, J.; INMAN, D. J. Time-domain electromechanical impedance for structural health monitoring. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON STRUCTURAL DYNAMICS, 8., 2011, Leuven. **Proceedings...** Leuven: Eurodyn, 2011. p. 2043-2046.

VIEIRA FILHO, J.; BAPTISTA, F. G.; INMAN, D. J. A PZT-Based Technique for SHM Using the Coherence Function. In: A CONFERENCE ON STRUCTURAL DYNAMICS- IMAC, 29., 2011, Jacksonville. **Proceedings...** Jacksonville: Springer, 2011a. p.111-118.

VIEIRA FILHO, J.; BAPTISTA, F. G.; INMAN, D. J. Time-domain analysis of piezoelectric impedance-based structural health monitoring using multilevel wavelet decomposition. **Mechanical Systems and Signal Processing**, Amsterdam, v. 25, n. 5, p. 1550-1558, 2011b.

VIEIRA, P. G. ; VIEIRA FILHO, J. ; DUARTE, M. A. Q. Selection of the optimal frequency band using wavelet packet in SHM systems. In: NATIONAL MEETING ON

COMPUTATIONAL MODELING- ENMC, 19.; MEETING ON MATERIALS SCIENCE AND TECHNOLOGY- ECTM, 7., 2016, João Pessoa. **Proceedings...** Rio de Janeiro: Rede SIRIUS, 2016. p. 822-831.

WICKERHAUSER, M. V. **Adapted wavelet analysis from theory to software**. New York: IEEE, 1994. p. 486.

WU, Y.; DU, R. Feature extraction and assessment using wavelet packets for monitoring of machining processes. **Mechanical Systems and Signal Processing**, Washington, v. 10, n. 1, p.29-53, jan. 1996.

YEN, G. G.; LIN, K. C. Wavelet packet feature extraction for vibration monitoring. **IEEE Trans. Industrial Electronics**, Sevilla, v. 47, n. 3, p. 650-667, 2000.