



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS – REGIONAL CATALÃO
UNIDADE ACADÊMICA ESPECIAL DE MATEMÁTICA E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM E OTIMIZAÇÃO



João Paulo Moreira Bento

**USO DAS CADEIAS DE MARKOV ASSOCIADO AO
MONITORAMENTO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL
BASEADO EM IMPEDÂNCIA ELETROMECHANICA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

CATALÃO – GO, 2018

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR
VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES E DISSERTAÇÕES
NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico: ☒ Dissertação ☐ Tese

2. Identificação da Tese ou Dissertação:

Nome completo do autor: JOÃO PAULO MOREIRA BENTO

Título do trabalho: *USO DAS CADEIAS DE MARKOV ASSOCIADO AO MONITORAMENTO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL BASEADO EM IMPEDÂNCIA ELETROMECÂNICA*

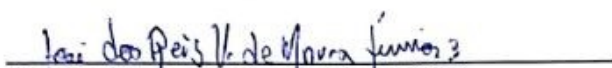
3. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento ☒ SIM ☐ NÃO¹

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF da tese ou dissertação.


Assinatura do(a) autor(a)²

Ciente e de acordo:


Assinatura do(a) orientador(a)²

Data: 02 / 05 / 2018

¹ Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

² A assinatura deve ser escaneada.

JOÃO PAULO MOREIRA BENTO

USO DAS CADEIAS DE MARKOV ASSOCIADO AO
MONITORAMENTO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL
BASEADO EM IMPEDÂNCIA ELETROMECÂNICA

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Modelagem e Otimização pela Universidade Federal de Goiás – Regional Catalão.

Orientador:
José dos Reis Vieira de Moura Júnior

CATALÃO – GO

2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Moreira Bento, João Paulo
USO DAS CADEIAS DE MARKOV ASSOCIADO AO
MONITORAMENTO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL BASEADO
EM IMPEDÂNCIA ELETROMECÂNICA [manuscrito] / João Paulo
Moreira Bento. - 2018.
XXVIII, 118 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. José dos Reis Vieira de Moura Júnior.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Unidade
Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia, Catalão,
Programa de Pós-Graduação em Modelagem e Otimização, Catalão, 2018.
Bibliografia. Apêndice.
Inclui siglas, abreviaturas, símbolos, gráfico, tabelas, algoritmos,
lista de figuras, lista de tabelas.

1. Monitoramento da Integridade Estrutural. 2. Materiais
Inteligentes. 3. Impedância Eletromecânica. 4. Otimização. 5. Cadeia de
Markov. I. Vieira de Moura Júnior, José dos Reis , orient. II. Título.

CDU 621

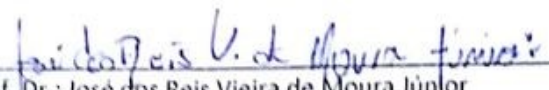


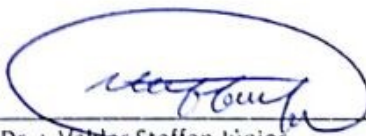
Defesa Nº _____

Ata de Defesa Pública – Dissertação de Mestrado

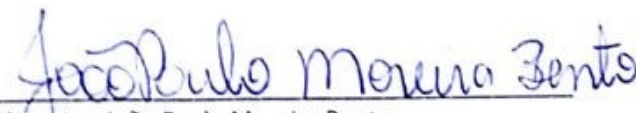
Aos 02 dias do mês de maio do ano de 2018, às 09h:00 min, reuniram-se os componentes da banca examinadora, professores(as) Dr. José dos Reis Vieira de Moura Júnior (presidente e Orientador), Dr. Valder Steffen Júnior e Dr. Romes Antônio Borges para, em sessão pública realizada na Sala de Reuniões (Centro Integrado de Pesquisa), da Regional Catalão (RC), da Universidade Federal de Goiás (UFG), procederem com a avaliação do trabalho intitulado: “Uso das Cadeias de Markov Associado ao Monitoramento da Integridade Estrutural Baseado em Impedância Eletromecânica”, em nível de Mestrado, área de concentração *Modelagem e Otimização*, de autoria de **João Paulo Moreira Bento**, discente do Programa de Pós-Graduação em Modelagem e Otimização (PPGMO) da UFG/RC. A sessão foi aberta pelo presidente da banca, que fez a apresentação formal dos membros da banca. A seguir, a palavra foi concedida ao discente que, dentro do tempo regulamentar, procedeu a apresentação de seu trabalho. Terminada a apresentação, cada membro da banca arguiu o candidato, tendo-se adotado o sistema de diálogo sequencial. Terminada a fase de arguição, procedeu-se a avaliação do trabalho. Os membros da banca consideraram o trabalho final: (☒) **Aprovado** ou (☐) **Reprovado**. Cumpridas as formalidades de pauta, às 11 h: 00 min a presidência da mesa encerrou a sessão e para constar, eu José dos Reis Vieira de Moura Júnior, lavrei a presente Ata que, depois de lida e aprovada, segue assinada pelos membros da banca examinadora e pelo discente e, posteriormente, será homologada pelo Colegiado do PPGMO.

Catalão-GO, 02 de maio de 2018.


Prof. Dr.: José dos Reis Vieira de Moura Júnior
Programa de Pós-Graduação em Modelagem e
Otimização, UFG/RC.
(Presidente da Banca)


Prof. Dr.: Valder Steffen Júnior
Universidade Federal de Uberlândia


Prof. Dr.: Romes Antônio Borges
Universidade Federal de Goiás


Discente: João Paulo Moreira Bento
Programa de Pós-Graduação em Modelagem e
Otimização, UFG/RC.

Agradecimentos

Inicialmente agradeço a Deus pelas oportunidades e experiências vividas, pela força e fé que me foram concedidas.

Aos meus familiares, principalmente aos meus pais João Batista e Marivalda pelo imenso carinho e apoio.

À Universidade Federal de Goiás, aos professores e técnicos com quem tive o privilégio de trabalhar e conviver neste período.

Ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem e Otimização da Universidade Federal de Goiás pela oportunidade de realizar este curso.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de mestrado concedida ao autor desta dissertação de mestrado.

Aos amigos que me acompanham desde os tempos de criança do Cururu Tei Tei, aos amigos de faculdade da República Friboi, aos amigos do intercâmbio da Família Española e aos grandes amigos que fiz em Catalão da República Alto da Serra.

Aos amigos que fiz ao longo deste mestrado, em potencial ao Bruno Barella e Stanley Washington por terem me auxiliado eficientemente nos projetos que foram realizados ao longo destes últimos anos.

Agradeço imensamente a meu orientador José dos Reis, primeiramente por ter aceitado ser meu orientador, por seu suporte, motivação e conversas que me ajudaram muito nos últimos anos. Sua dedicação, exemplo de pessoa e de profissional e senso de humor será sempre lembrado. Muito obrigado pela disposição, pela experiência e pela contribuição a este trabalho e a minha vida pessoal e profissional.

"É claro que somos apenas primatas evoluídos, vivendo em um planeta pequeno que orbita uma estrela comum, localizada no subúrbio de uma de bilhões de galáxias, mas desde o começo da civilização as pessoas tentam entender a ordem fundamental do mundo. Deve haver algo muito especial sobre os limites do universo, e o que pode ser mais especial do que não haver limites? Não deve haver limites para o esforço humano. Somos todos diferentes. Por pior que a vida possa parecer, sempre há algo que podemos fazer em que podemos obter sucesso. Enquanto houver vida, haverá esperança."

(Stephen Hawking)

RESUMO

BENTO, J. P. M. . *USO DAS CADEIAS DE MARKOV ASSOCIADO AO MONITORAMENTO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL BASEADO EM IMPEDÂNCIA ELETROMECÂNICA*. 2018. 118 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem e Otimização) – Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia, Universidade Federal de Goiás – Regional Catalão, Catalão – GO.

Existem inúmeros problemas que podem surgir em componentes que estejam em constante uso e sujeito a desgastes dentre os diversos tipos de componentes estruturais. Para isto, nos últimos anos tem-se desenvolvido técnicas capazes de monitorar a integridade estrutural. Nas últimas décadas inúmeras técnicas não destrutivas começaram a ser utilizadas, dentre elas pode-se citar o método de impedância eletromecânica. Este trabalho propõe apresentar na revisão bibliográfica alguns conceitos básicos relacionados aos principais tópicos ligados a SHM (Structural Health Monitoring - Monitoramento da Integridade Estrutural), como materiais inteligentes, as diversas técnicas, métricas de dano e analisadores de impedância. Será abordado também algumas técnicas de otimização clássica (busca randômica) e bioinspirada (algoritmo de colônia de abelhas e algoritmo de colônia de formigas) que podem ser utilizadas para realizar comparações dos sinais de impedância eletromecânica entre estruturas sem dano e com dano. Por fim, é discutido sobre o tema de cadeias de Markov que é um processo estocástico onde um estado futuro depende apenas do estado presente e não dos demais estados passados. A proposta da dissertação é um estudo de caso em um sistema LEGO que visa aplicar os conceitos de impedância eletromecânica, otimização e cadeias de Markov para o monitoramento da integridade estrutural em um sistema definido e com isto, fornecer dados para uma possível previsão de falhas. Como conclusão, pode-se perceber a potencialidade das cadeias de Markov associado ao método da impedância eletromecânica para monitoramento e previsão de estados futuros.

Palavras-chaves: Monitoramento da Integridade Estrutural, Materiais Inteligentes, Impedância Eletromecânica, Otimização, Cadeia de Markov.

ABSTRACT

BENTO, J. P. M. . *USE OF MARKOV CHAINS ASSOCIATED WITH THE ELECTROMECHANICAL IMPEDANCE-BASED STRUCTURAL HEALTH MONITORING*. 2018. 118 f. Master Thesis in Modelling and Optimization – Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia, Universidade Federal de Goiás – Regional Catalão, Catalão – GO.

There are several problems that can occur in components exposed to constant use and subjected to wear among the different types of structural components. Thus, in the last years it has been developed techniques able to monitor the health of the structures. In the last decades many non-destructive techniques have started to be used, among them we can mention the method of electromechanical impedance. This work proposes to present in the bibliographic review some basic concepts related to the main topics related to SHM (Structural Health Monitoring), such as smart materials, the different techniques, damage metrics and impedance analyzers. It will also be approached some techniques of classic optimization (random search) and bioinspired (bee colony algorithm and ant colony algorithm) that can be used to perform electromechanical impedance signals between damaged and non-damaged structures. Finally, it is presented the subject of Markov chains, a stochastic process, which a future state depends only on the present state and not on the other past states. The dissertation proposal is a case study (LEGO System) that aims to apply the concepts of electromechanical impedance, optimization and Markov chains for the monitoring of structural health in a defined system, and with this result, be able to provide data for a possible failure prediction. Concluding, it can realize the potentiality of the Markov chains associated to the electromechanical impedance method for monitoring and predicting future states.

Keywords: Structural Health Monitoring, Smart Materials, Electromechanical Impedance, Optimization, Markov Chain.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Fissura aberta na parte superior da aeronave <i>Boeing 737-300</i> (Foto: Don Nelson / AP).	29
Figura 2.1 – Direções dos eixos para materiais piezoelétricos.	36
Figura 2.2 – Dipolos elétricos nos domínios: a) cerâmica ferroelétrica não-polarizada, b) durante a polarização e c) após a polarização (cerâmica piezoelétrica).	37
Figura 2.3 – Exemplo de filme PVDF fabricado pela <i>Images SI Inc.</i>	38
Figura 2.4 – Exemplos de pastilhas PZT fabricadas pela <i>Ultra-piezo.</i>	39
Figura 2.5 – Exemplo de MFC.	39
Figura 2.6 – Modelo unidimensional do acoplamento eletromecânico utilizado para realizar o SHM baseado em impedância eletromecânica.	44
Figura 2.7 – Analisador de impedância <i>HP 4194A.</i>	48
Figura 2.8 – Conversor de impedância <i>PmodIA.</i>	49
Figura 2.9 – Analisador de impedância <i>Eval - AD5933EBZ.</i>	49
Figura 2.10 – Mecanismo para a transmissão de informações entre as abelhas.	52
Figura 2.11 – Comportamento das formigas no experimento da ponte dupla.	56
Figura 2.12 – Exemplo de diagrama de transição.	62
Figura 2.13 – Exemplo de estado comunicável.	64
Figura 2.14 – Exemplo de estado transiente.	64
Figura 2.15 – Exemplo de estado absorvente.	65
Figura 2.16 – Exemplo de estado Periódico.	65
Figura 2.17 – Exemplo 2 de estado Aperiódico.	65
Figura 3.1 – Dimensões da viga em estudo.	68
Figura 3.2 – Viga utilizada no experimento de impedância eletromecânica.	68
Figura 3.3 – Interface do software utilizado para realizar o ensaio de SHM baseado em impedância eletromecânica.	69
Figura 3.4 – Medição dos sinais de impedância eletromecânica da viga com e sem falha.	70
Figura 3.5 – Medição dos sinais de impedância eletromecânica da placa com e sem falha, apresentando a faixa com maior divergência dos sinais pelo algoritmo de busca aleatória com 10000 iterações.	71

Figura 3.6 – Medição dos sinais de impedância eletromecânica da placa com e sem falha, apresentando a faixa com maior divergência dos sinais pelo ACA.	73
Figura 3.7 – Medição dos sinais de impedância eletromecânica da placa com e sem falha, apresentando a faixa com maior divergência dos sinais pelo ACF.	74
Figura 3.8 – Comparação das otimizações.	75
Figura 4.1 – Captação dos sinais de impedância para o experimento com o auxílio da placa.	79
Figura 4.2 – Experimento realizado para captação dos sinais de impedância.	80
Figura 4.3 – Sinais de impedância eletromecânica para os 55 sinais captados sem dano.	81
Figura 4.4 – Sinais de impedância eletromecânica para os 45 sinais captados com dano.	81
Figura 4.5 – Média dos sinais de impedância eletromecânica normalizados.	82
Figura 4.6 – Sinais de impedância eletromecânica para os 66 sinais captados sem dano.	82
Figura 4.7 – Sinais de impedância eletromecânica para os 34 sinais captados com dano.	83
Figura 4.8 – Média dos sinais de impedância eletromecânica normalizados.	83
Figura 4.9 – Sinais de impedância eletromecânica para os 75 sinais captados sem dano.	84
Figura 4.10 – Sinais de impedância eletromecânica para os 25 sinais captados com dano.	84
Figura 4.11 – Média dos sinais de impedância eletromecânica normalizados.	85
Figura 4.12 – Otimização por ACA da média dos sinais de impedância eletromecânica.	86
Figura 4.13 – Otimização por ACA da média dos sinais de impedância eletromecânica.	87
Figura 4.14 – Otimização por ACA da média dos sinais de impedância eletromecânica.	87
Figura 4.15 – Aplicação da métrica de dano para a abordagem 1.	89
Figura 4.16 – Gráfico de caixa para verificação da diferença entre os estados na abordagem 1.	89
Figura 4.17 – Aplicação da métrica de dano para a abordagem 2.	90
Figura 4.18 – Gráfico de caixa para verificação da diferença entre os estados na abordagem 2.	91
Figura 4.19 – Aplicação da métrica de dano para a abordagem 3.	91
Figura 4.20 – Gráfico de caixa para verificação da diferença entre os estados na abordagem 3.	92
Figura 4.21 – Diagrama de transição de estados para a abordagem 1.	95
Figura 4.22 – Diagrama de transição de estados para a abordagem 2.	96
Figura 4.23 – Diagrama de transição de estados para a abordagem 3.	97
Figura 4.24 – Gráfico de estabilização da cadeia de Markov para a abordagem 1.	98
Figura 4.25 – Gráfico de estabilização da cadeia de Markov para a abordagem 2.	99
Figura 4.26 – Gráfico de estabilização da cadeia de Markov para a abordagem 3.	99
Figura A.1 – Planilha de modelagem dos estados de transição para abordagem 1.	114
Figura B.1 – Planilha de modelagem dos estados de transição para abordagem 2.	116
Figura C.1 – Planilha de modelagem dos estados de transição para abordagem 3.	118

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Simulações realizadas com o ABA para comparação do ponto ótimo.	71
Tabela 3.2 – Simulações realizadas com o ACA para comparação do ponto ótimo.	72
Tabela 3.3 – Simulações realizadas com o ACF para comparação do ponto ótimo.	74

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Correspondência entre a natureza e o ACE	57
Quadro 4.1 – Resumo das transições.	94

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABA — Algoritmo de Busca Aleatória

ACA — Algoritmo de Colônia de Abelhas

ACF — Algoritmo de Colônia Formigas

ADC — Analog to Digital Converter

ASD — Average Square Deviation

CC — Correlation Coefficient

CCD — Correlation Coefficient Deviation

CI — Circuito Integrado

DFT — Discret Fourier Transform

END — Ensaios Não Destrutivos

HP — Hewlett-Packard Company

I2C — Inter-Integrated Circuit

Images SI Inc — Images Scientific Instruments Incorporation

LEGO — The Lego Group

MAPD — Mean Absolute Percentage Deviation

MFC — Macro Fiber Composite

NASA — National Aeronautics and Space Administration

PVDF — Fluorido de Polivinilideno

PZT — Titanato Zirconato de Chumbo

RMSD — Root Mean Square Deviation

SHM — Structural Health Monitoring

SMA — SubMiniature version A

USB — Universal Serial Bus

LISTA DE SÍMBOLOS

Z_e — Impedância elétrica

V_e — Tensão elétrica alternada

I_e — Corrente

X_L — Reatância indutância

L — Indutância

ω_e — Frequência de excitação

X_C — Reatância capacitiva

C — Capacitância

Z_m — Impedância mecânica

F_m — Força aplicada

v_m — Velocidade

R_m — Amortecimento mecânico

M_m — Massa mecânica

C_m — Flexibilidade mecânica

K — Rigidez

S — Vetor das deformações

T — Vetor das tensões

E — Vetor campo elétrico

D — Vetor deslocamento elétrico

s — Tensor de flexibilidade

d — Tensor das constantes piezoelétricas em deformação

ϵ — Permissividade elétrica

Y — Admitância elétrica
 v — Voltagem de entrada no atuador PZT
 I — Corrente de saída do PZT
 a — Constante geométrica do PZT
 d_{3x} — Constante de acoplamento piezoelétrico em uma direção x com deformação nula
 $\hat{Y}_{xx}^E$ — Módulo complexo de Young do PZT com campo elétrico nulo
 $\bar{\epsilon}_{33}^T$ — Constante dielétrica complexa do PZT com tensão zero
 ω — Frequência angular
 Z — Impedância complexa da estrutura
 Z_a — Impedância complexa do PZT
 δ — Fator de perda dielétrica tangencial do PZT
 M_{RMSD} — Medida da falha do método de RMSD
 Re — Parte real do sinal de impedância
 $Z_{1,i}$ — Sinal da impedância medido pelo PZT quando a estrutura está sob condições saudáveis
 $Z_{2,i}$ — Sinal da impedância medido pelo PZT quando a estrutura está sob condição de falha
 i — Intervalo de frequência
 n — Quantidade de pontos a serem analisados
 δ_{ASD} — Diferença das médias de cada um dos sinais
 $\bar{Z}_1$ — Média do sinal de impedância medido pelo PZT quando a estrutura está sob condições saudáveis
 $\bar{Z}_2$ — Média do sinal da impedância medido pelo PZT quando a estrutura está sob condição de falha
 S_{Z_1} — Desvio padrão do sinal de impedância medido pelo PZT quando a estrutura está sob condições saudáveis
 S_{Z_2} — Desvio padrão do sinal da impedância medido pelo PZT quando a estrutura está sob condição de falha
 X_i^q — Valor para i -ésima variável X na iteração q
 X_i^l — Restrição inferior para para i -ésima variável X
 X_i^u — Restrição superior para i -ésima variável X
 r — Número randômico entre 0 e 1

SN — Tamanho da colônia de abelhas

X_i — Representa a i-ésima solução na colônia

$n_{abelhas}$ — Tamanho da dimensão

V_i — Representa a nova i-ésima solução candidata

Φ_{i_k} — Número aleatório dentro de $[-1,1]$

X_j — Representa a solução candidata escolhida aleatoriamente

k — Índice de dimensão aleatória dentro do conjunto $\{1, 2, \dots, n\}$

P_i — Seleção probabilística *roulette wheel selection*

fit_i — Valor da capacidade da i-ésima solução na colônia

lb_i — Limite superior da i-ésima dimensão

ub_j — Limite inferior da i-ésima dimensão

$rand(0,1)$ — Número aleatório entre $[0,1]$

k — Formiga

$p_{i,j}$ — Função probabilística para decidir se incluirá ou não determinado ponto na solução para a t-ésima iteração

$\tau_{i,j}$ — Trilha de feromônio da combinação (i,j)

$\eta_{i,j}$ — Heurística local da combinação (i,j) (visibilidade)

α — Importância relativa da trilha de feromonio

β — Importância relativa da heurística local

ρ — Taxa de evaporação (persistência da formiga na trilha)

$\Delta\tau_{i,j}$ — Quantidade de feromônio que será depositado no ponto (i,j)

$f(S)$ — Função objetivo f avaliada na solução S

$\mathbf{P}^n$ — Matriz de transição de passo n

$p_{ij}^{(n)}$ — Probabilidade de transição do estado i para o estado j de passo n

Lista de Algoritmos

Algoritmo 2.1	Algoritmo de Colônia de Abelhas	54
Algoritmo 2.2	Algoritmo de Colônia de Formigas	59

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	29
1.1	Estrutura do Trabalho	31
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	33
2.1	Conceitos de Impedância Elétrica e Mecânica	33
2.1.1	Impedância Elétrica	33
2.1.2	Impedância Mecânica	34
2.2	Materiais Inteligentes	35
2.3	Processo de Monitoramento da Integridade Estrutural	39
2.3.1	Técnicas Diversas de SHM	41
2.3.1.1	Técnicas Baseadas no Domínio do Tempo	41
2.3.1.2	Técnicas Baseadas no Domínio Modal	42
2.3.1.3	Técnicas Baseadas no Domínio da Frequência	42
2.3.2	Técnica de SHM Baseado em Impedância Eletromecânica	43
2.3.3	Métricas de Dano	45
2.3.4	Analisadores de Impedância	47
2.3.4.1	Analisador de Impedância HP	47
2.3.4.2	PmodIA	48
2.3.4.3	Eval AD5933EBZ	49
2.4	Métodos de Otimização	50
2.4.1	Busca Aleatória	50
2.4.2	Colônia de Abelhas	50
2.4.3	Colônia de Formigas	55
2.5	Cadeia de Markov	59
2.5.1	Processos Estocásticos	59
2.5.2	Processos Markovianos	60
2.5.3	Cadeia de Markov	60
3	OTIMIZAÇÃO DAS FAIXAS DE FREQUÊNCIA ASSOCIADA A IMPEDÂNCIA ELETROMECÂNICA	67
3.1	Otimização pelo Algoritmo de Busca Aleatória	70
3.2	Otimização pelo Algoritmo de Colônia de Abelhas	72

3.3	Otimização pelo Algoritmo de Colônia de Formigas	73
4	ESTUDO DE CASO - CADEIAS DE MARKOV E IMPEDÂNCIA ELETROME- CÂNICA NA PREVISÃO DE FALHAS	77
4.1	Descrição do Experimento	79
4.2	Pré-Tratamento dos Sinais	80
4.2.1	Abordagem 1	81
4.2.2	Abordagem 2	82
4.2.3	Abordagem 3	84
4.3	Otimização das Faixas de Frequência	85
4.3.1	Abordagem 1	86
4.3.2	Abordagem 2	86
4.3.3	Abordagem 3	87
4.4	Aplicação das Métricas de Dano	88
4.4.1	Abordagem 1	88
4.4.2	Abordagem 2	90
4.4.3	Abordagem 3	91
4.5	Aplicação das Cadeias de Markov	92
4.5.1	Divisão de Estados	93
4.5.2	Matriz de Transição	93
4.5.2.1	Abordagem 1	93
4.5.2.2	Abordagem 2	95
4.5.2.3	Abordagem 3	96
4.5.3	Cálculo do Estado Estacionário	97
4.5.3.1	Abordagem 1	98
4.5.3.2	Abordagem 2	98
4.5.3.3	Abordagem 3	99
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	101
	REFERÊNCIAS	105
APÊNDICE A	PLANILHA DE ESTADOS DE TRANSIÇÃO PARA ABORDAGEM 1	114
APÊNDICE B	PLANILHA DE ESTADOS DE TRANSIÇÃO PARA ABORDAGEM 2	116
APÊNDICE C	PLANILHA DE ESTADOS DE TRANSIÇÃO PARA ABORDAGEM 3	118

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Há uma crescente busca pelo desenvolvimento de tecnologias capazes de detectar danos prematuramente e, assim, evitar falhas futuras, principalmente nas áreas de engenharia aeronáutica, civil e mecânica. A falta ou a não realização correta de manutenção pode acarretar em grandes prejuízos. Na aeronáutica, pode-se indicar como exemplo, um acidente com um *Boeing 737-300* (N632SW) da companhia aérea *Southwest Airlines*, no ano de 2011. Após o pouso de emergência, a tripulação descobriu um buraco de aproximadamente um metro e meio na parte superior da aeronave, apresentado na Figura 1.1. Esta não foi a primeira vez que uma fuselagem de um *Boeing 737* se rompeu durante um voo da empresa. Em 2009, no voo 2294, um outro *Boeing 737-300* passou por uma rápida descompressão após um buraco ter sido aberto na fuselagem (VALDUGA, 2011).

Figura 1.1 – Fissura aberta na parte superior da aeronave *Boeing 737-300* (Foto: Don Nelson / AP).



Fonte: Retirado de (VALDUGA, 2011).

O monitoramento da integridade estrutural (SHM - do inglês *Structural Health Monitoring*) surgiu como uma tecnologia promissora para reduzir riscos e custos. Conforme descrito na literatura, é um processo de análise e detecção de falhas que avalia a saúde estrutural. É uma tecnologia que combina um sistema de sensores modernos e algoritmos

computacionais inteligentes para interpretar os dados e realizar o monitoramento estrutural em tempo real ou não. Um dos seus principais objetivos é prever possíveis danos que podem causar prejuízos e aumentar a vida útil dos componentes, estruturas e sistemas em análise. Portanto, a criação ou aperfeiçoamento de técnicas que buscam aumentar e melhorar a precisão, robustez e confiabilidade dos processos de monitoramento são altamente desejáveis, buscando ainda a redução de custo com manutenção e, assim, minimizar o custo global de produção (KESSLER; SPEARING; ATALLA, 2002; FARRAR; LIEVEN; BEMENT, 2005; IHN; CHANG, 2008; AFSHARI, 2012).

As tecnologias de monitoramento estrutural e de END (ensaios não destrutivos) vêm sendo o foco de vários estudos nas áreas acadêmica e industrial ao longo dos últimos anos (RABELO *et al.*, 2016). Elas compartilham uma mesma base e a maioria das técnicas de detecção de danos de END são utilizadas no SHM. Um dos principais fatores que faz o SHM mais prático e diferente do END é a integração de sensores e atuadores (materiais inteligentes) na estrutura que está sendo monitorada (AFSHARI, 2012).

O principal propósito dos END é o de não produzir nenhuma mudança significativa na estrutura em estudo, mantendo após a realização do ensaio as mesmas características que a estrutura apresentava anteriormente. Atualmente, existem inúmeros métodos de END que são utilizados para realizar o diagnóstico e monitoramento de danos em estruturas, dentre eles os principais são: técnica de impedância eletromecânica, técnica das ondas de Lamb, testes radiográficos, ensaios por ultrassom, líquidos penetrantes, medições de propriedades dinâmicas e partículas magnéticas (BRAY; MCBRIDE, 1992; PALOMINO, 2008; TSURUTA, 2008; MOURA JÚNIOR, 2008; LEUCAS, 2009).

Sua utilização se justifica principalmente com as vantagens econômicas adicionais, ou seja, se o sistema de monitoramento da integridade estrutural puder evitar com segurança a desmontagem desnecessária de componentes estruturais, e a necessidade de reduzir gastos e aumentar a confiabilidade e segurança das estruturas e equipamentos (FARRAR; WORDEN, 2012).

Na indústria, portanto, um grande desejo é prever como um determinado sistema estará funcionando daqui algum tempo. Para isto, deve-se conhecer bem o sistema em questão para assim poder caracterizá-lo e poder gerar análises e então, propor melhorias visando o bem comum. Um destes instrumentos pode ser a cadeia de Markov. Trata-se de uma técnica de modelagem de sistemas estocásticos que faz uso das probabilidades de transição entre estados para estudo do comportamento de sistemas ao longo do tempo. Com o emprego das cadeias de Markov é possível extrair características que possibilitem a previsão e a tomada de decisões a respeito destes sistemas, e com auxílio das técnicas de SHM em impedância eletromecânica pode-se tentar fornecer prognósticos de falhas e também sobre a vida residual da estrutura (MARCOS, 2014).

Sendo assim, tendo como motivações as necessidades, principalmente nas áreas de

engenharia aeronáutica, civil e mecânica, relacionadas a estudos para diagnosticar e evitar falhas futuras, este trabalho tem como objetivos, inicialmente, realizar a aplicação dos conceitos de monitoramento da integridade estrutural baseado em impedância eletromecânica em uma viga metálica e utilizar métodos de otimização para verificar qual é a melhor faixa para estudo (três métodos são utilizados para validar a faixa de frequência - ABA (Algoritmo de Busca Aleatória), ACA (Algoritmo de Colônia de Abelhas) e ACF (Algoritmo de Colônia de Formigas)). E por fim, após comprovar a eficácia das técnicas anteriores, aplicá-las em um estudo de caso onde deseja-se desenvolver um modelo em cadeia de Markov que utilize os sinais captados de impedância eletromecânica e que foram otimizados (de uma outra estrutura) para apresentar um registro futuro de como um certo processo poderá reagir após determinado período de tempo.

1.1 Estrutura do Trabalho

Este trabalho foi dividido em capítulos para uma melhor compreensão do leitor a respeito dos temas abordados.

O capítulo 1 é dedicado a mostrar uma pequena introdução a respeito do monitoramento da integridade estrutural e também são apresentados os principais objetivos desta dissertação.

No capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica para um melhor desenvolvimento do trabalho onde serão apresentados os principais conceitos relacionados aos materiais inteligentes, ao processo de monitoramento da integridade estrutural, aos métodos de otimização e a cadeia de Markov.

O capítulo 3 trata da realização do experimento, onde utilizou-se o SHM baseado em impedância eletromecânica em uma viga metálica. Foram captados sinais em dois estados diferentes (estado sem falha e com falha). Os sinais foram comparados, e utilizou-se dos métodos de otimização para encontrar a maior diferença entre as faixa de frequência entre os dois tipos de sinais captados (sem falha e com falha).

No capítulo 4 é contextualizado uma problemática, onde se deseja utilizar da combinação dos três principais tópicos utilizados neste trabalho para fornecer um estudo de previsão de funcionamento de um certo equipamento. Foi utilizado o monitoramento da integridade estrutural baseado em impedância eletromecânica para captar sinais de uma estrutura, a otimização pelo ACA para realizar a redução da região no domínio da frequência mais sensível as mudanças impostas ao sistema (apresentar a faixa de maior divergência entre os sinais) e as cadeias de Markov que tem como finalidade, fornecer possíveis previsões futuras do modo de funcionamento da estrutura.

Por fim, no capítulo 5 são apresentadas as conclusões obtidas e uma proposta de tra-

balho futuro.

Capítulo 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Conceitos de Impedância Elétrica e Mecânica

2.1.1 Impedância Elétrica

A impedância elétrica pode ser descrita como sendo a oposição que um circuito ou componente oferece à passagem de corrente alternada e pode ser calculada pela razão entre a tensão fornecida ao circuito ou componente e a corrente que passa por ele (equação 2.1).

$$Z_e = \frac{V_e}{I_e} \quad (2.1)$$

visto que Z_e é a impedância elétrica, V_e é a tensão elétrica alternada e I_e é a corrente.

Como esta é uma grandeza complexa, divide-se em duas partes, a primeira é a resistência (parte real) e a segunda é a reatância elétrica (parte imaginária). A resistência nos circuitos de corrente alternada tem comportamento similar aos circuitos de corrente contínua e assume valores positivos em *Ohms* (Ω) (GIBILISCO, 2002). Já a reatância pode assumir tanto valores positivos quanto negativos. Quando assume valores não-negativos, ela é chamada de reatância indutiva (X_L) e o seu valor em *Ohms* é dado pela equação 2.2.

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot \omega_e \cdot L \quad (2.2)$$

onde L é a indutância expressa em *Henries* (H) e ω_e é a frequência de excitação em *Hertz* (Hz) do circuito de corrente alternada considerado. Quando assume valores não-positivos é chamada de reatância capacitiva (X_C) e o seu valor em *Ohms* é dado pela equação 2.3 (IRWIN, 2003).

$$X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \omega_e \cdot C} \quad (2.3)$$

onde C é a capacitância expressa em *Farad* (F) e ω_e é a frequência de excitação em *Hertz* do circuito de corrente alternada considerado.

Quando a reatância é igual a zero, a impedância é igual à resistência e o circuito é dito como sendo puramente resistivo, e o valor inverso da impedância elétrica é chamado de admitância elétrica, cuja unidade de medida é *Siemens* (IRWIN, 2003).

2.1.2 Impedância Mecânica

Segundo Massoud (1985), a impedância mecânica de um sistema mecânico pode ser definida como a razão entre a força aplicada em um ponto do sistema e a velocidade com que este ponto se desloca, como apresentado pela equação 2.4.

$$Z_m = \frac{F_m}{v_m} \quad (2.4)$$

visto que Z_m é a impedância mecânica, F_m é a força aplicada e v_m é a velocidade.

Ela representa fisicamente o quanto a estrutura pode resistir ao movimento quando lhe é aplicada uma certa força. Esta é uma grandeza complexa, pois a força e a velocidade são grandezas vetoriais (com módulo e ângulo de fase) (LEUCAS, 2009).

De acordo com Palomino (2008), a impedância mecânica de uma estrutura varia com a frequência. Nas frequências de ressonância a impedância é baixa, o que significa que menos força é necessária para movimentar uma dada estrutura a certa velocidade. Nos sistemas mecânicos as três grandezas descritas a seguir podem ser relacionadas com a impedância mecânica.

- Amortecimento Mecânico (R_m): está associado à parte real da impedância, sendo responsável por dissipar a potência mecânica entregue ao sistema. Um dispositivo mecânico se comporta como uma resistência mecânica quando é acionado por uma força, esta é proporcional à velocidade que o dispositivo adquire, equação 2.5.

$$F(t) = R_m \cdot v(t) \quad (2.5)$$

no Sistema Internacional de Unidades, o amortecimento mecânico é dado por ($N \cdot s/m$).

- Massa Mecânica (M_m): está associada com a parte imaginária positiva da impedância complexa. Um dispositivo mecânico comporta-se como uma massa mecânica quando ao ser acionado por uma força resulta em uma aceleração diretamente proporcional à esta força, equação 2.6.

$$F(t) = M_m \cdot \frac{dv(t)}{dt} \quad (2.6)$$

sua unidade é o Kg .

- Flexibilidade Mecânica (C_m): está relacionada com a parte imaginária negativa da impedância complexa. Um dispositivo mecânico, se comporta como uma flexibilidade mecânica quando, ao ser acionado por uma força, se desloca proporcionalmente à força, equação 2.7.

$$x(t) = C_m \cdot F(t) \quad (2.7)$$

Na maioria dos casos, entretanto, prefere-se não trabalhar com a flexibilidade, ou seja, usa-se seu inverso, a rigidez. Assim, define-se a rigidez como o inverso da flexibilidade mecânica, 2.8.

$$K = \frac{1}{C_m} \quad (2.8)$$

2.2 Materiais Inteligentes

Com o desenvolvimento de novos materiais e com a crescente evolução nas áreas de engenharias aeronáutica, civil e mecânica, foram desenvolvidos dispositivos que estão sendo utilizados com êxito como sensores e atuadores, permitindo assim o monitoramento e ação de controle nas estruturas em que estão agregados. Estes dispositivos são produzidos sob variadas formas e diversos tamanhos, possibilitando sua utilização em diversas aplicações e em lugares de difícil acesso (BANKS; SMITH; WANG, 1996; PEAIRS, 2002).

Em conformidade com alegação de Rabelo (2014), o termo “Estruturas Inteligentes” vem sendo utilizado no decorrer das últimas três décadas pela comunidade de engenharia. Esta expressão indica a capacidade que algumas estruturas e componentes estruturais têm em alterar as suas propriedades. Algumas das características desta chamada "inteligência" seriam o auto-diagnóstico, o auto reparo (*self-healing*) em algumas aplicações, a recuperação funcional e o aprendizado. Deste modo, com estes atributos as estruturas inteligentes atendem a uma condição crucial de qualquer estrutura, que é a sua preservação, e ainda melhora as condições de monitoramento para realização de manutenções, podendo assim, até aumentar a vida útil da estrutura (PARK; INMAN, 2001; RABELO, 2014).

Os materiais inteligentes têm a capacidade de converter uma forma de energia em outra. Um dos principais tipos de materiais utilizados em estruturas inteligentes são as cerâmicas piezoelétricas (conversão de energia mecânica em elétrica e vice-versa), as ligas com memória de forma (conversão de energia térmica para energia mecânica), os fluidos e sólidos eletroreológicos e magnetoreológicos (são capazes de mudarem suas propriedades reológicas quando submetidos a um campo elétrico ou magnético respectivamente), os elementos eletroestrutivos e magnetoestrutivos (capacidade de realizarem esforços mecânicos

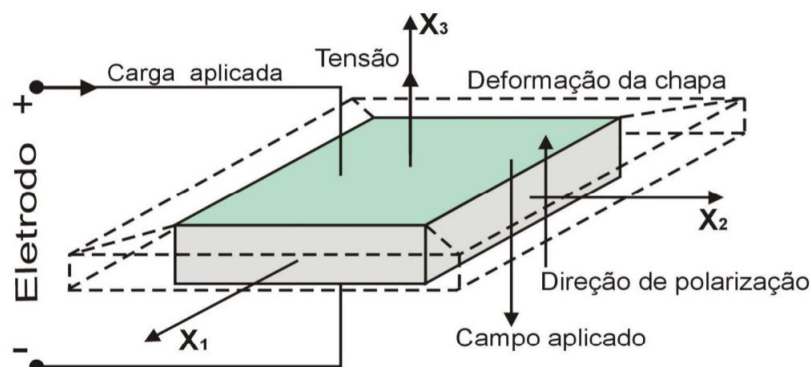
em resposta à aplicação de um campo elétrico ou magnético respectivamente) e as fibras ópticas. Em grande parte dos casos as propriedades destes materiais já são estudadas há algum tempo. Entretanto, somente de alguns anos para cá é que o estudo destes materiais têm sido refinado para aplicações em estruturas inteligentes (BANKS; SMITH; WANG, 1996; PEAIRS, 2002; MOURA JÚNIOR, 2008).

Segundo Moura Júnior (2008), o estudo a respeito dos materiais inteligentes abrange um vasto campo multidisciplinar, incluindo várias áreas de atuação como o biomimetismo (dispositivos que utilizam estratégias usadas por estruturas naturais), a ciência dos materiais (compósitos e metalurgia), a eletrônica (sensores, atuadores, controles), a fotônica (fibra óptica), a mecânica aplicada (vibrações, mecânica da fratura, elasticidade, aerodinâmica) e a produção (processo, microestrutura).

Neste capítulo dar-se-á um foco maior nas definições dos principais materiais piezoelétricos utilizados atualmente em SHM. Inicialmente, há relatos de que o efeito piezoelétrico foi documentado por Pierre e Jacques Curie, em 1880, enquanto que os cristais piezoelétricos foram empregados em rádios somente na década de 1940 (MOURA JÚNIOR, 2008). De acordo com Banks, Smith e Wang (1996), os materiais piezoelétricos são de uma classe de materiais dielétricos que quando se é aplicado um campo elétrico, em resposta eles apresentam deformações mecânicas. E quando são aplicadas deformações mecânicas, em resposta, eles produzem polarizações dielétricas.

Em conformidade com Tebaldi, Coelho e Lopes Júnior (2006), as propriedades piezoelétricas são estabelecidas utilizando três eixos de direções, duas destas consistindo em direções isotrópicas (que possuem as mesmas propriedades em todos os pontos destas direções) e a outra é relacionada com a direção de polarização, que sofre o efeito piezoelétrico, de acordo com a Figura 2.1.

Figura 2.1 – Direções dos eixos para materiais piezoelétricos.

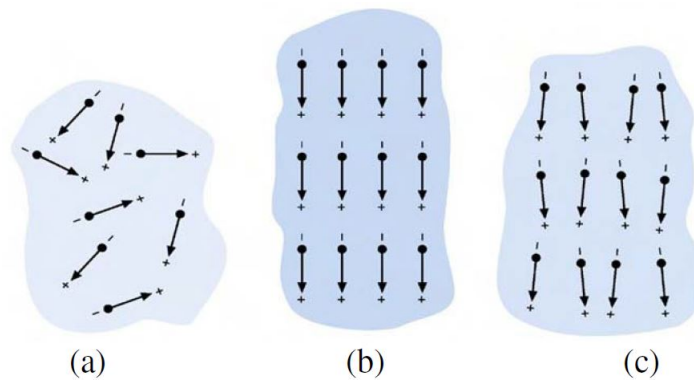


Fonte: Adaptado de Tebaldi, Coelho e Lopes Júnior (2006).

Os sensores e atuadores piezoelétricos são construídos pela polarização de um material, ao passo em que ele é submetido a elevados campos elétricos e sujeito a altas tempera-

turas demonstrando características piezoelétricas. Os compostos ou substratos anisotrópicos e normalmente ortotrópicos, são adequadamente selecionados devido as suas estruturas reticuladas poliméricas, cerâmicas ou cristalinas, distinguindo suas estruturas atômicas em no mínimo uma direção, com referência aos outros eixos de coordenadas. A polarização destes materiais tem por efeito alinhar parcialmente os dipolos elétricos dos domínios microscópicos (como observado na Figura 2.2), o que resulta em uma polarização macroscópica onde o acoplamento eletromecânico é facilitado (BANKS; SMITH; WANG, 1996; MARQUI, 2007).

Figura 2.2 – Dipolos elétricos nos domínios: a) cerâmica ferroelétrica não-polarizada, b) durante a polarização e c) após a polarização (cerâmica piezoelétrica).



Fonte: Adaptado de Marqui (2007).

Por meio deste acoplamento, o material se deformará mecanicamente quando aplicado um campo elétrico (efeito inverso ou atuador). O contrário também deve ocorrer, ou seja, quando aplicada uma deformação mecânica ao mesmo, deverá produzir polarizações dielétricas (efeito direto ou sensor) (MOURA JÚNIOR, 2008). As relações constitutivas envolvendo as variáveis elétricas e mecânicas, para um material piezoelétrico com comportamento linear podem ser expressas pelas equações 2.9 e 2.10, que indicam o efeito inverso e direto, respectivamente (RAJU, 1997; TSURUTA, 2008).

$$S_i = s_{ij}^E \cdot T_j + d_{mi} \cdot E_m \quad (2.9)$$

$$D_m = d_{mi} \cdot T_i + \epsilon_{mk}^T \cdot E_k \quad (2.10)$$

visto que S é o vetor das deformações (m/m), T é o vetor das tensões (N/m^2), E é o vetor campo elétrico (V/m), D é o vetor deslocamento elétrico (C/m^2), s é o tensor de flexibilidade (m^2/N), d é o tensor das constantes piezoelétricas em deformação (m/V) e ϵ é a permissividade elétrica (F/m). E os índices i, j, m e k indicam as componentes dos vetores e tensores envolvidos nas equações.

Conforme destacado por Banks, Smith e Wang (1996), o dispositivo quando empregado na função de sensor utiliza o efeito direto e quando é empregado com a função de atuador utiliza o efeito inverso. Desta maneira, verificam-se as possibilidades de emprego para estes materiais em aplicações de controle e detecção de falhas, utilizando um componente único. Vale salientar que, se houverem grandes mudanças de temperatura, e o limite da temperatura de Curie for ultrapassado, o material perde suas propriedades piezoelétricas.

Dentre os materiais piezoelétricos mais utilizados, pode-se destacar um piezocerâmico, conhecido como titanato zirconato de chumbo (PZT), um piezopolímero, conhecido como fluorido de polivinilideno (PVDF) e um compósito, chamado de MFC (*Macro Fiber Composite*).

O PVDF é um polímero piezoelétrico maleável e robusto, que pode ser fabricado em variadas geometrias complexas e extremamente finas (espessura de 40 a 120 μm). O seu número de aplicações é cada vez maior na engenharia. As suas principais características são: baixo peso, flexibilidade e baixa impedância mecânica (LEE; SUNG, 1999; ODON, 2003; MARQUI, 2007). Não é recomendado utilizar os filmes PVDF's como atuadores, já que seus coeficientes de acoplamento eletromecânico são menores do que dos PZT's. Por outro lado, o potencial dielétrico dos PVDF's é aproximadamente vinte vezes superior ao dos PZT's, podendo assim, serem expostos a campos elétricos muito maiores. Eles são melhores utilizados na função de sensor e o seu custo é inferior aos das pastilhas PZT's (BANKS; SMITH; WANG, 1996; RABELO, 2014). A Figura 2.3, apresenta um filme PVDF produzido pela *Images SI Inc.*

Figura 2.3 – Exemplo de filme PVDF fabricado pela *Images SI Inc.*



Fonte: Retirado de <http://www.imagesco.com>.

O PZT foi o material utilizado no início do desenvolvimento da técnica de impedância eletromecânica e por apresentar características, tais como: ampla faixa de linearidade, pouco peso, rápida resposta, baixo custo, elevada eficiência de conversão e rigidez superior à da estrutura em que está acoplado. Este material continua sendo largamente utilizado nas aplicações da técnica (PARK *et al.*, 2003; BITENCOURT; STEFFEN JÚNIOR, 2009). A rigidez das pastilhas PZT's utilizadas em SHM são superiores a das estruturas em análise, o que ocasiona em uma conversão eletromecânica de grande eficiência, tornando estas pastilhas muito eficientes nas aplicações como atuador auto-sensível, particularmente no controle e identificação de falhas, justamente por apresentar bons resultados em grandes faixas de

frequências (BANKS; SMITH; WANG, 1996). A Figura 2.4 apresenta algumas pastilhas PZT's produzidas pela *Ultra-piezo*.

Figura 2.4 – Exemplos de pastilhas PZT fabricadas pela *Ultra-piezo*.

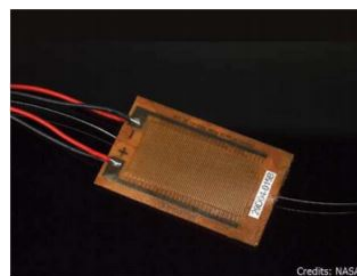


Fonte: Retirado de <http://www.ultra-piezo.com>.

Segundo Moura Júnior (2008), no geral existem algumas vantagens em utilizar os elementos piezoelétricos. As principais são: respostas lineares em baixos níveis de excitação, baixo peso, possibilidade de exibirem respostas em frequência de banda ampla e a grande flexibilidade de serem utilizados tanto como sensores quanto atuadores.

O MFC é um material flexível, desenvolvido em 1996, pela NASA e está disponível comercialmente desde 2002 (AFSHARI, 2012). Este material constitui-se de fibras piezoelétricas retangulares intercaladas entre camadas de adesivo e filme de eletrodo de poliimida (NASA, 2007). Podem ser citadas como principais características deste material, que estes piezo-compósitos possuem um processo de fabricação simples e repetível, são tolerantes a danos e são flexíveis, capazes então de acomodarem-se a superfícies complexas e/ou curvaturas de componentes estruturais, por ser mais flexível do que o PZT (PARK *et al.*, 2003; PALOMINO, 2008). A Figura 2.5 exhibe um exemplo de MFC.

Figura 2.5 – Exemplo de MFC.



Fonte: Retirado de (NASA, 2007).

2.3 Processo de Monitoramento da Integridade Estrutural

Em geral, um sistema de SHM é utilizado para a detecção de falhas, antecipação de avaria e diagnóstico de problemas em uma grande variedade de estruturas. Mas, antes de

definir um processo de SHM, é necessário entender o que é o conceito de danos. De acordo com [Farrar e Worden \(2007\)](#), danos são alterações consideráveis de massa, de rigidez ou de propriedades de dissipação de energia de um sistema. Ou seja, podem ser aderência de massas (incrustações) em estruturas, afrouxamento de parafusos, corrosões, cortes, delaminações, trincas, entre outros.

Seguindo o raciocínio de [Farrar, Doebling e Nix \(2001\)](#) e [Farrar e Worden \(2007\)](#), existem quatro principais passos sequenciais para descrever um processo de reconhecimento de padrões para o SHM. São eles:

1. Avaliação operacional;
2. Aquisição, normalização e seleção de dados;
3. Reconhecimento de padrões e condensação das informações;
4. Desenvolvimento de modelo estatístico.

No primeiro passo, é realizada uma avaliação prévia para responder certas perguntas referentes à aptidão da implementação de um sistema de identificação de danos.

O segundo passo, consiste em realizar três seleções. A primeira, é selecionar a cadeia de medição do sistema SHM. A segunda, é escolher os métodos que serão utilizados para diferenciar ou eliminar dos sinais as influências geradas devido às condições ambientais e de operação do sistema. A terceira e última, é definir quais são as técnicas responsáveis pela seleção dos dados que serão destinados ao processo de determinação de padrões. As técnicas de processamento de sinais, como filtragem e reamostragem podem fazer parte do processo de seleção dos dados.

No terceiro passo são utilizados padrões para correlacionar os sinais das informações extraídas a um diagnóstico da estrutura, como por exemplo, aos padrões: estrutura com dano, sem dano ou estrutura com danos múltiplos. E com a condensação de dados, acontece a eliminação de redundâncias e facilita a tomada de decisões, baseando-se em um número reduzido de características significativas. Esta é a área do processo SHM que mais recebe atenção na literatura técnica.

O quarto e último passo consiste na implementação de algoritmos que possam dizer se as mudanças nas características selecionadas (para identificar os sistemas danificados) são estatisticamente significativas. Outra finalidade é a implementação dos algoritmos que operam sobre os dados extraídos para quantificar o estado dos danos na estrutura.

De acordo com [Gonsalez \(2012\)](#), pode-se utilizar de modelos estatísticos para minimizar a ocorrência de falsos alarmes, que consistem em indicar, equivocadamente, a presença de dano (falso-positivo). Ou, por outro lado, estes são usados para minimizar a ocorrência

de falhas de detecção, que consistem em não indicar a presença de dano quando o mesmo existe (falso-negativo).

Conforme [Doebling, Farrar e Prime \(1998\)](#), a caracterização de falhas para um melhor entendimento, pode ser classificada nos seguintes níveis:

- Nível 1 – Detecta a existência da falha;
- Nível 2 – Detecta e localiza a falha;
- Nível 3 – Detecta, localiza e quantifica a falha;
- Nível 4 – Detecta, localiza e quantifica a falha e então estima a vida útil restante do equipamento.

E conforme proposto por [Inman \(2001\)](#), quando incorporado os materiais inteligentes, foram propostos três níveis adicionais:

- Nível 5 – Combina o nível 4 com estruturas inteligentes para auto-diagnóstico de falhas estruturais;
- Nível 6 – Combina o nível 4 com estruturas inteligentes e controle para formar um sistema de auto-reparo estrutural;
- Nível 7 – Combina o nível 1 com controle ativo e estruturas inteligentes para obtenção de um sistema simultâneo de controle e monitoramento.

2.3.1 Técnicas Diversas de SHM

2.3.1.1 Técnicas Baseadas no Domínio do Tempo

De acordo com [Cavalini Júnior \(2009\)](#), existem inúmeras técnicas de SHM baseadas no domínio temporal. As principais são: os observadores de estado, a *wavelet* e as baseadas em séries temporais.

A técnica de SHM baseada nos observadores de estado aplicada a sistemas discretos consiste em comparar os estados estimados pelo observador de estado para diferentes condições estruturais e assim detectar e localizar possíveis danos. Ela foi inicialmente proposta por [Melo \(1998\)](#), onde é apresentada a eficiência experimental dos observadores de estado quando aplicados no monitoramento de um sistema de três pavimentos.

Segundo [Carden e Fanning \(2004\)](#), a técnica *wavelet* consiste em decompor um sinal qualquer, temporal ou não, em uma série de funções de base local, chamadas de *wavelet*. Deste modo qualquer característica particular do sinal pode ser analisada com base nas características das *wavelets*.

A terceira técnica é baseada em séries temporais. Em conformidade com as palavras de [Cavalini Júnior \(2009\)](#), o monitoramento estrutural pode ser realizado através da análise das séries temporais das medidas dos sinais de vibração de estruturas, em condições perfeitas de funcionamento e em uma condição desconhecida. Isto porque, a presença de um dano altera as características estatísticas do sinal histórico temporal de aceleração.

2.3.1.2 Técnicas Baseadas no Domínio Modal

De acordo com [Marqui \(2007\)](#), diversos trabalhos procuram verificar as alterações nas propriedades básicas modais, que são definidas como: frequência natural, amortecimento modal e a forma do modo de vibração. Devido ao fato de que as frequências modais são propriedades globais da estrutura, não é totalmente claro que mudanças nestes parâmetros possam ser usadas para identificar além do nível 1 e 2 de falha. Em outras palavras, as frequências geralmente não podem proporcionar informações espaciais sobre mudanças estruturais. Uma exceção a esta limitação ocorre para altas faixas de frequências modais, nas quais os modos estão associados com respostas locais.

[Rizos, Aspragathos e Dimarogonas \(1990\)](#) efetuaram a localização e quantificação de falhas em uma viga engastada-livre a partir dos modos de vibrar da estrutura. Os resultados analíticos, juntamente com alguns modos de vibração identificados, foram usados para localizar e estimar a profundidade da falha. Deste modo, a metodologia proposta pode ser usada para a identificação de falhas em estruturas a partir de dados modais medidos.

2.3.1.3 Técnicas Baseadas no Domínio da Frequência

De acordo com [Cavalini Júnior \(2009\)](#), as duas principais técnicas baseadas no domínio da frequência são: a de impedância eletromecânica e a de ondas Lamb. Ambas detectam a presença de danos através da comparação entre os resultados obtidos a partir de diferentes condições estruturais, condição intacta e condição desconhecida. O método de impedância eletromecânica será detalhado posteriormente pois esta é a técnica utilizada nos experimentos realizados neste trabalho.

Segundo [Inman et al. \(2005\)](#), as ondas de Lamb são ondas de deformação plana que ocorrem nas superfícies inferior e superior de uma placa livre. O nome, ondas de Lamb, vem do precursor Horace Lamb. Em geral, atuadores piezelétricos acoplados a superfície da estrutura são utilizados para produzir as ondas de Lamb. Nesta técnica também são utilizadas altas frequências de excitação. Suas principais características são: capacidade de verificar grandes estruturas, capacidade de verificar a estrutura de uma área seccionada, monitoramento em projetos complicados ou de alto custo, além de examinar estruturas em movimento, boa sensibilidade a múltiplos defeitos com alta precisão de identificação e baixo consumo de energia

2.3.2 Técnica de SHM Baseado em Impedância Eletromecânica

A técnica de monitoramento da integridade estrutural baseado em impedância eletromecânica utiliza a propriedade piezoelétrica dos materiais formando um método de avaliação não-destrutivo (PARK *et al.*, 2003). O conceito básico desta técnica é o monitoramento da variação da impedância mecânica da estrutura causada pela presença de danos. Como a medição direta da impedância mecânica da estrutura é uma tarefa complicada, o método utiliza materiais piezoelétricos colados ou incorporados à estrutura, permitindo medir a impedância elétrica. Esta se relaciona com a impedância mecânica da estrutura que é afetada pela presença do dano. A impedância do conjunto PZT-estrutura, então é denominada impedância eletromecânica. Evidentemente, considera-se que o material piezoelétrico, utilizado como sensor da impedância elétrica permanece íntegro durante o ensaio (PARK *et al.*, 2003; PALOMINO, 2008; BITENCOURT; STEFFEN JÚNIOR, 2009).

Além de danos na estrutura, um outro fator que causa a mudança na impedância mecânica é a variação nos parâmetros ambientais, como a temperatura. As propriedades do material do PZT, bem como o módulo de *Young* da estrutura em estudo, são conhecidos por serem dependentes da temperatura. Portanto, se a temperatura ambiente varia, o monitoramento da integridade estrutural baseado em impedância eletromecânica mostra variações na integridade da estrutura em estudo, quando na verdade não existe nenhuma variação (chamados de falsos-positivos). Há estudos sendo realizados para compensar o efeito da temperatura no SHM baseado em impedância (RAJU, 1997; PARK *et al.*, 1999; PARK; CUDNEY; INMAN, 2000a; KOO *et al.*, 2009; AFSHARI, 2012; RABELO, 2014).

O estudo que sugere o emprego da técnica de impedância eletromecânica no monitoramento da integridade estrutural foi inicialmente abordado por Liang, Sun e Rogers (1994). Nos anos seguintes, diversos trabalhos nesta área foram realizados e os principais autores que se destacam são: Chaudhry *et al.* (1995a), Chaudhry *et al.* (1995b), Sun *et al.* (1995), Park *et al.* (1999), Park, Cudney e Inman (1999), Park, Cudney e Inman (2000a), Park, Cudney e Inman (2000b), Park, Cudney e Inman (2001), Soh *et al.* (2000), Giurgiutiu e Zagrai (2000), Giurgiutiu e Zagrai (2002), Giurgiutiu, Zagrai e Bao (2002), Bhalla *et al.* (2002), Bhalla, Naidu e Soh (2003), Park *et al.* (2003), Moura Júnior (2008), Koo *et al.* (2009), Baptista e Vieira Filho (2010), Jung *et al.* (2014) e Martowicz *et al.* (2016).

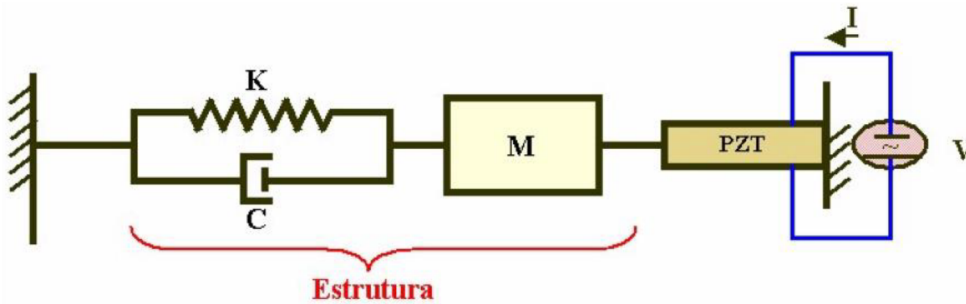
Os sensores de impedância (PZT) são utilizados no monitoramento da integridade estrutural baseado em impedância eletromecânica para inspecionar as alterações no amortecimento, massa e rigidez da estrutura em análise. Este sensor resume-se a uma pequena pastilha piezoelétrica, que geralmente tem dimensões menores que $25 \times 25 \times 0.1 \text{ mm}$, e é utilizado para medir a resposta dinâmica local (PALOMINO, 2008). No momento em que o sensor é fixado a estrutura, uma diferença de potencial elétrico de aproximadamente 1V é aplicada, causando uma deformação no PZT e na interface de sua união com a estrutura. De acordo com Raju (1997) é utilizado o valor de 1V pois com esta tensão são apresentados

bons resultados na identificação de mudanças estruturais.

Do ponto de vista dos ensaios típicos de análise modal, são utilizadas frequências de excitação muito altas. A resposta dinâmica da estrutura representa somente a área local do sensor. A resposta mecânica da vibração da área onde se encontra a pastilha de PZT é transmitida ao sensor na forma de uma resposta elétrica. Então quando ocorre uma falha mecânica na estrutura há mudanças na resposta dinâmica (dada pelo sinal da impedância), e consequentemente na resposta elétrica do PZT (PALOMINO, 2008). Um simples PZT pode ser capaz de identificar uma falha até uma distância (radial) de 0.4 metros em estruturas compósitas e até 2 metros em estruturas de barra de um único metal (PARK *et al.*, 2003).

A Figura 2.6 apresenta um exemplo para melhor visualização do modelo de SHM baseado em impedância eletromecânica, ele pode ser simplificado em um sistema massa-mola com um grau de liberdade.

Figura 2.6 – Modelo unidimensional do acoplamento eletromecânico utilizado para realizar o SHM baseado em impedância eletromecânica.



Fonte: Retirado de (MOURA JÚNIOR, 2008).

Segundo o trabalho de Liang, Sun e Rogers (1994), foi demonstrado que a admitância $Y(\omega)$ do PZT utilizado como atuador, é uma função combinada da impedância mecânica do PZT ($Z_a(\omega)$) e da estrutura ($Z(\omega)$). Ela é apresentada na equação 2.11 (TSURUTA, 2008).

$$Y(\omega) = \frac{I}{v} = i \cdot \omega \cdot a \cdot \left(\bar{\epsilon}_{33}^T (1 - i\delta) - \frac{Z(\omega)}{Z(\omega) + Z_a(\omega)} d_{3x}^2 \cdot \hat{Y}_{xx}^E \right) \quad (2.11)$$

visto que Y é a admitância elétrica (inverso da impedância), v é a voltagem de entrada no atuador PZT, I é a corrente de saída do PZT, a é a constante geométrica do PZT, d_{3x} é a constante de acoplamento piezoelétrico em uma direção x com deformação nula, $\hat{Y}_{xx}^E$ é o módulo complexo de Young do PZT com campo elétrico nulo, $\bar{\epsilon}_{33}^T$ é a constante dielétrica complexa do PZT com tensão zero, ω é a frequência angular, Z é a impedância complexa da estrutura, Z_a é a impedância complexa do PZT e δ é o fator de perda dielétrica tangencial do PZT.

De acordo com Moura Júnior (2008) e Bitencourt e Steffen Júnior (2009), assume-se que as propriedades mecânicas do PZT permanecem constantes ao longo do tempo, então,

percebe-se que, através da equação 2.11, a impedância elétrica do PZT é diretamente relacionada à impedância mecânica da estrutura. Sendo assim, qualquer variação na impedância elétrica medida, é considerada uma variação na impedância mecânica da estrutura e provavelmente uma possível presença de falha na estrutura. É possível notar que, a admitância elétrica é basicamente capacitiva, onde a parte imaginária é o termo dominante. O termo imaginário é mais suscetível a sofrer influências de fatores ambientais (como a variação da temperatura), do que a parte real. Por consequência, a parte real do sinal é usualmente utilizada nas aplicações (RAJU, 1997; PALOMINO, 2008)

A técnica de SHM baseada em impedância eletromecânica não é fundamentada em nenhum modelo estrutural. Portanto, é aplicável a qualquer estrutura complexa e os dados medidos podem ser facilmente interpretados (AYRES; ROGERS; CHAUDHRY, 1996; LALANDE *et al.*, 1996). E foi demonstrado que, a parte real da impedância complexa medida é mais sensível às características de dano dentro da estrutura, enquanto que a parte imaginária é mais sensível à temperatura (SUN *et al.*, 1995; BHALLA; NAIDU; SOH, 2003; PARK *et al.*, 2003; AFSHARI, 2012).

Em conformidade com Sun *et al.* (1995), a questão da identificação da melhor banda de frequência a ser monitorada sugere que as faixas acima de 200KHz são favoráveis para obter falhas localizadas, enquanto bandas menores que 70KHz são mais indicadas para áreas maiores de falhas.

Os sinais de impedância geralmente são obtidos através do analisador de impedância. Os dados adquiridos são transferidos para o computador para uma posterior análise e avaliação. Existem algumas dificuldades em utilizar este procedimento, pode-se citar como um exemplo, que o equipamento é grande e muito caro, sendo que poucos recursos deste são utilizados. Atualmente, vários pesquisadores utilizam outros equipamento como alternativas, dentre eles pode-se citar os analisadores de impedância de baixo custo *PmodIA* e *Eval - AD5933*, que serão descritos com mais detalhes nos tópicos posteriores.

2.3.3 Métricas de Dano

A impedância medida pelas pastilhas de PZT fornecem dados úteis relativos a integridade da estrutura em estudo. Entretanto, estes dados sem processamento, não fornecem informações quantificáveis sobre a presença e o estado do dano na estrutura. Dessa forma, ao processar o sinal medido, é necessário definir um índice que seja sensível ao dano e insensível aos outros parâmetros. Diferentes métodos estatísticos são amplamente utilizados no monitoramento da integridade estrutural baseado em impedância eletromecânica, ao fim de formar índices de danos. Pode-se citar como exemplos destes índices o desvio médio da raiz quadrada (RMSD), diferença média quadrada (ASD), o coeficiente de correlação (CC) e o desvio porcentual absoluto médio (MAPD) (AFSHARI, 2012; TSENG; NAIDU, 2002).

Segundo [Sun et al. \(1995\)](#), os gráficos das respostas de impedância nos fornecem informações qualitativas a respeito da integridade da estrutura em estudo, já a informação quantitativa geralmente é fornecida através de um escalar. Este escalar é conhecido como métrica de dano.

Uma delas é o RMSD, existem algumas variações desta métrica, contudo neste trabalho é apresentada apenas uma, ela é descrita pela equação 2.12.

$$M_{RMSD} = \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{[Re(Z_{1,i}) - Re(Z_{2,i})]^2}{[Re(Z_{1,i})]^2}} \quad (2.12)$$

Dado que M_{RMSD} representa a medida da falha, $Z_{1,i}$ representa sinal da impedância medido pelo PZT quando a estrutura está sob condições saudáveis (*baseline*), $Z_{2,i}$ representa o sinal da impedância medido pelo PZT quando a estrutura está sob condição de falha, i representa o intervalo de frequência e n representa a quantidade de pontos a serem analisados. Tais variações irão representar uma maior aproximação da falha quanto maior seja o valor da medida da falha ([MOURA JÚNIOR, 2008](#)).

De acordo com [Raju \(1997\)](#), a diferença média quadrada é outra das métricas utilizadas pelo método da impedância eletromecânica para quantificar o dano. Sua formulação matemática é apresentada na equação 2.13.

$$ASD = \sum_{i=1}^n [Re(Z_{1,i}) - (Re(Z_{2,i}) - \delta_{ASD})]^2 \quad (2.13)$$

No qual δ_{ASD} é a diferença das médias de cada um dos sinais, como pode ser visto a partir da equação 2.14.

$$\delta = Re(\bar{Z}_1) - Re(\bar{Z}_2) \quad (2.14)$$

A métrica de dano referente ao desvio do coeficiente de correlação é usada para interpretar e quantificar a informação contida em dois conjuntos de dados. A formulação matemática envolve a diferença entre um e o coeficiente de correlação entre a medição e a referência ([GIURGIUTIU; ZAGRAI, 2005](#)).

$$CCD = 1 - CC \quad (2.15)$$

No qual CCD é o desvio do coeficiente de correlação e CC é o coeficiente de correlação dado pela equação 2.16.

$$CC = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(Re(Z_{1,i}) - Re(\bar{Z}_1))(Re(Z_{2,i}) - Re(\bar{Z}_2))}{S_{Z_1} S_{Z_2}} \quad (2.16)$$

Visto que S_{Z_1} é o desvio padrão do sinal de impedância da referência e S_{Z_2} é o desvio padrão do sinal de impedância a ser comparado. Quando o coeficiente de correlação é igual a 1 os sinais têm total correlação. Quanto maior é a diferença entre os sinais, menor é o valor de CC. O valor de CC também pode ser utilizado para comparar e quantificar sinais de admitância (NAIDU; SOH, 2004).

Em conformidade com Tseng e Naidu (2002), existe ainda uma outra métrica de dano utilizada pelo método da impedância eletromecânica, ela é chamada de desvio percentual da média absoluta. Sua formulação é apresentada na pela equação 2.17.

$$MAPD = \sum_{i=1}^n \left| \frac{Re(Z_{1,i}) - Re(Z_{2,i})}{Re(Z_{1,i})} \right| \quad (2.17)$$

Observa-se que o MAPD é similar ao RMSD definido na equação 2.12, pois ambos avaliam as diferenças dos sinais em cada ponto dos dados da medição (PALOMINO, 2008).

2.3.4 Analisadores de Impedância

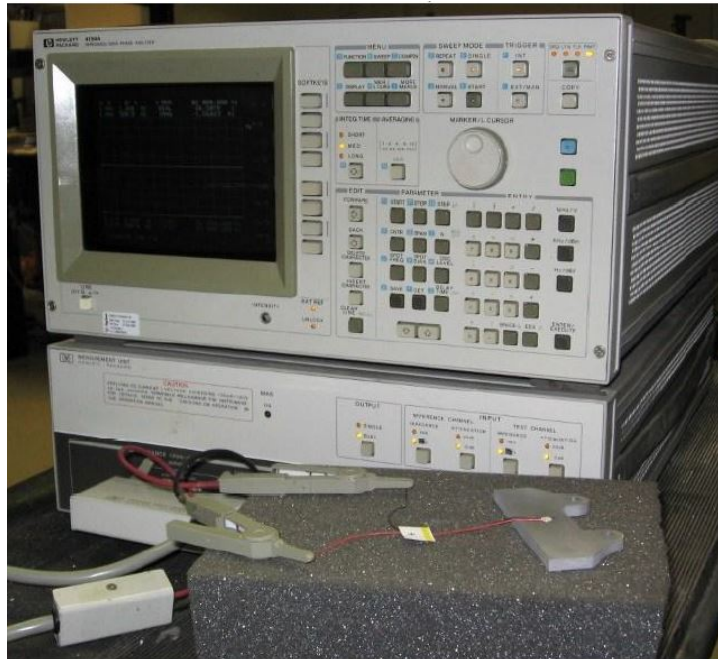
2.3.4.1 Analisador de Impedância HP

Segundo Teobaldi (2004), os analisadores de impedância tem propriedades para serem utilizados no monitoramento da saúde de equipamentos, estruturas e máquinas. Estes analisadores atuam em altas faixas de frequência. O custo dos analisadores comerciais é muito alto, de aproximadamente 30 mil dólares, dificultando a aplicação da técnica da impedância eletromecânica, pois ela utiliza apenas um subconjunto pequeno da capacidade destes instrumentos. Têm-se ainda como dificuldade, o fato de que estes analisadores são volumosos e pesados.

Um exemplo de analisador de impedância, que apesar de defasado, mas ainda é muito utilizado é o HP 4194 A. Utilizando este dispositivo dois parâmetros relacionados à impedância são medidos. O par de medidas mais comumente utilizado é o modo R-X, onde são medidos as partes real e imaginária da impedância complexa. As medidas feitas através do analisador de impedância HP 4194 A são mais precisas e podem ser feitas em uma ampla faixa de frequências. Este equipamento porém, é muito caro e possui um grande peso e volume o tornando assim pouco prático para a maioria das aplicações *in situ* (RAJU, 1997; BITENCOURT; STEFFEN JÚNIOR, 2009; AFSHARI, 2012). Na Figura 2.7 é apresentado o modelo de analisador de impedância HP 4194 A.

Atualmente como alternativa a este analisador de impedância que nem é mais comercializado existe o E4990A da Keysight Technologies.

Figura 2.7 – Analisador de impedância HP 4194A.

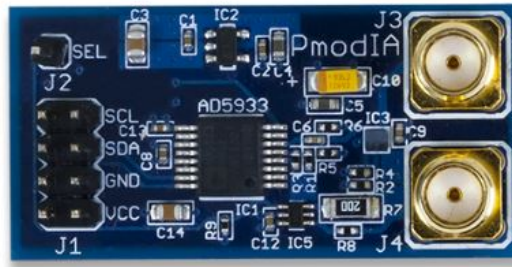


Fonte: Retirado de (AFSHARI, 2012).

2.3.4.2 PmodIA

Uma alternativa barata se comparada com o analisador de impedância da HP, pode ser o conversor *PmodIA* da empresa *Digilent*, que possui um preço estimado em cerca de 39 dólares. Este equipamento fornece aos usuários uma maneira de medir a impedância eletromecânica. Ele utiliza o CI *AD5933* o qual possui integrado um gerador de frequência de até 16.776MHz e um conversor analógico digital (ADC) para poder excitar uma impedância externa desconhecida em uma frequência conhecida. Essa frequência conhecida é enviada através de um dos conectores SMA. A resposta de frequência é capturada pelo outro conector SMA e enviada para o ADC e uma transformada discreta de *Fourier* (DFT) é realizada em dados amostrados, armazenando as partes reais e imaginárias da solução nos registros de dados do chip (DIGILENT, 2016).

Ao comunicar-se com o *PmodIA* através da interface *I2C*, os usuários podem programar o *PmodIA* para executar uma varredura em um circuito para obter a impedância eletromecânica. A Figura 2.8 apresenta o conversor de impedância em questão.

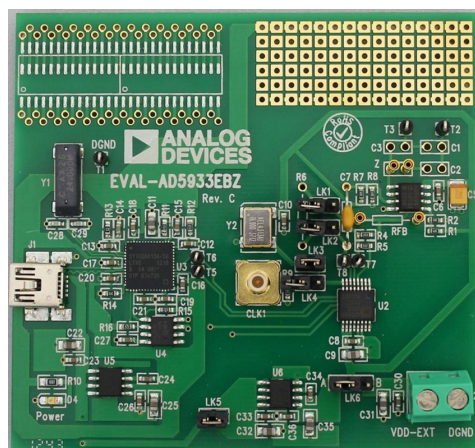
Figura 2.8 – Conversor de impedância *PmodIA*.

Fonte: Retirado de (DIGILENT, 2016).

2.3.4.3 Eval AD5933EBZ

Outra alternativa de baixo custo para realizar a medição de impedância eletromecânica pode ser a placa de modelo *Eval AD5933EBZ*. Esta placa também possui o CI *AD5933* que tornou-se de particular interesse devido às suas capacidades de medição de impedância. A aquisição do sinal é amostrada pelo conversor analógico digital e um microcontrolador processa e realiza a transformada discreta de Fourier (DFT), a placa opera com tensão de 2,7V até 5,5V. A tensão de alimentação da placa normalmente é fornecida pela porta USB do computador. Este registra principalmente a magnitude e a fase da impedância pela qual a parte real da impedância eletromecânica na técnica SHM pode ser calculada (SEPEHRY; SHAMSHIRSAZ; BASTANI, 2011; DEVICES, 2017).

A Figura 2.9 apresenta a placa de aquisição de dados em questão.

Figura 2.9 – Analisador de impedância *Eval - AD5933EBZ*.

Fonte: Elaborado pelo autor.

2.4 Métodos de Otimização

Uma das aplicabilidades dos métodos de otimização no monitoramento da integridade estrutural baseado em impedância eletromecânica é de otimizar as faixas de frequência para estudo das melhores bandas para verificação de onde existe a maior divergência entre os sinais, de estruturas sem danos e com danos. Além disso, como os métodos de otimização são procedimentos numéricos, eles podem também ser utilizados em diversas aplicações para o ajuste de parâmetros de módulos.

Serão apresentados a seguir, uma breve revisão bibliográfica sobre os três métodos de otimização, sendo um método clássico (Busca Aleatória) e dois métodos bioinspirados (Algoritmo de Colônia de Abelhas e Algoritmo de Colônia de Formigas), utilizados no estudo de caso, para encontrar a melhor faixa de frequência para análise entre dois sinais, sem dano e com dano, de impedância eletromecânica. Vale ressaltar que, neste trabalho o foco não é comparar um método de otimização com outro e apresentar qual é melhor, mas sim verificar que a resposta dos três métodos é a mesma, validando assim a melhor faixa de frequência.

2.4.1 Busca Aleatória

De acordo com [Vanderplaats \(1984\)](#), o método da Busca Aleatória é considerado o método de ordem zero mais simples de ser implementado. Por conta desta sua fácil implementação, ele é um processo muito utilizado. A simplicidade deste método é selecionar X vetores randomicamente ao longo de um espaço de projeto. Para evitar buscas mais longas do que o necessário, geralmente realiza-se algumas restrições, como $X^l \leq X \leq X^u$. Assumindo um gerador de números aleatórios que fornece números entre 0 e 1, então para produzir um valor para a i –ésima variável entre X^l e X^u , utiliza-se a equação 2.18.

$$X_i^q = X_i^l + r \cdot (X_i^u - X_i^l) \quad (2.18)$$

No qual r é um número randômico entre 0 e 1 e o sobrescrito q é o número de iterações ([VANDERPLAATS, 1984](#)).

2.4.2 Colônia de Abelhas

Nos últimos anos novas técnicas de otimização estão sendo desenvolvidas de acordo com estudos relacionados a sistemas biológicos. Estes métodos, diferentemente das técnicas clássicas, se embasam no uso de uma população de candidatos à solução do problema e estratégias para a atualização desta população. É essencial ressaltar que, as interações coletivas entre os agentes da população frequentemente conduz a algum tipo de comportamento ou inteligência coletiva. Esta particularidade fundamenta a base matemática na busca da solução ótima dos algoritmos bioinspirados ([SERAPIÃO, 2009a](#)).

Atualmente existem inúmeros métodos bioinspirados, mas pode-se dar uma certa notoriedade ao Algoritmo de Colônia de Abelhas - ACA (do inglês *Bee Colony Optimization*), proposto por [Lucic e Teodorovic \(2001\)](#), para a resolução de problemas de otimização combinatória. Essencialmente, esta técnica baseia-se no comportamento de colônias de abelhas em busca de matérias-primas para a produção de mel.

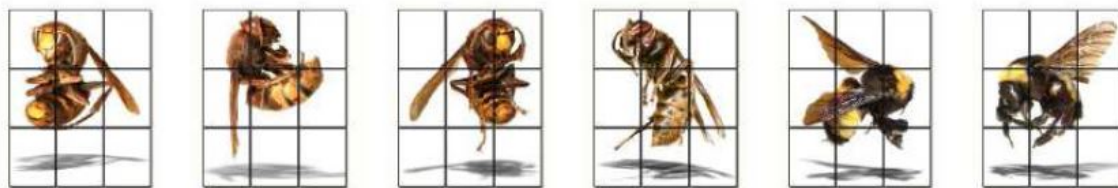
De acordo com observações realizadas na natureza, uma colônia de abelhas pode se estender por grandes distâncias (por aproximadamente $10Km$) e variadas direções ao mesmo tempo em busca de fontes de alimento. Neste âmbito então, o algoritmo de colônia de abelhas embasa-se em diversas observações práticas do comportamento das abelhas, podendo citar: refinados mecanismos de comunicação e compartilhamento de informações através de sons, substâncias químicas, tato, danças ou estímulos eletromagnéticos ([SERA-PIÃO, 2009a](#); [LUCIC](#); [TEODOROVIC, 2001](#); [LOBATO, 2016a](#)).

Para [Frisch \(1976\)](#), a dança tem um papel fundamental como meio de comunicação, pois é ela a responsável pela transmissão de informações sobre os espaços de busca explorados, (comunicação dentro da colônia, por exemplo, para indicar qual a direção em que está localizada a fonte de alimento, qual a sua distância em relação à colmeia e qual é a sua classificação quanto à qualidade do alimento). A intensidade desta dança permite que a colônia avalie a quantidade de alimento e conseqüentemente o número de abelhas a serem utilizadas, assim como quais as regiões devem ser exploradas ([CAMAZINE et al., 2001](#)).

Conforme destacado por [Lucic e Teodorovic \(2001\)](#), em cada colmeia são recrutados grupos de abelhas, as abelhas escoteiras, para explorar novas áreas com a finalidade de buscar pólen e néctar. Estas, ao retornarem para a colmeia, compartilham as informações adquiridas, de modo que novas abelhas são designadas para percorrer as melhores regiões visitadas, em quantidade proporcional à avaliação repassada anteriormente. Por consequência, as regiões mais promissoras são melhor exploradas e as piores acabam sendo casualmente descartadas. Este ciclo se repete, com novas regiões sendo visitadas pelas escoteiras a cada iteração.

Além disso, sabe-se que uma colônia de abelhas deve acumular comida para os períodos de inverno, onde as fontes de alimento tornam-se limitadas. Neste sentido, a colônia de abelhas coordena suas atividades de coleta de uma maneira eficiente, enviando as abelhas em múltiplas direções simultaneamente para explorar a maior área possível ([BAHAMISH; ABDULLAH; SALAM, 2008](#)). Depois de explorada a área, a abelha volta à colmeia, onde esta dança de maneiras distintas conforme a distância onde existe néctar, de modo a tentar convencer suas companheiras a segui-la. Exemplos desta dança são apresentados na Figura 2.10.

Figura 2.10 – Mecanismo para a transmissão de informações entre as abelhas.



Fonte: Retirado de (KARABOGA, 2005).

De acordo com Lobato (2016a), cada abelha decide por seguir um dado caminho de acordo com o número de vibrações realizadas e pela intensidade do som emitido durante esta dança. Quanto menor a distância entre a fonte de alimento e a colmeia, maior o número de vibrações. Vale ressaltar que os mecanismos pelos quais as abelhas decidem seguir uma dançarina específica não são bem conhecidos, mas considera-se que o recrutamento entre as abelhas é sempre uma função da qualidade da fonte de alimento, e que nem todas as abelhas começam a buscar alimento simultaneamente. Tal conjunto de procedimentos faz com que a colônia aumente a sua capacidade de exploração de regiões para fins de obtenção de insumos para a produção de mel.

Na literatura podem ser encontradas inúmeras aplicações do ACA, dentre as quais pode-se citar: resolução do problema do caixeiro viajante (LUCIC; TEODOROVIC, 2001), projeto de sistemas de engenharia e equipamentos (YANG, 2005; SERAPIÃO, 2009a), arquitetura de problemas de transporte (TEODOROVIC; DELL'ORCO, 2005), otimização de funções matemáticas (KARABOGA, 2005; PHAM *et al.*, 2006; SERAPIÃO, 2009a), alocação de recursos (QUIJANO; PASSINO, 2010), problemas de programação dinâmica (CHANG, 2006), problemas de controle ótimo (AFSHAR *et al.*, 2007), robótica (PHAM; CASTELLANI; FAHMY, 2008), projeto de filtros digitais (KARABOGA, 2009), resolução de problemas inversos em transferência radiativa (RIBEIRO NETO *et al.*, 2011), otimização multi-objetivo para o projeto de sistemas mecânicos (OMKAR *et al.*, 2011), sintonia de controladores (AZEEM; SAAD, 2004; SERAPIÃO, 2009b; SOUZA; LOBATO; GEDRAITE, 2012), dentre outras aplicações.

É importante ressaltar que várias linhas conceituais já foram utilizadas para o desenvolvimento de versões do ACA, dentre as quais pode-se citar: i) comportamentos de coleta de alimentos (LUCIC; TEODOROVIC, 2001; TEODOROVIC; DELL'ORCO, 2005; YANG, 2005; PHAM *et al.*, 2006; LU *et al.*, 2008), ii) comportamentos de acasalamento (ABBASS, 2001; CHANG, 2006; AFSHAR *et al.*, 2007) e iii) conceito de abelha-rainha (JUNG, 2003; AZEEM; SAAD, 2004; KARCI, 2004).

A técnica utilizada neste trabalho se baseia nos trabalhos de Karaboga (2005) e Pham *et al.* (2006). Como a maioria das estratégias heurísticas, o ACA é baseado numa população de candidatos potenciais para a resolução de problemas de otimização. Uma colônia de

abelhas artificiais (agentes) realiza a busca por ricas fontes de alimentos (boas soluções para um dado problema). Para aplicar o método então, o problema de otimização considerado deve ser inicialmente convertido em um problema para encontrar o melhor vetor de parâmetros que minimiza a função objetivo em questão. Então, as abelhas artificiais encontram aleatoriamente uma população de vetores de soluções iniciais e, em seguida, melhoram iterativamente, empregando as seguintes medidas estratégicas: avançam para as melhores soluções por meio de um mecanismo de busca na vizinhança e ao mesmo tempo abandonam as soluções precárias (KARABOGA, 2005).

O número de abelhas empregadas ou de espectadoras é igual ao número de soluções da colônia. O ACA gera uma população inicial aleatoriamente distribuída de SN soluções (fontes de alimentos), onde SN é o tamanho da colônia de abelhas (KARABOGA, 2005).

Então $X_i = \{x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,n_{abelhas}}\}$ representa a i – ésima solução na colônia, onde $n_{abelhas}$ é o tamanho da dimensão. Cada abelha empregada X_i gera uma nova cadidata a solução V_i na vizinhança de sua posição atual com a equação 2.19 (KARABOGA, 2005).

$$V_{i_k} = X_{i_k} + \Phi_{i_k}(X_{i_k} - X_{j_k}) \quad (2.19)$$

Uma vez que X_j é uma solução candidata escolhida aleatoriamente ($i \neq j$), k é um índice de dimensão aleatória selecionado do conjunto $\{1, 2, \dots, n\}$ e Φ_{i_k} é um número aleatório dentro de $[-1, 1]$. Uma vez que a nova solução candidata V_i é gerada, uma seleção é realizada. Se o valor da capacidade de V_i é melhor do que a de seu pai X_i , então atualize X_i com V_i , caso contrário mantenha X_i inalterado. Depois que todas as abelhas empregadas completarem o processo de busca, elas compartilham as informações a respeito de suas fontes de alimentos com as abelhas espectadoras através de danças (exemplos apresentados na Figura 2.10). As abelhas espectadoras avaliam então as informações em relação ao néctar que todas as abelhas empregadas forneceram e escolhem a fonte de alimento com uma probabilidade maior relacionada à quantidade de néctar. Esta seleção probabilística é chamada de *roulette wheel selection*, que pode ser descrito pela equação 2.20 (KARABOGA, 2005).

$$P_i = \frac{fit_i}{\sum_{i=1}^{SN} fit_i} \quad (2.20)$$

Dado que fit_i é o valor da capacidade da i – ésima solução na colônia. Conforme visto, quanto melhor for a solução i , maior será a probabilidade da fonte de alimento ser escolhida. Se uma posição não pode ser melhorada em um número predefinido (chamado limite) de ciclos, a fonte de alimento é abandonada. Suponha que a fonte abandonada seja X_i , e então a abelha escoteira descobre uma nova fonte de alimento para ser substituída pelo i – ésimo

resultado, como apresentado pela equação 2.21 (KARABOGA, 2005).

$$X_{i_k} = lb_i + rand(0, 1) \cdot (ub_i - lb_i) \quad (2.21)$$

Visto que $rand(0, 1)$ é um número aleatório entre $[0, 1]$ com base em uma distribuição normal e ub e lb são os limites superior e inferior da i – ésima dimensão, respectivamente.

A ideia básica desta técnica, portanto, é o esquema proposto para a exploração de regiões, podendo ser comparado com os algoritmos heurísticos que fazem uso do conceito de sub-populações, consistindo em um algoritmo de otimização inspirado no comportamento natural de busca por comida. Abaixo é apresentado o Algoritmo 2.1, que foi utilizado neste trabalho e foi baseado no algoritmo proposto por Pham *et al.* (2006).

Algoritmo 2.1: Algoritmo de Colônia de Abelhas

- 1 Gerar aleatoriamente uma população inicial (n_{ae} abelhas escoteiras).
 - 2 Avaliar a função objetivo para todos os indivíduos da população.
 - 3 Interromper o procedimento iterativo se todas as condições de parada forem satisfeitas.
 - 4 Selecionar m novas regiões de busca em torno das abelhas melhor avaliadas (menor valor de função objetivo).
 - 5 Recrutar m_{ge} abelhas para a busca geral nas m regiões.
 - 6 Selecionar a abelha com o menor valor da função objetivo em cada região.
 - 7 Substituir as abelhas com pior desempenho enviando m_2 abelhas para novas regiões de busca (aleatoriamente).
 - 8 Voltar para o Passo 2.
-

Segundo Lobato (2016a), o ACA tem o seu processo inicializado com a geração da população de n_{ae} abelhas escoteiras, limitadas pelo espaço de projeto definido pelo usuário (Passo 1). Em seguida, no Passo 2, para cada indivíduo desta população, avalia-se a função objetivo. No Passo 3 é feita a verificação dos critérios de parada, sendo o procedimento iterativo interrompido se estes forem satisfeitos. No Passo 4, as abelhas que têm os melhores valores, em termos da função objetivo, são escolhidas como "abelhas selecionadas", e os locais visitados por elas são escolhidos para a etapa de refinamento (exploração da vizinhança). Nos Passos 5 e 6, o algoritmo realiza buscas nas vizinhanças das regiões selecionadas, atribuindo neste caso, mais abelhas para a exploração das melhores regiões. Finalmente, realiza-se a avaliação da função objetivo para cada grupo de abelhas. Os valores da função objetivo são utilizados para determinar a probabilidade de seleção de abelhas. A busca nas vizinhanças das melhores regiões, que representam as soluções mais promissoras, são realizadas de forma mais detalhada através do recrutamento de mais abelhas. Esta etapa, conhecida como recrutamento diferencial, é uma operação fundamental do ACA. Ainda no Passo 6, para cada caminho percorrido, somente a abelha com melhor valor de fun-

ção objetivo será selecionada para formar a nova população de abelhas. Esta restrição, que não tem concepção conceitual fundamentada na natureza, foi introduzida para reduzir o número de pontos a serem explorados. No passo 7, as abelhas "restantes", isto é, aquelas que não tem bom valor de função objetivo, são substituídas por outras "geradas" aleatoriamente dentro do espaço de projeto. Este ciclo se repete até que um determinado critério de parada seja atendido.

2.4.3 Colônia de Formigas

De acordo com Koide (2010), o Algoritmo de Colônia de Formigas - ACF (do inglês *Ant Colony Optimization*) foi inspirado no comportamento das formigas, com respeito à organização do trabalho, cooperação entre si e sobretudo na busca pelo alimento. As colônias de insetos são muito organizadas e as atividades coletivas são realizadas com a auto-organização. Este comportamento social dos insetos pode ser explicado como sendo um mecanismo estrutural dinâmico de um sistema de interações entre os seus componentes. O estudo da auto-organização social dos insetos aplicado como um instrumento para outros campos do conhecimento originou diversos projetos de sistemas inteligentes com estas características, como exemplo pode-se citar o algoritmo de colônia de formigas (BONABEAU; DORIGO; THERAULAZ, 1999).

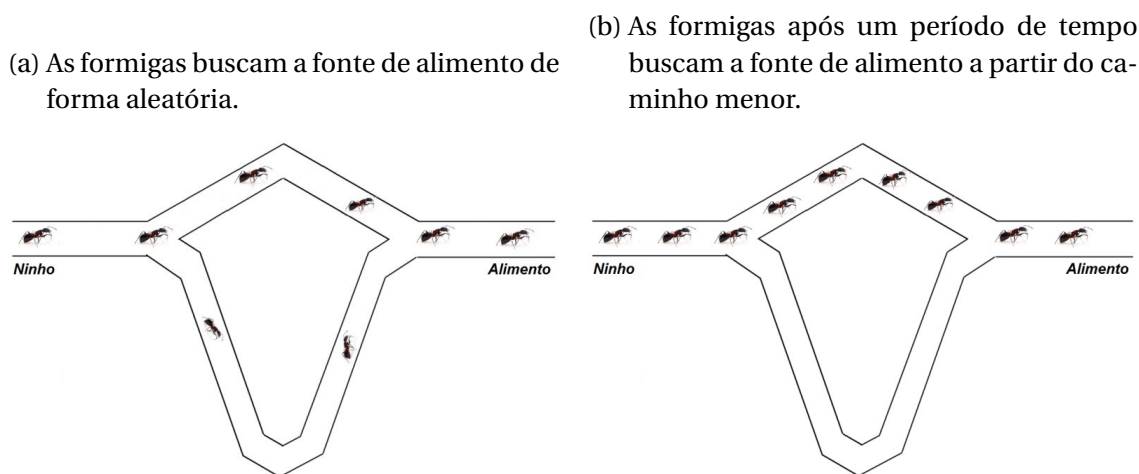
Um fator de grande destaque observado pelos biólogos, é a forma de comunicação das formigas. A auto-organização dos insetos necessita de uma interação entre si. Esta pode ser de forma direta, através de antenas, contato das mandíbulas, contato visual ou contatos químicos. E pode ser também de forma indireta, onde dois indivíduos podem interagir quando um deles modifica o ambiente e o outro responde a esta mudança em algum momento futuro (BONABEAU; DORIGO; THERAULAZ, 1999).

A forma de comunicação indireta das formigas é baseado na substância química produzida pelas formigas, o feromônio (DORIGO; STÜTZLE, 2004). Algumas espécies de formigas o utilizam para marcar trilhas e assim fazer caminhos ao seu redor. As trilhas de feromônio são utilizadas pelas formigas para se moverem do ninho até uma certa fonte de alimentos.

Esta observação científica foi constatada por Deneubourg *et al.* (1990), através de experimentos com formigas reais da espécie *L. humile*. Em um aquário, os autores colocaram um ninho de formigas em uma ponta e uma fonte de alimentos na outra ponta. Foram criados dois caminhos (um maior e outro menor) entre a colônia de formigas e a fonte de alimentos. No início, cada formiga seguiu um caminho aleatório. Mas como as formigas que escolheram o menor caminho realizavam o percurso de forma mais rápida do que as outras, era depositado uma maior quantidade de feromônio neste caminho em relação ao outro em um mesmo intervalo de tempo. Então, em um certo momento a intensidade do feromônio no caminho mais curto estava tão alta que quase todas as formigas seguiam por

ele. Basicamente, este experimento pode ser ilustrado nas Figuras 2.11 (a) e (b)

Figura 2.11 – Comportamento das formigas no experimento da ponte dupla.



Fonte: Adaptado de (DORIGO; STÜTZLE, 2004).

Constata-se então que as formigas tem a capacidade de perceber as mudanças realizadas por outras formigas no ambiente, sendo esta uma forma de comunicação (KOIDE, 2010). Inspirados no experimento da ponte dupla, Dorigo *et al.* (1991) geraram um modelo computacional baseado no comportamento social da colônia de formigas para resolver o problema do caixeiro viajante.

Este problema é baseado em um grupo de formigas artificiais, que liberam feromônio durante o seu percurso e seguem as trilhas de feromônio artificial para encontrar o menor caminho possível entre as cidades que o caixeiro deve visitar. De acordo com a explicação de Serapião (2009a), o algoritmo feito para solucionar este problema pode ser descrito da seguinte maneira: há uma colônia de formigas, onde cada formiga vai de uma cidade a outra independentemente, buscando cidades próximas ou realizando o seu caminho aleatoriamente. Durante o seu trajeto, uma formiga segue um caminho qualquer entre cidades, determinado por uma regra probabilística que sugere o caminho mais promissor, e libera uma determinada quantidade de feromônio. Essa quantidade é inversamente proporcional ao comprimento total do caminho percorrido pela formiga. Assim que todas as formigas tiverem concluído suas rotas e liberado feromônio, as conexões entre cidades que fazem parte da maior quantidade de rotas mais curtas terão uma quantidade maior de feromônio depositado. Visto que o feromônio evapora com o decorrer do tempo, quanto maior for o comprimento do caminho, mais rápido será o desaparecimento de uma trilha em um caminho longo.

Para Bonabeau, Dorigo e Theraulaz (1999), o algoritmo de colônia de formigas apresenta 4 características básicas. São elas: 1) a retroalimentação positiva em função das trilhas de feromônio, isto é, quanto maior o nível de feromônio melhor a qualidade da solução; 2) o

feromônio virtual, cuja quantidade é acrescida nas soluções boas e decrescida em outras soluções não efetivamente boas evitando a estagnação; 3) o comportamento cooperativo das formigas, cuja exploração é coletiva e 4) o reforço de feromônio nas trilhas de feromônio das formigas que atingiram melhores desempenhos.

Para [Viana et al. \(2008\)](#), as principais correspondências entre o que acontece na natureza e o ACF são apresentadas no Quadro 2.1.

Natureza	ACF
- Possíveis caminhos entre o ninho e o alimento	- Conjunto de possíveis soluções (diferentes vetores das variáveis de projeto).
- Caminho mais curto	- Solução ótima.
- Ação via comunicação por feromônio	- Procedimento de otimização.

Fonte: Adaptado de ([VIANA et al., 2008](#)).

Quadro 2.1 – Corresponência entre a natureza e o ACF.

Então, como dito anteriormente a primeira versão do algoritmo de otimização baseado em colônia de formigas foi apresentado por [Dorigo et al. \(1991\)](#). Foi a partir deste algoritmo que surgiram inúmeras variantes e versões aprimoradas que se diferem uma das outras pela maneira na qual as trilhas de feromônio são atualizadas ([DORIGO; MANIEZZO; COLORNI, 1996](#)).

A versão utilizada neste trabalho é a versão clássica. Segundo [Serapião \(2009a\)](#), ela pode ser explicada da seguinte maneira: dado um grafo G com V pontos, que representa um problema, uma formiga artificial é colocada em cada um dos pontos. Cada formiga percorre um caminho, seguindo uma fórmula probabilística em função do feromônio que é depositado em cada ponto do grafo para chegar ao destino.

Soluções parciais do problema são chamadas de estado. Cada formiga muda de um estado anterior para o próximo estado, que corresponde a uma solução parcial mais completa, com o objetivo de chegar ao estado final que é a solução total do problema. Em cada passo da construção da solução, a formiga visualiza o conjunto de expansões possíveis para a solução atual, isto é, identifica o conjunto de estados viáveis para o qual se pode passar a partir do estado atual.

Cada formiga possui uma estrutura de dados, chamada lista tabu, que guarda os pontos já visitados e proíbe que a formiga o visite novamente até completar o caminho (encontrar a fonte de alimento). Após a construção de todos os caminhos, a intensidade de feromônio em cada ponto (trilha) é acrescido de forma proporcional à qualidade da solução gerada.

Para construir a solução, cada formiga (k) utiliza iterativamente uma regra de transição de estado ($p_{i,j}$) (função probabilística) para decidir se incluirá ou não determinado

ponto na solução. As probabilidades ($p_{i,j}^k$) nas quais ocorrem as decisões para uma formiga (k) percorrer a conexão (i, j), são apresentadas em 2.22.

$$p_{i,j}^k(t) = \begin{cases} \frac{\tau_{i,j}^\alpha(t) \eta_{i,j}^\beta}{\sum_{j \in J^k} \tau_{i,j}^\alpha(t) \eta_{i,j}^\beta} & \text{se } j \in J^k \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.22)$$

Dado que $\tau_{i,j}$ é a trilha de feromônio da combinação (i, j), $\eta_{i,j}$ é a heurística local da combinação (i, j) (visibilidade), α é a importância relativa da trilha de feromônio e β é a importância relativa da heurística local.

Para realizar a atualização da trilha de feromônio nos pontos, é calculada inicialmente a quantidade a ser depositada em cada um deles, proporcionalmente à quantidade das soluções que pertecem a eles, através das seguintes relações:

$$\tau_{i,j}(t+1) = (1 - \rho) \tau_{i,j}(t) + \rho \Delta \tau_{i,j}(t) \quad (2.23)$$

$$\Delta \tau_{i,j} = \begin{cases} \frac{1}{f(S)} & \text{se } (i, j) \in S \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.24)$$

Dado que ρ é a taxa de evaporação (persistência da formiga na trilha), usada para evitar a rápida convergência das formigas em uma região do espaço de busca (convergência prematura), $\Delta \tau_{i,j}$ é a quantidade de feromônio que será depositada no ponto (i, j) e que depende da função objetivo f avaliada na solução S .

O valor de τ é modificado em cada iteração do processo de busca para aumentar os valores dos movimentos que resultaram em uma boa solução (correspondendo ao depósito de feromônio no caminho) e diminuir todos os demais valores (correspondente a evaporação do feromônio).

O Algoritmo 2.2 utilizado neste trabalho foi adaptado do algoritmo proposto por Do-

[rigo et al. \(1991\)](#).

Algoritmo 2.2: Algoritmo de Colônia de Formigas

Entrada: Definição dos parâmetros: F , NP , n_{iter} , d , ρ , α , β e as trilhas de feromônio

$$\Delta\tau_{i,j}.$$

- 1 Inicialização da população ($\vec{x}$)
 - 2 Avaliação de cada indivíduo da população - função objetivo ($F(\vec{x})$)
 - 3 Atualização da melhor formiga ($\vec{x}_*$)
 - 4 *while* (o critério de parada não for satisfeito) *do*
 - 5 Atualize cada formiga através da regra de transição de estado ($p_{i,j}^k$)
 - 6 Avalie o valor da função objetivo
 - 7 Armazene o valor da melhor solução
 - 8 Atualize os valores de $\Delta\tau_{i,j}$ e $\tau_{i,j}$
 - 9 *end while*
 - 10 Pós-processamento
-

Na maioria dos casos, o critério de parada do procedimento iterativo é o número de iterações (gerações), mas podem ser utilizados outros critérios como o número máximo de avaliações da função objetivo, intervenção humana, tempo de processamento, entre outros ([LOBATO, 2016b](#)).

2.5 Cadeia de Markov

2.5.1 Processos Estocásticos

Em conformidade com [Kijima \(1997\)](#), um processo estocástico pode ser definido como uma coleção de variáveis aleatórias $X(t)$ indexadas por um parâmetro t (geralmente o tempo) pertencente a um conjunto τ . Este parâmetro é chamado de **processo discreto no tempo** se o conjunto de índices for $\tau = \mathbb{Z}_+ = \{0, 1, 2, \dots\}$, ou de **processo contínuo no tempo** se $\tau = \mathbb{R}_+ = [0, \infty)$. De modo frequente, τ faz parte do conjunto dos números inteiros não-negativos. Entretanto, outros conjuntos podem ser viáveis e $X(t)$ representa uma característica mensurável de interesse no parâmetro t .

Segundo [Nogueira \(2009\)](#), os processos estocásticos são interessantes para descrever o procedimento de um sistema operando sobre algum período de tempo. Com isso, $X(t)$ pode ser o nível de estoque de um determinado produto no fim de um período de tempo t . É possível afirmar então que $X(t)$ é definido em um espaço denominado espaço de Estados.

Os processos estocásticos podem ser classificados como:

- Em relação ao estado:
 - estado discreto (cadeia): $X(t)$ é definido sobre um conjunto enumerável ou finito.

- estado contínuo (sequência): $X(t)$ caso contrário.
- Em relação ao tempo:
 - tempo discreto: t é finito ou enumerável.
 - tempo contínuo: t caso contrário.

2.5.2 Processos Markovianos

Um processo estocástico é denominado como processo markoviano se:

$$\begin{aligned} P\{X(t_{k+1}) \leq x_{k+1} \mid X(t_k) = x_k, X(t_{k-1}) = x_{k-1}, \dots, X(t_1) = x_{t1}, X(t_0) = x_{t0}\} \\ = P\{X(t_{k+1}) \leq x_{k+1} \mid X(t_k) = x_k\} \end{aligned} \quad (2.25)$$

sendo que para todo: $t_0 \leq t_1 \leq \dots t_k \leq t_{k+1} = 0, 1, \dots$ e toda sequência $k_0, k_1, \dots, k_{t-1}, k_t, k_{t+1}$.

A Equação 2.25, pode ser lida como: a probabilidade condicional de qualquer evento futuro, dado qualquer evento passado e o estado presente $X(t_k) = x_k$, é independente do evento passado e depende somente do estado presente. De uma forma mais simplificada pode-se dizer que: um processo estocástico é dito ser um processo markoviano se o estado futuro depende apenas do estado presente e não dos demais estados passados. Este tipo de processo estocástico pode ser intitulado de *memoryless process*, já que o passado não é levado em consideração (MARCOS, 2014).

As probabilidades condicionais $P\{X(t_{k+1}) \leq x_{k+1} \mid X(t_k) = x_k\}$, são nomeadas probabilidades de transição e representam desta maneira a probabilidade do estado $X(t_{k+1})$ ser x_{k+1} no instante t_{k+1} dado que o estado $X(t_k)$ é x_k no tempo t_k (MARCOS, 2014).

2.5.3 Cadeia de Markov

De acordo com Marcos (2014), um processo Markoviano é dito ser uma cadeia de Markov quando as variáveis randômicas $X(t)$ estão definidas em um espaço de estados discretos E . Caso o tempo seja discreto, a cadeia de Markov é dita ser uma **cadeia de Markov em tempo discreto**. Tem-se então que:

$$\begin{aligned} P\{X(t_{k+1}) \leq x_{k+1} \mid X(t_k) = x_k, X(t_{k-1}) = x_{k-1}, \dots, X(t_1) = x_{t1}, X(t_0) = x_{t0}\} \\ = P\{X(t_{k+1}) \leq x_{k+1} \mid X(t_k) = x_k\} \end{aligned} \quad (2.26)$$

$\forall$ sequência $0, 1, \dots, k-1, k, k+1$.

As probabilidades de transição $P\{X(k+1) = x_{k+1} \mid X(k) = x_k\}$ representam, desta forma, a probabilidade do estado $X(k+1)$ ser x_{k+1} no tempo $k+1$ dado que o estado $X(k)$ é $x(k)$ no tempo k .

Se para cada x_{k+1} e x_k , tem-se:

$$P\{X(k+1) = x_{k+1} \mid X(k) = x_k\} = P\{X(1) = x_1 \mid X(0) = x_0\} \quad (2.27)$$

$\forall$ sequência $1, 2, \dots, k-1, k, k+1$.

Então, estas probabilidades de transição são chamadas de estacionárias. Assim, tendo-se probabilidades de transição estacionárias, implica que as probabilidades de transição não mudam em relação ao tempo. Ainda de acordo com a expressão 2.27, as probabilidades de transição são denominadas **probabilidades de transição de passo 1** (MARCOS, 2014).

A existência de probabilidades de transição estacionárias de passo 1 implica que para cada x_{k+n} e x_k e $n(n = 0, 1, 2, \dots)$, tem-se:

$$P\{X(k+n) = x_{k+n} \mid X(k) = x_k\} = P\{X(n) = x_n \mid X(0) = x_0\} \quad (2.28)$$

$\forall$ sequência $1, 2, \dots, k-1, k, k+1$.

Assim, estas probabilidades condicionais são nomeadas de **probabilidades de transição de passo n**. Realizando a simplificação da expressão 2.28, adota-se x_{k+1} ou x_{k+n} como sendo j e x_k como i (NOGUEIRA, 2009). O resultado é apresentado abaixo:

$$p_{ij} = P\{X(k+1) = j \mid X(k) = i\} \quad (2.29)$$

e

$$p_{ij}^{(n)} = P\{X(k+n) = j \mid X(k) = i\} \quad (2.30)$$

Segundo as palavras de Nogueira (2009), como $p_{ij}^{(n)}$ são probabilidades condicionais, estas necessitam ser não negativas e desde que o processo precise realizar uma transição em algum estado, estas precisam satisfazer as seguintes propriedades:

$$p_{ij}^{(n)} \geq 0 \quad \forall (i, j), \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (2.31)$$

e

$$\sum_{j=0}^M p_{ij}^{(n)} = 1 \quad \forall i, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (2.32)$$

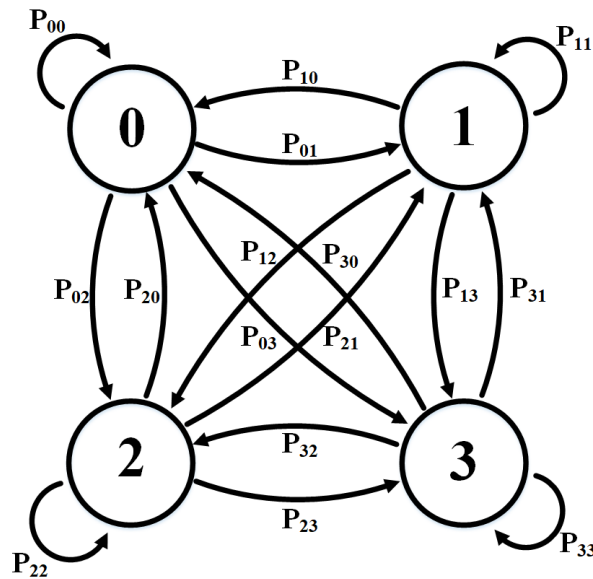
Uma maneira adequada de se apresentar todas as probabilidades de transição de passo n é montar a matriz $\mathbf{P}^{(n)}$:

$$\mathbf{P}^{(n)} = \begin{bmatrix} P_{00}^{(n)} & P_{01}^{(n)} & \cdots & P_{0M}^{(n)} \\ P_{10}^{(n)} & P_{11}^{(n)} & \cdots & P_{1M}^{(n)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{M0}^{(n)} & P_{M1}^{(n)} & \cdots & P_{MM}^{(n)} \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

A matriz $\mathbf{P}^{(n)}$ é denominada **matriz de transição de passo n** . Quando $n = 1$, a matriz é denominada apenas **matriz de transição** (NOGUEIRA, 2009).

Uma maneira alternativa de se representar as probabilidades de transição é utilizar uma representação chamada de **diagrama de transição de estado**. Neste os sentidos das flechas indicam a probabilidade de transição de um estado i para outro estado j . A Figura 2.12, apresenta um exemplo deste diagrama.

Figura 2.12 – Exemplo de diagrama de transição.



Fonte: Adaptado de (NOGUEIRA, 2009).

Para Nogueira (2009), a matriz de transição $\mathbf{P}$ é a matriz de transição de probabilidades de estado para um passo no tempo, ou seja, de t para $t + 1$. É possível dizer então de uma maneira mais básica que as equações de Chapman-Kolmogorov fornecem um método para computar a matriz de transição para n passos no tempo, ou seja, de t para $t + 1$, de t para $t + 2, \dots$, de t para $t + n$.

Seja $p_{ij}^{(n)}$ a probabilidade de transição do estado i para o estado j de passo n , pode-se

escrever que:

$$p_{ij}^{(n)} = \sum_{k=0}^M p_{ik}^m p_{kj}^{n-m} \quad (2.34)$$

$$\forall \quad i = 0, 1, \dots, M.$$

$$\forall \quad j = 0, 1, \dots, M.$$

e qualquer $m = 1, 2, \dots, n-1$ e qualquer $n = m+1, m+2, \dots$.

Em notação matricial, a expressão 2.34, pode ser observada de acordo com a equação 2.35.

$$\mathbf{P}^{(n)} = \mathbf{P}^m \cdot \mathbf{P}^{n-m} \quad (2.35)$$

Segundo Taylor (2012), $\mathbf{P}^{(n)}$ é a matriz de transição de passo n . Em particular, se $n = 2$ e $m = 1$, então desde $\mathbf{P}^{(1)} = \mathbf{P}$, obtêm-se a equação 2.36.

$$\mathbf{P}^{(2)} = \mathbf{P}^1 \cdot \mathbf{P}^{2-1} = \mathbf{P} \cdot \mathbf{P} = \mathbf{P}^2 \quad (2.36)$$

Isso, por sua vez implica que $\mathbf{P}^{(3)} = \mathbf{P}^2 \cdot \mathbf{P}^{3-2} = \mathbf{P}^2 \cdot \mathbf{P} = \mathbf{P}^3$, e continuando desta forma obtêm-se a equação 2.37.

$$\mathbf{P}^{(n)} = \mathbf{P}^n \quad (2.37)$$

$$\forall \quad n \geq 1.$$

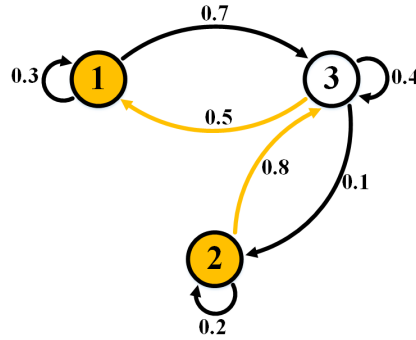
A expressão 2.37, garante que a matriz de transição de passo n é igual à matriz de transição de passo 1 elevada a n – *ésima* potência. É importante ressaltar que, esta expressão só é válida para cadeias de Markov cujas probabilidades de transição de estados **são constantes** em relação ao tempo (probabilidades de transição estacionárias). A este tipo de cadeia de Markov denomina-se **cadeia de Markov homogênea** e a matriz de transição $\mathbf{P}$ é então uma matriz homogênea (NOGUEIRA, 2009; TAYLOR, 2012).

Segundo com Marcos (2014), os estados podem ser classificados e categorizados de acordo com seu comportamento na cadeia de Markov.

Dois estados i e j são ditos **estados comunicáveis** se j é acessível a partir de i , se i é acessível a partir de j . Ainda se um estado i comunica-se com um estado k e este se comunica com um estado j , então i comunica-se com j . Se dois estados comunicam-se entre si eles pertencem à mesma classe. Se todos os estados são comunicantes, portanto todos os estados pertencem a uma única classe e a cadeia de Markov é **irredutível** (NOGUEIRA, 2009).

Na Figura 2.13, é apresentado um exemplo de estado comunicável, observa-se que todos os estados são comunicáveis, inclusive os estados 1 e 2, pois j é acessível a partir de i e vice-versa.

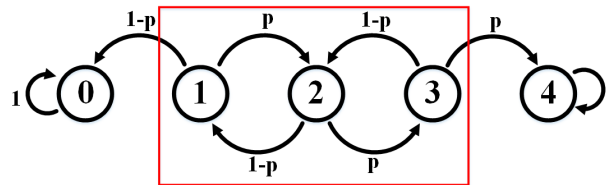
Figura 2.13 – Exemplo de estado comunicável.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Um estado i é um **estado transiente** se existe um estado $j (j \neq i)$ que é acessível a partir de i , mas o contrário não é possível, isto é, i não é acessível a partir de j . Um estado transiente será visitado somente um número finito de vezes. Após um número suficientemente grande de períodos a probabilidade de o sistema estar em um estado transiente é zero (NOGUEIRA, 2009). A Figura 2.14, apresenta um exemplo de estado transiente.

Figura 2.14 – Exemplo de estado transiente.

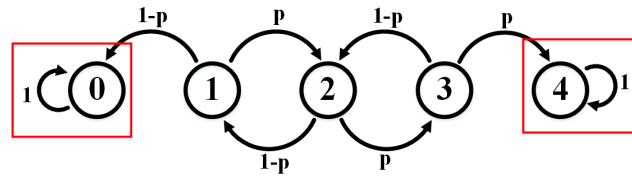


Fonte: Elaborado pelo autor.

Um estado é dito ser **recorrente** se entrando neste estado, o processo definitivamente irá retornar para este estado. Portanto, um estado é recorrente, se e somente se, não é transiente. Uma vez que o estado recorrente será "revisitado" após cada visita (não necessariamente no próximo passo do processo), este será visitado infinitamente para o processo em tempo infinito (NOGUEIRA, 2009).

Um estado é **absorvente** se $p_{ii} = 1$. Uma vez entrado neste estado, o processo nunca deixará o mesmo. A Figura 2.15, apresenta um exemplo de estado absorvente. Uma vez estando neste estado, a probabilidade de permanecer nele é igual a 1. É possível afirmar então, que um estado absorvente é um caso especial de um estado recorrente (NOGUEIRA, 2009).

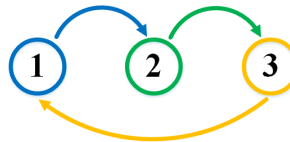
Figura 2.15 – Exemplo de estado absorvente.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Um estado i é **periódico** com período t se um retorno a este estado é possível somente em $t, 2 \cdot t, 3 \cdot t, \dots, m \cdot t$ passos para $t > 1$ e t é o maior inteiro com esta propriedade (máximo divisor comum). Isto implica que $p_{ii}^{(n)} = 0$ sempre que n não é divisível por t (NOGUEIRA, 2009). Na figura 2.16, pode-se verificar que somente é possível voltar para cada estado com múltiplos de 3 passos (para voltar ao estado 1 necessita-se 3 passos).

Figura 2.16 – Exemplo de estado Periódico.

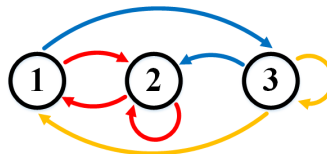


Fonte: Elaborado pelo autor.

Se o estado recorrente não é periódico, então, é denominado de **aperiódico** (NOGUEIRA, 2009).

Na Figura 2.17, o estado 1 é aperiódico porque pode voltar para ele em 2 ou 3 passos (2 e 3 não são múltiplos).

Figura 2.17 – Exemplo 2 de estado Aperiódico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Se **todos os estados** em uma cadeia de Markov são **recorrentes, aperiódicos e comunicáveis**, então a cadeia é chamada de **ergódica**, isso significa que em n passos teremos um comportamento estacionário.

Segundo (OLIVEIRA, 2014), seja $\mathbf{P}$ a matriz de transição para uma **Cadeia Ergódica** com S estados. Então, existe uma matriz de $\mathbf{P}$, com estado estacionário $\pi = [\pi_1 \cdots \pi_s]$, tal que, conforme n é suficientemente grande ela terá a forma da matriz 2.38. É possível verificar

nesta matriz que, todos os valores da primeira coluna devem ser iguais, todos os valores da segunda coluna devem ser iguais, e assim até última coluna.

$$\lim_{k \rightarrow \infty} P^k = \begin{bmatrix} \pi_1 & \pi_2 & \cdots & \pi_S \\ \pi_1 & \pi_2 & \cdots & \pi_S \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \pi_1 & \pi_2 & \cdots & \pi_S \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

tal que a soma das linhas deve atender a seguinte propriedade: $\pi_1 + \pi_2 + \cdots + \pi_S = 1$.

Supondo que estamos no estado estacionário, o sistema apresentado na equação 2.39 é válido.

$$\pi^n = \pi^0 \cdot P^n \quad (2.39)$$

Não existe uma equação sobre o número de passos necessários para a cadeia de Markov se tornar estacionária, mas se P contém poucos valores e estes são próximos de 0 ou 1, então, o estado estacionário é atingido rapidamente (NOGUEIRA, 2009).

Capítulo 3

OTIMIZAÇÃO DAS FAIXAS DE FREQUÊNCIA ASSOCIADA A IMPEDÂNCIA ELETROMECÂNICA

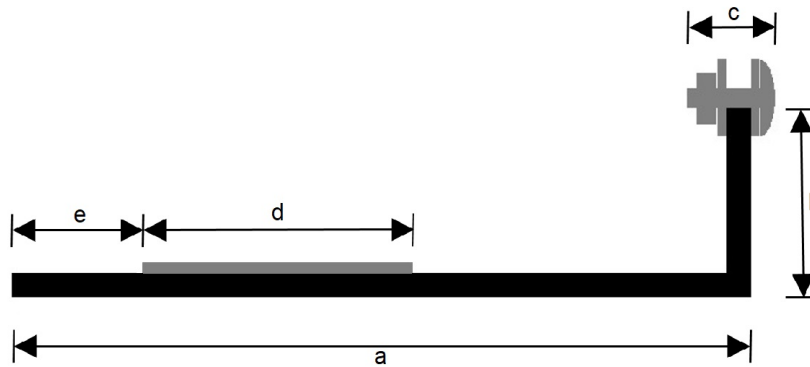
O estudo de caso apresentado neste capítulo aborda o ensaio de monitoramento da integridade estrutural baseado em impedância eletromecânica para identificação de falhas e a otimização das bandas de frequência para encontrar a faixa que mais diverge entre os sinais de uma viga em dois estados diferentes, um estado sem dano e outro com dano. Deve-se destacar que de acordo com [Giurgiutiu e Zagrai \(2002\)](#) e [Raju \(1997\)](#), um importante aspecto desta técnica é a correta determinação da banda de frequência mais sensível para realização do SHM para este tipo de dano. Em geral, a obtenção da banda para uma dada estrutura é determinada pelo método de tentativa e erro e o tipo de sinal mais utilizado para análise de impedância eletromecânica é o que corresponde à parte real.

O experimento consiste na realização de medições dos sinais de impedância eletromecânica através do acoplamento do PZT (responsável pela associação da impedância elétrica do PZT com a impedância mecânica da estrutura) na viga em estudo, em duas condições diferentes. Na primeira condição a viga está íntegra e na segunda condição é simulada uma falha (acréscimo de massa - um conjunto formado por parafuso, porca e duas arruelas - na extremidade dobrada da viga), para então poder ser realizada a implementação dos algoritmos de otimização propostos e fornecer ao final a melhor faixa de estudo para análise dos sinais.

A viga utilizada neste ensaio possui as seguintes dimensões: $150 \times 25 \times 3\text{mm}$ e a extremidade dobrada tem 35mm de comprimento. A massa do conjunto viga+PZT tem cerca de 60g . O sensor/atuador utilizado neste experimento é o do tipo Titanato-Zirconato de Chumbo (PZT) com dimensões de $73 \times 25\text{mm}$. A Figura 3.1, apresenta uma ilustração com a vista lateral da viga em estudo (o PZT está retratado na cor cinza e destacado pela letra *d*),

as medidas geométricas, em mm , para melhor entendimento são: $a = 150$; $b = 35$; $c = 16$; $d = 73$; $e = 23$.

Figura 3.1 – Dimensões da viga em estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 3.2(a) é apresentada a viga em perfeitas condições (sem nenhum dano), já na Figura 3.2(b) é apresentada a mesma viga, só que na condição de falha (um acréscimo de massa de aproximadamente 11 g na extremidade dobrada da viga simula o dano físico na mesma - um aumento de cerca de 18% na massa total da estrutura). Na Figura 3.2 também é possível constatar que o sensor/atuador piezoelétrico está fixado na viga.

Figura 3.2 – Viga utilizada no experimento de impedância eletromecânica.

(a) Forma íntegra (sem dano).



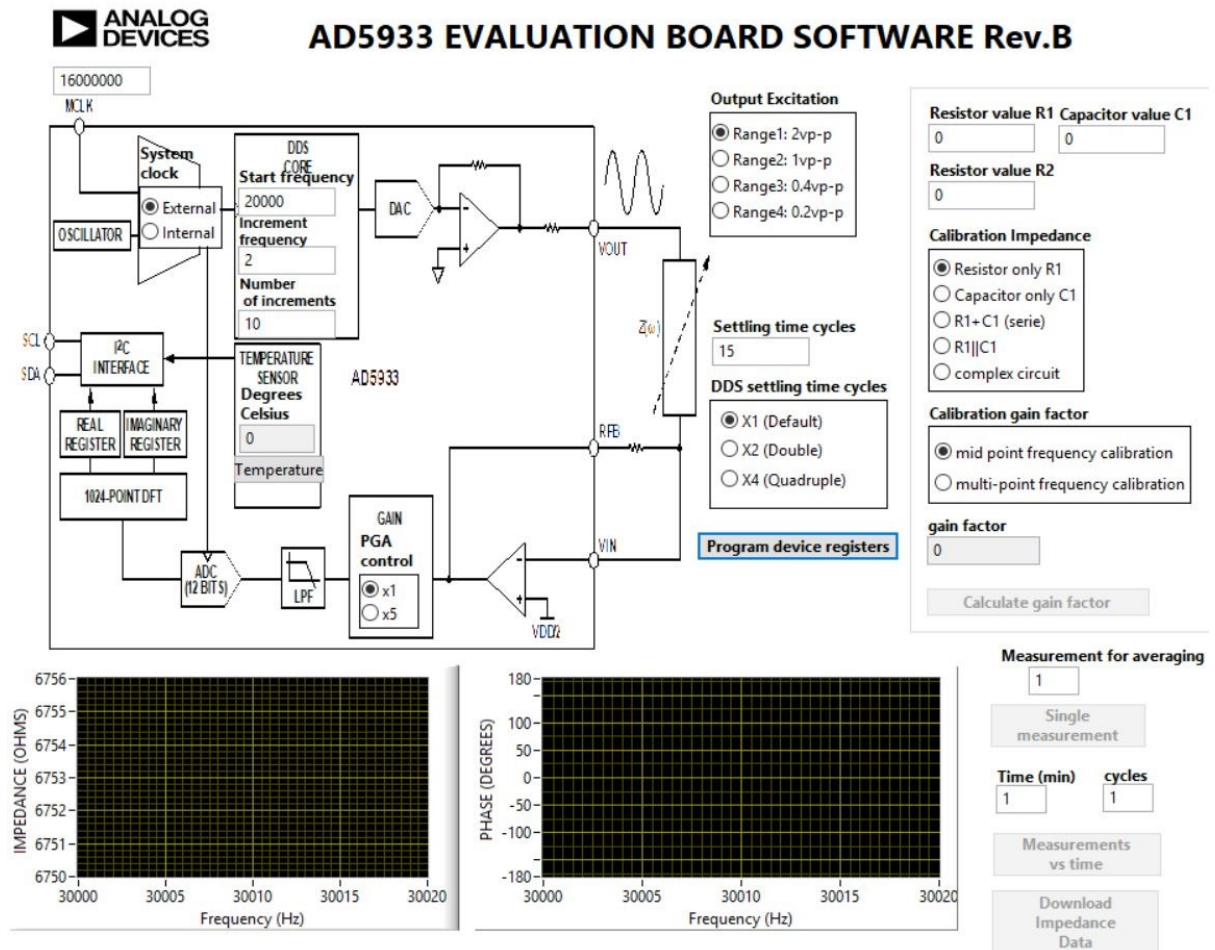
(b) Simulação de um dano (em destaque no círculo de cor vermelha).



Fonte: Elaborado pelo autor.

O monitoramento do sinal de impedância eletromecânica da viga é feito através da placa EVAL-AD5933EBZ, que é apresentada na Figura 2.9. A placa faz comunicação com um computador através da conexão USB, e a partir do software *AD5933 Evaluation Board Software Rev.B* é realizada a medição do sinal de impedância. A interface deste software é apresentada na Figura 3.3.

Figura 3.3 – Interface do software utilizado para realizar o ensaio de SHM baseado em impedância eletromecânica.

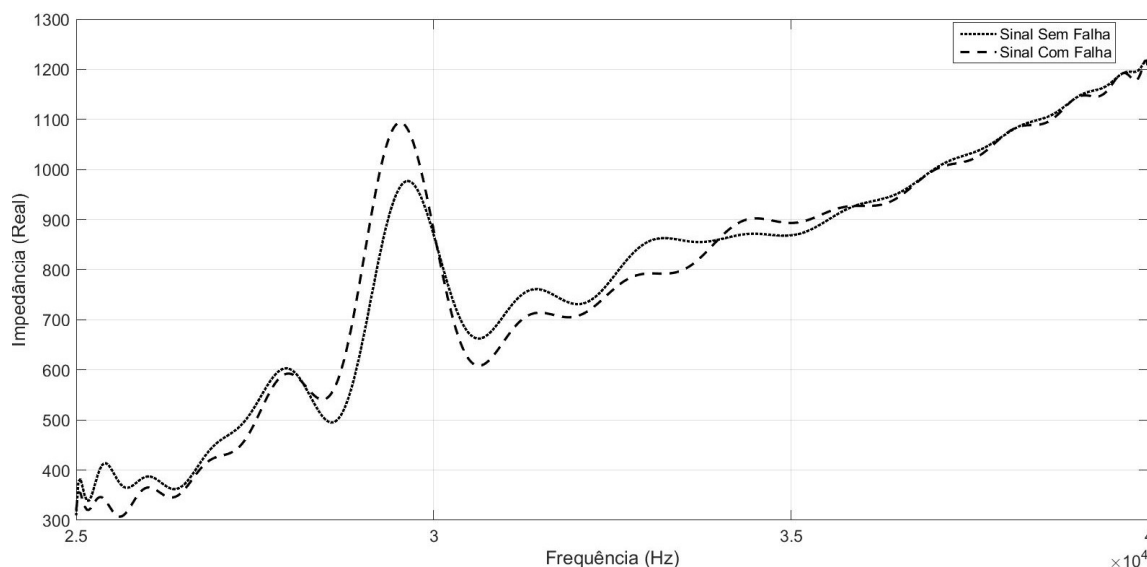


Fonte: AD5933 Evaluation Board Software Rev. B.

A faixa de frequência utilizada neste experimento foi de 25–40KHz com um passo de 30Hz, totalizando 501 pontos para análise. É importante ressaltar que, esta faixa de frequência foi selecionada através do método de tentativa e erro. Deve-se trabalhar apenas com a parte real do sinal da impedância medida para poder realizar as análises, devido ao fato de que as propriedades mecânicas da estrutura estão armazenadas nesta parte do sinal.

Foram realizadas 20 amostras na condição da viga sem falha e outras 20 amostras na condição da viga com falha. A média destas amostras é apresentada na Figura 3.4, onde os sinais de impedância eletromecânica da viga em questão estão plotados.

Figura 3.4 – Medição dos sinais de impedância eletromecânica da viga com e sem falha.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nos tópicos a seguir, serão mostrados os estudos referentes a otimização da melhor faixa de frequência do sinal de impedância eletromecânica, apresentado na Figura 3.4. É importante salientar que a função objetivo utilizada nos três métodos de otimização foi a métrica de dano RMSD, pois ela é, de acordo com a literatura estudada, uma das métricas mais utilizadas nos ensaios de impedância eletromecânica para quantificar os sinais, realizando a comparação entre dois sinais (*baseline* e dano) e fornecendo um valor escalar que quantifica essa diferença. E também a mesma restrição foi aplicada aos três métodos, a faixa de frequência, determinou-se que a variação da faixa de frequência será entre ± 10 e ± 20 do ponto ótimo selecionado, ou seja, a melhor faixa de frequência para análise poderá variar entre 21 e 41 pontos.

3.1 Otimização pelo Algoritmo de Busca Aleatória

O primeiro método de otimização utilizado é o método clássico da Busca Aleatória. Foram realizadas simulações com 1000, 3000, 5000, 7000 e 10000 iterações para verificar a eficácia do método em encontrar a faixa com a maior divergência entre os sinais. De acordo com a Tabela 3.1 foram realizadas 20 simulações para cada uma das cinco diferentes iterações utilizadas e em todas estas simulações a faixa ótima de frequência tem 41 pontos dentro do vetor.

Para 1000 iterações, pode-se observar que esta quantidade de iterações não fornece um resultado preciso, variando o ponto ótimo em dez posições diferentes. Com 3000 iterações, observa-se que o resultado já apresenta uma melhora se comparado com o resultado anterior, apresentando o ponto ótimo em seis posições diferentes. Com 5000 iterações, é

possível observar que o resultado esta variando apenas entre três posições. Com 7000 iterações, o ponto ótimo varia em três posições diferentes, mas em 15 das 20 simulações o resultado ótimo está na posição 138. E finalmente com 10000 iterações, pode-se verificar que este é o melhor resultado apresentado por este algoritmo, sendo que o ponto ótimo varia apenas entre duas posições e em 17 das 20 simulações o resultado ótimo está na posição 138.

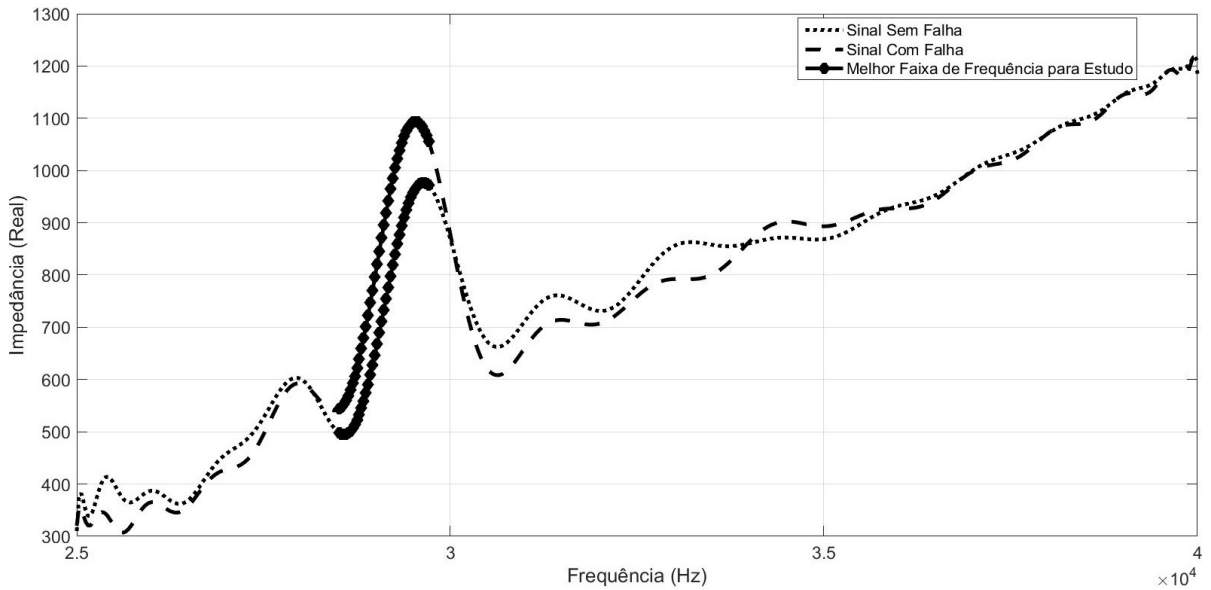
Tabela 3.1 – Simulações realizadas com o ABA para comparação do ponto ótimo.

Simulação	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ponto Ótimo 1000 iterações	141	141	135	139	137	133	136	138	138	136	138	142	140	138	139	136	145	138	136	138
Ponto Ótimo 3000 iterações	138	138	138	139	140	139	135	139	138	138	140	136	137	139	138	138	139	139	138	140
Ponto Ótimo 5000 iterações	138	138	138	138	138	137	137	137	137	137	137	138	138	138	138	138	138	138	137	139
Ponto Ótimo 7000 iterações	138	138	138	137	138	138	138	138	137	138	138	137	138	138	139	138	138	138	138	139
Ponto Ótimo 10000 iterações	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	137	138	137	138	138	138	137	138	138	138

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após analisar a Tabela 3.1, conclui-se que com o aumento das iterações chega-se a um melhor resultado. E de acordo com este método de otimização é a posição 138 com uma faixa de frequência de 41 pontos, a melhor faixa para estudo, ou seja faixa de frequência de maior divergência entre os sinais é compreendida entre 28510 – 29710Hz. Para uma melhor visualização, a Figura 3.5 apresenta a faixa otimizada (em destaque pelos pontos em negrito) pelo método da Busca Aleatória no sinal da impedância obtido pelo experimento.

Figura 3.5 – Medição dos sinais de impedância eletromecânica da placa com e sem falha, apresentando a faixa com maior divergência dos sinais pelo algoritmo de busca aleatória com 10000 iterações.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2 Otimização pelo Algoritmo de Colônia de Abelhas

O segundo método de otimização utilizado é o Algoritmo de Colônia de Abelhas. Neste algoritmo serão realizadas variações na população de abelhas (5, 10, 25, 50 e 100) e na quantidade de iterações (10, 25, 50 e 100) para verificar a eficácia do algoritmo em encontrar a faixa com a maior divergência entre os sinais. De acordo com a Tabela 3.2 foram realizadas 20 simulações para cada uma das cinco diferentes iterações utilizadas e em todas estas simulações a faixa ótima de frequência tem 41 pontos dentro do vetor.

Iniciando com uma população de 5 abelhas e 10 iterações, pode-se observar que o resultado não é tão preciso, apresentando variação do ponto ótimo em 12 posições diferentes. Com a população de 10 abelhas e 10 iterações, é possível observar que o resultado já apresenta significativas melhoras se comparado com o resultado anterior, apresentando seis posições diferentes do ponto ótimo. Já com a população de 25 abelhas e 25 iterações, observa-se que o resultado foi o mesmo, apresentado ponto ótimo sempre na posição 138. E os resultados apresentados para a população de 50 abelhas e 50 iterações e para a população de 100 abelhas e 100 iterações, também foi o mesmo, ou seja, o ponto ótimo sempre na posição 138.

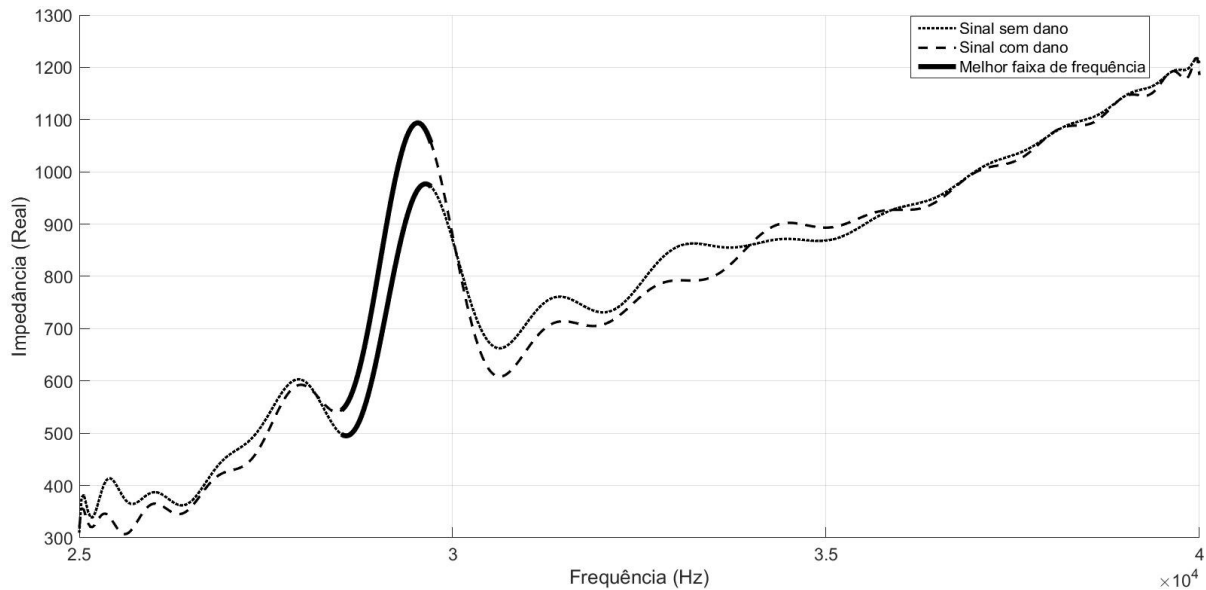
Tabela 3.2 – Simulações realizadas com o ACA para comparação do ponto ótimo.

Simulação	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ponto Ótimo																				
5 abelhas	141	133	136	137	139	146	134	126	141	140	141	141	142	141	137	135	136	137	137	138
10 iterações																				
Ponto Ótimo																				
10 abelhas	138	138	138	138	137	138	138	141	136	138	138	139	138	138	139	138	140	137	139	138
10 iterações																				
Ponto Ótimo																				
25 abelhas	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138
25 iterações																				
Ponto Ótimo																				
50 abelhas	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138
50 iterações																				
Ponto Ótimo																				
100 abelhas	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138
100 iterações																				

Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com a Tabela 3.2 é possível afirmar que há uma significativa melhora nos resultados quando a quantidade da população de abelhas é ampliada de 5 para 10. E utilizando a população de 25 abelhas, 50 abelhas e 100 abelhas os resultados são sempre os mesmos, ponto ótimo sempre na posição 138 com uma faixa de frequência de 41 pontos, ou seja faixa de frequência de maior divergência entre os sinais é compreendida entre 28510 – 29710Hz. Para uma melhor visualização a Figura 3.6 apresenta a faixa otimizada (em destaque pelas linhas contínuas em negrito) pelo Algoritmo de Colônia de Abelhas no sinal da impedância obtido pelo experimento.

Figura 3.6 – Medição dos sinais de impedância eletromecânica da placa com e sem falha, apresentando a faixa com maior divergência dos sinais pelo ACA.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3 Otimização pelo Algoritmo de Colônia de Formigas

O terceiro método de otimização utilizado é o Algoritmo de Colônia de Formigas. Neste algoritmo serão realizadas variações na população de formigas (5, 10, 25, 50 e 100) e na quantidade de iterações (10, 25, 50 e 100) para verificar a eficácia do algoritmo em encontrar a faixa com a maior divergência entre os sinais. De acordo com a Tabela 3.3 foram realizadas 20 simulações para cada uma das cinco diferentes iterações utilizadas e em todas estas simulações a faixa ótima de frequência tem 41 pontos dentro do vetor.

Iniciando com uma população de 5 formigas e 10 iterações, pode-se observar o resultado já converge para a posição 138 em 19 das 20 simulações realizadas. Com a população de 10 formigas e 10 iterações, é possível observar que o método ainda não foi capaz melhorar o resultado, apresentando os mesmos resultados anteriores. Com a população de 25 formigas e 25 iterações, observa-se que o resultado ótimo sempre está na posição 138. E os resultados apresentados para a população de 50 formigas e 50 iterações e para a população de 100 formigas e 100 iterações, também foi o mesmo, ou seja, o ponto ótimo sempre na posição 138.

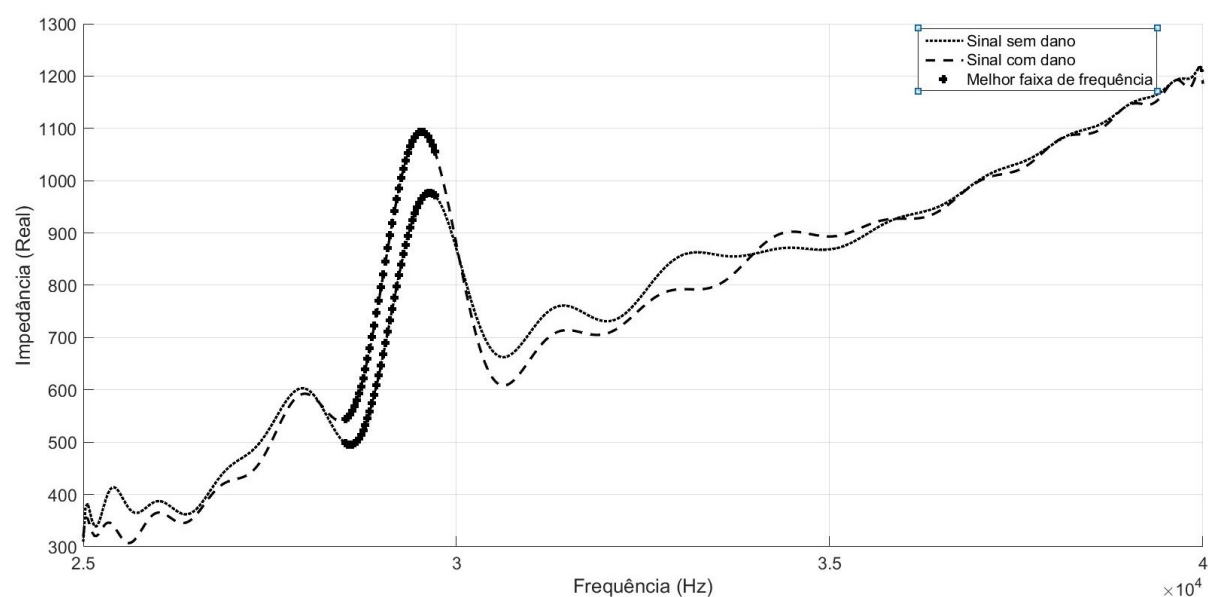
Tabela 3.3 – Simulações realizadas com o ACF para comparação do ponto ótimo.

Simulação	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ponto Ótimo																				
5 formigas	138	138	138	138	138	23	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138
10 iterações																				
Ponto Ótimo																				
10 formigas	138	138	138	138	138	23	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138
10 iterações																				
Ponto Ótimo																				
25 formigas	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138
25 iterações																				
Ponto Ótimo																				
50 formigas	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138
50 iterações																				
Ponto Ótimo																				
100 formigas	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138	138
100 iterações																				

Fonte: Elaborado pelo autor.

Em conformidade com a Tabela 3.3 é possível afirmar que não há melhora nos resultados quando a quantidade de integrantes da população é dobrada de 5 para 10 formigas, mas a partir dos resultados apresentados utilizando 25 formigas e 25 iterações é possível afirmar que esta quantidade utilizada é suficiente para apresentar o melhor ponto ótimo para este estudo, que é o ponto 138. O mesmo resultado é apresentado utilizando 50 e 100 formigas. Pode-se afirmar então que a faixa de frequência de maior divergência entre os sinais é compreendida entre 28510 – 29710Hz. Para uma melhor visualização a Figura 3.7 apresenta a faixa otimizada (em destaque pelas linhas pontilhadas em negrito) pelo Algoritmo de Colônia de Formigas no sinal da impedância obtido pelo experimento.

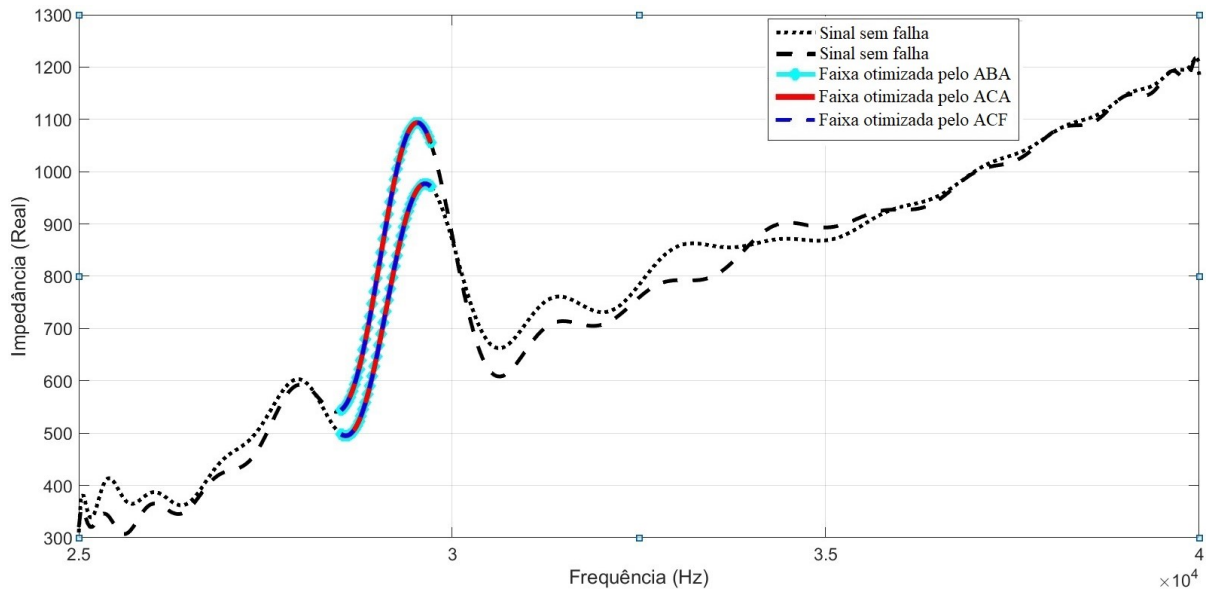
Figura 3.7 – Medição dos sinais de impedância eletromecânica da placa com e sem falha, apresentando a faixa com maior divergência dos sinais pelo ACF.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 3.8 apresenta o gráfico comparando os três melhores resultados dos três métodos de otimização (ABA, ACA e ACF) utilizados no sinal de impedância eletromecânica.

Figura 3.8 – Comparação das otimizações.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Realizando a comparação entre os três métodos de otimização pode-se concluir que o método clássico da busca aleatória necessitou de um maior número de iterações (10000) e convergiu em 17 das 20 simulações realizadas para o ponto 138 com uma faixa de frequência de 41 pontos, enquanto que com ambos os métodos bioinspirados (ACA e ACF) foram necessárias apenas 25 iterações e uma população de 25 (abelhas/formigas) para chegar ao ponto ótimo 138 com uma faixa de frequência de 41 pontos. Vale frisar que não foram realizados testes para comparar qual método é melhor e qual é pior.

Para o leitor poder ter uma idéia sobre a velocidade dos resultados, foi utilizado um notebook com processador *i7* de terceira geração e 8Gb de memória RAM, com estas características os algoritmos bioinspirados (ACA e ACF) forneceram os resultados cerca de 10 vezes mais rápido que o algoritmo utilizando o método clássico (ABA).

Com este capítulo constata-se que os 3 métodos de otimização convergem para o mesmo ponto e apresentam a mesma faixa otimizada de frequência. Com isso, o objetivo foi alcançado e esta abordagem pode ser utilizada no próximo capítulo para a seleção de uma região ótima em outro estudo de caso, onde será implementando ainda o processo de cadeias de Markov.

Capítulo 4

ESTUDO DE CASO - CADEIAS DE MARKOV E IMPEDÂNCIA ELETROMECHANICA NA PREVISÃO DE FALHAS

Existem inúmeras aplicações como modelos estatísticos para às cadeias de Markov no mundo e cada uma delas pode possuir soluções bem particulares. Pode-se citar como exemplo, o *PageRank* de uma página da web como utilizado pelo Google, que é completamente definido através de uma cadeia de Markov (OLIVEIRA, 2014).

Esta ampla variedade de aplicações e grandes abrangências dificultam na definição do modelo, mas ao mesmo tempo expandem o cenário das possibilidades a serem consideradas. A princípio, é necessário conhecer bem o processo para somente então estabelecer como serão obtidos os estados da cadeia de Markov. Normalmente, a construção do modelo está condicionada aos dados históricos. E a partir destes, na maior parte dos casos, as probabilidades de transição podem ser determinadas através da frequência relativa de ocorrência (MARCOS, 2014).

Como dito anteriormente, o monitoramento da integridade estrutural baseado em impedância eletromecânica pode ser utilizado para detecção de falhas, antecipação de avaria e diagnóstico de problemas em uma grande variedade de estruturas e a otimização das bandas de frequência é utilizada para encontrar a faixa que mais diverge entre os sinais captados.

Então, neste capítulo, o estudo de caso apresentado tem como intuito unir estes três temas em uma simulação de um cenário real em uma indústria qualquer. Nesta indústria uma certa máquina pode apresentar dois estados diferentes - estado de funcionamento e estado de falha. A equipe de manutenção desta empresa pode ser solicitada à realizar ajus-

tes na máquina ou não. Assim, dentro de cada um destes estados, podem ainda ser apresentados mais dois estados - estado sem manutenção e estado com manutenção. Portanto, a seguinte divisão de estados é adotada: Estado 1 - máquina em funcionamento sem manutenção, Estado 2 - máquina em funcionamento com manutenção, Estado 3 - máquina em falha sem manutenção e Estado 4 - máquina em falha com manutenção.

Há diversos fatores que podem contribuir para um mau ou bom funcionamento desta máquina. Dentre eles, estão o manuseio dos funcionários sobre ela, se o ambiente está causando algum tipo de problema, se a equipe de manutenção é qualificada e pode realizar de maneira correta o serviço, se foram realizadas manutenções preventivas, entre outras inúmeras razões.

A técnica de impedância eletromecânica pode ser utilizada neste estudo de caso para apresentar quando a máquina está em pleno funcionamento e quando ela está em situação de falha, de acordo com os sinais captados (estes sinais devem apresentar uma certa diferença entre os dois estados). Optou-se por construir um sistema, eletromecânico com kits LEGO para elaborar um cenário controlado para a inserção de mudanças de estado, garantindo maior repetibilidade dos resultados e menos ruídos externos.

De acordo com estes sinais captados, e após ser realizada a separação de estados, deseja-se verificar com o auxílio das cadeias de markov uma previsão futura de como a máquina se comportará.

Este estudo de caso foi dividido em etapas para uma melhor compreensão do conteúdo. A primeira etapa consiste na realização do experimento para captação dos sinais de impedância eletromecânica. Na segunda etapa é realizado um pré-tratamento dos sinais. Na terceira etapa é realizada a otimização dos sinais. Enquanto na quarta etapa é aplicada a métrica de danos e na última etapa é utilizado o conceito de cadeias de Markov para a previsão de falhas.

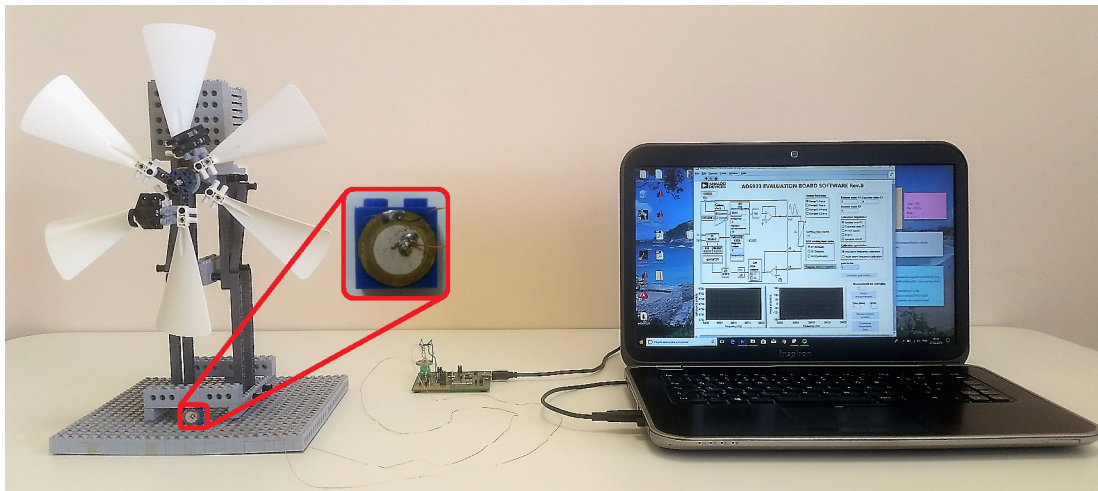
Serão apresentadas e analisadas 3 tipos de abordagens:

- Abordagem 1: a máquina apresenta um mal funcionamento, pois de 100 sinais captados em um certo período de tempo, foram obtidos 55 sinais de impedância eletromecânica sem falha e 45 sinais com falha.
- Abordagem 2: a máquina apresenta uma melhora no funcionamento, pois de 100 sinais captados em um certo período de tempo, foram obtidos 66 sinais de impedância eletromecânica sem falha e 34 sinais com falha.
- Abordagem 3: a máquina apresenta um bom funcionamento se comparado com as abordagens anteriores, pois de 100 sinais captados em um certo período de tempo, foram obtidos 75 sinais de impedância eletromecânica sem falha e 25 sinais com falha.

4.1 Descrição do Experimento

O experimento para a captação dos sinais de impedância eletromecânica, foi realizado utilizando uma estrutura montada em LEGO, com uma massa total de aproximadamente 356g. Para a captação dos sinais de impedância foi utilizado o analisador de impedância Eval - AD5933EBZ (Figura 2.9). A faixa de frequência utilizada neste experimento foi de $40000\text{Hz} - 52775\text{Hz}$, com passo de 25Hz , totalizando 511 pontos para análise. A seleção da banda de frequência utilizada para estudo foi feita por tentativa e erro. A Figura 4.1 apresenta o experimento realizado para captação dos sinais de impedância eletromecânica, e em destaque na cor vermelha é apresentado o local e a peça onde o PZT foi colado.

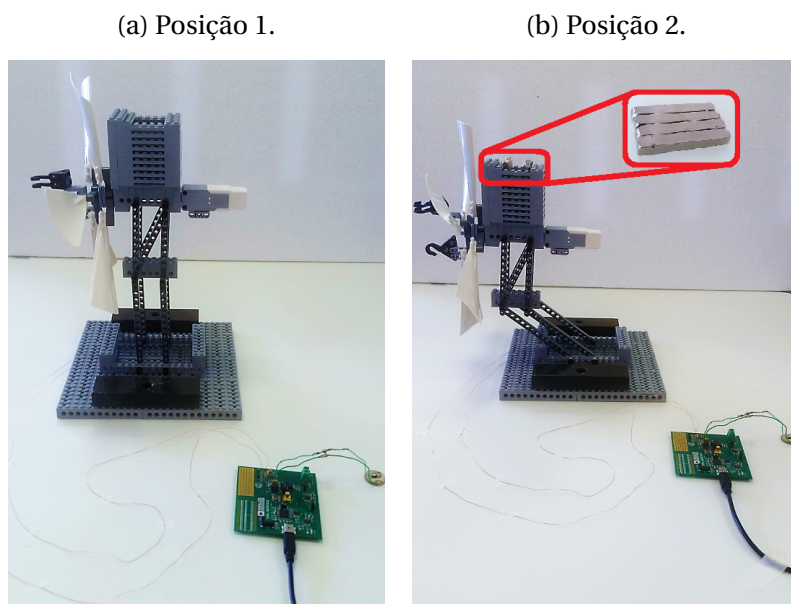
Figura 4.1 – Captação dos sinais de impedância para o experimento com o auxílio da placa.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Foram captados sinais em 2 posições diferentes. A posição 1 simula o equipamento em estado de funcionamento e a posição 2 simula o equipamento em estado de falha. Nesta posição foi acrescentada na estrutura uma certa massa (pesos de metal na parte superior da estrutura com cerca de 135g para simular uma falha no equipamento). A Figura 4.2(a) apresenta a estrutura na posição 1 (simulando um equipamento qualquer em modo de funcionamento) e a 4.2(b) apresenta a estrutura na posição 2, com destaque em vermelho para o acréscimo de massa na parte superior (simulando um equipamento qualquer em modo de falha).

Figura 4.2 – Experimento realizado para captação dos sinais de impedância.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Inicialmente foram colhidos 75 sinais de impedância eletromecânica para a estrutura na posição 1 e 45 sinais para a estrutura na posição 2. Para realização do estudo de cada abordagem o artifício descrito a seguir foi adotado. Foi decidido que para o estudo, cada uma das três abordagens teria um limite de 100 sinais. Então, na Abordagem 1 foram eliminados aleatoriamente 20 sinais da posição 1 (restando 55 sinais para estudo nesta posição) e mantidos os 45 sinais da posição 2. Para a Abordagem 2 foram eliminados aleatoriamente 9 sinais da posição 1 (restando 66 sinais para estudo nesta posição) e da posição 2 foram eliminados aleatoriamente 11 sinais (restando 34 sinais para estudo nesta posição). E por fim, para a Abordagem 3 foram mantidos os 75 sinais da posição 1 e eliminados aleatoriamente 20 sinais da posição 2 (restando 25 sinais para estudo nesta posição).

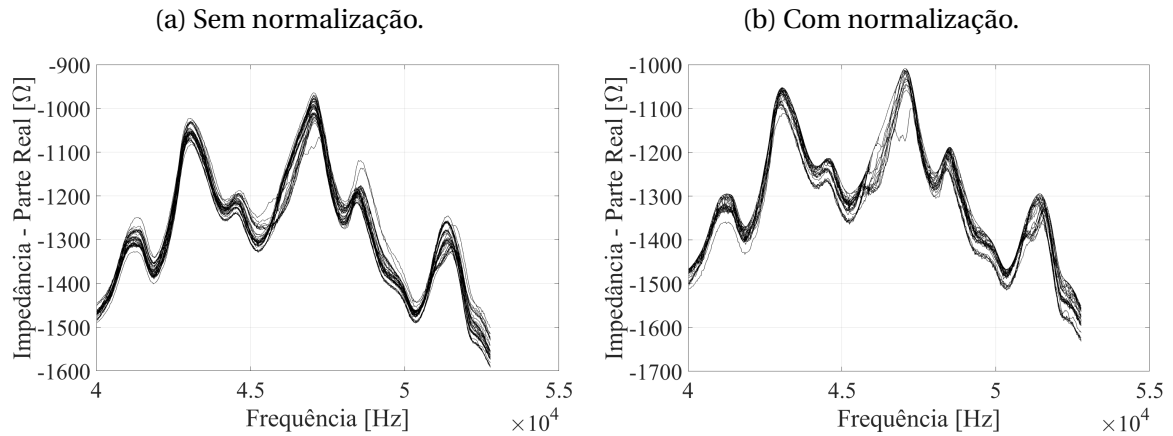
4.2 Pré-Tratamento dos Sinais

Como os sinais de impedância eletromecânica captados para cada uma das duas posições apresentaram uma certa variação (devido a não ter um controle preciso do ambiente onde foi realizado a coleta dos mesmos), foi necessário efetuar a normalização dos sinais, para poder ser realizada uma comparação de forma significativa dos sinais de cada posição entre si. Outros autores como [Rabelo \(2014\)](#) e [Silva et al. \(2016\)](#), denominam esta etapa por compensação de temperatura. A seguir são apresentados os resultados para as três abordagens feitas.

4.2.1 Abordagem 1

De acordo com a Figura 4.3 é possível verificar os sinais sem dano na parte (a) antes e na parte (b) depois ser feito o processo de normalização/compensação de temperatura.

Figura 4.3 – Sinais de impedância eletromecânica para os 55 sinais captados sem dano.

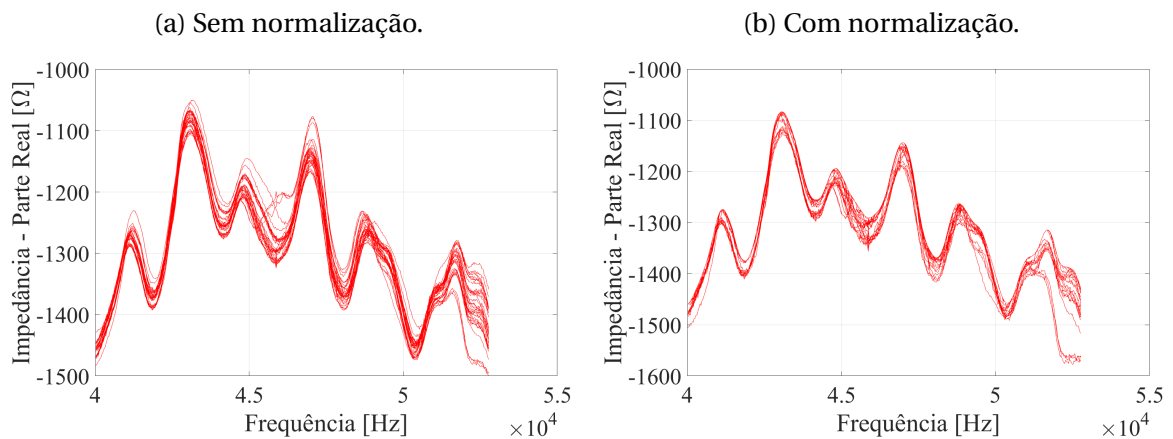


Fonte: Elaborado pelo autor.

Feita a normalização/compensação de temperatura, os sinais podem ser comparados de uma forma mais eficaz, e é possível observar na Figura 4.3 (b) que os sinais tendem a estar mais próximos.

Para os sinais com dano, na Figura 4.4 é possível verificar os sinais na parte (a) antes e na parte (b) depois da normalização.

Figura 4.4 – Sinais de impedância eletromecânica para os 45 sinais captados com dano.

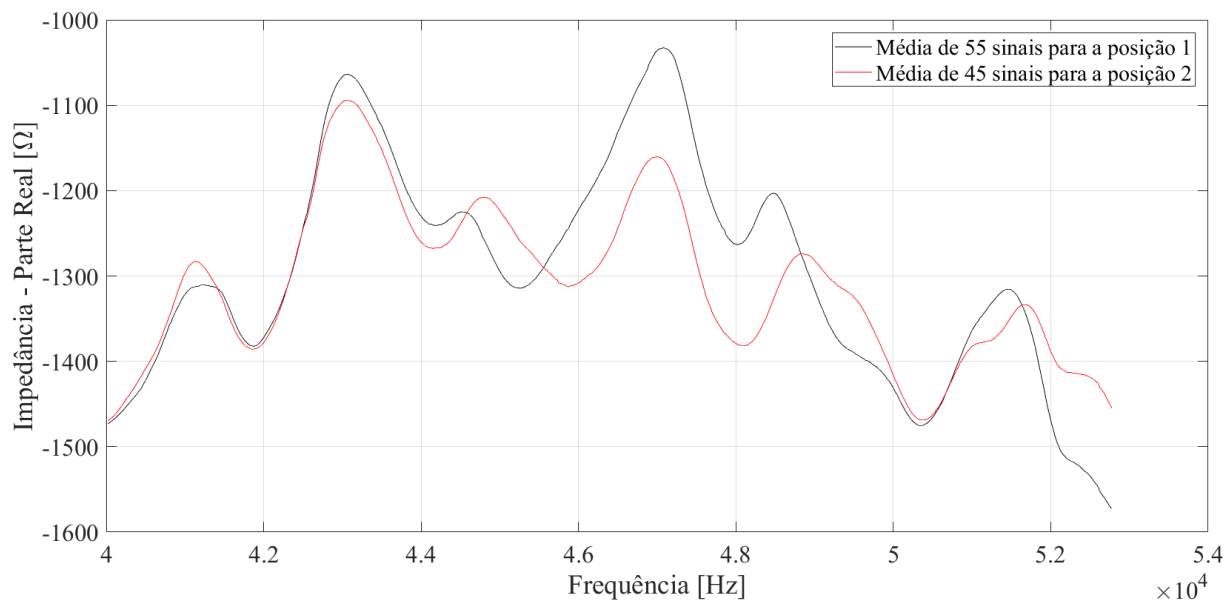


Fonte: Elaborado pelo autor.

Após ser feita a normalização, os sinais podem ser comparados de uma forma mais eficaz e é possível observar na Figura 4.4 (b) que os sinais tendem a estar mais próximos entre si.

A média dos sinais de impedância eletromecânica de cada posição foi calculada depois de ser aplicada a normalização, a mesma é apresentada na Figura 4.5.

Figura 4.5 – Média dos sinais de impedância eletromecânica normalizados.



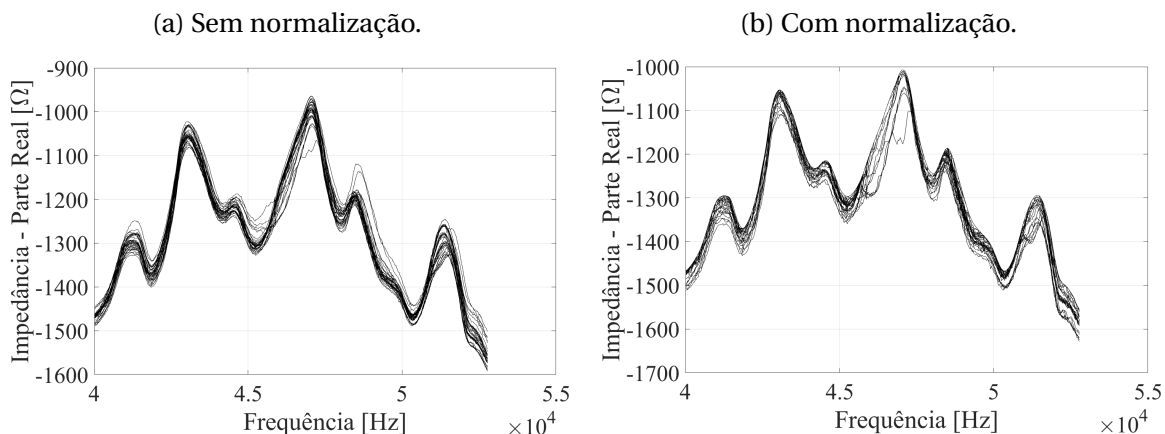
Fonte: Elaborado pelo autor.

É possível verificar que nos sinais apresentados pela Figura 4.5 existe um certo deslocamento entre os mesmos, podendo levar a conclusão de que possivelmente existe algum dano em um dos sinais.

4.2.2 Abordagem 2

De acordo com a Figura 4.6 é possível verificar os sinais sem dano antes (a) e depois (b) da normalização.

Figura 4.6 – Sinais de impedância eletromecânica para os 66 sinais captados sem dano.

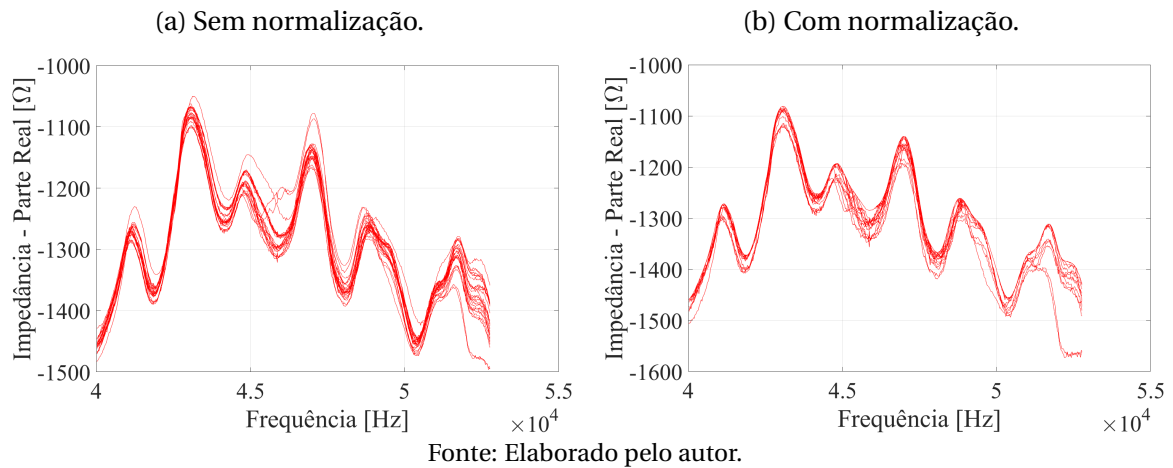


Fonte: Elaborado pelo autor.

Após ser feita a normalização, os sinais podem ser comparados de uma forma mais eficaz e é possível observar na Figura 4.6 (b) que os sinais tendem a estar mais próximos.

A Figura 4.7 mostra os sinais com dano antes (a) e depois (b) do processo de normalização.

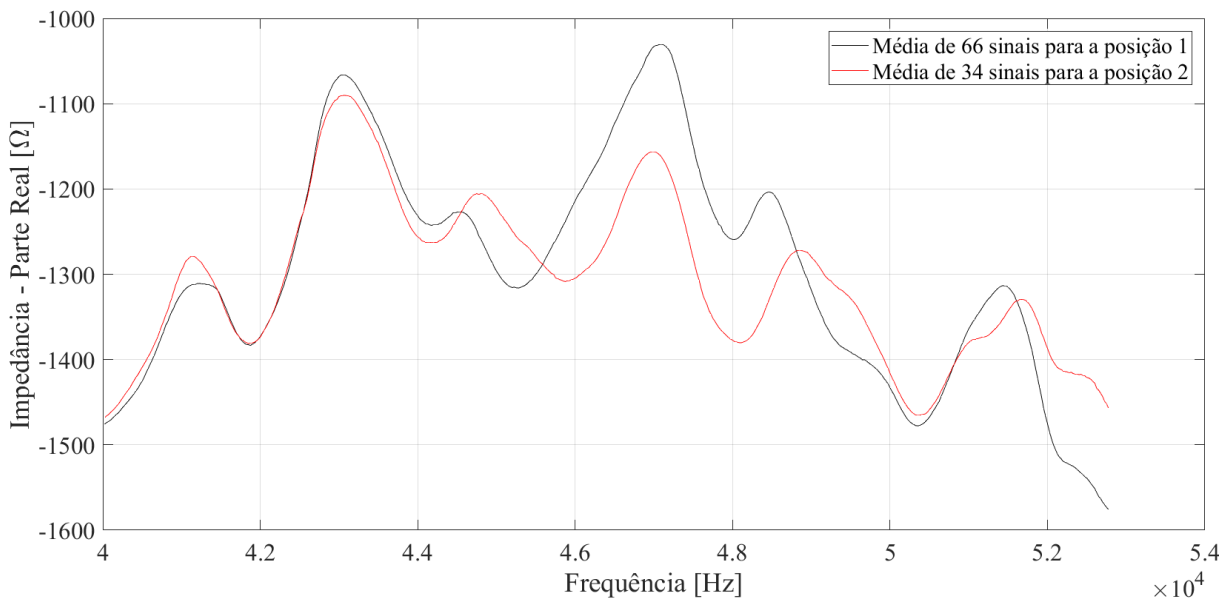
Figura 4.7 – Sinais de impedância eletromecânica para os 34 sinais captados com dano.



Após ser feita a normalização, os sinais podem ser comparados de uma forma mais eficaz e é possível observar na Figura 4.7 (b) que os sinais tendem a estar mais próximos entre si.

A média dos sinais de impedância após o processo de normalização pode ser observada pela Figura 4.8.

Figura 4.8 – Média dos sinais de impedância eletromecânica normalizados.

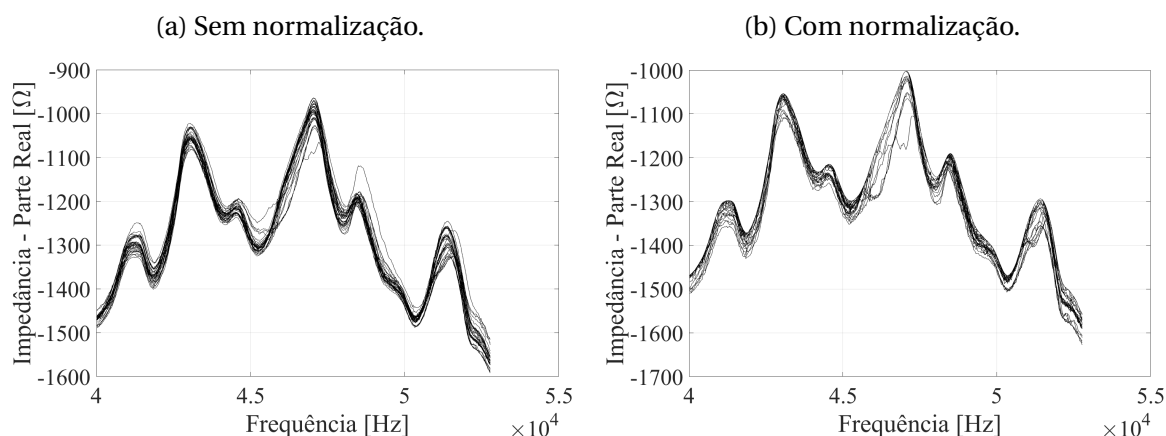


É possível observar que nos sinais apresentados pela Figura 4.8 existe um certo deslocamento entre os mesmos, podendo levar a conclusão de que possivelmente existe algum dano em um dos sinais.

4.2.3 Abordagem 3

E por fim, conforme a Figura 4.9 é possível verificar os sinais sem dano antes (a) e depois (b) do processo de normalização.

Figura 4.9 – Sinais de impedância eletromecânica para os 75 sinais captados sem dano.

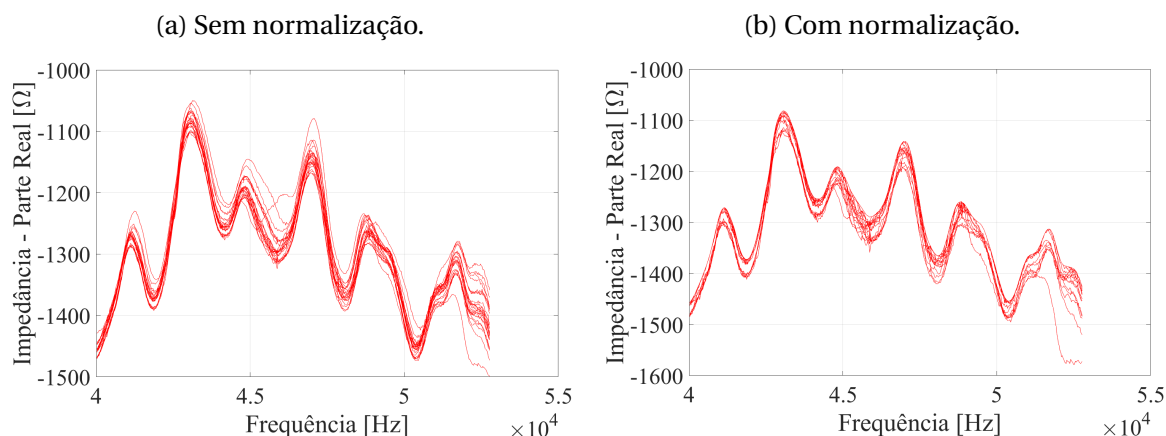


Fonte: Elaborado pelo autor.

Posteriormente à aplicação da compensação de temperatura, os sinais podem ser comparados de uma forma mais eficaz e é possível observar na Figura 4.9 (b) que os sinais tendem a estar mais próximos.

Na Figura 4.10, pode-se verificar os sinais de impedância com dano antes (a) e depois (b) de ser feita a normalização/compensação de temperatura.

Figura 4.10 – Sinais de impedância eletromecânica para os 25 sinais captados com dano.

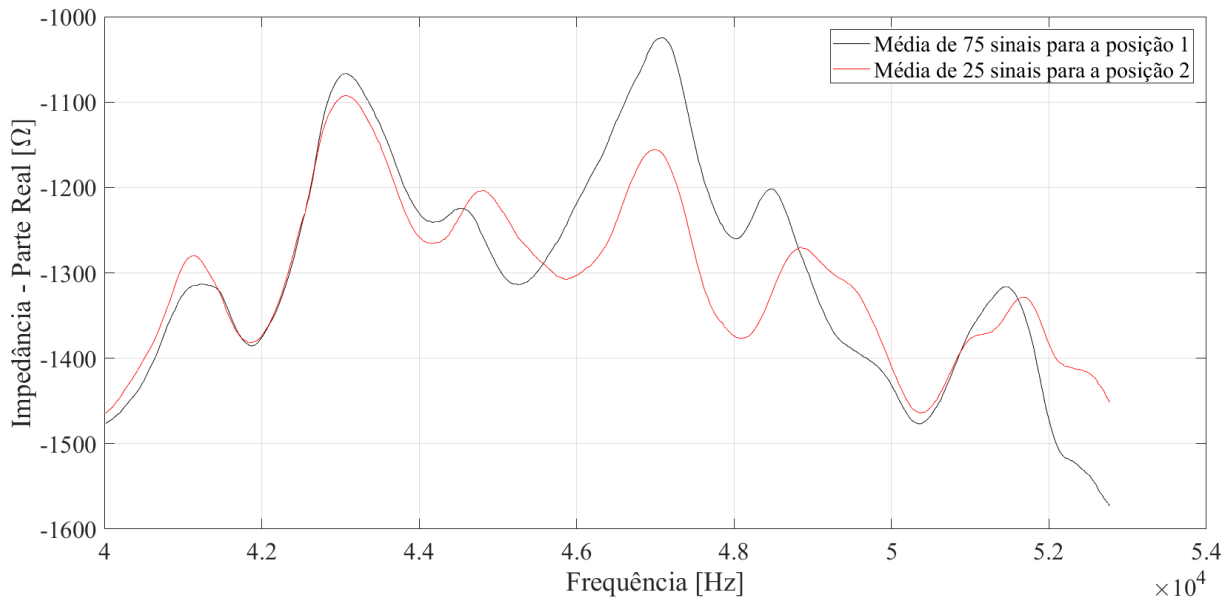


Fonte: Elaborado pelo autor.

Após ser feita a normalização, os sinais podem ser comparados de uma forma mais eficaz e é possível observar na Figura 4.10 (b) que os sinais tendem a estar mais próximos entre si.

E segundo a Figura 4.11, é possível verificar a média dos sinais de impedância após ser feita o processo de normalização.

Figura 4.11 – Média dos sinais de impedância eletromecânica normalizados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se perceber que nos sinais apresentados pela Figura 4.11 existe um certo deslocamento entre os mesmos, podendo levar a conclusão de que possivelmente existe algum dano em um dos sinais.

4.3 Otimização das Faixas de Frequência

A metodologia utilizada no capítulo anterior foi fundamental para a aplicação da otimização dos sinais de impedância eletromecânica. Aplica-se o método de otimização para reduzir a região no domínio da frequência mais sensível as mudanças impostas ao sistema (apresenta a maior diferença entre os sinais). Como foi confirmado no capítulo anterior, os três métodos de otimização apresentados neste trabalho chegaram praticamente ao mesmo resultado. Assim, nesta etapa será utilizado apenas um método de otimização para determinar a melhor faixa de monitoramento.

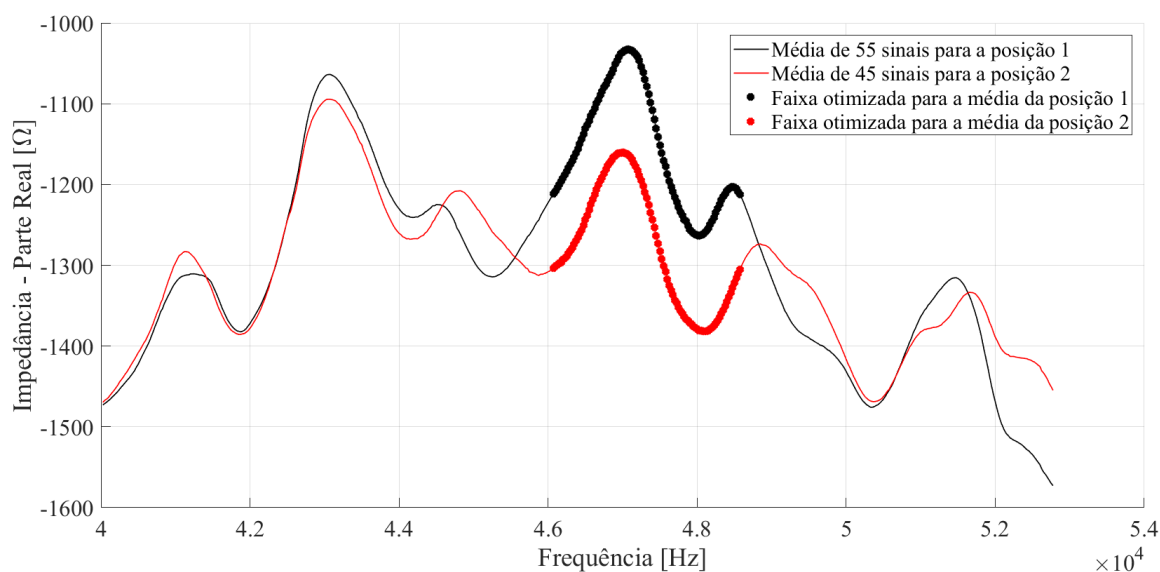
Os métodos de otimização bioinspirados apresentaram um melhor desempenho se for levado em consideração a velocidade para apresentar a resposta final (ponto ótimo e melhor faixa), então o método escolhido foi o Algoritmo de Colônia de Abelhas (ACA), com a população de 100 abelhas e 100 iterações para fornecer o resultado. Para esta aplicação o

método vai fornecer o ponto ótimo e apresentar a melhor faixa de frequência que pode variar entre ± 10 e ± 50 pontos para cada uma das três abordagens. Vale ressaltar que o cálculo da região ótima foi feito através da comparação entre a média dos sinais sem dano e com dano de cada uma das abordagens.

4.3.1 Abordagem 1

Para esta abordagem a média apresentada na Figura 4.5 foi utilizada. Com ela o ponto de maior divergência foi o 293 e a faixa ótima compreende uma faixa de ± 50 pontos. A faixa otimizada corresponde a frequência de 46075 Hz até 48575 Hz . Ela é apresentada pela Figura 4.12.

Figura 4.12 – Otimização por ACA da média dos sinais de impedância eletromecânica.

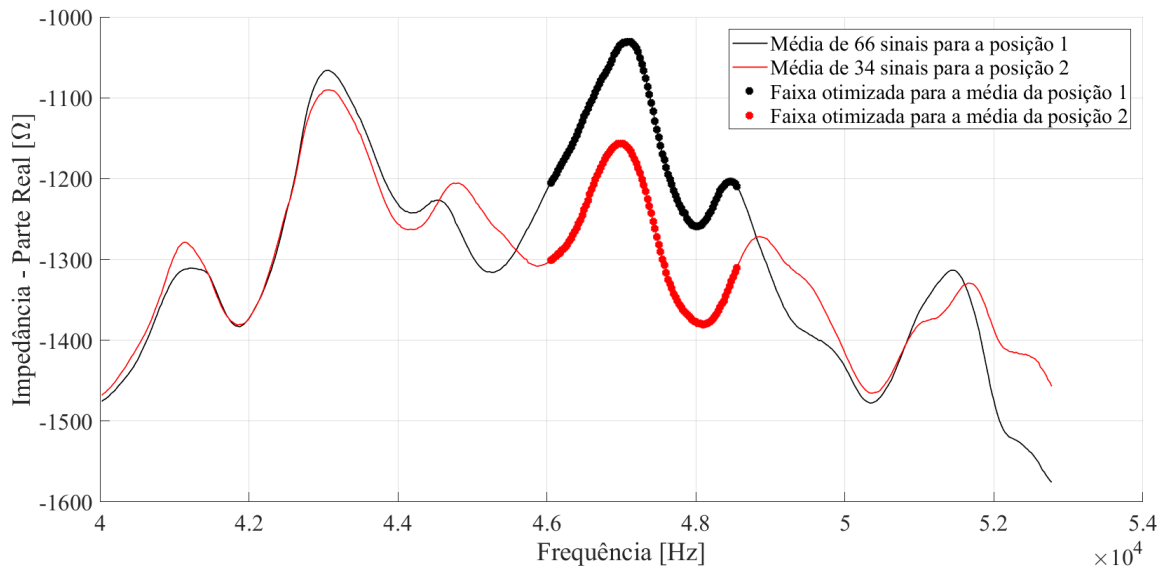


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.2 Abordagem 2

Nesta abordagem, a média utilizada foi apresentada na Figura 4.8. Realizando a otimização, o ponto 292 foi o de maior divergência e a faixa ótima compreende uma faixa de ± 50 pontos. A faixa otimizada corresponde então a frequência de 46050 Hz até 48550 Hz . Ela é apresentada pela Figura 4.13.

Figura 4.13 – Otimização por ACA da média dos sinais de impedância eletromecânica.

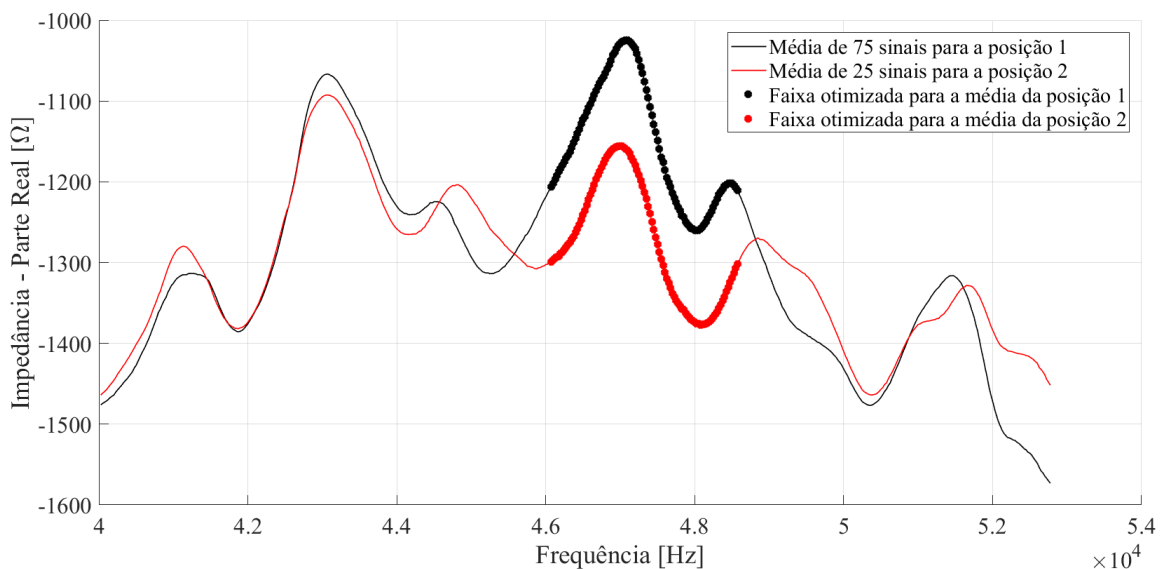


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.3 Abordagem 3

Para a abordagem 3, a média apresentada na Figura 4.11 foi utilizada. Realizando a otimização, o ponto 293 foi o de maior divergência e a faixa ótima compreende uma faixa de ± 50 pontos. A faixa otimizada corresponde a frequência de 46075 Hz até 48575 Hz . Ela é apresentada pela Figura 4.14.

Figura 4.14 – Otimização por ACA da média dos sinais de impedância eletromecânica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4 Aplicação das Métricas de Dano

Depois de realizar a otimização das médias das faixas de frequência, o resultado de cada abordagem foi aplicado aos respectivos sinais, ou seja, a faixa otimizada da abordagem 1 foi aplicada aos 100 sinais correspondentes a ela, e o mesmo foi efetuado para as outras duas abordagens.

Após ser feita a reorganização dos sinais para a faixa otimizada, foi aplicado a métrica de dano RMSD. Esta métrica é bastante utilizada quando se tem duas amostras a serem comparadas, resultando em um valor numérico de dano. O baseline utilizado no cálculo do RMSD foi a média otimizada do sinal sem dano de cada abordagem no passo anterior. Essa média foi comparada com cada um dos 100 sinais apresentados em cada uma das 3 abordagens (para a abordagem 1, utilizou-se da média dos sinais sem dano e ela foi comparada com os 100 sinais desta abordagem; para a abordagem 2, utilizou-se da média dos sinais sem dano e ela foi comparada com os 100 sinais desta abordagem e o mesmo se repetiu para a abordagem 3).

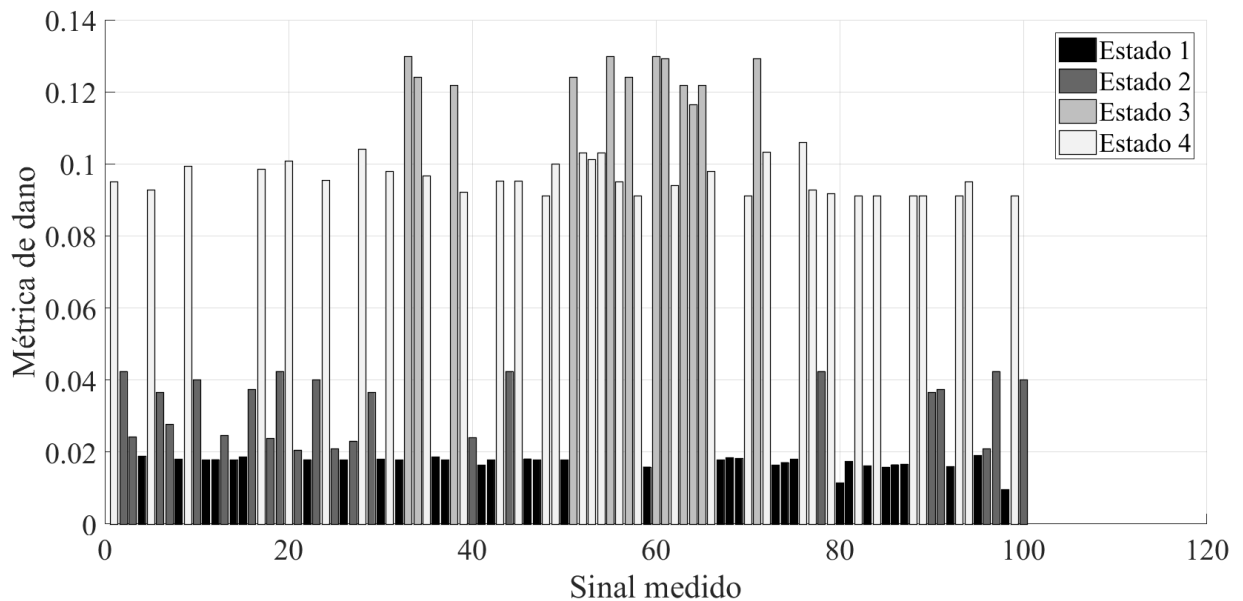
Foi definido previamente que os valores apresentados pela métrica que estão abaixo de 0.02 serão definidos como estado 1, os valores que estão entre 0.02 e 0.07 serão definidos como estado 2, os valores que estão acima de 0.11 serão definidos como estado 3 e os valores entre 0.07 e 0.11 serão definidos como estado 4.

A posição que cada estado assume dentro do intervalo de 1 a 100, em cada abordagem, foi feita aleatoriamente.

4.4.1 Abordagem 1

Em conformidade com a Figura 4.15, pode-se observar de acordo com o cálculo da métrica RMSD aplicada a cada um dos 100 sinais, que cada um dos quatro estados, é visivelmente separável entre um e outro. Para esta abordagem, o estado 1 apresenta 33 sinais, o estado 2 apresenta 22 sinais, o estado 3 apresenta 12 sinais e o estado 4 apresenta 33 sinais.

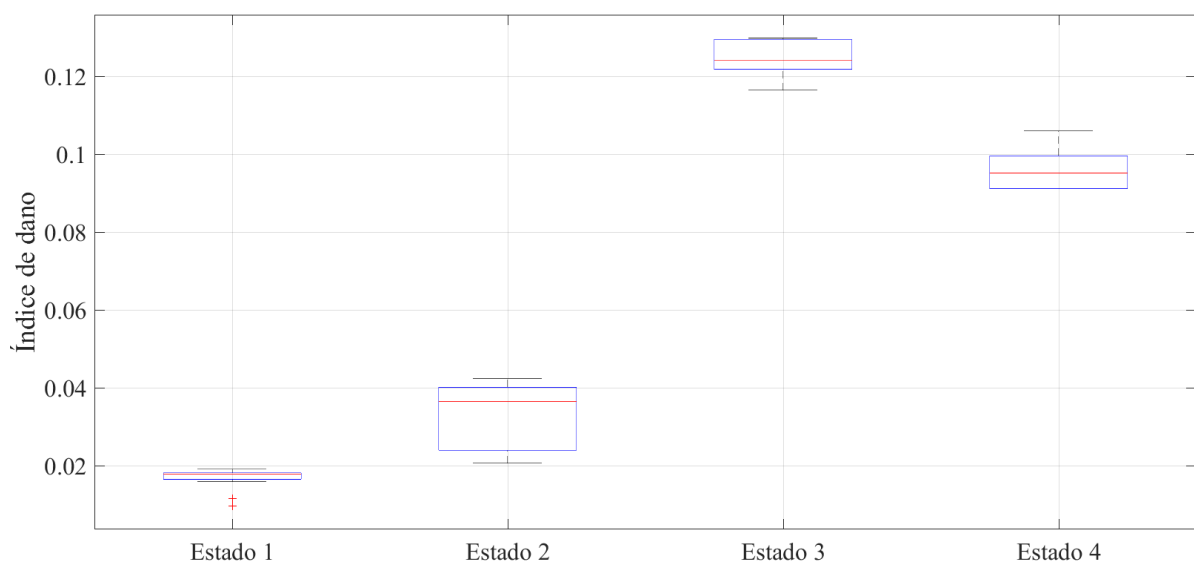
Figura 4.15 – Aplicação da métrica de dano para a abordagem 1.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 4.16 apresenta o gráfico de caixa para esta abordagem. Neste gráfico é possível obter informações quanto a localização e dispersão relativos a cada estado. Pode-se afirmar também que os estados não podem ser confundidos uns com os outros. Cada grupo está visivelmente separado, apenas o valor mínimo do estado 2 é próximo ao valor máximo do estado 1. Pode-se realizar esta afirmação ao observar que cada um dos quatro grupos avaliados trabalha em uma faixa restrita e bem definida associada à parte real da impedância eletromecânica.

Figura 4.16 – Gráfico de caixa para verificação da diferença entre os estados na abordagem 1.

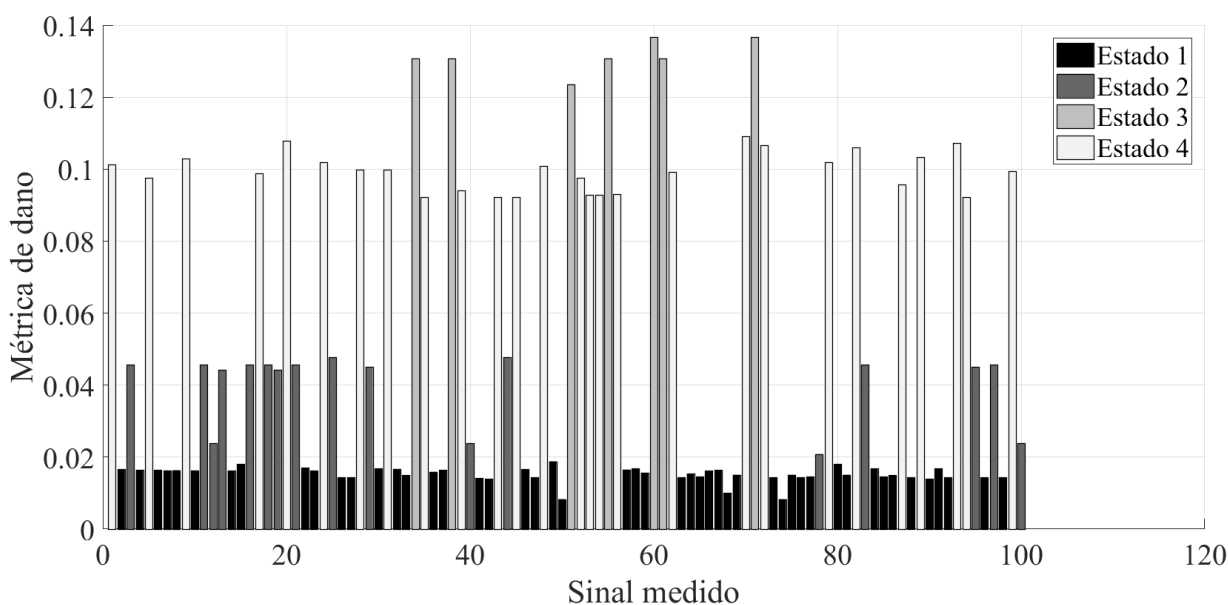


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4.2 Abordagem 2

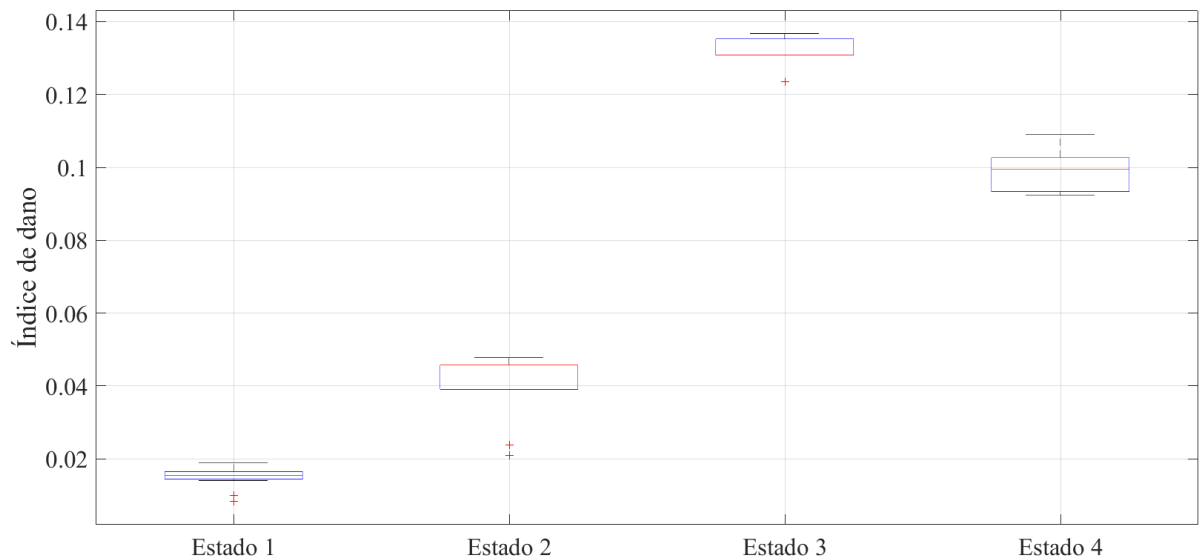
De acordo com a Figura 4.17, pode-se observar de acordo com o cálculo da métrica RMSD aplicada a cada um dos 100 sinais que cada um dos quatro estados é visivelmente separável entre um e outro. Para esta abordagem, o estado 1 apresenta 49 sinais, o estado 2 apresenta 17 sinais, o estado 3 apresenta 7 sinais e o estado 4 apresenta 27 sinais.

Figura 4.17 – Aplicação da métrica de dano para a abordagem 2.



A Figura 4.18 apresenta o gráfico de caixa para esta abordagem. Neste gráfico é possível obter informações quanto a localização e dispersão relativos a cada estado. Pode-se afirmar também que os estados não podem ser confundidos uns com os outros. Cada grupo está visivelmente separado, apenas dois *outliers* do estado 2 que estão próximos ao valor máximo do estado 1. É possível afirmar que as métricas RMSD tem boa sensibilidade quanto a diferença de estados e é evidente a diferença entre os valores apresentados pelas métricas para cada um dos quatro estados.

Figura 4.18 – Gráfico de caixa para verificação da diferença entre os estados na abordagem 2.

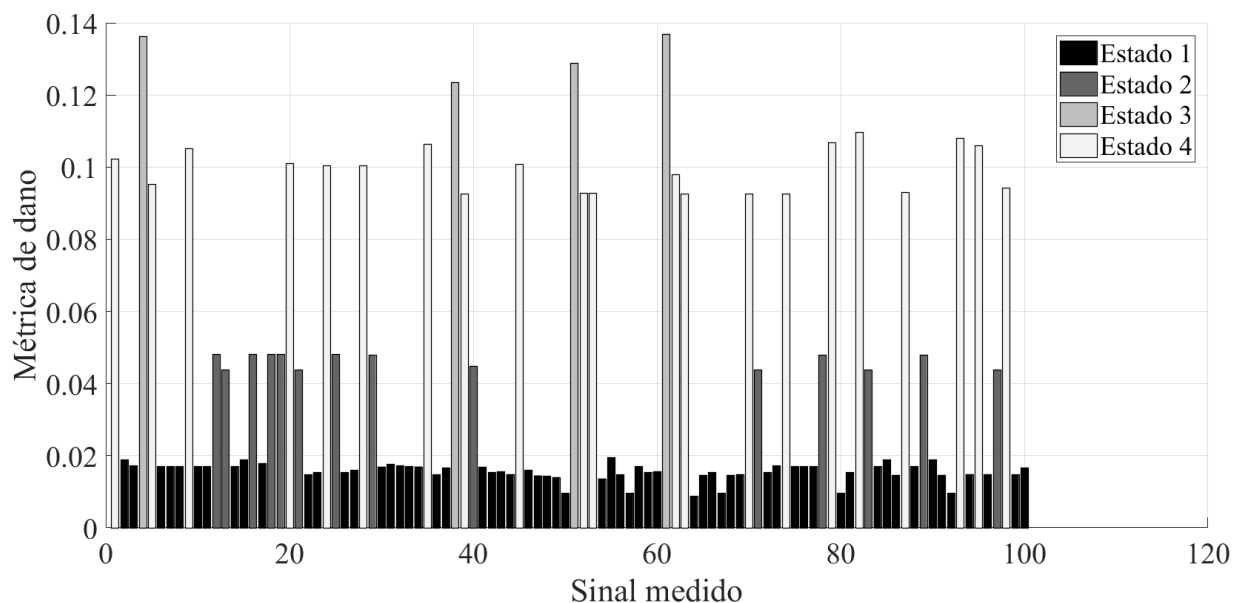


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4.3 Abordagem 3

De acordo com a Figura 4.19, verifica-se a distribuição da amplitude do cálculo da métrica de dano em cada um dos 100 sinais, e assim eles podem ser separados em cada um dos quatro estados. Para esta abordagem, o estado 1 apresenta 61 sinais, o estado 2 apresenta 14 sinais, o estado 3 apresenta 4 sinais e o estado 4 apresenta 21 sinais.

Figura 4.19 – Aplicação da métrica de dano para a abordagem 3.

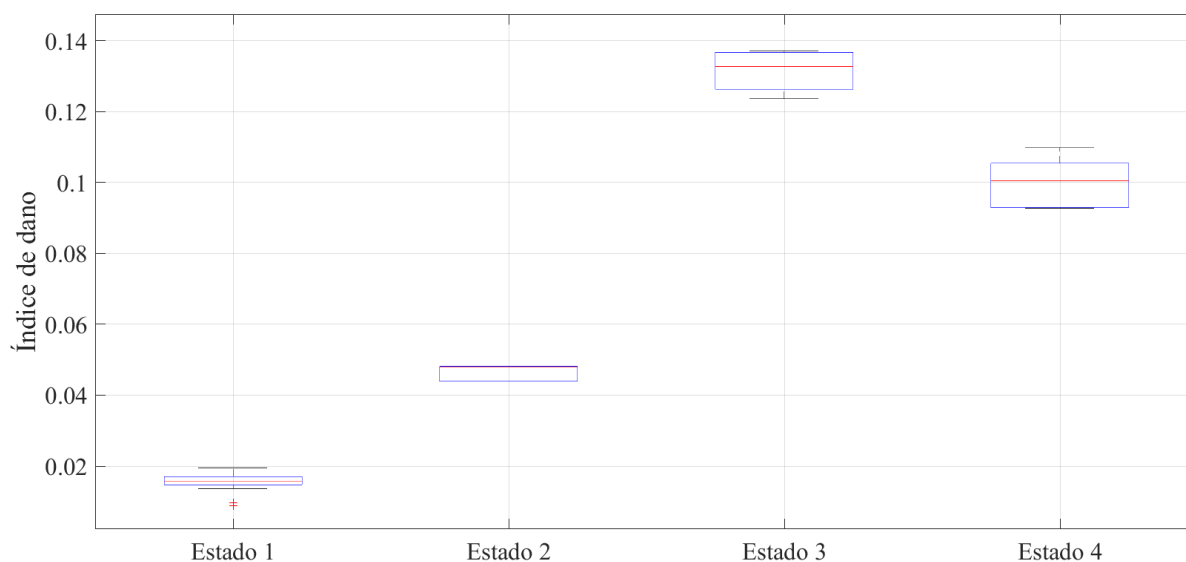


Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 4.20 apresenta o gráfico de caixa para esta abordagem. Neste gráfico é possí-

vel obter informações quanto a localização e dispersão relativos a cada estado. Nesta abordagem pode-se perceber que cada estado está visivelmente separado um do outro. Pode-se admitir então que cada um dos grupos avaliados trabalha em uma faixa restrita e bem definida associada à parte real da impedância eletromecânica.

Figura 4.20 – Gráfico de caixa para verificação da diferença entre os estados na abordagem 3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.5 Aplicação das Cadeias de Markov

De acordo com [Oliveira \(2014\)](#), muitos dos processos que ocorrem na natureza e na sociedade podem ser estudados (pelo menos em primeira aproximação) como se o fenômeno estudado passasse, a partir de um estado inicial, por uma sequência de estados onde a transição de um determinado estado para o seguinte ocorreria segundo uma certa probabilidade. No caso em que esta probabilidade de transição depende apenas do estado em que o fenômeno se encontra e do estado seguinte, o processo é chamado processo de Markov e uma sequência de estados seguindo este processo é denominada de cadeia de Markov.

Evidentemente, ao se supor tal restrição, estaremos simplificando, talvez até demasiadamente, uma vez que as probabilidades podem modificar com o tempo. Mas, assim mesmo, a informação que obtivermos com este modelo já nos servirá de auxílio para uma previsão do comportamento de certos fenômenos.

Então, o conceito de cadeia de Markov será aplicado ao estudo de caso apresentado neste capítulo para fornecer dados relativos a uma estimativa de como o sistema se comportará após um certo período.

4.5.1 Divisão de Estados

Os estados foram definidos neste trabalho de acordo com o cenário proposto para estudo. São eles: estado 1 - máquina em funcionamento sem manutenção, estado 2 - máquina em funcionamento com manutenção, estado 3 - máquina em estado de falha sem manutenção e estado 4 - máquina em estado de falha com manutenção. Estes estados foram definidos para uma generalização do estudo, onde diversas indústrias apresentam estas características. Os estados foram definidos como discretos, seguindo a abordagem de [Marcos \(2014\)](#), que em seu trabalho definiu os seus estados booleanos baseado na presença ou ausência de pragas em uma lavoura cafeeira.

4.5.2 Matriz de Transição

As transições são identificadas observando-se a sequência temporal dos estados. Temos dois tipos de transições possíveis: o sistema pode permanecer no mesmo estado ou pode mudar de um estado para outro.

A quantificação das matrizes de transição foi realizada através da frequência relativa de ocorrência, respeitando a propriedade de matrizes estocásticas, que de acordo com [Marcos \(2014\)](#) é uma estratégia muito utilizada, se tratando de cadeias de Markov.

Uma vez que os estados foram obtidos, as probabilidades de transição foram calculadas. Para o cálculo destas, é importante lembrar que a sequência de estados é avaliada da seguinte maneira: se o processo se inicia no estado 1 (máquina em funcionamento sem manutenção) e o próximo estado é o estado 2 (máquina em funcionamento com manutenção), então corresponde a transição t_{12} a qual é incrementada. Este procedimento é repetido até que se chegue ao último estado daquela abordagem.

Para um melhor entendimento das transições, o Quadro 4.1 foi construído. Nele é possível verificar o que cada transição representa.

Segundo as características apresentadas pelo Quadro 4.1, pode-se destacar algumas transições. Deseja-se que as probabilidades de t_{11} , t_{21} e t_{41} aumentem para cada abordagem, ou seja, a abordagem 3 deve apresentar maiores probabilidades para estas transições do que a abordagem 2, e esta por consequência deve apresentar maiores probabilidades para estas transições do que a abordagem 1. Espera-se que haja redução nas probabilidades de t_{33} e t_{43} para próximo de zero, pois ineficiência da manutenção, deixando a máquina inutilizável significa prejuízos para a indústria.

4.5.2.1 Abordagem 1

A Figura A.1 apresentada no apêndice A, apresenta a transformação dos dados em estados, ou seja, a transformação de dados quantitativos em estados booleanos, para a abordagem 1.

Transição	Característica
t_{11}	- Máquina em pleno funcionamento.
t_{12}	- Manutenção preventiva a ser realizada.
t_{13}	- Falta de mão de obra/peças para realizar a manutenção.
t_{14}	- Manutenção corretiva a ser realizada.
t_{21}	- Manutenção preventiva foi realizada.
t_{22}	- Manutenção preventiva foi realizada e uma outra será realizada.
t_{24}	- Manutenção preventiva foi realizada mas a máquina apresentou falha uma manutenção corretiva será realizada.
t_{33}	- Ineficiência da manutenção, máquina não será mais utilizada.
t_{34}	- Manutenção corretiva a ser realizada.
t_{41}	- Manutenção corretiva foi realizada.
t_{42}	- Manutenção corretiva foi realizada e um acompanhamento de manutenção preventiva será realizado.
t_{43}	- Manutenção corretiva foi realizada, mas foi ineficaz e máquina não será mais utilizada.
t_{44}	- Manutenção corretiva foi realizada mas a máquina ainda apresentou defeitos sendo necessária a realização outra manutenção corretiva.

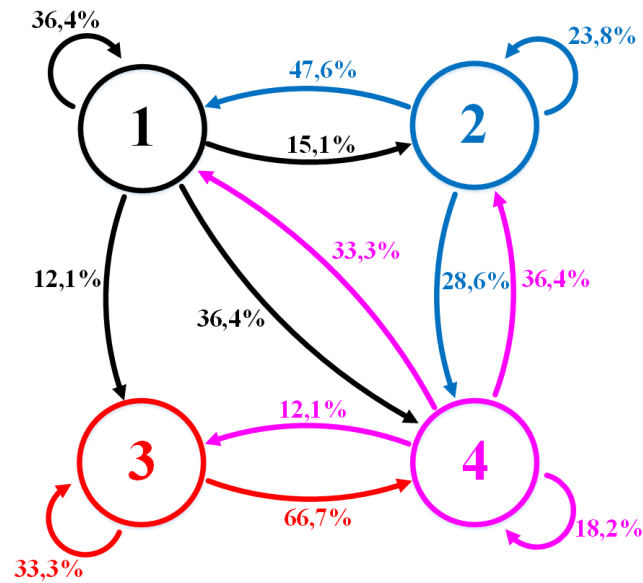
Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 4.1 – Resumo das transições.

A coluna **Sinal**, corresponde a posição que o estado assume no vetor, a coluna **Estado**, corresponde ao estado que o índice de dano vai assumir dependendo do valor apresentado no cálculo do RMSD. Esta coluna serve de fundamento para a montagem das transições - as 16 colunas posteriores.

Estas colunas são contabilizadas, e têm sua frequência absoluta indicada na parte inferior. Logo após, é realizado o cálculo para apresentar a frequência relativa de cada linha da matriz. A Figura 4.21 apresenta o diagrama de transição, que foi construído com base nestas probabilidades.

Figura 4.21 – Diagrama de transição de estados para a abordagem 1.



Fonte: Elaborado pelo autor.

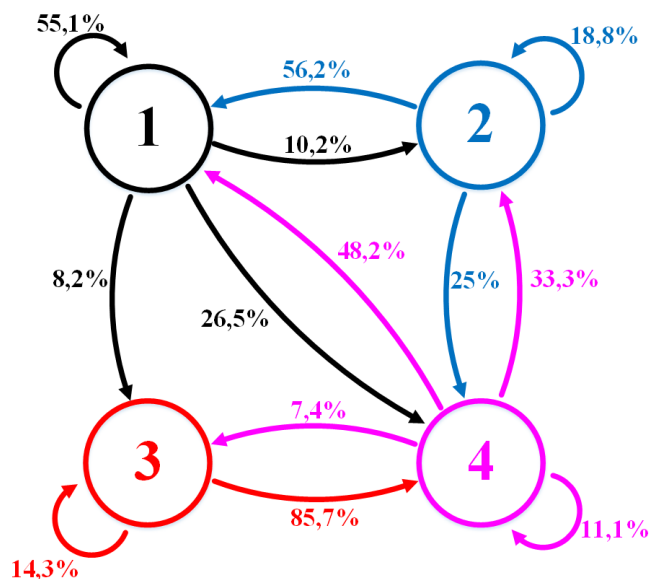
É possível observar na Figura 4.21, que como houve muitas ocorrências de dano, a probabilidade da máquina permanecer em funcionamento sem manutenção (t_{11}) foi de cerca de 36.4%, e de que haja ineficiência da manutenção na máquina nas transições t_{33} e t_{43} é 33.3% e 12.1%, respectivamente.

4.5.2.2 Abordagem 2

A Figura B.1 apresentada no apêndice B, apresenta a transformação dos dados em estados, ou seja, a transformação de dados quantitativos em estados booleanos, para a abordagem 2.

Utilizando o mesmo procedimento da abordagem 1, as probabilidades para a abordagem 2 foram calculadas. A Figura 4.22 apresenta o diagrama de transição, que foi construído com base nestas novas probabilidades.

Figura 4.22 – Diagrama de transição de estados para a abordagem 2.



Fonte: Elaborado pelo autor.

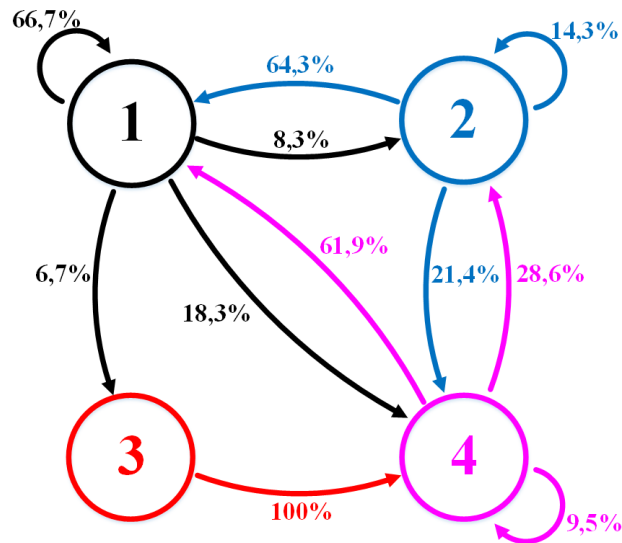
É possível observar na Figura 4.22, que já houve melhoras nas probabilidades apresentadas neste diagrama de transição, se o compararmos com a diagrama apresentado na Figura 4.21. A probabilidade da máquina permanecer em funcionamento sem manutenção (t_{11}) aumentou para de cerca de 55.1%, e houve uma redução nas probabilidades de que haja ineficiência da manutenção na máquina nas transições t_{33} e t_{43} , que agora é de 14.3% e 7.4%, respectivamente.

4.5.2.3 Abordagem 3

A Figura C.1 apresentada no apêndice C, apresenta a transformação dos dados em estados, ou seja, a transformação de dados quantitativos em estados booleanos, para a abordagem 3.

Utilizando o mesmo procedimento da abordagem 1, as probabilidades para a abordagem 3 foram calculadas. A Figura 4.23 apresenta o diagrama de transição, que foi construído com base nestas novas probabilidades.

Figura 4.23 – Diagrama de transição de estados para a abordagem 3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observando as características apresentadas no Quadro 4.1 e as transições das Figuras 4.21, 4.22 e 4.23, pode-se constatar que como esperado, há um aumento da probabilidade para que a máquina permaneça em bom funcionamento. Quanto melhor o funcionamento da máquina, maior será a probabilidade de t_{11} , que como esperado na abordagem 3 há um aumento de sua probabilidade para cerca de 66.7%.

Há também uma melhora na questão da manutenção corretiva, pois ocorreu um aumento na probabilidade da máquina voltar a funcionar após apresentar falha, transição t_{41} , onde na abordagem 1 apresentava a probabilidade de 33.3%, na abordagem 2 apresentava a probabilidade de 48.2% e por fim na abordagem 3 apresenta 61.9% de probabilidade. Houve quedas nas probabilidades de falha da máquina, transições t_{13} e t_{14} .

Quanto a manutenção preventiva, houve melhoras, pois houve aumento na probabilidade de quando se compara as três abordagens para a transição t_{21} e houve redução nas probabilidades de transição t_{22} e t_{24} .

Por fim, como esperado, com a redução da quantidade de ocorrências da máquina apresentando falha, houve uma redução nas probabilidades de que haja ineficiência da manutenção na máquina nas transições t_{33} e t_{43} , que agora é de 0%.

4.5.3 Cálculo do Estado Estacionário

Para todas as abordagens, foram realizados cálculos modificando o estado inicial para realizar uma análise e verificar o estado estacionário de cada abordagem. Foram utilizados dois vetores de estados iniciais com valores obtidos aleatoriamente, respeitando a regra de que a soma destes valores deve ser igual a 1. O estado inicial 1 é apresentado na equação 4.1

e o estado inicial 2 na equação 4.2.

$$E1_0 = [0.1 \ 0.2 \ 0.3 \ 0.4] \quad (4.1)$$

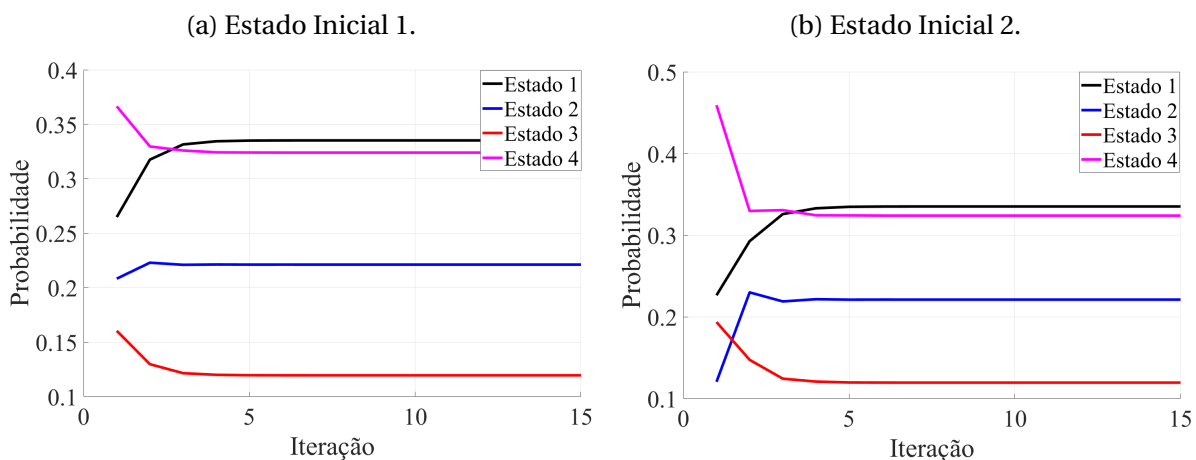
$$E2_0 = [0.4 \ 0.1 \ 0.4 \ 0.1] \quad (4.2)$$

Vale recordar que, a equação utilizada para encontrar o estado estacionário de cada abordagem, foi apresentada na equação 2.39.

4.5.3.1 Abordagem 1

A Figura 4.24 apresenta o comportamento estacionário utilizando os dois estados iniciais, na parte (a) é utilizado o estado apresentado na equação 4.1 e na parte (b) é utilizado o estado apresentado na equação 4.2.

Figura 4.24 – Gráfico de estabilização da cadeia de Markov para a abordagem 1.



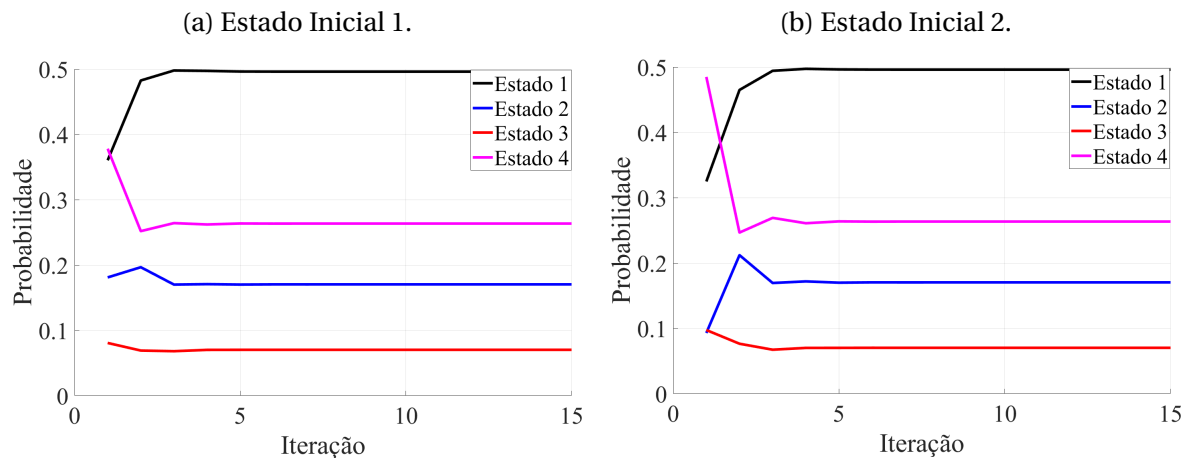
Fonte: Elaborado pelo autor.

Para esta abordagem, a cadeia de Markov apresenta o comportamento estacionário nas seguintes probabilidades: Estado 1 = 33.52%, Estado 2 = 22.12%, Estado 3 = 11.96% e Estado 4 = 32.4%.

4.5.3.2 Abordagem 2

A Figura 4.25 apresenta o comportamento estacionário utilizando os dois estados iniciais, na parte (a) é utilizado o estado apresentado na equação 4.1 e na parte (b) é utilizado o estado apresentado na equação 4.2.

Figura 4.25 – Gráfico de estabilização da cadeia de Markov para a abordagem 2.

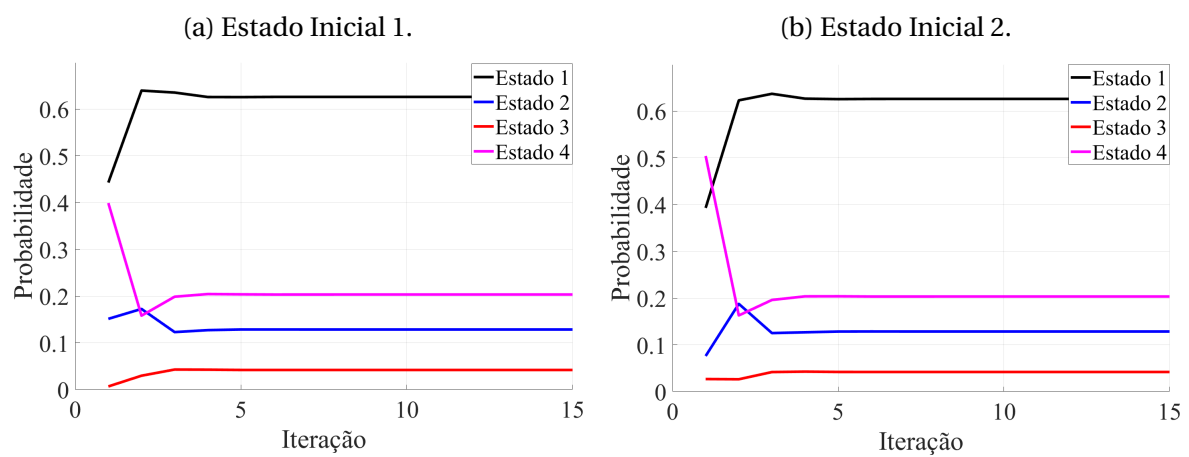


Nesta abordagem, a cadeia de Markov apresenta comportamento estacionário nas seguintes probabilidades: Estado 1 = 49.6%, Estado 2 = 17.03%, Estado 3 = 7.02% e Estado 4 = 26.34%.

4.5.3.3 Abordagem 3

A Figura 4.26 apresenta o comportamento estacionário utilizando os dois estados iniciais, na parte (a) é utilizado o estado apresentado na equação 4.1 e na parte (b) é utilizado o estado apresentado na equação 4.2.

Figura 4.26 – Gráfico de estabilização da cadeia de Markov para a abordagem 3.



E para a última abordagem, a cadeia de Markov apresenta o comportamento estacionário nas seguintes probabilidades: Estado 1 = 62.62%, Estado 2 = 12.85%, Estado 3 = 4.19% e Estado 4 = 20.34%.

É possível verificar que a matriz de transição é o maior influenciador para a estacionariedade das probabilidades. O vetor de estado inicial não importa tanto, pois após um certo período as probabilidades serão as mesmas, ou seja, apresenta um comportamento estacionário. Como todos os estados destas cadeias de Markov apresentadas mostram comportamentos de estados recorrentes, aperiódicos e comunicáveis, pode-se afirmar que as cadeias apresentadas são **ergóticas**.

Capítulo 5

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foram apontados os conceitos básicos referentes ao monitoramento da integridade estrutural baseado em impedância eletromecânica, otimização e cadeias de Markov. Na parte de SHM, percebe-se que é um tema estudado a anos e o aprimoramento das técnicas é constante. Existem inúmeros métodos para realizar o SHM, mas o foco desta dissertação foi o de utilizar a técnica não-destrutiva de impedância eletromecânica. A otimização neste trabalho foi utilizada para nos fornecer a região no domínio da frequência mais sensível às mudanças impostas ao sistema - maior diferença entre os sinais de impedância eletromecânica sem dano e com dano. O conceito de cadeias de Markov foi aplicado para fornecer uma previsão futura de funcionamento de um sistema que pode sofrer manutenção ou não.

Fazendo o uso das técnicas de otimização no capítulo 3, pôde-se realizar a comparação entre os dois tipos de sinais captados - sem falha e com falha - através do método de impedância eletromecânica em uma viga de alumínio. O procedimento de otimização clássico, chamado de busca aleatória (ABA), e os procedimentos de otimização bioinspirados, algoritmo de colônia de abelhas (ACA) e algoritmo de colônia de formigas (ACF), foram capazes de apresentar bons resultados. Todos forneceram a mesma faixa ótima como solução. Este estudo prévio foi importante para que no capítulo 4 fosse possível utilizar qualquer um dos três métodos para fornecer a faixa reduzida mais sensível a mudanças impostas a uma estrutura qualquer.

No capítulo 4 foi desenvolvido um estudo de caso que teve como finalidade simular um cenário real de uma indústria qualquer, onde uma máquina apresenta dois estados. O primeiro é o modo de funcionamento e o segundo o modo de falha, e ainda pode ser realizada ou não a manutenção nesta máquina. O estudo compreende então quatro estados no total: o estado 1 apresenta a máquina em funcionamento e sem manutenção, o estado 2

apresenta a máquina em funcionamento com manutenção, o estado 3 apresenta a máquina em falha sem manutenção e o estado 4 apresenta a máquina em falha com manutenção. Para simular esta máquina, foram utilizadas peças de LEGO em duas posições diferentes - posição 1 simulava a máquina em funcionamento e posição 2 com um acréscimo de massa simulava a máquina em falha. A captação dos sinais de impedância eletromecânica foi feita utilizando a placa de aquisição de baixo custo utilizada no experimento anterior.

Foram utilizadas três abordagens distintas, onde foram alteradas as quantidades de sinais de impedância eletromecânica em cada estado para verificar o comportamento das probabilidades da máquina permanecer em funcionamento. Utilizando o método de otimização bioinspirado de colônia de abelhas (ACA) foi possível reduzir a região no domínio da frequência mais sensível as mudanças impostas ao sistema. Com o uso da métrica de danos RMSD foi possível verificar que cada um dos quatro estados citados anteriormente são separáveis estatisticamente.

Após todo este processo foi realizado o procedimento para criação dos estados de transição e formação do diagrama de transição com as probabilidades. Nota-se que nas três abordagens apresentadas os estados apresentam as mesmas características, que são de ser cadeias ergóticas, ou seja, apresentam um comportamento estacionário. Isso significa que após um certo período, dados os estados em questão, a probabilidade da máquina permanecer em cada um deles será a mesma, possibilitando assim uma previsão futura do comportamento da mesma e o tempo (iteração) necessário ao sistema para convergir neste estado.

Observa-se que a parte real dos sinais de impedância eletromecânica podem fornecer dados relevantes quanto a saúde da estrutura, e com a contribuição de métodos de otimização (clássicos ou bioinspirados) é possível reduzir a região no domínio da frequência mais sensível as mudanças impostas ao sistema (maior diferença entre os sinais). Utilizando as métricas de danos para apresentar de uma forma quantitativa a diferença entre os sinais (baseline e sinal comparado), o conceito de cadeia de Markov pode ser aplicado, fornecendo dados relativos a uma estimativa de como um sistema se comporta após certo período.

As principais contribuições deste trabalho foram a união das temáticas de SHM baseado em impedância eletromecânica, métodos de otimização e cadeias de Markov para a solução de um problema baseado em um cenário real e também sobre a utilização de kits LEGO criando uma bancada didática, onde apresentou-se uma forma alternativa e eficiente para o estudo em questão abrindo portas para a sua utilização no monitoramento da integridade estrutural baseado em impedância eletromecânica.

É necessário realizar trabalhos mais aprofundados neste assunto, mas a primeira perspectiva é de que a união das temáticas de monitoramento da integridade estrutural, métodos de otimização e cadeias de Markov podem ser implementadas em casos reais de manutenção, auxiliando no estudo de previsão de falhas de máquinas e outros equipamentos.

Como trabalhos futuros pode-se tentar aplicar os mesmos conceitos utilizados neste trabalho em um sistema hidráulico real para monitoramento e previsão de falhas, assim como auxílio na proposição de melhorias no métodos de manutenção planejada. O método apresentado pode ainda ser aplicado em diversos outros cenários reais em ambientes controlados ou industriais. Sob o ponto de vista acadêmico, trabalhos futuros podem envolver a implementação online para monitoramento remoto, assim como ampliar o estudo dos conceitos abordados através de cadeias de Markov ocultas.

REFERÊNCIAS

ABBASS, H. A. Mbo: marriage in honey bees optimization-a haplometrosis polygynous swarming approach. In: *Proceedings of the 2001 Congress on Evolutionary Computation (IEEE)*. South Korea: [s.n.], 2001. v. 1, p. 207–214. Citado na página 52.

AFSHAR, A. *et al.* Honey-bee mating optimization (hbmo) algorithm for optimal reservoir operation. *Journal of the Franklin Institute*, Elsevier, v. 344, n. 5, p. 452–462, 2007. Citado na página 52.

AFSHARI, M. *Vibration- and Impedance-based Structural Health Monitoring Applications and Thermal Effects*. 144 f. Tese (Doctor of Philosophy In Mechanical Engineering) — Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA, 2012. Citado 6 vezes nas páginas 30, 39, 43, 45, 47 e 48.

AYRES, J. W.; ROGERS, C. A.; CHAUDHRY, Z. A. Qualitative health monitoring of a steel bridge joint via piezoelectric actuator/sensor patches. In: *Smart Structures and Materials 1996: Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways*. USA: [s.n.], 1996. v. 2719, p. 123–131. Citado na página 45.

AZEEM, M. F.; SAAD, A. M. Modified queen bee evolution based genetic algorithm for tuning of scaling factors of fuzzy knowledge base controller. In: *Proceedings of the IEEE INDICON 2004. First India Annual Conference*. India: IEEE, 2004. p. 299–303. Citado na página 52.

BAHAMISH, H. A. A.; ABDULLAH, R.; SALAM, R. A. Protein conformational search using bees algorithm. In: IEEE. *Modeling & Simulation, 2008. AICMS 08. Second Asia International Conference on*. [S.l.], 2008. p. 911–916. Citado na página 51.

BANKS, H.; SMITH, R.; WANG, Y. *Smart material structures: modeling, estimation, and control*. France: John Wiley & Sons, 1996. ISSN 0298-3168. ISBN 9780471970248. Citado 5 vezes nas páginas 35, 36, 37, 38 e 39.

BAPTISTA, F. G.; VIEIRA FILHO, J. Optimal frequency range selection for pzt transducers in impedance-based shm systems. *IEEE Sensors Journal*, IEEE, v. 10, n. 8, p. 1297–1303, 2010. Citado na página 43.

BHALLA, S. *et al.* Practical issues in the implementation of electro-mechanical impedance technique for nde. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. *SPIE's International Symposium on Smart Materials, Nano-, and Micro-Smart Systems*. Australia, 2002. v. 4935, p. 484–494. Citado na página 43.

- BHALLA, S.; NAIDU, A. S. K.; SOH, C. K. Influence of structure-actuator interactions and temperature on piezoelectric mechatronic signatures for nde. In: *International Conference on Smart Materials, Structures, and Systems*. India: [s.n.], 2003. v. 5062, p. 263–269. Citado 2 vezes nas páginas 43 e 45.
- BITENCOURT, T. F.; STEFFEN JÚNIOR, V. Monitoramento da integridade estrutural de aeronaves. *Horizonte Científico*, v. 3, n. 2, p. 18, 2009. Citado 4 vezes nas páginas 38, 43, 44 e 47.
- BONABEAU, E.; DORIGO, M.; THERAULAZ, G. *Swarm Intelligence - From Natural to Artificial Systems*. New York: Oxford University Press, 1999. ISBN 0-19-513159-2. Citado 2 vezes nas páginas 55 e 56.
- BRAY, D. E.; MCBRIDE, D. *Nondestructive testing techniques*. USA: New York : Wiley, 1992. ISBN 0471525138. Citado na página 30.
- CAMAZINE, S. *et al. Self-organization in biological systems*. New Jersey: Princeton University Press, 2001. ISBN 0-691-01211-3. Citado na página 51.
- CARDEN, E. P.; FANNING, P. Vibration based condition monitoring: A review. *Structural Health Monitoring*, v. 3, n. 4, p. 355–377, 2004. Citado na página 41.
- CAVALINI JÚNIOR, A. A. *Monitoramento da integridade estrutural de sistemas mecânicos via observador de estado modal*. 206 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 41 e 42.
- CHANG, H. S. Converging marriage in honey-bees optimization and application to stochastic dynamic programming. *Journal of Global Optimization*, Springer, v. 35, n. 3, p. 423–441, 2006. Citado na página 52.
- CHAUDHRY, Z. *et al.* Monitoring the integrity of composite patch structural repair via piezoelectric actuators/sensors. In: *36th Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*. USA: [s.n.], 1995. p. 1074. Citado na página 43.
- CHAUDHRY, Z. A. *et al.* Local-area health monitoring of aircraft via piezoelectric actuator/-sensor patches. In: *Proc. SPIE, Smart Structures and Materials*. USA: [s.n.], 1995. v. 2443, p. 268–276. Citado na página 43.
- DENEUBOURG, J. L. *et al.* The self-organizing exploratory pattern of the argentine ant. *Journal of Insect Behavior*, v. 3, n. 2, p. 159–168, Mar 1990. ISSN 1572-8889. Citado na página 55.
- DEVICES, A. *Data Sheet - AD5933*. 2017. Technical Support Analog Devices. Disponível em: <<http://www.mouser.com/ds/2/609/AD5933-877234.pdf>>. Acesso em: 22/07/2017. Citado na página 49.
- DIGILENT. *PmodIA Reference Manual*. 2016. Digilent - A National Instruments Company. Disponível em: <https://reference.digilentinc.com/_media/pmod:pmod:pmodia_rm.pdf>. Acesso em: 22/07/2017. Citado 2 vezes nas páginas 48 e 49.
- DOEBLING, S. W.; FARRAR, C. R.; PRIME, M. B. A summary review of vibration-based damage identification methods. *The Shock and Vibration Digest*, v. 30, n. 2, p. 91–105, 1998. Citado na página 41.

DORIGO, M.; MANIEZZO, V.; COLORNI, A. Ant system: optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, IEEE, v. 26, n. 1, p. 29–41, 1996. Citado na página 57.

DORIGO, M. *et al.* Positive feedback as a search strategy. In: . Technical Report No. 91-016, Politecnico di Milano, Italy: Citeseer, 1991. Citado 3 vezes nas páginas 56, 57 e 59.

DORIGO, M.; STÜTZLE, T. *Ant Colony Optimization*. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology Press, 2004. ISBN 0-262-04219-3. Citado 2 vezes nas páginas 55 e 56.

FARRAR, C. R.; DOEBLING, S. W.; NIX, D. A. Vibration-based structural damage identification. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, The Royal Society, v. 359, n. 1778, p. 131–149, 2001. ISSN 1364-503X. Citado na página 40.

FARRAR, C. R.; LIEVEN, N. A. J.; BEMENT, M. An introduction to damage prognosis. In: _____. *Damage Prognosis for Aerospace, Civil and Mechanical Systems*. USA: John Wiley & Sons Inc., 2005. cap. 1, p. 1 – 12. ISBN 0470869070. Citado na página 30.

FARRAR, C. R.; WORDEN, K. An introduction to structural health monitoring. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, The Royal Society, v. 365, n. 1851, p. 303–315, 2007. ISSN 1364-503X. Citado na página 40.

_____. *Structural health monitoring: a machine learning perspective*. USA: John Wiley & Sons, 2012. 654 p. ISBN 978-1-119-99433-6. Citado na página 30.

FRISCH, K. V. *Bees: their vision, chemical senses, and language*. New York: Cornell University Press, 1976. Citado na página 51.

GIBILISCO, S. *Manual de Eletrônica e de Telecomunicações*. Brasil: Reichmann e Affonso Editores, 2002. Citado na página 33.

GIURGIUTIU, V.; ZAGRAI, A. Damage detection in thin plates and aerospace structures with the electro-mechanical impedance method. *Structural Health Monitoring*, v. 4, n. 2, p. 99–118, 2005. Citado na página 46.

GIURGIUTIU, V.; ZAGRAI, A. N. Characterization of piezoelectric wafer active sensors. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, v. 11, n. 12, p. 959–976, 2000. Citado na página 43.

_____. Embedded self-sensing piezoelectric active sensors for on-line structural identification. *International Journal of the Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management*, v. 124, p. 116–125, 2002. Citado 2 vezes nas páginas 43 e 67.

GIURGIUTIU, V.; ZAGRAI, A. N.; BAO, J. J. Piezoelectric wafer embedded active sensors for aging aircraft structural health monitoring. *Structural Health Monitoring*, v. 1, n. 1, p. 41–61, 2002. Citado na página 43.

GONSALEZ, C. G. *Metodologias para reconhecimento de padrões em sistemas SHM utilizando a técnica da Impedância Eletromecânica (E/M)*. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2012. Citado na página 40.

- IHN, J.-B.; CHANG, F.-K. Pitch-catch active sensing methods in structural health monitoring for aircraft structures. *Structural Health Monitoring*, v. 7, n. 1, p. 5–19, 2008. Citado na página 30.
- INMAN, D. J. Smart structures: examples and new problems. In: XVI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA. *Anais*. Uberlândia: ABCM, 2001. p. 4–13. Citado na página 41.
- INMAN, D. J. *et al.* *Damage Prognosis for Aerospace, Civil and Mechanical Systems*. USA: John Wiley & Sons Inc., 2005. 470 p. ISBN 978-0-470-86907-9. Citado na página 42.
- IRWIN, J. D. *Introdução à Análise de Circuitos Elétricos*. Brasil: LTCE, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 34.
- JUNG, H. K. *et al.* Relative baseline features for impedance-based structural health monitoring. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, v. 25, n. 18, p. 2294–2304, 2014. Citado na página 43.
- JUNG, S. H. Queen-bee evolution for genetic algorithms. *Electronics letters*, IET, v. 39, n. 6, p. 575–576, 2003. Citado na página 52.
- KARABOGA, D. *An idea based on honey bee swarm for numerical optimization*: Technical report - tr06. Kayseri, 2005. 10 p. Citado 3 vezes nas páginas 52, 53 e 54.
- KARABOGA, N. A new design method based on artificial bee colony algorithm for digital iir filters. *Journal of the Franklin Institute*, Elsevier, v. 346, n. 4, p. 328–348, 2009. Citado na página 52.
- KARCI, A. Imitation of bee reproduction as a crossover operator in genetic algorithms. In: _____. *PRICAI 2004: Trends in Artificial Intelligence: 8th Pacific Rim International Conference on Artificial Intelligence*. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2004. p. 1015–1016. ISBN 978-3-540-28633-2. Citado na página 52.
- KESSLER, S. S.; SPEARING, S. M.; ATALLA, M. J. In-situ damage detection of composites structures using lamb wave methods. In: 1º EUROPEAN WORKSHOP ON STRUCTURAL HEALTH MONITORING, 2002, ENS-Cachan. *Proceedings of the first European workshop on structural health monitoring*. Paris, 2002. p. 10–12. Citado na página 30.
- KIJIMA, M. Introduction. In: _____. *Markov Processes for Stochastic Modeling*. London: Chapman & Hall, 1997. cap. 1, p. 1–23. Citado na página 59.
- KOIDE, R. M. *Algoritmo de colônia de formigas aplicado à otimização de materiais compostos laminados*. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 55 e 56.
- KOO, K.-Y. *et al.* Automated impedance-based structural health monitoring incorporating effective frequency shift for compensating temperature effects. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, v. 20, n. 4, p. 367–377, 2009. Citado na página 43.
- LALANDE, F. *et al.* High-frequency impedance analysis for nde of complex precision parts. In: *Proc. SPIE - Smart Structures and Materials 1996: Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways*. USA: [s.n.], 1996. v. 2717, p. 237–243. Citado na página 45.

LEE, I.; SUNG, H. J. Development of an array of pressure sensors with pvdf film. *Experiments in Fluids*, v. 26, n. 1, p. 27–35, 1999. ISSN 1432-1114. Citado na página 38.

LEUCAS, L. de F. *Utilização das técnicas de impedância eletromecânica e ondas lamb para identificação de dano em estruturas com rebites*. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Faculdade de Engenharia de Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 34.

LIANG, C.; SUN, F.; ROGERS, C. Coupled electro-mechanical analysis of adaptive material systems — determination of the actuator power consumption and system energy transfer. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, v. 5, n. 1, p. 12–20, 1994. Citado 2 vezes nas páginas 43 e 44.

LOBATO, F. S. *Guia de Estudos: Algoritmo de Colônia de Abelhas*: Notas de aula. 2016. 7 f. Citado 3 vezes nas páginas 51, 52 e 54.

_____. *Guia de Estudos: Algoritmo de Colônia de Formigas*: Notas de aula. 2016. 6 f. Citado na página 59.

LU, X. *et al.* A novel global convergence algorithm: Bee collecting pollen algorithm. In: _____. *Advanced Intelligent Computing Theories and Applications. With Aspects of Artificial Intelligence: 4th International Conference on Intelligent Computing, ICIC 2008*. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2008. p. 518–525. ISBN 978-3-540-85984-0. Citado na página 52.

LUCIC, P.; TEODOROVIC, D. Bee system: modeling combinatorial optimization transportation engineering problems by swarm intelligence. In: *Preprints of the TRISTAN IV triennial symposium on transportation analysis*. [S.l.: s.n.], 2001. p. 441–445. Citado 2 vezes nas páginas 51 e 52.

MARCOS, W. P. *Cadeia de Markov aplicada ao manejo de pragas em lavoura cafeeira*. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Faculdade de Engenharia de Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014. Citado 6 vezes nas páginas 30, 60, 61, 63, 77 e 93.

MARQUI, C. R. *Modelagem de Estruturas Piezelétricas para Aplicação em Localização de Falhas*. 237 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2007. Citado 3 vezes nas páginas 37, 38 e 42.

MARTOWICZ, A. *et al.* Application of electromechanical impedance-based shm for damage detection in bolted pipeline connection. *Nondestructive Testing and Evaluation*, v. 31, n. 1, p. 17–44, 2016. Citado na página 43.

MASSOUD, M. *Impedance methods for machine analysis: modal parameters extraction techniques*. [S.l.]: Université de Sherbrooke, 1985. 4-14 p. Citado na página 34.

MELO, G. P. de. *Detecção e localização de falhas via observadores de estado e de ordem reduzida*. 125 f. Tese (Doutor em Engenharia Mecânica) — Faculdade de Engenharia de Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1998. Citado na página 41.

MOURA JÚNIOR, J. dos Reis Vieira de. *Uma contribuição aos sistemas de monitoramento de integridade estrutural aplicada a estruturas aeronáuticas e espaciais*. 144 f. Tese (Doutor em Engenharia Mecânica) — Faculdade de Engenharia de Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008. Citado 7 vezes nas páginas 30, 36, 37, 39, 43, 44 e 46.

NAIDU, A.; SOH, C. Damage severity and propagation characterization with admittance signatures of piezo transducers. *Smart Materials and Structures*, IOP Publishing, v. 13, n. 2, p. 393–403, 2004. Citado na página 47.

NASA. *Mechanical and Fluid Systems - Macro-Fiber Composite (MFC) Actuator*. 2007. National Aeronautics and Space Administration. Disponível em: <<https://technology.nasa.gov/t2media/tops/pdf/LAR-TOPS-209.pdf>>. Acesso em: 22/07/2017. Citado na página 39.

NOGUEIRA, F. *Modelagem e Simulação - Cadeia de Markov*. Notas de aula. 2009. 40 p. Disponível em: <<http://www.ufjf.br/epd042/files/2009/02/cadeiaMarkov1.pdf>>. Acesso em: 20/05/2017. Citado 7 vezes nas páginas 59, 61, 62, 63, 64, 65 e 66.

ODON, A. Probe with pvdv sensor for energy measurements of optical radiation. *Measurement Science Review*, v. 3, p. 111–114, 2003. Citado na página 38.

OLIVEIRA, J. C. F. de. *Noções de grafos dirigidos, cadeias de markov e as buscas do google*. 79 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Matemática) — Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Departamento de Matemática, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2014. Citado 3 vezes nas páginas 65, 77 e 92.

OMKAR, S. *et al.* Artificial bee colony (abc) for multi-objective design optimization of composite structures. *Applied Soft Computing*, Elsevier, v. 11, n. 1, p. 489–499, 2011. Citado na página 52.

PALOMINO, L. V. *Análise das métricas de dano associadas à técnica da impedância eletromecânica para o monitoramento de integridade estrutural*. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Faculdade de Engenharia de Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008. Citado 7 vezes nas páginas 30, 34, 39, 43, 44, 45 e 47.

PARK, G.; CUDNEY, H. H.; INMAN, D. J. Impedance-based health monitoring technique for massive structures and high-temperature structures. In: *Proc. SPIE*. [S.l.: s.n.], 1999. v. 3670, p. 461–469. Citado na página 43.

_____. Impedance-based health monitoring of civil structural components. *Journal of Infrastructure Systems*, v. 6, n. 4, p. 153–160, 2000. Citado na página 43.

_____. An integrated health monitoring technique using structural impedance sensors. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, v. 11, n. 6, p. 448–455, 2000. Citado na página 43.

_____. Feasibility of using impedance-based damage assessment for pipeline structures. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, John Wiley & Sons, Ltd., v. 30, n. 10, p. 1463–1474, 2001. ISSN 1096-9845. Citado na página 43.

PARK, G.; INMAN, D. Smart bolts: an example of self-healing structures. *Smart Materials Bulletin*, v. 2001, n. 7, p. 5 – 8, 2001. ISSN 1471-3918. Citado na página 35.

PARK, G. *et al.* Impedance-based structural health monitoring for temperature varying applications. *JSME International Journal Series A*, v. 42, n. 2, p. 249–258, 1999. Citado na página 43.

_____. Overview of piezoelectric impedance-based health monitoring and path forward. *Shock and Vibration Digest*, v. 35, n. 6, p. 451–463, 2003. Citado 5 vezes nas páginas 38, 39, 43, 44 e 45.

PEAIRS, D. M. *Development of a self-sensing and self-healing bolted joint*. 94 f. Dissertação (Master of Science) — Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA, 2002. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 36.

PHAM, D.; CASTELLANI, M.; FAHMY, A. Learning the inverse kinematics of a robot manipulator using the bees algorithm. In: IEEE. *Industrial Informatics, 2008. INDIN 2008. 6th IEEE International Conference on*. South Korea, 2008. p. 493–498. Citado na página 52.

PHAM, D. *et al.* The bees algorithm-a novel tool for complex optimisation. In: ELSEVIER. *2nd International Virtual Conference on Intelligent Production Machines and Systems (IPROMS 2006)*. [S.l.], 2006. p. 454–459. Citado 2 vezes nas páginas 52 e 54.

QUIJANO, N.; PASSINO, K. M. Honey bee social foraging algorithms for resource allocation: Theory and application. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Elsevier, v. 23, n. 6, p. 845–861, 2010. Citado na página 52.

RABELO, D. de S. *Monitoramento de integridade estrutural baseado na técnica da impedância eletromecânica incorporando compensação do efeito da variação da temperatura*. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Faculdade de Engenharia de Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014. Citado 4 vezes nas páginas 35, 38, 43 e 80.

RABELO, D. de S. *et al.* Impedance-based structural health monitoring and statistical method for threshold-level determination applied to 2024-t3 aluminum panels under varying temperature. *Structural Health Monitoring*, v. 16, n. 4, p. 365–381, 2016. Citado na página 30.

RAJU, V. *Implementing impedance - based health monitoring*. 225 f. Dissertação (Master of science in mechanical engineering) — Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA, 1997. Citado 6 vezes nas páginas 37, 43, 45, 46, 47 e 67.

RIBEIRO NETO, A. C. *et al.* Solution of inverse radiative transfer problems with the bees colony algorithm. In: 21º CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING. *Proceedings of CO-BEM 2011*. Natal: ABCM, 2011. Citado na página 52.

RIZOS, P.; ASPRAGATHOS, N.; DIMAROGONAS, A. Identification of crack location and magnitude in a cantilever beam from the vibration modes. *Journal of Sound and Vibration*, v. 138, n. 3, p. 381 – 388, 1990. ISSN 0022-460X. Citado na página 42.

SEPEHRY, N.; SHAMSHIRSAZ, M.; BASTANI, A. Experimental and theoretical analysis in impedance-based structural health monitoring with varying temperature. *Structural Health Monitoring*, v. 10, n. 6, p. 573–585, 2011. Citado na página 49.

SERAPIÃO, A. B. d. S. Fundamentos de otimização por inteligência de enxames: uma visão geral. *Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica*, scielo, v. 20, p. 271 – 304, 09 2009. ISSN 0103-1759. Citado 5 vezes nas páginas 50, 51, 52, 56 e 57.

_____. Pid tuning by swarm optimization strategies. In: 8º BRAZILIAN CONFERENCE ON DYNAMICS, CONTROL AND THEIR APPLICATIONS. *Proceedings of DINCOM 2009*. Bauru, 2009. Citado na página 52.

SILVA, R. N. F. *et al.* The use of electromechanical impedance based structural health monitoring technique in concrete structure. In: 8º EUROPEAN WORKSHOP ON STRUTURAL HEALTH MONITORING. *EWSHM 2016*. Spain, 2016. Citado na página 80.

SOH, C. K. *et al.* Performance of smart piezoceramic patches in health monitoring of a rc bridge. *Smart Materials and Structures*, v. 9, n. 4, p. 533, 2000. Citado na página 43.

SOUZA, D. L. de; LOBATO, F. S.; GEDRAITE, R. A comparative study using bio-inspired optimization methods applied to controllers tuning. In: *Frontiers in Advanced Control Systems*. [S.l.]: InTech, 2012. p. 143–162. ISBN 978-953-51-0677-7. Citado na página 52.

SUN, F. P. *et al.* Truss structure integrity identification using pzt sensor-actuator. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, v. 6, n. 1, p. 134–139, 1995. Citado 3 vezes nas páginas 43, 45 e 46.

TAYLOR, J. *Markov Decision Processes: Lecture Notes for STP 425: Discrete-time markov chains*. Arizona, USA, 2012. 86 p. Citado na página 63.

TEBALDI, A.; COELHO, L. dos S.; LOPES JÚNIOR, V. Detecção de falhas em estruturas inteligentes usando otimização por nuvem de partículas: Fundamentos e estudo de casos. *Revista Controle & Automação*, v. 17, n. 3, p. 312–330, 2006. Citado na página 36.

TEOBALDI, A. *Detecção de falhas estruturais usando sensores e atuadores piezelétricos e algoritmos genéticos*. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2004. Citado na página 47.

TEODOROVIC, D.; DELL'ORCO, M. Bee colony optimization—a cooperative learning approach to complex transportation problems. *Advanced OR and AI methods in transportation*, Poland, p. 51–60, 2005. Citado na página 52.

TSENG, K. K.-H.; NAIDU, A. S. K. Non-parametric damage detection and characterization using smart piezoceramic material. *Smart Materials and Structures*, v. 11, n. 3, p. 317–329, 2002. Citado 2 vezes nas páginas 45 e 47.

TSURUTA, K. M. *Monitoramento de integridade estrutural de materiais compostos sujeitos a impactos empregando a técnica da impedância eletromecânica*. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Faculdade de Engenharia de Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008. Citado 3 vezes nas páginas 30, 37 e 44.

VALDUGA, F. *Southwest Airlines suspende operacao de suas aeronaves Boeing 737-300 apos incidente em voo*. CAVOK - Asas da Informação. 2011. Disponível em: <<http://www.cavok.com.br/blog/?p=30652#more-30652>>. Acesso em: 22/06/2017. Citado na página 29.

VANDERPLAATS, G. N. *Numerical optimization techniques for engineering design - With applications*. USA: McGraw-Hill Book Company, 1984. ISBN 0070669643. Citado na página 50.

VIANA, F. A. C. *et al.* Tuning dynamic vibration absorbers by using ant colony optimization. *Computers & Structures*, Elsevier, v. 86, n. 13, p. 1539–1549, 2008. Citado na página 57.

YANG, X.-S. Engineering optimizations via nature-inspired virtual bee algorithms. In: _____. *Artificial Intelligence and Knowledge Engineering Applications: A Bioinspired Approach: First International Work-Conference on the Interplay Between Natural and Artificial Computation - IWINAC*. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2005. p. 317–323. ISBN 978-3-540-31673-2. Citado na página 52.

APÊNDICE A

**Planilha de estados de transição para
abordagem 1**

Figura A.1 – Planilha de modelagem dos estados de transição para abordagem 1.

Sinal	Estado	TRANSIÇÕES															
		1-1	1-2	1-3	1-4	2-1	2-2	2-3	2-4	3-1	3-2	3-3	3-4	4-1	4-2	4-3	4-4
1	4																
2	2														1		
3	2						1										
4	1																
5	4					1											
6	2														1		
7	2						1										
8	1																
9	4					1											
10	2														1		
11	1						1										
12	1	1															
13	2		1														
14	1					1											
15	1	1															
16	2		1														
17	4								1								
18	2														1		
19	2						1										
20	4								1								
21	2														1		
22	1					1											
23	2		1														
24	4								1								
25	2														1		
26	1					1											
27	2		1														
28	4								1								
29	2														1		
30	1					1											
31	4				1												
32	1																
33	3			1													
34	3											1					
35	4												1				
36	1													1			
37	1	1															
38	3			1													
39	4																
40	2														1		
41	1						1										
42	1	1															
43	4				1												
44	2														1		
45	4								1								
46	1														1		
47	1																
48	4				1												
49	4																
50	1																1
51	3			1													
52	4																
53	4												1				1
54	4																1
55	3															1	
56	4																
57	3															1	
58	4																
59	1														1		
60	3			1													
61	3											1					
62	4												1				
63	3															1	
64	3												1				
65	3												1				
66	4													1			
67	1														1		
68	1	1															
69	1	1															
70	4				1												
71	3															1	
72	4																
73	1														1		
74	1	1															
75	1																
76	4				1												
77	4																1
78	2															1	
79	4								1								
80	1														1		
81	1	1															
82	4				1												
83	1																
84	4				1										1		
85	1																
86	1	1													1		
87	1	1															
88	4				1												
89	4																1
90	2															1	
91	2																
92	1																
93	4				1												
94	4																1
95	1														1		
96	2		1														
97	2																
98	1																
99	4																
100	2															1	

FREQ ABS	12	5	4	12	10	5	0	6	0	0	0	4	8	11	12	4	6	99
FREQ REL	12,12%	5,05%	4,04%	12,12%	10,10%	5,05%	0,00%	6,06%	0,00%	0,00%	4,04%	8,08%	11,11%	12,12%	4,04%	6,06%	100,00%	99
TOTAL	33				21				12				33					99
FREQ REL CADA ESTADO	36,40%	15,10%	12,10%	36,40%	47,60%	23,80%	0,00%	28,60%	0,00%	0,00%	33,30%	66,70%	33,30%	36,40%	12,10%	18,20%	100,00%	

Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE B

**Planilha de estados de transição para
abordagem 2**

Figura B.1 – Planilha de modelagem dos estados de transição para abordagem 2.

Sinal	Estado	TRANSIÇÕES															
		1-1	1-2	1-3	1-4	2-1	2-2	2-3	2-4	3-1	3-2	3-3	3-4	4-1	4-2	4-3	4-4
1	4																
2	1													1			
3	2		1														
4	1																
5	4																
6	1													1			
7	1	1															
8	1	1															
9	4																
10	1													1			
11	2		1														
12	2						1										
13	2						1										
14	1																
15	1	1					1										
16	2		1														
17	4								1								
18	2														1		
19	2						1										
20	4								1								
21	2																
22	1						1								1		
23	1	1															
24	4																
25	2																
26	1																
27	1	1					1										
28	4																
29	2																
30	1																
31	4						1										
32	1													1			
33	1	1															
34	3																
35	4																
36	1																
37	1	1															
38	3																
39	4																
40	2																
41	1																
42	1																
43	4	1															
44	2																
45	4																
46	1																
47	1	1															
48	4																
49	1																
50	1	1															
51	3																
52	4																
53	4																
54	4																
55	3																
56	4																
57	1																
58	1																
59	1	1															
60	3																
61	3																
62	4																
63	1																
64	1																
65	1	1															
66	1	1															
67	1	1															
68	1	1															
69	1	1															
70	4																
71	3																
72	4																
73	1																
74	1	1															
75	1	1															
76	1	1															
77	1	1															
78	2																
79	4																
80	1																
81	1	1															
82	4																
83	2																
84	1																
85	1																
86	1	1															
87	4																
88	1																
89	4																
90	1																
91	1	1															
92	1	1															
93	4																
94	4																
95	2																
96	1																
97	2																
98	1																
99	4																
100	2																

Legenda	
Estado 1	Posição 1 e Ausência de Manutenção
Estado 2	Posição 1 e Realização de Manutenção
Estado 3	Posição 2 e Ausência de Manutenção
Estado 4	Posição 2 e Realização de Manutenção

FREQ ABS	27	5	4	13	9	3	0	4	0	0	1	6	13	9	2	3	
FREQ REL TOTAL	27,27%	5,05%	4,04%	13,13%	9,09%	3,03%	0,00%	4,04%	0,00%	0,00%	1,01%	6,06%	13,13%	9,09%	2,02%	3,03%	100,00%
FREQ REL CADA ESTADO	55,10%	10,20%	8,20%	16,50%	56,20%	18,80%	0,00%	25,00%	0,00%	0,00%	14,30%	95,70%	48,20%	33,30%	7,40%	11,10%	100,00%

Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE C

**Planilha de estados de transição para
abordagem 3**

Figura C.1 – Planilha de modelagem dos estados de transição para abordagem 3.

Sinal	Estado	TRANSIÇÕES															
		1-1	1-2	1-3	1-4	2-1	2-2	2-3	2-4	3-1	3-2	3-3	3-4	4-1	4-2	4-3	4-4
1	4																
2	1													1			
3	1	1															
4	3			1													
5	4												1				
6	1													1			
7	1	1															
8	1	1															
9	4																
10	1				1									1			
11	1	1															
12	2		1														
13	2					1											
14	1					1											
15	1	1															
16	2		1														
17	1					1											
18	2	1															
19	2						1										
20	4								1								
21	2													1			
22	1					1											
23	1	1															
24	4				1												
25	2														1		
26	1					1											
27	1	1															
28	4				1												
29	2														1		
30	1					1											
31	1	1															
32	1	1															
33	1	1															
34	1	1															
35	4				1												
36	1													1			
37	1	1															
38	3			1													
39	4												1				
40	2														1		
41	1					1											
42	1	1															
43	1	1															
44	1	1															
45	4				1												
46	1													1			
47	1	1															
48	1	1															
49	1	1															
50	1	1															
51	3			1													
52	4												1				
53	4															1	
54	1													1			
55	1	1															
56	1	1															
57	1	1															
58	1	1															
59	1	1															
60	1	1															
61	3			1													
62	4												1				
63	4															1	
64	1													1			
65	1	1															
66	1	1															
67	1	1															
68	1	1															
69	1	1															
70	4				1												
71	2														1		
72	1																
73	1	1				1											
74	4				1												
75	1													1			
76	1	1															
77	1	1															
78	2		1														
79	4								1								
80	1													1			
81	1	1															
82	4				1												
83	2														1		
84	1					1											
85	1	1															
86	1	1															
87	4				1												
88	1													1			
89	2		1														
90	1																
91	1	1				1											
92	1	1															
93	4				1												
94	1													1			
95	4				1												
96	1													1			
97	2		1														
98	4								1								
99	1													1			
100	1	1															
FREQ. ABS		40	5	4	11	9	2	0	3	0	0	0	4	13	6	0	2
FREQ. REL		40,40%	5,05%	4,04%	11,11%	9,09%	2,02%	0,00%	3,03%	0,00%	0,00%	0,00%	4,04%	13,13%	6,06%	0,00%	2,02%
TOTAL		60				14			4					21			
FREQ. REL CADA ESTADO		66,70%	8,30%	6,70%	10,30%	64,30%	14,30%	0,00%	21,40%	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%	61,90%	28,80%	0,00%	9,50%
					100,00%				100,00%				100,00%				100,00%

Fonte: Elaborado pelo autor.