

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

MÁRIO ANDERSON DE OLIVEIRA

**MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE
ESTRUTURAL BASEADA EM SENSORES
PIEZELÉTRICOS E ANÁLISE DE SINAIS NO
DOMÍNIO DO TEMPO**

Ilha Solteira
2013

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

“Monitoramento de Integridade Estrutural Baseada em Sensores Piezelétricos e Análise de Sinais no Domínio do Tempo”

MÁRIO ANDERSON DE OLIVEIRA

Orientador: Prof. Dr. Jozué Vieira Filho

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia - UNESP – Campus de Ilha Solteira, para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de Conhecimento: Automação.

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

Oliveira, Mário Anderson de.

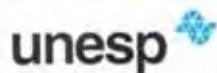
O482m Monitoramento de integridade estrutural baseada em sensores piezelétricos e análise de sinais no domínio do tempo / Mário Anderson de Oliveira. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2013
129 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2013

Orientador: Jozué Vieira Filho

Inclui bibliografia

1. SHM. 2. PZT. 3. Impedância eletromecânica. 4. Análise temporal.
5. Análise de componentes principais. 6. Savitzky-Golay.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

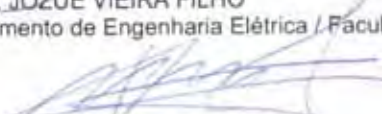
TÍTULO: MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL BASEADA EM SENSORES PIEZELÉTRICOS E ANÁLISE DE SINAIS NO DOMÍNIO DO TEMPO

AUTOR: MARIO ANDERSON DE OLIVEIRA

ORIENTADOR: Prof. Dr. JOZUE VIEIRA FILHO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de DOUTOR EM ENGENHARIA ELÉTRICA, Área: AUTOMAÇÃO, pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. JOZUE VIEIRA FILHO
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. VICENTE LOPES JUNIOR
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. NOBUO OKI
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. LEOPOLDO PISANELLI RODRIGUES DE OLIVEIRA
Departamento de Engenharia Mecânica / USP - Escola de Engenharia de São Carlos


Prof. Dr. FERNANDO DOTTA
Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico / EMBRAER

Data da realização: 03 de maio de 2013.

Dedico este trabalho aos meus pais Antônio Bernardes de Oliveira e Carmen Maria Sousa Oliveira que me educaram e possibilitaram mais essa conquista.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus que me concedeu saúde, força, inteligência e motivação para a realização deste trabalho.

Também sou eternamente grato as seguintes pessoas e Instituições:

Ao meu professor orientador Jozué Vieira Filho pela constante ajuda, orientação e estímulo fornecido durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus pais Antônio e Carmen pelo incentivo, amor, carinho e por apoiarem sempre nesse longo e tortuoso caminho.

Aos meus irmãos Cíntia e Éder (e respectivas famílias) pelo carinho, amizade e compreensão.

Aos demais familiares pelo apoio oferecido.

Aos colegas de turma do doutorado pela amizade e por dividirem os vários momentos vividos nestes últimos 4 anos.

Aos Profs. Vicente Lopes Júnior, Samuel da Silva e Antônio Eduardo Turra, do Grupo de Materiais e Sistemas Inteligentes (GMSINT) do Departamento de Engenharia Mecânica da UNESP de Ilha Solteira, pela colaboração na parte experimental e fornecimento do laboratório de pesquisa para realização de ensaios.

A todos os demais colegas do GMSINT pela amizade, apoio, contribuições e sugestões.

Aos colegas Nicolás Cortez e Julian Pita, do Laboratório de Processamento de Sinais e Instrumentação do Departamento de Engenharia Elétrica da UNESP, pela amizade, solidariedade e ajuda no desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas de Ilha Solteira Juliana Antunes, Lucas Ramalho, Nelcileo Araújo e Reginaldo Szezupior pela amizade, companheirismo e pela disposição para me ajudar tanto nos bons momentos quanto nos difíceis.

Ao Prof. Fabricio Baptista do Departamento de Engenharia Elétrica da UNESP Bauru pelo apoio e disposição em sanar minhas dúvidas durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Daniel J. Inman do *Department of Aerospace Engineering, University of Michigan*, pelas contribuições, sugestões e finas correções nos artigos gerados a partir desta tese.

Aos professores e técnicos administrativos da UNESP pelo apoio fornecido na realização deste trabalho.

Aos colegas professores e administrativos do DAEE, do Instituto Federal de Mato Grosso (IFMT) do Campus Cuiabá, pelo apoio e por sempre me fornecer o suporte necessário para o desenvolvimento deste trabalho. Em especial aos amigos professores Cristovam Albano Júnior (e família), Ana Cláudia Azevedo e Armino Campos Neto.

Aos colegas e amigos da DPPG, Prof. Tony Silva (coordenador do programa DINTER), Aldair, Stefânia, Nádia Kunze, Flávio e Paulino, pelo apoio, amizade e companheirismo.

Ao Instituto Federal de Mato Grosso (IFMT), especialmente ao Campus Cuiabá, pelo suporte e apoio durante o desenvolvimento deste trabalho.

A CAPES através do projeto DINTER processo 23038.034330/2008-32 pelo financiamento deste trabalho.

A FAPESP processo 2011/20354-6 pelo suporte financeiro no desenvolvimento deste trabalho.

Ao CNPq e a FAPEMIG, através do INCT-EIE, pelo aporte financeiro no desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus amigos Rodrigo Paiva, Laura e a pequena Laís pela recepção em sua casa, pela amizade, e pela grande ajuda a mim prestada na etapa de finalização desta tese.

Aos membros da banca examinadora por todos os comentários e sugestões pertinentes.

Finalmente, me sinto profundamente grato a todos que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento desta tese.

“Mais do que de máquinas,
precisamos de humanidade. Mais do
que de inteligência, precisamos de
afeição e doçura. Sem essas virtudes a
vida será uma violência e tudo será
perdido. Não sois máquinas, homens
é que sois.” Charles Chaplin

RESUMO

O presente trabalho propõe duas novas metodologias para identificação de danos estruturais aplicados aos sistemas de monitoramento de integridade estrutural. Essas metodologias utilizam somente os sinais de respostas dos transdutores piezelétricos colados na estrutura a ser monitorada. A primeira utiliza o princípio da impedância eletromecânica, sem necessidade de cálculo da resposta em frequência, nem da EMI, pois a análise é realizada a partir dos sinais de resposta dos PZT diretamente no domínio do tempo. Nessa metodologia, transdutores do tipo PZT são colados à estrutura a ser monitorada enquanto um sinal de excitação em uma faixa de frequência apropriada excita o conjunto PZT/estrutura. Um mesmo PZT é usado tanto para excitar a estrutura (atuador) quanto para receber os sinais de resposta da estrutura (sensor). A identificação de possíveis danos estruturais é realizada através de técnicas de processamento de sinais tais como: *scores*, pesos e pesos rotacionados calculados a partir da PCA. São utilizados ainda os coeficientes do modelo AR. A segunda metodologia é baseada no princípio da função de coerência, na qual um único PZT é usado para excitar a estrutura (atuador) e outros três transdutores PZT são utilizados para receber os sinais de resposta da estrutura (sensores). Nesta metodologia, diferentes técnicas de processamento de sinais no domínio do tempo foram aplicadas diretamente nos sinais de resposta dos PZT. Para isso, os *scores* e os pesos foram calculados a partir das componentes principais. Outras técnicas, tais como SSA e filtros de Savitzky-Golay, também foram empregadas. Nas duas metodologias, a análise de detecção de falha é baseada em duas métricas estatísticas consagradas na área de SHM: RMSD e CCDM. A fim de testar as metodologias propostas, testes práticos foram realizados em diferentes placas de alumínio e os resultados, apresentados neste trabalho, demonstram a efetividade desses métodos na detecção de danos estruturais.

Palavras-chave: SHM. PZT. Impedância eletromecânica. Análise temporal. Análise de componentes principal. Modelo auto-regressivo. Análise espectral singular. Savitzky-Golay.

ABSTRACT

This work presents two novel methodologies for damage detection applied to Structural Health Monitoring systems. The proposed methodologies use only response signals of piezoelectric transducers bonded to the host structure. In the first methodology, the analysis is based on EMI (Electromechanical Impedance), however it isn't necessary to calculate the Frequency Response Function or EMI itself due analysis is carried out directly in time-domain. For this, the PZT are excited by a signal with a wide frequency range and acts as an actuator and also as sensors to receive the signals. The coefficients for AR models and the scores, loadings and rotated loadings (Principal Components) are calculated directly from the time signals. The second methodology is based on Coherence Function. For this, the single PZT is used as an actuator to excite the structure and other three PZT's are used as sensors to receive the response signals. The scores and loadings (Principal Components) are calculated directly from the time signals. Some techniques of digital signal processing such as Singular Spectral Analysis e Savitzky-Golay filter have also been used. For both methodologies, the damage detection procedures were conducted using statistics metrics useful: RMSD and CCDM. Practical tests were carried out on different aluminum plates and the results demonstrated that the indexes RMSD and CCDM for these methodologies could be an excellent approach for SHM applications.

Keywords: SHM. PZT. Electromechanical impedance. Time-domain analysis. Principal component analysis. Autoregressive model. Singular spectral analysis. Savitzky-Golay.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Representação do modelo eletromecânico do tipo massa-mola para o conjunto PZT/estrutura.	27
Figura 2	Circuito de excitação e captação do sinal de resposta do conjunto PZT/estrutura.	31
Figura 3	Parte real da EMI para diferentes temperaturas e um dono simulado a 1cm do PZT.	34
Figura 4	Exemplos de ferramentas de processamento de sinais para identificação de danos.	36
Figura 5	Diagrama contendo todas as técnicas abordadas no presente trabalho.	37
Figura 6	Sistema baseado na EMI utilizado para análise no domínio do tempo.	56
Figura 7	Placa com os transdutores PZT acoplados e a posição dos danos (medidas em milímetros).	57
Figura 8	Diagrama contendo o método baseado na análise de modelo AR.	57
Figura 9	Valor do AIC para várias ordens considerando todos os sensores.	58
Figura 10	Índices RMSD para o Sensor 1 em função da ordem do modelo AR.	59
Figura 11	Índices RMSD para o Sensor 2 em função da ordem do modelo AR.	59
Figura 12	Índices RMSD para o Sensor 3 em função da ordem do modelo AR.	60
Figura 13	Índices RMSD para o Sensor 4 em função da ordem do modelo AR.	60
Figura 14	Índices RMSD para os 8º coeficientes do modelo AR.	61
Figura 15	Índices RMSD para o método da EMI.	62
Figura 16	Índices RMSD normalizados para os 8º coeficientes do modelo AR.	62
Figura 17	Índices RMSD normalizados para todos os sensores para a EMI.	62
Figura 18	Comparativo dos índices RMSD normalizados considerando o modelo AR e o princípio da EMI.	63
Figura 19	Diagrama contendo o procedimento baseado nos scores.	64
Figura 20	Variância acumulada em função das componentes principais.	65

Figura 21	RMSD para a 1ª PC considerando as estruturas íntegra e danificada.	66
Figura 22	Índices CCDM para a 1ª PC considerando a estrutura íntegra e danificada.....	66
Figura 23	Índices CCDM para o método da EMI para todos os sensores.	67
Figura 24	Índices RMSD para o método da EMI para todos os sensores.....	67
Figura 25	Índices RMSD: comparativo entre EMI e a metodologia proposta baseada nas PC	68
Figura 26	Índices CCDM: comparativo entre EMI e a metodologia baseada na PCA.	68
Figura 27	Índices RMSD normalizados: comparativo entre EMI e a metodologia baseada nas PC.	69
Figura 28	Índices CCDM normalizados: comparativo entre EMI e a metodologia baseada nas PC.	69
Figura 29	Índices RMSD para os coeficientes AR calculados a partir das PC.....	70
Figura 30	Comparativo entre os vários índices RMSD normalizados.....	71
Figura 31	Comparativo dos índices RMSD.	71
Figura 32	Índices RMSD normalizados considerando as diversas metodologias estudadas.....	72
Figura 33	Placa de alumínio contendo os transdutores PZT e os danos simulados (dimensões em centímetros).	75
Figura 34	Fotos do painel aeronáutico contendo os transdutores PZT e o ímã.	75
Figura 35	Procedimento para o método baseado na análise de pesos das PC.	76
Figura 36	Resposta temporal para o sensor 4 considerando a estrutura em duas condições: íntegra e dano D.....	77
Figura 37	Índices RMSD para PCC.....	79
Figura 38	Índices RMSD para parte real da EMI (normalizados).	79
Figura 39	Comparativo entre os índices RMSD para PCC e EMI: a) Sensor S1; b) Sensor S2 (índices normalizados).	80
Figura 40	Comparativo entre os índices RMSD para PCC e EMI: a) Sensor S3; b) Sensor S4 (índices normalizados).	80

Figura 41	Comparativo entre índices RMSD para PCC e EMI para o sensor S5(índices normalizados).	80
Figura 42	Diagrama contendo o procedimento baseado na rotação de pesos.....	81
Figura 43	Variância acumulada em função das componentes principais para Dano D.	82
Figura 44	Pesos para o dano D em função das PC: a) não rotacionados; b) rotacionados.....	83
Figura 45	Índices RMSD para os pesos rotacionados.....	84
Figura 46	Parte real da impedância para o sensor S4 em duas condições estruturais: <i>baseline</i> e dano D.	85
Figura 47	Índices RMSD para parte real da EMI.	86
Figura 48	Comparativo entre os índices RMSD para PCC rotacionados e EMI para S1.....	86
Figura 49	Comparativo entre os índices RMSD para PCC rotacionados e EMI para S2.....	87
Figura 50	Comparativo entre os índices RMSD para PCC rotacionados e EMI para S3.....	87
Figura 51	Comparativo entre os índices RMSD para PCC rotacionados e EMI para S4.....	87
Figura 52	Comparativo entre os índices RMSD para PCC rotacionados e EMI para S5.....	87
Figura 53	Diagrama proposto para identificação de danos estruturais.	90
Figura 54	Posição dos transdutores PZT e dos danos simulados (A, B, C e D) na placa de alumínio.....	90
Figura 55	Variância acumulada para cada autovalor considerando o sinal de excitação.	94
Figura 56	Índices CCDM para o cenário 1.	95
Figura 57	Índices CCDM para o cenário 2.	95
Figura 58	Índices CCDM para o cenário 3.	96
Figura 59	Índices CCDM para o cenário 4.	96
Figura 60	Índices CCDM para o cenário 5.	97

Figura 61	Índices CCDM para o cenário 6.	97
Figura 62	Índices CCDM para o cenário 7.	98
Figura 63	Índices CCDM para o cenário 8.	98
Figura 64	Resposta temporal para o sensor S2 para duas condições estruturais: <i>baseline</i> e dano D.	99
Figura 65	Índices RMSD para os PCC: a) primeira componente; b) segunda componente; c) terceira componente.	100
Figura 66	Índices RMSD para soma dos PCC para: a) as três PC; b) a primeira com a segunda PC; c) a segunda com e terceira PC.	101
Figura 67	Soma dos Índices RMSD para: a) as três PC; b) a primeira com a segunda PC; c) a segunda com e terceira PC.	102
Figura 68	Diagrama contendo procedimento para o método baseado na SSA.	103
Figura 69	Decomposição da SSA para quatro componentes principais diferentes.	103
Figura 70	a) Resposta temporal para S1 e sua própria série reconstruída; b) erro residual.	104
Figura 71	Norma da matriz de trajetória em função dos autovalores para S1.	104
Figura 72	Índices RMSD para SSA para janela de 500 e variação no número de autovalores: a) sensor S1; b) sensor S2; c) sensor S3.	105
Figura 73	Índices CCDM para SSA para janela de 500 componentes e variação no número de autovalores: a) sensor S1; b) sensor S2; c) sensor S3.	105
Figura 74	Índices RMSD para SSA número de autovalores fixo e variação no tamanho da janela: a) sensor S1; b) sensor S2; c) sensor S3.	106
Figura 75	Índices CCDM para SSA número de autovalores fixo e variação no tamanho da janela: a) sensor S1; b) sensor S2; c) sensor S3.	106
Figura 76	Índices RMSD para SSA considerando a janela de 20 e 10 autovalores.	107
Figura 77	Índices CCDM para SSA considerando a janela de 20 e 10 autovalores.	107
Figura 78	Diagrama resumido do método baseado nos filtros de Savitzky-Golay.	108
Figura 79	Ilustração contendo os sinais: original, suavizados pelo filtro SG, primeira derivada, segunda derivada e resíduos.	109
Figura 80	Sinais para S1 após aplicação da segunda derivada em duas condições estruturais: <i>baseline</i> e dano D.	110

Figura 81	Índices CCDM para todos os sensores e condições estruturais após suavização pelo filtro SG.....	110
Figura 82	Índices CCDM para todos os sensores e condições estruturais após aplicação da primeira derivada.	111
Figura 83	Índices CCDM para todos os sensores e condições estruturais após aplicação da segunda derivada.	111
Figura 84	CCDM normalizados para todas as condições estruturais: a) sensor 1; b) sensor 2; c) sensor 3.	112

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Ranking do crescimento da frota aérea mundial no ano de 2011.....	21
Tabela 2	Tempo de uso das aeronaves civis em operação nos EUA e Europa.	22

LISTA DE QUADROS

Quadro 1	Descrição do cenário 1.	92
Quadro 2	Descrição do cenário 2.	92
Quadro 3	Descrição do cenário 3.	92
Quadro 4	Descrição do cenário 4.	93
Quadro 5	Descrição do cenário 5.	93
Quadro 6	Descrição do cenário 6.	93
Quadro 7	Descrição do cenário 7.	93
Quadro 8	Descrição do cenário 8.	94

LISTA DE ABREVIATURAS

AIC	<i>Akaike Information Criterion</i> – Critério de informação de Akaike
A/D	Conversor Analógico para Digital
AR	<i>AutoRegressive Model</i> - Modelo auto-regressivo
ARMA	<i>AutoRegressive Moving Average</i> – Modelo auto-regressivo de médias móveis
ARX	<i>AutoRegressive Exogenous</i> – Modelo auto-regressivo com entradas exógenas
BTS	<i>Bartlett Test of Sphericity</i> – Teste de esfericidade de Bartlett
CCMD	<i>Correlation Coefficient Deviation Metric</i> – Desvio do coeficiente de correlação
CF	<i>Coherence Function</i> - Função de coerência
D/A	Conversor Digital para Analógico
DAQ	<i>Data Aquisition</i> – Dispositivo de aquisição de dados
DC	<i>Direct Current</i> – Corrente contínua
EMI	<i>Electromechanical Impedance</i> – Impedância eletromecânica
EVS	<i>Extreme Value Statistic</i> – Estatística de valor extremo
FA	<i>Factorial Analysis</i> – Análise fatorial
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i> – Transformada Rápida de Fourier
FIR	<i>Finite Impulsive Response</i> – Resposta ao impulso finita
FRF	<i>Frequency Response Function</i> - Função de Resposta em Frequência
KMO	Kaiser-Meyer-Olkin
LabView	<i>Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench</i>
MAPP	<i>Mean Absolute Percentage Deviation</i> – Desvio médio percentual absoluto

NDE	<i>Non-Destructive Evaluation</i> – Avaliação não destrutiva
NPCA não linear	<i>Non-Linear Principal Component Analysis</i> – Análise de componentes principal
PC	<i>Principal Components</i> – Componentes principais
PCA	<i>Principal Component Analysis</i> - Análise de componentes principais
PCC	<i>Principal Component Coefficients</i> – Coeficientes das componentes principais
PZT	<i>Pb- Lead Zirconate Titanate</i> – Titanato Zirconato de Chumbo
RMSD	<i>Root Mean Square Deviation</i> – Desvio da raiz média quadrática
SG	Savitzky-Golay Filter – Filtros de Savitzky-Golay
SHM	<i>Structural Health Monitoring</i> – Monitoramento de integridade estrutural
SSA	<i>Singular Spectral Analysis</i> – Análise Espectral Singular
SVD	<i>Singular Value Decomposition</i> – Decomposição em valores singulares
USB	<i>Universal Serial Bus</i> – Barramento serial universal

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO	24
1.2	OBJETIVOS	24
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	25
2	DETECÇÃO DE DANOS ESTRUTURAIS BASEADO NO PRINCÍPIO DA IMPEDÂNCIA ELETROMECCÂNICA	26
2.1	DETECÇÃO UTILIZANDO A TÉCNICA DA IMPEDÂNCIA ELETROMECCÂNICA	26
2.2	DETECÇÃO DE FALHA UTILIZANDO MÉTODOS NO DOMÍNIO DO TEMPO	30
2.3	EFEITO DA VARIAÇÃO DE TEMPERATURA NA DETECÇÃO DE FALHAS ESTRUTURAIS.....	33
3	ANÁLISE DE SINAIS NO DOMÍNIO DO TEMPO	36
3.1	DETECÇÃO BASEADA NA FUNÇÃO DE COERÊNCIA	37
3.2	ANÁLISE TEMPORAL ATRAVÉS DE MODELO AUTO-REGRESSIVO	39
3.3	ANÁLISE TEMPORAL ATRAVÉS DA ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS	42
3.4	ANÁLISE BASEADA NA ROTAÇÃO DE PESOS	45
3.5	ANÁLISE BASEADA NA ANÁLISE ESPECTRAL SINGULAR	48
3.6	ANÁLISE BASEADA NOS FILTROS DE SAVITZKY–GOLAY	52
4	RESULTADOS BASEADOS NA EMI PARA PLACA RETANGULAR.....	55
4.1	DESCRIÇÃO GERAL DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO.....	55
4.2	DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA TESTE.....	56
4.3	RESULTADOS BASEADOS NO MODELO AR	57
4.3.1	COMPARATIVO ENTRE EMI E AR	61
4.4	ANÁLISE ATRAVÉS DE COMPONENTES PRINCIPAIS	63
4.4.1	COMPARATIVO ENTRE EMI E PCA	67
4.5	ANÁLISE ATRAVÉS DO MODELO AR A PARTIR DAS COMPONENTES PRINCIPAIS	70
4.5.1	COMPARATIVO ENTRE MODELO AR CALCULADO A PARTIR DAS PC COM A EMI	71
4.6	COMPARATIVO FINAL ENTRE OS DIVERSOS MÉTODOS ESTUDADOS ...	72

4.7	CONCLUSÕES	73
5	RESULTADOS BASEADOS NA EMI PARA PAINEL AERONÁUTICO.....	74
5.1	DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA DE TESTE	74
5.2	ANÁLISE COM COEFICIENTES DAS COMPONENTES PRINCIPAIS (PESOS)	76
5.2.1	COMPARATIVO ENTRE PCC E EMI	79
5.3	ANÁLISE COM ROTAÇÃO DE PESOS	81
5.3.1	COMPARATIVO ENTRE ROTAÇÃO DE PESOS E EMI	85
5.4	CONCLUSÕES	88
6	RESULTADOS BASEADOS NO PRINCÍPIO DA FUNÇÃO DE COERÊNCIA	89
6.1	METODOLOGIA EMPREGADA	89
6.2	RESULTADOS UTILIZANDO SCORES	91
6.3	RESULTADOS PARA PCC.....	98
6.4	RESULTADOS PARA SSA.....	102
6.5	RESULTADOS PARA SAVITZKY-GOLAY	108
6.6	CONCLUSÕES	113
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	114
7.1	CONCLUSÕES	114
7.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	117
	REFERÊNCIAS	119
	APÊNDICE.....	129

1 INTRODUÇÃO

Diferentes estruturas de engenharia mecânica, civil e aeroespacial têm sido usadas por um longo período, sendo submetidas a diferentes tipos de carregamentos. Ao longo dos anos essas estruturas sofrem degradações e podem ser danificadas. Um rigoroso processo de manutenção, com base, muitas vezes, apenas no tempo de uso, evita que danos maiores aconteçam (LOPES JUNIOR et al., 2000). Porém, esse processo pode aumentar significativamente os custos de operação dessas estruturas. Nos últimos anos, vários pesquisadores têm focado os aspectos econômicos e de segurança estrutural. Nesse sentido, técnicas de SHM (*Structural Health Monitoring*) têm sido amplamente estudadas para aumentar a segurança e reduzir custos de manutenção (FARRAR; LIEVEN; BEMEND, 2005). O monitoramento estrutural pode ser realizado em tempo real ou não. De acordo com Rytter (1993), os sistemas avançados de monitoramento de integridade estrutural podem ser realizados através da: (1) detecção da existência do dano; (2) identificação do dano na estrutura; (3) identificação do tipo de dano; (4) avaliação da extensão do dano; (5) identificação do tempo de vida restante de uso para a estrutura. Atualmente é comum o uso de técnicas convencionais de inspeção visual ou outras formas de NDE (*Nondestructive Evaluation*) (STASZEWSKI; WORDEN, 2004). Brand e Boller (1999) realizaram uma pesquisa na qual mostram que cerca de 61% da análise estrutural em aeronaves é realizada através de inspeção visual. Cerca de 31% utilizam outra forma de NDE e essa inspeção é realizada de forma não planejada. Somente 8% utilizam técnicas de NDE com manutenção planejada. Contudo, sabe-se que a inspeção visual é muito limitada, pois depende totalmente da experiência e da acuidade visual do inspetor. Por outro lado, outras formas de NDE podem ser utilizadas com maior precisão para detecção de pequenas falhas que poderiam ser imperceptíveis ao olho humano.

Dentro das várias áreas onde é imprescindível a análise da integridade estrutural, uma das mais importantes e promissoras é a área de aviação. Atualmente, a aviação mundial está em franco crescimento e com grandes perspectivas de crescimento da frota para os próximos anos. De acordo com pesquisa realizada por Lewis (2012), desde a década de 90 tem havido um aumento significativo na capacidade de entrega de aeronaves de grande porte. Em 1980, por exemplo, essa capacidade era de 30% enquanto que em 1990 e 2000 aumentou-

se para 36% e 50%, respectivamente. Em 2010 esse número subiu para 60% e essa previsão deve aumentar ainda mais, para 65%, em 2031. Segundo pesquisa realizada por Morrow e Fafard (2011), a frota aérea mundial aumentou em média 1,8 % em relação ao ano de 2010, atingindo mais de 25.000 novas aeronaves em operação. A pesquisa indica ainda o crescimento da frota para as dez principais aeronaves comercializadas no mundo, conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Ranking do crescimento da frota aérea mundial no ano de 2011.

Ranking	Empresa	Frota	Crescimento
1	Airbus: Família 320	4390	4,6%
2	Boeing 737600/700/800/900	3471	5,3%
3	Boeing 737-300/400/500	1487	-1,9%
4	Boeing 777	928	4,0%
5	Boeing 757	898	0,8%
6	Boeing 767	840	1,8%
7	Airbus A330	765	6,3%
8	Boeing 747	740	-0,8%
9	Boeing MD-80	740	-0,8%
10	Airbus A340	332	-1,2%

Fonte: FlightGlobal (1999).

Além do aumento do número de aeronaves, existem muitas aeronaves antigas que ainda estão operando na malha aérea mundial e que possuem um longo tempo de vida, muitas vezes superior ao tempo definido nos seus próprios projetos estruturais (BOLLER, 2001). A empresa FlightGlobal (1999) realizou outra pesquisa onde mostra que a América do Norte tem a maior frota de aviões mais antigos do Ocidente, com aproximadamente 60% dos 5.400 jatos sendo considerados antigos, assim como mais de 40% dos 2800 turboélices. A Europa ocupa o segundo lugar, com cerca de 14% de sua frota sendo considerada velha. Já a Ásia e América Latina partilham o segundo lugar no mercado de turboélice com idade avançada. Ainda segundo a pesquisa, um grande número de aeronaves tem saído paulatinamente de operação devido ao longo tempo de uso. A pesquisa desenvolvida por Penney (2000) mostra que a situação para aviões militares é ainda mais crítica. A retenção das aeronaves militares, consideradas idosas, que ainda estão em serviço é uma tendência mundial e estas estão sendo

substituídas paulatinamente. No ano de 2000, a Força Aérea dos Estados Unidos através do *Research Laboratory* (AFRL) possuía mais de 75% da frota militar com mais de 25 anos e, além disso, muitas aeronaves ainda estavam em serviço mesmo depois de 50 anos de uso (PENNEY, 2000). Os dados mostrados na Tabela 2 representam a idade das aeronaves para os Estados Unidos e Europa considerando somente a indústria de aviação civil. Esses dados são para o ano de 1999 (STASZEWSKI; BOLLER, 2002).

Tabela 2 – Tempo de uso das aeronaves civis em operação nos EUA e Europa.

Tipo	Total Entregue	Frota em Serviço 01/09	Idade das aeronaves em 1999		
			≥ 15 anos	≥ 20 anos	≥ 25 anos
A300	503	411 (82%)	220 (46%)	60 (12%)	1 (0,2%)
A310	255	218 (85%)	54 (21%)		
707/720	1009	379 (37%)			
727	1831	1247 (68%)	1381 (75%)	1127 (62%)	673 (38%)
737-100/200	1144	901 (79%)	853 (75%)	442 (39%)	222 (19%)
737 CFMI	1988	1971 (99%)	13 (0,7%)		
747-100/SP	724	562 (78%)	490 (68%)	317 (44%)	154 (21%)
757	968	943 (97%)	51 (6%)		
767	840	820 (98%)	109 (14%)		
DC-8	556	243 (44%)	268 (48%)	268 (48%)	268 (48%)
DC-9	976	727 (74%)	776 (79%)	739 (75%)	588 (61%)
DC-10	446	397 (89%)	333 (75%)	276 (62%)	162 (36%)
L-1011	249	155 (62%)	185 (74%)	113 (45%)	60 (24%)
Total	11489	8974	4733 (46%)	3342 (33%)	2128 (21%)

Fonte: Staszewski e Boller (2002).

Embora a pesquisa mostrada acima não seja recente, nota-se que o número de aeronaves em operação acima dos 15 anos de idade é bastante significativo. As preocupações com os aviões mais antigos em operação aumentaram consideravelmente a partir do acidente com um *Boeing 737-200* da empresa *Aloha* em abril de 1988 (BOLLER, 2001), mas é importante destacar que aeronaves mais velhas exigem manutenção preventiva mais frequente, o que aumenta muito os custos de operação.

Os números apresentados mostram que o monitoramento da integridade estrutural está se tornando algo tão importante quanto o desenvolvimento de novas estruturas aeronáuticas, pois novas técnicas e metodologias de prognóstico e identificação de falhas estruturais podem significar eficiência, redução de custos e aumento na segurança estrutural. Com a crescente demanda de serviços na área de análise estrutural, as pesquisas em SHM têm sido desenvolvidas com o objetivo de extrapolar o mundo acadêmico e chegar aos mais sofisticados sistemas de SHM.

O monitoramento da integridade estrutural através de métodos não destrutivos (NDE) tem crescido bastante nos últimos anos, pois esses métodos permitem a aplicação em vários tipos de estruturas e identificação de diversos tipos de danos. Assim como o projeto de estruturas deve prever operações dentro de limites específicos, considerando condições ambientais na qual serão usadas, a avaliação dessas estruturas deve ser realizada após certo tempo de uso a fim de prevenir falhas (WORDEN; DULILEU -BARTON, 2004). Para essa avaliação, os métodos NDE são muito úteis e eles são baseados em diferentes técnicas tais como: emissão acústica, corrente de *Eddy*, radiografia, termografia, shearografia, ondas de *Lamb*, impedância eletromecânica e outras (BOLLER; STASZEWSKI, 2004). Juntamente com o desenvolvimento das técnicas baseadas em EMI, o processamento digital de sinais e a computação têm sido elementos cruciais para implantação de novos sistemas de identificação de falhas (STASZEWSKI; WORDEN, 2004).

As técnicas baseadas na EMI e nas ondas de *Lamb* têm sido bastante utilizadas nos últimos anos. Ambas fazem uso de um pequeno transdutor piezelétrico (PZT) colado na estrutura a ser monitorada. Esse sensor, quando submetido a um estímulo mecânico converte energia mecânica em energia elétrica (sensor) e, de forma dual, quando submetido a um estímulo elétrico converte energia elétrica em energia mecânica (atuador) (LEE; STASZEWSK, 2007). A ideia básica para exploração dos transdutores PZT é a transferência de energia entre o sensor e/ou atuador com a estrutura mecânica. Logo, colando-se transdutores PZT na estrutura a ser monitorada e excitando-os numa faixa de frequência apropriada, é possível identificar danos estruturais através da análise e do processamento dos sinais de resposta da estrutura através dos próprios sensores (PARK; INMAN, 2007; MAL, 2005; HU; YANG, 2007; WANG; YOU, 2008). Em ambas as metodologias faz-se necessário conhecer o sinal de resposta da estrutura quando a mesma é considerada íntegra. Essa resposta é denominada de *baseline* e é a referência para a identificação de um possível dano estrutural

através da comparação do mesmo com os resultados obtidos em outras situações, com a estrutura sendo considerada danificada ou não.

1.1 Contribuições do trabalho

O presente trabalho busca contribuir através dos seguintes tópicos:

- **Análise da integridade estrutural baseado na EMI:** geralmente os trabalhos desenvolvidos em aplicações utilizando PZT são realizados no domínio da frequência, quando baseados na impedância eletromecânica (SILVA, 2008). No presente trabalho é utilizada uma metodologia que utiliza somente os sinais de resposta da estrutura diretamente no domínio do tempo. Para isso, os sinais são analisados utilizando PCA e modelo AR. Para essa forma de análise, realizada diretamente no domínio do tempo, não é necessário o cálculo da impedância eletromecânica.
- **Análise da integridade estrutural baseado no princípio da Função de Coerência:** Essa metodologia é baseada no trabalho desenvolvido por Vieira Filho, Baptista e Inman (2011a) no qual um PZT é usado como atuador e outros três como sensores. Nesse trabalho os autores utilizaram a magnitude da Função de Coerência na detecção de danos estruturais. Na metodologia proposta, utiliza-se também um transdutor PZT como atuador e outros três, em momentos diferentes, como sensores. Porém, a análise dos sinais é realizada através do uso das PCA, Análise Singular Espectral (SSA) e filtros de Savitzky-Golay diretamente no domínio do tempo.

1.2 Objetivos

Desenvolver novas metodologias de análise da integridade estrutural utilizando para isso os sinais diretamente no domínio do tempo, sem necessidade de modelos matemáticos da estrutura, obtidos a partir de transdutores PZT acoplados na estrutura a ser monitorada. Para isso são abordadas duas metodologias diferentes: a primeira baseada na impedância eletromecânica e a segunda baseada no princípio da função de coerência. Para as duas metodologias, são empregadas várias técnicas diferentes de processamento de sinais a fim de detectar danos estruturais com precisão.

1.3 Organização do trabalho

Este trabalho está organizado em sete capítulos como segue:

- Capítulo 1: Introdução, objetivos e contribuições para o presente trabalho.
- Capítulo 2: Fundamentação teórica e revisão bibliográfica do estado da arte em SHM, detecção de danos baseados na EMI (domínio do tempo e frequência) e detecção de danos considerando variação de temperatura.
- Capítulo 3: Fundamentação teórica e estado da arte (trabalhos relacionados à SHM) para Função de Coerência (CF), modelo auto-regressivo (AR), Análise de Componentes Principais (PCA), rotação de pesos (*loadings rotation*), Análise Singular Espectral (SSA) e filtros de Savitsky-Golay (SG).
- Capítulo 4: Apresentação da metodologia empregada para detecção de danos estruturais, utilizando o modelo AR e PCA, explorando-se a EMI. São apresentados os resultados de testes práticos, para uma placa de alumínio retangular, tanto para os métodos baseados em AR quanto em PCA. Esses resultados são comparados com o método da EMI.
- Capítulo 5: Apresentação da metodologia empregada para detecção de danos estruturais utilizando os pesos, determinados através das componentes principais (PC), e rotação de pesos (*loadings rotation*) baseados na EMI. São apresentados os resultados de testes práticos, para um painel aeronáutico de alumínio para ambos os métodos. Esses resultados são comparados com o método da EMI.
- Capítulo 6: Apresentação da metodologia para detecção de danos estruturais utilizando o princípio da Função de Coerência (CF). Essa metodologia considera um único transdutor para excitação do conjunto PZT/estrutura e outros transdutores diferentes para captação dos sinais de resposta da estrutura. São avaliados nesse capítulo os métodos utilizando PCA (*scores* e pesos) assim como as metodologias para Análise Singular Espectral (SSA) e filtros de Savitsky-Golay (SG). Testes práticos foram realizados numa placa de alumínio retangular.
- Capítulo 7: Considerações finais e perspectivas para trabalhos futuros.

2 DETECÇÃO DE DANOS ESTRUTURAIS BASEADO NO PRINCÍPIO DA IMPEDÂNCIA ELETROMECAÂNICA

Neste capítulo será apresentada a fundamentação teórica necessária para o entendimento dos resultados presentes nos capítulos subsequentes. Serão discutidos aspectos relacionados às técnicas de detecção de danos estruturais no domínio do tempo assim como no domínio da frequência, além da fundamentação matemática.

2.1 Detecção utilizando a técnica da Impedância Eletromecânica

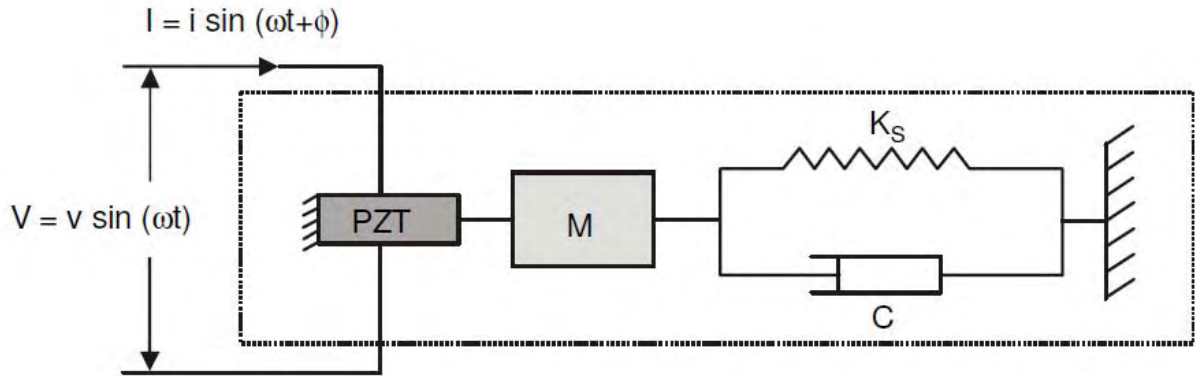
A técnica baseada na Impedância Eletromecânica (EMI) aplicada à análise da saúde estrutural (SHM) foi inicialmente proposta por Liang, Sun e Rogers (1994) e é considerada uma forma importante de avaliação estrutural não destrutiva (NDE), normalmente aplicada com base no uso da resposta em frequência (FRF). Essa técnica exige que a estrutura seja excitada em uma faixa de frequência apropriada através de transdutores PZT colados na mesma. Estes transdutores piezelétricos, quando excitados eletricamente, produzem deformações mecânicas (função atuador) e quando sofrem alguma deformação produzem campo elétrico (função sensor). Para um transdutor piezelétrico tipo PZT linear, o comportamento eletromecânico pode ser descrito através da Equação (1) (MOHEIMANI; FLEMING, 2006).

$$\begin{bmatrix} S \\ D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s^E & d_t \\ d & \varepsilon^t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T \\ E \end{bmatrix} \quad (1)$$

Na Equação (1), S representa a deformação mecânica, T a tensão mecânica, E o campo elétrico, D a densidade de carga, s a complacência, d a constante de deformação piezelétrica e ε a permissividade. A primeira linha da matriz descreve o efeito inverso do efeito piezelétrico e a segunda descreve o efeito direto.

A estrutura a ser monitorada, incluindo o PZT, pode ser representada por um modelo eletromecânico do tipo massa-mola com um único grau de liberdade, conforme Figura 1 (LIANG; SUN; ROGERS, 1994).

Figura 1 – Representação do modelo eletromecânico do tipo massa-mola para o conjunto PZT/estrutura.



Fonte: Liang, Sun e Rogers (1994).

Na Figura 1, M representa a massa, K_s a constante elástica da mola e C o coeficiente de amortecimento. Se o transdutor for excitado através de uma fonte senoidal V , com amplitude v e frequência angular ω , produzirá uma corrente I de amplitude i e fase ϕ . Então, a impedância elétrica do PZT, $Z_E(\omega)$, pode ser determinada pela Equação (2) (LIANG; SUN; ROGERS, 1994).

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

Na Equação (2), Z_a representa 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}^2 a constante piezoeletrica e j a unidade imaginária.

Nota-se, a partir da Equação (2), que qualquer variação na impedância mecânica da estrutura causará uma mudança na impedância elétrica do transdutor PZT. Na análise baseada na técnica EMI, os transdutores PZT são colados na estrutura a ser monitorada e requerem uma tensão de excitação de baixa amplitude, tipicamente menor que 3V, para produzir a excitação forçada da estrutura. Geralmente, nessa técnica, o sinal utilizado na excitação da estrutura faz uma varredura em uma faixa de frequência variável que pode variar entre valores próximos de 0 até acima de 150kHz (PARK et al., 2003). Na prática, essa fonte de frequência de excitação variável faz a estrutura vibrar nas suas frequências naturais e essas respostas são utilizadas para estimar a FRF e, posteriormente, calcular a EMI. Certamente, na presença de um dano, essas frequências naturais irão se alterar provocando deslocamentos em frequência e amplitude. As diferenças entre o estado considerado íntegro e a condição de estrutura com dano serão comparadas para detectar os possíveis danos estruturais.

Naturalmente, é preciso conhecer a condição gerada pela estrutura saudável, conhecida como *baseline*, para servir de objeto de comparação (referência). Em geral, os resultados dessas medidas são utilizados para estimar a FRF e, posteriormente, determinar a impedância elétrica do transdutor PZT. Na prática, por exemplo, uma perda ou acréscimo de massa na estrutura monitorada irá mudar a impedância do PZT e essa variação é utilizada na técnica baseada na EMI para detecção de danos estruturais.

A faixa de frequência da impedância elétrica, calculada a partir dos sinais de resposta do conjunto transdutor/estrutura, que apresenta maior sensibilidade e repetitividade na detecção de danos estruturais, variam de acordo com a geometria, a massa, condições de engastamento, além de outras características da estrutura. Uma grande vantagem das técnicas que utilizam altas frequências consiste no fato de que essas sofrem menos interferências de condições globais como, por exemplo, vibrações ambientais. Além do mais, para altas frequências o comprimento de onda do sinal de excitação é relativamente pequeno, contribuindo significativamente para detecção de danos pequenos tais como: fissuras, delaminações e arrebites ou parafusos afrouxados (ZAGRAI; GIURGIUTIU, 2009). Em muitos casos esses danos não poderiam ser detectados através de métodos que utilizam sinais de excitação em baixas frequências.

Numa etapa subsequente, métricas estatísticas são determinadas a partir dos sinais de impedância para detecção de danos estruturais. Um dos índices mais empregados em SHM é o RMSD (*Root Mean Square Deviation*), como apresentado na Equação (3), onde $y_{n,d}$ e $y_{n,h}$ representam os sinais correspondentes à estrutura danificada e íntegra, respectivamente.

$$\text{RMSD} = \sum_n^N \sqrt{\frac{(y_{n,d} - y_{n,h})^2}{(y_{n,h})^2}} \quad (3)$$

Outro índice estatístico bastante utilizado em SHM é o CCDM (*Correlation Coefficient Deviation Metric*), dado pela Equação (4).

$$\text{CCDM} = 1 - \left| \frac{\sum_n^N (y_{n,b} - \bar{y}_b) (y_{n,h} - \bar{y}_d)}{\sqrt{\sum_n^N (y_{n,b} - \bar{y}_b)^2} \sqrt{\sum_n^N (y_{n,d} - \bar{y}_d)^2}} \right| \quad (4)$$

Na Equação (4), \bar{y}_b e \bar{y}_d representam as médias dos sinais do *baseline* (estrutura íntegra) e da estrutura danificada, respectivamente. Alguns autores também têm utilizado o índice MAPD (*Mean Absolute Percentage Deviation*), mas o mesmo não é usado neste trabalho. Nota-se que ambos os índices são baseados na comparação entre a estrutura danificada e íntegra (*baseline*).

Na literatura, há um grande número de trabalhos baseados no princípio da EMI. Após o trabalho publicado por Liang, Sun e Rogers (1994), vários outros autores desenvolveram trabalhos relacionados à EMI, tais como: (SUN, CHAUDHRY, LIANG, et al., 1995; PARK; CUDNEY; INMAN, 2000; GIURGIUTIU; ZAGRAI; BAO, 2002; BHALLA; KIONG SOH, 2003; FARRAR; LIEVEN; BEMEND, 2005; ANNAMDAS; SOH; 2009; ZAGRAI; GIURGIUTIU, 2009).

Recentemente, vários outros trabalhos foram desenvolvidos baseados na EMI. Como exemplo, Baptista e Vieira Filho (2010) desenvolveram um sistema de medição de impedância elétrica para sistemas SHM, cujo princípio básico é baseado no cálculo da FRF utilizando FFT (*Fast Fourier Transform*). O sistema possui um hardware gerenciado a partir de um software desenvolvido na plataforma LabVIEW® em conjunto com uma placa multifuncional *Data Acquisition* (DAQ). Hajrya, Vergé e Mechbal (2010) propuseram detectar e localizar danos estruturais num material composto utilizando uma rede de sensores PZT posicionados de forma ótima através de matrizes de controlabilidade, observabilidade e da norma H_∞ . As informações espaciais desses transdutores foram utilizadas para determinar o indicador da localização dos danos na estrutura monitorada. Finzi Neto et al. (2011) desenvolveram um sistema para obtenção do módulo da componente real da impedância elétrica dos transdutores PZT, no qual a excitação é gerado a partir de um sintetizador digital e os sinais de resposta de amplitude e fase são obtidos por um sistema gerenciado por um Processador Digital de Sinal (DSP). Baptista, Vieira Filho e Inman (2011) propuseram um método para o correto dimensionamento das pastilhas de PZT levando em consideração a sensibilidade ideal para a detecção de danos. Os autores fizeram uma investigação, tanto teórica quanto experimental, considerando o efeito de carregamento do transdutor PZT (BAPTISTA; FILHO, 2010). Atualmente, várias outras contribuições têm sido propostas para a utilização dessa técnica e incluem, dentre outras, técnicas de processamento de sinais, métodos estatísticos e novos circuitos de excitação/recepção dos sinais provenientes da estrutura. Nesse sentido, Cortez, Vieira Filho e Baptista (2012) propuseram um sistema de detecção de danos estruturais utilizando-se somente as variações na tensão de saída dos transdutores PZT. Esse sistema é portátil, autônomo, versátil e pode substituir com eficiência

os instrumentos comerciais em diferentes aplicações de monitoramento de saúde estrutural. Nesse trabalho, a identificação de danos é realizada comparando-se as variações da raiz quadrada da tensão elétrica dos sinais de resposta de transdutores PZT colados à estrutura monitorada. Min et al. (2012) propuseram uma ferramenta de identificação da sensibilidade do dano em função da variação de frequência, de forma automática, e prover detalhes a cerca do tipo e da severidade do dano utilizando para isso reconhecimento de padrões a partir de redes neurais. Os testes foram realizados em uma tubulação metálica e o dano foi simulado pela perda de torque num conjunto parafuso/porca.

2.2 Detecção de falha utilizando métodos no domínio do tempo

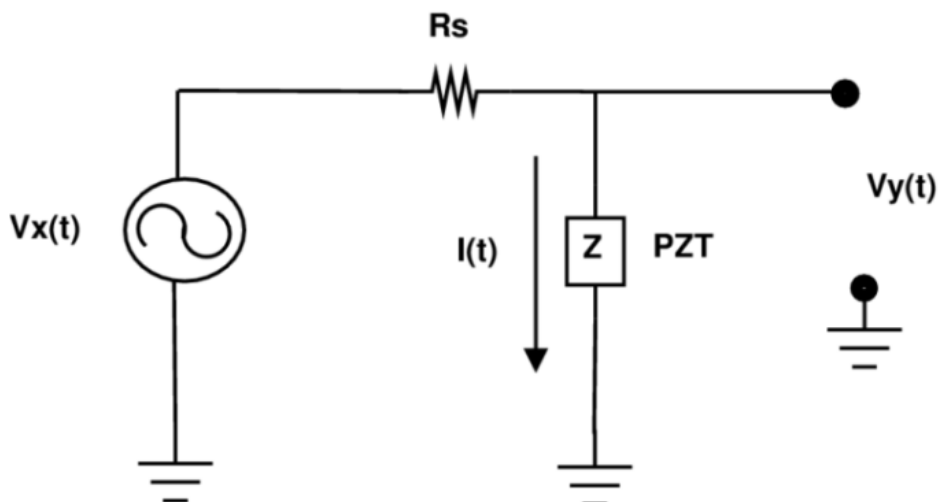
Há poucos trabalhos na literatura que utilizam técnicas de processamento de sinais, incluindo análise no domínio do tempo, aplicadas à detecção de danos estruturais baseados na EMI. Vieira Filho, Baptista e Inman (2011a) propuseram uma metodologia usando a magnitude da função de coerência para detecção de danos estruturais. Para isso, a estrutura foi excitada numa faixa de frequência específica e a resposta da estrutura foi usada para computar índices estatísticos, tanto para a condição íntegra quanto danificada. Os resultados das duas metodologias foram comparados com o objetivo de identificar possíveis danos estruturais. Vieira Filho, Baptista e Inman (2011b) propuseram detectar danos utilizando a transformada *wavelet* multi-nível. Os autores compararam o princípio da EMI, baseada na resposta em frequência, com o método baseado em *wavelet* através do uso de índices estatísticos. Os índices usados foram RMSD e CCDM. Vieira Filho et al. (2011) propuseram uma nova metodologia na qual a resposta dos transdutores PZT forneciam informações da variação da impedância eletromecânica quando a estrutura monitorada possuía algum tipo de dano. Os resultados para o método baseado na FRF foi comparado com a resposta temporal através do índice RMSD. Cortez, Vieira Filho e Baptista (2012) propuseram um sistema de detecção de danos estruturais utilizando-se somente as variações na tensão de saída dos transdutores PZT. Esse sistema é portátil, autônomo, versátil e pode substituir com eficiência os instrumentos comerciais em diferentes aplicações de monitoramento de saúde estrutural. A identificação de danos é realizada comparando-se as variações da raiz quadrada da tensão elétrica dos sinais de resposta de transdutores PZT colados à estrutura monitorada. Outra grande vantagem desse sistema consiste no fato do sistema não ser limitada pela taxa de amostragem do conversor AD e dispensa da

transformada de Fourier (sistema analógico), e não necessita de um computador para a detecção de danos estruturais.

De maneira geral, todos os trabalhos citados que utilizam a análise no domínio do tempo, apresentaram resultados em termos de sensibilidade na detecção de danos estruturais superiores quando comparados com o método baseado na FRF/EMI. Assim como o método baseado na FRF/EMI, os métodos no domínio do tempo nem sempre garantem a questão da localização do dano com precisão, mas por outro lado são eficazes na detecção do dano. Em geral, esses resultados sugerem que tais métodos podem ser utilizados para detecção de danos em estruturas cuja sensibilidade para métodos baseados na FRF seja limitada.

A análise no domínio do tempo pode ser entendida considerando o circuito de excitação do conjunto PZT/estrutura proposto por (BAPTISTA; VIEIRA FILHO, 2010), como apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Circuito de excitação e captação do sinal de resposta do conjunto PZT/estrutura.



Fonte: Baptista (2010).

Considerando um sinal de excitação senoidal $V_x(t)$ com frequência angular ω e pico V_{xP} , a análise do domínio do tempo pode ser matematicamente compreendida considerando a função de transferência do circuito dado pela Equação (5).

$$\frac{V_y(\omega)}{V_x(\omega)} = \frac{Z(\omega)}{Z(\omega) + R_s} \quad (5)$$

Na Equação (5), 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 $V_y(t)$ pode ser obtida através da transformada inversa de Laplace ou de Fourier do sinal $V_x(t)$.

Outra forma de análise do circuito considera a definição de impedância elétrica, dada pela Equação (6).

$$Z(\omega) = \frac{V_y(\omega)}{I(\omega)} \quad (6)$$

Na Equação (6), $Z(\omega)$ 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 da excitação. Considerando a fase Ψ a impedância pode ser escrito através da Equação (7) (FINZI NETO et al., 2011).

$$Z(\omega) = \frac{V_y}{I} \cos(\Psi) + j \frac{V_y}{I} \sin(\Psi) \quad (7)$$

Na Equação (7), j representa a unidade imaginária. Considerando a resistência R_s , pode ser demonstrado que a impedância pode ser escrita pelas Equações (8) e (9) (FINZI NETO et al., 2011).

$$Z_{Re} = R_s \frac{V_y}{(V_x - V_y)_P} \cos(\Psi) \quad (8)$$

$$Z_{Im} = R_s \frac{V_y}{(V_x - V_y)_P} \sin(\Psi) \quad (9)$$

Nas Equações (8) e (9) P representa pico, Z_{Re} e Z_{Im} representam a parte real e imaginária da impedância, respectivamente. Em vários trabalhos apresentados na literatura é extremamente comum os autores analisarem apenas a parte real da impedância eletromecânica (PARK et al., 2003). Analisando a Equação (8), pode ser visto que se 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} . A mesma análise pode ser realizada para a parte imaginária da impedância. Outra forma de análise é considerar o módulo da impedância

eletromecânica. Considerando as Equações (8) e (9) o módulo da impedância eletromecânica $|Z|$ é dado pela Equação (10).

$$|Z| = \frac{V_y}{(V_x - V_y)_p} R_s \quad (10)$$

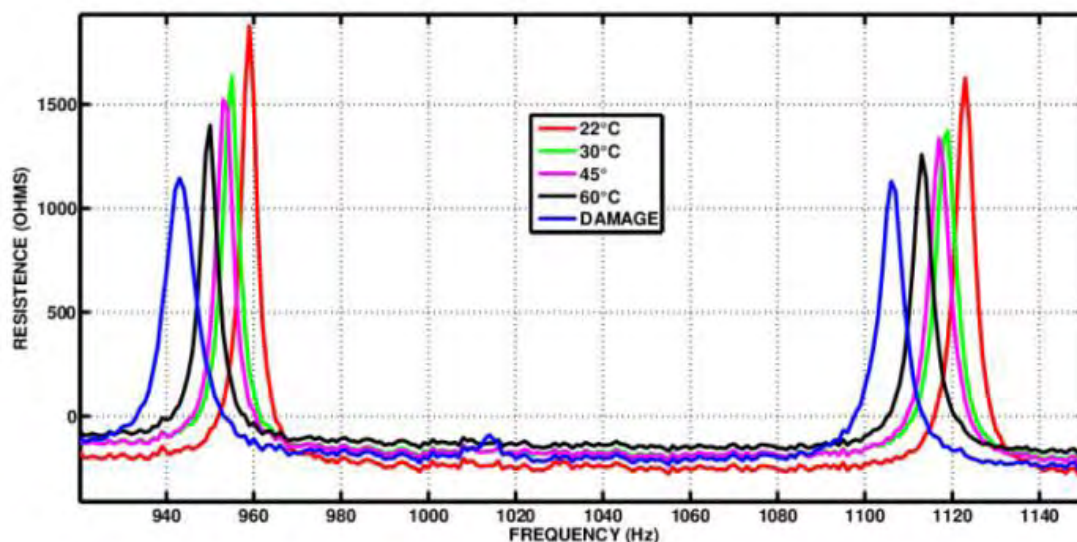
A partir das Equações (8), (9) e (10) nota-se que é possível detectar danos estruturais utilizando apenas os sinais de resposta do conjunto PZT/estrutura, sem calcular a EMI de fato, pois estes sinais estão correlacionados com impedância eletromecânica. Neste trabalho a detecção de dano é realizada usando os sinais de respostas medidos no domínio do tempo (V_y) e, conseqüentemente, elimina a necessidade de estimação da FRF ou da Impedância Eletromecânica, além de não exigir qualquer tipo de transformação inversa de Laplace/Fourier. Essa análise pode tornar o processo de detecção de danos mais sensível e objetivo.

2.3 Efeito da variação de temperatura na detecção de falhas estruturais

A detecção de danos estruturais em estruturas reais é altamente influenciada por variações nas condições ambientais do meio no qual a estrutura está sendo monitorada. Tais variações incluem mudanças de carregamento, condições de contorno, temperatura e umidade (SOHN; WORDEN; FARRAR, 2001). Dentre tais variações ambientais, a mudança de temperatura apresenta uma forte influência negativa na detecção de danos estruturais. De maneira geral, a variação da temperatura pode causar sérios erros durante o processo de detecção de falhas estruturais. Para os métodos baseados na EMI, os sinais de impedância sofrem um deslocamento em frequência para esquerda à medida que a temperatura aumenta e conseqüentemente para a direita com a diminuição da temperatura (BHALLA; NAIDU; SOH, 2003). Variações na amplitude também são observadas no sinal da impedância eletromecânica (BAPTISTA; VIEIRA FILHO; INMAN, 2012). Muitas vezes essas variações são similares às provocadas pelos danos estruturais, dificultando assim, diferenciar o dano estrutural de variações na temperatura. Esse fator tem sido um grande desafio, para pesquisadores e indústrias, durante a proposição de novos sistemas SHM. Como exemplo desses deslocamentos na EMI, a Figura 3 apresenta os sinais da parte real da impedância para uma barra de alumínio de 500 x 300 x 20 mm na qual foi colado um PZT 7BB-27-4. O dano

simulado foi realizado por uma porca metálica de 2g colada na estrutura monitorada a 10 cm do PZT. Durante os testes, a viga permaneceu horizontalmente suspensa por dois elásticos, simulando uma condição de contorno livre-livre.

Figura 3 – Parte real da EMI para diferentes temperaturas e um dono simulado a 10 cm do PZT.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Vários trabalhos são apresentados na literatura como proposta de compensação de variações ambientais na detecção de danos estruturais. Sun, Chaudhry, Rogers, et al. (1995) propuseram a compensação do deslocamento causado pela temperatura no sinal de impedância através do uso da função de correlação de probabilidade. Sohn, Worden e Farrar (2001) desenvolveram um trabalho no qual o objetivo é reduzir os falsos positivos provocados pelas variações ambientais na detecção de danos estruturais. Para isso, os autores utilizaram redes neurais auto-associativas e PCA para discriminar as alterações na deterioração e identificação de danos estruturais. Manson (2002) utilizou PCA para suprimir fatores ambientais aplicados à análise de danos em *outlier*. Kullaa (2003) utilizou Análise de Fatores (FA) para remover variáveis ambientais considerando que alguns desses fatores possuem efeitos característicos nas medidas de sinais de resposta estrutural. Os fatores contendo informações das características indesejáveis (ambientais, por exemplo) são excluídos restando somente os necessários para detecção de danos estruturais.

Ainda nesse sentido, Yan et al. (2005b) usaram PCA, método linear, para distinguir mudanças nas medidas provocadas por variações ambientais. De acordo com os autores, os efeitos dessas variações são diferentes em relação aos causados pelos danos estruturais. Yan et al. (2005a) também desenvolveram um método similar ao descrito na

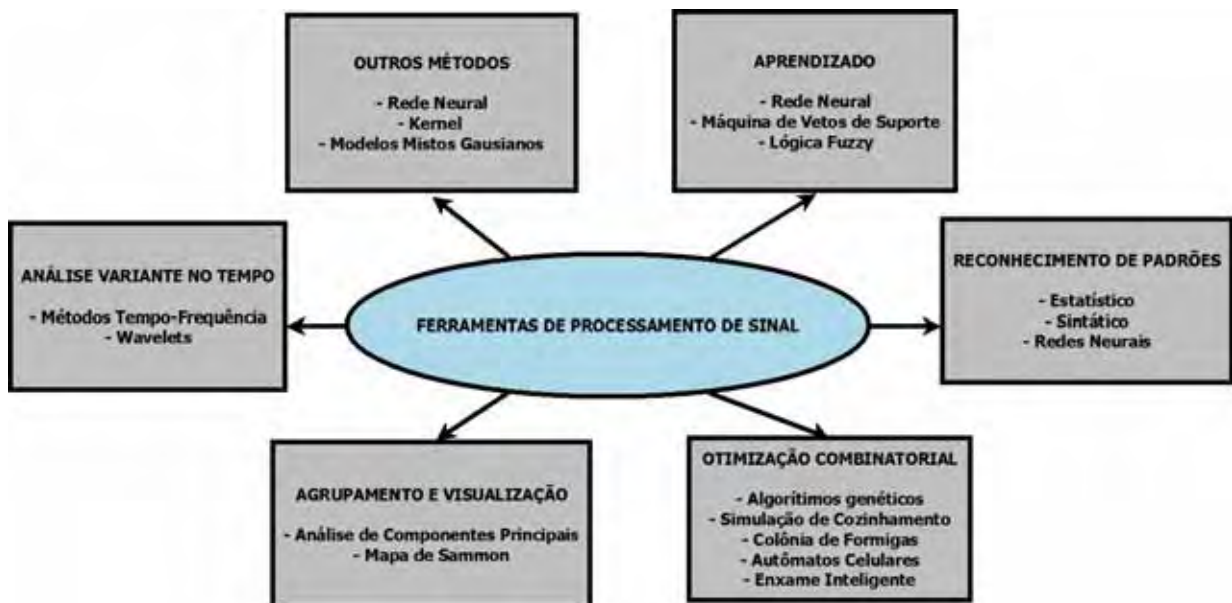
referência anterior, porém para sistemas não lineares. Koo et al. (2007) e Koo et al. (2009) desenvolveram uma estratégia de detecção de dano com base no coeficiente de correlação entre a referência da impedância (*baseline*) e o sinal de impedância com desvio de frequência, no qual o deslocamento refere-se à correlação máxima. Deraemaeker et al. (2008) propuseram detectar danos estruturais usando somente medidas de vibração submetidas às variações de condições ambientais. Esses efeitos ambientais foram tratados utilizando FA e os danos foram detectados utilizando controle estatístico de processos. Zhou et al. (2009) desenvolveram um método de compensação dos efeitos da temperatura no *baseline* utilizando interpolação do *baseline* a partir de subconjuntos de dados selecionados a partir de temperaturas consideradas críticas. Lämsä e Raiko (2010) propuseram a utilização de FA não linear para eliminação de efeitos externos (variáveis ambientais) para detecção de danos estruturais em uma estrutura (ponte). Yoder e Adams (2010) aplicou os filtros SG em um problema de vibro-acústico aplicado na análise da integridade estrutural quando submetidos a mudanças ambientais. O filtro de Savitzky-Golay foi aplicado para retirar o efeito da modulação no envelope extraído a partir da transformada de Hilbert a fim de fazer uma aproximação da resposta estrutural da viga. Lim et al. (2011) propuseram um método de detecção de danos estruturais na presença de variações de temperatura e carregamento, para o método baseado na EMI, através do uso de Kernel Análise de Componentes Principais (KPCA). Naquele trabalho, o dano foi simulado através do afrouxamento de parafusos que prendem uma asa (material composto) de uma aeronave a fuselagem. Baptista, Vieira Filho e Inman (2012) propuseram um sistema que permite em tempo real de aquisição de dados a partir de múltiplos sensores e inclui ainda a compensação de efeitos de temperatura, eliminando uma das causas de diagnósticos incorretos na monitorização estrutural. Segundo os autores, esse sistema é de baixo custo quando comparado com analisadores de impedância convencionais, o hardware e o software são simples e mais fáceis de desenvolver do que outros sistemas de medição.

Embora neste trabalho não seja proposto nenhum método de compensação de temperatura, sempre é importante mencionar que vários sistemas de SHM, que utilizam PZT, estão sujeitos à variação de temperatura e conseqüentemente todos os cuidados no momento do prognóstico de falha devem ser tomados a fim de eliminar os falsos positivos. Sendo que em altas frequências, acima de 20 kHz, essa sensibilidade a variação de temperatura é aumentada significativamente devido a alteração do grupo de velocidade de ondas na estrutura. Os resultados apresentados nos capítulos subsequentes são susceptíveis à variações na temperatura ambiente, o que exige cuidados quando da aplicação das técnicas propostas para detecção de danos reais.

3 ANÁLISE DE SINAIS NO DOMÍNIO DO TEMPO

Atualmente, as ferramentas computacionais e de processamento de sinal são essenciais no desenvolvimento e na operação de qualquer sistema de identificação, detecção e localização de danos estruturais. Para isso, existem diferentes formas de análise de sinal, tanto no domínio do tempo quanto da frequência, e cabe ao pesquisador selecionar qual método que mais se adequa à aplicação a ser desenvolvida. Com o avanço das ferramentas computacionais de hardware e software, aliado a novas ferramentas de processamento de sinal e estatística, pode-se desenvolver sistemas de SHM mais autônomos e com maior precisão nos diagnósticos de falhas estruturais. Staszewski e Worden (2004) apresentaram um diagrama (Figura 4) com as principais técnicas envolvidas na identificação de danos estruturais. Ainda nesse artigo pode-se fazer uma leitura mais aprofundada sobre os métodos de processamento de sinal aplicados a identificação de danos estruturais.

Figura 4 – Exemplos de ferramentas de processamento de sinais para identificação de danos.



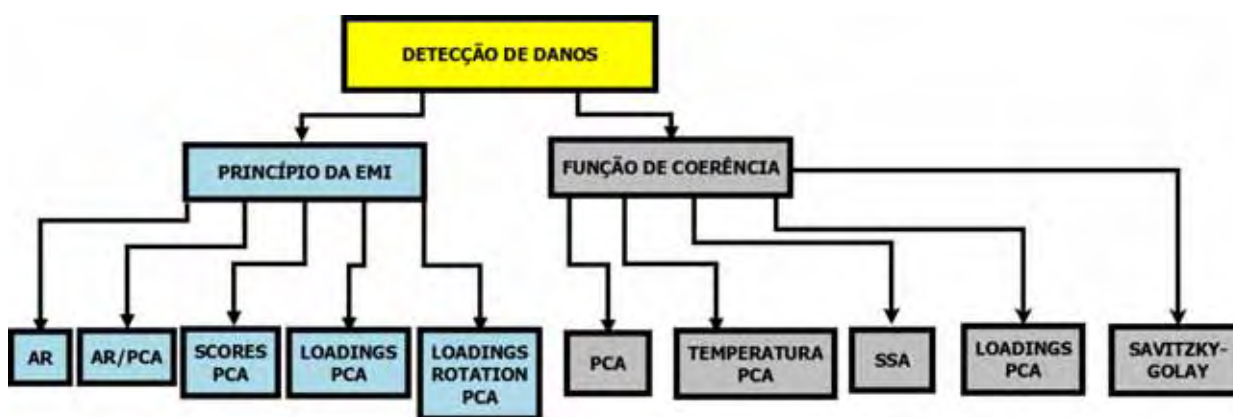
Fonte: Staszewski e Worden (2004).

Em geral, os sinais adquiridos a partir da estrutura a ser monitorada não apresentam características ideais para aplicação direta das técnicas de processamento de sinais. Em muitos casos, primeiramente tem-se a etapa conhecida como pré-processamento, necessária para adequar o sinal a níveis satisfatórios para aplicação das técnicas de processamento de sinal (STASZEWSKI, 2002). Nessa etapa geralmente têm-se normalização,

busca por tendências ou remoção de tendências, filtragem, alisamento, cálculos de médias, análise de *outlier* dentre outras técnicas (STASZEWSKI; READ; FOOTE, 2000).

No presente trabalho são utilizadas diversas técnicas de processamento de sinais aplicadas à detecção de danos estruturais baseadas em duas metodologias distintas: impedância eletromecânica e princípio da função de coerência. Na Figura 5 é apresentado um diagrama que ilustra todas as técnicas de processamento de sinais e metodologias utilizadas. Diferentemente das técnicas convencionais de detecção de danos estruturais que utilizam os sinais no domínio da frequência, neste trabalho todas as análises desenvolvidas utilizam os sinais diretamente no domínio do tempo.

Figura 5 – Diagrama contendo todas as técnicas abordadas no presente trabalho.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Nas seções seguintes serão apresentados os fundamentos teóricos, assim como uma breve revisão de literatura, das ferramentas de processamento de sinal e modelagem utilizadas. Essas técnicas são: Função de Coerência, Modelos Auto-Regressivos, Análise de Componentes Principais, Análise de Fatores (rotação de pesos), Análise Espectral Singular e filtros de Savitzky-Golay.

3.1 Detecção baseada na Função de Coerência

A motivação para utilização da técnica de detecção de danos baseada no princípio da Função de Coerência foi o trabalho realizado por Vieira Filho, Baptista e Inman (2011a). Os resultados obtidos naquele trabalho apresentaram excelentes sensibilidades na detecção de danos estruturais. Para isso, os autores propuseram uma metodologia usando a magnitude da função de coerência para detecção de danos estruturais. Para isso, a estrutura foi excitada

numa faixa de frequência através de um atuador PZT e a resposta estrutural obtida em outro PZT (sensor). A configuração usada é similar à metodologia conhecida com ondas de *Lamb*. No entanto, para o método proposto por Vieira Filho, Baptista e Inman (2011a) o sinal de excitação é do tipo *chirp* e possui nível de tensão próximo de 3 volts enquanto para o método ondas de *Lamb* esse sinal é um tom puro com amplitude elevada, normalmente acima de 50 volts. Além disso, a análise e a operação são realizadas de formas diferentes. No referido trabalho as métricas estatísticas foram determinadas a partir da magnitude da CF. Os sinais de resposta foram considerados tanto para a condição de estrutura íntegra quanto danificada.

A Função de Coerência (CF) fornece a medida quantitativa da similaridade entre dois sinais diferentes para uma mesma faixa de frequência. A CF entre dois sinais $x(t)$ e $y(t)$ no domínio do tempo, normalizada através da densidade espectral de potência cruzada, pode ser determinada através da Equação (11) (VASEGHI, 2006), onde $P_{XY}[f]$ representa o espectro de potência cruzado, $P_{XX}[f]$ e $P_{YY}[f]$ representam os auto espectros de potência dos sinais $x(t)$ e $y(t)$, respectivamente, e f é a frequência (RABINER; GOLD, 1975).

$$C_{XY}[f] = \frac{P_{XY}[f]}{\sqrt{P_{XX}[f] \cdot P_{YY}[f]}} \quad (11)$$

Os espectros de potência $P_{XX}[f]$, $P_{YY}[f]$ e $P_{XY}[f]$ podem ser determinados através da FFT (*Fast Fourier Transform* – Transformada rápida de Fourier) conforme Equações (12), (13) e (14), respectivamente.

$$P_{XX}[f] = \text{conj}(FFT(x[n])).FFT(x[n]) \quad (12)$$

$$P_{YY}[f] = \text{conj}(FFT(y[n])).FFT(y[n]) \quad (13)$$

$$P_{XY}[f] = \text{conj}(FFT(x[n])).FFT(y[n]) \quad (14)$$

Os vetores $y[n]$ e $x[n]$ representam os sinais amostrados a partir de $x(t)$ e $y(t)$. Contudo, na maioria das aplicações práticas, geralmente utiliza-se somente a magnitude da função de coerência, que é dada pela Equação (15).

$$M_{XY}[f] = \frac{|P_{XY}[f]|}{\sqrt{P_{XX}[f] \cdot P_{YY}[f]}} \quad (15)$$

A interpretação da magnitude da função de coerência é extremamente importante para determinação do nível de similaridade entre dois sinais. Para isso, faz-se necessário avaliar os valores resultantes da magnitude, que variam entre 0 e 1. Valores próximos a 1 indicam que os sinais possuem alta coerência. Por outro lado, os valores próximos de 0 representam uma similaridade extremamente pobre.

Embora, neste trabalho, não seja calculada a função de coerência propriamente dita, essa metodologia é utilizada como referência no Capítulo 6 quanto à forma de excitação e aquisição dos sinais de respostas da estrutura, assim como a análise temporal dos sinais de resposta. Para isso, diversas técnicas de processamento de sinais tais como análise de componentes principais, análise espectral singular e filtros de Savitzky-Golay são utilizados como forma de condicionamento dos sinais antes de ser processado o cálculo das métricas estatísticas CCDM e RMSD.

3.2 Análise temporal através de modelo auto-regressivo

A modelagem através de séries temporais tem um grande potencial para aplicações em detecção de danos em sistemas dinâmicos (AGUIRRE, 2007). Em especial, os modelos Auto-Regressivos (AR) têm sido usados com muita frequência para tais aplicações. Um modelo AR é um processo estocástico de ordem variável n que pode ser representado genericamente por uma combinação linear de valores de uma série temporal. Considere o modelo geral utilizado na identificação de sistemas representado pela Equação (16).

$$A(q)y(k) = \frac{B(q)}{F(q)} u(k) + \frac{C(q)}{D(q)} \vartheta(k) \quad (16)$$

Na Equação (16), $u(k)$ representa o sinal de excitação, $\vartheta(k)$ representa um ruído branco. Isolando-se $y(k)$ tem-se a Equação (17), como segue:

$$y(k) = \frac{B(q)}{F(q)A(q)} u(k) + \frac{C(q)}{D(q)A(q)} \vartheta(k) \quad (17)$$

reescrevendo-se a Equação (17) tem-se a Equação (18).

$$y(k) = H(k)u(k) + G(q)\vartheta(k) \quad (18)$$

Na Equação (18), o fator (q^{-1}) representa um atraso e se relaciona com $y(k)$ de acordo com a seguinte equação:

$$y(k)q^{-1} = y(k-1) \quad (19)$$

nas Equações (16-18), $u(k)$ representa o sinal de excitação, $\vartheta(k)$ representa um ruído branco e $A(q)$, $B(q)$, $C(q)$, $D(q)$ e $F(q)$ são os polinômios definidos pelas seguintes equações:

$$A(q) = 1 - a_1q^{-1} - \dots - a_{ny}q^{-ny} \quad (20)$$

$$B(q) = b_1q^{-1} + \dots + b_{nu}q^{-nu} \quad (21)$$

$$C(q) = 1 + c_1q^{-1} + \dots + a_{nv}q^{-nv} \quad (22)$$

$$D(q) = 1 + d_1q^{-1} + \dots + a_{nd}q^{-nd} \quad (23)$$

$$F(q) = 1 + fq^{-1} + \dots + a_{nf}q^{-nf} \quad (24)$$

na Equação (18) as funções $H(q)$ e $G(q)$ são normalmente chamadas de função de transferência do processo e do ruído, respectivamente, ou seja: $H(q)$ é o resultado de substituir $q = Z^{-1}$ na transformada unilateral Z da resposta ao impulso do processo $h(k)$ (AGUIRRE, 2007). Para o caso do modelo AR adotado nesse trabalho, a excitação $u(k)$ (Equação 16) é considerada como nula, pois toda a análise será realizada somente sobre os sinais de resposta da estrutura.

Os coeficientes de $A(q)$, $B(q)$, ..., $F(q)$ podem ser estimados através de vários métodos tais como: método de Burg, método dos momentos (equações de Yule Walker), método dos mínimos quadrados, dentre outros (BOX; JENKINS, 1976; GREEN; NGUYEN, 1999).

No presente trabalho os coeficientes do modelo AR são determinados utilizando o método dos mínimos quadrados.

Uma das tarefas mais difíceis quando se trabalha com modelos consiste em estimar a ordem que possa representar o sistema dinâmico com fidelidade (AGUIRRE, 2007). Na literatura existem vários critérios para determinação dessa ordem, sendo que um dos mais utilizado é o critério de informação de Akaike (AIC). Figueiredo et al. (2011) desenvolveram uma discussão a cerca dos métodos baseado no critério da informação de Akaike, função de auto-correlação parcial, raiz do erro médio quadrático e decomposição em valores singulares (SVD). Nesse trabalho, os autores fazem umas comparações entre três modelos AR diferentes e avalia a influência da ordem do modelo AR na detecção de danos estruturais.

O AIC, utilizado neste trabalho, é dado pela Equação (25) (AGUIRRE, 2007).

$$AIC(n_\theta) = N \log(\hat{\sigma}_\epsilon^2(n_\theta)) + 2n_\theta \quad (25)$$

Na Equação (25), N representa o número de amostras, $\hat{\sigma}_\epsilon^2(n_\theta)$ é variância do erro de predição e n_θ é o número total de coeficientes estimados. O índice (AIC) é afetado pelo número de parâmetros e pelo erro de previsão, assim, a minimização do seu valor fornece um modelo bem ajustado com baixa variância do erro de previsão.

Existem vários trabalhos na literatura que utilizam modelos AR para detecção, predição e/ou localização de danos estruturais. Adams e Farrar (2002) propuseram o uso dos coeficientes AR para caracterizar o estado de danos linear. Lynch et al. (2002) utilizaram as mudanças dos erros residuais do modelo ARX provocados pelo dano estrutural para comparar com uma base de dados constituída para estrutura considerada íntegra (*baseline*). A detecção de danos estruturais é realizada com base num algoritmo AR-ARX e os testes foram aplicados numa placa retangular e numa estrutura de cinco andares. Outras aplicações para detecção e localização de danos estruturais podem ser encontradas em (LEI et al., 2003). Em geral, o uso de modelo AR para a predição linear combinado com modelo ARX tem sido bastante empregado na literatura. Como exemplo, os modelos ARX foram utilizados para computar parâmetros de entrada para análises subsequente para identificação de danos estruturais (SOHN; FARRAR, 2001; ADAMS; FARRAR, 2002; SOHN et al., 2005). Fasel et al. (2005) propuseram o uso de modelos ARX no domínio da frequência juntamente com EVS (*Extreme Value Statistics*) para detecção de danos não lineares aplicados a problemas de vibração. Adams e Farrar (2007) criaram um indicador de dano que foi definido com base em modelos

ARMA. Silva, Dias Junior e Lopes Junior (2008) propuseram uma análise temporal baseada em EMI utilizando modelo ARX. Contudo, o ARX foi usado para estimar a FRF. Silva et al. (2008) utilizaram ARMA (*Autoregressive Move Average*) conjuntamente com PCA (*Principal Components Analysis*) como preparação dos dados antes de serem utilizados para classificação de danos através de *fuzzy clustering*. Os testes foram aplicados em problemas de vibração, em uma estrutura *benchmark*. Gul e Catbas (2011) utilizaram séries temporais para detectar, localizar e estimar a extensão de danos estruturais. Os autores usaram ARX para criar *clusters* a partir de diferentes sensores para captação da resposta de uma estrutura livre. Hidalgo et al. (2012) apresentam um sistema SHM contendo uma rede sem fio, de baixo consumo, para detecção de danos estruturais no qual se utiliza modelos AR-ARX para detecção e sincronização entre os nós do sistema descentralizado. Os testes foram realizados numa placa de alumínio retangular e noutra estrutura de alumínio de cinco pavimentos.

Neste trabalho, no Capítulo 4, os coeficientes do modelo AR são estimados a partir dos sinais de resposta no tempo para cada condição estrutural, assim como para cada sensor, e posteriormente são utilizados como variáveis de entrada para o cálculo das métricas estatísticas RMSD. O modelo AR é utilizado na metodologia baseada na EMI no domínio do tempo.

3.3 Análise temporal através da análise de componentes principais

A Análise de Componentes Principais (PCA) é considerada um método fatorial devido ao fato de que a redução dos dados não acontece simplesmente pela seleção de algumas variáveis, mas sim pela construção de um novo conjunto de variáveis sintéticas obtidas através da combinação linear entre as variáveis iniciais e as médias dos fatores (VICINI; SOUZA, 2005). Matematicamente, é uma técnica de análise multivariada que permite investigar um grande conjunto de dados. Adicionalmente, esta técnica transforma um conjunto de dados originais em um novo conjunto comumente conhecido como componentes principais (PC). A PCA tem como objetivo substituir um conjunto de variáveis correlacionadas por um conjunto de novas variáveis não correlacionadas (JOLLIFFE, 2002).

Dado um conjunto de medidas, $\mathbf{X} = [x_{i1} \ x_{i2} \dots \ x_{ij}]^T$ onde $i= 1,2,3,\dots,M$; $j= 1,2,3,\dots,N$. T representa transposição matricial, M é o número total de observações e N o número de variáveis. Pode-se obter o conjunto de componentes principais (PC) a partir de

uma série de operações nos dados observados. Inicialmente, calcula-se a matriz de covariância conforme a Equação (26):

$$\mathbf{C} = \sum_{i=1}^M \mathbf{X}_i \mathbf{X}_i^T \quad (26)$$

a dimensão de \mathbf{C} é $N \times N$. Se \mathbf{C} é uma matriz quadrada $N \times N$ e \mathbf{I} representa a matriz identidade, então os escalares $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$ devem satisfazer à Equação (27):

$$|\mathbf{C} - \lambda \mathbf{I}| = 0 \quad (27)$$

na Equação (27), λ representa o autovalor de \mathbf{C} . Como a matriz de covariância tem dimensão $M \times N$ e λ é o autovalor da matriz \mathbf{C} , então, pode-se escrever conforme a Equação (28):

$$\mathbf{C}\mathbf{E} = \lambda \mathbf{E} \quad (28)$$

a matriz \mathbf{E} tem dimensão $N \times N$ e é conhecida como autovetor ou vetor característico de \mathbf{C} , associado com λ . A estratégia para obtenção das PC (*scores*) é formar combinação linear a partir das variáveis originais. Assim, os *scores* (\mathbf{Z}) são determinados tomando os elementos de \mathbf{X} e projetando-os em \mathbf{E} conforme Equação (29).

$$\mathbf{Z} = \mathbf{X} \mathbf{E} \quad (29)$$

Em geral, a escolha do número de componentes, mais representativas para uma dada aplicação, pode ser realizada através da análise da variância acumulada para cada autovalor. Na verdade, há várias técnicas utilizadas para determinação do número ótimo de componentes, no entanto uma análise mais simples adotada por vários autores consiste em utilizar as componentes na qual a variância acumulada seja maior ou igual a 70% da variância total acumulada. Para isso, pode-se utilizar a seguinte equação (VICINI; SOUZA, 2005):

$$ve(\%) = 100 \frac{\sum_{k=0}^k \lambda_k}{S} \quad (30)$$

na Equação (30), S representa o traço da matriz \mathbf{C} e $k = 0, 1, 2, \dots, M$.

Outra forma de análise da quantidade de componentes consiste na determinação do coeficiente de correlação do produto-momento de Pearson. Esse pode ser útil para a compreensão sobre a disposição das medidas em relação os eixos das PC. Por exemplo, considerando duas variáveis X e Y, o coeficiente de Pearson (ρ) pode ser determinado usando a Equação (31) (GIBBONS; CHAKRABORTI, 2003).

$$\rho(X, Y) = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{[\text{Var}(X) \text{Var}(Y)]^{\frac{1}{2}}} \quad (31)$$

O valor absoluto do coeficiente de correlação é sempre menor que 1 e seu sinal é determinado pelo sinal da covariância. Se X e Y são variáveis aleatórias independentes, sua correlação é zero. Por outro lado, se X e Y têm forte correlação, o coeficiente de Pearson se aproxima de 1. Se a correlação entre as variáveis aumenta, o eixo principal se torna cada vez maior em relação ao eixo secundário. Quando os coeficientes de Pearson são 1 (correlação perfeita), o segundo eixo praticamente desaparece e o eixo principal dobra o comprimento.

No presente trabalho são utilizados, com frequência, os pesos calculados a partir das PC. Esses pesos (**W**) medem a influência que cada variável $x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,j}$ possui em relação a cada componente principal ($z_{i,1}, z_{i,2}, \dots, z_{i,j}$). Na matriz **W**, as linhas correspondem as variáveis e as colunas as componentes. Os pesos de cada variável em relação às componentes podem ser calculados pela Equação (32) (RENCHEER, 2002).

$$W = \frac{e_{i,j}}{\sqrt{\text{Var}(x_{i,j})}} \quad (32)$$

Na Equação (32), $e_{i,j}$ representa um elemento da matriz de autovalores **E** e $\text{Var}(x_{i,j})$ representa a variação de $x_{i,j}$. Neste trabalho, os pesos **W** serão usados diretamente nos cálculos das métricas estatísticas RMSD e CCDM e ainda, em outra situação, como variável entrada para algoritmo de rotações de pesos.

Há uma vasta literatura sobre a utilização da PCA (*Principal Component Analysis*) em aplicações de SHM. De maneira geral os trabalhos exploram as PC como forma de compressão de dados (redução de dados) na etapa de pré-processamento dos sinais de resposta. Kerschen e Golival (2002) desenvolveram um trabalho no qual descreve a interpretação física das componentes ortogonais aplicados à estrutura dinâmica através de Decomposição em Valores Singulares (SVD). Manson (2002) utilizou PCA para suprimir

fatores ambientais aplicados à análise de danos em *outlier*. Park et al. (2007) utilizaram um algoritmo contendo PCA para redução da quantidade de dados gerados pelo método da EMI e eliminar ruídos indesejáveis. Esses autores compararam índices RMSD para compressão da impedância considerando a presença das PC (*Principal Components*) assim como a sua ausência. Yan et al. (2005b) usaram PCA para distinguir mudanças nas medidas provocadas por variações ambientais. De acordo com os autores, os efeitos dessas variações são diferentes em relação aos causados pelos danos estruturais. Mujica et al. (2008) propuseram o uso de PCA para redução de dimensionalidade para identificação de danos, especificamente detecção e localização de impactos em um *flap* das asas de um avião comercial. A PCA também foi utilizada conjuntamente com PLS (*Partial Least Square*) para organização de uma base de conhecimento prévio para detecção e localização de impactos para aplicações de SHM utilizando a técnica de conhecimento baseado em casos. Em outro trabalho, a PCA foi usada em conjunto com um modelo ARMA para classificação de danos através de *fuzzy clustering* (SILVA et al., 2008). Koo e Park (2008) estudaram os efeitos da variação de temperatura na impedância, particularmente no deslocamento da frequência nos eixos vertical e horizontal. Para solucionar esse problema, os autores propuseram uma nova estratégia de detecção de danos somente através da utilização de frequências ressonantes. As medidas de impedância foram extraídas a partir das componentes principais (PC) e as variações das componentes foram introduzidas como um indicador de danos sem os efeitos da temperatura.

Neste trabalho duas aplicações diferentes são baseadas nos *scores* e nos pesos das PC. No Capítulo 4 os *scores* são utilizados para detecção de danos baseados no princípio na EMI. Já no Capítulo 6 esses são utilizados para detecção de danos na metodologia baseada no princípio da função de coerência. Os pesos são utilizados tanto no Capítulo 5 quanto no 6. Em todos os casos, os pesos e/ou *scores* são calculados a partir dos sinais resposta da estrutura no domínio do tempo e esses são utilizados como variáveis de entrada para as métricas RMSD e CCDM.

3.4 Análise baseada na rotação de pesos

O procedimento de rotação de pesos utilizando Análise de Componentes Principais, também é conhecido como *R-Modo* e geralmente é estudado dentro da teoria de Análise de Fatores (AF). A justificativa para a rotação de fatores consiste no fato de que essa técnica pode simplificar a estrutura do fator e, portanto, tornar a interpretação mais fácil e mais

confiável (RENCHER, 2002). Durante a análise fatorial é extremamente recomendável testar diferentes subespaços dos fatores retidos para avaliar a robustez da interpretação da rotação. Nesse sentido, este trabalho utiliza rotação de pesos para melhorar a sensibilidade dos índices RMSD. Para isso, a rotação de pesos é realizada usando o algoritmo fatorial conhecido como Varimax. Esse algoritmo simplifica a interpretação dos resultados, pois, cada variável original tende a ser associada com um ou mais fatores, e cada fator representa apenas um pequeno número de variáveis. O objetivo do algoritmo fatorial é buscar uma rotação dos fatores originais tal que a variância entre os fatores seja maximizada. Então, considerando os elementos da matriz de pesos (\mathbf{W}) b_{ij} , $i = 1, 2, \dots, p$ com $j = 1, 2, \dots, m$ a rotação dos pesos através do algoritmo Varimax (\mathbf{V}) pode ser calculado através da Equação (33) (JOLLIFFE, 2002).

$$\mathbf{V} = \sum_{j=1}^m \left[\sum_{i=1}^p b_{i,j}^4 - \frac{1}{p} \left(\sum_{i=1}^p b_{i,j}^2 \right)^2 \right] \quad (33)$$

Na Equação (33) os termos entre colchetes são proporcionais aos desvios quadrados dos pesos para cada fator rotacionado (JOLLIFFE, 2002). As linhas de \mathbf{V} correspondem às variáveis e as colunas correspondem aos fatores.

Antes de proceder a rotação dos pesos é necessário verificar se a correlação entre as variáveis são significativas ou não. Na literatura, há vários métodos de teste de correlação de dados, mas neste trabalho foram utilizadas duas técnicas bastante comuns em estatística: o teste de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) e teste da esfericidade de Bartlett (BTS).

O teste KMO mede a adequação das amostras para avaliar quão estreita é a correlação entre a matriz de covariância (\mathbf{C}) e a matriz diagonal e é baseado na seguinte equação (KAISER, 1970):

$$KMO = \frac{\sum_{i \neq j} r_{i,j}^2}{\sum_{i \neq j} r_{i,j}^2 + \sum_{i \neq j} q_{i,j}^2} \quad (34)$$

na Equação (34), $r_{i,j}^2$ é o quadrado de um dado elemento a partir de \mathbf{C} e $q_{i,j}^2$ é o quadrado de um elemento de \mathbf{Q} . Por sua vez, as matrizes \mathbf{Q} e \mathbf{D} são obtidas como seguem:

$$\mathbf{Q} = \mathbf{D}\mathbf{C}^{-1}\mathbf{D} \quad (35)$$

$$D = \left[(\text{diag } C^{-1})^{\frac{1}{2}} \right]^{-1} \quad (36)$$

se C^{-1} se aproximar de uma matriz diagonal, o valor do KMO se aproxima de 1 e, consequentemente, o procedimento de rotação de pesos pode ser realizado com sucesso.

O teste da esfericidade de Bartlett's (BTS) é outra forma de verificar se a rotação de fatores pode ser realizada com sucesso ou não. Este teste considera a hipótese de a matriz de correlação ser uma matriz identidade. Se a diagonal principal for igual a 1 e todos os outros valores forem zero, então o determinante de C será igual a 1. Se isso acontecer, então garante-se que não há nenhuma correlação entre as variáveis analisadas (BARTLETT, 1937).

Considerando a hipótese $H_0 = \sigma_{12} = \sigma_{22} \dots = \sigma_{k2}$ e k amostras, o BTS pode ser obtido como segue (BARTLETT, 1937):

$$BTS = \frac{m}{c} \quad (37)$$

onde c é dado pela seguinte equação:

$$c = 1 + \frac{1}{3(k-1)} \left[\sum_{i=1}^k \frac{1}{v_i} - \frac{1}{\sum_{i=1}^k v_i} \right] \quad (38)$$

O valor de m pode ser calculado como segue:

$$m = \left(\sum_{i=1}^k v_i \right) \ln S^2 - \sum_{i=1}^k v_i \ln s_i^2 \quad (39)$$

onde S^2 é dado por:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^k v_i s_i^2}{\sum_{i=1}^k v_i} \quad (40)$$

na Equação (40), $s_1^2, s_2^2, \dots, s_k^2$ são os desvios da amostra independente com v_1, v_2, \dots, v_k graus de liberdade. Em seguida, o BTS é aproximadamente χ^2_{k-1} . Assim, considerando o índice de significância alpha (α), a hipótese H_0 deverá ser rejeitada se $BTS > \chi^2_{\alpha, k-1}$. O teste de Bartlett aplicado a PCA requer a rejeição da hipótese nula.

Na literatura, até o presente momento dessa pesquisa, não foram encontrados trabalhos que são relacionados exclusivamente com rotação de pesos (PC) aplicados a SHM. No entanto, para a Análise de Fatores (FA) como um todo, há alguns poucos trabalhos relacionados principalmente com a supressão de fatores ambientais durante o processo de detecção de danos estruturais. Nesse sentido, Kullaa (2003) utilizou FA para remover variáveis ambientais considerando que alguns desses fatores possuem efeitos característicos nas medidas de resposta da estrutura. Os fatores contendo informações das características indesejáveis (ambientais, por exemplo) são excluídos, restando somente os necessários para detecção de danos estruturais. Deraemaeker et al. (2008) propuseram detectar danos estruturais usando somente medidas de vibração submetidas às variações de condições ambientais. Esses efeitos ambientais foram tratados utilizando FA e os danos foram detectados utilizando controle estatístico de processos. Lämsä e Raiko (2010) propuseram a utilização de FA não linear para eliminação de efeitos externos (variáveis ambientais) para detecção de danos estruturais em uma estrutura (ponte), e esses resultados foram comparados com um método linear.

Neste trabalho, a análise baseada na rotação de pesos é aplicada à detecção de danos estruturais para a técnica baseada na EMI (Capítulo 5). A rotação dos pesos é realizada como uma forma de melhorar a sensibilidade dos índices RMSD na detecção de danos estruturais aumentando-se, assim, a precisão do método proposto na seção 3.3 (pesos sem rotação). Os pesos são calculados a partir dos sinais temporais de resposta da estrutura e, posteriormente, rotacionados antes de serem utilizados como variáveis de entrada para as métricas RMSD.

3.5 Análise baseada na Análise Espectral Singular

A Análise Espectral Singular é um método de análise de séries temporais que engloba elementos de análise de séries temporais clássica, processamento de sinais, sistemas dinâmicos e análise multivariada. A ideia básica da SSA é fazer uma decomposição da série original em uma soma de um número pequeno de outras componentes independentes e interpretáveis como uma tendência de variação lenta, componentes oscilatórias e uma estrutura de ruído (MIRMONEMI et al. 2011). A SSA possui uma abordagem não paramétrica, ou seja, não é necessário conhecer o modelo matemático do sistema dinâmico da série temporal a ser estudada (REF). A análise espectral é baseada na decomposição de

Karhunen-Loeve da matriz de covariância. O procedimento referente à SSA pode ser desenvolvido em quatro etapas, como apresentado mostrado a seguir (HASSANI, 2007):

Etapla 1: decomposição da série temporal. Seja uma sequência de vetores $\{\hat{X}(t)\}$ de m -dimensões decomposta a partir de uma série temporal $\{X(t): t=1, \dots, N\}$ dada por:

$$\hat{X}(t) = (X(t), X(t+1), \dots, X(t+m-1)) \quad (41)$$

na Equação (41), $t=1, \dots, N'$ e N' é dado pela Equação (42).

$$N' = N - m + 1 \quad (42)$$

O resultado $N' \times m$ representa o total de matrizes de trajetórias (**D**) da série temporal na qual N é definido como o tamanho da janela da matriz de trajetória. A matriz **D** é composta por vetores de m -dimensões na qual **D** é uma matriz de Henkel (os elementos das diagonais $i+j$ são constantes e iguais) (MIRMONEMI et al. 2011).

Etapla 2: determinação da matriz de covariância **C**. A partir da matriz **D**, define-se a matriz de covariância como sendo:

$$\mathbf{C} = \frac{1}{N'} \mathbf{D}^T \mathbf{D} \quad (43)$$

posteriormente, os autovalores podem ser determinados através da decomposição em valores singulares (SVD), como segue:

$$\mathbf{X} = \mathbf{U} \mathbf{\Sigma} \mathbf{V}^T \quad (44)$$

nas equações (43) e (44), o índice T representa transposição. Os elementos da matriz diagonal $\mathbf{\Sigma}$ são determinados através da seguinte equação:

$$\mathbf{\Sigma} = [\text{diag}(\sigma_1, \dots, \sigma_m)] \quad (45)$$

os elementos da matriz Σ são conhecidos como valores singulares de \mathbf{D} e são iguais à raiz quadrada dos autovalores de \mathbf{C} . Os autovalores de \mathbf{C} $\{(\rho_i, \mathbf{v}_i) : i= 1, \dots, m\}$ são obtidos através da Equação (46).

$$\mathbf{C}\mathbf{v}_i = \rho_i \mathbf{v}_i \quad (46)$$

Cada autovalor ρ_i estima a variância parcial na direção de \mathbf{v}_i e a soma de todos os autovalores é igual à variância acumulada para toda a série original.

Etapa 3: projeção da série em cada autovalor. Esse procedimento corresponde à determinação das componentes principais (PC) e pode ser realizado através da seguinte Equação:

$$\mathbf{A}_i(\mathbf{t}) = \sum_{j=1}^m \mathbf{X}(t+j-1) \rho_i(j) \quad (47)$$

nessa Equação cada uma das PC independente de ter tendência linear ou não linear, padrão de periodicidade ou quase periodicidade, ou múltiplo padrão de periodicidade, possui faixa de frequência limitada e características bem definidas, o que facilita sua estimação.

Etapa 4: reconstituição da série. A série temporal pode ser reconstituída através de uma combinação das PC, como apresentado nas Equações (48) e (49).

$$\mathbf{R}_i(\mathbf{t}) = \frac{1}{m_t} \sum_{i \in I} \sum_{j=l_t}^{u_t} \mathbf{A}_i(t-j+1) \mathbf{v}_i(j) \quad (48)$$

$$\mathbf{X}_{rec}(\mathbf{t}) = \sum_{j=1}^m \mathbf{R}_i(\mathbf{t}) \quad (49)$$

A normalização dos fatores (m_t) , (l_t) e (u_t) é definida como segue.

$$(m_t, l_t, u_t) = \begin{cases} \left(\frac{i}{t}, 1, t\right), & 1 \leq t \leq m-1 \\ \left(\frac{i}{m}, 1, m\right), & m \leq t \leq N' \\ \left(\frac{i}{N-t+1}, t-N+m, m\right), & N'+1 \leq t \leq N \end{cases} \quad (50)$$

Cada componente principal (PC) armazena parte da energia acumulada pela série temporal original e, obviamente, se todas componentes forem somadas o resultado conterá a

energia total da série original. O resíduo da série temporal (r) é dado pela diferença entre a série original e a série reconstruída conforme Equação (51).

$$r(t) = X(t) - X_{\text{rec}}(t) \quad (51)$$

Certamente, quanto maior for o número de PC utilizadas no processo de reconstrução da série temporal menor será o resíduo resultante.

Na literatura existem alguns trabalhos que utilizam a técnica multivariada, mais especificamente: Análise Singular Espectral (SSA) aplicada a problemas de SHM. No entanto, essa técnica vem sendo aplicada com mais frequência nos últimos três anos. Loh, Chen e Mao (2010) utilizaram SSA para decompor as respostas não lineares sísmicas em pilares de concreto a fim de monitorar deformações permanentes nessa estrutura. A extração dos danos foi realizada usando a grande variabilidade de alta frequência da SSA. Loh, Chen e Hsu (2011) desenvolveram um sistema de monitoramento estrutural contínuo, aplicado em um arco, em Taiwan, submetido a diferentes comportamentos não lineares causados por variações ambientais. As técnicas de SSA e PCA não lineares (NPCA) foram utilizadas para extração de deformações residuais no referido arco. Irina (2012) desenvolveu um estudo no qual explora as possibilidades de análise inversa e modelagem de dados de uma estrutura não linear de vibração. Uma abordagem estatística baseada na SSA é utilizada para determinar a resposta de amortecimento livre de uma estrutura a partir de uma perturbação inicial. O sinal de vibração é decomposto em novas variáveis, componentes principais, que são utilizadas para revelar um padrão oscilatório da resposta estrutural. Muruganatham et al. (2013) utilizaram SSA para decompor uma série temporal advinda de sinais de vibração obtidos para o escorregamento de motores elétricos. Essa decomposição através de SSA gerou dois conjuntos de séries periódicas e ruídos não periódicos, que foram utilizados para a extração de tendências de falhas futuras em motores.

Neste trabalho, os resíduos obtidos após a reconstrução das séries temporais são utilizados como variáveis de entrada para o cálculo das métricas estatísticas CCDDM e RMSD e a SSA é utilizada em conjunto com a metodologia baseada no princípio da função de coerência (Capítulo 6).

3.6 Análise baseada nos filtros de Savitzky–Golay

Os filtros de Savitzky-Golay, que é considerado um filtro digital do tipo FIR (*Finite Impulse Response*), são representados por equações polinomiais de alisamento ou suavização baseados no método dos mínimos quadrados (SAVITZKY; GOLAY, 1964). Estes são normalmente utilizados para "suavizar" um sinal ruidoso cuja faixa de frequência do sinal sem ruído é larga. Neste tipo de aplicação, os filtros de suavização SG possuem um desempenho muito melhor do que o padrão médio de filtros FIR, pois esses têm tendência de atenuar uma parte significativa do conteúdo do sinal de alta frequência, juntamente com o ruído. Embora os filtros de SG sejam mais eficazes para preservar as componentes pertinentes de alta frequência do sinal, eles são menos eficaz do que o padrão médio de filtros FIR em rejeitar ruídos com níveis elevados. Os filtros de SG preservam os momentos de ordem elevada com mais eficiência do que outros métodos de suavização, o que tende a preservar as larguras e as amplitudes dos picos dos sinais analisados (SAVITZKY; GOLAY, 1964). Os filtros de Savitzky-Golay são considerados ótimos porque minimizam o erro quadrático médio na montagem de um dos polinômios para cada conjunto de dados ruidosos.

A análise baseada em SG pode ser entendida assumindo-se que $N = 2M+1$ é par, para uma sequência simétrica de M pontos, para cada lado de x_0 no conjunto de dados X representado pela Equação (52) (ORFANIDIS, 2010).

$$X = [x_{-M}, \dots, x_{-1}, x_0, x_1, \dots, x_M] \quad (52)$$

As N amostras de dados em X são representadas por um polinômio de ordem d como segue:

$$\hat{x}_m = c_0 + c_1 m + \dots + c_d m^d, \quad -M \leq m \leq M \quad (53)$$

na Equação (53) há $d+1$ vetores de base polinomial representado por s_i , $i=0,1,\dots,d$ definidos pelas componentes representadas pela seguinte Equação:

$$s_i(m) = m^i, \quad -M \leq m \leq M \quad (54)$$

a matriz S ($N \times (d+1)$) tem s_i como coluna e é definida como segue:

$$S = [s_0, s_1, \dots, s_d] \quad (55)$$

Os valores suavizados (*smoothed*) podem ser escrito na forma vetorial conforme Equação (56).

$$\hat{x} = \sum_{i=0}^d c_i s_i \quad (56)$$

No entanto, o valor de $y_0 = \hat{x}_0$ é dado em termo do centro do filtro b_0 conforme Equação (57).

$$y_0 = b_0^t x = \sum_{m=-M}^M b_0(m) x_m \quad (57)$$

O vetor X pode ser deslocado de n instantes de tempo conforme Equação (58).

$$X_d = [x_{n-M}, \dots, x_{n-1}, x_n, x_{n+1}, \dots, x_{N+m}]^T \quad (58)$$

A Equação (59) representa a saída de um filtro de SG de comprimento N , ordem d , para suavização de ruídos para uma sequência $x(n)$ no estado estacionário (ORFANIDIS, 2010).

$$y(n) = \sum_{m=-M}^M b_0(m) x(n+m) = \sum_{m=-M}^M b_0(-m) x(n-m) \quad (59)$$

A segunda parte da Equação (59) corresponde à forma de convolução da saída do filtro. Essa equação pode ser escrita dessa forma, pois o filtro b_0 é simétrico e consequentemente $b_0(-m) = b_0(m)$. As $d+1$ colunas de $N \times (d+1)$ da matriz G representam a diferenciação do filtro SG para as derivadas de ordem $i = 1, 2, \dots, d$. Derivando-se a Equação (59) i vezes e fazendo $m=0$, tem-se a Equação (60) (ORFANIDIS, 2010).

$$y_0^{(i)} = \hat{x}_0^{(i)} = d^i \frac{\hat{x}_m}{dm^i} /_{m=0} = i! c_i g_i^T X \quad (60)$$

Finalmente, a Equação (61) representa, de forma genérica, a saída diferenciada do filtro SG (ORFANIDIS, 2010).

$$y^{(i)}(n) = i! \sum_{m=-M}^M g_i(-m) x(n-m), \quad i = 0, 1, \dots, d \quad (61)$$

O uso das derivadas geralmente é interessante quando se deseja remover *offsets* no sinal que está sendo processado (LUO et al. 2005). Geralmente, a primeira derivada remove deslocamentos sistemáticos da linha de base enquanto que com a segunda derivada é possível eliminar uma variação linear da linha de base, normalmente devida a efeitos de espalhamento (HONORATO et al. 2007). O problema, em muitos casos, é que o cálculo das derivadas é feito a partir de diferenças entre valores de pontos adjacentes, o que tende a piorar a relação sinal-ruído (RSR). Como possível solução, antes de qualquer diferenciação é comum aplicar-se aos dados algum tipo de suavização usando-se o filtro de Savitzky-Golay (SAVITZKY; GOLAY, 1964).

Vários trabalhos na literatura aplicados a área de monitoramento da integridade estrutural e áreas afins têm utilizado os filtros de Savitzky-Golay como forma de suavizar os sinais de resposta da estrutura na etapa de pré-processamento desses sinais (STASZEWSKI, 2002). Staszewski, Lee e Traynor (2007) utilizaram filtros SG em conjunto com filtros Kaiser-Bessel para melhorar o sinal de resposta de um laser Doppler aplicado ao método de ondas de *Lamb*. Yoder e Adams (2010) aplicaram os filtros SG em um problema de vibro-acústico na análise da integridade estrutural quando submetidos a mudanças ambientais. O filtro de Savitzky-Golay foi aplicado para retirar o efeito da modulação no envelope extraído a partir da transformada de Hilbert a fim de fazer uma aproximação da resposta estrutural da viga. Os autores justificaram o uso do filtro SG devido ao fato de que mesmo sendo um filtro do tipo passa-baixa, possui um ótimo poder de extrair ruídos e manter as componentes de altas frequências do sinal original. Saar (2011) utilizou o filtro de SG para suavizar a tensão de excitação e os sinais de resposta, de modo que a razão entre os sinais filtrados fosse utilizada para a estimativa do módulo da impedância eletromecânica. Thenozhi, Wen e Garrido (2012) utilizaram os filtros SG para remover ruídos de alta frequência a partir da integração numérica de sinais de aceleração obtidos em um edifício a fim de determinar a velocidade e deslocamento. Para isso, os autores aplicaram um filtro de ordem 3 com uma janela de 41 pontos.

Nesse estudo os filtros SG são utilizados na metodologia baseada no princípio da função de coerência (Capítulo 6), na qual todos os sinais de respostas da estrutura monitorada são suavizados e, a partir desses, são calculadas a primeira e segunda derivada, antes de proceder ao cálculo das métricas estatísticas CCDDM.

4 RESULTADOS BASEADOS NA EMI PARA PLACA RETANGULAR

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos com os novos métodos para identificação de danos estruturais no domínio do tempo baseadas no princípio da impedância eletromecânica (EMI). A primeira análise explora técnicas de séries temporais através do uso dos coeficientes do modelo Auto-Regressivo (AR). A segunda análise é baseada em estatística multivariada, mais especificamente o uso dos *scores* calculados a partir da Análise de Componentes Principais (PCA). A terceira utiliza o conjunto de componentes principais em conjunto com modelos AR. Para todas essas metodologias, tanto os índices RMSD quanto os CCDM são determinados considerando como referência o sinal do *baseline*. Todos os testes realizados para os métodos propostos são comparados com a técnica tradicional baseada na FRF/EMI.

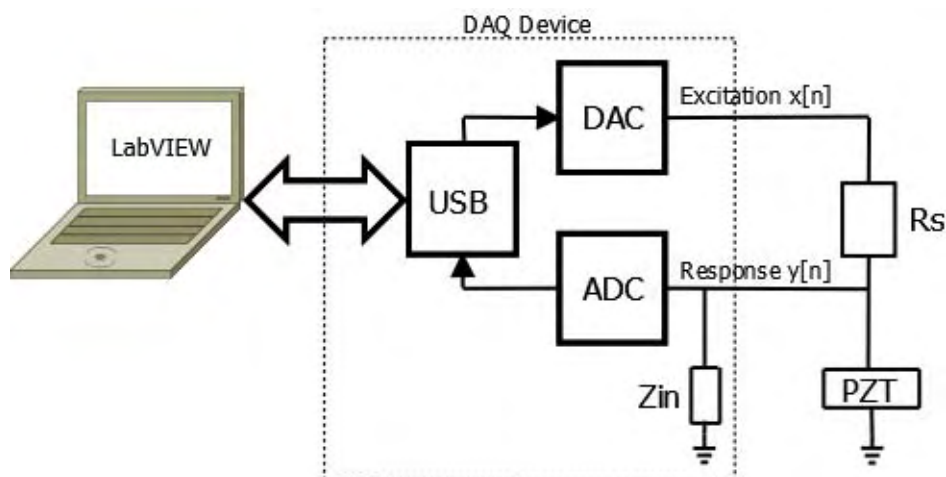
4.1 Descrição geral do sistema de aquisição

Neste capítulo, os sinais usados para computação dos coeficientes do modelo AR e/ou das PC foram adquiridos através do circuito de excitação/recepção de sinais do conjunto PZT/ estrutura apresentado na Figura 2. Esse circuito é gerenciado a partir de um software desenvolvido na plataforma LabVIEW[®], que controla uma placa multifuncional do tipo *Data Acquisition* (DAQ) - modelo USB-6259 (BAPTISTA ; VIEIRA FILHO, 2010). Este software que é executado no computador e que controla o DAQ fornece os sinais $x[n]$ e $y[n]$ na forma discreta (Figura 6). Para a aplicação da metodologia de forma correta, os conversores DAC (digital para analógico) e o ADC (analógico para digital), que estão integrados no dispositivo DAQ, estão sincronizados, o que significa que cada amostra n gerada pelo sinal de excitação gera uma amostra equivalente no sinal de resposta.

Os métodos propostos neste capítulo são baseados no princípio da EMI e utilizam transdutores PZT colados na estrutura. Nesse procedimento um dado PZT trabalha de forma dual como sensor e atuador. A ideia básica consiste em excitar o conjunto PZT/estrutura e, posteriormente, mostrar a resposta estrutural. Sinais do tipo *chirp*, com diferentes faixas de

frequências, são os mais utilizados para excitar a estrutura o conjunto PZT/estrutura. Os testes apresentados nesse capítulo foram realizados usando um sinal *chirp* variando na faixa de 0 a 250 kHz.

Figura 6 – Sistema baseado na EMI utilizado para análise no domínio do tempo.

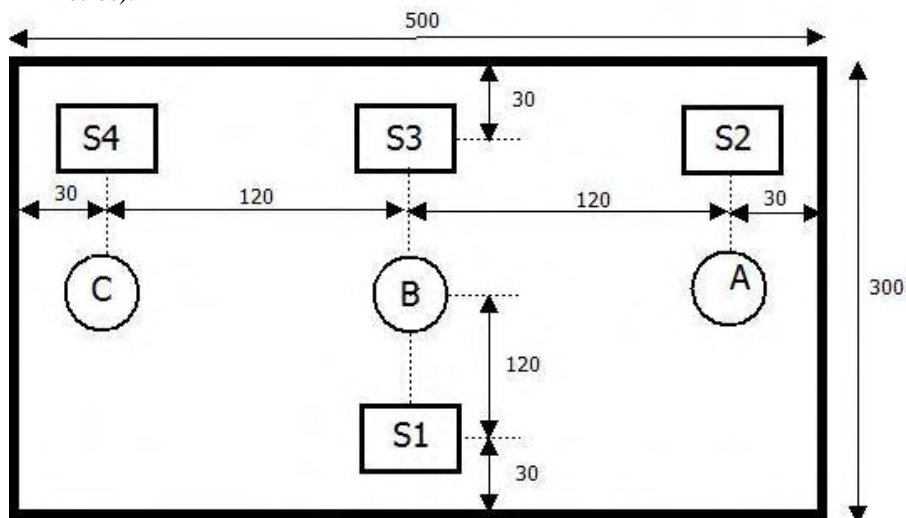


Fonte: Baptista e Vieira Filho (2010)

4.2 Descrição da estrutura teste

Os testes práticos foram realizados numa placa de alumínio com dimensões de 500 x 300 x 2 mm. Durante os testes, a viga permaneceu horizontalmente suspensa por dois elásticos, simulando uma condição de contorno livre-livre. Primeiramente, quatro transdutores PZT PSI-5H4E de 20 x 20 x 0,267 mm (chamados de S1, S2, S3 e S4) foram colados utilizando cola tipo Cianoacrilato na estrutura a ser monitorada. Três danos removíveis (A, B e C) foram simulados colando-se uma porca metálica (4 x 2 mm e cerca de 1 g) na estrutura a ser monitorada em diferentes pontos, como ilustrado na Figura 7. Posteriormente, cinco conjuntos de sinais foram adquiridos, para cada sensor, considerando a estrutura íntegra. Tais sinais foram armazenados e representam a estrutura sem dano, sendo conhecidos como *baseline* (BL). Outro conjunto de medidas, para cada sensor, foi adquirido após a adição de massa, em diferentes posições, a estrutura a ser monitorada (danos A, B e C). Finalmente, um novo conjunto de medidas, para cada sensor, foi adquirido na condição de estrutura recuperada (Íntegra - I). O sinal de resposta foi amostrado a uma taxa de 1,25 Msample/s para gerar 262.144 amostras. A resistência R_s adotada foi de 10k Ω .

Figura 7 – Placa com os transdutores PZT acoplados e a posição dos danos (medidas em milímetros).



Fonte: Elaboração do próprio autor.

4.3 Resultados baseados no modelo AR

O primeiro método baseia-se no uso dos coeficientes do modelo AR para detecção de danos estruturais. O procedimento baseado no modelo AR pode ser resumido no fluxograma apresentado na Figura 8.

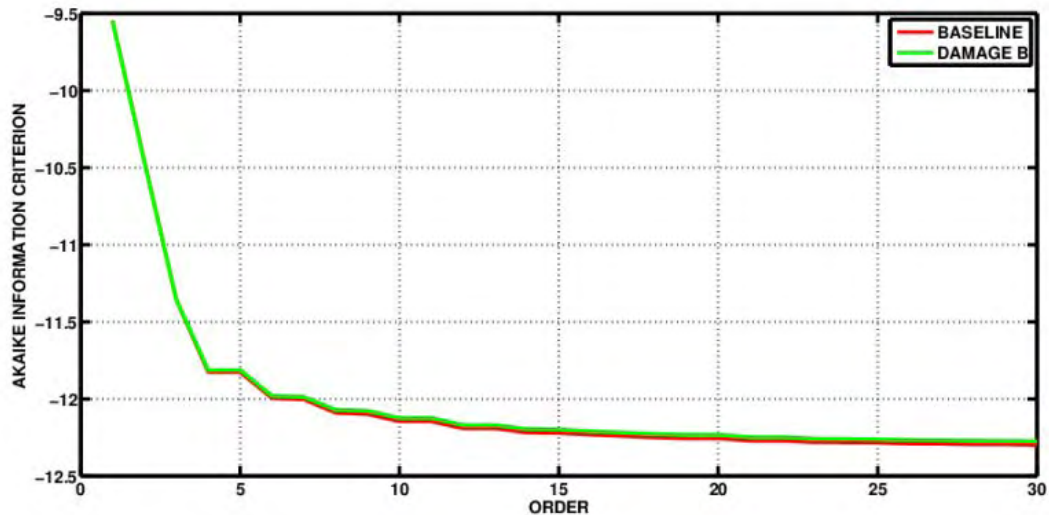
Figura 8 – Diagrama contendo o método baseado na análise de modelo AR.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Nesta proposta, cada transdutor opera ao mesmo tempo como sensor e atuador (Figura 1). Os sinais no domínio do tempo foram analisados através do software (Matlab®). A metodologia consiste em estimar os coeficientes do modelo AR de cada um dos sinais obtidos diretamente no domínio do tempo, conforme Equação (20). No entanto, antes de proceder ao cálculo dos modelos AR, faz-se necessário determinar a ordem do modelo que melhor representa o sinal original. Considerando o critério de informação de Akaike (Equação 25), todos os sinais foram considerados na verificação da ordem do modelo. O resultado desse teste é apresentado na Figura 9.

Figura 9 – Valor do AIC para várias ordens considerando todos os sensores.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

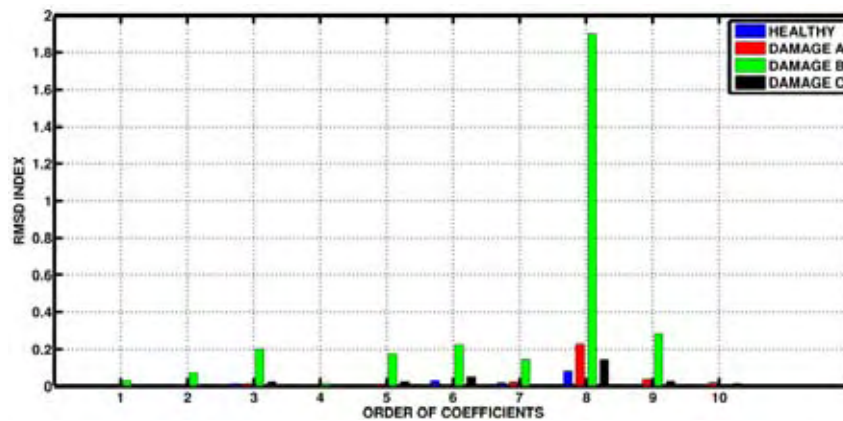
Nota-se na Figura 9 que o valor de $n=10$ para o modelo AR representa um valor próximo ao mínimo encontrado para todos os sensores, o que pode ser um indicativo de que ordens inferiores a 10 podem não representar o sistema dinâmico com fidelidade. Assim, considerando os modelos AR de ordem 10, os coeficientes foram estimados usando-se a Equação 20. Nas Equações (62) e (63) são apresentados os modelos AR para dois sinais obtidos para o sensor 1 (*baseline* e dano A). Esta escolha foi realizada arbitrariamente tendo em vista que os demais modelos são similares.

$$\Psi_b(D) = 1 - 3.295 D^{-1} + 4.458 D^{-2} - 2.474 D^{-3} - 0.8063 D^{-4} + 1.787 D^{-5} - 0.2143 D^{-6} - 1.12 D^{-7} + 0.8592 D^{-8} - 0.1435 D^{-9} - 0.05024 D^{-10} \quad (62)$$

$$\Psi_d(D) = 1 - 3.322 D^{-1} + 4.585 D^{-2} - 2.683 D^{-3} - 0.6981 D^{-4} + 1.881 D^{-5} - 0.3569 D^{-6} - 1.13 D^{-7} + 1.004 D^{-8} - 0.2621 D^{-9} - 0.01774 D^{-10} \quad (63)$$

Os termos $\Psi_b(D)$ e $\Psi_d(D)$ representam os modelos para a estrutura íntegra (*baseline*) e danificada, respectivamente. Aparentemente, as Equações (62) e (63) apresentam resultados muito próximos para as condições de *baseline* e estrutura danificada. As variações entre os coeficientes mostram-se pequenas, o que dificulta o diagnóstico da estrutura monitorada, mas pode-se observar que o oitavo coeficiente apresenta uma diferença mais significativa. Os índices RMSD foram computados a partir dos coeficientes do modelo AR como forma de facilitar a detecção de um eventual dano estrutural. Com base na Equação (3), o índice RMSD foi determinado para cada sensor utilizando para isso as diferenças entre os coeficientes dos modelos considerando os danos A, B e C e os respectivos modelos para o *baseline*. Os resultados para o sensor 1, considerando a estrutura íntegra e os danos A, B e C em função dos coeficientes do modelo AR, são apresentados na Figura 10.

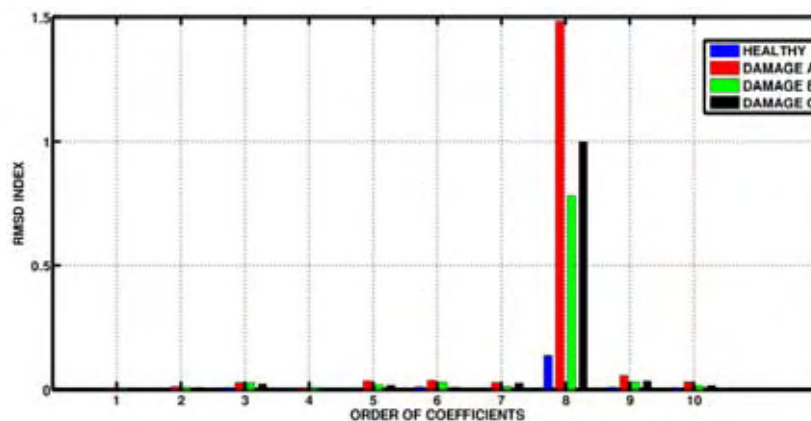
Figura 10 – Índices RMSD para o Sensor 1 em função da ordem do modelo AR.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os resultados para o Sensor 2 são mostrados na Figura 11.

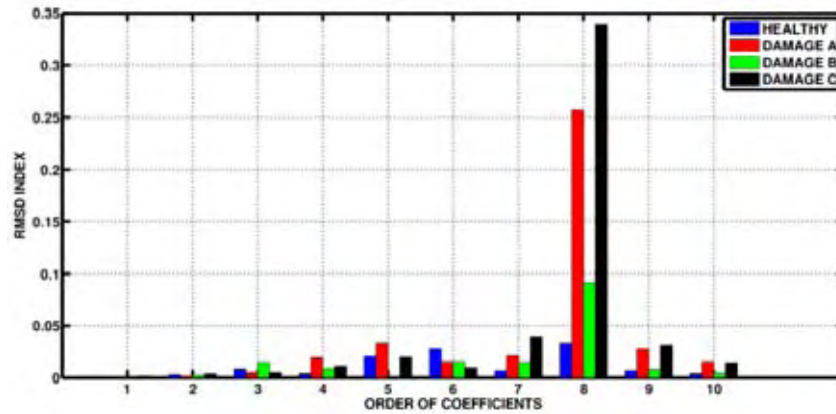
Figura 11 - Índices RMSD para o Sensor 2 em função da ordem do modelo AR.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Observa-se que o oitavo coeficiente apresenta uma sensibilidade mais significativa para o dano A. Os resultados para o Sensor 3 são apresentados na Figura 12.

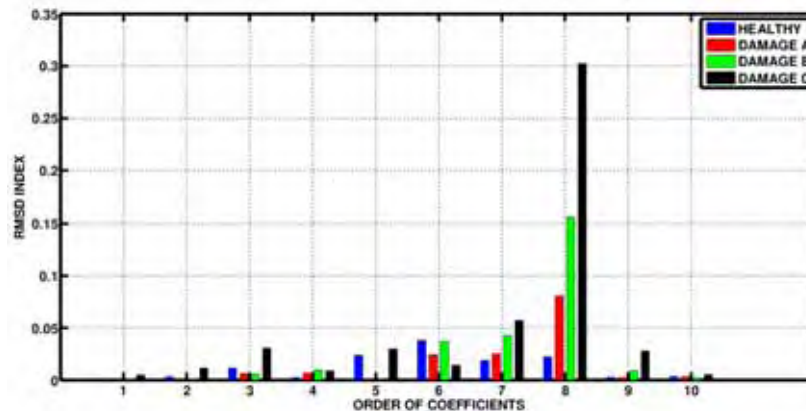
Figura 12 - Índices RMSD para o Sensor 3 em função da ordem do modelo AR.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Observa-se que o oitavo coeficiente foi mais sensível em relação aos danos A e C. Os resultados para o Sensor 4, considerando a estrutura íntegra e os danos A, B e C em função das ordens dos coeficientes do modelo AR, são apresentados na Figura 13.

Figura 13 - Índices RMSD para o Sensor 4 em função da ordem do modelo AR.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

O resultado para o dano C mostrou-se mais sensível. Os resultados apresentados em todas as Figuras mostram que o dano estrutural pode ser identificado, sobretudo para os coeficientes de ordem 8. Observando-se a localização dos danos, pode-se notar que os sensores S1, S2 e S4 apresentam o oitavo coeficiente com maior valor quando ocorrem os danos A, B e C, respectivamente. Isso indica uma localização razoável do dano. Porém, essa coerência não é garantida com o sensor S3, que apresentou o oitavo coeficiente com valores

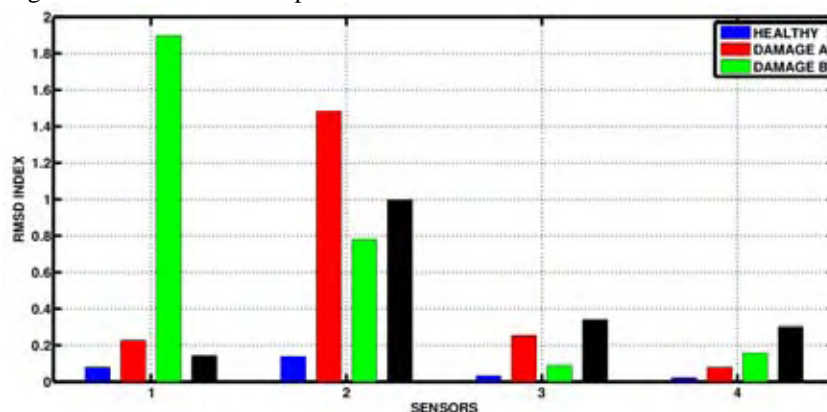
maiores para os danos A e C, enquanto que o esperado seria para o dano B. Estudos mais detalhados podem ser realizados para melhor avaliar tal desempenho.

4.3.1 Comparativo entre EMI e AR

A fim de comparar o método baseado no princípio da EMI com o método proposto, a FRF foi computada com base no sistema e nas informações apresentados em Baptista e Vieira (2010). A faixa de frequência escolhida para a comparação foi de 30 a 40 kHz, que é a faixa de melhor resposta para o método EMI na estrutura analisada. Além disso, foi utilizada a parte real da impedância eletromecânica, pois apresenta melhores resultados para o índice RMSD.

Considerando que o melhor desempenho com o modelo AR é encontrado no oitavo coeficiente, apenas os valores obtidos com esses coeficientes foram usados na comparação. Assim, na Figura 14 são apresentados os resultados para o 8º coeficiente obtidos com os Sensores 1, 2, 3 e 4, com a estrutura íntegra e danificada (danos A, B e C).

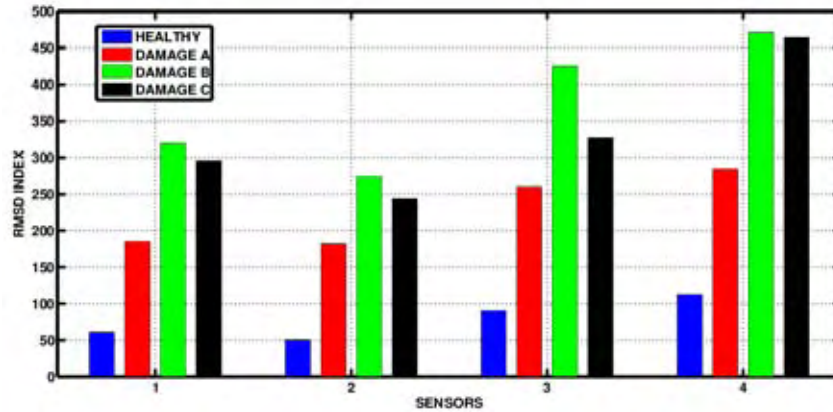
Figura 14– Índices RMSD para os 8º coeficientes do modelo AR.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na Figura 15 são apresentados os valores para os índices RMSD para a técnica EMI para os sensores 1, 2, 3 e 4, com a estrutura íntegra e danificada (danos A, B e C) na faixa de frequência de 30 a 40 kHz. Os valores RMSD apresentados nas Figuras 14 e 15 são absolutos e dificultam uma comparação direta entre os métodos. Porém, esses valores podem ser utilizados para identificação e, nos dois casos, verifica-se que o dano pode ser detectado. Porém, para uma melhor comparação, nas Figuras 16 e 17 são apresentados os mesmos resultados das Figuras 14 e 15, porém normalizados.

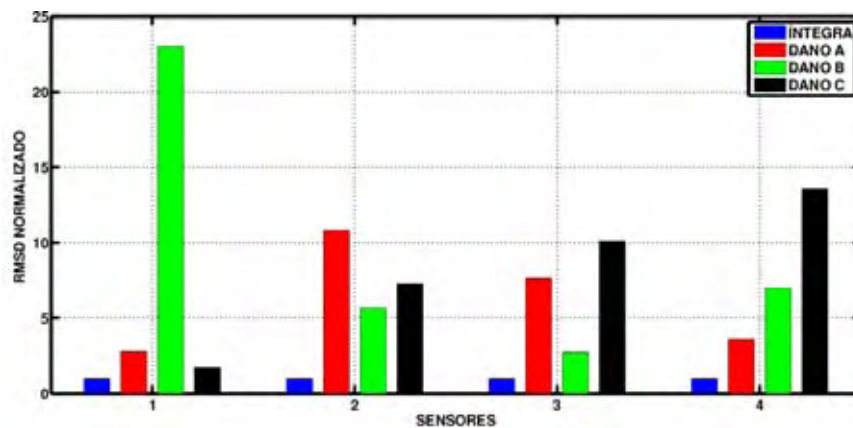
Figura 15 – Índices RMSD para o método da EMI.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

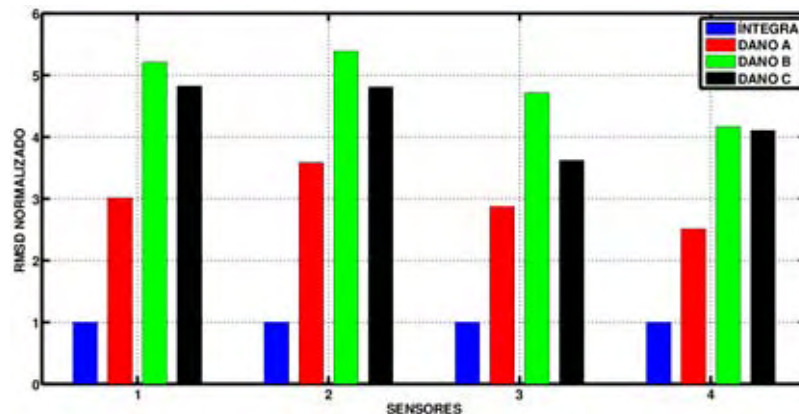
Todos os procedimentos relativos a normalização referidos neste trabalho é realizado dividindo-se os índices RMSD e/ou CCDM pelo valor dos índices obtidos com a estrutura na condição íntegra.

Figura 16 – Índices RMSD normalizados para os 8º coeficientes do modelo AR.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

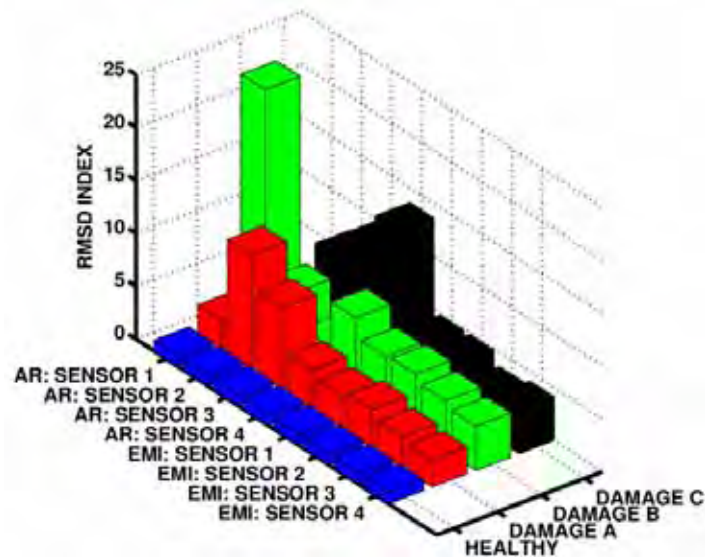
Figura 17 – Índices RMSD normalizados para todos os sensores para a EMI.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Analisando as Figuras 16 e 17 pode-se notar que a sensibilidade para o método no domínio do tempo baseado no modelo AR é maior quando comparada com o baseado no princípio da EMI. Finalmente, os resultados para ambas as metodologias são apresentados em um mesmo gráfico, na Figura 18, considerando os índices RMSD normalizados.

Figura 18 – Comparativo dos índices RMSD normalizados considerando o modelo AR e o princípio da EMI.

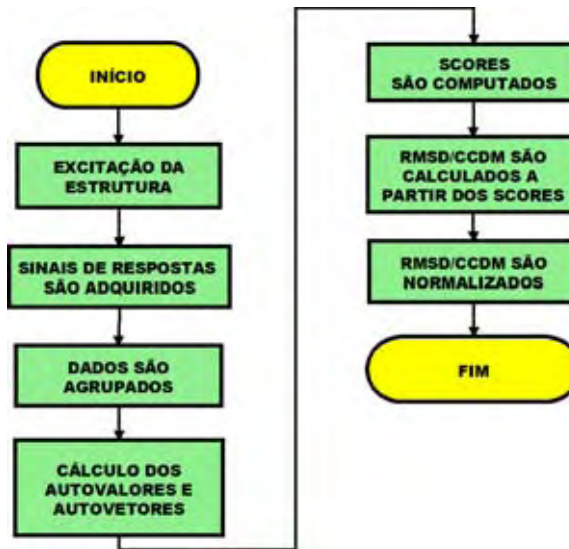


Fonte: Elaboração do próprio autor.

Nota-se na Figura 18 que as duas metodologias apresentam resultados semelhantes, sendo que a sensibilidade para o método proposto é um pouco mais significativa em relação ao baseado na EMI, quando se trata da detecção de falhas estruturais. Por outro lado, devem-se realizar mais estudos a cerca da localização de danos para o método aqui estudado devido algumas discrepâncias em relação à metodologia baseada na EMI.

4.4 Análise através de componentes principais

Nesta seção serão apresentados os resultados considerando a análise dos *scores* ou componentes principais (PC). Na Figura 19 é mostrado, de forma resumida, o procedimento utilizado nesse trabalho para o método baseado nos *scores*.

Figura 19 – Diagrama contendo o procedimento baseado nos *scores*.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os sinais aqui analisados foram adquiridos através dos circuitos/sistema descritos nas Figuras 2, 6 e 7. Para obtenção das componentes principais, os sinais de resposta da estrutura (domínio do tempo) para cada um dos sensores (S1, S2, S3 e S4) considerando o *baseline*, danos (A, B e C) e íntegra, foram agrupados em cinco matrizes de dados distintos conforme Equações (64-68).

$$\mathbf{BL} = \begin{bmatrix} x_{BLi,S1} & x_{BLi,S2} & x_{BLi,S3} & x_{BLi,S4} \end{bmatrix} \quad (64)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} x_{Ai,S1} & x_{Ai,S2} & x_{Ai,S3} & x_{Ai,S4} \end{bmatrix} \quad (65)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} x_{Bi,S1} & x_{Bi,S2} & x_{Bi,S3} & x_{Bi,S4} \end{bmatrix} \quad (66)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} x_{Ci,S1} & x_{Ci,S2} & x_{Ci,S3} & x_{Ci,S4} \end{bmatrix} \quad (67)$$

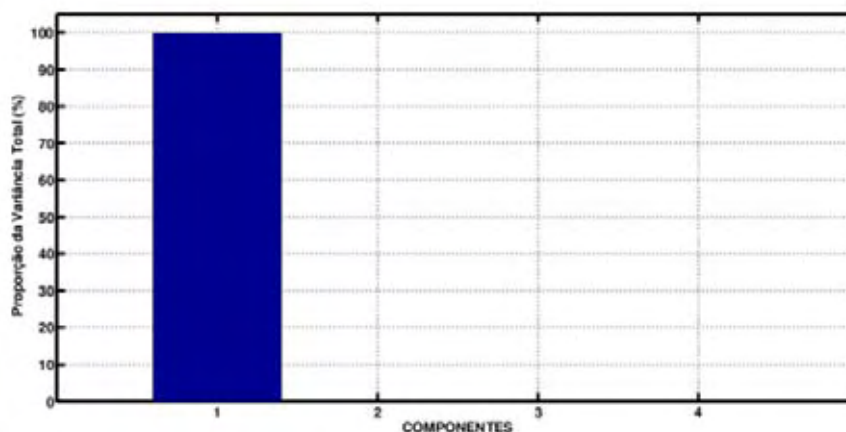
$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} x_{Hi,S1} & x_{Hi,S2} & x_{Hi,S3} & x_{Hi,S4} \end{bmatrix} \quad (68)$$

Nas equações anteriores, as matrizes \mathbf{BL} , \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} e \mathbf{I} representam *baseline*, dano A, dano B, dano C e estrutura íntegra respectivamente. O vetor $x_{BLi,S1}$ representa o sinal do sensor 1 (S1) para o *baseline*, $x_{Ai,S3}$ representa o sinal do sensor 3 (S3) considerando o dano A; e assim segue para os demais casos. A dimensão de $x_{BLi,S1}$ (e demais vetores) é um vetor coluna com

262.144 linhas. Em resumo, todos os *baselines* (sensores 1, 2, 3 e 4) foram utilizados simultâneos para a determinação da matriz de covariância do *baseline* (Equação (26)). Quatro outras matrizes de covariâncias foram determinadas considerando os sinais relativos aos danos A, B, C e estrutura íntegra. A partir do cálculo das matrizes de covariâncias para cada condição, foram calculadas as componentes principais utilizando as Equações (27), (28) e (29). Assim, deve-se deixar claro que esta metodologia explora todos os sensores ao mesmo tempo e não tem qualquer objetivo em localizar o dano, mas apenas detectá-lo com precisão.

A partir das componentes principais, foram determinados os índices RMSD e CCDM, tendo sempre como referência o sinal *baseline*. No entanto, primeiramente foi analisada a contribuição que cada uma das componentes teria na representação dos sinais no domínio do tempo. Para isso, foi utilizada a Equação (30) para determinar a variância acumulada em função das componentes principais. O resultado para a condição na qual a estrutura apresenta um dano (dano B) é mostrado na Figura 20.

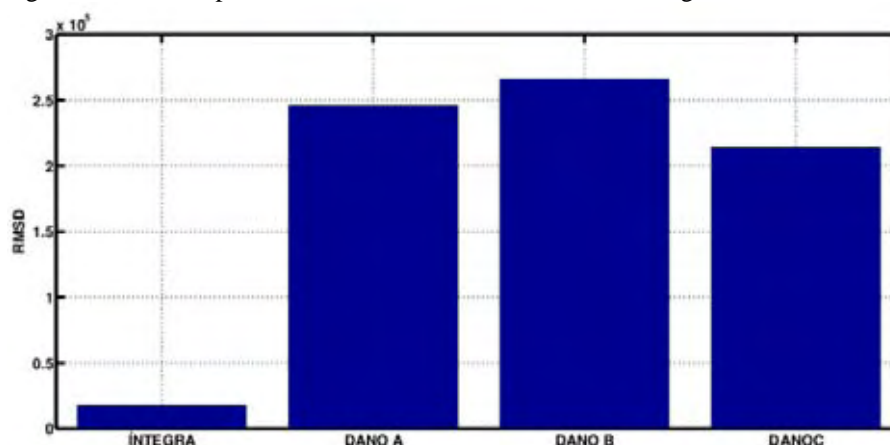
Figura 20 – Variância acumulada em função das componentes principais.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Para as demais condições, o comportamento da variância acumulada é similar ao apresentado na Figura 20. Analisando a Figura 20, nota-se que a primeira componente representa praticamente 100% da variância acumulada. Portanto, as três outras componentes podem ser desprezadas sem que ocorra nenhum prejuízo com relação à fidelidade dos dados. Conseqüentemente, a quantidade de dados a serem analisados será reduzida drasticamente, proporcionando uma menor taxa de processamento computacional. Logo, os resultados serão analisados considerando apenas os índices RMSD obtidos a partir dos *scores* da primeira componente, tanto para a estrutura íntegra quanto para a danificada (danos A, B e C). Esses resultados são mostrados na Figura 21.

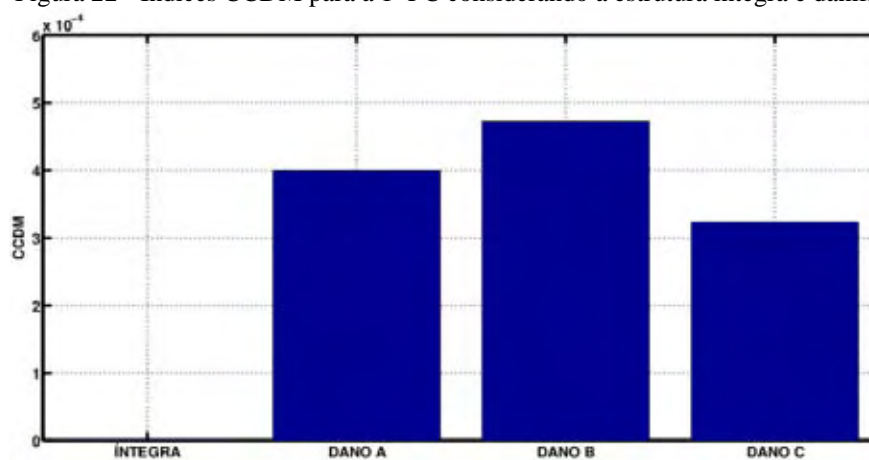
Figura 21 – RMSD para a 1ª PC considerando as estruturas íntegra e danificada.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Também foram computados os índices CCDM considerando somente a primeira componente, com a estrutura íntegra e danificada (danos A, B e C). Os resultados são mostrados na Figura 22.

Figura 22 - Índices CCDM para a 1ª PC considerando a estrutura íntegra e danificada.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

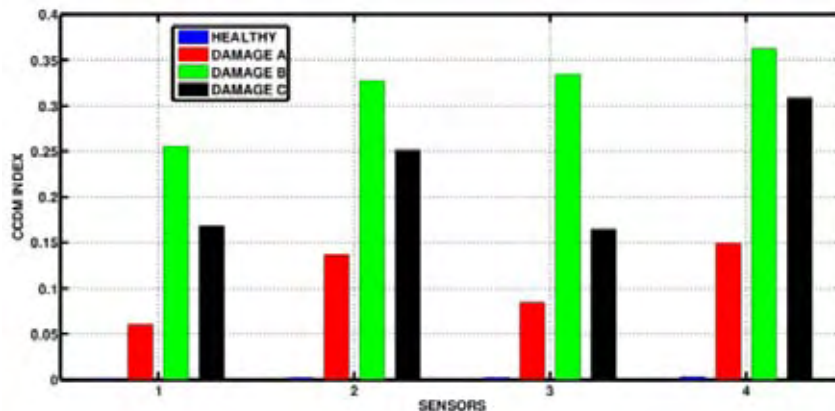
Analisando as Figuras 21 e 22, pode-se notar que as diferenças para os dois índices, com a estrutura íntegra e danificada, são significativas. Considerando apenas os valores absolutos, observa-se também que os índices RMSD, aparentemente, possuem uma melhor sensibilidade quando comparado aos índices CCDM para a metodologia proposta. Contudo, os dois índices podem ser utilizados como ferramentas para identificação de possíveis danos estruturais.

4.4.1 Comparativo entre EMI e PCA

Para comparar o método EMI com o método proposto, a FRF foi computada com base no sistema desenvolvido por Baptista e Vieira Filho (2010). Todos os dados referentes ao método EMI são os mesmos usados nos testes comparativos com o modelo AR. Deve-se lembrar de que o método baseado nas PC usa os sinais de todos os sensores e apresenta um resultado único global, independentes dos sensores. Já no caso da EMI, são apresentados os resultados para cada sensor isolado.

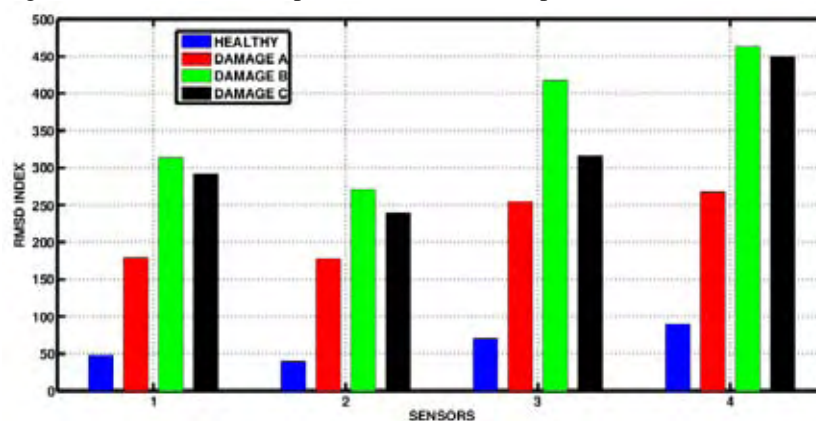
Os resultados para os índices RMSD e CCDM são apresentados nas Figuras 23 e 24. Em termos de valores absolutos, os índices CCDM são bem menores do que os índices RMSD. Porém, considerando os valores relativos aos valores com a estrutura íntegra, os resultados dos índices CCDM são bem melhores dos que os apresentados pelos índices RMSD, como será visto posteriormente.

Figura 23 - Índices CCDM para o método da EMI para todos os sensores.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

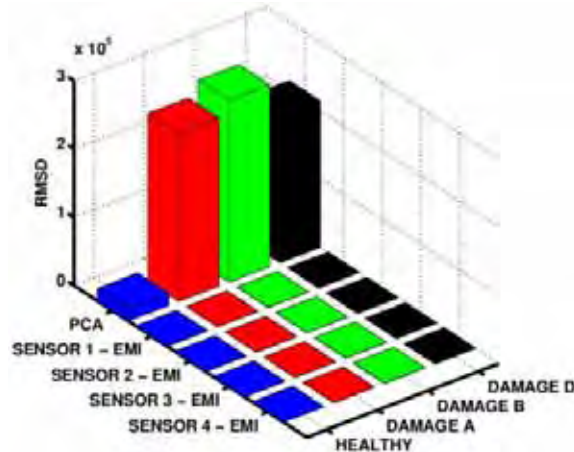
Figura 24 - Índices RMSD para o método da EMI para todos os sensores.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

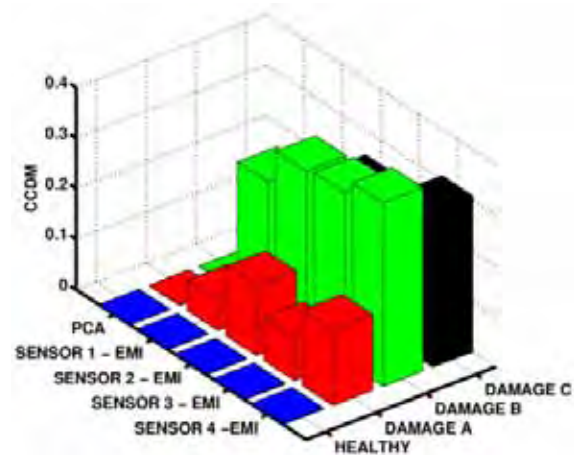
Para uma melhor visualização dos resultados em conjunto para os dois métodos, nas Figuras 25 e 26 são apresentados os resultados para os índices RMSD e CCDM, respectivamente.

Figura 25 - Índices RMSD: comparativo entre EMI e a metodologia proposta baseada nas PC



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 26 - Índices CCDM: comparativo entre EMI e a metodologia baseada na PCA.

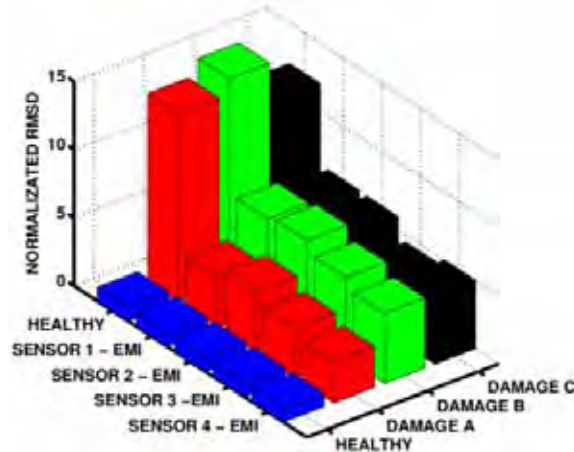


Fonte: Elaboração do próprio autor.

Nota-se, através da análise da Figura 25, que o método proposto, baseado na análise de componentes principais e utilizando o índice RMSD é significativamente mais sensível quando comparado com o método baseado no princípio da EMI. Por outro lado, o método baseado na FRF, aparentemente, é mais sensível quando comparado com método baseado em PCA para o índice CCDM, conforme ilustrado na Figura 26. Contudo, a análise mais minuciosa a respeito do comparativo da sensibilidade entre ambos os métodos é dificultada devido às diferenças de

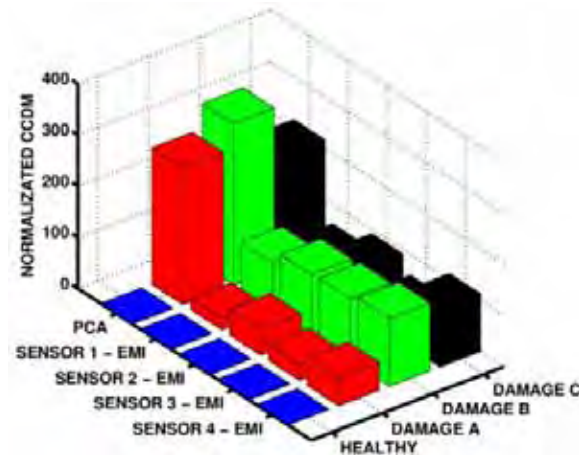
escalas apresentadas nas Figuras anteriores. A fim de se comparar a sensibilidade das duas metodologias, os índices foram normalizados em torno do menor valor, tanto para a análise com PC quanto para EMI. Nas Figura 27 e 28 são apresentados os resultados dos índices RMSD e CCDM, respectivamente, normalizados para ambas as metodologias.

Figura 27 - Índices RMSD normalizados: comparativo entre EMI e a metodologia baseada nas PC.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 28 - Índices CCDM normalizados: comparativo entre EMI e a metodologia baseada nas PC.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Analisando as Figuras 27 e 28 nota-se que o método baseado na análise das PC, tanto para os índices RMSD quanto para os CCDM, possuem sensibilidade extremamente mais significativa quando comparado com a EMI. Essa sensibilidade poderia ser utilizada para detecção de danos estruturais onde o método baseado no princípio da EMI possui

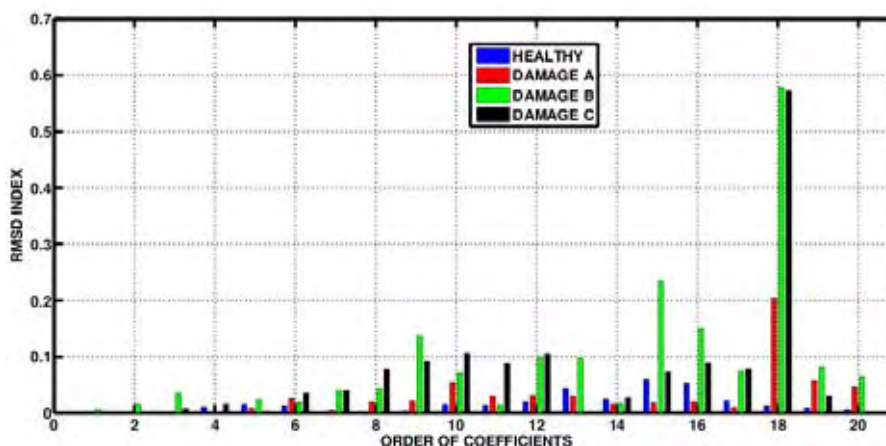
limitação de sensibilidade. Portanto, os índices CCDM e RMSD aliados à PCA no domínio do tempo podem ser utilizados com sucesso para detecção de falha estrutural.

4.5 Análise através do modelo AR a partir das Componentes Principais

Os resultados apresentados na Figura 20 mostraram que somente a primeira componente principal explica praticamente 100 % da variância acumulada para a metodologia em estudo. Logo, é possível uma redução significativa nas dimensões dos dados a serem trabalhados na identificação de possíveis danos estruturais. Também, ao se analisar os resultados mostrados na Figura 18 nota-se que o modelo AR apresenta excelentes resultados quando comparados à tradicional metodologia baseada no princípio da EMI.

As conclusões anteriores indicam que, possivelmente, uma combinação do modelo AR com PCA pode gerar uma metodologia interessante para identificação de danos estruturais. Assim, calculando-se as PC para os sinais de resposta da estrutura no domínio do tempo (procedimento mostrado na seção 3.3), tanto com falha quanto os considerados íntegros, pode-se obter os modelos AR a partir das PC. Com essa configuração, os índices RMSD foram determinados a partir dos coeficientes dos modelos AR. O número de coeficientes utilizados nesse trabalho é 20 e foi determinado através do critério de informações de Akaike (Equação 25). Posteriormente, foram determinados os modelos AR com 20 coeficientes a partir das PC e a partir destes os índices RMSD para cada coeficiente. Esses resultados são apresentados na Figura 29.

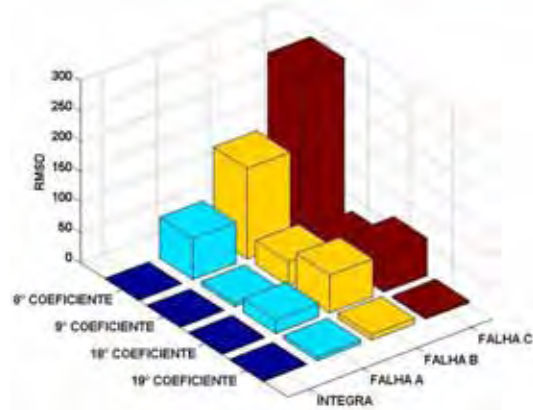
Figura 29 - Índices RMSD para os coeficientes AR calculados a partir das PC.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Nota-se na Figura 29 que alguns coeficientes são mais propícios à identificação de danos estruturais como, por exemplo, os 8º, 9º, 18º e 19º. Na Figura 30 são mostrados esses principais índices já normalizados.

Figura 30 – Comparativo entre os vários índices RMSD normalizados.



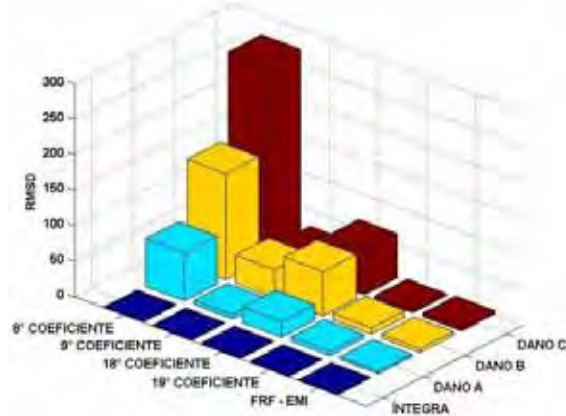
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Analisando a Figura 30, nota-se uma vez mais que o 8º coeficiente possui maior sensibilidade para detecção de danos estruturais que os demais coeficientes do modelo AR.

4.5.1 Comparativo entre modelo AR calculado a partir das PC com a EMI

A Figura 31 mostra um comparativo entre os principais índices RMSD, determinados a partir dos coeficientes do modelo AR, e os obtidos com o método baseado no princípio da EMI.

Figura 31 – Comparativo dos índices RMSD.



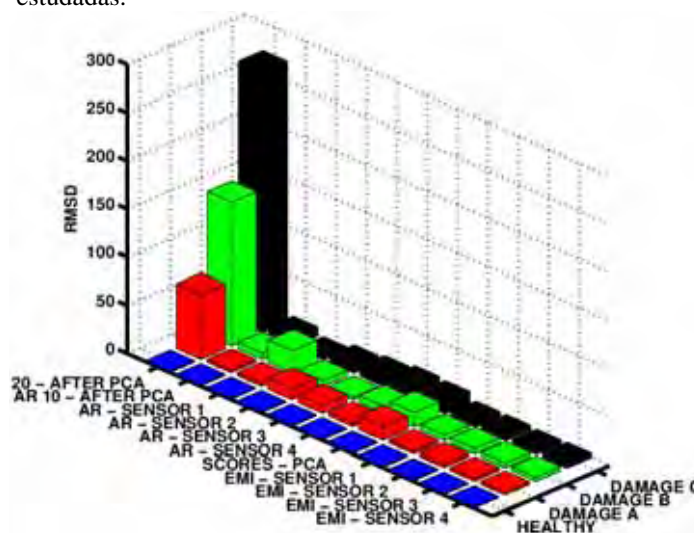
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Observa-se na Figura 31 que todos os coeficientes (8° , 9° , 18° e 19°) possuem sensibilidade extremamente superior quando comparada com o método baseado no princípio da EMI, sendo que todos os índices RMSD para o modelo AR podem ser utilizados para detecção de danos estruturais.

4.6 Comparativo final entre os diversos métodos estudados

A Figura 32 mostra em um mesmo gráfico um comparativo geral da sensibilidade entre os diversos métodos apresentados anteriormente, utilizando para isso os índices RMSD normalizados. Para os resultados referentes ao modelo AR foram utilizados somente o 8° coeficiente, já que o mesmo mostrou-se mais sensível para todos os resultados ao longo deste trabalho. O resultado chamado de “AR 20 APÓS PCA” considera o modelo AR de vigésima ordem enquanto que o “AR 10 APÓS PCA” considera o modelo AR de décima ordem, todos determinados a partir das PC. No resultado intitulado “PCA”, as PC foram determinadas a partir dos sinais no tempo.

Figura 32 – Índices RMSD normalizados considerando as diversas metodologias estudadas.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Analisando-se a Figura 32, nota-se que a metodologia que emprega o modelo AR a partir das PC possui uma excelente sensibilidade quando comparada com as demais metodologias. Como era de se esperar, os resultados obtidos com os modelos de vigésima ordem são mais sensíveis à detecção de danos estruturais quando comparados aos de décima ordem. Isso já era

esperado, pois quanto maior a ordem do modelo mais precisa é a sua representação do sistema dinâmico real.

4.7 Conclusões

Em geral, os resultados considerando o modelo AR determinados diretamente a partir dos sinais no tempo apresentaram resultados expressivos quando comparados com o método baseado no princípio da EMI. Além disso, a metodologia utilizando PCA também possui resultados bastante convincentes quando usada com os índices RMSD. Contudo, os resultados utilizando PCA juntamente com uso do índice CCDM mostraram-se mais sensíveis conforme mostrado anteriormente na Figura 28. Os melhores resultados em termos de sensibilidade foram alcançados aliando-se as duas metodologias PCA e coeficientes do modelo AR, considerando-se somente a primeira PC e modelos AR de vigésima ordem. Para os resultados envolvendo as PC, deve-se deixar claro que esta metodologia explora todos os sensores e não tem qualquer objetivo em localizar o dano, mas apenas detectá-lo com precisão. Logo, todos os resultados apresentados no presente capítulo comprovam que as metodologias abordadas no escopo desse trabalho podem ser utilizadas em SHM para detecção de danos estruturais, pois apresentam resultados compatíveis e geralmente mais sensíveis, quando comparadas com o já consolidado método baseado no princípio da EMI.

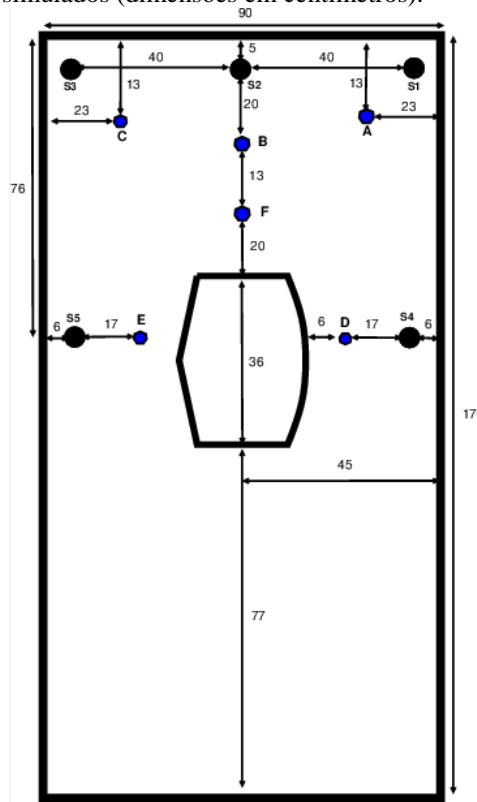
5 RESULTADOS BASEADOS NA EMI PARA PAINEL AERONÁUTICO

Neste capítulo serão apresentadas duas novas técnicas para identificação de danos estruturais, desenvolvidas a partir dos sinais de resposta da estrutura no domínio do tempo baseadas no método da impedância eletromecânica (EMI). Ambas exploram os pesos (*loadings*) calculados para as PC. A primeira análise utiliza somente os pesos como variável de entrada para cálculo das métricas RMSD enquanto a segunda faz uso de Análise Fatorial (rotação de pesos) para a detecção de danos estruturais. A rotação dos pesos é realizada como forma de incrementar a sensibilidade dos índices RMSD na detecção de danos estruturais. Diferentemente do método apresentado no Capítulo 4, onde todos os sinais dos sensores são explorados conjuntamente via PCA, nos métodos apresentados neste capítulo é possível fazer a diferenciação de cada um dos sensores separadamente tornando os resultados mais propícios à localização de danos estruturais. Finalmente, a fim de testar os métodos propostos neste capítulo, testes práticos foram realizados em um painel aeronáutico de alumínio e os resultados são comparados com a consagrada técnica da EMI baseada na FRF.

5.1 Descrição da estrutura de teste

A estrutura de teste utilizada para detecção de danos estruturais, com base na análise dos pesos e pesos rotacionados, consiste de um painel de alumínio aeronáutico cujas dimensões são de aproximadamente 1700 x 900 x 2 mm, conforme ilustrado na Figura 33. Durante os testes experimentais, primeiramente, cinco transdutores piezelétricos (S1, S2, S3, S4 e S5) foram colados ao painel, utilizando cola do tipo Cianoacrilato em diferentes posições conforme ilustrado na Figura 33. Posteriormente, cada PZT foi excitado por um sinal *chirp* DC de 0 a 125 kHz. Em seguida, seis danos removíveis (A, B, C, D, E e F) foram simulados colocando-se um ímã com diâmetro de 20 mm e 31 g de massa na estrutura a ser , em diferentes posições em relação aos sensores/atuadores. Os sinais de resposta do conjunto PZT/estrutura foram adquiridos considerando uma taxa de amostragem de 1,25 Msample/s e um resistor limitador de corrente de 1k Ω . O sistema de aquisição de dados e o circuito de excitação do conjunto PZT/estrutura são os mesmos utilizados e apresentados no Capítulo 4.

Figura 33 – Placa de alumínio contendo os transdutores PZT e os danos simulados (dimensões em centímetros).



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Adicionalmente, a Figura 34 apresenta a fotografia real da estrutura com os transdutores PZT acoplados.

Figura 34 – Fotos do painel aeronáutico contendo os transdutores PZT e o ímã.



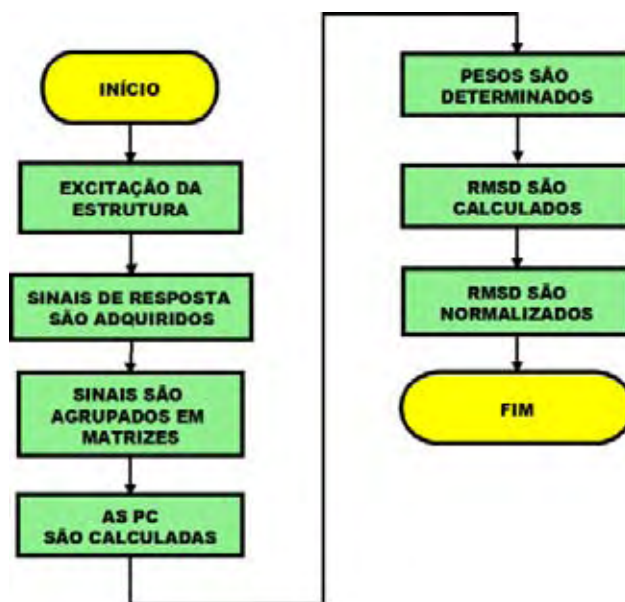
Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 34 mostra ainda uma ampliação do imã utilizado para simulação dos danos estruturais além o detalhe dos PZT's. Nota-se também que a estrutura encontra-se totalmente presa, através de vigas de metal, ao piso e à parede.

5.2 Análise com coeficientes das componentes principais (pesos)

Nessa seção, o método proposto explora os coeficientes das componentes principais (PCC), também conhecido como *loadings* ou pesos. Considerando a descrição anterior para o sistema de teste (Figura 33), o método proposto pode ser explicado, resumidamente, considerando-se o diagrama mostrado na Figura 35.

Figura 35 – Procedimento para o método baseado na análise de pesos das PC.

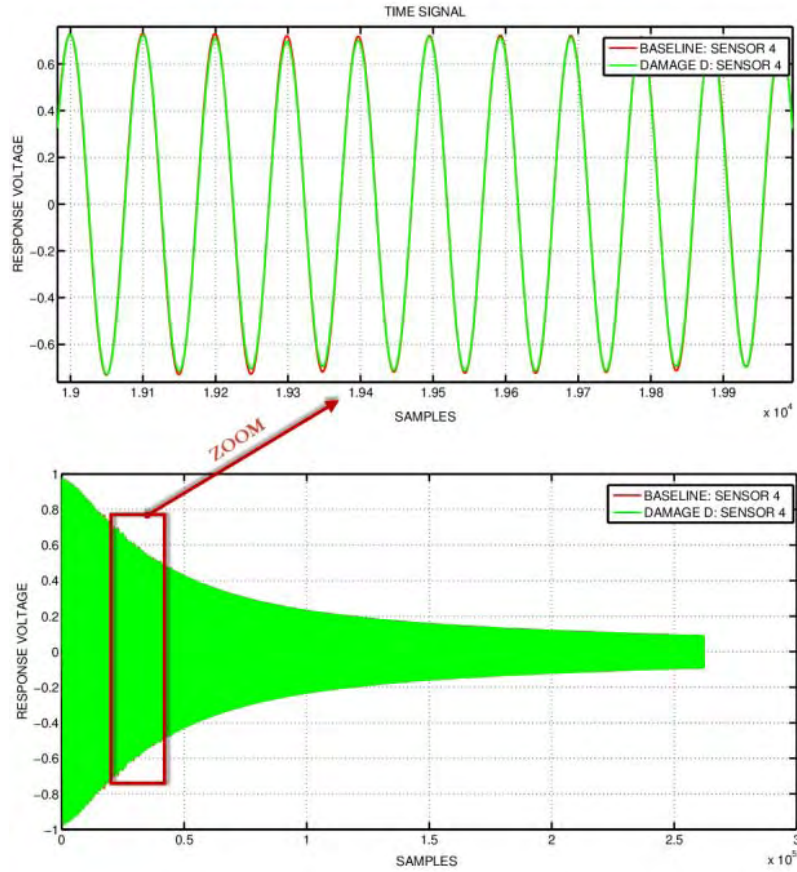


Fonte: Elaboração do próprio autor.

Neste método, é analisada a contribuição que cada variável (x_i) tem sobre cada componente principal (Z_i) através da determinação dos pesos (*loadings*). Para cada PZT, um conjunto de cinco medidas em instantes diferentes foi adquirido para cada sensor mantendo-se a estrutura íntegra. Esses sinais foram utilizados para calcular a média aritmética e esta foi armazenada como *baseline* (BL). Posteriormente, os danos (A, B, C, D, E e F) foram simulados separadamente e as respostas individuais de cada PZT (S1, S2, S3, S4 e S5) foram adquiridas. Na Figura 36 são apresentadas as respostas da estrutura no domínio do tempo para

o sensor S4, em duas condições: íntegra e com dano (dano D). Nota-se que as diferenças entre os dois sinais, nas condições saudável e danificada, são quase imperceptíveis.

Figura 36 – Resposta temporal para o sensor 4 considerando a estrutura em duas condições: íntegra e dano D.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Por último, mais um conjunto de dados foi adquirido para cada sensor considerando a estrutura reparada (íntegra- I). Todos os sinais de resposta foram amostrados a uma taxa de 1,25 Msample/s. Os sinais de resposta para cada um dos sensores (S1, S2, S3, S4 e S5) foram agrupados em oito matrizes, considerando *baseline* (**BL**), todos os danos (**A**, **B**, **C**, **D**, **E** e **F**) e estrutura saudável (**H**) de acordo com as seguintes Equações:

$$\mathbf{BL} = [x_{BLi,S1} \ x_{BLi,S2} \ x_{BLi,S3} \ x_{BLi,S4} \ x_{BLi,S5}] \quad (69)$$

$$\mathbf{A} = [x_{Ai,S1} \ x_{Ai,S2} \ x_{Ai,S3} \ x_{Ai,S4} \ x_{Ai,S5}] \quad (70)$$

$$\mathbf{B} = [x_{Bi,S1} \ x_{Bi,S2} \ x_{Bi,S3} \ x_{Bi,S4} \ x_{Bi,S5}] \quad (71)$$

$$\mathbf{C} = [x_{Ci,S1} \ x_{Ci,S2} \ x_{Ci,S3} \ x_{Ci,S4} \ x_{Ci,S5}] \quad (72)$$

$$\mathbf{D} = [x_{Di,S1} \ x_{Di,S2} \ x_{Di,S3} \ x_{Di,S4} \ x_{Di,S5}] \quad (73)$$

$$\mathbf{E} = [x_{Di,S1} \ x_{Di,S2} \ x_{Di,S3} \ x_{Di,S4} \ x_{Di,S5}] \quad (74)$$

$$\mathbf{F} = [x_{Fi,S1} \ x_{Fi,S2} \ x_{Fi,S3} \ x_{Fi,S4} \ x_{Fi,S5}] \quad (75)$$

$$\mathbf{H} = [x_{Hi,S1} \ x_{Hi,S2} \ x_{Hi,S3} \ x_{Hi,S4} \ x_{Hi,S5}] \quad (76)$$

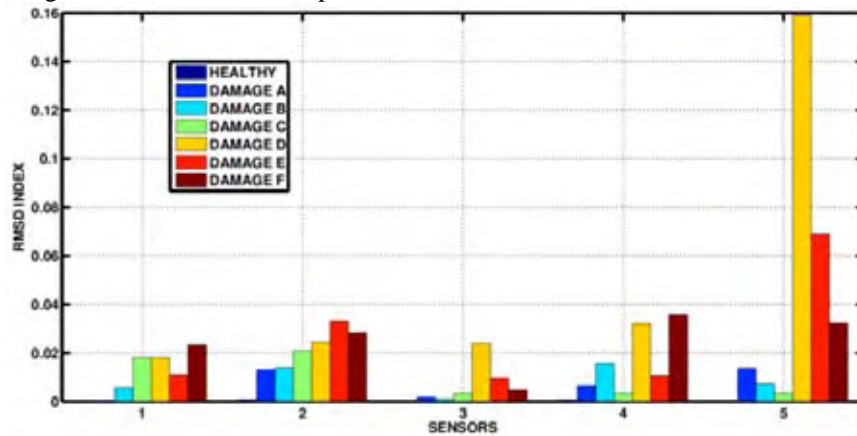
nas Equações (69-76), $i = 1, 2, 3, \dots, 262144$ e o $x_{BLi,S1}$ representa o sinal do sensor 1 (S1) para o *baseline*, $x_{Ai,S3}$ representam o sinal do sensor 3 (S3), considerando o dano A e, assim, para os demais índices. Resumindo, todos os *baselines* (para todos os sensores) foram agrupados para formar a matriz **BL** (Equação (69)). Da mesma forma, seis outras matrizes foram formadas considerando os respectivos sinais por todos os danos, (**A**, **B**, **C**, **D**, **E** e **F**) e outra para a estrutura saudável (**H**). As dimensões de cada matriz são cinco colunas por 262.144 linhas. Resumindo, formaram-se oito matrizes que são usadas como variáveis de entrada no cálculo das componentes principais (PC).

A partir das matrizes de dados apresentadas nas Equações (69-76) os PCC foram calculados (Equação (32)) considerando todas as condições estruturais (saudável e danos A, B, C, D, E e F) e para todos os sensores. Em seguida, os PCC para as três primeiras componentes principais foram somados, com intuito de aumentar a sensibilidade, antes de proceder ao cálculo dos índices RMSD. Para o método proposto o cálculo do RMSD é dado pela Equação (77).

$$\text{RMSD} = \sqrt{\frac{(P_a - P_b)^2}{(P_b)^2}} \quad (77)$$

Na Equação (77), P_a e P_b representam a soma dos três primeiros PCC para a estrutura analisada e *baseline*, respectivamente. A Equação (77) não apresenta o sinal do somatório, pois os índices RMSD são calculados somente entre dois valores de pesos, um referente ao *baseline* e outro referente à estrutura analisada. A Figura 37 mostra os resultados das métricas RMSD para o conjunto de sensores em todas as condições estruturais.

Figura 37 – Índices RMSD para PCC.



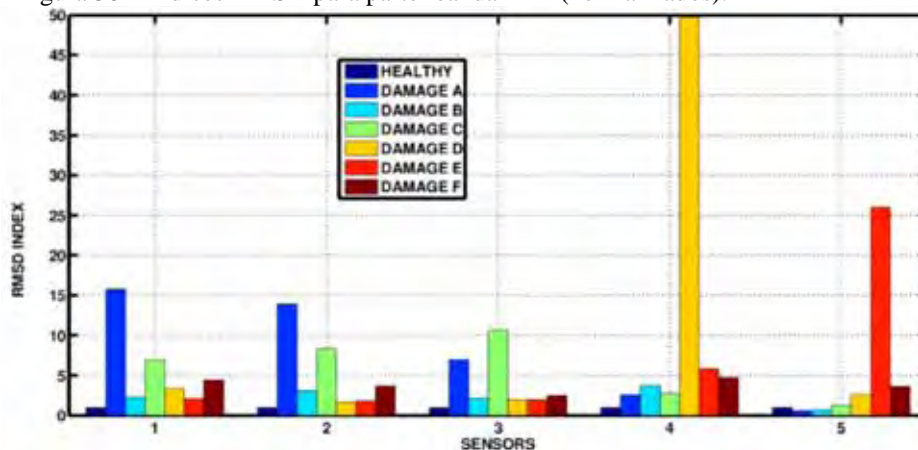
Fonte: Elaboração do próprio autor.

A comparação dos resultados entre sensores apresentados na Figura 37 não é simples, pois os índices RMSD apresentam grandes variações. Porém, o mais importante é verificar que todos respondem adequadamente às falhas.

5.2.1 Comparativo entre PCC e EMI

A fim de comparar o método proposto (domínio do tempo) com a tradicional técnica baseada na FRF, a impedância eletromecânica foi calculada utilizando o sistema proposto por (BAPTISTA; VIEIRA FILHO, 2010). Considerando a parte real da EMI, os índices RMSD foram calculados através da Equação (3). Para facilitar a análise dos resultados, os índices RMSD para as técnicas EMI e PCC foram normalizados, considerando a condição saudável como referência, em todas as condições estruturais e para todos os sensores (S1, S2, S3, S4 e S5). O resultado completo é apresentado na Figura 38.

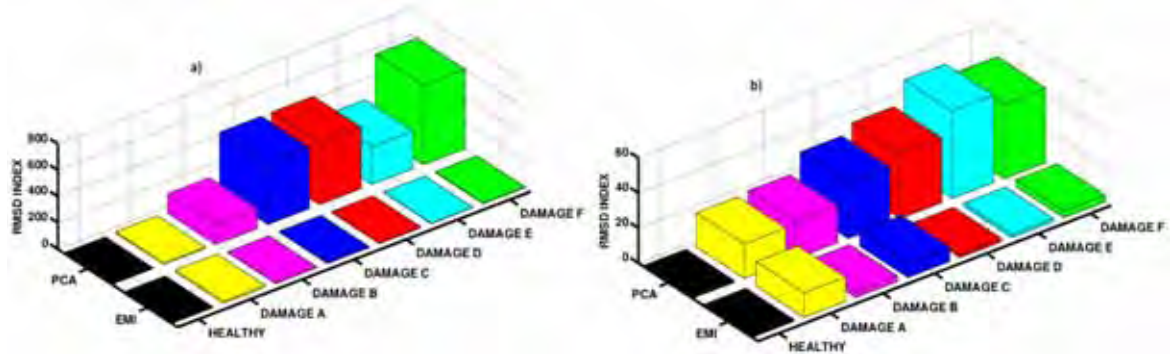
Figura 38 – Índices RMSD para parte real da EMI (normalizados).



Fonte: Elaboração do próprio autor.

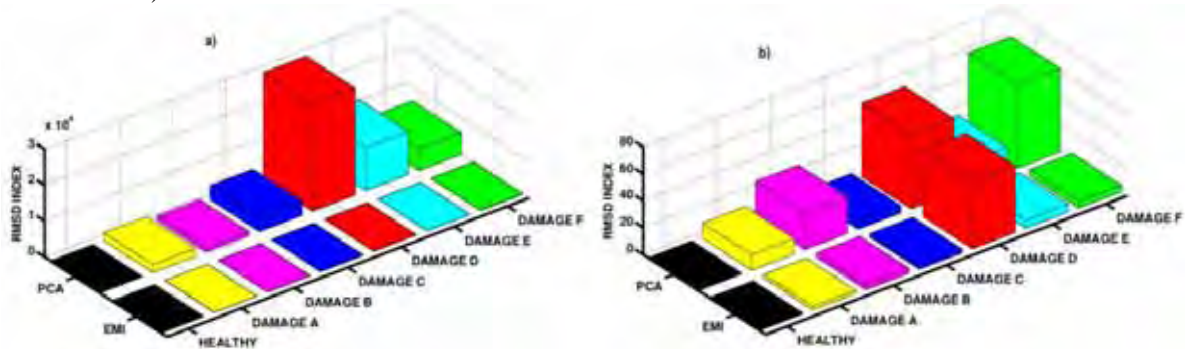
Para uma melhor comparação, os resultados obtidos para as técnicas EMI e PCC são apresentados em conjunto nas Figuras 39, 40 e 41, considerando todos os sensores (S1, S2, S3, S4 e S5) e todas as condições estruturais (íntegra e danos A, B, C, D, E e F). Os índices RMSD apresentados estão normalizados, tendo como referência a condição da estrutura sem dano.

Figura 39 – Comparativo entre os índices RMSD para PCC e EMI: a) Sensor S1; b) Sensor S2 (índices normalizados).



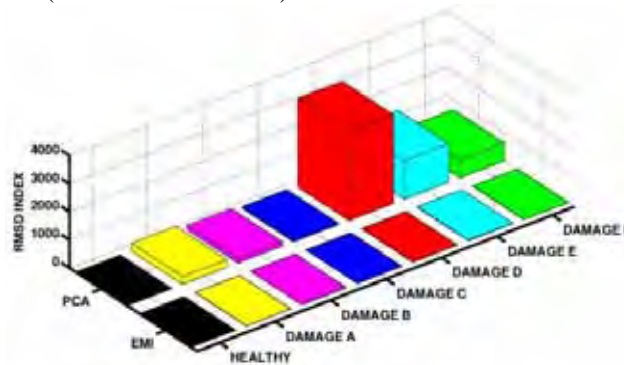
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 40 - Comparativo entre os índices RMSD para PCC e EMI: a) Sensor S3; b) Sensor S4 (índices normalizados).



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 41 - Comparativo entre índices RMSD para PCC e EMI para o sensor S5 (índices normalizados).



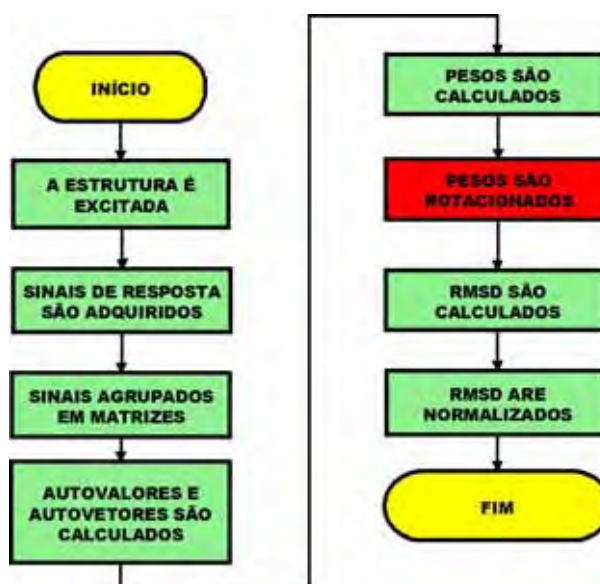
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Analisando as Figuras 39, 40 e 41, nota-se que os dois métodos apresentam excelentes resultados para detecção de danos estruturais. No entanto, pode-se ver que a sensibilidade do método proposto (domínio do tempo) é mais significativa do que o método tradicional baseado na FRF/EMI. Certamente, a melhoria na sensibilidade dos índices RMSD poderia simplificar as aplicações práticas em detecção de danos estruturais.

5.3 Análise com rotação de pesos

A metodologia apresentada nessa seção, resumida no diagrama da Figura 42, é bastante similar à apresentada na seção anterior. A estrutura analisada é mesma apresentada e descrita na seção 5.1. Neste procedimento a estrutura também é excitada considerando uma sinal *chirp* de 2V de amplitude numa faixa de frequência de 0 a 125 kHz. O sinal de resposta da estrutura é adquirido utilizando-se uma taxa de amostragem de 1,25 Msample/s e resistência de 10 k Ω . A principal diferença consiste na etapa posterior ao cálculo dos pesos e anterior à de obtenção dos índices RMSD (bloco em vermelho no diagrama da Figura 42). Neste caso, é realizada uma rotação de pesos com a finalidade de aumentar a sensibilidade dos índices RMSD no processo de detecção de danos estruturais.

Figura 42 – Diagrama contendo o procedimento baseado na rotação de pesos.



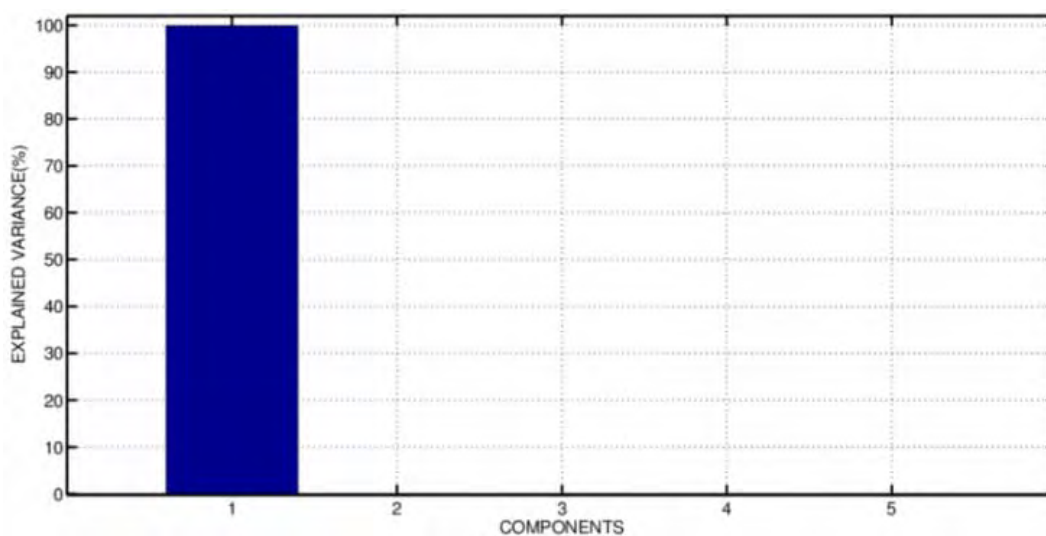
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os sinais obtidos através do circuito/sistema de aquisição mostrado nas Figuras 2 e 6 também foram agrupados em oito matrizes conforme apresentado na seção anterior. Na

sequência, os pesos são calculados para cada sensor e condição estrutural e rotacionados, utilizando a técnica denominada de Varimax (Seção 3.4), antes do cálculo dos índices RMSD. A descrição da placa com as devidas dimensões e caracterização dos danos e posições dos PZT foi apresentada anteriormente na Figura 33.

Considerando os sinais adquiridos, a primeira análise consiste na verificação do número de componentes que deverão ser utilizadas no processo de detecção de danos estruturais. Para isso, os coeficientes de Pearson (Equação (31)) foram calculados para todas as matrizes. Como todas as matrizes apresentaram todos os coeficientes acima de 0.999, então é possível dizer que o eixo principal é muito mais significativo em relação aos demais eixos. Esse resultado também foi comprovado calculando-se as variâncias acumuladas (Equação (30)) a partir de todas as matrizes. O resultado da variância acumulada para a matriz **D** é apresentado na Figura 43. Para esse resultado, a matriz **D** foi escolhida aleatoriamente, mas os resultados são semelhantes para outros casos.

Figura 43 – Variância acumulada em função das componentes principais para Dano D.

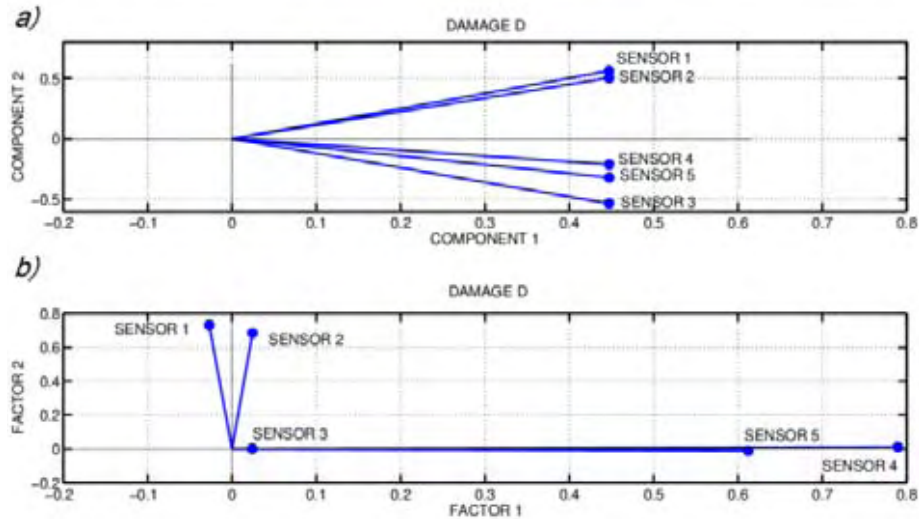


Fonte: Elaboração do próprio autor.

O gráfico apresentado na Figura 43 mostra que a primeira componente contribui com cerca 99,94% da variância acumulada, enquanto a segunda componente explica com 0.0478% e as demais se aproximam de zero. Logo, a primeira componente mostra-se mais propícia para a utilização no método proposto, pois ela explica praticamente 100% da variância acumulada.

Após a verificação da variância acumulada, os pesos para todas as matrizes foram calculados usando a Equação (32). A Figura 44 (a) apresenta os pesos em função das duas primeiras componentes principais para a matriz **D**.

Figura 44 – Pesos para o dano D em função das PC: a) não rotacionados; b) rotacionados.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

É possível observar que os pesos possuem uma pequena variação em relação à primeira componente, que é a mais representativa, de acordo com os resultados apresentados na Figura 43. Esses resultados também são semelhantes para outras matrizes. Considerando que o método proposto calcula os índices RMSD a partir dos pesos, e estes são semelhantes para todas as condições estruturais, a sensibilidade para a detecção de danos pode ser prejudicada. Para aumentar a sensibilidade do método, a rotação de pesos foi realizada como forma de melhorar a variação dos pesos em relação à primeira componente principal.

Antes de realizar a rotação dos pesos, os testes KMO e BTS devem ser realizados para verificar se o índice de correlação entre os dados são pertinentes para realização do procedimento de rotação (Seção 3.4). Primeiramente, usando a Equação (34) foi realizado o teste KMO para todas as matrizes. O índice KMO para matriz **D** foi 0.8508, que é considerado um excelente valor para proceder à análise de fatores. Valores de KMO menores do que 0.5 indicam que não é possível realizar a análise de fatores. Posteriormente, usando a Equação (37), o teste BTS para a matriz **D** também foi realizado, e este apresentou nível de significância próximo de zero (usando significância $\alpha = 0,05$). Consequentemente, a hipótese nula é rejeitada e a análise fatorial é realizável. A partir dos resultados de ambos os testes, conclui-se que a rotação de pesos possui grau de adequação ideal para análise de fatores de

acordo com a classificação de KMO e BTS. Para todas outras matrizes, os resultados foram semelhantes.

Usando a Equação (33), a rotação dos pesos foi efetuada a partir dos pesos calculados através da Equação (32), considerando os três primeiros fatores. Os resultados para a matriz **D** são apresentados na Figura 44 (b) em função dos dois primeiros fatores. É possível notar que a variação dos pesos rotacionados no sentido do primeiro fator é incrementada em relação à Figura 44 (a). Resultados semelhantes foram obtidos para outras matrizes. Assim, as variações apresentadas a partir da rotação dos pesos são úteis, pois essas aumentam a sensibilidade para os índices RMSD aplicados à detecção de danos estruturais.

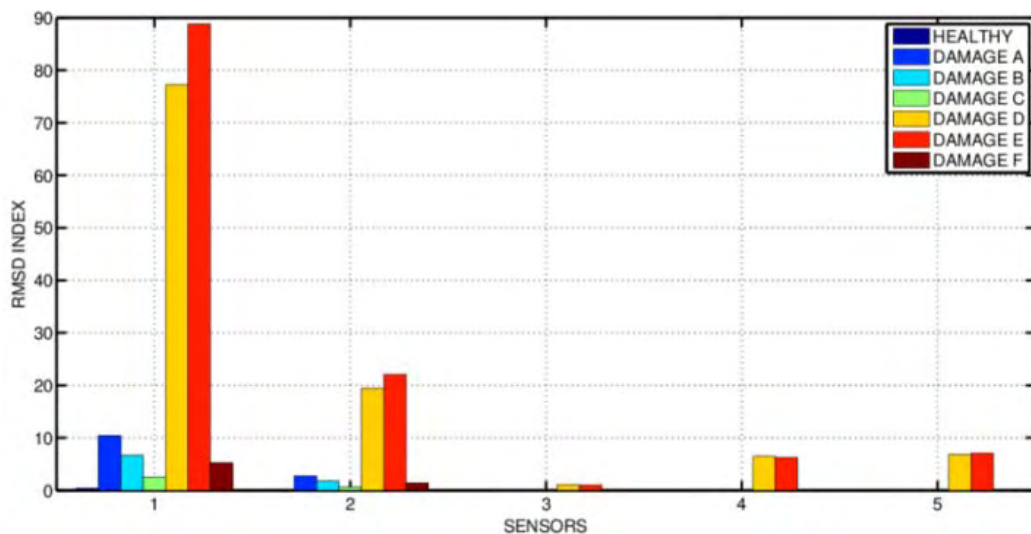
A partir dos pesos rotacionados, os índices RMSD foram calculados considerando somente os pesos correspondentes ao primeiro fator, como segue:

$$\text{RMSD} = \sqrt{\frac{(V_a - V_b)^2}{(V_b)^2}} \quad (78)$$

Na equação (78), V_a e V_b representam os pesos rotacionados para a estrutura analisada e *baseline*, respectivamente, e o operador de somatório não aparece porque o cálculo é feito apenas entre dois valores em cada condição estrutural.

A partir dos pesos rotacionados e utilizando a Equação (78), os índices RMSD foram calculados para todas as condições (saudável e danos A, B, C, D, E e F) e para todos os sensores (S1, S2, S3, S4 e S5). Estes resultados são mostrados na Figura 45.

Figura 45 – Índices RMSD para os pesos rotacionados.



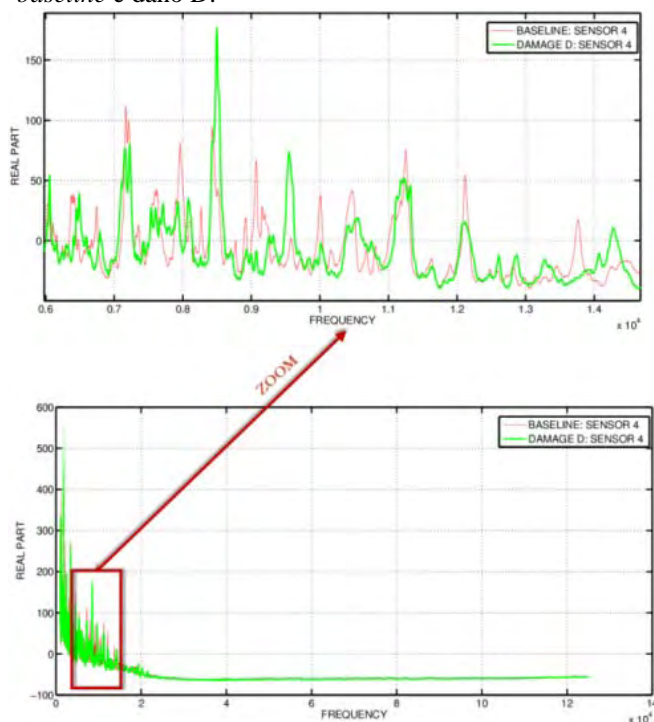
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os resultados gerais apresentados dificultam a verificação da sensibilidade dos índices RMSD. Porém, os resultados para S1 se destacam, quando comparados com os resultados de outros sensores.

5.3.1 Comparativo entre rotação de pesos e EMI

A fim de comparar o método proposto com o tradicional baseado na FRF/EMI procedeu-se o cálculo da impedância eletromecânica de acordo com o sistema proposto por Baptista e Vieira Filho (2010). A Figura 46 mostra a parte real da impedância eletromecânica para o teste prático considerando o resultado para o Sensor 4 nas condições de estrutura íntegra e dano D. A escolha da parte real da EMI para a comparação se deu devido ao fato de a mesma ter apresentado uma melhor sensibilidade para a estrutura analisada quando comparada com o módulo e/ou a parte imaginária.

Figura 46 – Parte real da impedância para o sensor S4 em duas condições estruturais: *baseline* e dano D.

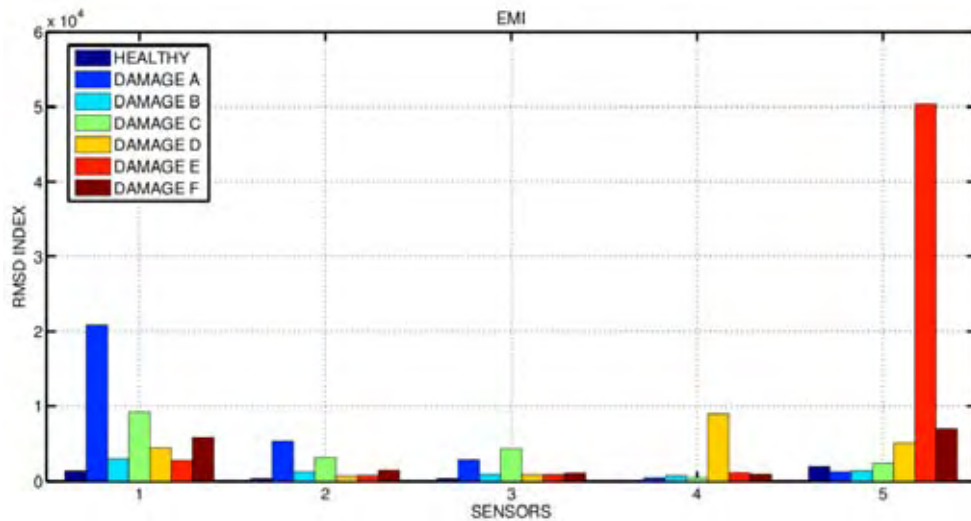


Fonte: Elaboração do próprio autor.

A partir da parte real da EMI os índices RMSD foram calculados através da Equação (3). Os resultados dos índices RMSD para a EMI são apresentados na Figura 47 considerando as condições estruturais (saudável e danos A, B, C, D, E e F) e todos os sensores (S1, S2, S3, S4 e S5). A análise dos resultados apresentados nas Figuras 45 e 46 são

extremamente difíceis devido as grandes diferenças entre os índices RMSD. Como forma de melhorar a análise de resultados, os índices RMSD para ambas as técnicas (EMI e pesos rotacionados) foram normalizados, considerando como referência a condição íntegra para cada um dos sensores.

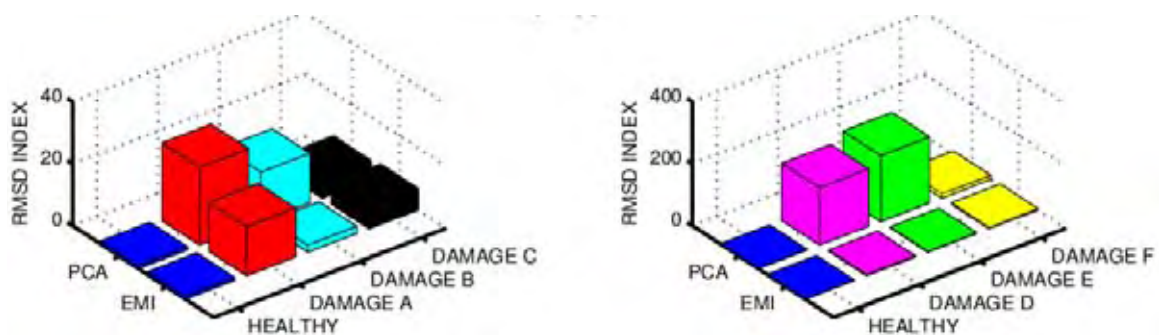
Figura 47 – Índices RMSD para parte real da EMI.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

As Figuras 48, 49, 50, 51 e 52 mostram o comparativo entre os índices RMSD normalizados, conforme descrito na seção 4.3.1, para ambas as técnicas (EMI e pesos rotacionados) considerando todos os sensores.

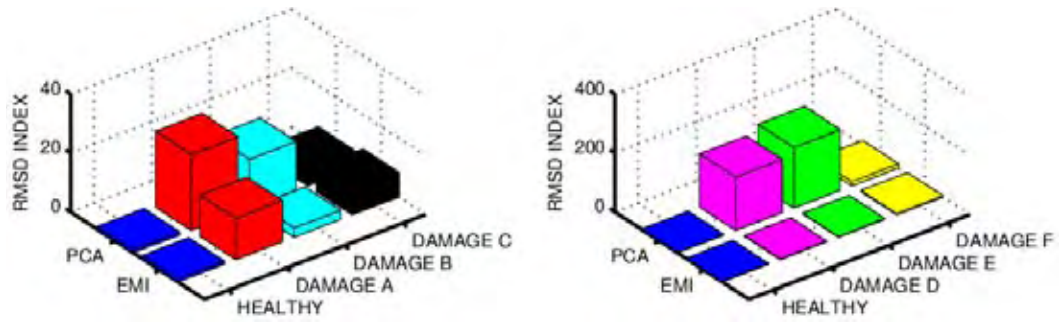
Figura 48 – Comparativo entre os índices RMSD para PCC rotacionados e EMI para S1.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

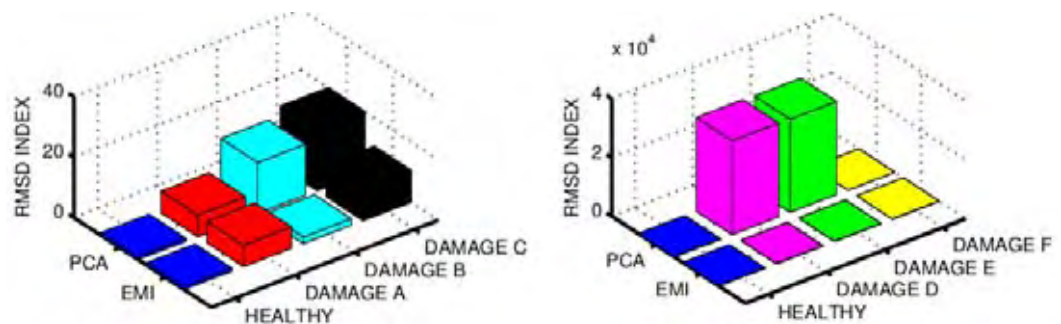
Analisando os resultados apresentados na Figura 48 nota-se que o método proposto possui maior sensibilidade quando comparado com o baseado na FRF/EMI.

Figura 49 - Comparativo entre os índices RMSD para PCC rotacionados e EMI para S2.



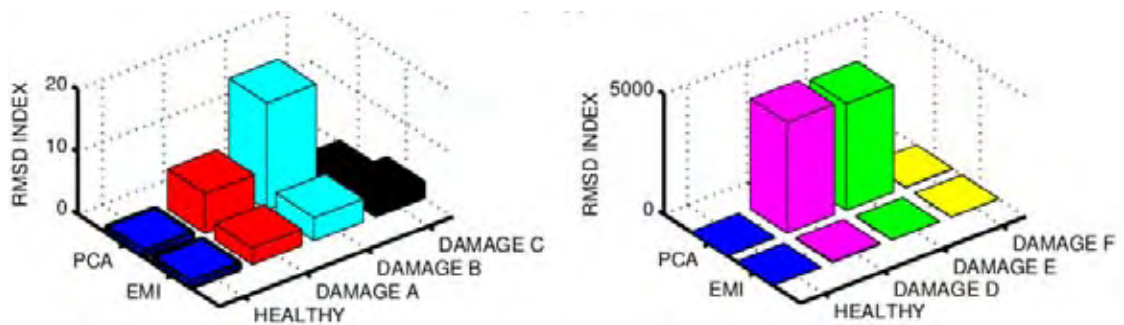
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 50 - Comparativo entre os índices RMSD para PCC rotacionados e EMI para S3.



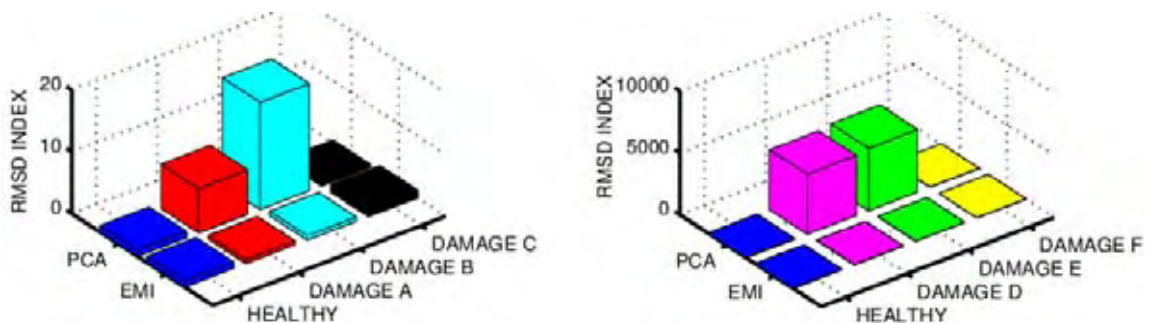
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 51 - Comparativo entre os índices RMSD para PCC rotacionados e EMI para S4.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 52 - Comparativo entre os índices RMSD para PCC rotacionados e EMI para S5.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Embora todos os danos tenham sido detectados, os resultados mostram que os danos D e E foram detectados com maior precisão por todos os sensores. Além disso, os dois métodos apresentem excelentes resultados para a detecção de danos, sendo que, mais uma vez, o método proposto se mostra mais sensível do que o tradicional baseado na FRF/EMI.

5.4 Conclusões

Este capítulo apresentou dois novos métodos para a detecção de danos em estruturas, explorando o princípio da impedância eletromecânica no domínio do tempo aplicado a uma placa de alumínio de aeronaves. Esses métodos são únicos e baseiam-se na análise do sinal no domínio do tempo, utilizando os pesos calculados a partir das PC assim como a rotação desses pesos a fim melhorar a sensibilidade dos índices RMSD. Os resultados foram analisados usando-se índices tradicionais de detecção de danos em sistemas SHM. Os testes mostraram valores de RMSD são mais sensíveis a danos do que os obtidos com o método de EMI e FRF, o que representa uma vantagem importante. O presente trabalho tem uma redução das operações matemáticas, porque somente o primeiro fator é usado para cálculo dos índices RMSD.

6 RESULTADOS BASEADOS NO PRINCÍPIO DA FUNÇÃO DE COERÊNCIA

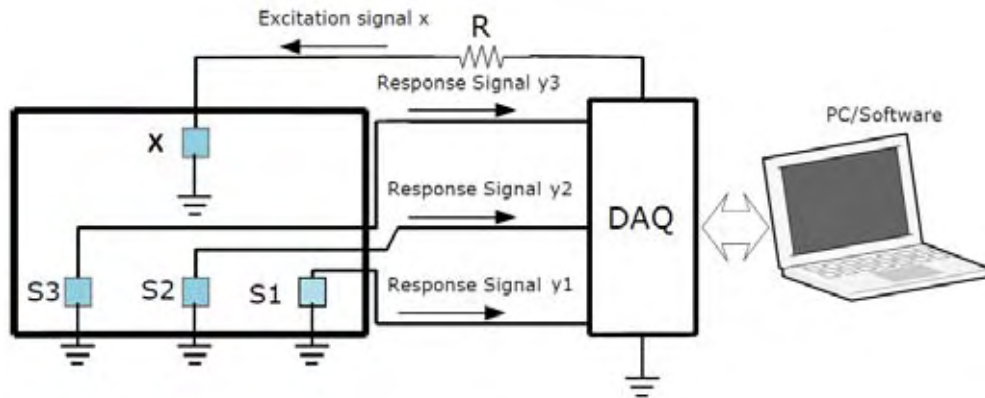
A motivação para o desenvolvimento deste capítulo vem dos bons resultados alcançados no trabalho desenvolvido por Vieira Filho, Baptista e Inman (2011a), no qual os autores propuseram uma nova metodologia para detecção de danos estruturais usando como ferramenta de análise a magnitude da função de coerência (Seção 3.1). Esta metodologia é bem diferente da utilizada no capítulo anterior, tendo em vista que um sinal apropriado é usado para excitação do conjunto PZT/estrutura através de um dos transdutores PZT enquanto outros três transdutores PZT são usados somente como sensor para coletar a resposta da estrutura, ou seja, o primeiro PZT atua como atuador e os outros três restantes como sensores. Nessa configuração cada sensor adquire o sinal de resposta separadamente. A configuração usada é similar à metodologia conhecida com ondas de *Lamb*, contudo a análise e a operação são completamente diferentes. Assim como no capítulo anterior, esta análise também requer que os dados sejam coletados previamente considerando a estrutura de referência (*baseline*) e tem como base as PC. Como discutido anteriormente, neste trabalho as PC são utilizadas diretamente na obtenção de métricas usadas para detectar danos estruturais. Neste caso, em particular, as PC são calculadas diretamente a partir dos sinais no domínio do tempo e esses servem de dados de entrada para o cálculo dos índices CCDM e RMSD. Nesse capítulo são utilizados diferentes métodos de análises dos sinais de resposta, no domínio do tempo, tais como: análise baseada nos *scores* das PC, análise baseado nos pesos, Análise Singular Espectral (SSA) e filtros de Savitzky-Golay.

6.1 Metodologia empregada

Os conceitos da metodologia desenvolvida têm como base a configuração apresentada na Figura 53. Para isso, quatro transdutores piezelétricos são colados na estrutura a ser monitorada. Nessa configuração, o transdutor X opera como atuador para excitar a estrutura numa faixa de frequência apropriada (sinal *chirp* variando de 0 a 250 kHz), e os outros três transdutores operam de modo passivo como sensores (S1, S2, e S3). A principal diferença entre esta metodologia e as baseadas em ondas de *Lamb* é o sinal de excitação. Em técnicas baseadas em ondas de *Lamb*, o sinal de excitação é um tom puro com amplitude

elevada – normalmente acima de 50 volts. Já na metodologia proposta, o sinal de excitação é do tipo *chirp* e possui nível de tensão próximo de 3 volts.

Figura 53 – Diagrama proposto para identificação de danos estruturais.

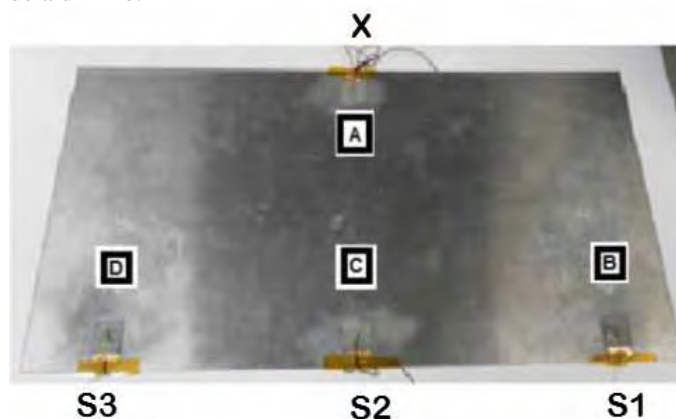


Fonte: Vieira Filho, Baptista e Inman (2011a).

Esse sistema é controlado a partir do software desenvolvido por Baptista e Vieira Filho (2010) na plataforma LabVIEW[®] e que também controla uma placa multifuncional *Data Acquisition* (DAQ), dispositivo modelo USB-6259. O sinal de excitação x é usado para excitar o conjunto atuador/ estrutura. O DAQ fornece os sinais $x[n]$ e $y[n]$ na forma discreta, obtidos a uma taxa de amostragem de 1,25 Msample/s.

Os testes práticos, analisados nesse capítulo, foram todos realizados numa placa de alumínio com dimensões de 500 x 230 x 2 mm. Durante os testes, a viga permaneceu horizontalmente suspensa por dois elásticos, simulando uma condição de contorno livre-livre. Para isso, quatro piezocerâmica PSI-5H4E de 20 x 20 x 0,267 mm foram coladas na placa utilizando cola do tipo Cianoacrilato conforme ilustra a Figura 54.

Figura 54 – Posição dos transdutores PZT e dos danos simulados (A, B, C e D) na placa de alumínio.



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

O transdutor PZT X foi utilizado como atuador e os outros três transdutores (S1, S2 e S3) foram usados como sensores.

Quatro danos removíveis (A, B, C, e D) foram simulados colando-se uma porca metálica de 4 x 2 mm e cerca de 1 g na estrutura a ser monitorada em diferentes distâncias, conforme mostrado na Figura 54. A análise dos sinais adquiridos a partir da estrutura foi analisada usando o MatLab[®].

6.2 Resultados utilizando *scores*

Nessa seção o método utilizado é similar ao mostrado no diagrama presente na Figura 19. Os sinais de resposta da estrutura foram adquiridos a partir do sistema apresentado na Figura 53. Esses sinais foram agrupados em seis matrizes, considerando a resposta para os sensores S1, S2, S3 e para o atuador (X_{EX}), de acordo com as seguintes Equações:

$$\mathbf{BL} = [X_{BLi,S1} \ X_{BLi,S2} \ X_{BLi,S3} \ X_{EX}] \quad (78)$$

$$\mathbf{A} = [X_{Ai,S1} \ X_{Ai,S2} \ X_{Ai,S3} \ X_{EX}] \quad (79)$$

$$\mathbf{B} = [X_{Bi,S1} \ X_{Bi,S2} \ X_{Bi,S3} \ X_{EX}] \quad (80)$$

$$\mathbf{C} = [X_{Ci,S1} \ X_{Ci,S2} \ X_{Ci,S3} \ X_{EX}] \quad (81)$$

$$\mathbf{D} = [X_{Di,S1} \ X_{Di,S2} \ X_{Di,S3} \ X_{EX}] \quad (82)$$

$$\mathbf{H} = [X_{Hi,S1} \ X_{Hi,S2} \ X_{Hi,S3} \ X_{EX}] \quad (83)$$

nas equações anteriores, \mathbf{BL} representa a matriz do *baseline*, \mathbf{H} a matriz de estrutura íntegra e \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} e \mathbf{D} as matrizes de danos.

O procedimento de identificação de falha utilizado nessa seção considera oito cenários diferentes para avaliação do método. As principais diferenças entre esses cenários estão presentes nas duas últimas colunas de cada tabela. Na última coluna é avaliada a presença ou a ausência do sinal de excitação durante o processo de determinação dos *scores*. Para o caso de ausência do sinal de excitação, as matrizes (\mathbf{BL} , \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} , \mathbf{D} e \mathbf{H}), apresentadas

anteriormente, não possuem a última coluna (X_{EX}). Na penúltima coluna dos quadros apresentados a seguir é avaliada a presença ou ausência de mudança na temperatura ambiente. O primeiro cenário é apresentado no Quadro 1. Para todos os casos abaixo, foram utilizados sinais de excitação do tipo *chirp* variando de 0 a 250 kHz.

Quadro 1– Descrição do cenário 1.

Descrição	Condição estrutural	Temperatura	Excitação
<i>Baseline</i>	Íntegra	25°C	Ausente
Íntegra	Íntegra	25°C	Ausente
Danos	A, B, C e D	25°C	Ausente

Fonte: Elaboração do próprio autor.

O segundo cenário é mostrado no Quadro 2. Em relação ao primeiro cenário a principal diferença é a presença do sinal de excitação.

Quadro 2 - Descrição do cenário 2.

Descrição	Condição	Temperatura	Excitação
<i>Baseline</i>	Íntegra	25°C	Presente
Íntegra	Íntegra	25°C	Presente
Danos	A, B, C e D	25°C	Presente

Fonte: Elaboração do próprio autor.

O terceiro cenário é descrito no Quadro 3. Para esse cenário há uma significativa mudança na temperatura para a estrutura considerada íntegra e o sinal de excitação está ausente.

Quadro 3 - Descrição do cenário 3.

Descrição	Condição	Temperatura	Excitação
<i>Baseline</i>	Íntegra	25°C	Ausente
Íntegra	Íntegra	45°C	Ausente
Danos	A, B, C e D	25°C	Ausente

Fonte: Elaboração do próprio autor.

O quarto cenário é descrito no Quadro 4. Para esse caso, também há mudança na temperatura da estrutura considerada íntegra e o sinal de excitação está presente.

Quadro 4 - Descrição do cenário 4.

Descrição	Condição	Temperatura	Excitação
Baseline	Íntegra	25°C	Presente
Íntegra	Íntegra	45°C	Presente
Danos	A, B, C e D	25°C	Presente

Fonte: Elaboração do próprio autor.

O quinto cenário é mostrado no Quadro 5.

Quadro 5 - Descrição do cenário 5.

Descrição	Condição	Temperatura	Excitação
<i>Baseline</i>	Íntegra	45°C	Ausente
Íntegra	Íntegra	45°C	Ausente
Danos	A, B, C e D	45°C	Ausente

Fonte: Elaboração do próprio autor.

O sexto cenário é mostrado no Quadro 6. Em relação ao cenário anterior a principal diferença é a presença do sinal de excitação.

Quadro 6 - Descrição do cenário 6.

Descrição	Condição	Temperatura	Excitação
<i>Baseline</i>	Íntegra	45°C	Presente
Íntegra	Íntegra	45°C	Presente
Danos	A, B, C e D	45°C	Presente

Fonte: Elaboração do próprio autor.

O sétimo cenário é descrito no Quadro 7. Neste, há uma significativa mudança na temperatura na condição de estrutura íntegra e ainda ausência de sinal de excitação.

Quadro 7 - Descrição do cenário 7.

Descrição	Condição	Temperatura	Excitação
<i>Baseline</i>	Íntegra	45°C	Ausente
Íntegra	Íntegra	25°C	Ausente
Danos	A, B, C e D	45°C	Ausente

Fonte: Elaboração do próprio autor.

O oitavo cenário é mostrado no Quadro 8.

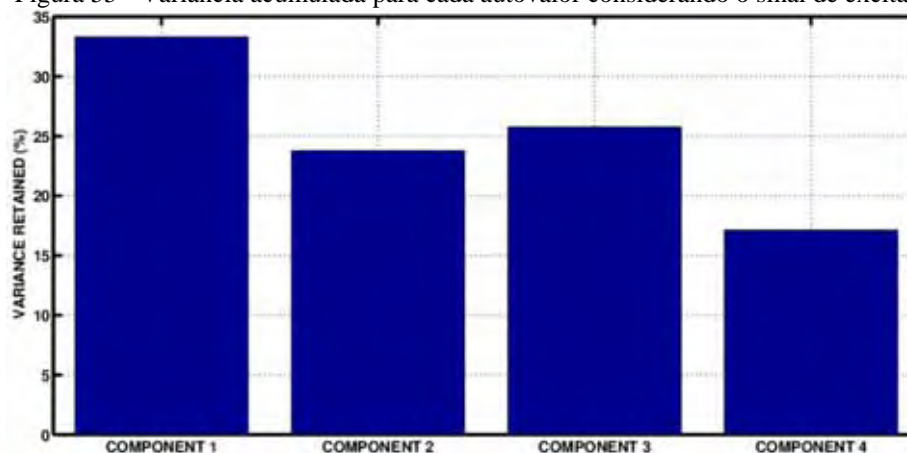
Quadro 8 - Descrição do cenário 8.

Descrição	Condição	Temperatura	Excitação
<i>Baseline</i>	Íntegra	45°C	Presente
Íntegra	Íntegra	25°C	Presente
Danos	A, B, C e D	45°C	Presente

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A partir da Equação (30) foi determinada a variância acumulada em relação aos autovalores. Os resultados para uma situação específica é mostrado na Figura 55. As condições escolhidas foram: estrutura íntegra com a presença do sinal de excitação e temperatura ambiente. Essa escolha foi realizada aleatoriamente tendo em vista que para os demais casos os resultados são semelhantes. Este gráfico mostra que todos os autovalores contribuem para a variância acumulada.

Figura 55 - Variância acumulada para cada autovalor considerando o sinal de excitação.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

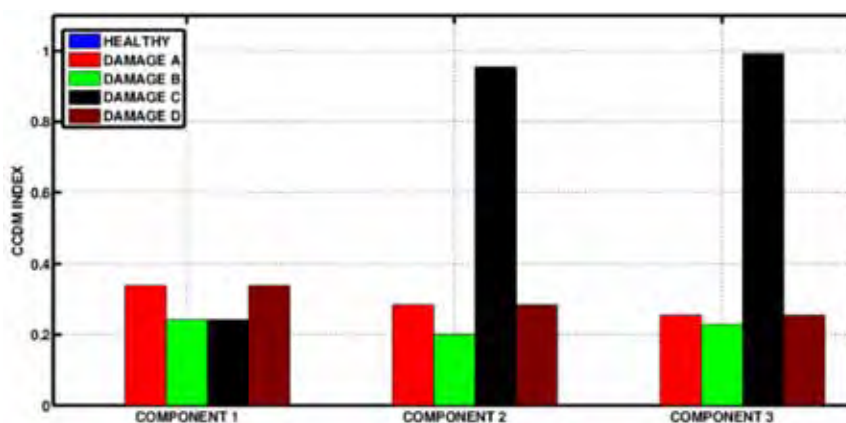
De acordo com a Figura 55, pode-se notar que todas as componentes contribuem significativamente para a representação do sinal. Logo, todas as componentes serão utilizadas no cálculo dos índices CCDM, nos oito cenários apresentados anteriormente.

Considerando a Equação (29), as PC foram calculadas diretamente a partir dos sinais no domínio do tempo para cada um dos cenários descritos anteriormente. Logo, quatro PC foram calculadas para cada cenário no qual o sinal de excitação está presente e três PC para os quais o sinal de excitação está ausente. Após o cálculo das PC, estas foram usadas

como variável de entrada para a determinação dos índices CCDM de acordo com a Equação (4).

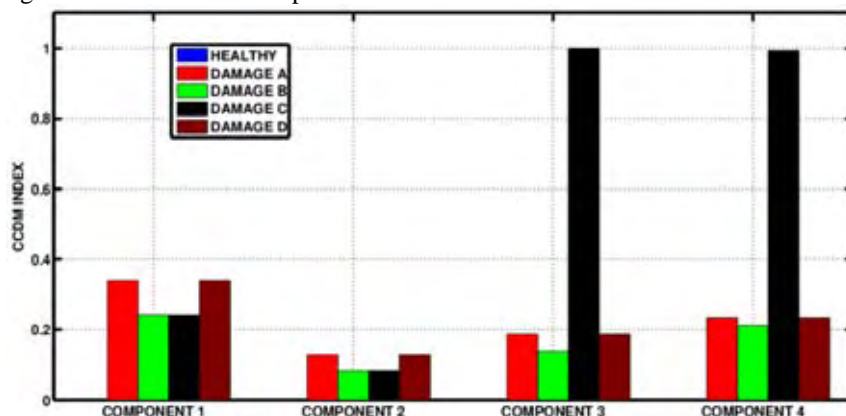
Neste trabalho, todos os índices CCDM foram calculados comparando cada componente principal individualmente. Como exemplo, a primeira componente para o *baseline* foi usada em conjunto com a condição de estrutura íntegra para determinar a primeira coluna apresentada na Figura 56. Para as demais colunas, o procedimento foi idêntico ao descrito anteriormente. A seguir, são apresentados os resultados para todos os oito cenários descritos previamente. As Figuras 56 e 57 mostram os resultados para os cenários 1 e 2.

Figura 56 – Índices CCDM para o cenário 1.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

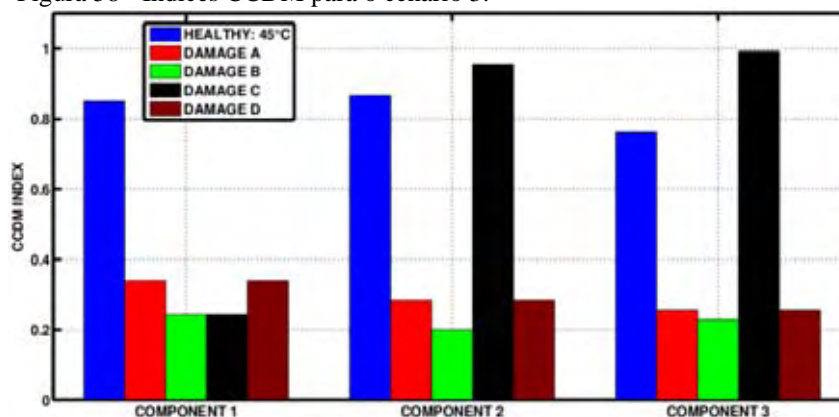
Figura 57 - Índices CCDM para o cenário 2.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Analisando as Figuras 56 e 57 pode-se observar que a diferença entre os índices CCDM para a estrutura íntegra e danificada é bastante significativa para todos os cenários, facilitando assim a identificação de danos estruturais. Os resultados para o cenário 3 é apresentado na Figura 58.

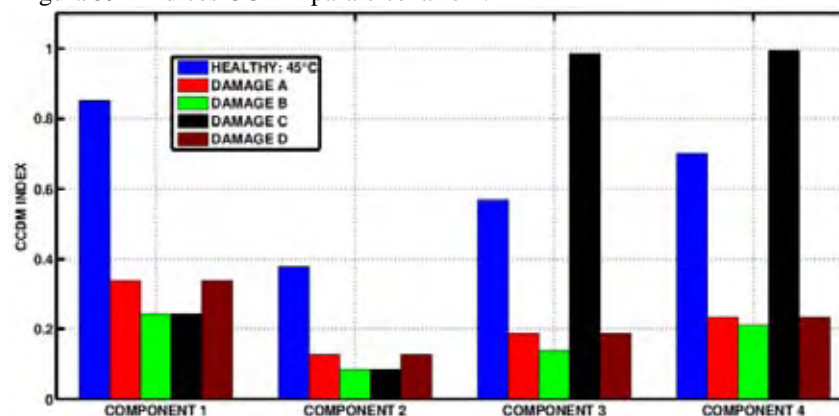
Figura 58 - Índices CCDM para o cenário 3.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os resultados para o cenário 4 é mostrado na Figura 59.

Figura 59 - Índices CCDM para o cenário 4.

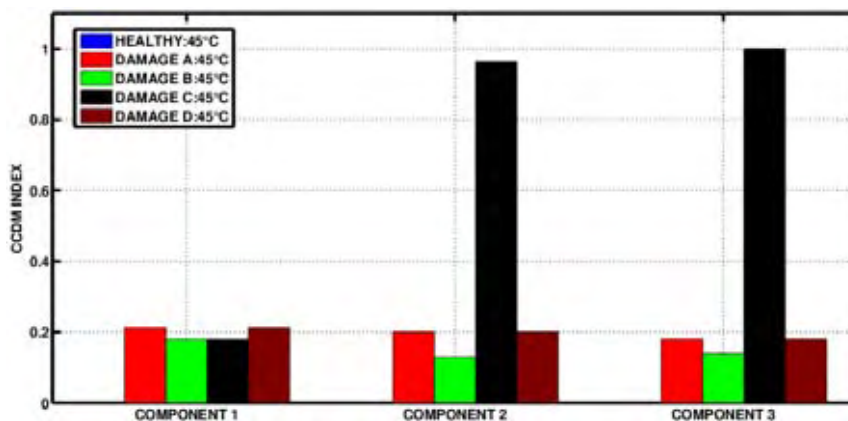


Fonte: Elaboração do próprio autor.

Para os casos onde a estrutura considerada íntegra possui temperatura diferente das condições ambientais, Figuras 58 e 59, severas mudanças são apresentadas nos resultados. Os índices CCDM para a estrutura considerada íntegra (primeira coluna) apresentam resultados extremamente fora dos padrões obtidos com os diferentes danos. Isso é devido à variação da temperatura em relação ao *baseline*, problema típico de metodologias baseadas em sensores piezelétricos. Esses resultados mostram que o método proposto pode ser utilizado para identificação dos efeitos de temperatura. Para isso, pode-se analisar a diferença entre as duas Figuras mostradas anteriormente. A diferença entre o menor CCDM para estrutura íntegra a 45°C com o maior CCDM na presença de algum dano é insignificante.

Os resultados para o cenário 5 (Figura 60), considerou a alteração na temperatura de teste para 45°C. Isso foi realizado para incrementar a repetibilidade dos resultados.

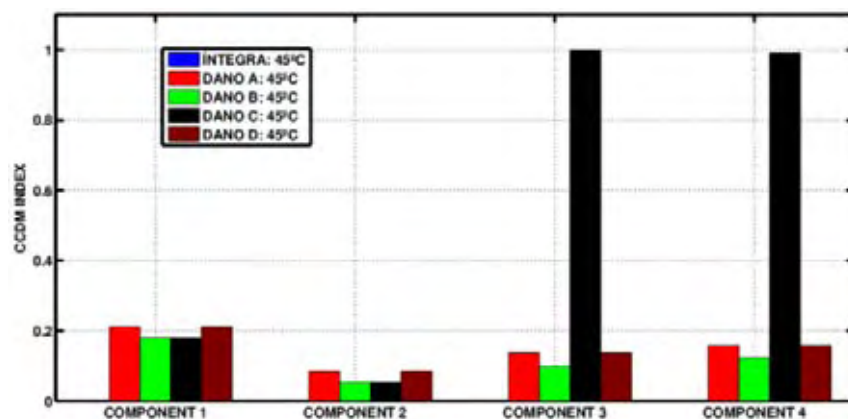
Figura 60 - Índices CCDM para o cenário 5.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os resultados para o cenário 6 é apresentado na Figura 61.

Figura 61 - Índices CCDM para o cenário 6.

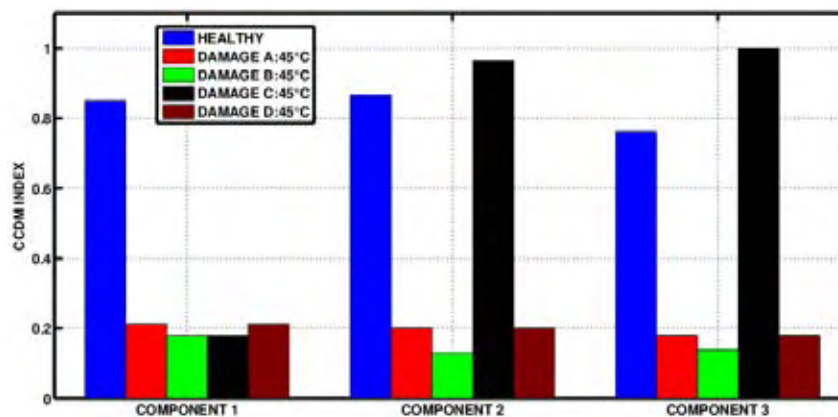


Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os resultados apresentados nas Figuras 60 e 61 são similares aos apresentados nas Figuras 56 e 57. Todos mostram que o dano pode ser identificado independentemente do sinal de excitação. Nas Figuras subsequentes a temperatura para a estrutura íntegra foi alterada para a temperatura ambiente, enquanto o *baseline* e a estrutura tida como danificada foram mantidos a 45°C. O resultados para o cenários 7 e 8 são apresentados nas Figuras 62 e 63.

Os resultados apresentados nas Figuras 62 e 63 são similares aos apresentados nas Figuras 58 e 59. Esses resultados provam, uma vez mais, que a metodologia pode ser usada para identificar o efeito de temperatura e facilitar a distinção entre dano estrutural e efeito de temperatura. Pode-se observar ainda que o sinal de excitação para o cálculo das PC não contribui significativamente para a identificação de danos estruturais.

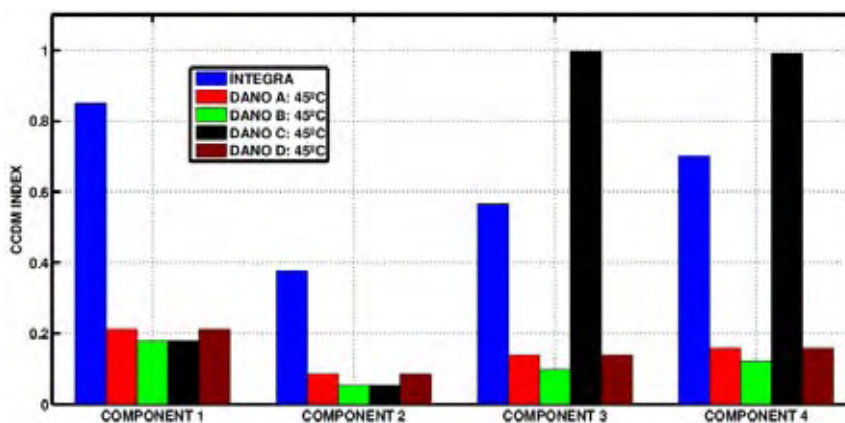
Figura 62 - Índices CCDM para o cenário 7.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os resultados para o cenário 8 são apresentados na Figura 63.

Figura 63 - Índices CCDM para o cenário 8.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

De acordo com os resultados apresentados anteriormente é possível identificar danos estruturais usando-se qualquer uma das PC individualmente.

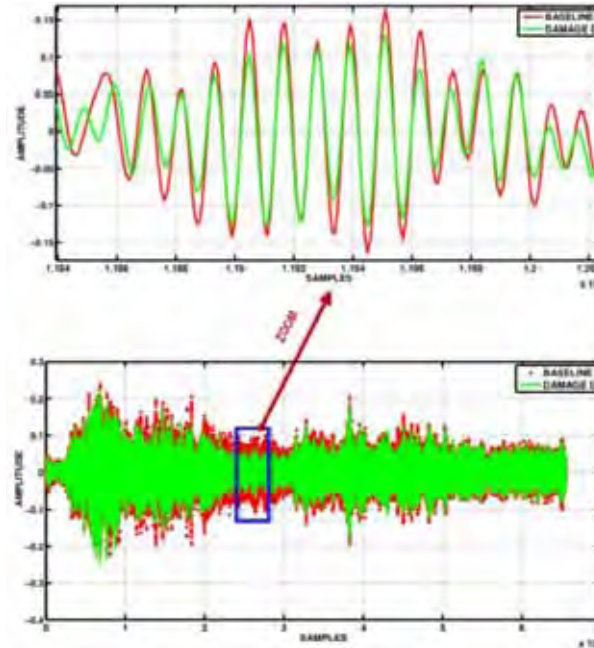
6.3 Resultados para PCC

Nessa seção serão apresentados os resultados somente para o cenário apresentado no Quadro 1, considerando a técnica baseada nos pesos (PCC) conforme apresentado na seção 5.2. O procedimento utilizado para aquisição dos sinais é baseado no diagrama apresentado na Figura 53 no qual o sensor X é usado para excitar a estrutura e os sinais de respostas são obtidos nos sensores 1, 2 e 3 separadamente. Quatro danos removíveis (A, B, C e D) foram

simulados utilizando uma porca metálica, conforme procedimento mostrado na seção 6.1. A placa utilizada para o teste foi mostrada anteriormente na Figura 54.

Na Figura 64 é apresentado o sinal de resposta para o sensor S2 considerando a estrutura no estado considerado íntegro (*baseline*) e com o dano B.

Figura 64 – Resposta temporal para o sensor S2 para duas condições estruturais: *baseline* e dano D.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Nota-se que os dois sinais são bastante semelhantes com relação à forma, mas a amplitude do sinal na presença do dano é menor em relação ao do *baseline*.

De maneira geral, o dano diminui a amplitude do sinal de resposta quando comparado ao sinal com a estrutura íntegra. Os sinais de respostas adquiridos foram agrupados em 6 matrizes, equivalente às apresentadas nas equações (78-83), de acordo com as seguinte Equações:

$$\mathbf{BL} = [x_{BLi,S1} \ x_{BLi,S2} \ x_{BLi,S3}] \quad (84)$$

$$\mathbf{A} = [x_{Ai,S1} \ x_{Ai,S2} \ x_{Ai,S3}] \quad (85)$$

$$\mathbf{B} = [x_{Bi,S1} \ x_{Bi,S2} \ x_{Bi,S3}] \quad (86)$$

$$\mathbf{C} = [x_{Ci,S1} \ x_{Ci,S2} \ x_{Ci,S3}] \quad (87)$$

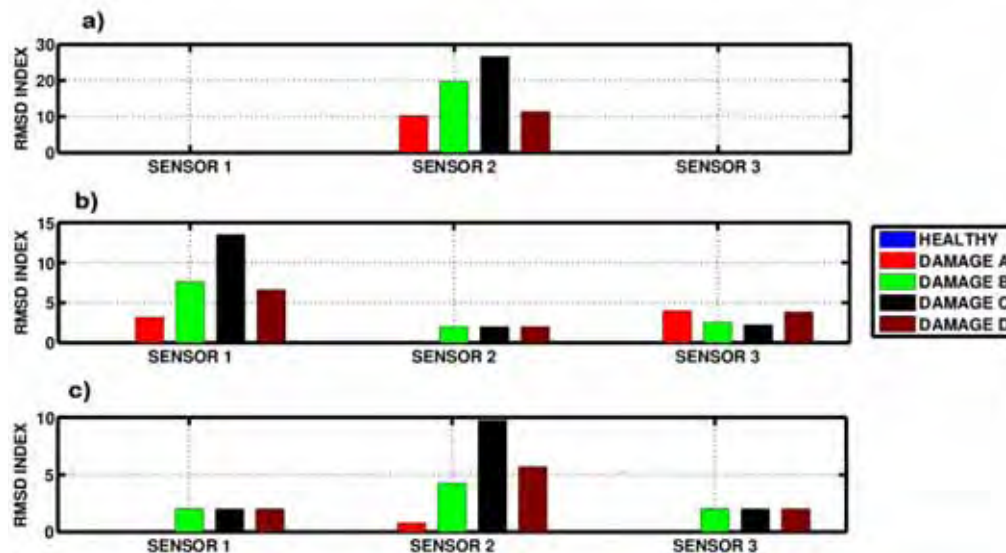
$$\mathbf{D} = [x_{Di,S1} \ x_{Di,S2} \ x_{Di,S3}] \quad (88)$$

$$\mathbf{H} = [x_{Hi,S1} \ x_{Hi,S2} \ x_{Hi,S3}] \quad (89)$$

para cada matriz apresentada anteriormente os pesos foram calculados através da Equação (32). O índice RMSD foi calculado a partir dos pesos considerando o *baseline* como referência (Equação (3)).

Na Figura 65 são apresentados os resultados dos índices RMSD considerando a primeira componente, a segunda e a terceira separadamente.

Figura 65 – Índices RMSD para os PCC: a) primeira componente; b) segunda componente; c) terceira componente.



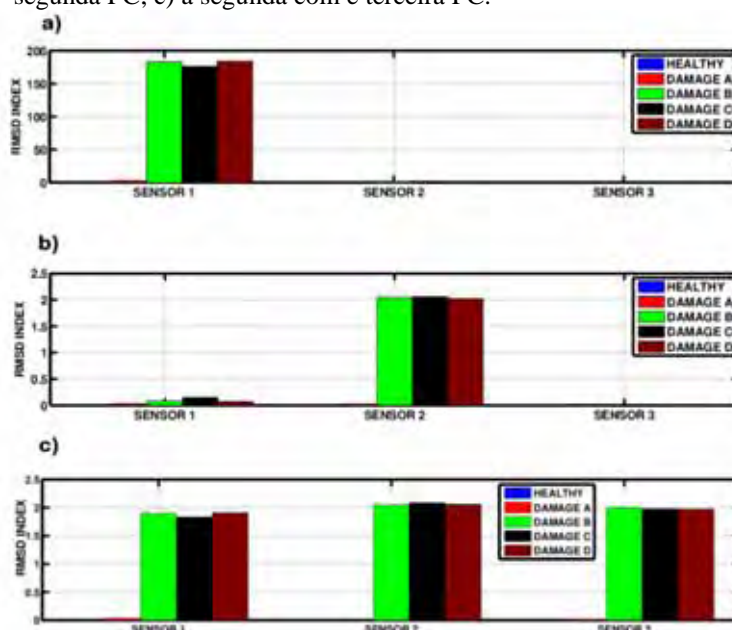
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Analisando a Figura 65 (a), com pesos considerando somente a primeira PC, nota-se que o sensor S2, que está posicionado praticamente na mesma linha do sinal de excitação (PTX), vide Figura 54, foi o que apresentou melhor resultado para a detecção de todos os danos (A, B, C e D). Como era de se esperar, o dano C, que está mais próximo ao sensor S2, possui maior valor para o índice RMSD. Resultados semelhantes podem ser vistos para a terceira componente. No entanto, para essa componente, os sensores S1 e S3 não conseguiram detectar o dano A. Além disso, a primeira componente mostrou-se mais sensível à detecção de danos quando comparada com a terceira componente. Já a segunda componente também detectou os danos com maior sensibilidade através do sensor S1. Como era de se esperar, a sensibilidade para a segunda PC é intermediária quando comparada as duas outras. Logo, para essa metodologia, pode-se utilizar somente a primeira componente para detecção do dano

estrutural tendo em vista a excelente sensibilidade, além de uma boa previsão para a localização de danos na estrutura.

Como forma de avaliar a sensibilidade do método proposto, também foi realizada uma análise da influência do número de PC na detecção de danos estruturais. Para isso, vários testes considerando a soma dos pesos das componentes principais foram realizados. Assim, foi realizada a soma dos pesos das PC em três situações distintas: todas as três PC, primeira com segunda PC e a segunda com a terceira. Na Figura 66 são apresentados os resultados para as três primeiras situações.

Figura 66 – Índices RMSD para soma dos PCC para: a) as três PC; b) a primeira com a segunda PC; c) a segunda com e terceira PC.

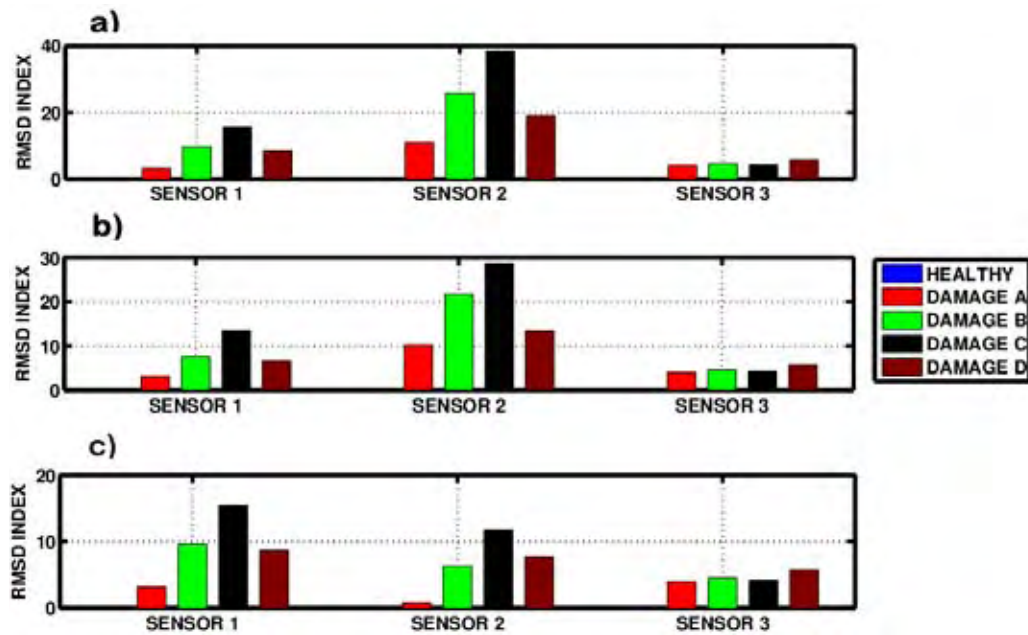


Fonte: Elaboração do próprio autor.

Como se pode ver na Figura 66 (a) a, sensibilidade aumenta significativamente para a soma das três PC e decai para a soma alternada das demais PC. No entanto, a ideia da localização é totalmente perdida para a soma das três PC, tendo em vista que o sensor S1 detectou os danos B, C e D com mesmo nível de precisão. Também, o dano A praticamente não foi detectado para nenhuma das combinações mostradas na Figura 66. Logo, esse procedimento mostrou-se ineficaz na detecção de danos estruturais.

No entanto, a melhoria na sensibilidade pode ser realizada aliando-se os dois resultados apresentados nas Figuras 65 e 66. Para isso, ao invés de se somar os pesos das PC antes do cálculo dos índices RMSD, pode-se calcular o índice RMSD para cada componente e posteriormente somar os resultados dos índices RMSD. Estes resultados são apresentados na Figura 67 considerando as mesmas condições dos apresentados na Figura 66.

Figura 67 – Soma dos Índices RMSD para: a) as três PC; b) a primeira com a segunda PC; c) a segunda com e terceira PC.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Verifica-se na Figura 67 (a) que a sensibilidade para detecção de danos foi melhorada com relação aos resultados apresentados na Figura 65. Nota-se que o sensor S2, que está na mesma linha do sinal de excitação, apresenta melhor sensibilidade para detecção de danos estruturais quando comparados aos demais. Como era de se esperar, o dano C foi detectado com maior precisão quando comparados com os demais. Já o sensor S3, possui maior sensibilidade para o dano D. Quando comparado com os demais sensores, o sensor S3 apresenta menor sensibilidade para detecção de todos os danos. Já o sensor S1 possui uma boa sensibilidade na detecção de todos os danos.

6.4 Resultados para SSA

Nessa seção serão apresentados os resultados obtidos para a técnica baseada no princípio da função de coerência considerando a Análise Espectral Singular (SSA). Nessa metodologia as métricas estatísticas RMSD e CCDM são calculadas a partir do erro (resíduo) de predição da série temporal para a SSA. O procedimento adotado nessa seção pode ser resumido, como ilustrado na Figura 68.

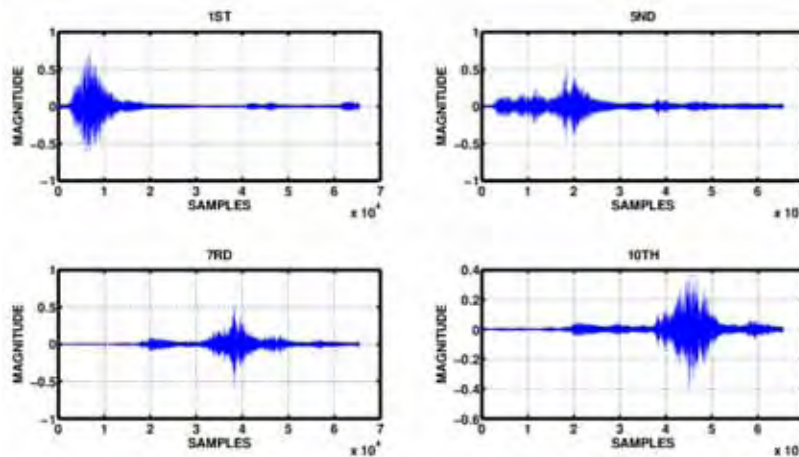
Figura 68 – Diagrama contendo procedimento para o método baseado na SSA.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Considerando os sinais de respostas obtidos para o Cenário 1 (Quadro 1), procedeu-se a estimação da série temporal a partir da série original. Utilizando-se a teoria descrita na seção 3.5, a série foi reconstruída e o erro de predição da série foi calculado conforme Equação (51). Na Figura 69 é mostrada a decomposição desse sinal considerando quatro diferentes componentes principais aplicados ao sinal do *baseline* para o sensor S1.

Figura 69 – Decomposição da SSA para quatro componentes principais diferentes.

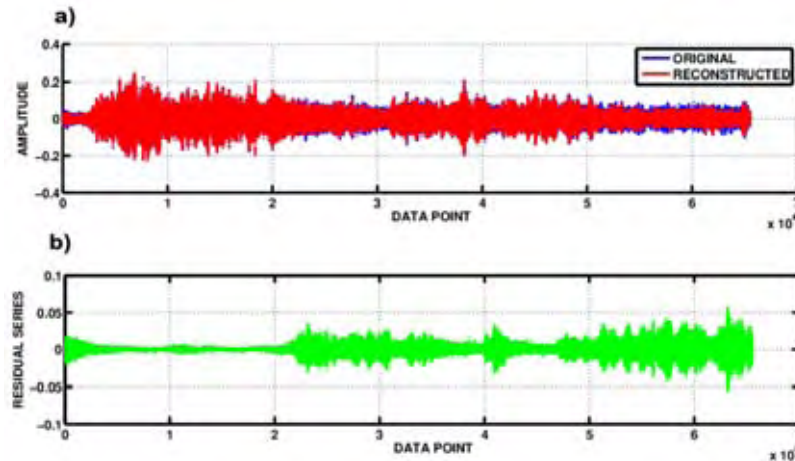


Fonte: Elaboração do próprio autor.

Para cada sinal foi gerado um erro de predição linear considerando a estrutura em estado íntegro (*baseline*), novamente íntegro adquirido em outro momento e danos A, B, C e D para todos os sensores (S1, S2 e S3). Na Figura 70 são apresentados os resultados para a série original oriunda da medição do sensor S1 considerando a estrutura íntegra (*baseline*), a série reconstruída e o erro de predição. Esse erro pode variar de acordo com o tamanho da

janela utilizado na matriz de trajetória e também com o número de autovalores utilizados no processo de reconstrução da série temporal.

Figura 70 – a) Resposta temporal para S1 e sua própria série reconstruída; b) erro residual.

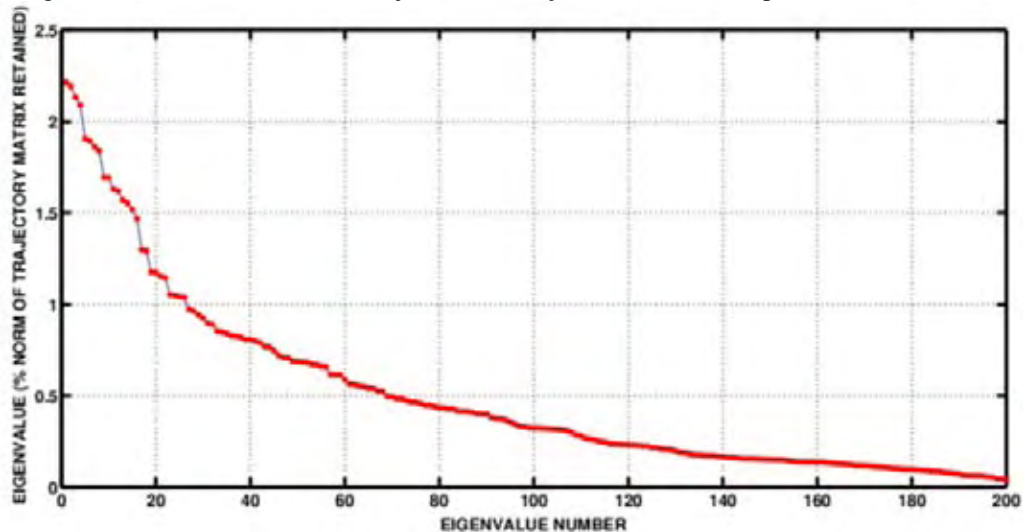


Fonte: Elaboração do próprio autor.

Para o resultado apresentado anteriormente, foi considerada uma janela da matriz de trajetória de 200 componentes e os sete primeiros autovalores mais significativos no processo de reconstrução da série.

A análise do número de autovalores, que são representativos para a reconstrução da série, pode ser realizada analisando-se a norma da matriz de trajetória acumulada em função do número de autovalores. Os resultados para o sinal do sensor S1 considerando a estrutura íntegra (*baseline*) em função dos autovalores são apresentados na Figura 71.

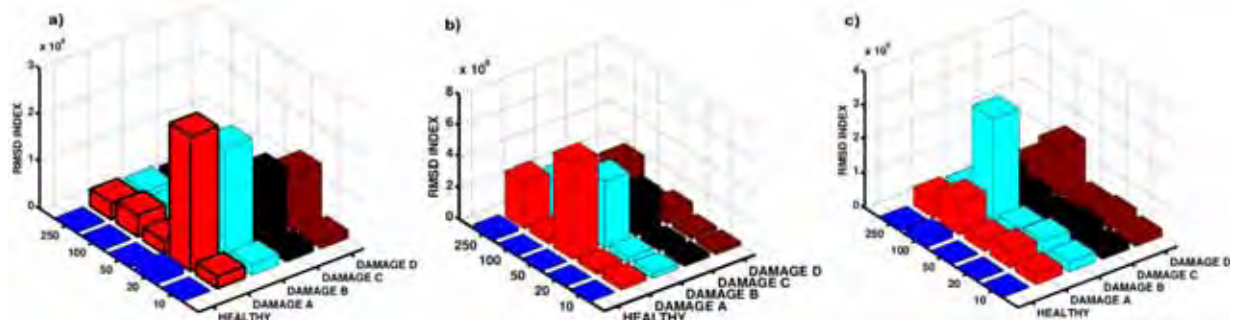
Figura 71 – Norma da matriz de trajetória em função dos autovalores para S1.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Nota-se na Figura 71 que cada autovalor contribui significativamente na reconstrução da série temporal. Porém, é extremamente difícil fazer uma análise sobre qual seria o número de autovalores que poderiam ser utilizados na detecção de danos estruturais, tendo em vista o aumento no número de autovalores tem efeitos significativos no tempo de processamento dos sinais. Nessa seção serão apresentados resultados experimentais a cerca da análise da variação do número de autovalores no processo de reconstrução da série temporal. Assim, a Figura 72 mostra os resultados para SSA variando-se o número de autovalores no processo de reconstrução da série com uma janela fixa de 500 componentes. A partir do resíduo de cada sinal são calculados os índices RMSD e CCDM considerando o sinal do *baseline* como referência. Foram considerados 10, 20, 50, 100 e 250 autovalores.

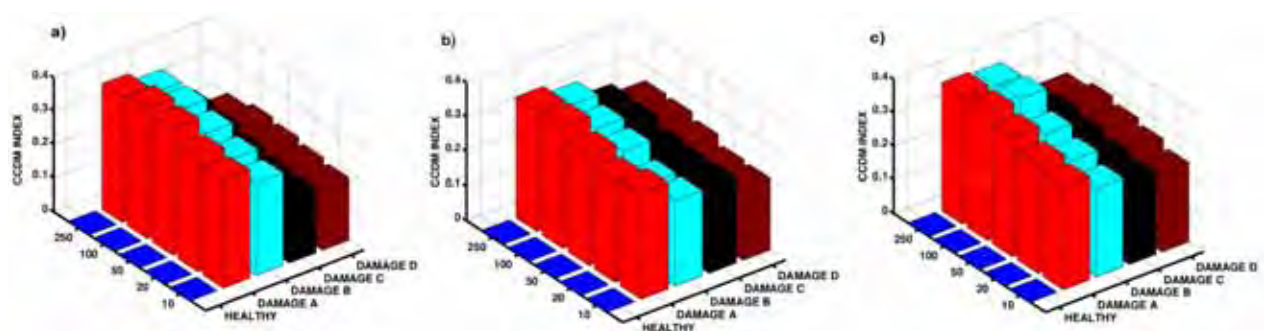
Figura 72 - Índices RMSD para SSA para janela de 500 e variação no número de autovalores: a) sensor S1; b) sensor S2; c) sensor S3.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Analisando a Figura 72, o número de autovalores influencia no processo de reconstrução da série temporal e conseqüentemente influencia na sensibilidade do sistema de detecção de danos estruturais. No entanto, não há um padrão definido para a relação do número de autovalores ótimo para detecção de danos estruturais. Na Figura 73 são apresentados os resultados para os índices CCDM, como na Figura anterior.

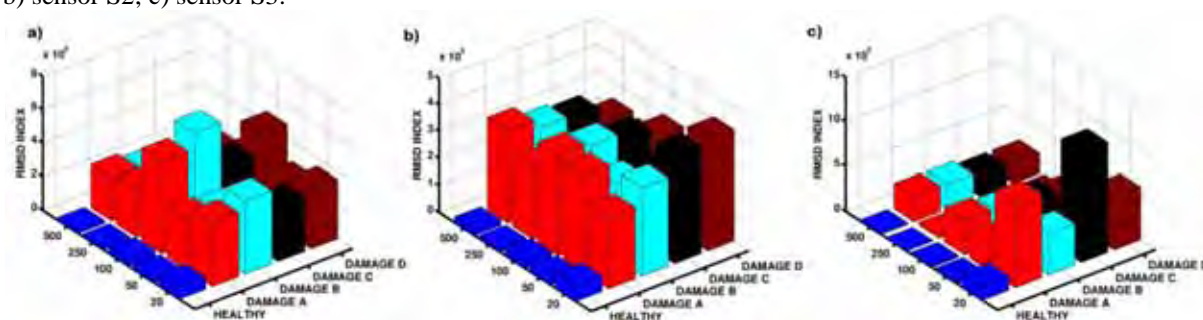
Figura 73 - Índices CCDM para SSA para janela de 500 componentes e variação no número de autovalores: a) sensor S1; b) sensor S2; c) sensor S3.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Como pode ser visto na Figura 73, os índices CCDM apresentam um padrão mais bem definido com relação ao número de autovalores a ser escolhido, ou seja, praticamente não sofre alteração nos índices na medida em que há alteração na quantidade de autovalores. De maneira geral, a sensibilidade para ambos os sensores é bastante significativa e, conseqüentemente, danos estruturais podem ser detectados para um número reduzido de autovalores. Na Figura 74 são apresentados os resultados para SSA mantendo-se fixo o número de autovalores utilizados na reconstrução da série e variando-se o tamanho da matriz de trajetória. O tamanho das janelas da matriz de trajetória foi variado de 20, 50, 100, 250 e 500 componentes.

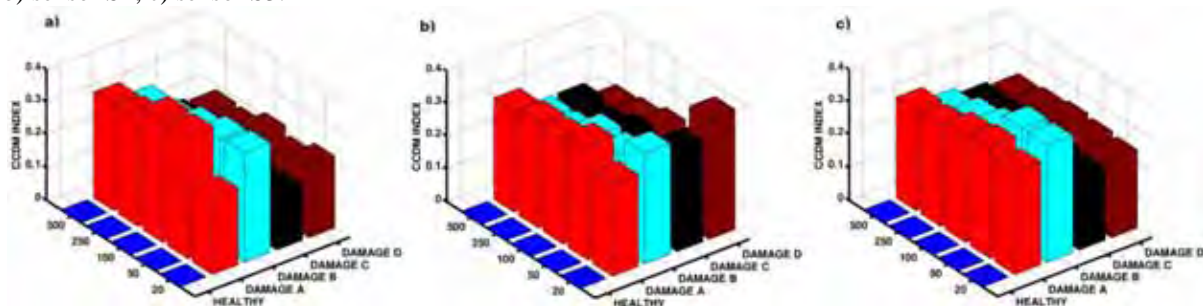
Figura 74 – Índices RMSD para SSA número de autovalores fixo e variação no tamanho da janela: a) sensor S1; b) sensor S2; c) sensor S3.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Observa-se que os índices RMSD, para todos os sensores e condições estruturais, considerando a variação no tamanho da janela da matriz de trajetória, pouco se alteram. Mesmo assim, é possível concluir que o sensor S2 apresentou maior sensibilidade para detecção de danos enquanto o sensor S3 apresentou o pior desempenho. Esse resultado já tinha sido mostrado também na seção 6.3. Na Figura 75 são apresentados os resultados para os índices CCDM.

Figura 75 - Índices CCDM para SSA número de autovalores fixo e variação no tamanho da janela: a) sensor S1; b) sensor S2; c) sensor S3.

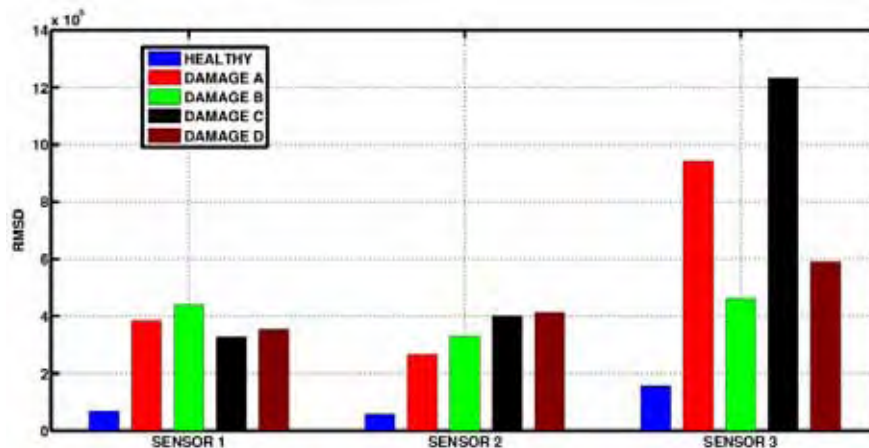


Fonte: Elaboração do próprio autor.

Estes resultados são similares aos apresentados pelos índices RMSD, ou seja, o tamanho da janela pouco influencia a detecção de danos estruturais.

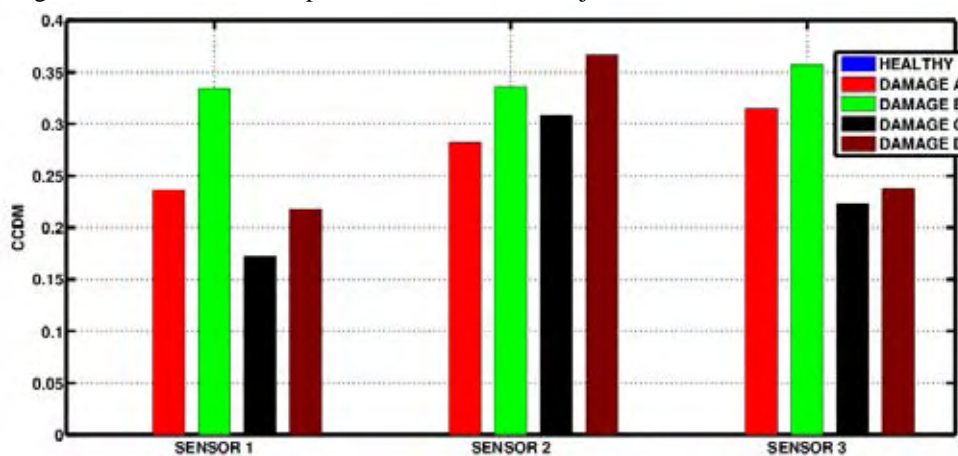
Analisando os resultados anteriores, conclui-se que o tamanho da janela da matriz de trajetória e o número de autovalores são praticamente irrelevantes no processo de detecção de danos estruturais para o método proposto. Também, é possível ter excelentes resultados na detecção de danos estruturais utilizando várias combinações de tamanhos de janelas e autovalores. Como exemplo, poder-se-ia aplicar SSA com uma janela de 20 para a matriz de trajetória e 10 autovalores na reconstrução da série temporal. Esses resultados são apresentados nas Figuras 66 e 77, considerando tanto o RMSD quanto o CCDM, respectivamente.

Figura 76 – Índices RMSD para SSA considerando a janela de 20 e 10 autovalores.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 77 - Índices CCDM para SSA considerando a janela de 20 e 10 autovalores.



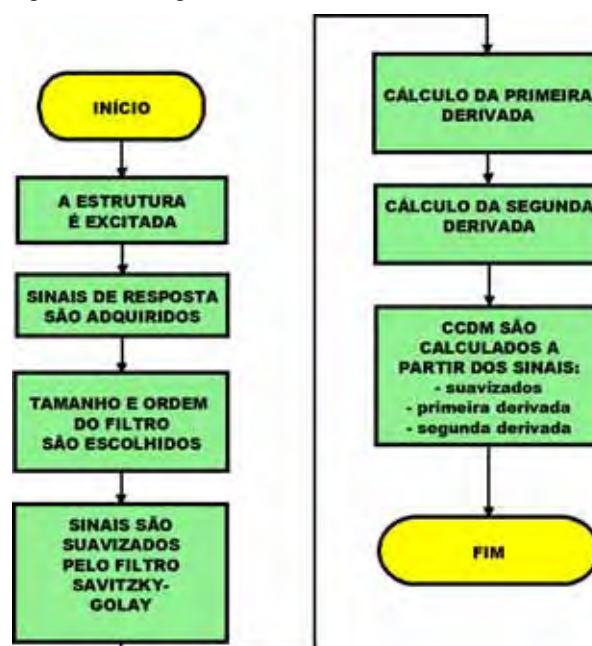
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Nessa condição, o tempo de processamento de todos os dados, incluído todos os sensores e todos os danos e cálculo dos índices CCDM e RMSD, no Matlab foi de, aproximadamente, 29 segundos. Por outro lado, se considerar uma janela de 100 componentes e 10 autovalores, esse número aumenta para aproximadamente 44 segundos. As Figuras 76 e 77 mostram que todos os danos podem ser detectados com precisão tanto para os índices CCDM quanto para os RMSD. No entanto, esse método não dá subsídio quanto à localização do dano na estrutura analisada.

6.5 Resultados para Savitzky-Golay

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos para a técnica baseada nos filtros de Savitzky-Golay (SG) considerando três análises distintas: sinal suavizado pelo filtro SG, primeira derivada e segunda derivada - calculadas a partir dos sinais suavizados. A metodologia utilizada nessa seção calcula as métricas CCDM considerando como referência o sinal íntegro (*baseline*). O diagrama apresentado na Figura 78 mostra de forma resumida o procedimento adotado. A estrutura utilizada nos testes é a mesma apresentada na Figura 54, assim como o sistema de aquisição de dados (Figura 53). Também, o procedimento de excitação e aquisição dos sinais de resposta possuem a mesma configuração apresentada na seção 6.1 (princípio da função de coerência).

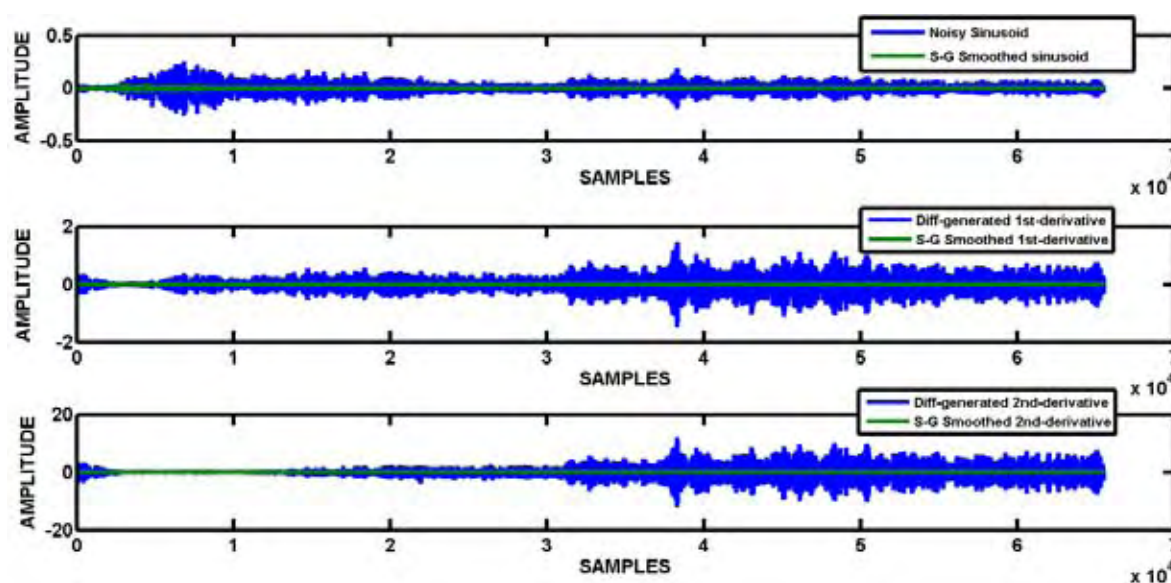
Figura 78 – Diagrama resumido do método baseado nos filtros de Savitzky-Golay.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os parâmetros do filtro SG foram determinados de forma empírica e consiste em um polinômio de ordem $d=4$ e um filtro com uma janela de comprimento $N=111$ pontos. Importante salientar que a ordem d deve ser menor que o comprimento do filtro N , e deve ser ímpar para garantir a simetria do filtro. Os sinais de resposta da estrutura, de acordo com o Cenário 1 (Quadro 1), foram filtrados utilizando o filtro de SG projetado. O sinal para o sensor 4, considerando o dano D (original) e o correspondente sinal suavizado após filtragem (Equação (59)), são apresentados no primeiro gráfico da Figura 79. O sinal suavizado foi derivado utilizando a Equação (60) e sua resposta é apresentada no segundo gráfico da Figura 79. Também foi determinada a segunda derivada a partir do sinal suavizado. Esse último resultado é apresentado no terceiro gráfico da Figura 79. As diferenças apresentadas nos gráficos da Figura 79 são em relação ao sinal original.

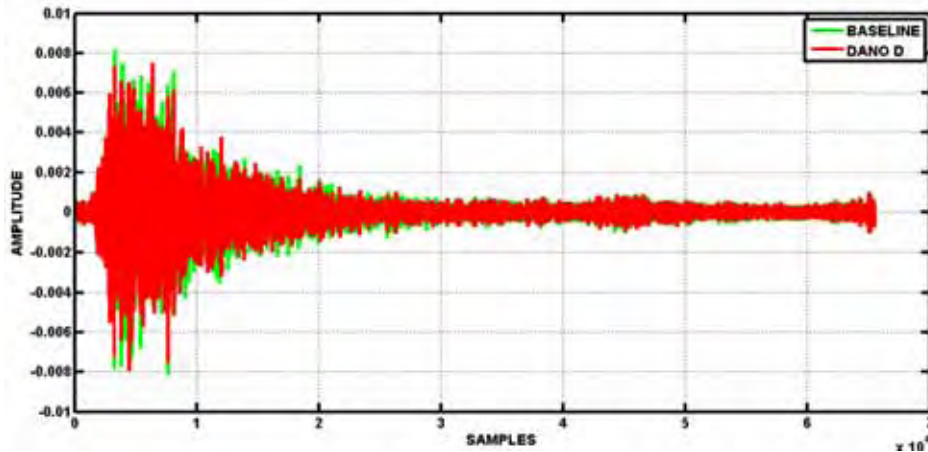
Figura 79 – Ilustração contendo os sinais: original, suavizados pelo filtro SG, primeira derivada, segunda derivada e resíduos.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na Figura 80 é apresentado o sinal resultante da segunda derivada para o sensor S1, considerando duas condições estruturais distintas: *baseline* e dano D. Nota-se que a diferença entre os dois sinais é bastante acentuada e isso facilita o processo de detecção de danos estruturais a partir das métricas CCDDM calculadas a partir dos sinais resultantes da segunda derivada.

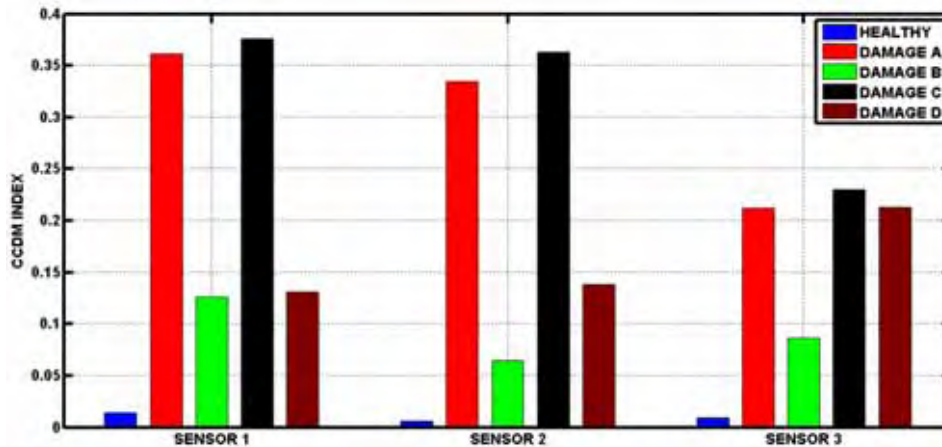
Figura 80 – Sinais para S1 após aplicação da segunda derivada em duas condições estruturais: *baseline* e dano D.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Considerando o sinal de resposta da estrutura íntegra (*baseline*) como referência, as métricas CCDM foram calculadas para todos os sensores (S1, S2 e S3) e para todas as condições estruturais (íntegra, dano A, dano B, dano C e dano D) a partir dos sinais suavizados pelo filtro SG, primeira e segunda derivadas. Na Figura 81 são apresentados os resultados para o sinal suavizado pelo filtro SG.

Figura 81 – Índices CCDM para todos os sensores e condições estruturais após suavização pelo filtro SG.

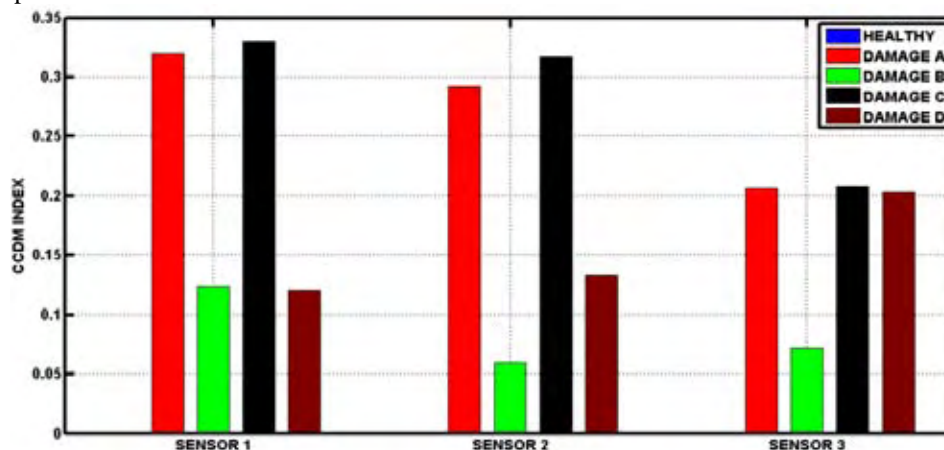


Fonte: Elaboração do próprio autor.

Verifica-se que os danos estruturais podem ser detectados facilmente e que o dano A foi detectado por todos os sensores com boa sensibilidade. Como era de se esperar, o sensor 2 também detectou bem o dano C enquanto o sensor 3 detectou todos os danos, exceto o dano B. Embora o dano B tenha sido que menos influenciou a detecção de danos para todos os sensores, nota-se, mesmo assim, que a diferença dele para a condição íntegra é bastante significativa, que mostra a eficácia do método na detecção de danos estruturais.

Na Figura 82 são apresentados os resultados dos índices CCDM, para todos os sensores e condições estruturais, calculados após o sinal suavizado (filtro SG) ter sido submetido a uma derivada de ordem 1 (Equação (61)).

Figura 82 – Índices CCDM para todos os sensores e condições estruturais após aplicação da primeira derivada.

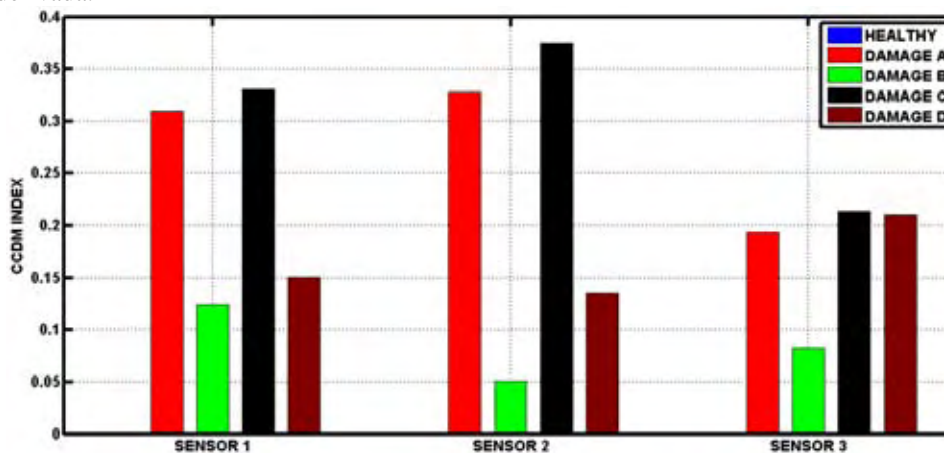


Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os resultados apresentados na Figura 82 são similares aos apresentados na Figura 81, mas é possível constatar uma melhor sensibilidade na detecção dos danos, quando comparada com o resultado anterior.

Na Figura 83 são apresentados os resultados para as métricas CCDM, para todos os sensores e condições estruturais, calculadas a partir do sinal da segunda derivada. Os resultados apresentados na Figura 83 também são similares aos apresentados nas duas Figuras anteriores.

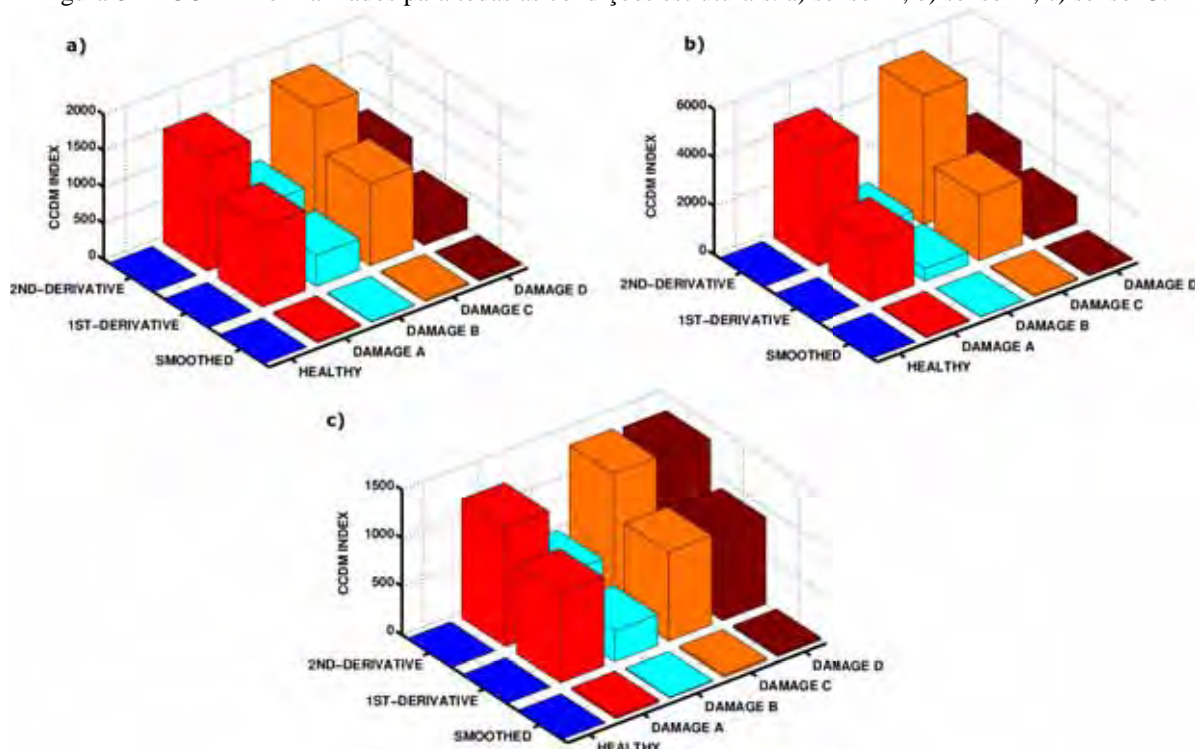
Figura 83 - Índices CCDM para todos os sensores e condições estruturais após aplicação da segunda derivada.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A fim de comparar a sensibilidade entre os três procedimentos adotados nessa seção, a Figura 84 apresenta em uma mesma escala todos os resultados. Na Figura 84 são apresentados os resultados para todos os sensores e condições estruturais: a) para o sensor 1, b) para o sensor 2 e c) para o sensor 3.

Figura 84 – CCDM normalizados para todas as condições estruturais: a) sensor 1; b) sensor 2; c) sensor 3.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Analisando-se a Figura 84, nota-se que, para todos os sensores, os resultados com a segunda derivada são melhores quando comparados aos demais procedimentos. Já os resultados com a primeira derivada são melhores do que os resultados com o sinal somente suavizado. Pode-se ver ainda que os resultados para todos os sensores são bem parecidos. Além disso, o sensor S2 possui melhor sensibilidade quando comparado aos demais, o que pode ser devido ao fato de estar na mesma linha do sensor de excitação X. O dano A, por estar na proximidade do sensor de excitação X, foi detectado com sucesso por todos os sensores (vide Figura 54). Como era de se esperar, o dano C, que também está na mesma direção do sensor X, porém mais próximo do sensor S2, foi bem detectado por todos os sensores. O sensor S3 detectou bem o dano D, pois o dano está bem próximo ao referido sensor. Esperava-se que o dano B fosse bem detectado pelo sensor S1, porém isso não ocorreu.

6.6 Conclusões

Neste capítulo foram apresentados novos métodos para análise de SHM baseado no princípio da função de coerência, nos quais um PZT foi utilizado para excitar a estrutura e outros três para captar o sinal de resposta. O primeiro método é baseado na análise de componentes principais (*scores*), sendo que essas foram calculadas diretamente a partir dos sinais no domínio do tempo. Esses resultados mostraram que o sinal de excitação, utilizado no cálculo das PC, praticamente não contribui para a identificação de danos estruturais na metodologia proposta. Com relação ao efeito na variação de temperatura, pode ser observado que a metodologia apresentada pode contribuir para a diferenciação entre dano e efeitos de temperatura. Para o método baseado nos pesos das componentes principais (PCC), nota-se que os resultados possuem excelente sensibilidade, principalmente quando os índices RMSD são somados. Como era de se esperar, o sensor S2 possui maior sensibilidade na detecção de danos estruturais. Para o método baseado na SSA os resultados mostraram que a sensibilidade também é muito boa, mesmo com poucos autovalores utilizados na reconstrução da série temporal. Também, os índices CCDM apresentaram melhor sensibilidade para detecção de danos quando comparados com os RMSD. Os resultados para o método que utiliza os filtros de Savitzky-Golay também foram bons e mais uma vez os danos A e C, que estão localizados na mesma linha do atuador X e sensor S2, foram detectados com maior sensibilidade, embora os demais danos B e D também tenham sido detectados com precisão.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são apresentadas as considerações finais para as metodologias propostas neste trabalho, assim como as perspectivas para realização de trabalhos futuros.

7.1 Conclusões

O objetivo deste trabalho foi desenvolver novas metodologias de análise da integridade estrutural utilizando os sinais de resposta do conjunto PZT/estrutura diretamente no domínio do tempo, obtidos a partir de transdutores PZT acoplados à estrutura a ser monitorada, sem necessidade de modelos matemáticos estruturais. Ao longo do texto vários métodos aplicados a SHM foram desenvolvidos baseados na técnica da impedância eletromecânica e no princípio da função de coerência. Testes práticos foram realizados com todos os métodos e os resultados demonstraram a efetividade dessas técnicas na detecção de danos estruturais. Todos os métodos desenvolvidos neste trabalho, no domínio do tempo, são originais e podem contribuir significativamente para a detecção de danos em estruturas nas quais os métodos tradicionais, tais como a EMI, por exemplo, apresentam baixa sensibilidade.

No Capítulo 4, foi apresentada uma nova forma para detecção de falhas no domínio do tempo baseada no método da EMI. Para isso, foram utilizadas duas ferramentas matemáticas diferentes: modelo AR e análise de componentes principais (PCA). Para a metodologia proposta, os transdutores PZT são usados tanto para excitar a estrutura (atuador) quanto para receber o sinal de resposta da estrutura (sensor). Nessa metodologia, para ambas as ferramentas, faz-se necessário o uso de um sinal de referência (*baseline*) para determinação dos resultados. Os resultados foram determinados com base nos índices estatísticos RMSD e CCDM.

Os resultados, para o modelo AR, demonstraram que é possível identificar danos estruturais a partir da utilização dos coeficientes do modelo AR. Contudo, o RMSD para o 8º coeficiente mostrou-se mais propício para detecção de danos estruturais. Também, os resultados experimentais para a metodologia utilizando AR possuem ganhos em termos de

sensibilidade quando comparados com resultados obtidos com métodos tradicionais no domínio da frequência (FRF).

Já os resultados com análise de componentes principais foram obtidos utilizando-se tanto os índices RMSD quanto os CCDM. Os resultados dos índices RMSD e CCDM mostraram-se extremamente mais sensíveis quando comparados com os obtidos com o método da EMI. Tal eficiência também foi confirmada com os coeficientes do modelo AR.

O Capítulo 5 apresentou dois novos métodos para a detecção de danos em estruturas, explorando o princípio da impedância eletromecânica, aplicado a um painel aeronáutico de alumínio. Esses métodos são únicos e baseiam-se na análise do sinal no domínio do tempo, utilizando diretamente os pesos calculados a partir das PC e também a rotação dos mesmos. Os dois métodos mostraram-se bem mais sensíveis do que métodos que exploram a EMI baseada na FRF. Isso representa uma vantagem importante, pois facilita a escolha de um *threshold* durante o processo de detecção de danos. Também, o método baseado na rotação de pesos reduz consideravelmente a operações matemáticas necessárias para detectar danos, pois somente o primeiro fator é usado para cálculo dos índices RMSD. Para os métodos, os índices RMSD são calculados apenas entre dois valores, para cada condição, enquanto para o método baseado na EMI utilizam-se 65.000 valores para a mesma condição estrutural.

Sumarizando, os resultados mostraram que as metodologia propostas com base no princípio da EMI podem ser utilizadas para detecção de danos, pois apresentam resultados semelhantes ou até melhores, em termo de sensibilidade, do que a tradicional EMI. A principal vantagem dos métodos propostos não necessita do cálculo da FRF ou da EMI, pois a análise é realizada diretamente no domínio do tempo. Diferentemente da técnica baseada na FRF/EMI, os métodos aqui propostos não utilizam o sinal de excitação nos cálculos matemáticos, o que é uma grande vantagem, pois reduz a quantidade de operações durante o processamento dos sinais.

No Capítulo 6, foi proposta uma nova metodologia para análise de SHM no domínio do tempo. Essa metodologia é diferente da baseada na EMI, pois um PZT foi utilizado para excitar a estrutura e outros três para captar o sinal de resposta da estrutura a ser monitorada. Porém, é difícil comparar esses resultados com outros trabalhos, pois essa metodologia tem sido pouco explorada na literatura.

Para a metodologia baseada no princípio da função de coerência, as componentes principais foram calculadas diretamente a partir dos sinais no domínio do tempo. A partir das PC, foram calculados os índices CCDM e os resultados desses índices foram analisados

considerando a presença e a ausência do sinal de excitação. A partir desses resultados, pode-se observar que o sinal de excitação, utilizado no cálculo das PC, praticamente não contribui para a identificação de danos estruturais para a metodologia proposta. Adicionalmente, pode-se observar, a partir dos resultados, que qualquer componente principal pode ser utilizada na detecção de danos estruturais. A soma dos índices CCDM pode incrementar significativamente a sensibilidade do método proposto na detecção de danos. Com relação ao efeito na variação de temperatura ambiente, pode-se observar que a metodologia apresentada pode contribuir para a diferenciação entre dano e efeitos de temperatura.

Para o método baseado nos pesos das componentes principais, nota-se que os resultados possuem excelente sensibilidade, principalmente quando os índices RMSD são somados. Além do mais, como era de se esperar, o sensor S2 mostrou-se mais sensível na detecção de danos estruturais. Uma grande vantagem desse método, em relação ao apresentado no parágrafo anterior, consiste no fato de os sensores serem analisados separadamente, o que pode proporcionar uma noção a cerca da posição espacial do dano na estrutura. Para essa metodologia, o pior resultado foi obtido quando foram consideradas as somas dos pesos das componentes principais antes de computar os índices RMSD.

Os resultados para SSA desmontaram que danos estruturais podem ser detectados com precisão mesmo utilizando poucos autovalores no processo de reconstrução da série temporal. Adicionalmente, conclui-se que o tamanho da janela da matriz de trajetória e o número de autovalores são praticamente irrelevantes no processo de detecção de danos estruturais para o método proposto. Também, é possível ter excelentes resultados na detecção de danos estruturais utilizando várias combinações de tamanhos de janelas e autovalores. Além disso, os índices CCDM apresentaram melhor sensibilidade para detecção de danos quando comparados com os RMSD. A deficiência apresentada por esse método consiste no fato da perda das informações referentes à localização espacial dos danos na estrutura monitorada.

Para o método que utiliza os filtros de Savtzy-Golay, os resultados também mostraram que o mesmo é viável para a detecção de danos estruturais. O melhor resultado, em termos de sensibilidade, foi alcançado para o cálculo dos índices CDDM computados a partir da segunda derivada. Resultados também satisfatórios foram obtidos coma primeira derivada e com o sinal suavizado. Os resultados utilizando os filtros de SG demonstraram que os danos A e C, que estão a mesma linha do transdutor X e do sensor S2, foram detectados com maior precisão quando comparados com os demais.

7.2 Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para trabalhos, os seguintes tópicos podem ser explorados:

- (1) - Considerando a metodologia baseada nas PC, na qual todos os sensores são analisados conjuntamente, pode-se avaliar a possibilidade de detecção de danos sem o uso do *baseline*. Para isso, análises minuciosas das matrizes de correlação entre os sinais de resposta provenientes dos vários sensores com o sinal de excitação podem fornecer resultados significativos.
- (2) - Estudar novas formas de compensação dos efeitos de temperatura no domínio do tempo considerando o fato de que enquanto no domínio da frequência há um deslocamento da EMI em amplitude e frequência (BAPTISTA; VIEIRA FILHO; INMAN, 2012). No domínio do tempo a variação na temperatura provoca uma redução significativa na amplitude dos sinais de resposta.
- (3) - Investigar quão sensíveis são os coeficientes do modelo AR as variações da temperatura ambiente, assim como a influência do número de coeficientes na detecção de danos estruturais, conforme trabalho desenvolvido por Figueiredo et al. (2011).
- (4) - Ainda com relação à compensação de temperatura, os métodos baseados em análise fatorial (FA) poderiam ser utilizados considerando rotações de pesos oblíquas, ao invés da ortogonal, de forma a rotacionar os sinais (na condição íntegra) com variação de temperatura até atingir os sinais do baseline. Uma alternativa a ser considerada para solução desse problema seria a utilização da rotação conhecida como Promax ao invés do Varimax.
- (5) – Para métodos de compensação de temperatura, os filtros de Savitzky-Golay conjuntamente com o uso da primeira e segunda derivadas poderiam ser utilizados na etapa de pré-processamento de sinais de forma a eliminar offsets causados pela variação de temperatura. Para isso, podem-se estudar as características da banda de atenuação dos filtros assim como a ordem dos mesmos.
- (6) - Desenvolver um modelo matemático que represente a interação PZT/estrutura, no domínio do tempo, como forma de comprovar os resultados apresentados no presente trabalho, assim como os outros citados na revisão de literatura.
- (7) - Aplicar os métodos propostos em material composto, pois já foram realizados alguns experimentos nesses materiais baseado na FRF/EMI e o resultado para detecção de danos

foi extremamente pobre. Logo, considerando o fato dos métodos no domínio do tempo serem mais sensíveis quando comparado com os métodos no domínio da frequência, poder-se-ia utilizá-los como alternativa aos baseados na FRF na detecção de danos estruturais nesses materiais.

- (8) - Considerando o método baseada na FC, podem ser realizados novos testes considerando outras formas de estrutura a fim de verificar o comportamento da propagação de onda na estrutura e os mecanismos de interação dessa com os danos e as fronteiras. Nesse sentido, podem-se aplicar métodos numéricos de propagação de ondas tais como os utilizados no trabalho desenvolvido por Lee e Staszewsk (2007).
- (9) - Para a localização espacial dos danos estruturais, pode-se utilizar análise de fatores e/ou outras técnicas de análise de agrupamentos, como por exemplo, distância euclidiana.
- (10) - Investigar os motivos que proporcionam maior sensibilidade no domínio do tempo quando comparado com o da frequência. Para isso poder-se-ia desenvolver modelos matemáticos baseados nas técnicas desenvolvidas nesse trabalho.

REFERÊNCIAS

- ADAMS, D. E.; FARRAR, C. R. Classifying linear and nonlinear structural damage using frequency domain ARX models. **Structural Health Monitoring**, London, v. 1, n. 2, p. 185-201, 2002.
- ADAMS, D. E.; FARRAR, C. R. Damage indicator defined as the distance between ARMA models for structural health monitoring. **Structural Health Monitoring**, London, v. 15, n. 7, p. 992-1005, 2007.
- AGUIRRE, L. A. **Introdução à identificação de sistemas: técnicas lineares e não-lineares aplicadas a sistemas reais**. Belo Horizonte: EdUFMG, 2007. 728 p.
- ANNAMDAS, V. G. M.; SOH, C. K. Application of Electromechanical impedance technique for engineering structures: review and future issues. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, London, v. 21, n. 1, p. 41-59, 2009.
- 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. Transducer loading effect on the performance of PZT-based SHM systems. **Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on**, New York, v. 57, n. 4, p. 933-941, 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, 2010.
- BAPTISTA, F. G.; VIEIRA FILHO, J.; INMAN, D. J. Sizing PZT transducers in Impedance-based structural health monitoring. **Sensors Journal, IEEE**, New York, v. 11, n. 6, p. 1405-1414, 2011.
- BAPTISTA, F. G.; VIEIRA FILHO, J.; INMAN, D. J. Real-time multi-sensors measurement system with temperature effects compensation for impedance-based structural health monitoring. **Structural Health Monitoring**, London, v. 11, n. 2, p. 173-186, 2012.
- BARTLETT, M. S. Properties of sufficiency and statistical tests. **Proceedings of the Royal Society of London Series**, London, v. A, n. 160, p. 268-282, 1937.

- BHALLA, S.; KIONG SOH, C. Structural impedance based damage diagnosis by piezo-transducers. **Earthquake Engineering & Structural Dynamics**, New Jersey, v. 32, n. 12, p. 1897-1916, 2003.
- 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, s/n, 2003, Bangalore/ India. **Proceedings...**Bangalore/India: SPIE Digital Library, 2003. v. 5062, p. 263-269.
- BOLLER, C. Ways and options for aircraft structural health management. **Smart Materials and Structures**, Bristol, v. 10, n. 3, p. 432-439, 2001.
- BOLLER, C.; STASZEWSKI, W. J. **Health monitoring of aerospace structures: smart sensor technologies and signal processing, an introduction to damage prognosis**. Munich: John Wiley & Sons, 2004. 266 p.
- BOX, G. E. P.; JENKINS, G. M. **Times series analysis forecasting and control**. Aokland: Holden - Day, 1976. 573 p.
- BRAND, C.; BOLLER, C. Identification of cycle cost reduction in structures with self-diagnostic devices. In: SYMPOSIUM ON DESIGN FOR LOW COST OPERATION AND SUPPORT, 37, 1999, Ottawa. **Proceedings...** Ottawa: RTO MP-37, 1999. p. 1-8.
- CORTEZ, N. E.; VIEIRA FILHO, J.; BAPTISTA, F. G. A new microcontrolled structural health monitoring system based on the electromechanical impedance principle. **Structural Health Monitoring**, London, v. 1, n. 2, p. 1-9, 2012.
- DERAEMAERKER, A.; REYNDERS, E.; DE ROECK, G.; KULLAA, J. Vibration-based structural health monitoring using output-only measurements under changing environment. **Mechanical Systems and Signal Processing**, Amsterdam, v. 22, n. 1, p. 34-56, 2008.
- FARRAR, C. R.; LIEVEN, N. A. J.; BEMEND, M. T. An introduction to damage prognosis. In: **AUTOR. Damage Prognosis for aerospace, civil and mechanical systems**. Bristol: John Wiley & Sons, 2005. p. 1-12.
- FASEL, T. R.; SOHN, H.; PARK, G.; FARRAR, C. R. Active sensing using impedance-based arx models and extreme value statistics for damage detection. **Earthquake Engineering and Structural Dynamics**, New Jersey, v. 34, n. 7, p. 773 - 785, 2005.

FIGUEIREDO, E.; FIGUEIRAS, J.; PARK, G.; FARRAR, C. R.; WORDEN, K. Influence of the autoregressive model order on damage detection. **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering**, New Jersey, v. 26, n. 3, p. 225–238, 2011.

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.

FLIGHTGLOBAL. **Ageing airliner census 1999**. London: FlightGlobal, 1999. 15 p.

GIBBONS, J. D.; CHAKRABORTI, S. **Nonparametric statistical inference**. 4. ed. New York: Marcel Dekker, 2003. 645 p.

GIURGIUTIU, V.; ZAGRAI, A. N.; BAO, J. J. Piezoelectric wafer embedded active sensor for aging aircraft structural health monitoring. **Structural Health Monitoring**, London, v. 1, n.1, p. 41–62, 2002.

GREEN, R.; NGUYEN, T. **A Handbook of time-series analysis, signal processing and dynamics**. Waltham: Academic Press, 1999. 848 p.

GUL, M.; CATBAS, F. N. Structural health monitoring and damage assessment using a novel time series analysis methodology with sensor clustering. **Journal of Sound and Vibration**, Amsterdam, v. 330, n. 6, p. 1196-1210, 2011.

HAJRYA, R.; VERGÉ, M.; MECHBAL, N. Active damage detection and localization applied to a composite structure using piezoceramic patches. In: CONFERENCE ON CONTROL AND FAULT TOLERANT SYSTEMS, 10., 2010, Nice. **Proceedings...** Nice: IEEE Explore, 2010. p. 849-854.

HASSANI, H. Singular spectrum analysis: methodology and comparison. **Journal of Data Science**, New York, v. 5, n. 2, p. 239-257, 2007.

HIDALGO, E.; MUNOZ, F.; DE MIER, A. G.; CARVAJAL, R. G.; TORRALBA, A.; CASTRO, R.; GALLEGO, R. Wireless structural health monitoring system based on Autoregressive models. In: ANNUAL CONFERENCE ON IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS SOCIETY- IECON, 38., 2012, Montreal. **Proceedings...** Montreal: IEEE Explore, 2012. p. 6035-6040.

HONORATO, F. A.; BARROS NETO, B. D.; MARTINS, M. N.; GALVÃO, R. K. H.; PIMENTEL, M. F. Transferência de calibração em métodos multivariados. **Química Nova**, São Paulo, v. 30, n. 5, p. 1301-1312, 2007.

HU, Y.; YANG, Y. Wave propagation modeling of the PZT sensing region for structural health monitoring. **Smart Materials and Structures**, Bristol, v. 16, n. 3, p. 706 – 716, 2007.

IRINA, T. An inverse vibration-based approach towards modelling and damage identification in nonlinearly vibrating structures. Application for delamination detection in a composite beam. **Journal of Physics: Conference Series**, Glasgow, v. 382, n. 1, p. 012030, 2012.

JOLLIFFE, I. T. **Principal component analysis**. 2. ed. New York: Spring, 2002. 518 p.

KAISER, H. F. A Second generation little jiffy. **Psychometrika**, London, v. 34, n. 4, p. 401–415, 1970.

KERSCHEN, G.; GOLINVAL, J. C. Physical interpretation of the proper orthogonal modes using the singular value decomposition. **Journal of Sound and Vibration**, Amsterdam, v. 249, n. 5, p. 849-865, 2002.

KOO, K.-Y.; PARK, S.; LEE, J.-J.; YUN, C.-B. Automated impedance-based structural health monitoring incorporating effective frequency shift for compensating temperature effects. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, London, v. 20, n. 4, p. 367-377, 2009.

KOO, K. Y.; PARK, S.; LEE, J. J.; YUNA, C. B.; INMAN, D. J. Impedance-based structural health monitoring considering temperature effects. In: HEALTH MONITORING OF STRUCTURAL AND BIOLOGICAL SYSTEMS, 2007, San Diego. **Proceedings...** San Diego: SPIE Library Online, 2007. v. 6532, p. 1- 9.

KULLAA, J. Is temperature measurement essential in structural health monitoring? In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON STRUCTURAL HEALTH MONITORING, 4., 2003, Stanford. **Workshop...** Stanford: Onera DEStech, 2003. p. 717–724.

LÄMSÄ, V.; RAIKO, T. Novelty Detection by nonlinear factor analysis for structural health monitoring. In: IEEE INTERNATIONAL WORKSHOP ON MACHINE LEARNING FOR SIGNAL, 5., 2010, Kittilä. **Processing...** Kittilä: IEEE Explore, 2010. p. 468–473

- LEE, B. C.; STASZEWSK, W. J. Lamb wave propagation modeling for damage detection: I. two-dimensional analysis. **Smart Material and Structures**, Bristol, v. 16, n. 2, p. 249-259, 2007.
- LEI, Y.; KIREMIDJIAN, A. S.; NAIR, K. K.; LYNCH, J. P.; LAW, K. H.; KENNY, T. W.; CARRYER, E.; KOTTAPALLI, A. Statistical damage detection using time series analysis on a structural health monitoring benchmark problem. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLICATIONS OF STATISTICS AND PROBABILITY IN CIVIL ENGINEERING, 9., 2003, San Francisco. **Proceedings...** San Francisco: San Diego University, 2003. p. 1-7.
- LEWIS, C. **Commercial Fleet Forecast, Global: 2012-2031**. London: FlighGlobal, 2012. 8 p.
- 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.
- LIM, H. J.; KIM, M. K.; SOHN, H.; PARK, C. Y. Impedance based damage detection under varying temperature and loading conditions. **NDT International**, Amsterdam, v. 44, n. 8, p. 740-750, 2011.
- LOH, C.-H.; CHEN, C.-H.; HSU, T.-Y. Application of advanced statistical methods for extracting long-term trends in static monitoring data from an arch dam. **Structural Health Monitoring**, London, v. 10, n. 6, p. 587-601, 2011.
- LOH, C. H.; CHEN, C. H.; MAO, C. H. Detecting seismic response signals using singular spectrum analysis. In: SENSORS AND SMART STRUCTURES TECHNOLOGIES FOR CIVIL, MECHANICAL, AND AEROSPACE SYSTEMS, s/n, 2010, San Diego. **Proceedings...** San Diego: SPIE Online Library, 2010. v.7647, p. 1-12.
- LOPES JUNIOR, V.; PARK, G.; CUDNEY, H. H.; INMAN, D. J. Impedance-based structural healthy with artificial neural networks. . **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, London, v. 11, n. 3, p. 206-214, 2000.
- LUO, J.; YING, K.; HE, P.; BAI, J. Properties of Savitzky-Golay digital differentiators. **Digital Signal Process**, Orlando, v. 15, n. 2, p. 122-136, 2005.

LYNCH, J. P.; SUNDARARAJAN, A.; LAW, K. H.; KIREMIDJIAN, A. S. Embedding Algorithms Wireless Structural System. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES AND NEW CHALLENGES IN EARTHQUAKE ENGINEERING RESEARCH, 2., 2002, Hong Kong. **Proceedings...** Hong Kong: Icanceer, 2002. p. 1- 8.

MAL, A. R.; BANERJEE, S.; SHIH, F. A Conceptual structural health monitoring system based on vibration and wave propagation. **Structural Health Monitoring**, London, v. 4, n. 3, p. 283-293, 2005.

MANSON, G. Identifying damage sensitive, environment insensitive features for damage detection. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON IDENTIFICATION IN ENGINEERING SYSTEMS, 3., 2002, Swansea. **Proceedings...** Swansea: Institute of Physics Publishing, 2002. p. 187-197.

MIN, J.; PARK, S.; YUN, C.-B.; LEE, C.-G.; LEE, C. Impedance-based structural health monitoring incorporating neural network technique for identification of damage type and severity. **Engineering Structures**, Amsterdam, v. 39, n.1, p. 210-220, 2012.

MIRMONEMI, M.; LUCAS, C.; ARAABI, B. N.; MOSHIRI, B.; BIDAR, M. R. Recursive spectral analysis of natural time series based on eigenvector matrix perturbation for online applications. **IET Signal Processing**, New York, v. 5, n. 6, p. 515-526, 2011.

MOHEIMANI, S. O. R.; FLEMING, A. J. **Piezoelectric transducers for vibration control and damping**. London: Springer, 2006. 203 p.

MORROW, D. K.; FAFARD, A. **World airliner census**. London: FlighGlobal, 2011. 28 p.

MUJICA, L. E.; VEHI, J.; RUIZ, M.; VERLEYSSEN, M.; STASZEWSKI, W.; WORDEN, K. Multivariate statistics process control for dimensionality reduction in structural assessment. **Mechanical Systems and Signal Processing**, Amsterdam, v. 22, n. 1, p. 155-171, 2008.

MURUGANATHAM, B.; SANJITH, M. A.; KRISHNAKUMAR, B.; SATYA MURTY, S. A. V. Roller element bearing fault diagnosis using singular spectrum analysis. **Mechanical Systems and Signal Processing**, Amsterdam, v. 35, n. 1-2, p. 150-166, 2013.

ORFANIDIS, S. J. **Introduction to signal processing**. New Jersey: Prentice Hall, 2010. 783 p.

PARK, G.; CUDNEY, H. H.; INMAN, D. J. An integrated health monitoring technique using structural impedance sensors. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, London, v. 11, n. 6, p. 448-455, 2000.

PARK, G.; INMAN, D. J. Structural health monitoring using piezoelectric impedance measurements. **Philosophical Transactions of Royal Society**, London, v. 365, n. 1851, p. 373-392, 2007.

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

PARK, S.; LEE, J. J.; YUN, C. B.; INMAN, D. J. Electro-mechanical impedance-based wireless structural health monitoring using pca-data compression and k-means clustering algorithms. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, London, v. 19, n. 4, p. 509-520, 2007.

PENNEY, S. **Geriatric ward**. London: FlightGlobal, 2000. 10 p.

RABINER, L. R.; GOLD, B. **Theory and application of digital signal processing**. Englewood Cliffs: Pratince - Hall, 1975. 762 p.

RENCHER, A. C. **Methods of multivariate analysis**. 2. ed. New York: John Wiley and Sons, 2002. 727 p.

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.

SAAR, T. Robust piezo impedance magnitude measurement method. **Electronics and Electrical Engineering**, Tallinn, v. 7, n. 113, p. 107-110, 2011.

SAVITZKY, A.; GOLAY, M. J. E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. **Analytical Chemistry**, Washington, v. 36, n. 8, p. 1627-1639, 1964.

SILVA, S. **Detecção de danos estruturais usando análise de séries temporais e atuadores e sensores piezelétricos**. 2008. 157 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica)- Departamento de Engenharia Mecânica, Univesidade Esatdual de Campinas- UNICAMP, Campinas, 2008.

SILVA, S.; DIAS JUNIOR, M.; LOPES JUNIOR, V. Structural health monitoring in smart structures through time series analysis. **Structural Health Monitoring**, London, v. 7, n. 3, p. 231-244, 2008.

- SILVA, S.; DIAS JUNIOR, M.; LOPES JUNIOR, V.; BRENNAN, M. J. Structural damage detection by fuzzy clustering. **Mechanical Systems and Signal Processing**, Amsterdam, v. 22, n. 7, p. 1636–1649, 2008.
- SOHN, H.; ALLEN, D. W.; WORDEN, K.; FARRAR, C. R. Structural damage classification using extreme value statistics. **Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control**, Los Alamos, v. 127, n. 1, p. 125–132, 2005.
- SOHN, H.; FARRAR, C. R. Damage diagnosis using time series analysis of vibration signals. **Smart Material and Structures**, Bristol, v. 10, n.3, p. 446–451, 2001.
- SOHN, H.; WORDEN, K.; FARRAR, C. R. Novelty detection under changing environmental conditions In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SMART STRUCTURES AND MATERIALS, 2001, Newport Beach. **Annual...** Newport Beach: SPIE Digital Library, 2001. v. 4330, p. 108-118.
- STASZEWSKI, W. J. Intelligent signal processing for damage detection in composite materials. **Composites Science and Technology**, London, v. 62, n. 7–8, p. 941-950, 2002.
- STASZEWSKI, W. J.; BOLLER, C. Acoustic wave propagation phenomena modelling and damage mechanical in ageing aircraft. In: AIRCRAFT INTEGRATED MONITORING SYSTEMS- AIMS, 1, 2002, Nashville. **Proceedings...** Nashville: Academy of Information and Management Sciences, 2002. p. 67-72.
- STASZEWSKI, W. J.; LEE, B. C.; TRAYNOR, R. Fatigue crack detection in metallic structures with lamb waves and 3D laser vibrometry. **Measurement Science and Technology**, Bristol, v. 18, n. 3, p. 727, 2007.
- STASZEWSKI, W. J.; READ, I. J.; FOOTE, P. D. Damage detection in composite materials using optical fibers: recent advances in signal processing. In. SPIE SMART STRUCTURES AND MATERIALS, s/n, 2000, Newport Beach. **Proceedings...** Newport Beach: SPIE Digital Library, 2000. v. 3985, p. 261-270.
- STASZEWSKI, W. J.; WORDEN, K. **Health monitoring of aerospace structures: smart sensor technologies and signal processing, an introduction to damage prognosis**. Munich: John Wiley & Sons, 2004. 266 p.
- 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.
- SUN, F. P.; CHAUDHRY, Z. A.; ROGERS, C. A.; MAJMUNDAR, M.; LIANG, C. Automated real-time structure health monitoring via signature pattern recognition. In: ,

SMART STRUCTURES AND MATERIALS, 1995, San Diego. **Proceedings...** San Diego: SPIE Online Library, 1995. v. 2443, p. 236-247.

THENOZHI, S.; WEN, Y.; GARRIDO, R. A novel numerical integrator for structural control and monitoring. In: INFORMATION REUSE AND INTEGRATION-IRI, IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON, 13., 2012, Las Vegas. **Conference...** Las Vegas: IEEE Explore, 2012. p. 680-686.

VASEGHI, S. V. **Advanced signal processing and noise reduction**. 2. ed. West Sussex: John Wiley & Sons, 2006. 493 p.

VICINI, L.; SOUZA, A. M. **Análise multivariada da teoria à prática**. 2005. 215 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Estatística)- Departamento de Estatística, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2005.

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.

WANG, S.; YOU, C. A circuit design for impedance-based structural health monitoring. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, London, v. 19, n. 9, p. 1029-1040, 2008.

WORDEN, K.; DULILEU -BARTON, J. M. Overview of intelligent fault detection in system and structures. **Structural Health Monitoring**, London, v. 3, n. 1, p. 85-98, 2004.

YAN, A. M.; KERSCHEN, G.; DE BOE, P.; GOLINVAL, J. C. Structural damage diagnosis under varying environmental conditions - Part II: local PCA for non-linear cases. **Mechanical Systems and Signal Processing**, Amsterdam, v. 19, n. 4, p. 865-880, 2005a.

YAN, A. M.; KERSCHEN, G.; DE BOE, P. D.; GOLINVAL, J. C. Structural damage diagnosis under varying environmental conditions – part I: a linear analysis. **Mechanical Systems and Signal Processing**, Amsterdam, v. 19, n. 4, p. 847-864, 2005b.

YODER, N. C.; ADAMS, D. E. Vibro-acoustic modulation utilizing a swept probing signal for robust crack detection. **Structural Health Monitoring**, London, v. 9, n. 3, p. 257-267, 2010.

ZAGRAI, A. N.; GIURGIUTIU, V. Electromechanical impedance modeling. In: BOLLER, C.; CHANG, F. K.; FUJINO, Y. (Ed.). **Encyclopedia of structural health monitoring**. Chichester: John Wiley & Sons, 2009. cap. 5, p. 1-19.

ZHOU, D.; KIM, J. K.; HA, D. S.; QUESENBERY, J. D.; INMAN, D. J. A system approach for temperature dependency of impedance-based structural health monitoring. In: SMART SENSOR PHENOMENA, TECHNOLOGY, NETWORKS AND SYSTEMS- SPIE, 2009, San Diego. **Proceedings...** San Diego: SPIE Digital Library, 2009. v. 7293, p.1-10.

APÊNDICE

Artigos aceitos, publicados e em submissão gerados a partir desta tese.

OLIVEIRA, M. A.; VIEIRA FILHO, J.; LOPES JUNIOR, V.; INMAN, D. J. Time-domain technique based on the electromechanical impedance principle for damage detection using principal component analysis and loadings rotation. **Mechanical Systems and Signal Processing**.

OLIVEIRA, M. A.; VIEIRA FILHO, J.; LOPES JUNIOR, V.; INMAN, D. J. A novel time-domain technique for damage detection applied to SHM using Savitzky-Golay filter. In: IWSHM: INTERNATIONAL WORKSHOP ON STRUCTURAL HEALTH MONITORING, 9., 2013, Stanford. **Proceedings...**Stanford: IWSHM.

OLIVEIRA, M. A.; VIEIRA FILHO, J.; LOPES JUNIOR, V.; INMAN, D. J. . Damage detection based on electromechanical impedance principle and principal components. In: IMAC: A CONFERENCE AND EXPOSITION ON STRUCTURAL DYNAMICS, 33., 2013, Garden Grove. **Proceedings...** Garden Grove: Springer, 2013. v. 7, p.1-8.

OLIVEIRA, M. A.; VIEIRA FILHO, J. Structural health monitoring based on AR models and PZT sensors. In: IEEE SENSORS, 11., 2012, Taipei, Taiwan. **Proceedings...** Taipei: IEEE Explore, 2012. p. 684-687.

OLIVEIRA, M. A.; VIEIRA FILHO, J. . Damage detection method applied to SHM using principal component analysis and loadings rotation. In: SYMPOSIUM ON INTELLIGENT MATERIALS AND CONTROL- SIMC, 4., 2012, Ilha Solteira. **Anais...** Ilha Solteira: SIMC/UNESP, 2012. p. 1-4.

OLIVEIRA, M. A.; VIEIRA FILHO, J. Monitoramento da integridade estrutural no domínio do tempo utilizando PZT e análise de componentes principais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 19., 2012, Campina Grande. **Anais...** Campina Grande: CBA, 2012. p. 2585-2592.