



**Universidade  
Federal de Itajubá**

**TESE DE DOUTORADO**

**Otimização da Identificação de Danos  
Estruturais por meio de Inteligência  
Computacional e Dados Modais**

Autor:

**Guilherme Ferreira Gomes**

**INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

Itajubá, Setembro de 2017

Minas Gerais - Brasil

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

## TESE DE DOUTORADO

# Otimização da Identificação de Danos Estruturais por meio de Inteligência Computacional e Dados Modais

Autor: **Guilherme Ferreira Gomes**

Orientador: **Sebastião Simões da Cunha Jr.**

Co-orientador: **Antonio Carlos Ancelotti Jr.**

Curso: **Doutorado em Engenharia Mecânica**

Área de Concentração: **Projeto, Materiais e Processos**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Itajubá, Setembro de 2017

Minas Gerais - Brasil

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

## TESE DE DOUTORADO

# **Otimização da Identificação de Danos Estruturais por meio de Inteligência Computacional e Dados Modais**

Autor:

**Guilherme Ferreira Gomes**

Tese aprovada por banca examinadora em 22 de Setembro de 2017, conferindo ao autor o título de **Doutor em Engenharia Mecânica em Nome do Programa.**

**Banca Examinadora:**

**Dr. Ariosto Bretanha Jorge - FUPAI**

**Prof. Dr. Marco Túlio Santana Alves - UFBA**

**Prof. Dr. Bruno Silva de Souza - IEM/UNIFEI**

**Prof. Dr. Edmilson Otoni Corrêa - IEM/UNIFEI**

**Prof. Dr. Antonio Carlos Ancelotti Jr. - IEM/UNIFEI (Co-orientador)**

**Prof. Dr. Sebastião Simões da Cunha Jr. - IEM/UNIFEI (Orientador)**

## **Dedicatória**

*A Deus, acima de todas as coisas e  
aos meus pais, Ivani e Expedito,  
que fizeram com que eu chegasse até aqui ...*

## Agradecimentos

Nesta simples página é o momento em que quebramos formalidades e ficamos livres para dar reconhecimento a todos aqueles que o merecem.

Primeiramente dedico este trabalho e agradeço aos meus pais por todo, amor incondicional, carinho, dedicação e suporte que me deram durante toda a jornada da vida. Sem eles, seria impossível que estivesse chegado até este ponto em minha vida. A minha esposa Priscila, por me incentivar, apoiar e me encorajar a cada dia. Você é a pessoa que renova minhas energias, fazendo meu mundo muito melhor.

Agradeço meu orientador, Prof. Dr. Sebastião Simões Cunha Jr. e, por de fato me orientar sempre para o melhor caminho a seguir e que com o passar dos anos juntos, creio que ganhei um amigo que levarei por toda a vida. Ao Prof. Dr. Antonio Carlos Ancelotti Jr., meu coorientador, que sempre esteve disponível e de prontidão a me ajudar no que fosse preciso.

Aos amigos do Grupo de Pesquisa em Mecânica Computacional e Otimização (GEMEC) pela amizade e diversas discussões proveitosas que contribuíram para a evolução deste trabalho. Vocês tiveram papel fundamental em meu crescimento profissional.

A Empresa Brasileira de Aeronáutica - EMBRAER®, que por meio do Eng. Ricardo Rulli e sua equipe (*Smart Structures R&D*), gentilmente, nos cedeu material de alto nível para a pesquisa.

Muita dedicação, esforço, finais de semana e noites de trabalho (além de muito café) foram necessários para que este trabalho chegasse ao seu fim. Apesar de toda dificuldade enfrentada para a defesa da tese fosse realizada, um aprendizado muito importante foi sentido na prática, de que ao final de tudo, o bem sempre prevalece.

À Capes pelo apoio financeiro.

A todos estes, e aqueles que não pude citar em apenas uma página, meus sinceros agradecimentos.

*Un peu de science éloigne de Dieu, beaucoup de science y ramène.*

Louis Pasteur

## Resumo

Métodos convencionais de identificação de danos em sua maioria são limitados, sendo onerosos e em alguns casos impraticáveis, exigindo que a estrutura inspecionada esteja prontamente acessível para inspeção. Neste trabalho, desenvolveu-se um estudo numérico tratando o caso da identificação de danos como um problema inverso. Os problemas direto e inverso de identificação de danos são apresentados combinando o método dos elementos finitos com métodos computacionais inteligentes, lançando mão de heurísticas de otimização e redes neurais artificiais. Fez-se uso dos algoritmos genéticos na otimização dos objetivos construídos, e ainda, introduziu-se uma nova heurística de otimização levando em consideração o comportamento peculiar da polinização de flores e do movimento do girassol em busca do sol. O dilema básico da detecção de danos advém de respostas obtidas por sensores distribuídos nas estruturas. A qualidade destas respostas e, portanto, a qualidade da detecção de danos depende da configuração dos sensores. Otimizou-se a configuração ótima dos sensores em três frentes principais: por meio de critérios matriciais que são capazes de fornecer localizações de maior quantidade de informação modal, uma abordagem pela reconstrução dos modos por meio de interpolação de superfícies e ainda uma terceira proposição por meio de otimização multiobjetivo. Obtendo-se as configurações ótimas dos sensores, lançou-se mão das técnicas evolucionárias na identificação de danos e em uma segunda abordagem, tratou-se o problema, essencialmente, como um problema de reconhecimento de padrões, construindo uma rede neural artificial para prever a localização de danos. Todas as discussões apresentadas nesta tese contribuem para o desenvolvimento de uma metodologia otimizada na implementação da tecnologia de monitoramento da integridade estrutural.

**Palavras-chave:** Identificação de Danos, Otimização de Sensores, Redes Neurais Artificiais, Dados Modais, Materiais Compósitos.

## **Abstract**

Conventional methods of damage identification are mostly limited, costly and in some cases impractical, requiring that an inspected structure be readily accessible for inspection. In this study, a numerical analysis was developed to improve damage identification, treated as an inverse problem. The direct and inverse problem of damage identification is presented by combining the finite element method with intelligent computational methods by using optimization heuristics and artificial neural networks. Genetic algorithms were used in the optimization of the defined objectives, and a new optimization heuristic which is designed to take into account the peculiar behavior of flower pollination and the movement of the sunflower in search of the sun, was introduced. The basic dilemma of damage detection comes from responses obtained by sensors distributed in the structures. The quality of these responses and therefore the quality of the damage detection depends on the configuration of the sensors. The optimal configuration of the sensors on three main fronts was proposed: various matrix criteria were able to provide locations of a greater amount of modal information; an approach of the reconstruction of the modes through surface interpolation and a third proposition by means of multiobjective optimization. By obtaining the optimal configurations of the sensors, evolutionary optimization techniques were used in the identification of damages. In a second approach, the problem was essentially treated as one of pattern recognition, constructing an artificial neural network to predict the location of damages. All the discussions presented in this thesis contribute to the development of an optimized methodology in the implementation of structural integrity monitoring technology.

**Keywords:** Damage identification, Sensor Optimization, Artificial Neural Networks, Modal Data, Composite Materials.

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>iv</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>vii</b>
<b>Lista de Símbolos</b>	<b>ix</b>
<b>Lista de Abreviaturas</b>	<b>xii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação . . . . .	1
1.2 Objetivos e Escopo do Trabalho . . . . .	3
1.3 Estrutura da Tese . . . . .	6
1.4 Estado da Arte . . . . .	6
1.4.1 Vibrações Mecânicas como Critério de Dano . . . . .	7
1.4.2 Uso de Métodos de Otimização . . . . .	12
1.4.3 Uso de Redes Neurais Artificiais . . . . .	15
1.4.4 Outros Métodos de Identificação de Danos . . . . .	18
1.4.5 Localização ótima de sensores . . . . .	22
<b>2 Monitoramento da Integridade Estrutural</b>	<b>27</b>
2.1 Noções Gerais . . . . .	27
2.2 Monitoramento por Meio de Vibrações Mecânicas . . . . .	30
2.2.1 Frequências naturais . . . . .	31
2.2.2 Modos de vibração . . . . .	32
2.3 Monitoramento Estrutural em Materiais Compósitos . . . . .	33
2.3.1 Monitoramento em Estruturas Aeronáuticas . . . . .	34
2.3.2 Delaminações . . . . .	36
<b>3 Métodos Computacionais para Detecção e Identificação de Danos</b>	<b>40</b>
3.1 Algoritmos de Otimização . . . . .	40
3.1.1 Algoritmos Genéticos . . . . .	41
3.1.2 Algoritmo de Polinização de Girassol (SunFlower Optimization) . . . . .	45
3.1.3 Otimização Multiobjetivo . . . . .	51

---

3.2	Redes Neurais Artificiais . . . . .	54
3.2.1	Redes Multilayer Perceptron (MLP) . . . . .	56
<b>4</b>	<b>Formulação Numérica do Problema de Identificação de Danos</b>	<b>58</b>
4.1	Modelagem do Problema Direto por Elementos Finitos . . . . .	58
4.1.1	Redução de Rigidez local . . . . .	61
4.2	Otimização do Posicionamento dos Sensores . . . . .	62
4.2.1	Métodos Matriciais para o posicionamento dos Sensores . . . . .	64
4.2.2	Interpolação dos Modos de Vibração . . . . .	67
4.2.3	Modelagem do problema inverso de otimização de sensores . . . . .	69
4.3	Critérios e Métricas para a Identificação de Danos . . . . .	70
4.3.1	Método da diferença dos modos de vibração . . . . .	71
4.3.2	Curvatura modal . . . . .	73
4.4	Modelagem do Problema Inverso . . . . .	74
4.4.1	Identificação por Heurística de Otimização . . . . .	75
4.4.2	Identificação por Redes Neurais Artificiais . . . . .	77
<b>5</b>	<b>Resultados e Discussão</b>	<b>80</b>
5.1	Resultados Iniciais de Modelagem . . . . .	80
5.1.1	Influência da Condição de Contorno . . . . .	81
5.1.2	Efeito direto do dano . . . . .	85
5.2	Influência do Dano nos Modos de Vibração . . . . .	87
5.3	Posicionamento dos Sensores . . . . .	92
5.3.1	Critérios Matriciais . . . . .	92
5.3.2	Critério de Interpolação dos Modos . . . . .	101
5.3.3	Posicionamento Ótimo por Otimização Multiobjetivo . . . . .	101
5.4	Identificação de Danos por meio de Heurísticas de Otimização . . . . .	107
5.4.1	Resultados obtidos pelo algoritmo genético . . . . .	107
5.4.2	Resultados obtidos pelo algoritmo SunFlower . . . . .	109
5.4.3	Caso particular de detecção de furos circulares . . . . .	114
5.5	Identificação de Danos por meio de Redes Neurais Artificiais . . . . .	123
5.5.1	Redes Neurais baseadas em Frequências Naturais . . . . .	123
5.5.2	Redes Neurais baseadas em Modos de Vibração Reduzidos . . . . .	130
5.6	Resultados Experimentais . . . . .	136
5.6.1	Descrição do Ensaio . . . . .	136
5.6.2	Problema Inverso de Ajuste de Modelo Numérico-Experimental . . . . .	140
5.6.3	Resultados da Detecção de Danos por meio de Mudanças nas Frequências Naturais . . . . .	142

---

<b>6</b>	<b>Conclusões</b>	<b>147</b>
6.1	Conclusões . . . . .	147
6.2	Recomendações Para Trabalhos Futuros . . . . .	150
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>151</b>
<b>A</b>	<b>Otimização dos Sensores para Condição de Contorno de Engastamento</b>	<b>168</b>
A.1	Otimização por meio de Critério de Informação Modal . . . . .	168
A.2	Otimização da Interpolação dos Modos . . . . .	175
A.3	Otimização Multiobjetivo . . . . .	175
<b>B</b>	<b>Identificação de Danos Considerando Ruídos na Medição</b>	<b>179</b>
B.1	Detecção de Danos por meio de Algoritmos Genéticos e Dados Ruidosos . . .	181
B.2	Detecção de Danos por meio do Algoritmos SunFlower e Dados Ruidosos . . .	183
<b>C</b>	<b>Eficiência do Algoritmo SunFlower</b>	<b>185</b>

# Lista de Figuras

1.1	Uma visão geral dos potenciais campos de aplicação das técnicas de monitoramento estrutural (Adaptado de Ooijselaar (2014)). . . . .	2
1.2	O quadro multidisciplinar da concepção de um sistema SHM (adaptado de Ooijselaar (2014)). . . . .	4
2.1	Os quatro níveis de condição estrutural segundo Rytter (1993). . . . .	30
2.2	Mapeamento de danos em serviço para a fuselagem de uma aeronave Airbus A-320. Os locais com danos são marcados em vermelho (Adaptado de Wenk e Bockenheimer (2014)). . . . .	35
2.4	Exemplo de delaminação real em uma estrutural de material compósito (adaptado de Heslehurst (2014)). . . . .	36
2.3	Alguns dados causados em aeronaves em operação. . . . .	37
2.5	Fontes de delaminação em descontinuidades na geometria e no material (adaptado de Raju e O'brien (2008)). . . . .	39
3.1	Comparação entre métodos convencionais de busca e algoritmos genéticos (adaptado de Gopalakrishnan <i>et al.</i> (2011b)). . . . .	42
3.2	Fluxograma do funcionamento básico de um GA e seus operadores genéticos (adaptado de Beygzadeh <i>et al.</i> (2014)). . . . .	44
3.3	Fluxogramas dos algoritmos GA e SO. . . . .	48
3.4	Noções gerais sobre a metodologia do algoritmo SO. . . . .	50
3.5	Espaços de busca em otimização multiobjetivo (adaptado de Jaimes <i>et al.</i> (2009)).	52
3.6	Conjunto ótimo de Pareto e sua frente (adaptado de Jaimes <i>et al.</i> (2009)). . . .	53
3.7	Otimização multiobjetivo empregando otimizações independentes (adaptado de Deb (2008)). . . . .	54
3.8	Um exemplo de neurônio simples exibindo entrada, função de ativação e saída com uma camada escondida (adaptado de Gopalakrishnan <i>et al.</i> (2011b)). . . .	55
3.9	Rede multicamada do tipo MLP (adaptado de Hossain <i>et al.</i> (2016)). . . . .	56
4.1	Modelagem da estrutura danificada por MEF e sistema de referência dos elementos. . . . .	62
4.2	Interpolação de superfície a partir da posição ótima dos sensores. Modo real (a) e superfície interpolada (b). . . . .	69

4.3	Configuração das possíveis posições dos sensores. . . . .	71
4.4	Modelagem do problema inverso de detecção de danos usando técnicas inteligentes. . . . .	75
4.5	Fluxograma resumido da metodologia de trabalho adotada neste trabalho. . . . .	79
5.1	Sistema de referência da placa para aplicação das condições de contorno. . . . .	81
5.2	Variação das frequência dos primeiros 10 modos em função da localização do dano. . . . .	84
5.3	Localização dos danos estudados na placa. . . . .	85
5.4	Diferença dos modos de vibração em diferentes posições do dano. . . . .	89
5.5	Diferença entre os modos de vibração com índices padronizados. . . . .	90
5.6	Diferença dos modos de vibração em diferentes posições do dano. . . . .	91
5.7	Resultado geral do posicionamento de 4 sensores por meio de diversos métodos (localização ótima destacada em vermelho). . . . .	98
5.8	Resultado geral do posicionamento de 6 sensores por meio de diversos métodos (localização ótima destacada em vermelho). . . . .	99
5.9	Resultado geral do posicionamento de 9 sensores por meio de diversos métodos (localização ótima destacada em vermelho). . . . .	100
5.10	Resultado de interpolação considerando o conjunto dos 6 primeiros modos de vibração. . . . .	102
5.11	Resultado da otimização multiobjetivo considerando os seis primeiros modos de vibração. . . . .	104
5.12	Resultados multiobjetivos exibindo as posições dos sensores e tomada de decisão. . . . .	105
5.13	Convergência na população de girassol para detecção de delaminação no elemento 19. . . . .	111
5.14	Convergência na população de girassol para detecção de delaminação no elemento 89. . . . .	112
5.15	Variação das variáveis de projeto ao longo das gerações. . . . .	113
5.16	Modelagem do dano como um furo circular. . . . .	114
5.17	Resultados da detecção de dano (furos) em placa laminada usando GA, SFO e SFO com parâmetros otimizados. . . . .	118
5.18	Resultados da população final para detecção de dano (furos) em placa laminada usando GA, SFO e SFO com parâmetros otimizados. . . . .	119
5.19	Variação das variáveis $x$ , $y$ e $r$ e da função objetivo $J_8$ durante a otimização. . . . .	120
5.20	Variação da população de indivíduos ao longo das gerações para o algoritmo SFO. . . . .	121
5.21	Variação da do melhor indivíduo ao longo das gerações para o algoritmo SFO. . . . .	122
5.22	Arquitetura da rede neural com seis entradas, uma camada oculta e duas saídas. . . . .	124
5.23	Variação das frequências naturais em função da localização do dano e sua severidade. . . . .	124

5.24	Resultados globais da a placa danificada para (a) elemento e (b) severidade. Os resultados obtidos para os valores alvos mostram boa eficiência para um método de identificação em tempo real. . . . .	126
5.25	Resultado global do treinamento para elemento e severidade . . . . .	127
5.26	Previsão da rede neural considerando dados não treinados. . . . .	127
5.27	Resultados gráficos da saída da rede neural para dados não treinados (legenda: ■ Target, ■ Rede Neural). . . . .	128
5.28	Regressão dos dados de entrada e saída da rede neural considerando frequências naturais. . . . .	129
5.29	Arquitetura da rede neural usando modos reduzidos na identificação de danos. . . . .	131
5.30	Elementos utilizados aleatoriamente na fase de treinamento da rede neural artificial. . . . .	131
5.31	Resultados gráficos da saída da rede neural para dados não treinados para os modos de vibração (legenda: ■ Target, ■ Rede Neural). . . . .	133
5.32	Regressão dos dados de entrada e saída da rede neural considerando os modos de vibração. . . . .	134
5.33	Estruturas de teste utilizadas neste trabalho, cordialmente cedidas pela EMBRAER®. 137	
5.34	Esquema da bancada experimental. . . . .	138
5.35	Sistema de referência para aquisição de vibração e ponto de impacto . . . . .	138
5.36	Função de reposta em frequência para as placas de estudo. . . . .	139
5.37	Resultado da identificação de dano na placa delaminada considerando 1 e 2 danos presentes (legenda: ■ dano detectado, ■ danos reais). . . . .	144
5.38	Resultado da identificação de dano na placa delaminada considerando oito danos estruturais. . . . .	144
5.39	Resultado da identificação de dano na placa delaminada considerando oito danos estruturais. . . . .	145
5.40	Resultado final da identificação de danos com possível localização do(s) dano(s) (legenda: ■ dano detectado, ■ danos reais). . . . .	146
A.1	Resultado geral do posicionamento de 4 sensores por meio de diversos métodos. . . . .	172
A.2	Resultado geral do posicionamento de 6 sensores por meio de diversos métodos. . . . .	173
A.3	Resultado geral do posicionamento de 9 sensores por meio de diversos métodos. . . . .	174
A.4	Resultado de interpolação considerando o conjunto dos 6 primeiros modos de vibração para placa em CCCC. . . . .	177
A.5	Resultados multiobjetivos exibindo as posições dos sensores e tomada de decisão para a placa em CCCC. . . . .	178
C.1	Convergência na população através dos dias (gerações). . . . .	186
C.2	Resultado do arranjo de mistura para diferentes funções de teste. . . . .	188

# Lista de Tabelas

1.1	Revisão acerca de detecção de danos por meio de métricas dinâmicas de vibrações mecânicas. . . . .	13
1.2	Revisão sistemática sobre os parâmetros utilizados na otimização em detecção de danos. . . . .	16
1.3	Revisão sistemática sobre os parâmetros utilizados na busca por danos estruturais por meio de redes neurais artificiais. . . . .	18
1.4	Revisão sistemática sobre os parâmetros utilizados na busca por danos estruturais por meio de técnicas não convencionais. . . . .	23
1.5	Revisão acerca dos parâmetros utilizados em estudos de otimização de posicionamento de sensores. . . . .	25
4.1	Propriedades do material considerado neste estudo. . . . .	60
4.2	Estudo da convergência de malha para os primeiros modos de vibração. . . . .	70
4.3	Operadores genéticos utilizados para o problema de identificação de parâmetros. . . . .	76
5.1	Estudo da convergência de malha para os primeiros modos de vibração. . . . .	81
5.2	Quantificação dos erros da discretização do modelo. . . . .	82
5.3	Frequências Naturais da placa intacta e danificada, considerando um dano induzido no elemento $N_e = 45$ com $\alpha = 0.2$ . . . . .	86
5.4	Resultados do posicionamento ótimo considerando 4 sensores. . . . .	94
5.5	Resultados do posicionamento ótimo considerando 6 sensores. . . . .	95
5.6	Resultados do posicionamento ótimo considerando 9 sensores. . . . .	96
5.7	Resultado de interpolação dos modos de vibração usando um número reduzido de pontos em localização ótimas . . . . .	106
5.8	Resultados da identificação do dano usando GA em um número reduzido de pontos sensoriados. . . . .	108
5.9	Resultados da gráficos da identificação de danos usando GA, sem ruído. . . . .	108
5.10	Operadores biológicos do algoritmo SunFlower aplicado à identificação de delaminação. . . . .	109
5.11	Resultados da identificação do dano usando <i>Sunflower Optimization</i> em um número reduzido de pontos sensoriados. . . . .	110

5.12	Resultados da gráficos da identificação de danos usando <i>Sunflower Optimization</i> , sem ruído. . . . .	110
5.13	Parâmetros principais dos algoritmos GA e SFO. . . . .	115
5.14	Resultados da detecção de danos usando GA e SFO. . . . .	116
5.15	Parâmetros da rede para detecção de danos considerando frequências naturais. . . . .	123
5.16	Previsão dos danos considerando apenas uma saída. . . . .	128
5.17	Previsão dos danos considerando somente os modos de vibração danificados. . . . .	132
5.18	Resultados experimentais das estruturas sem e com danos. . . . .	138
5.19	Resultado geral do ajuste dos modelos numérico-experimental. . . . .	141
6.1	Conclusão sobre o método proposto em relação às técnicas convencionais de inspeção. . . . .	150
A.1	Resultados do posicionamento ótimo considerando 4 sensores. . . . .	169
A.2	Resultados do posicionamento ótimo considerando 6 sensores. . . . .	170
A.3	Resultados do posicionamento ótimo considerando 9 sensores. . . . .	171
A.4	Resultado de interpolação dos modos de vibração usando um número reduzido de pontos em localização ótimas para a placa em CCCC. . . . .	176
B.1	Visão geral dos modos de vibração compostos por diferentes níveis de ruído. . . . .	180
B.2	Resultados da identificação do dano usando GA com 1% de ruído na medição. . . . .	181
B.3	Resultados da identificação do dano usando GA com 5% de ruído na medição. . . . .	182
B.4	Resultados da identificação do dano usando GA com 10% de ruído na medição. . . . .	182
B.5	Resultados gerais da detecção de dano considerando ruídos brancos em diferentes níveis. . . . .	182
B.6	Resultados da identificação do dano usando SFO com 1% de ruído na medição. . . . .	183
B.7	Resultados da identificação do dano usando SFO com 5% de ruído na medição. . . . .	184
B.8	Resultados da identificação do dano usando SFO com 10% de ruído na medição. . . . .	184
B.9	Resultados gerais da detecção de dano considerando ruídos brancos em diferentes níveis para o algoritmo SFO. . . . .	184
C.1	Funções de teste escolhidas para testar o algoritmo de polinização modificado. . . . .	185
C.2	Resultados do algoritmo SFO aplicado em funções de teste. . . . .	186

# Lista de Símbolos

## Símbolos Latinos

$[A]$	Matriz de transformada de coordenadas
$[B]$	Matriz de função de forma
$[C]$	Matriz de constante elástica do material
$[H]$	Matriz de Reposta em frequência
$[K]$	Matriz de rigidez
$[M]$	Matriz de massa
$E$	Módulo de elasticidade longitudinal [MPa]
$E_D$	Matriz de independência efetiva
$G$	Módulo de elasticidade transversal [MPa]
$H(D)$	Matriz de entropia
$J$	Função objetivo genérica
$N_e$	Número do elemento
$Q$	Matriz de informação de Fisher
$b_k$	limiar da rede neural
$d_i$	Função passo no algoritmo de polinização
$f$	Função matemática
$f_e$	Excitação externa
$g$	Função matemática de restrição
$m_p$	Taxa de mortalidade das flores
$p_c$	Taxa de cruzamento
$p_m$	Taxa de mutação
$p_p$	Taxa de polinização
$p_s$	Taxa de sobrevivência
$R^2$	Coefficiente de determinação
$s_i$	Direção dos indivíduos do algoritmo de polinização

---

$x$	Coordenada espacial [m]
$x_k$	Entrada da rede neural
$\ddot{x}$	Aceleração [m/s <sup>2</sup> ]
$y$	Coordenada espacial [m]
$y_k$	Saída da rede neural
$w_k$	Pesos sinápticos

## Símbolos Gregos

$\alpha$	Multiplicador de severidade do dano
$\beta$	Percentual de redução de rigidez
$\epsilon$	Deformação
$\gamma$	Distribuição gamma
$\lambda$	Autovalor
$\omega_n$	Frequência natural
$\nu$	Coefficiente de Poisson
$\rho$	Massa específica do material
$\Omega$	Subconjunto dos reais
$\phi$	Modo de vibração
$\Phi$	Autovetor
$\sigma$	Tensão

---

## Subscritos/Sobrescritos

<i>cd</i>	Com dano
<i>d</i>	Danificado
<i>e</i>	Elemento
<i>el</i>	Elemento
<i>F</i>	Norma Frobenius
<i>pop</i>	População
<i>real</i>	Representa dados de valores conhecidos
<i>ruido</i>	Sinal com adição de ruído
<i>S</i>	Laminado simétrico
<i>sd</i>	Sem dano
<i>it</i>	Representa uma iteração
<i>T</i>	Matriz transposta

# Lista de Abreviaturas

<b>ACO</b>	<i>Ant Colony Optimization</i>
<b>ADPR</b>	<i>Average Driving Point Residue</i>
<b>AE</b>	<i>Acoustic Emission</i>
<b>ANFIS</b>	<i>Adaptive Neural Fuzzy Inference System</i>
<b>ANN</b>	<i>Artificial Neural Network</i>
<b>BVID</b>	<i>Barely Visible Impact Damage</i>
<b>CCCC</b>	<i>Clamped Clamped Clamped Clamped</i>
<b>CMA</b>	<i>Covariance Matrix Adaption</i>
<b>CMV</b>	<i>Curvatura do Modo de Vibração</i>
<b>DE</b>	<i>Differential Evolution</i>
<b>DPR</b>	<i>Driving Point Residue</i>
<b>Efi</b>	<i>Effective Independence</i>
<b>EMD</b>	<i>Empirical Mode Decomposition</i>
<b>FEM</b>	<i>Finite Element Model</i>
<b>FFFF</b>	<i>Free Free Free Free</i>
<b>FFT</b>	<i>Fast Fourier Transform</i>
<b>FIM</b>	<i>Fisher Information Matrix</i>
<b>FRF</b>	<i>Função de Resposta em Frequência</i>
<b>FSS</b>	<i>Frequency Shift Surface</i>
<b>GA</b>	<i>Genetic Algorithm</i>
<b>HHT</b>	<i>Hilbert Huang Transform</i>
<b>IMF</b>	<i>Intrinsic Mode Function</i>
<b>KE</b>	<i>Kinetic Energy</i>
<b>MAC</b>	<i>Modal Assurance Criterion</i>
<b>MDLAC</b>	<i>Multiple Damage Location Assurance Criterion</i>
<b>MEF</b>	<i>Método dos Elementos Finitos</i>
<b>MLP</b>	<i>Multi Layer Perceptron</i>
<b>MSC</b>	<i>Mode Shape Curvature</i>
<b>MSE</b>	<i>Modal Strain Energy</i>

---

<b>NDE</b>	<i>Non Destructive Evaluation</i>
<b>NDI</b>	<i>Non Destructive Inspection</i>
<b>NDT</b>	<i>Non Destructive Testing</i>
<b>NSGA</b>	<i>Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm</i>
<b>ODS</b>	<i>Operating Deflection Shape</i>
<b>PCA</b>	<i>Principal Component Analysis</i>
<b>PDE</b>	<i>Probability of Damage Existence</i>
<b>PoD</b>	<i>Probability Of Detection</i>
<b>PSO</b>	<i>Particle Swarm Optimization</i>
<b>RNA</b>	<i>Rede Neural Artificial</i>
<b>SA</b>	<i>Simulated Annealing</i>
<b>SFO</b>	<i>SunFlower Optimization</i>
<b>SHM</b>	<i>Structural Health Monitoring</i>
<b>SLV</b>	<i>Scanning Laser Vibrometer</i>
<b>SSE</b>	<i>Spectral Strain Energy</i>
<b>SVD</b>	<i>Singular Value Decomposition</i>

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Motivação

Materiais compósitos têm sido amplamente utilizados ao longo dos anos na indústria aeroespacial e em outras aplicações de engenharia onde o peso estrutural é uma das principais justificativas de seu emprego. Isto é devido às suas excelentes vantagens, tais como: elevada resistência e notável rigidez em relação à sua massa específica, além da elevada capacidade de suportar a fadiga e corrosão (Kaw (2005)).

No entanto, tais estruturas compósitas, em serviço, podem apresentar certos mecanismos de falha, tais como ruptura de fibra, trincas na matriz e delaminações. Essas falhas são causadas devido a sobrecarga estática, impacto, fadiga, erros de projeto e superaquecimento. Essencialmente, a delaminação é considerada a maior "fraqueza" dos materiais compósitos laminados, levando à perda de integridade estrutural. As delaminações podem facilmente se espalhar por todo o laminado de uma estrutura composta podendo levar a falhas catastróficas quando não detectadas (Chakraborty (2005)).

Inspeções visuais programadas, geralmente, são demoradas, caras e exigem que os componentes estejam prontamente acessíveis, como mostrado na Figura 1.1. Outros métodos convencionais (emissão acústica, métodos ultrassônicos, termografia, radiografias e outros) para detecção prévia de danos em compósitos são na maioria das vezes onerosos e dependem fortemente da habilidade e experiência do operador. As tecnologias de monitoramento da integridade estrutural (*Structural Health Monitoring* - SHM) propõem uma alternativa promissora e envolvem o monitoramento contínuo de uma estrutura, utilizando uma abordagem de ensaios não destrutivos (*Non Destructive Inspection* - NDI) empregando sensores integrados (Heslehurst (2014)).

Inspeções SHM que exploram métricas de vibração são métodos baseados no princípio que a degradação devido a danos em uma estrutura altera parâmetros de vibração como frequên-

cias naturais, modos de vibração e amortecimento estrutural. Portanto, desta maneira é possível analisar os parâmetros de vibração medidos para caracterizar e identificar a presença de danos usando técnicas de modelagem inversa e inteligência computacional.



(a) Inspeção de pás eólicas.

(b) Inspeção de fuselagens aeronáuticas.

(c) Inspeção em pontes

**Figura 1.1:** Uma visão geral dos potenciais campos de aplicação das técnicas de monitoramento estrutural (Adaptado de Ooijevaar (2014)).

Segundo Gopalakrishnan *et al.* (2011b), a metodologia SHM tem como objetivo fornecer as ferramentas para o monitoramento constante ou periódico de ativos estruturais críticos, a fim de determinar a necessidade de ações corretivas e prevenir falhas catastróficas. A metodologia SHM tem, portanto, potencial aplicação em muitas áreas da engenharia, incluindo aeroespacial, mecânica e civil. A ideia básica de um sistema SHM é fornecer para uma estrutura de interesse, capacidades de detecção e análise além de permitir que o monitoramento e avaliação sejam realizados periodicamente ou continuamente de forma autônoma. O método SHM oferece potencialmente maior segurança, uma vez que as falhas não evoluem para um nível alarmante. Como os benefícios potenciais desta incorporação de SHM são enormes, uma grande quantidade de pesquisa está em andamento em todo o mundo para desenvolver e melhorar sistemas que trazem algum grau de "autoconsciência" às estruturas feitas pelo homem (Gopalakrishnan *et al.* (2011b)).

Os benefícios de um sistema que emprega a metodologia SHM incluem (mas não limitando-se a) (Gopalakrishnan *et al.* (2011b)):

- Permitir uma utilização otimizada da estrutura, um tempo de parada minimizado e evitar falhas catastróficas;

- Dar ao projetista uma melhoria em seus produtos;
- Alterar drasticamente a organização do trabalho dos serviços de manutenção. Isto é, substituição da inspeção de manutenção programada e periódica por manutenção baseada em desempenho (ou condição), reduzindo o trabalho de manutenção atual.

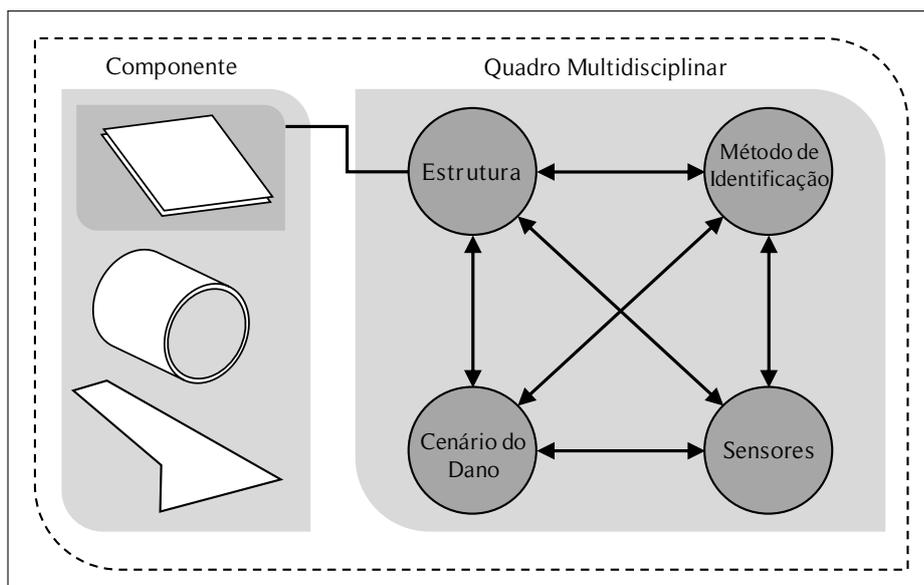
Em resumo, o desenvolvimento de tecnologias de monitoramento estrutural de compósitos tem como objetivo proporcionar segurança e economia de custos (principalmente com manutenção). No entanto, o número de aplicações práticas destas tecnologias ainda são limitadas. Isto deve-se principalmente à complexidade de possíveis cenários de danos e as exigências de alto desempenho dos métodos de identificação empregados. O estudo desenvolvido neste trabalho refere-se principalmente à relação entre esses dois aspectos, a fim de alcançar um nível de maturidade específico. Informações detalhadas sobre os conceitos empregados para que tal fato ocorra serão apresentadas nas seções seguintes. O conhecimento contido nessas seções é necessário para compreender plenamente o tema aqui estudado. Os resultados obtidos neste trabalho de pesquisa indicam claramente a capacidade notável dos métodos computacionais inteligentes na identificação de danos. Os algoritmos nas suas formulações inversas são capazes de prever parâmetros de delaminação.

## 1.2 Objetivos e Escopo do Trabalho

O desenvolvimento de uma estratégia de monitoramento da integridade estrutural envolve relevantes desafios da pesquisa, como foi demonstrado na seção anterior. A Figura 1.2 ilustra esquematicamente o quadro multidisciplinar associado a este desafio, incluindo quatro componentes principais: a estrutura, o método de identificação de danos, cenário de dano e a tecnologia de sensoriamento. As características desses componentes são estreitamente interligadas e, em conjunto, definem o desempenho da estratégia proposta. Idealmente, uma boa estratégia combina um alto nível de detecção com um baixo número de falsos positivos. O sucesso de uma estratégia de identificação de danos depende, contudo, da estrutura e do cenário de dano que é considerado. A seleção da abordagem mais adequada está, portanto, longe de ser trivial e direta (Ooijevaar (2014)).

É importante salientar que existe uma diferença em relação à detecção, localização e identificação de danos. Neste trabalho e dano (na maioria dos casos) é induzido à estrutura para que se possa verificar a capacidade de localizá-lo em uma posição já conhecida. Logo, o foco deste trabalho se restringe à localização e à identificação do dano, partindo da hipótese que o dano já está presente na estrutura.

Este trabalho é dedicado à identificação de danos estruturais em estruturas compósitas laminadas (mas não se restringindo somente a estas), principalmente no que se diz respeito à



**Figura 1.2:** O quadro multidisciplinar da concepção de um sistema SHM (adaptado de Ooijevaar (2014)).

identificação de delaminações, aqui modeladas como um perda local de rigidez estrutural, uma vez que este é um dos principais modos de falha de materiais compósitos. O dano simulado como uma redução de rigidez modela fielmente o comportamento mecânico estrutural de delaminações, onde de fato existe um relação muito forte entre o tamanho de delaminações e redução de rigidez (Jamison *et al.* (1984)).

Existe um acréscimo da redução de rigidez devido ao aumento do tamanho da delaminação (Lagace (1989)). Todavia, diversos outros trabalhos (Zhang *et al.* (1999); Takeda e Ogihara (1994); Zhang *et al.* (1994); Kashtalyan e Soutis (2000); Ogihara e Takeda (1995)) estudaram, abordaram e deixaram evidente a redução de rigidez devido aos danos de delaminações. A delaminação, portando, um importante modo de falha em materiais compósitos que pode não ser visível na superfície estrutural, mas é capaz de afetar resistência e rigidez (Garg (1988)).

Como já salientado, a tecnologia SHM é um campo que requer uma compreensão profunda de materiais, sensores, além da capacidade de realizar sofisticadas modelagens numéricas e analíticas e processamento de sinais. Cada um desses tópicos é um assunto por si só, e desenvolver um trabalho incorporando todos os aspectos acima é realmente uma tarefa difícil (Gopalakrishnan *et al.* (2011b)). A modelagem constitui um componente importante na tecnologia SHM. Dados simulados são usados para apoiar o desenvolvimento de novos algoritmos para detecção de danos, ou para uma melhor compreensão sobre os efeitos de danos na resposta da estrutura. Um dos objetivos específicos desta pesquisa é, portanto, apresentar algumas ferramentas computacionais que podem ser usadas para a detecção/identificação de danos estruturais.

Abordagens em vibrações estruturais são enfatizadas neste estudo pois a presença de um

dano resulta na modificação das matrizes estruturais da mesma que implica na modificação da resposta dinâmica estrutural. O uso de métodos dinâmicos se justifica em primeiro lugar, porque eles não exigem que a estrutura esteja facilmente acessível e porque métodos de baixa frequência fornecem dados relativamente de fácil interpretação.

A capacidade de identificar componentes danificados nos sistemas aeroespacial, mecânico e civil está se tornando cada vez mais importante (Doebbling *et al.* (1996); Fan e Qiao (2011); Dessi e Camerlengo (2015)). Apesar de esforços consideráveis terem sido dedicados à comunidade de diagnóstico e prognóstico para desenvolver métodos eficazes de diagnósticos e identificações de danos ao longo das últimas décadas, a identificação de danos estruturais ainda é considerada um desafio prático para a garantia de segurança de estruturas de engenharia (Guan *et al.* (2017)).

Em suma, o objetivo e foco principal deste trabalho se baseia na solução do problema inverso e de reconhecimento de padrões de identificação de danos (e quantificação de sua severidade) em material compósito (mas não se restringindo somente) fazendo-se uso, principalmente, de inteligência computacional lançando mão de parâmetros modais estruturais com o intento de identificar a possível localização de um dano estrutural e sua magnitude, isto é, sua severidade.

Uma das principais contribuições deste trabalho se refere a um estudo detalhado sobre diversos métodos de otimização de sensores em estruturas do tipo placa, principalmente sobre otimização de multiobjetivos simultâneos. Em seguida, uma nova heurística de otimização global é proposta na solução do problema inverso de detecção de danos. Por último, o uso de redes neurais artificiais a partir de modos de vibração reduzidos é introduzido a fim de poder prever danos (delaminação) em materiais compósitos laminados.

O objetivo geral deste estudo pode ser dividido em alguns objetivos específicos, sendo eles:

- Aplicar o método de elementos finitos (MEF) como ferramenta na metodologia de detecção de danos;
- Efetuar um estudo acerca do posicionamento ótimo dos sensores no processo de identificação de danos, a fim de se obter a maior quantidade de informação modal possível usando um número reduzido de sensores;
- Acoplar o MEF com heurísticas de otimização global na busca por uma metodologia que possa identificar a localização danos em estruturas placas.
- Treinar uma rede neural artificial baseando-se nas repostas modais estruturais para que então seja possível prever a possível localização de danos.

Este trabalho contribuirá com a comunidade científica e engenheiros no desenvolvimento de ferramentas e no diagnóstico de identificação de danos em materiais compósitos.

## 1.3 Estrutura da Tese

Este trabalho está organizado conforme será exposto a seguir.

No Capítulo 1, faz-se uma introdução a respeito do trabalho em questão, apresentando uma revisão literária das relevantes contribuições com o passar dos anos, de pesquisadores na área. Os principais objetivos de pesquisa são ainda inclusos neste capítulo.

No Capítulo 2, será realizada uma abordagem sobre o conceito de monitoramento da integridade estrutural (SHM), dando ênfase aos métodos baseados em dados modais como critério de detecção de danos.

Noções sobre as técnicas computacionais empregadas neste trabalho serão discutidas no Capítulo 3, onde heurísticas de otimização global e redes neurais artificiais serão discutidas.

No Capítulo 4, discorre-se sobre a formulação matemática e modelagem do problema numérico (direto e inverso) da metodologia proposta.

No Capítulo 5, os resultados serão levantados, lançados e discutidos.

Por fim, no Capítulo 6, serão apresentadas as conclusões oriundas a partir dos resultados obtidos e uma sugestão para a continuidade do tema em trabalhos futuros.

## 1.4 Estado da Arte

Danos são a principal causa de falha estrutural e ocorrem frequentemente em estruturas mecânicas. Nas últimas décadas, foi dada atenção especial aos métodos de detecção de danos em uma fase inicial para evitar a falha súbita de componentes estruturais. Mais especificamente, o monitoramento da integridade estrutural baseado na vibração das estruturas tem sido o foco de atenção de muitos pesquisadores a fim de se obter ferramentas eficientes e de grande importância para as comunidades de engenharia civil, aeronáutica e mecânica. Ademais, muitas frentes de pesquisa tem se voltado ao desenvolvimento de indicadores de danos confiáveis que permitam além de detectar o dano, identifica-lo em termos de localização.

Um dos primeiros trabalhos de relevância publicado foi desenvolvido por Adams *et al.* (1978). Os autores desenvolveram um método não-destrutivo de avaliação da integridade estrutural baseado em medições de vibração. Foi mostrado que as medições de vibração feitas na estrutura (função receptância) podem ser usadas, em conjunto com um modelo teórico adequado (referência), para indicar a localização e a magnitude de um dano, em um modelo unidimensional.

No mesmo período, Cawley e Adams (1979) perceberam que um determinado estado de dano pode ser gerado por uma redução da rigidez ou por um acréscimo no amortecimento estrutural. Mudanças de rigidez, sejam elas locais ou distribuídas, levam a mudanças nas frequências naturais da estrutura em questão. Além disso, uma vez que a distribuição da tensão através de uma estrutura em vibração é não uniforme e é diferente para cada uma das frequências naturais, qualquer dano localizado afetaria cada modo individual e diferentemente, dependendo da localização particular do dano. Assim, a medição de dados modais de uma estrutura em duas ou mais etapas da sua vida oferece a possibilidade de localizar danos na estrutura. Se um conjunto de repostas dinâmicas forem medidas antes que a estrutura esteja em serviço, medições dessas mesmas repostas em uma etapa posterior podem ser usadas para determinar se a estrutura ainda atende determinados critérios de operacionalidade. O presente trabalho descreverá o uso de dados modais combinados com estratégias evolucionárias inteligentes na tentativa de localizar possíveis regiões críticas (danificadas). Para isto, alguns tópicos de interesse sobre o tema discutido e revisto na sequência.

### 1.4.1 Vibrações Mecânicas como Critério de Dano

A presença de danos ou a deterioração estrutural provoca alterações nas frequências naturais na estrutura. Os métodos de localização de danos mais úteis (baseados em testes dinâmicos) são provavelmente aqueles que utilizam alterações nas frequências de ressonância (frequências naturais), devido ao fato de serem métricas de fácil obtenção e confiáveis. Lifshitz e Rotem (1969) *apud* Doebling *et al.* (1998) apresentam o que pode ter sido o primeiro artigo a propor detecção de danos por meio de medições de vibração. Eles analisam a mudança nos módulos dinâmicos, que podem estar relacionados com a mudança de frequência, indicando danos em estruturas.

Hassiotis e Jeong (1995) investigaram uma técnica para a identificação de reduções localizadas na rigidez de uma estrutura usando somente medidas de frequência natural. As sensibilidades dos autovalores têm sido usadas em um problema de otimização, que minimiza critérios de mudanças na rigidez dos elementos e resíduos do problema do autovalor. A formulação global proposta proporcionou um método útil para identificar danos com um pequeno número de frequências naturais medidas a partir de uma viga em alumínio.

Enfatizando aqui o uso de frequências naturais como métrica de dano, Mimovich (1988) apresentou um trabalho utilizando o método de frequência modal para diagnosticar a fratura experimentalmente em estruturas simples do tipo viga. Foi ilustrado que o dano interferiu diretamente na variação das frequências e a partir de amostras experimentais, as localizações dos danos puderam ser previstas dentro de uma precisão de 1%.

Law *et al.* (1990) *apud* Salawu (1997) sugeriram uma técnica para determinar mudanças de rigidez estrutural e posições de defeitos a partir de mudanças medidas nas frequências de

ressonância. A técnica utilizou um modelo em elementos finitos da estrutura e a solução do problema de identificação envolveu a utilização de um método de programação não-linear. Os autores observaram que a identificação dos danos apresentava melhor desempenho se certas partes da estrutura fossem incluídas em destaque na formulação. Uma vez que o conhecimento prévio das áreas danificadas não estava disponível, a determinação da(s) parte(s) a ser(em) incluída(s) poderia ser difícil.

A partir dos resultados de ensaios de vibração de Moradalizadeh (1990) *apud* Salawu (1997) em estruturas de concreto, verificou-se que o grau de redução na frequência natural depende da posição do defeito. Observações semelhantes foram relatadas por Ågårdh (1991) a partir de ensaios realizados em um mastro de aço de 20m de altura. Danos em regiões críticas resultaram em reduções significativas (até 15%) nas frequências naturais.

Recentemente, Fu *et al.* (2016) apresentaram uma abordagem em duas etapas baseada na energia de deformação modal (*Modal Strain Energy* - MSE) e análise de sensibilidade da resposta para identificar os danos locais em placas. O dano local foi simulado por uma redução no módulo de elasticidade. O ponto importante é que um método para enfraquecer o "efeito de vizinhança" foi proposto para reduzir os falsos alarmes na localização de danos, já que estes são um dos maiores desafios enfrentados hoje na comunidade SHM. Exemplos numéricos foram então conduzidos para ilustrar a eficiência do método proposto, e assim, danos puderam ser identificados com sucesso mesmo sob efeito de ruídos de medição.

Além disso, aspectos de segurança e economia são as principais motivações para o aumento da investigação sobre o monitoramento da integridade estrutural. Dado que o dano altera as características dinâmicas de uma estrutura, as suas propriedades modais (frequências naturais, amortecimento e modos de vibração), várias técnicas baseadas na análise modal experimental foram desenvolvidas nos últimos anos. Não só frequências naturais são utilizadas como métrica de dano, mas também o uso de funções de resposta em frequência (FRF) são amplamente exploradas por diversos pesquisadores. Como exemplo, o método de curvatura da FRF foi proposta por Sampaio *et al.* (1999), baseando-se apenas nos dados medidos sem a necessidade de qualquer identificação modal. No trabalho dos autores, o método foi descrito teoricamente e comparado com dois métodos mais referenciados na literatura. Os resultados mostraram que o método de curvatura da FRF obteve bons resultados na detecção, localização e quantificação de danos, embora este último item ainda precise de maior atenção. A sua principal vantagem é a sua simplicidade de realização.

Muitos métodos atuais sobre identificação de danos estruturais, tais como algoritmos genéticos (GA - *Genetic Algorithm*) e métodos inteligentes, como redes neurais artificiais (ANN - *Artificial Neural Network*) são muitas vezes implementados com base em alguns dados medidos e um grande número de dados de simulação de respostas de vibração estrutural. Portanto, Yan *et al.* (2006) enfatizaram que o estabelecimento de um modelo dinâmico preciso e eficiente para uma estrutura é uma pré-condição importante. Os autores apresentaram um método de

modelagem melhorado baseado na modificação da matriz de rigidez do elemento na posição de dano estrutural usando um coeficiente de modificação. Verificou-se a influência da posição de dano estrutural e condições de contorno no coeficiente de modificação para danos estruturais, e para isso os autores fizeram uso de FRF e frequências naturais.

Em face a essa realidade, nos últimos anos diversas frentes de pesquisa vêm juntando esforços a fim de conceber melhores índices de danos baseado em modos de vibração, pois estes são mais eficazes em localizar um dano estrutural. Citando caso análogo, Kim *et al.* (2003) apontou uma metodologia para localizar e estimar de forma não destrutiva o tamanho de danos em estruturas, para as quais apenas algumas frequências naturais ou alguns modos de vibração são disponíveis. Em primeiro lugar, os autores elaboraram um método de detecção de danos baseado em frequência naturais. Um algoritmo foi então desenvolvido para localizar danos por meio de alterações nas frequências naturais, sendo ainda capaz de estimar o tamanho de trincas a partir das perturbações em frequência. Em seguida, é descrito um método de detecção de danos baseado em modos de vibração. Ambos os métodos são avaliados para vários cenários de danos simulados numericamente, para os quais duas frequências naturais e de modo são gerados a partir de modelos de elementos finitos. O resultado das análises indicou que os dois métodos localizaram corretamente o dano, contudo a metodologia baseada nos modos apresentou maior precisão na identificação das trincas.

Li *et al.* (2002) abordaram o problema da identificação da localização de dano em estruturas do tipo placa usando a técnica de deformação modal. Com base na abordagem de Rayleigh-Ritz, a análise de deformação modal de uma placa danificada é feita, e os dados modais então obtidos. A partir do resíduo do modo de deformação, são propostos dois novos parâmetros sensíveis a danos para determinar as localizações de danos, e são construídos índices de danos correspondentes. Comparados com os índices convencionais, eles foram considerados simples e intuitivos, e fáceis de serem usados na prática. Simulações numéricas e experimentais foram efetuadas e os resultados apresentaram uma boa consistência e uma forte capacidade de identificação dos índices propostos.

No trabalho de Yam *et al.* (2002) foram investigadas sistematicamente as sensibilidades dos parâmetros estáticos e dinâmicos para danos em placas, sendo propostos índices de danos correspondentes para analisar suas capacidades de identificação. Para as análises estáticas, os índices de dano são formulados usando a deflexão fora do plano, sua inclinação e curvatura com base em um modelo de elementos finitos. Para as análises dinâmicas, os dois índices foram formulados relacionados à curvatura do modo de vibração (CMV) e à função de resposta de frequência de deformação. Simulações numéricas e testes experimentais foram executados para verificar a capacidade de identificação dos índices propostos, e é dada orientação para selecionar os parâmetros apropriados para a detecção de danos. Os autores salientaram em seu trabalho que a utilização de modos em baixa frequências reduz a probabilidade de detecção de falsos positivos.

Do mesmo modo, Rucevskis *et al.* (2016), descreveram um método baseado em curvatura modal para detecção e localização de danos em estruturas semelhantes a placas. O ponto chave do algoritmo proposto é a necessidade de não fazer uso de dados da estrutura "não danificada". O índice de danos é definido como a diferença absoluta entre a curvatura medida da estrutura danificada e para isso, um polinômio suave é ajustado a fim de representar a curvatura modal da estrutura dita "saudável". A aplicabilidade e a eficácia do método de detecção de danos proposto foram demonstradas experimentalmente numa placa de alumínio e obtiveram bons resultados.

Em virtude do que foi mencionado, outros métodos não convencionais fazendo uso de dinâmica estrutural são propostos por alguns pesquisadores. Cornwell *et al.* (1999) investigaram a utilização de parâmetros modais medidos para detectar e localizar danos em estruturas semelhantes a placas. Os autores salientaram a existência de muitos métodos para localizar danos em uma estrutura dadas as propriedades modais antes e depois do dano. Infelizmente, muitos destes métodos requerem um modelo de elemento finito e/ou modos de vibração normalizados pela massa. Logo, se as propriedades modais são obtidas usando a excitação ambiente, então as formas modais não serão normalizadas pela massa. Para isto, os autores usaram um método baseado nas mudanças na energia de deformação da estrutura. Tal método foi desenvolvido originalmente para estruturas tipo viga, isto é, estruturas caracterizadas por curvatura unidimensional e foi generalizado em estruturas semelhantes a placas que se caracterizam pela curvatura bidimensional. O método proposto mostrou requerer apenas as formas modais da estrutura antes e depois de danos.

Outra técnica numérica para identificação de danos em estruturas laminadas foi proposta por Dos Santos *et al.* (2000). Ao considerar as sensibilidades das condições de ortogonalidade dos modos de vibração, é formulado um algoritmo que calcula um parâmetro de dano em cada elemento finito. O parâmetro de dano está diretamente relacionado à redução da rigidez do elemento finito danificado. A vantagem é que foram necessárias apenas as propriedades mecânicas da placa não danificada e as frequências naturais e modos da placa danificada. O modelo numérico proposto permitiu a identificação de múltiplos danos. Exemplos mostraram a boa eficiência e estabilidade do modelo numérico na identificação de danos em mais de um elemento.

Com efeito, Bayissa e Haritos (2007) propuseram um parâmetro de resposta de vibração conhecido como energia de deformação espectral (*Spectral Strain Energy* - SSE) para a identificação de danos estruturais em estruturas semelhantes a placas no contexto de uma abordagem de identificação de danos não baseada em modelo. A SSE apresentada foi derivada da resposta da curvatura modal. O desempenho e a robustez do método SSE apresentaram bons resultados quando aplicados em uma estrutura real.

É evidente que existe uma necessidade no desenvolvimento de técnicas eficazes de monitoramento estrutural, de modo a que a segurança e a integridade das estruturas compósitas possam ser melhoradas. Qiao *et al.* (2007) avaliaram técnicas de detecção de danos baseadas em dinâmica para placas compostas laminadas usando materiais piezoelétricos inteligentes

e instrumentação moderna como vibrômetro laser de varredura (*Scanning Laser Vibrometer - SLV*). O estudo visando a detecção de delaminações fez uso das medições de curvatura dos modos de vibração, medidos indiretamente e diretamente. A implementação do algoritmo pelos autores foi bem sucedida na detecção de delaminação de placas laminadas, demonstrando que a abordagem de detecção de danos baseada na dinâmica utilizando curvatura é uma técnica viável para o monitoramento de estruturas compostas.

Sob tal enfoque, Hu e Wang (2009) e Hu e Wu (2009) apresentaram a detecção de trincas superficiais em um laminado utilizando o método de energia de deformação modal. Em primeiro lugar, as propriedades do material eram desconhecidas e foram obtidas utilizando um método inverso por meio de análise de elementos finitos e análise modal experimental. Os deslocamentos modais foram usados para calcular as energias de deformação modal e um índice de dano foi definido pelos autores empregando a energia de deformação modal fracionária do laminado antes e depois do dano. Conseqüentemente, os índices de danos obtidos a partir de medições globais e locais conseguiram localizar a trinca superficial no laminado. Neste método proposto apenas alguns modos de vibração foram necessários, e os autores concluíram que o método têm um custo relativamente baixo e flexibilidade na medição, permitindo uma avaliação não destrutiva e viabilidade de detecção em tempo real em estruturas laminadas.

Um método de identificação de danos baseado em energia de deformação para estruturas de tipo placa foi apresentado por Fan e Qiao (2012). Os autores propuseram a derivada da energia de deformação como métrica de dano para localização e quantificação de danos. O método consiste em três etapas: seleção dos modos mais sensíveis, localização de dano e quantificação de danos. O método proposto é uma técnica de identificação de danos baseada na resposta que requer as frequências modais e modos de vibração antes e depois do dano. Estudos numéricos demonstraram sua viabilidade para detectar corretamente os danos mesmo sob ruído de medição elevado e condições de baixa severidade de dano.

Destaca-se também que Zhang *et al.* (2013a) apresentaram um novo método de detecção de danos para placas com base na curvatura da superfície de mudança de frequência (*frequency shift surface - FSS*). Ao contrário de outras propriedades de vibração comumente usadas como os modos de vibração que podem apresentar baixa precisão na prática, o método proposto foi utilizado como recurso para contornar este problema. Além disso, verificou-se que um dano local causará apenas mudança local na FSS, o que pode ser considerada como anormalidade, pois a curvatura da FSS de uma placa intacta é suave, de acordo com a suposição de que as estruturas de placas intactas são frequentemente homogêneas. Comparado com os métodos tradicionais, o método proposto pelos autores demonstrou ser mais sensível e preciso na identificação de danos.

Uma recapitulação é exibida na Tabela 1.1 expondo os anos de pesquisa na área por meio de trabalhos de diversos pesquisadores, fazendo uso de diferentes métricas de vibrações. Em vista dos trabalhos e argumentos apresentados pelos parágrafos anteriores e os adicionais

presentes na Tabela, fica claro que o uso de dados modais como métrica em estudos de detecção de danos é de suma importância, permeando desafios científicos importante desde os anos 80 até os dias atuais.

### 1.4.2 Uso de Métodos de Otimização

Encontrar a melhor solução para um determinado problema é uma importante área de pesquisa e aplicação em muitos campos de engenharia. Uma variedade de diferentes problemas de otimização podem ser identificados no monitoramento da integridade estrutural, onde uma série de diferentes ferramentas matemáticas possíveis são oferecidas para encontrar uma melhor solução (Worden *et al.* (2009)).

Os algoritmos genéticos têm sido objeto de considerável interesse, uma vez que fornecem uma robusta solução para problemas complexos. Devido à forma de como o algoritmo genético explora a região de interesse, evita-se ficar preso a um ponto de mínimo local, isto é, uma solução não ótima do problema em questão. Friswell *et al.* (1998) fizeram uso de algoritmos genéticos aplicado ao problema de detecção de danos usando dados de vibração. O objetivo visou a identificação da posição de um ou mais locais danificados na estrutura, além de estimar a extensão dos danos nestes. Para um dado local, utilizou-se um método de sensibilidade para otimizar a extensão de danos. Esta abordagem de dois níveis incorporou as vantagens do algoritmo genético. O método foi demonstrado num exemplo de viga e placa em caráter experimental, apresentando bons resultados.

Alguns anos depois, Yong e Hong (2001) propuseram um método de identificação de danos em uma viga baseando-se no comportamento dinâmico da mesma, por meio da minimização de uma função objetivo composta por dados referentes à estrutura antes e após a inserção do dano. Para isto, os autores fizeram o uso de algoritmo genético e três funções objetivo foram analisadas neste estudo: uma função composta por frequências naturais, uma função composta por modos de vibração e uma terceira função objetivo composta por frequências e modos. Os autores observaram uma pequena taxa de variação nas frequências naturais da estrutura devido ao dano imposto, sendo necessário então um dano relativamente grande para que houvesse uma variação perceptível nas frequências naturais da estrutura em questão, contudo o método de otimização empregado apresentou excelente eficiência no processo de detecção.

Ainda convém destacar que métodos inversos combinam um modelo inicial da estrutura e dados medidos para otimizar um modelo ou testar uma hipótese. Friswell (2007) forneceu uma visão geral do uso de métodos inversos na detecção de danos utilizando dados de vibração. O autor enfatizou que os danos são muitas vezes de natureza local e, embora o efeito da perda de rigidez possa exigir apenas um pequeno número de parâmetros, a falta de conhecimento da localização significa que um grande número de parâmetros candidatos deve ser incluído. O trabalho discutiu uma série de problemas que existem com esta abordagem de monitoramento

**Tabela 1.1:** Revisão acerca de detecção de danos por meio de métricas dinâmicas de vibrações mecânicas.

Autor	Tipo de Estrutura	Defeito Estudado	Métrica
Mimovich (1988)	Viga	Trincas	Frequências naturais
Law <i>et al.</i> (1990)	Viga	Redução da rigidez	Frequências naturais
Moradalizadeh (1990)	Viga	Redução da rigidez	Frequências naturais
Ågårdh (1991)	Mastro de aço	Redução da rigidez	Frequências naturais
Hassiotis e Jeong (1995)	Viga	Redução da rigidez	Frequências naturais
Hassiotis e Jeong (1995)	Viga	Redução da rigidez	Frequências naturais
Wang <i>et al.</i> (1997)	Viga	Redução da rigidez	FRF
Sampaio <i>et al.</i> (1999)	Ponte de Concreto	-	FRF
Cornwell <i>et al.</i> (1999)	Placa	Redução da rigidez	Modos de vibração
Dos Santos <i>et al.</i> (2000)	Placa laminada	Redução da rigidez	Modos de vibração
Kawiecki (2001)	Viga, placa e disco	Redução da espessura local	Amortecimento estrutural
Li <i>et al.</i> (2002)	Placa	Redução da espessura local	Modos de vibração
Yam <i>et al.</i> (2002)	Placa	Redução da espessura local	Modos de vibração
Kim <i>et al.</i> (2003)	Viga	Trinca	Frequências naturais e Modos
Maia <i>et al.</i> (2003)	Viga	Redução do módulo de elasticidade	FRF
Yan <i>et al.</i> (2006)	Vaso de pressão	Trincas	FRF
Bayissa e Haritos (2007)	Placa	Redução do módulo de elasticidade	Modos de vibração
Qiao <i>et al.</i> (2007)	Placa laminada	Delaminação	Modos de vibração
Curadelli <i>et al.</i> (2008)	Viga de concreto	Redução da rigidez	Amortecimento estrutural
Michele Frizzarin <i>et al.</i> (2008)	Viga de concreto	Redução do amortecimento e rigidez	Amortecimento estrutural
Hu e Wang (2009)	Placa laminada	Trincas superficiais	Modos de vibração
Fan e Qiao (2012)	Placa	Redução da rigidez	Modos de vibração
Zhang <i>et al.</i> (2013a)	Placa	Redução da rigidez	Modos de vibração
Eun <i>et al.</i> (2014)	Viga	Adição de Massa	FRF
Garcia-Palencia <i>et al.</i> (2015)	Treliça	Dano nos apoios	FRF
Gomes <i>et al.</i> (2016a)	Placa Laminada	Redução da rigidez	Frequência natural
Gomes <i>et al.</i> (2016b)	Placa Laminada	Furos circulares	Frequência natural e acelerações
Yang <i>et al.</i> (2016)	Placa Laminada	Delaminação	Curvatura da flexibilidade modal
Rucevskis <i>et al.</i> (2016)	Placa	Corte	Polinômio ajustado ao modo de vibração
Xu e Zhu (2017)	Placa	Redução da espessura local	Modo de vibração

estrutural, incluindo erros de modelagem, efeitos ambientais e localização de danos. A aplicação de algoritmos robustos de detecção e localização de danos com base no monitoramento da resposta em serviço de uma estrutura permaneceu um desafio, embora a disponibilidade de um modelo abre caminho para um prognóstico mais preciso da estimativa da vida remanescente, reafirmou o autor.

Sob o mesmo ponto de vista, a grande maioria das técnicas de avaliação de estruturas vem utilizando técnicas de modelagem numérica, tal como o método de elementos finitos. Seguindo neste caminho, o monitoramento da saúde estrutural por meio da utilização de técnicas de ajuste de modelos em elementos finitos (*FE Updating*) geralmente trata da minimização de uma ou mais funções objetivos complexas, não lineares, não convexas e com vários mínimos locais usando dados de uma estrutura real (possivelmente danificada) e dados oriundos do modelo de otimização. Dependendo do critério adotado na metodologia proposta, o método inverso tem a habilidade de detectar e identificar danos estruturais. Logo, algoritmos de otimização estocástica com desempenho promissor na resolução de problemas de otimização global têm recebido considerável atenção para fins de atualização de modelos de elementos finitos nos últimos anos.

Diante do exposto, o monitoramento da saúde estrutural por meio da utilização de técnicas de atualização de modelos em elementos finitos fazendo uso de técnicas de otimização eficientes tem recebido considerável atenção para fins de detecção de danos nos últimos anos. Por exemplo, Jafarkhani e Masri (2011) em seus estudos, observaram o desempenho de uma estratégia evolutiva na abordagem da atualização de modelos em detecção de danos. O algoritmo de atualização do modelo de elemento finito aplicado em seus estudos foi capaz de detectar, localizar e quantificar com precisão os danos. Os autores deixaram claro que as estratégias evolutivas aplicados em conjuntos à atualização de modelos em elementos finitos são suficientemente poderosas na detecção de danos em estruturas reais e complexas.

Em uma outra frente, uma metodologia dita simples e robusta foi apresentada por Nanda *et al.* (2012) para determinar a localização e a quantidade de trincas fazendo uso de Enxame de Partículas Incremental. Uma comparação foi feita para avaliar o desempenho da otimização de enxames de partículas padrão e a técnica de otimização de enxames de partículas incremental para detectar trincas em membros estruturais. A função objetivo foi então formulada usando a frequência natural medida da estrutura intacta e a frequência obtida a partir da simulação por elementos finitos. Os resultados das simulações demonstram que o método desenvolvido foi capaz de detectar e estimar a extensão dos danos com precisão satisfatória.

Mohan *et al.* (2013) avaliaram o uso da função de resposta em frequência com auxílio da técnica de otimização por Enxames de Partículas (*Particle Swarm Optimization* - PSO), para detectar e quantificar danos estruturais. A robustez e eficiência do método acima foi estabelecida após comparação de resultados entre os dois métodos, nomeadamente algoritmo genético e PSO, considerando frequências naturais como resposta estrutural estudada. O desempenho

destes métodos foi avaliado em vigas e placas aplicando vários cenários de danos. Observou-se que o uso de FRF como resposta da estrutura danificada tem levado a uma melhor precisão, uma vez que contém dados relacionados à forma do modo.

Tem-se conhecimento de que a energia de deformação modal (MSE) é uma propriedade física sensível que pode ser utilizada como índice de danos no monitoramento estrutural. No trabalho de Cha e Buyukozturk (2015), uma abordagem de detecção de danos usando algoritmos de otimização multiobjetivos híbridos baseados em MSE foi proposta para detectar danos em várias estruturas tridimensionais de aço. Os autores salientaram que danos menores têm pouco efeito sobre a diferença das propriedades modais da estrutura e, portanto, esses danos com múltiplas localizações numa estrutura são difíceis de detectar utilizando métodos tradicionais de detecção de danos com base em propriedades modais. Algoritmo genético multiobjetivo híbrido proposto foi capaz de detectar a localização exata de pequenos danos induzidos na estrutura, mesmo a partir do uso de dados modais incompletos.

Na mesma época, Braun *et al.* (2015) abordaram o uso de problema inverso na identificação de coeficientes de rigidez estrutural. O problema foi resolvido usando diferentes versões do algoritmo de otimização por colônia de formigas (*Ant Colony Optimization - ACO*). A estimativa de danos foi avaliada utilizando dados experimentais ruidosos assumindo uma configuração de dano ao longo da estrutura. Os resultados relatados revelaram que o método híbrido apresentou ser a melhor opção para o caso de detecção de danos estudado e apresenta ser promissor na aplicação em uma estrutura real.

Um método baseado em energia de deformação e um algoritmo de evolução diferencial (*Differential Evolution - DE*) foi proposto por Vo-Duy *et al.* (2016). O algoritmo foi utilizado para localizar e quantificar danos em uma placa laminada. Em primeiro lugar, utilizou-se o método da energia de deformação modal para identificar um conjunto de potenciais elementos danificados. Em seguida, o algoritmo de evolução diferencial foi utilizado para minimizar uma função objetivo baseada no erro dos modos de vibração. Exemplos numéricos tratados pelos autores foram capazes de detectar danos mesmo sob condição de ruído.

Uma revisão geral é apresentada na Tabela 1.2 expondo os parâmetros utilizados por diversos pesquisadores a fim de solucionar o problema de detecção de danos por meio de métodos inversos de otimização.

### 1.4.3 Uso de Redes Neurais Artificiais

Embora os modelos matemáticos existentes para estruturas complexas possam ser suficientemente precisos para efeitos de análise e concepção, estes modelos não são, por si só, capazes de diagnosticar quais membros podem causar as alterações observadas em uma resposta dinâmica estrutural, por exemplo. Uma metodologia robusta de avaliação de danos deve

**Tabela 1.2:** Revisão sistemática sobre os parâmetros utilizados na otimização em detecção de danos.

Autor	Algoritmo	Função Objetivo
Friswell <i>et al.</i> (1998)	GA	$J = \sum_{j=1}^r \left( \frac{\delta\omega_{mj} - \delta\omega_{aj}}{\delta\omega_{mj}} \right)^2 + \sum_{j=1}^r (\phi_{mj} - \phi_{aj})^T (\phi_{mj} - \phi_{aj})$
Yong e Hong (2001)	GA	$J = \sum_{i=1}^{nm} \left\{ \left[ \left( \frac{\lambda_i(\alpha) - \lambda_i^0}{\lambda_i^0} \right)^A - \left( \frac{\lambda_i^D - \lambda_i^U}{\lambda_i^U} \right)^E \right]^2 + [(\phi_{ij}(\alpha) - \phi_{ij}^0) - (\phi_{ij}^D - \phi_{ij}^U)]^2 \right\}$
Jafarkhani e Masri (2011)	CMA	$J(\alpha) = \sum_{i=1}^n \left[ \left( \frac{f_i^e - f_i^a}{f_i^a} \right)^2 + \left( 1 - \frac{ \phi_i^{eT} \phi_i^a ^2}{(\phi_i^{eT} \phi_i^e)(\phi_i^{aT} \phi_i^a)} \right) \right]$
Nanda <i>et al.</i> (2012)	PSO	$J = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \left( \frac{f_i^m}{f_i^c} \right) - 1 \right)^2}$
Mohan <i>et al.</i> (2013)	PSO	$J = \frac{1}{N} \sum_{q=1}^N \left( \sum_{a=1}^R \sum_{p=1}^M \frac{ H_{ak}(\omega_p, \alpha) - H_{ak}^m(\omega_p) }{\max(H_{ak}^m(\omega_p))} \right)$
Suveges (2016)	DE	$J = \sum_{i=1}^n [(\sigma_{ix}^{sim} - \sigma_{ix}^{cal})^2 + (\sigma_{iy}^{sim} - \sigma_{iy}^{cal})^2]$
Cha e Buyukozturk (2015)	GA	$J = \sum_{i=1}^{ms} \sum_{i=1}^{el}  \Phi_i^{dT} K_j \Phi_i^d - \Phi_i^{sT} K_j \Phi_i^s $
Braun <i>et al.</i> (2015)	ACO	$J = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^{N_t} [x_j^{Mod}(K, t_i) - x_j^{Exp}(K, t_i)]^2$
Gomes <i>et al.</i> (2016a)	GA	$J = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \left( 1 - \frac{\omega_i^d}{\omega_i(\bar{X})^c} \right)^2}$
Gomes <i>et al.</i> (2016b)	GA	$J = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \left( 1 - \frac{\omega_i^{real}}{\omega_i(\bar{X})^{model}} \right)^2} + \sum_{i=1}^n (\ddot{x}^{real} - \ddot{x}^{model})^2$
Vo-Duy <i>et al.</i> (2016)	DE	$J = \sum_{i=1}^{nm} \frac{\ \Phi_i^d - \Phi_i^d(x)\ }{\ \Phi_i^d\ }$

ser capaz de reconhecer padrões na resposta observada da estrutura resultante de danos de membros individuais, incluindo a capacidade de determinar a extensão do dano do membro. Essa capacidade está dentro do escopo das capacidades de reconhecimento de padrões de redes neurais artificiais (RNA) (Wu *et al.* (1992)). Justamente, segundo Montalvão *et al.* (2006), o uso de redes neurais nos procedimentos de detecção de danos tem sido motivado pela possibilidade da existência de diferentes tipos de dano em vários locais diferentes em uma mesma estrutura, tornando a detecção de danos um processo altamente complexo.

Citando alguns dos principais trabalhos em destaque na área, Chakraborty (2005) trabalhou na previsão de delaminações em laminados reforçados por fibras usando somente frequências naturais como parâmetros indicativos (*input*) na rede neural. Centenas de modelos em elementos finitos foram executados para gerar uma base de dado com frequências naturais de até 10 modos para várias combinações de tamanho, forma e localização de delaminação incorporada a uma placa e, em seguida, esses dados foram usados no treinamento de uma rede neural *backpropagation* a um nível aceitável de precisão. Foi observado que, a rede pode aprender eficazmente sobre o tamanho, forma e localização da delaminação incorporada presente no laminado e pode prever razoavelmente bem quando testado com conjunto de dados desconhecidos.

Redes Neurais Artificiais (RNA) têm recebido atenção crescente em seu uso na detecção de danos estruturais, baseando-se principalmente em parâmetros modais de vibração. Contudo, algumas incertezas ainda podem existir e produzir falsos positivos/negativos a partir desta rede. Bakhary *et al.* (2007) propuseram uma abordagem estatística para levar em conta o efeito das incertezas no desenvolvimento de um modelo de RNA. Aplicando o método de estimativa de ponto de *Rosenblueth* verificado pela simulação de Monte Carlo, as estatísticas dos parâmetros de rigidez foram estimadas. A probabilidade de existência de dano (*Probability of Damage Existence* - PDE) é então calculada com base na função de densidade de probabilidade da existência de estados danificados e não danificados. A abordagem desenvolvida é aplicada para detectar dano simulado em um modelo de portal. Os resultados numéricos e experimentais demonstraram que, em comparação com a abordagem normal por redes neurais artificiais (RNA), a abordagem estatística de RNA fornece uma identificação mais confiável de danos estruturais.

É sabido que a delaminação é um dano grave que pode ocorrer em compósitos laminados devido à fraca tenacidade à fratura inter-laminar da matriz. Os métodos de detecção baseados em vibração empregam alterações causadas pela perda de rigidez em parâmetros dinâmicos, tais como frequências para detectar e avaliar danos. Um dos desafios de fazer uso de variações em frequências para a detecção de danos é que, embora a presença de danos seja facilmente identificada por meio de uma variação na frequência medida, a determinação da sua localização bem como sua gravidade não são tarefas de fácil realização. Na tentativa de solucionar este inconveniente, Zhang *et al.* (2013b) lançaram mão do uso de problemas inversos na solução de um conjunto de equações não-lineares simultâneas. Os autores examinaram três diferentes al-

goritmos inversos para resolver as equações não-lineares visando prever a interface, localização longitudinal e tamanho da delaminação: modo direto usando um método gráfico, rede neural artificial e otimização. Os três algoritmos inversos foram validados usando dados numéricos gerados a partir do modelo de elementos finitos (*Finite Element Model* - FEM) de vigas delaminadas e dados modais. Os resultados mostraram que os três algoritmos foram capazes de prever os parâmetros de delaminação com certo nível de precisão.

Um algoritmo não paramétrico baseado em vibração, rápido e altamente preciso, para a detecção de danos estruturais com base em redes neurais convolucionais adaptativas unidimensionais foi proposto por Abdeljaber *et al.* (2017). O principal objetivo foi identificar e localizar qualquer dano estrutural em tempo real processando os sinais brutos de vibração adquiridos por uma rede de acelerômetros. A abordagem proposta foi capaz de classificar diretamente o sinal do acelerômetro sem exigir qualquer recurso de extração, pré ou pós-processamento. Consequentemente, isto acarreta a um sistema eficiente em termos de velocidade, permitindo uma aplicação em tempo real. Experiências em larga escala foram conduzidas em uma estrutura real e revelaram um excelente desempenho e verificaram a eficiência computacional do método de detecção de danos em tempo real proposto.

Outros trabalhos em detecção de danos com uso de rede neurais são apresentados na Tabela 1.3, onde diferentes estruturas de redes são aplicadas na tentativa de solucionar o desafio de detecção de danos. Noções técnicas e teóricas sobre esta ferramenta computacional será tratada com maiores detalhes no Capítulo 3.

**Tabela 1.3:** Revisão sistemática sobre os parâmetros utilizados na busca por danos estruturais por meio de redes neurais artificiais.

Autor	Tipo de Rede	Estrutura da Rede	Entrada
Szewczyk e Hajela (1994)	backpropagation	Variável	$\Phi$
Barai e Pandey (1995)	backpropagation	69-21-21-21	$\ddot{x}$
Zang e Imregun (2001)	backpropagation	*-*-2	FRF
Yam <i>et al.</i> (2003)	backpropagation	32-16-4	FRF
Kao e Hung (2003)	NSIN	301-0-5	$f_e$
Chakraborty (2005)	backpropagation	10-9-3	$\omega_n$
Yan <i>et al.</i> (2007)	backpropagation	32-16-15	$\ddot{x}$
Bakhary <i>et al.</i> (2007)	backpropagation	6-97-6	$\omega_n$
Mehrjoo <i>et al.</i> (2008)	backpropagation	32-50-6	$\omega_n$ e $\Phi$
da Silva Lopes (2010)	backpropagation	50-4-4	$\Delta\sigma$
Zhang <i>et al.</i> (2013b)	backpropagation	7-20-20-3	$\omega_n$
Abdeljaber <i>et al.</i> (2017)	backpropagation	41-64-32-2	$\ddot{x}$

#### 1.4.4 Outros Métodos de Identificação de Danos

Os métodos convencionais em detecção de danos estruturais são, provavelmente, o teste modal, no qual as mudanças nos parâmetros modais são usadas como parâmetros de detec-

ção. Métodos não tradicionais referem-se a técnicas mais específicas baseadas em técnicas de processamento de sinais tais como a análise *wavelet*, transformada de Hilbert Huang (*Hilbert Huang Transform* - HHT), análise dos componentes principais (*Principal Component Analysis* - PCA), lógica *fuzzy*, ondas *lamb* e outras.

Ganguli (2001) desenvolveu um sistema de lógica *fuzzy* para monitoramento de pá de rotor de helicóptero. O dano estrutural foi modelado como uma perda de rigidez no local danificado que pode se resultar de delaminação. Um modelo em elementos finitos da pá do rotor foi usado para calcular a alteração nas frequências das pás (tanto rotativas como não rotativas) devido aos danos. Os desvios de medição devidos a danos são então "fuzzificados" e mapeados usando um sistema de lógica *fuzzy*. O sistema elaborado pelo autor foi capaz de classificar corretamente a condição "sem danos" até níveis de ruído de 30%, reduzindo assim a possibilidade de alarmes falsos, o que se trata de um problema-chave neste tema. O sistema de lógica *fuzzy* que foi proposto seria uma ferramenta de processamento de informações visando auxiliar na localização de uma área de dano aproximada.

Quando se diz respeito à sinais de vibração, a transformada de Hilbert-Huang (*Hilbert-Huang Transform* - HHT) vem sendo empregada em vários trabalhos. A transformada compreende uma decomposição empírica em diferentes modos e então da aplicação da transformada em cada modo separadamente. Devido à sua capacidade de analisar dados de séries temporais não-lineares e não-estacionários, o método HHT tem muitas aplicações potenciais, inclusive fornecendo amplitude e frequência instantânea de um sinal, diferentemente de uma transformada FFT (*Fast Fourier Transform*). Quek *et al.* (2003) ilustraram a viabilidade da transformada de Hilbert-Huang (HHT) como uma ferramenta de processamento de sinal para localizar uma anomalia, na forma de uma trinca, delaminação e perda de rigidez em vigas e placas. Os resultados indicam que HHT foi capaz de representar bem um evento localizado e é sensível a ligeiras distorções no sinal. No entanto, a sensibilidade da HHT é tal que a análise com um sinal distorcido necessita de uma interpretação cuidadosa, ressaltam os autores.

Um outro método para estimar a localização de dano em estruturas de vigas e placas foi apresentado por Rucka e Wilde (2006). Os modos de vibração das vigas foram analisados pela transformada *wavelet* contínua unidimensional. Uma formulação da transformada *wavelet* contínua bidimensional para a detecção de danos em placas também foi apresentada pelos autores. A localização do dano é então indicada por um pico na variação espacial da resposta transformada. A análise proposta foi efetivamente capaz de identificar a posição do defeito sem o conhecimento prévio das características da estrutura, o que é uma enorme vantagem do método.

Do mesmo modo, Zhao *et al.* (2007) focaram no desenvolvimento de um sistema de monitoramento por ondas guiadas para a inspeção de asas de aeronaves. Para interpretar os sinais coletados por sensores piezoelétricos, foi desenvolvido um algoritmo baseado em análise de correlação chamado *RAPID* para detecção de defeitos, localização, bem como o monitoramento da evolução dos danos. Os autores obtiveram bons resultados para o mapeamento dos defeitos

simulados no painel de asa e ressaltaram que os defeitos reais numa asa de aeronave podem ser diferentes dos defeitos maquinados, e as respostas de sensores são susceptíveis a serem diferentes, o que leva a crer que deve-se alcançar uma maturidade ainda maior no tema.

Juntamente às novas técnicas, Fan e Qiao (2009) apresentou um algoritmo de detecção de danos baseado em transformada contínua de *wavelet* bidimensional para estruturas de tipo placa. O algoritmo proposto é uma técnica de detecção de danos baseada somente na resposta da estrutura danificada, sendo necessário somente seu modo de vibração. O algoritmo foi aplicado em placas com diferentes tipos de dano, ilustrando sua eficácia e viabilidade, podendo ser usado como uma técnica viável e eficaz para a identificação de danos em estruturas do tipo casca.

Uma nova técnica de detecção de danos por *neuro-wavelet* foi apresentada por Rucka e Wilde (2010). O método proposto combinou a capacidade da transformada *wavelet* contínua para detectar anormalidades nos parâmetros dinâmicos da estrutura com a possibilidade de aprendizagem e reconhecimento da rede neural artificial. A eficácia do método é verificada em estruturas de viga e placa. Os resultados do estudo mostram que a rede neural treinada nos dados de uma estrutura simples pode efetivamente melhorar a busca da localização do mesmo tipo de dano em estruturas complexas.

Xiang e Liang (2012) relatou uma abordagem em duas etapas para a detecção de múltiplos danos em placas finas. O primeiro passo centra-se na detecção de localização de danos. Isto é feito aplicando o a transformada *wavelet* à forma modal para revelar singularidades, ou seja, a possível localização do dano. A gravidade do dano nos locais identificados é então avaliada na segunda etapa usando um algoritmo de otimização de enxame de partículas (PSO). Os autores concluíram que o método proposto foi eficaz na detecção de múltiplos danos e executado razoavelmente bem mesmo quando as frequências naturais não são medidas com elevada precisão. As análises feitas também sugeriram que o uso de frequências naturais de ordem mais alta pode levar a melhores resultados para a avaliação da gravidade do dano.

A respeito de técnicas inteligentes, Hakim e Abdul Razak (2013) fizeram uso de redes adaptativas (*Adaptive neuro fuzzy inference system* - ANFIS) e técnicas de redes neurais artificiais (RNAs) para identificar danos em uma ponte de aço usando parâmetros dinâmicos. Os dados necessários para a inteligência artificial foram somente as frequências naturais. Em seu estudo comparativo, os resultados mostraram que tanto ANFIS e RNAs apresentaram boas previsões. No entanto, a arquitetura proposta ANFIS utilizando algoritmo de aprendizagem híbrido foi dito de melhor execução do que o *feedforward* da rede multicamada que aprende usando o algoritmo *backpropagation*.

No mesmo caráter inovativo, Zhu e Wu (2014) elaboraram um método rápido de detecção de danos estruturais com base em dados de vibração estrutural, que são usados para avaliar rapidamente a falha estrutural para um monitoramento de curto prazo. No trabalho, os autores empregaram um sistema de inferências *neurofuzzy* adaptativo para identificação não paramé-

trica. Percebeu-se que ANFIS foi capaz de fornecer um alto grau de precisão para a previsão da resposta estrutural.

Uma vez que a presença de uma trinca ou de uma delaminação provoca uma descontinuidade nas primeiras derivadas das formas modais, foi apresentado por Surace *et al.* (2014) um método numérico para a detecção de descontinuidades por uma técnica chamada de aniquilação polinomial. O método, já proposto para estruturas de tipo viga, foi estendido para permitir a detecção e localização de danos em estruturas do tipo placa. Resultados encorajadores indicaram que o desenvolvimento da técnica para testes não destrutivos de estruturas semelhantes a placas é altamente valioso.

Em uma outra frente, técnicas de ensaio não destrutivo aplicadas para materiais de elevada responsabilidade, bem como os materiais compósitos, devem ser avaliadas em várias categorias: eficácia na detecção, localização e identificação de danos em fases iniciais, complexidade de aplicação e custo de inspeção. No estudo de Katunin *et al.* (2015) os autores testaram experimentalmente três estruturas compostas, sendo uma delas extraída do estabilizador vertical de uma aeronave militar, possuindo danos por impacto e delaminação pouco visível. Os ensaios foram realizados utilizando várias técnicas, incluindo detecção por sensores piezoelétricos (ondas guiadas), ultra-som, termografia e inspeção por vibrações, a fim de analisar a aplicabilidade destes métodos nas condições ambientais de inspeção dos elementos da aeronave. A análise realizada permitiu concluir sobre a eficácia dos métodos aplicados e suas aplicações específicas em ensaios não destrutivos de elementos compostos.

Para obter uma compreensão mais profunda da iniciação, crescimento e evolução dos diferentes tipos de danos, WenQin *et al.* (2016) usam a técnica de emissão acústica (*Acoustic Emission* - AE) juntamente com técnicas de pós-processamento, como a Decomposição Empírica de Modos (*Empirical Mode Decomposition* - EMD), Função Intrínseca do Modo (*Intrinsic Mode Functions* - IMF) e transformada HHT. Resultados estatísticos mostram que a frequência de pico do sinal AE pode distinguir vários modos de falha de forma eficaz. A transformada HHT dos sinais de AE foi capaz de ilustrar claramente a distribuição de frequência dos componentes da IMF em escalas de tempo em diferentes estágios de dano e ainda foi capaz de calcular a frequência instantânea precisa para reconhecimento de modos de falha para ajudar a entender o processo de dano.

Sabe-se que materiais compósitos são muito úteis no quesito estrutural, particularmente em aplicações sensíveis ao peso. Modelos de teste de uma mesma estrutura feita a partir de materiais compósitos podem apresentar um comportamento dinâmico muito diferente devido a grandes incertezas associadas às propriedades do material compósito. Além disso, estruturas compostas podem sofrer de imperfeições pré-existentes como delaminações, vazios ou trincas durante a fabricação. Chandrashekhar e Ganguli (2016) propuseram uma modelagem de incertezas em estruturas compostas por meio de um sistema robusto de lógica *fuzzy* e usado para detecção de delaminação. A lógica foi projetada usando variações nas frequências naturais de-

vido à aleatoriedade nas propriedades do material. A análise probabilística foi então realizada usando a simulação de Monte Carlo em um modelo de elementos finitos. Os autores concluíram que o sistema apresentou excelente robustez na detecção de delaminação em níveis muito altos de aleatoriedade nos dados de entrada.

A Tabela 1.4 traz um breve revisão da literatura sobre os principais métodos não-convencionais empregados na problemática de detecção e identificação de danos em estruturas.

### 1.4.5 Localização ótima de sensores

O problema básico da detecção de danos se dá a partir de respostas obtidas por meio de sensores distribuídos em estruturas. A qualidade dessas respostas e, portanto, a qualidade da detecção de danos dependem fortemente da localização e do número de sensores utilizados na estrutura em questão. Questões pertinentes a custo e praticidade impedem a instrumentação em todas as posições de interesse e impõem que haja uma alternativa menor de posições do sensor. Para isto, deve-se encontrar um posicionamento ideal para estes sensores, o que se trata de um problema de otimização complexo.

Efetivamente, Guo *et al.* (2004) apresentaram um índice de desempenho de otimização do posicionamento de sensores com base na detecção de danos com emprego de GAs para determinar a localização de sensores nas estruturas. Para isso, os autores fixaram o número de sensores. No entanto, os GAs podem resultar em soluções inviáveis para o problema, então, algumas estratégias melhoradas foram apresentadas pelos autores, como *crossover* baseado em código de identificação, mutação baseada em dois *bits* de genes e convergência melhorada. Para atacar o problema em si, os autores optaram pela maximização da matriz de informação de Fisher (*Fisher Information Matrix* - FIM), pois essa matriz é uma soma da contribuição de cada grau de liberdade ou localização do sensor para as formas modais da estrutura. A maximização da matriz de informação de Fisher conduzirá à melhor estimativa dos coeficientes de dano por consequência. Resultados mostraram que o algoritmo melhorado proposto foi eficaz na determinação de posições ótimas de sensores baseando em critérios de informação modal.

Uma parte extremamente importante no que se diz respeito à ensaios experimentais em dinâmica é a colocação de sensores nas estruturas, geralmente sob a forma de acelerômetros. Os acelerômetros devem ser colocados de maneira que todas as informações dinâmicas importantes sejam obtidas durante o ensaio. Kammer e Tinker (2004) estudaram o posicionamento ótimo de acelerômetros triaxiais, apresentando uma nova técnica, baseada na independência efetiva (*Effective Independence* - EfI). A técnica é aplicada e comparada com abordagens padrão usando o veículo espacial X-33.

Outro aspecto que chama a atenção, é sobre o desenvolvimento de um sistema de monitoramento para estruturas de engenharia de grande escala, pois estas, requerem que um grande

**Tabela 1.4:** Revisão sistemática sobre os parâmetros utilizados na busca por danos estruturais por meio de técnicas não convencionais.

Autor	Tipo de Estrutura	Defeito Estudado	Técnica empregada
Worden e Manson (1999)	Rolamentos	PCA e <i>Sammon Mapping</i>	
Sawyer e Rao (2000)	Treliça 2D e 3D	Trincas	Lógica <i>fuzzy</i>
Ganguli (2001)	Pá de rotor de helicóptero	Redução de rigidez	Lógica <i>fuzzy</i>
Quek <i>et al.</i> (2003)	Vigas e placas	Trincas, delaminação e redução de rigidez	Transformada HHT
Rucka e Wilde (2006)	Viga e placa	Redução local de espessura	Transformada <i>wavelet</i> 2D
Zhao <i>et al.</i> (2007)	Asa de aeronave	Furos simulando corrosão	Ondas guiadas
Rucka e Wilde (2010)	Vigas e placas	Trincas e redução de espessura local	ANN + <i>wavelet</i>
Katunin (2011)	Placas	Trincas e redução de espessura	Transformada <i>wavelet</i> B-spline
Xiang e Liang (2012)	Placas	Trincas e redução de rigidez	Transformada <i>wavelet</i>
Hakim e Abdul Razak (2013)	Ponte	Corte	ANFIS + ANN
Kunwar <i>et al.</i> (2013)	Ponto	Remoção de parafusos	HHT
Devivier <i>et al.</i> (2013)	Placas	Impacto	Deflectometria
Pieczonka <i>et al.</i> (2013)	Placas	Impacto	Vibrotermografia
Zhu e Wu (2014)	Estrutura 3D	Redução de rigidez	ANFIS
Surace <i>et al.</i> (2014)	Vigas e placas	Trincas e delaminações	Aniquilação polinomial
Katunin (2014)	Placa	Trincas e redução de espessura local	Transformada <i>wavelet</i>
Moreno-García <i>et al.</i> (2014)	Placas	Redução de espessura local	CMV modificado
Sharif-Khodaei <i>et al.</i> (2015)	Placas	Impacto	Impedância eletromecânica
Katunin <i>et al.</i> (2015)	Estruturas aeronáuticas	Impacto de delaminação	Ondas guiadas
Rao <i>et al.</i> (2015)	Vigas e placas compostas	Trincas na matriz e delaminação	PCA
WenQin <i>et al.</i> (2016)	Corpos de prova em viga	Pequenos furos	AE, EMD e HHT
Munoz <i>et al.</i> (2016)	Viga	Trincas	Emissão acústica
Chandrashekhhar e Ganguli (2016)	Placa	Delaminação	Lógica <i>fuzzy</i>
Ashory <i>et al.</i> (2016)	Placa	Redução de espessura local	Transformada <i>wavelet</i>
Navabian <i>et al.</i> (2016)	Placa	Redução de espessura local	CMV e Transformada <i>wavelet</i>
Hoell e Omenzetter (2016)	Pá de turbina eólica	Redução da rigidez local	PCA
Yang e Oyadiji (2017b)	Placa	Delaminação	Transformada <i>wavelet</i>
Yang e Oyadiji (2017a)	Viga	Delaminação	Transformada <i>wavelet</i>

número de sensores e seu posicionamento sejam de suma relevância para tais estruturas. Nesta ideia, Rao e Anandakumar (2007) sugeriram um algoritmo de posicionamento ótimo de sensores usando PSO. O algoritmo proposto visou precisamente alcançar a melhor identificação de frequências e formas modais. Experimentos numéricos foram realizados considerando estruturas de engenharia civil para avaliar o desempenho do algoritmo baseado em inteligência de enxame proposto. Estudos numéricos indicaram que o algoritmo de PSO híbrido proposto gera configurações de sensor superiores às abordagens iterativas convencionais baseadas em informações que têm sido popularmente usadas para grandes estruturas. Além disso, o algoritmo de PSO híbrido proposto exibiu características de convergência superior quando comparado com outras contrapartes de PSO.

Sobre a mesma temática, Yi *et al.* (2011) propuseram um outro método híbrido baseado em múltiplos métodos de otimização. A colocação inicial do sensor é primeiramente obtida por fatoração QR. Em seguida, usando a minimização dos elementos fora da diagonal na matriz de critério modal (MAC) como uma medida da utilidade de uma configuração de sensor. Finalmente, as localizações do sensor são determinadas pelo algoritmo genético generalizado. Os resultados indicaram que o método proposto foi eficaz na obtenção de posições ótimas de sensores. Os autores ainda concluíram que para os critérios de otimização que consideram apenas a forma modal (como, critério MAC), a forma de modos locais pode ter certa influência na colocação do sensor das estruturas com maior níveis de rigidez.

Nos anos atuais, Gu *et al.* (2016) propuseram um algoritmo para o *layout* de sensores para solucionar o problema de que um posicionamento arbitrário de sensores afeta a eficácia da obtenção de dados, além de reduzir a precisão do sistema de monitoramento, em um pá de turbina eólica, em seus estudos. Este algoritmo integrou as vantagens do método de energia cinética, método de independência efetiva e o critério de garantia modal (*Modal Assurance Criterion* - MAC). A fim de evitar a redundância de informação causada pela concentração parcial sensores, a distância euclidiana foi introduzida como a condição de iteração do algoritmo. A simulação de elementos finitos e os resultados experimentais mostram que a disposição obtida pelo método proposto foi benéfica para melhorar a relação sinal/ruído.

Zhou *et al.* (2017) apresentaram uma estrutura genérica de posicionamento de sensores, em que quatro metodologias foram desenvolvidas e implementadas por meio da integração com uma ferramenta de otimização baseada em algoritmos genéticos. Para validar a eficácia do *layout* desenvolvido, os autores realizam um estudo de caso abrangente de posicionamento de sensores para o Edifício *Factor* da Universidade da Califórnia, Los Angeles. Os resultados obtidos mostram boa melhora no posicionamento otimizado de sensores quando comparados com aqueles instrumentados inicialmente.

A Tabela 1.5 exibe uma breve síntese de alguns dos principais trabalhos realizados sobre a metodologia de posicionamento ótimo de sensores. Detalhes específicos sobre as nomenclaturas exibidas na Tabela serão dados no Capítulo 4.

**Tabela 1.5:** Revisão acerca dos parâmetros utilizados em estudos de otimização de posicionamento de sensores.

Autor	Tipo de Estrutura	Algoritmo	Número de Sensores	Métrica utilizada
Penny <i>et al.</i> (1994)	Placa	-	6 e 12	Efi, MAC, SVD
Heredia-Zavoni e Esteva (1998)	Modelo de prédio	-	1 a 6	FIM
Shi <i>et al.</i> (2000)	Treliça	-	20	MDLAC e FIM
Worden e Burrows (2001)	Placa	GA e SA	10 e 4	MAC, Efi e FIM
Guo <i>et al.</i> (2004)	Treliça	GA	5, 10 e 15	FIM
Kammer e Tinker (2004)	Veículo espacial X-33	-	389	Efi e FIM
Papadimitriou (2004)	Treliça 3D	GA	2 a 50	Entropia
Cooté <i>et al.</i> (2005)	Fuselagem de helicóptero	-	20	Efi
Meo e Zumpano (2005)	Ponte	-	10	Efi e FIM
Rao e Anandakumar (2007)	Placa (ponte)	PSO	10, 13, 16, 22 e 40	FIM
Liu <i>et al.</i> (2008)	Treliça 2D	GA	5,10 e 15	MAC
Yi <i>et al.</i> (2011)	<i>Guangzhou New TV Tower</i>	GA	28	MAC
Prabhu e Atamturktur (2012)	<i>Catedral St. John</i>	-	80	Efi Modificado
Borissova <i>et al.</i> (2012)	Viga	Combinatório	6 a 10	Função erro
Li (2012)	Treliça	Combinatório	30, 18, 12 e 10	KE, DPR e Efi
Rao <i>et al.</i> (2014)	Viga e Modelo de Ponte	-	10	PCA e Efi
Beygzadeh <i>et al.</i> (2014)	Treliça	GA	6	Desvio padrão de ruído
Fendzi <i>et al.</i> (2014)	Placas	GA	4 e 5	PoD
Jung <i>et al.</i> (2015)	Casca cilíndrica	GA	10	MAC
Yi <i>et al.</i> (2015)	Treliça 3D	WA	20	MAC
Zhu <i>et al.</i> (2015)	Modelo de moinho mecânico	-	12	Efi
Eskeew e Jang (2017)	Ponte	GA	22	Efi e KE
Gu <i>et al.</i> (2016)	Pá de turbina eólica	-	7	MAC
Zhou <i>et al.</i> (2017)	Modelo de prédio	GA	40 e 60	Efi, entropia e MSE
Vincenzi e Simonini (2017)	Modelo de ponte	Fatoração	12	Entropia

Por fim, objetivou-se nesta revisão bibliográfica relevar sobre alguns trabalhos presentes na literatura relacionados com a temática desta tese, a fim de se fundamentar a relevância deste trabalho que tem como objetivo o estudo de identificação de danos em materiais compósitos a partir de parâmetros modais a partir de sinais de sensores distribuídos de maneira ótima. É evidente que a necessidade pela busca e concepção de um monitoramento estrutural eficiente é um desafio científico a se contornar. As métricas de vibração como critério de dano são fortemente empregadas como parâmetros a serem diagnosticados. Técnicas computacionais evolutivas e inteligência computacional são poderosas ferramentas empregadas no auxílio do diagnóstico de repostas estruturais. Ademais, obter respostas em um número reduzido de sensores, sem que haja perda significativa de quantidade e qualidade de informação estrutural é um dilema a ser solucionado que demanda uma quantidade de trabalho significativa. Em adição, observa-se que as pesquisas correlatas sobre o tema são recentes e de elevado interesse industrial e científico em todo o globo. Logo, neste trabalho, técnicas de inteligência computacional serão empregadas, dando continuidade às contribuições já existentes por diversos pesquisadores da área.

# Capítulo 2

## Monitoramento da Integridade Estrutural

### 2.1 Noções Gerais

O Monitoramento da Saúde ou da Integridade Estrutural (*Structural Health Monitoring - SHM*) é um campo interdisciplinar na engenharia que trata de métodos inovadores de monitoramento estrutural, integridade e desempenho sem afetar a própria estrutura ou prejudicar sua operação. A metodologia SHM utiliza vários tipos de sensores a fim de detectar a presença, localização e severidade de danos estruturais. Tal tecnologia integra técnicas de avaliação não destrutiva (NDE) utilizando sensoriamento e materiais inteligentes para criar mecanismos de auto-monitoramento caracterizados por uma maior confiabilidade e longa vida útil estrutural. Aplica-se o método principalmente a sistemas com exigências críticas relativas ao desempenho estrutural, onde a avaliação clássica de inspeção localizada está relacionada com custos elevados, difícil ou até mesmo de impossível em termos de operação (Stepinski *et al.* (2013)).

Os métodos de SMM que são capazes de encontrar alterações nas características estruturais devido a danos ou degradação podem ser definidos como métodos de detecção de danos (Bandara *et al.* (2014)). De acordo com Zaher (2003), um dano pode ser considerado como um enfraquecimento indesejável de uma estrutura que tem um efeito negativo sobre seu desempenho e afeta a segurança do sistema estrutural. O dano também pode ser definido como qualquer alteração nas características geométricas ou nas propriedades dos materiais da estrutura em questão, que podem causar tensões, deslocamentos ou vibrações indesejáveis. Os efeitos de danos em uma estrutura podem ser classificados como lineares ou não-lineares. Uma situação de dano linear é definida como uma em que a estrutura inicialmente linear-elástica assim permanece após o dano. Bakhary *et al.* (2007) *apud* Bandara *et al.* (2014) definiram que o dano não-linear é o caso em que a estrutura inicialmente linear-elástica se comporta de maneira não-linear após o dano.

Com base na extensa literatura que se desenvolveu sobre o monitoramento estrutural nos últimos 20 anos, pode-se argumentar que este campo amadureceu ao ponto de surgirem vários axiomas fundamentais, ou princípios gerais (Worden *et al.* (2007)). Em primeiro lugar, a declaração de tais axiomas, segundo os autores, objetiva dar a pesquisadores um ponto de partida que alivia a necessidade de rever uma vasta quantidade de literatura neste campo. Justamente, ao longo dos vários anos de pesquisa na área, onde extensivos estudos foram realizados, alguns princípios fundamentais (axiomas) foram propostos por Worden *et al.* (2007), sendo estes:

- **Axioma I:** Todos os materiais são susceptíveis a falhas.
- **Axioma II:** A avaliação de danos requer a comparação entre dois estados.
- **Axioma III:** A identificação do dano pode ser feita por métodos de aprendizagem não supervisionada, porém, identificar o tipo do dano e sua severidade requer aprendizagem supervisionada.
- **Axioma IV:** Sensores não conseguem medir danos. Aquisição e processamento de sinais sim.
- **Axioma V:** Sem "processamento inteligente", quanto mais sensível a medição é em relação ao dano, mais sensível também será submetido às condições ambientais.
- **Axioma VI:** O tamanho e a escala de tempo associadas ao início e a evolução do dano são as prerrogativas necessárias para o sistema SHM.
- **Axioma VII:** Existe uma relação entre a sensibilidade de um algoritmo ao dano e o ruído.
- **Axioma VIII:** O tamanho (ou dimensão) de um dano pode ser determinada por mudanças na dinâmica do sistema e é inversamente proporcional à faixa de frequência de excitação.

O primeiro axioma revela a real necessidade de inspeção estrutural, dado que todos materiais estão sujeito a falhas. A segunda consideração deixa clara que no desenvolvimento de um sistema SHM, é necessário que se conheça um estado sem defeito (ou intacto), servindo como referência. Neste estudo, o uso de um modelo em elementos finitos será empregado como modelo de base. Os axiomas III, IV, V e VI abordam sobre o processamento de dados do uso de algoritmos inteligentes na tentativa de se obter a avaliação estrutural. Aqui, o uso de técnicas computacionais serão empregadas a fim de solucionar toda esta problemática. Em suma, o procedimento desenvolvido neste trabalho se enquadra em todos os axiomas abordados, que são prerrogativas fundamentais na metodologia SHM estudada.

Há muitas conotações diferentes do termo dano em estruturas mecânicas que em SHM pode ser entendido intuitivamente como uma imperfeição, defeito ou falha que prejudica as condições funcionais e de trabalho das estruturas de engenharia. Uma definição mais precisa

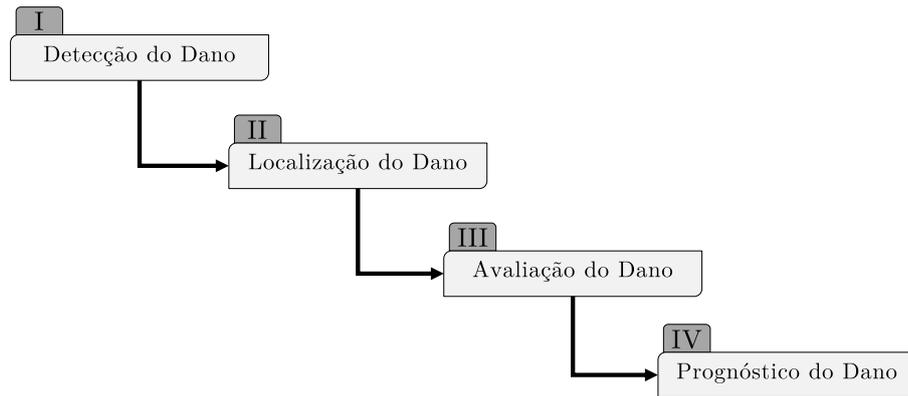
de dano pode ser feita quando a análise do sistema é utilizada. Estruturas podem ser modeladas como sistemas com excitações de entrada e sinais de saída mensuráveis.

Neste contexto, o dano pode ser considerado como uma excitação exógena que resulta em fluxo de energia e transformação, levando a modificações dos sinais de saída. Portanto, a detecção de danos é um problema inverso. Saídas mensuráveis são usadas para detectar danos. Os danos também podem ser considerados como uma modificação nas propriedades do material e/ou parâmetros físicos estruturais. Estas propriedades e parâmetros podem ser modificados devido à plasticidade do material, fadiga e corrosão, por exemplo. Neste contexto, a detecção de danos é um problema de identificação. As propriedades dos materiais e os parâmetros físicos precisam ser extraídos para avaliar tais danos, então, a detecção de danos pode ser considerada como um problema de reconhecimento de padrões. O reconhecimento de padrões requer procedimentos de seleção de recursos para treinamento e geralmente é baseado em abordagens estatísticas ou neurais (Stepinski *et al.* (2013)).

A detecção de danos constitui o principal objetivo do problema global de identificação de danos. Os passos a serem tomados em um sistema SHM podem ser classificadas como um processo que consiste em quatro principais atividades ou níveis (Rytter (1993)), como mostrado na Figura 2.1. Estes são: I) detecção de danos, II) localização do dano, III) a avaliação do tamanho do dano e IV) a previsão de vida remanescente. Nestas circunstâncias, a detecção fornece uma indicação qualitativa de que o dano pode estar presente, a localização fornece informações sobre a provável posição do dano, a avaliação estima a sua severidade fornecendo informações sobre o tipo e tamanho do dano e, finalmente, o prognóstico estima a vida estrutural residual e prevê uma possível falha estrutural.

Segundo Stepinski *et al.* (2013), os primeiros três níveis (isto é, detecção, localização e avaliação) estão principalmente relacionados com a identificação do sistema, modelagem e aspectos do processamento do sinal. O nível de prognóstico cabe no campo da análise de fadiga, mecânica de fratura, mecânica do dano, avaliação de projeto, confiabilidade e análise estatística. Este trabalho terá como foco principal, o segundo passo (II - localização do dano) proposto por Rytter (1993).

Geralmente, a identificação do tipo do dano e sua extensão requer conhecimento prévio do comportamento estrutural na presença de cada um dos possíveis modos de falha esperados para uma correlação futura com dados experimentais, o que é normalmente adquirido recorrendo-se a modelos analíticos. Por exemplo, no monitoramento operacional, os parâmetros modais da estrutura danificada devem ser comparados com os parâmetros da estrutura em seu estado não danificado, no que é chamado de diagnóstico global. Uma vez detectada a existência de dano, o uso de um modelo da estrutura em estado danificado pode ser usado para determinar o local do dano, no que é chamado de diagnóstico local (Montalvão *et al.* (2006)). O prognóstico, tradicionalmente relacionado à mecânica da fratura e à fadiga, está começando a ser levantado pela comunidade de análise modal como um campo de interesse, como visto em Farrar *et al.*



**Figura 2.1:** Os quatro níveis de condição estrutural segundo Rytter (1993).

(2003).

## 2.2 Monitoramento por Meio de Vibrações Mecânicas

Muitas técnicas SHM desenvolvidas ao longo dos anos baseiam-se na detecção de mudanças no comportamento dinâmico dos componentes monitorados. Avaliações valiosas do estado-da-arte na dinâmica baseada em SHM pode ser encontrada em Doebling *et al.* (1996), Sohn *et al.* (2003) e Staszewski *et al.* (2004) *apud* Gopalakrishnan *et al.* (2011b). As técnicas de inspeção baseadas em dinâmica estrutural são tipicamente classificadas como métodos baseados em vibração e métodos de propagação de ondas. As técnicas de detecção de danos baseadas em vibrações geralmente monitoram mudanças nas frequências naturais, modos de vibração e seus derivados.

A principal ideia por de trás das técnicas de detecção de danos baseadas em mudanças dinâmicas estruturais é o fato de que os parâmetros modais (frequências naturais, modos de vibração e amortecimento modal) são funções de parâmetros físicos (massa, rigidez e amortecimento), sendo assim, é razoável assumir que a existência de um dano leva a mudanças nas propriedades modais na estrutura (Montalvão *et al.* (2006)). Ainda, os parâmetros modais são mais úteis e fáceis para um ajuste de modelos se comparados aos índices de danos que podem ser calculados somente oriundos de uma série temporal, fato que toma mais tempo que uma análise modal.

A análise modal é um dos poucos métodos não destrutivos que são tecnicamente suficientemente maduros para serem utilizados como um sistema integrado de detecção de danos (Boller (2000)). As técnicas locais de identificação de danos, como os métodos ultra-sônicos e os métodos de raios-X, exigem que a vizinhança do dano seja conhecida *a priori* e prontamente acessível para testes, o que não pode ser garantido na maioria dos casos em engenharia. Assim, o método de identificação de danos baseado em vibração como técnica global de identifica-

ção de danos abordada nesta tese, é desenvolvida para superar estas dificuldades (Fan e Qiao (2011)).

De acordo com Gopalakrishnan *et al.* (2011b), estudos de técnicas baseadas em vibração podem avaliar a influência das reduções de rigidez nas frequências naturais causadas por danos. Estas investigações demonstraram que as frequências naturais são melhores indicadores de danos, que geralmente mostram baixa sensibilidade e não permitem a determinação da localização dos danos. Ainda segundo os mesmos autores, estudos mais recentes têm investigado os efeitos de danos localizados nos modos de vibração, formas de deflexão operacional (*Operating Deflection Shape* - ODS) e curvaturas correspondentes. Estes métodos baseados em propriedade modais vêm sendo muito atraentes, pois fornecem informações sobre o estado geral da saúde estrutural bem como a possibilidade de identificar danos em regiões aproximadas.

### 2.2.1 Frequências naturais

Uma das características básicas que se pode usar para a detecção de danos, são as frequências naturais. Estas possuem a vantagem de poderem ser adquiridas sem recurso de um teste modal completo. Uma análise espectral básica de um único teste de excitação aleatório com um sensor de resposta pode ser suficiente. Uma vantagem adicional das frequências naturais é que elas podem ser estimadas com bastante precisão, tipicamente até 1% (Worden e Friswell (2009)). Uma alteração na frequência natural pode ser tomada como uma indicação de danos no sistema. Ao considerar as mudanças em muitas frequências naturais, pode-se potencialmente deduzir outras características do dano, como por exemplo, uma possível localização de determinado dano estrutural.

Segundo Sinou (2009), a alteração das frequências naturais pode ser considerada como um dos métodos de detecção de danos preponderantes nos procedimentos de avaliação estrutural. Quando existe um dano numa estrutura, a rigidez é reduzida e conseqüentemente a diminuição das frequências naturais do sistema pode ser observada. Uma das maiores vantagens desta técnica de detecção é que as medições de frequência podem ser conduzidas de forma rápida e fácil. Além disso, as técnicas experimentais utilizadas para a determinação de frequências naturais são técnicas clássicas de medição de vibrações, permitindo assim que as medições vibratórias não sejam extensivas com um grande número de pontos de medição e um procedimento experimental relativamente barato.

Outra vantagem é que as medições de frequência podem ser extraídas com uma precisão relativa confiável e as incertezas nas frequências medidas podem ser facilmente estimadas se as medições experimentais forem feitas com um controle adequado das condições experimentais. Além disso, o conhecimento do comportamento dinâmico global de sistemas não danificados é muito fácil de obter usando desenvolvimentos analíticos ou modelos de elementos finitos, permitindo assim que os pontos de medição sejam adequadamente escolhidos não só para uma

detecção rápida e eficiente das alterações nas frequências, mas também para a identificação da localização dos danos e da severidade (Sinou (2009)).

De acordo com Doebling *et al.* (1996), o primeiro artigo que propôs a detecção de danos usando a medição de vibração foi escrito por Lifshitz e Rotem (1969) *apud* Sinou (2009). Os autores fizeram uso das variações nas frequências naturais por meio de mudanças nos módulos dinâmicos para detectar danos. Adiante, Hearn e Testa (1991) demonstraram que a mudança na  $i$ -ésima frequência natural pode ser aproximada pela Equação 2.1.

$$\Delta\omega_i^2 = \frac{(\epsilon_N(\Phi_i))^T \Delta k_n (\epsilon_N(\Phi_i))}{\Phi_i^T M \Phi_i} \quad (2.1)$$

sendo  $M$  a matriz de massa.  $\Phi_i$  define o  $i$ -ésimo modo de vibração e  $\epsilon_N(\Phi_i)$  o vetor de deformação que é computado do modo de vibração.  $\Delta k_n$  é a variação da matriz de rigidez devido à presença do dano. A equação anterior assume que o dano não modifica a matriz de massa.

A gama de frequências utilizadas no problema de detecção de danos tem uma grande influência na obtenção dos resultados. A grande vantagem de se utilizar medição de vibração em baixas frequências é que os modos são geralmente globais e os sensores de vibração podem ser facilmente montados em campo (Friswell (2007)).

O método que usa medições nas variações de frequências naturais estruturais de baixa frequência são feitas em um único ponto na estrutura em conjunto com uma análise dinâmica do sistema para detectar o dano. A vantagem do método é que a frequência natural e a razão de amortecimento podem ser obtidas usando medição num único ponto na estrutura e são independentes da posição de medição escolhida. No entanto, requer uma análise dinâmica suficientemente precisa da estrutura para obter as formas modais para estimar a localização e severidade do dano (Guan *et al.* (2017)).

Vários pesquisadores tentaram detectar danos em estruturas usando variações nas frequências naturais como exposto no Capítulo 1. Logo, percebe-se a vasta aplicabilidade do uso deste parâmetro como critério de dano em estruturas mecânicas.

## 2.2.2 Modos de vibração

Modos de vibração são características de resposta estrutural que se opoem às frequências naturais, pois estes sofrem alterações locais na presença de danos localizados, assim, eles podem ser mais eficazes na localização de danos. O preço que se paga pela flexibilidade extra proporcionada pelas modos de vibração é a tarefa de realizar um teste modal completo com sensores de múltiplas respostas e instrumentação complexa e sofisticada. Outro problema com os modos é que não é possível efetuar uma medição com a mesma precisão que as frequências

naturais. Erros de teste na faixa de 5-10% são típicos (Worden e Friswell (2009)). O uso dos modos de vibração vem sendo considerado superior ao uso de frequências naturais devido a sua sensibilidade maior a danos estruturais e pode prover informações detalhadas a respeito da extensão e localização do dano estrutural.

Em comparação com o uso de frequências naturais, a vantagem de usar formas modais e suas derivadas como uma característica básica para a detecção de danos é bastante óbvia. Primeiro, os modos de vibração contêm informações locais, o que torna mais sensíveis a danos locais e permite que sejam usados diretamente na detecção de múltiplos danos. Em segundo lugar, as formas de modo são menos sensíveis aos efeitos ambientais, como a temperatura, do que as frequências naturais (Fan e Qiao (2011)).

De acordo com Sinou (2009), a abordagem das formas modais também tem recebido considerável atenção em conjunção com mudanças nas frequências naturais devido ao fato de uma forma modal ser uma característica única da descrição espacial de uma estrutura mecânica para cada frequência de ressonância. Assim, um dano local pode causar alterações nos modos de vibração e a evolução da descrição espacial da amplitude de cada ressonância pode ser usada como um indicador de dano.

Levando-se em consideração esses aspectos, as alterações das formas modais são consideradas bastante sensíveis aos danos, modos mais elevados são capazes de fornecer diretamente a localização de danos. O problema associado ao monitoramento dos modos está relacionado com a necessidade de resolução de medição espacial, o que complica os procedimentos experimentais. A resolução de medição necessária pode ser obtida por meio do uso de um vibrômetro laser de varredura, que tem se tornado uma ferramenta importante para testes dinâmicos.

## 2.3 Monitoramento Estrutural em Materiais Compósitos

Uma definição bem peculiar sobre o monitoramento da integridade estrutural é dada por Sundararaman *et al.* (2003), ressaltando que materiais compósitos possuem um "calcanhar de Aquiles", isto é, enquanto danos em uma blindagem de aço são na maioria das vezes facilmente perceptíveis, materiais compósitos possuem na maioria dos casos uma aparência superficial como se estivessem em perfeitas condições enquanto em seu interior, há sérios danos. Em adição, estruturas em material compósito apresentam um comportamento dinâmico muito complexo relativo à variedade de mecanismos de danos, que são muito difíceis de classificar e prever (Niemann *et al.* (2010)). A detecção de danos estruturais baseada em vibrações tem-se expandido rapidamente em estruturas de material compósito por ter se mostrado ser de fácil aproximação e bom desempenho.

Já se conhece o excelente comportamento mecânico de estruturas em material compósito, porém a presença de um dano pode acarretar a deteriorações catastróficas nestas estruturas. Danos causados por impacto, por exemplo, são difíceis de detectar visualmente, e necessitam de ensaios não destrutivos destas estruturas (Friswell (2007)).

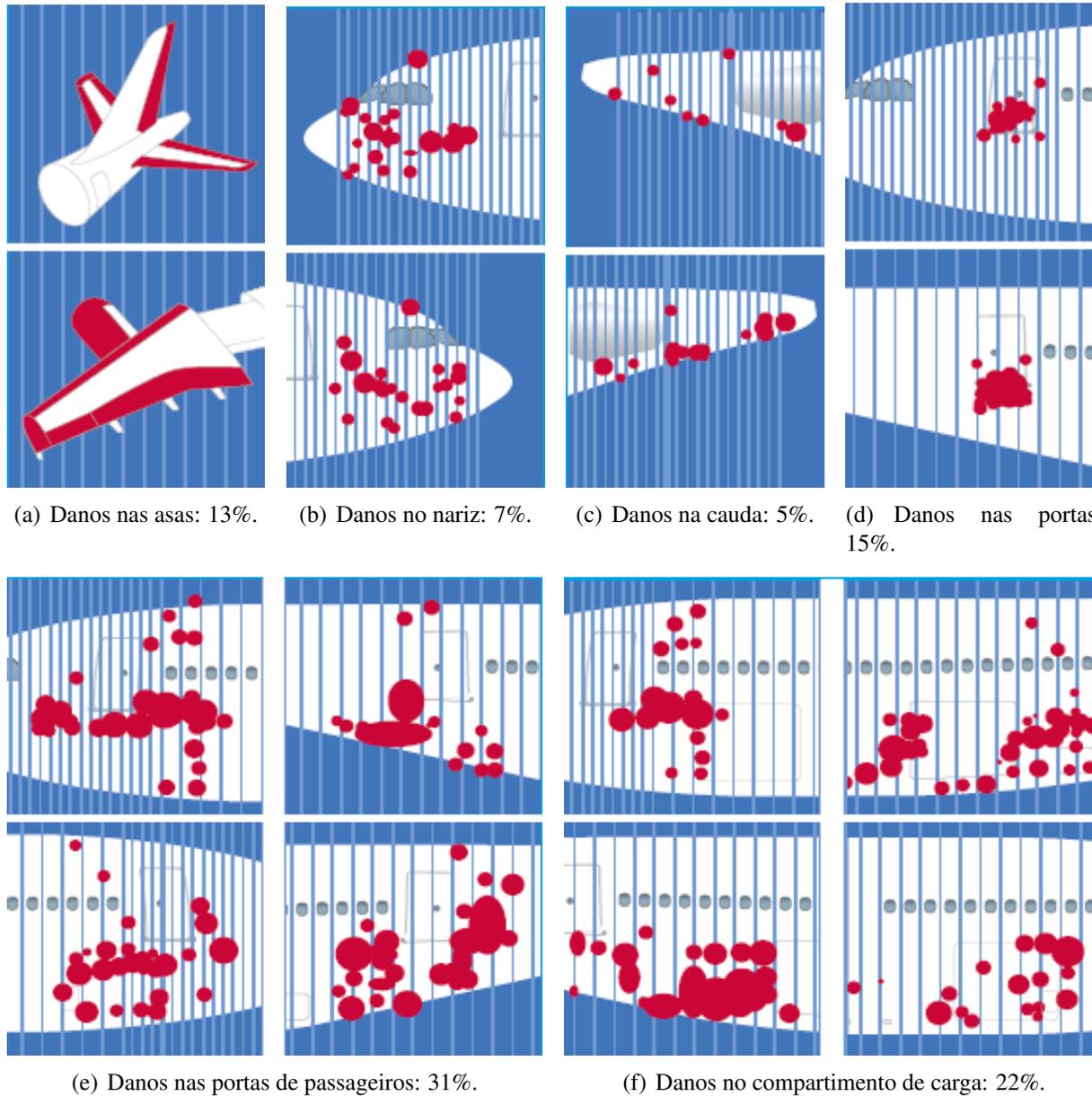
Zou *et al.* (2000) revisaram os métodos baseados em vibração para monitorar estruturas de material compósito. Embora as estruturas de material compósito possuam vários modos de falha, tais como trincas na matriz, a quebra de fibras ou a separação da fibra-matriz, estes mecanismos de dano produzem mudanças semelhantes na resposta em vibração àquela obtida para danos em estruturas metálicas. Entretanto, a delaminação é um problema sério em estruturas de material compósito, e não tem paralelo a mecanismos de dano em outros materiais.

### 2.3.1 Monitoramento em Estruturas Aeronáuticas

Como já exposto, SHM é uma forma inovadora de ensaios não destrutivos (NDT) embarcados que podem ser empregados para avaliar diretamente a integridade das estruturas aeronáuticas. O princípio do SHM é comparável ao sistema nervoso humano, onde os sensores formam uma rede comparável ao sistema nervoso, detectando e diagnosticando danos estruturais, cargas mecânicas ou condições anormais. No caso da fabricante AIRBUS®, os sensores são interrogados através de um sistema de diagnóstico "*on-board*" ou "*off-board*" e a informação sobre o estado estrutural é reportada para a equipe de manutenção. Em contraste com o NDT convencional, não há necessidade de um inspetor qualificado para acessar a área de inspeção e para realizar a medição que na maioria dos casos são caras e demoradas (Wenk e Bockenheimer (2014)).

Um dado real é exibido na Figura 2.2, mostrando um número relevante de danos na fuselagem da aeronave comercial A-320. A empresa consegue contornar esta problemática empregando tecnologia SHM, que mostrou para casos selecionados, um grande potencial para reduzir o tempo e custo de manutenção, aumentando a disponibilidade de aeronaves (Wenk e Bockenheimer (2014)).

A comunidade aeroespacial começou a estudar o uso da tecnologia de detecção de danos durante o final da década de 1970 e início de 1980 para uma variedade de aplicações na área civil e militar (Farrar e Worden (2012)). De acordo com os autores, o desenvolvimento de sistemas SHM para aplicações aeroespaciais tem sido impulsionado por preocupações com segurança e econômicas. No ano 2000, 30% da frota de aviões comerciais tinha atingido a sua vida útil. Tal como acontece com outras infra-estruturas, há um desejo de operar esses ativos para além da sua vida de *design* original e, portanto, deve ser dada mais atenção à identificação dos danos antes de atingir um nível crítico. Militares estão interessados nesta tecnologia devido ao potencial de redução de custos do ciclo de vida, sabendo que ao longo da vida de um sistema de aeronaves militares, os custos de manutenção excederão o preço de compra desse sistema. A Figura 2.3

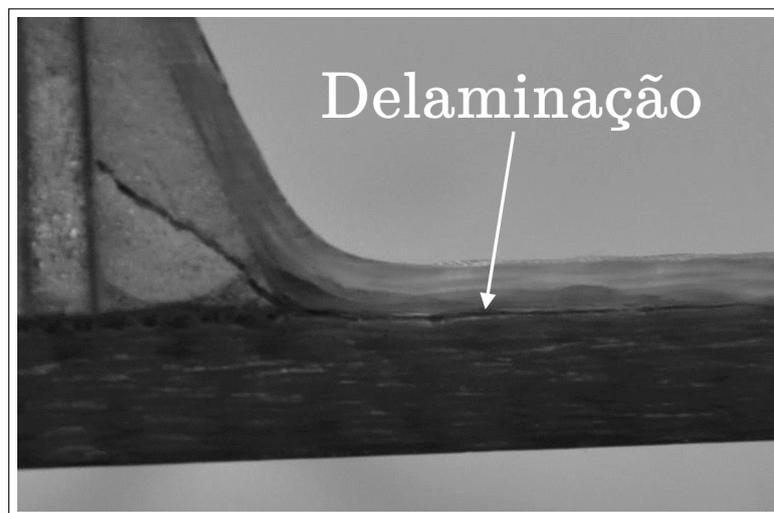


**Figura 2.2:** Mapeamento de danos em serviço para a fuselagem de uma aeronave Airbus A-320. Os locais com danos são marcados em vermelho (Adaptado de Wenk e Bockenheimer (2014)).

exibe alguns exemplos de danos reais em aeronaves relevando a importância do tema estudado. Segundo Mistry *et al.* (2011), o monitoramento em estruturas aeronáuticas, principalmente em aeronaves, visa principalmente a supervisão em algumas áreas de interesse. Estas áreas são regiões com preocupações em nível de projeto e são conhecidas como zonas de alta tensão, que serão referenciadas como "*hot spots*".

### 2.3.2 Delaminações

Quando dois ou mais materiais são combinados visando formar um material com funcionalidades melhoradas, tal material é designado como um material compósito. Materiais compósitos modernos usam fibras de alta resistência em uma matriz polimérica. As fibras e a matriz são combinadas para formar uma única camada. Os materiais compósitos laminados são formados por empilhamento de camadas de diferentes orientações de uma maneira predeterminada. Um dos modos de falha mais comuns das estruturas de material compósito é a delaminação entre as camadas. Delaminação é uma fenda que se forma entre as camadas adjacentes em um laminado (Figura 2.4), onde as camadas de ambos os lados da delaminação podem ter diferentes orientações de fibras. Como tal, uma delaminação pode ser vista como uma fissura de interface entre duas laminas de um material anisotrópico (Raju e O'brien (2008)).



**Figura 2.4:** Exemplo de delaminação real em uma estrutura de material compósito (adaptado de Heslehurst (2014)).



(a) Danos causados por fadiga em torno de rebites da fuselagem (Farrar e Worden (2012))



(b) Danos acidentais causados por veículos terrestres (Boller (2013))



(c) Danos acidentais causados por veículos terrestres (Boller (2013))



(d) Danos sofridos por um Fairchild A-10 *Thunderbolt* durante uma missão da Guerra do Iraque em 2003 (Farrar e Worden (2012)).



(e) Dano sofrido por *bird strike* (Telegraph (2016)).



(f) Dano sofrido por *lightning strike* (Sweers *et al.* (2012)).

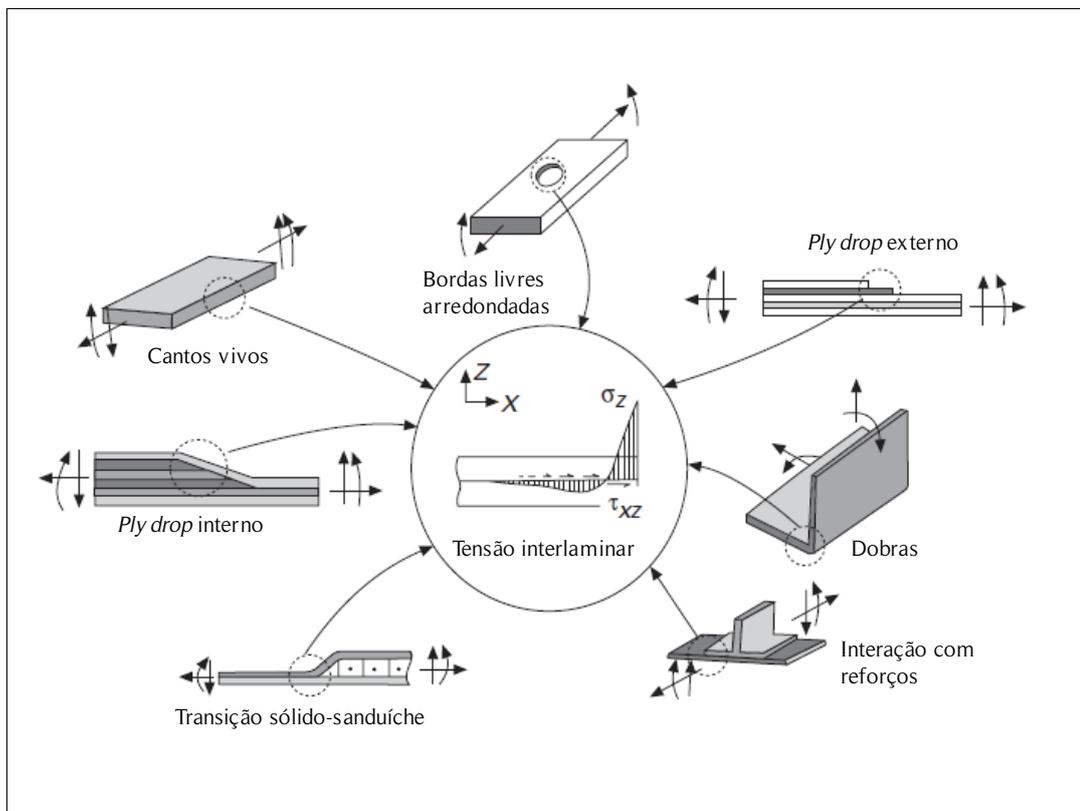
**Figura 2.3:** Alguns danos causados em aeronaves em operação.

As fontes mais comuns de delaminação são as descontinuidades nos materiais e estruturais que dão origem a tensões interlaminares. Algumas destas fontes são mostradas na Figura 2.5. Delaminação também pode resultar de fatores de serviço, como impacto de baixa velocidade por objetos estranhos, como por exemplo, impacto de pássaros em aeronaves. Embora tal dano ao impacto possa causar uma série de delaminações, ele não pode deixar qualquer indicação externa e é muitas vezes chamado de "danos de impacto meramente-visível" ou simplesmente *Barely Visible Impact Damage* (BVID) (Lee (2000)). No entanto, tais danos causam degradação da rigidez e alteram as características de vibração. Em geral, a abordagem de redução de rigidez pode modelar uma classe grande de danos estruturais, incluindo trincas e delaminações (Ganguli (2001)).

Ainda assim, Garcia *et al.* (2015) ressaltam que a delaminação é um modo de falha particularmente perigoso, pois ocorre e cresce sob a superfície sem ser visível exteriormente, causando quebra da matriz e levando a alterações nas propriedades físicas de todo o laminado, tais como redução da rigidez e da resistência. Segundo os autores, as técnicas de SHM utilizam procedimentos não destrutivos para tirar conclusões sobre a saúde e a condição de uma determinada estrutura. Os métodos SHM baseados em vibração apresentam uma possibilidade muito atraente, uma vez que são métodos não destrutivos globais e não requerem nenhuma informação *a priori* para o local, o tipo ou o tamanho do dano.

Segundo Chakraborty (2005), a presença de tal delaminação provoca alteração nas propriedades físicas e geralmente não afeta a distribuição de massa, mas reduz a rigidez da estrutura e acarreta mudanças nos parâmetros modais. Assim, o uso de vibrações se encaixa como um parâmetro candidato adequado para detectar tais danos. O objetivo da metodologia aqui abordada não é apenas detectar um dano estrutural, mas também fornecer uma indicação precoce de dano. O alerta precoce fornecido por um sistema SHM pode então ser usado para definir estratégias de remediação antes que os danos estruturais levem à falha (Ihesiulor *et al.* (2013)).

Atualmente, existe um número relevante de técnicas para a identificação e localização dos danos estruturais. Contudo, todas as técnicas têm suas próprias vantagens e desvantagens, não há nenhum algoritmo geral que permite a resolução de todos os tipos de problemas em todos os tipos de estruturas. Toda técnica tende a ter uma sensibilidade relacionada com danos, isto é, uma técnica muito sensível pode produzir falsos positivos, enquanto uma técnica menos sensível pode levar a falsos negativos, sendo este último o mais problemático. Geralmente, apenas danos acima de um determinado tamanho (limiar) podem ser detectados (Montalvão *et al.* (2006)). Logo, este trabalho de pesquisa trata de aspectos relacionados com a detecção de delaminação em estruturas de material compósito por uma abordagem em medições de vibrações. Variações no comportamento modal possuem fortes indicações sobre o estado estrutural e quando devidamente tratados por meio de métodos eficientes, podem indicar a presença e localização de determinado tipo de dano.



**Figura 2.5:** Fontes de delaminação em discontinuidades na geometria e no material (adaptado de Raju e O'Brien (2008)).

## Capítulo 3

# Métodos Computacionais para Detecção e Identificação de Danos

Foi ressaltado nos capítulos anteriores que a detecção de danos é essencialmente considerada como um problema inverso ou de reconhecimento de padrões. Em essência, a detecção de danos é um problema de identificação do sistema, em que para um dado conjunto de parâmetros de entrada-saída, existe uma determinada relação associada a tal sistema. Neste capítulo, noções essenciais serão introduzidas e discutidas sobre os métodos computacionais empregados na tentativa da solução do problema de detecção de danos. Argumentações sobre os métodos evolutivos serão feitas. Introduzirá ainda uma modificação do método de otimização por polinização de flores, aqui chamado de *SunFlower Optimization* (SFO) e por fim discorrerá sobre técnicas neurais para reconhecimentos de padrões (redes neurais artificiais).

### 3.1 Algoritmos de Otimização

O processo de detecção/identificação de danos é essencialmente um problema inverso como visto anteriormente, onde entrada(s) e saída(s) são conhecidas, e, por meio destas, pode-se determinar a localização de um dano presente numa dada estrutura. Em essência, a detecção de danos é um problema de identificação do sistema, em que para um dado conjunto de parâmetros de entrada-saída a localização e a extensão do dano é identificada usando um conjunto de funções chamadas funções objetivo, minimizadas por meio de determinado algoritmo de otimização. Neste trabalho, algoritmos genéticos (GA) serão empregados no problema de detecção de danos por métodos de otimização. Na sequência, uma proposta denominada *SunFlower Optimization* será introduzida.

### 3.1.1 Algoritmos Genéticos

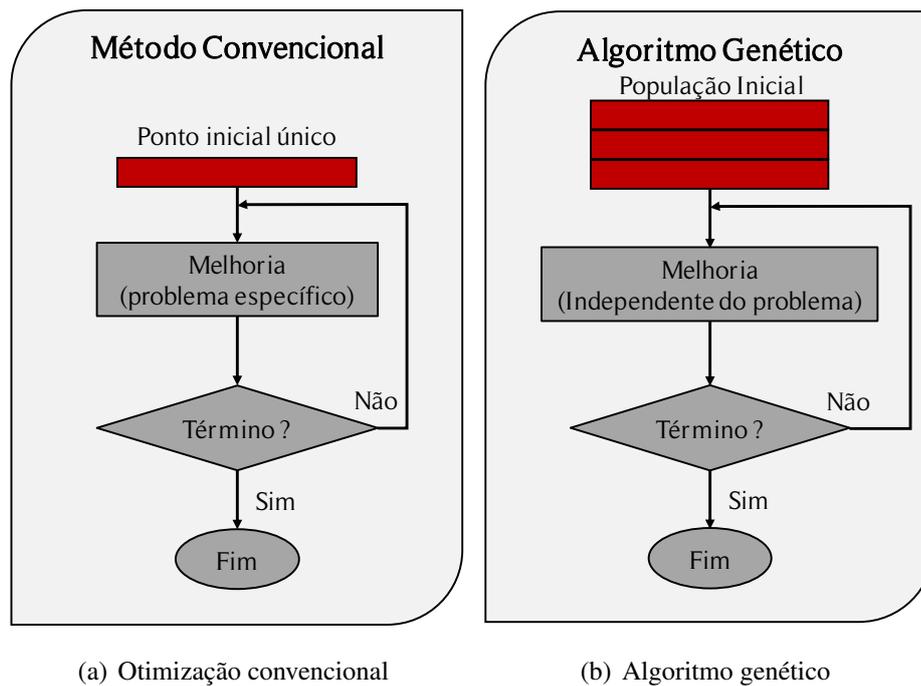
Segundo Gopalakrishnan *et al.* (2011b), os algoritmos genéticos são poderosos e amplamente aplicáveis métodos de buscas estocásticos com base no princípio da seleção natural e genética natural de Darwin. Técnicas convencionais de busca e otimização são geralmente baseadas em derivadas, fazendo uso do gradiente de determinada função para encontrar os mínimos ou máximos locais. Estas técnicas dependem do problema e podem funcionar bem para determinadas funções simples. Problemas práticos (como o que se está tentando resolver aqui) são de natureza complexa, e esses métodos não podem dar qualquer solução satisfatória. A diferença entre os algoritmos de pesquisa convencionais e GA é mostrada na Fig.3.1. A principal eficiência dos algoritmos genéticos está na sua robustez, podendo encontrar o ótimo global sem ficar estagnados em pontos locais em funções multimodais. GAs não requerem muita operação matemática para sua execução e não dependem do problema, lidando com todos os tipos de funções e restrições objetivas, lineares ou não. As diferenças entre os GAs dos métodos convencionais é resumido por Holland e Goldberg (1989), como:

- GA se inicia de um conjunto de pontos chamados população, e não de um ponto inicial.
- GA trabalha com um forma codificada das soluções, chamadas de cromossomos. Um número de cromossomos cria uma população.
- GA usa informações da função de aptidão (*fitness*) e não as derivadas.
- GA usa regras de transição probabilísticas, e não determinísticas.

Uma "busca genética" começa com cromossomos criados aleatoriamente, concebendo a população inicial. Os cromossomos são codificados a partir das soluções, geralmente sendo feita usando codificação binária. A população é o espaço de solução de cada geração que possui um número fixo de cromossomos. Por exemplo, uma população de cinco membros pode ser dada como:

```
1000100110
0011100001
1010001011
1100010000
1111001000
```

Os cromossomas parentais sofrem dois tipos de operações genéticas, cruzamento (*crossover*) e mutação para criar descendentes. *Crossover* é a principal operação genética que os cromossomos-pais sofrem. O desempenho de um GA depende em grande parte do desempenho do operador *crossover* utilizado. Ele opera em um par de cromossomos de cada vez e gera



(a) Otimização convencional

(b) Algoritmo genético

**Figura 3.1:** Comparação entre métodos convencionais de busca e algoritmos genéticos (adaptado de Gopalakrishnan *et al.* (2011b)).

uma ou duas crias retendo algumas características de ambos os cromossomos pais. Pode haver várias maneiras de realizar um *crossover*. Uma simples operação de *crossover* é ilustrada aqui. Um par de cromossomas parentais são selecionados aleatoriamente ou com base na sua aptidão. Um ponto de cruzamento é selecionado aleatoriamente após o quarto dígito. Código genético é trocado por meio deste ponto e os descendentes são então gerados (Gopalakrishnan *et al.* (2011b)).

$$\begin{pmatrix} \text{Pai: } 1010 \times 001011 \\ \text{Mãe: } 1111 \times 001000 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} \text{Filho 1: } 1010 \times 001000 \\ \text{Filho 2: } 1111 \times 001011 \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

Esta é uma operação de cruzamento conhecida como cruzamento de ponto único. O cruzamento também pode ocorrer em múltiplos pontos. Uma probabilidade de cruzamento ou taxa de cruzamento  $p_c$  é definida como a probabilidade de que um membro de uma população será selecionado para tal cruzamento. O valor típico do  $p_c$  é de 0.5 a 0.8. Um  $p_c = 1.0$  implica que todos os membros de uma população irão se cruzar (Gopalakrishnan *et al.* (2011b)). Ordens mais elevadas de  $p_c$  conduzem a uma melhor exploração do espaço de busca da solução e reduzem as chances de se obter um ponto de mínimo local, contudo, aumentam o custo computacional.

O operador genético de mutação, cria descendentes alterando aleatoriamente um ou mais genes no cromossomo pai. Por exemplo, se o 5º gene do 2º membro da população é selecionado

para mutação, o cromossomo do filho depois da mutação seria dada como:

$$\text{Pai: } 0011100001 \rightarrow \text{Filho: } 0011000001 \quad (3.2)$$

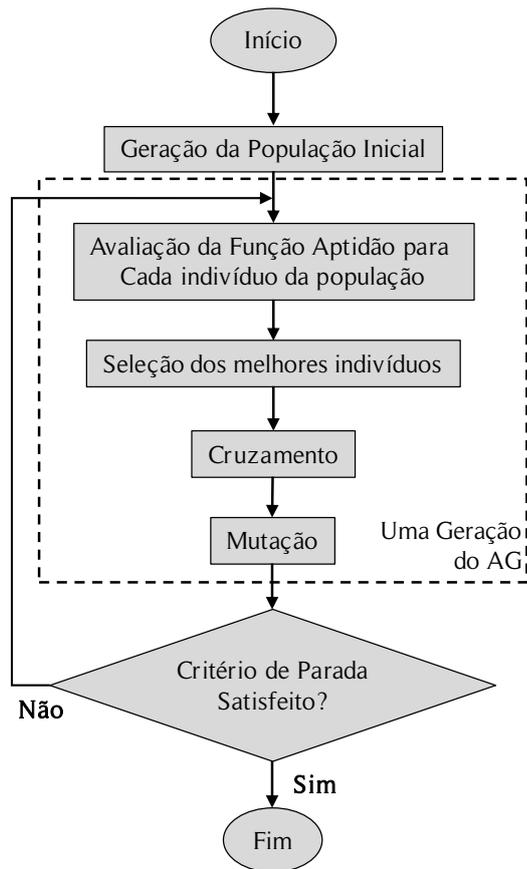
A probabilidade de mutação  $p_m$  é definida pela probabilidade de um único gene de toda a população ser alterado. Um valor típico de  $p_m$  é 0.01.

A parte mais crucial de um GA é o procedimento de seleção, ou seja, a criação de uma nova geração a partir de uma anterior é dada por esta operação genética. A seleção é a força motriz para qualquer pesquisa genética. As seleções são sempre baseadas na aptidão (*fitness*) de determinado indivíduo. Os indivíduos têm maiores chances de serem selecionados para a próxima geração. A aptidão de um indivíduo geralmente é feita usando a própria função de otimização. A pressão de seleção, isto é, o peso sobre os membros saudáveis para a seleção, desempenha um papel crítico no procedimento de seleção. Alta pressão de seleção pode levar a convergência prematura. Por outro lado a baixa pressão de seleção torna a convergência lenta (Holland e Goldberg (1989)).

A seleção pode ser a partir do espaço de amostragem regular ou do espaço de amostragem ampliado. O espaço de amostragem regular geralmente é criado substituindo os pais por seus descendentes após seu nascimento. Assim, o tamanho deste espaço é sempre igual ao tamanho da população. As substituições também podem ter lugar aleatoriamente ou com base em seus valores de aptidão. O espaço de amostragem ampliado contém os subespaços pai e filhos, onde recebem a mesma chance de competir na seleção. O tamanho deste espaço será alterado à medida que o número de nascimentos muda. Uma grande variedade de mecanismos de seleção são experimentados até a data. Os três mecanismos básicos descritos em Holland e Goldberg (1989) são os seguintes:

- Seleção estocástica;
- Seleção determinística;
- Seleção mista.

Na seleção estocástica, os indivíduos recebem certa probabilidade de seleção com base na sua aptidão. Estas probabilidades podem ser diretamente proporcionais aos seus valores de aptidão ou podem ser obtidas aumentando os seus valores de aptidão. Na seleção determinística, são selecionados os melhores membros da população. A seleção mista é uma combinação de seleção estocástica e determinística (Gopalakrishnan *et al.* (2011b)). O fluxograma básico sobre o funcionamento do algoritmo é exibido na Figura 3.2.



**Figura 3.2:** Fluxograma do funcionamento básico de um GA e seus operadores genéticos (adaptado de Beygzadeh *et al.* (2014)).

### Programa o Inteira

Programa o não-linear inteira refere-se a programa o matemática com variáveis contínuas e discretas. O uso de programa o inteira com algoritmos genéticos   uma abordagem natural na formula o de problemas onde   necessário otimizar simultaneamente a estrutura do sistema (discreto) e parâmetros (contínuos). Este tipo de estratégia têm sido utilizada em várias aplica es, incluindo a indústria de processos, de engenharia, e de pesquisa operacional. As necessidades em áreas tão diversas têm motivado a pesquisa e desenvolvimento na tecnologia, particularmente em algoritmos para lidar com problemas de grande escala, altamente combinatórios e altamente não-lineares (Bussieck e Pruessner (2003)). A formula o geral   dada

por:

$$\begin{aligned} & \text{Minimizar } f(x, y) \\ & \text{Sujeito a } g(x, y) \leq 0 \\ & \quad x \in X \\ & \quad y \in Y \text{ inteiro} \end{aligned} \tag{3.3}$$

As funções  $f(x, y)$  e  $g(x, y)$  são funções não-lineares. As variáveis  $x$  e  $y$  são as variáveis de decisão, onde  $y$  é a restringida somente a valores inteiros.  $X$  e  $Y$  são restrições delimitantes nas variáveis.

Neste trabalho, o uso de programação intera será justificado pela busca de dano em elementos estruturais que formam um conjunto de número inteiros, não havendo necessidade de precisão numérica, evitando assim uma redundância na otimização e gasto de esforço computacional desnecessário.

### 3.1.2 Algoritmo de Polinização de Girassol (SunFlower Optimization)

A natureza é uma maravilhosa fonte de inspiração para o desenvolvimento de técnicas de otimização que podem resolver problemas difíceis de matemática e engenharia. Desde o início dos anos 70, vários algoritmos de otimização bio-inspirados na natureza surgiram a partir do Algoritmo Genético (AG), alguns dos quais provaram ser métodos de otimização global muito eficientes. Junto com o GA, o algoritmos de enxame da partícula (PSO), otimização da colônia da formiga (ACO), a evolução diferencial (DE) e muitos outros métodos foram propostos e executados com sucesso. No entanto, como cada algoritmo possui pontos fortes e fracos, não há um único método dentro da família de algoritmos de otimização numéricos inspirados na natureza, que se destaca como o melhor para resolver todos os tipos de problemas (Bayraktar *et al.* (2013)).

Yang (2012) propôs um novo algoritmo baseado no processo de reprodução de flores considerando o processo biológico de polinização. O algoritmo de polinização ou FPA (*Flower Polination Algorithm*) foi desenvolvido por Xin-She Yang em 2012, inspirado no processo de polinização de fluxo de plantas com flores. Simplificadamente, o algoritmo faz uso de quatro regras principais:

1. A polinização biótica e cruzada pode ser considerada como um processo de polinização e os polinizadores portadores de pólen se movem de uma forma que obedece aos voos de Lévy.

2. Para polinização local, polinização abiótica e auto-polinização são usadas.
3. Polinizadores como insetos podem desenvolver a constância da flor, que é equivalente a uma probabilidade de reprodução que é proporcional à similaridade de duas flores envolvidas.
4. A interação ou troca de polinização local e polinização global pode ser controlada por uma probabilidade de troca  $p \in [0, 1]$ , ligeiramente inclinada para a polinização local.

Para formular as iterações, estas regras têm de ser convertidas em equações adequadas. Por exemplo, na etapa de polinização global, os gametas de pólen de flores são transportados por polinizadores, como insetos, e o pólen pode viajar por uma longa distância, porque os insetos geralmente podem voar e se mover em uma faixa muito maior. Portanto, a regra 1 e a constância da flor (regra 3) podem ser representadas matematicamente como (Yang (2012)):

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \gamma L(\lambda)(g_* - x_i^t) \quad (3.4)$$

sendo  $x_i^t$  o pólen  $i$  do vetor solução  $x_i$  na iteração  $t$ , e  $g_*$  a melhor solução encontrada na atual geração/iteração. O fator de escala  $\lambda$  que controla o tamanho do passo dado.

Seguindo a ideia do comportamento biológico da polinização de determinadas flores, introduz-se uma nova meta-heurística de otimização. Para tal, ainda se manterá no campo de flores levando-se em consideração o comportamento peculiar dos girassóis na busca da melhor orientação para o sol. O ciclo destas plantas é ímpar e sempre o mesmo: todos os dias, eles acordam e acompanham o sol como os ponteiros de um relógio, assemelhando-se a um radar rastreando o alvo. À noite, eles viajam na direção oposta para esperar novamente para sua partida na manhã seguinte. Baseado neste comportamento peculiar, modificou-se o algoritmo de Yang (2012), como descrito na sequência.

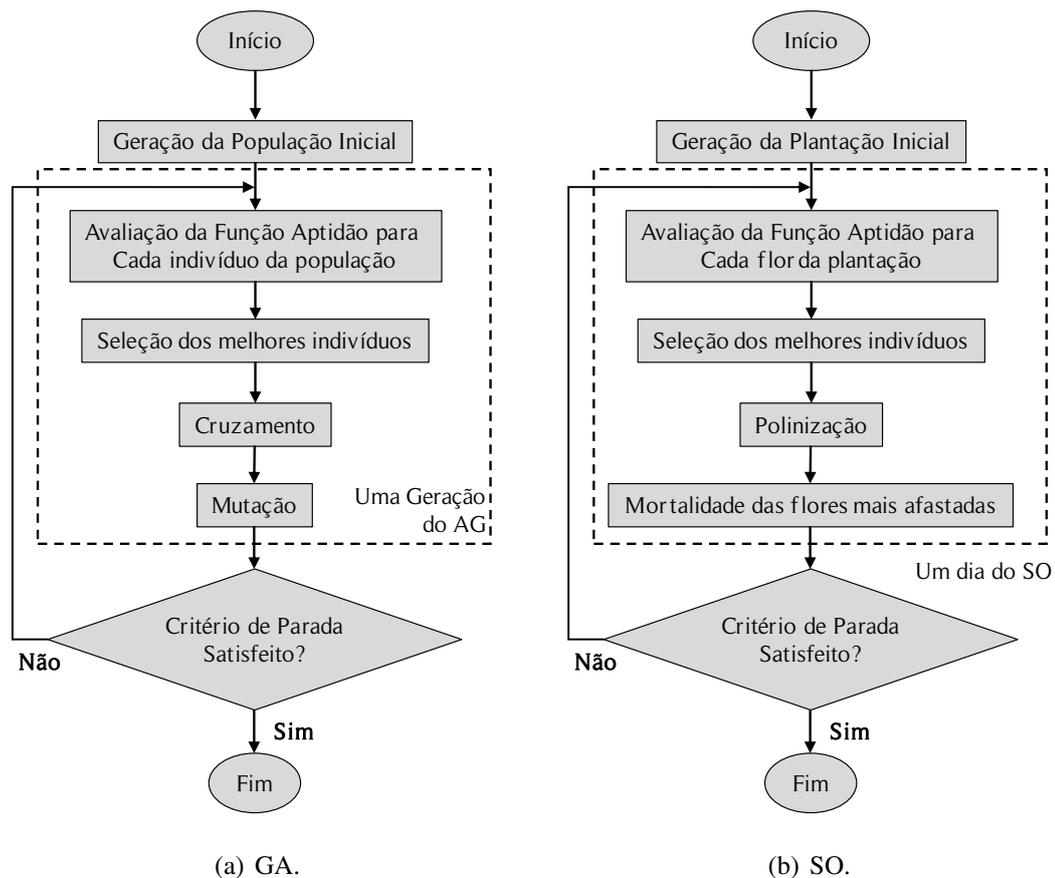
O algoritmo se inicia pela geração de uma população inicial de indivíduos (flores), podendo ser geradas de forma aleatória ou ordenada de acordo com os requisitos do problema. Neste estudo, optou-se pela criação de populações iniciais aleatórias. O algoritmo então calcula a aptidão de cada indivíduo neste espaço de busca, quantificando esse valor como função aptidão ou simplesmente *fitness*. O(s) melhor(es) indivíduo(s) desta população de flores será definido como a referência do espaço de busca, ou seja, o sol. Da mesma forma com que os girassóis são orientados pelo sol no mundo em que vivemos, todos os indivíduos serão orientados pela planta com a melhor aptidão na população neste método de otimização proposto. Uma vez orientados pelo sol, indivíduos irão se reproduzir e se mover em direção ao ponto de ótimo de forma aleatória controlada, isto é, novos indivíduos serão gerados de forma aleatória contudo, em uma determinada direção específica. Este algoritmo proposto trabalha com três variáveis

principais definindo os operadores biológicos, sendo elas: *i*) taxa de polinização ( $p_p$ ), *ii*) a taxa de mortalidade das plantas ( $m_p$ ) e *iii*) a taxa de sobrevivência das plantas que se movimentarão de forma controlada até o sol ( $p_s$ ).

A taxa de polinização  $p_p$  define o percentual de indivíduos da população que irão polinizar entre si. Destaca-se ainda que a polinização considerada aqui é tomada aleatoriamente ao longo da distância mínima entre a flor  $i$  e a flor  $i + 1$ , isto é, os melhores indivíduos polinizarão de forma hierárquica entre si. No mundo real, cada flor geralmente libera milhões de gametas de pólen. No entanto, por simplicidade, também assume-se que cada girassol só produza um gameta de pólen e se reproduza individualmente.

A taxa de mortalidade  $m_p$  determina que um percentual de indivíduos não sobreviverão, pois estão muito distantes do sol e não receberam quantidade de calor suficiente para sua sobrevivência. Os  $m_p$  % indivíduos serão definidos como os piores de sua população de acordo com o valor de suas respectivas aptidões (*fitness*). Esse operador biológico é fundamental para a heurística aqui desenvolvida, pois permite uma certa variabilidade da população ao longo das gerações e diminui a probabilidade de se obter regiões de ótimos locais.

A terceira variável  $p_s$  caracteriza o percentual de indivíduos que se moverão em direção da fonte de calor (sol). É claro que na natureza as plantas (ou a grande maioria delas) não possuem movimentos de translação, contudo, neste caso, é atribuído uma movimentação para os  $p_s$  % indivíduos da população. O tamanho do passo dado pelo indivíduo sobrevivente será aleatório de acordo com uma distribuição normal, entre a sua localização e a localização do melhor indivíduo (sol). A taxa de sobrevivência é então definida como  $p_s = 1 - (p_p + m_p)$ , pois  $p_p + p_s + m_p = 1$ . O fluxograma da Figura 3.3 exhibe resumidamente o funcionamento do algoritmo SFO. Pode-se notar ainda que o algoritmo SFO possui uma certa semelhança com o algoritmo genético.



**Figura 3.3:** Fluxogramas dos algoritmos GA e SO.

Matematicamente, a direção dos indivíduos (flores) a caminho do melhor indivíduo (sol) é dada por:

$$\vec{s}_i = \frac{X^* - X_i}{\|X^* - X_i\|}, \quad i = 1, 2, \dots, n_p. \quad (3.5)$$

O passo dado de cada indivíduo é dado por:

$$d_i = \lambda \times P_i(\|X_i + X_{i-1}\|) \times \|X_i + X_{i-1}\| \quad (3.6)$$

sendo  $\lambda$  um valor que define um deslocamento "inercial" das plantas, ou simplesmente o passo,  $P_i(\|X_i + X_{i-1}\|)$  é a probabilidade de polinização, ou seja, o girassol  $i$  poliniza com seu vizinho mais próximo  $i - 1$  gerando um novo indivíduo em uma posição aleatória que varia de acordo com cada distância entre as flores. Ou seja, os indivíduos mais próximos do sol tomarão passos menores em busca de um refinamento local, enquanto indivíduos mais distantes se moverão com passos aleatórios na direção estabelecida com valor aleatório. Também é necessário restringir o passo máximo dado por cada indivíduo, a fim de não ficar restrito somente a regiões de mínimos

locais. Define-se o passo máximo como:

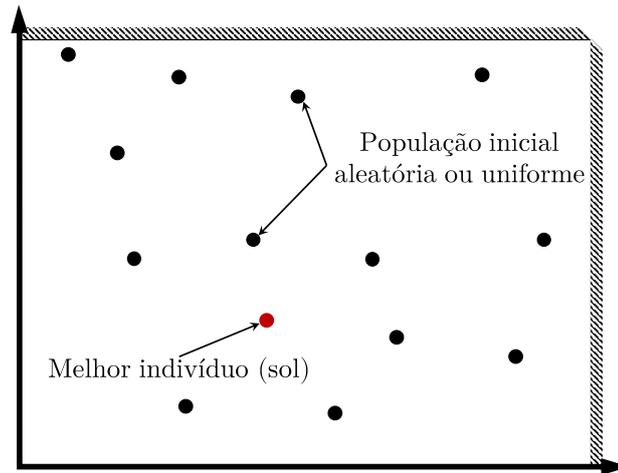
$$d_{max} = \frac{\|X_{max} - X_{min}\|}{2 \times N_{pop}} \quad (3.7)$$

sendo  $X_{max}$  e  $X_{min}$  os limites superiores e inferiores,  $N_{pop}$  é o número total de plantas na população.

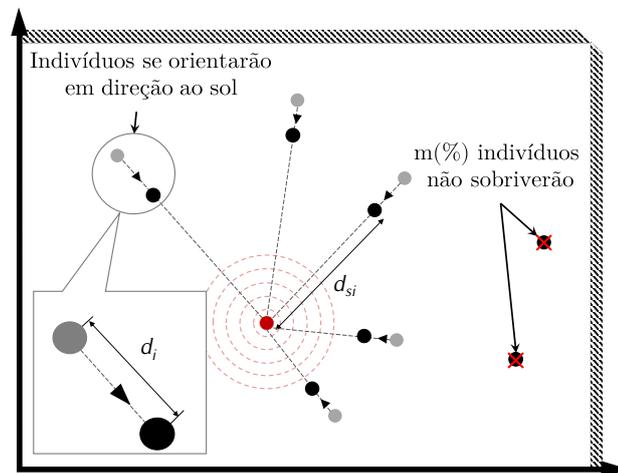
A nova população, ou plantação de flores, é dada por:

$$\vec{X}_{i+1} = \vec{X}_i + d_i \times \vec{s}_i \quad (3.8)$$

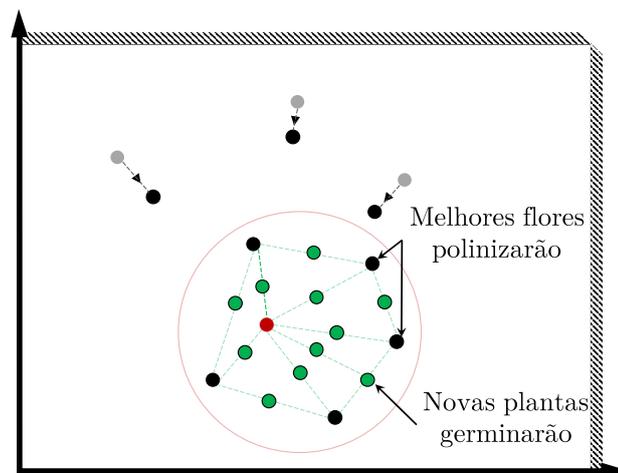
Uma visualização simples das etapas do algoritmo proposto é mostrada pela Figura 3.4. O algoritmo começa com a geração de uma população de indivíduos. Esta população pode ser aleatória ou mesmo uniforme. A avaliação de cada indivíduo permite avaliar qual deles será transformado (considerado) como o sol, ou seja, aquele com melhor avaliação entre todos. Ainda em uma versão futura pretende-se adotar a possibilidade de trabalhar com vários sóis, mas aqui neste trabalho restringir a apenas um. Então todos os outros indivíduos se orientarão, como os girassóis, para o sol e mover-se-ão de um modo aleatório controlado, isto é, tomarão passos aleatórios em uma direção específica.



(a) População inicial de indivíduos e escolha do sol.



(b) Todos indivíduos se orientam ao Sol.



(c) Melhores flores polinizam.

**Figura 3.4:** Noções gerais sobre a metodologia do algoritmo SO.

Tendo em vista os aspectos observados, o algoritmo proposto, trata de uma modificação no algoritmo de FPA, introduzindo uma busca orientada no espaço amostral. Resultados numéricos sobre a aplicação deste algoritmo serão discutidos no Capítulo 5.

### 3.1.3 Otimização Multiobjetivo

Muitos problemas de decisão e planejamento envolvem múltiplos objetivos conflitantes que devem ser considerados simultaneamente. Na otimização de um único objetivo, é possível determinar, dado um conjunto de soluções, qual é melhor que a outra. Como resultado, geralmente obtêm-se um única solução. No entanto, na otimização multiobjetivo não existe um método direto para determinar se uma solução é melhor do que determinada outra. O método mais comumente adotado na otimização multiobjetivo para comparar soluções é o chamado de relação de dominância de Pareto, que, em vez de uma única solução ótima, leva a um conjunto de alternativas com diferentes *trade-off* entre os objetivos. Essas soluções são chamadas soluções ótimas de Pareto ou soluções não dominadas (Jaimes *et al.* (2009)).

Formalmente, um problema de otimização com múltiplos objetivo é definido como:

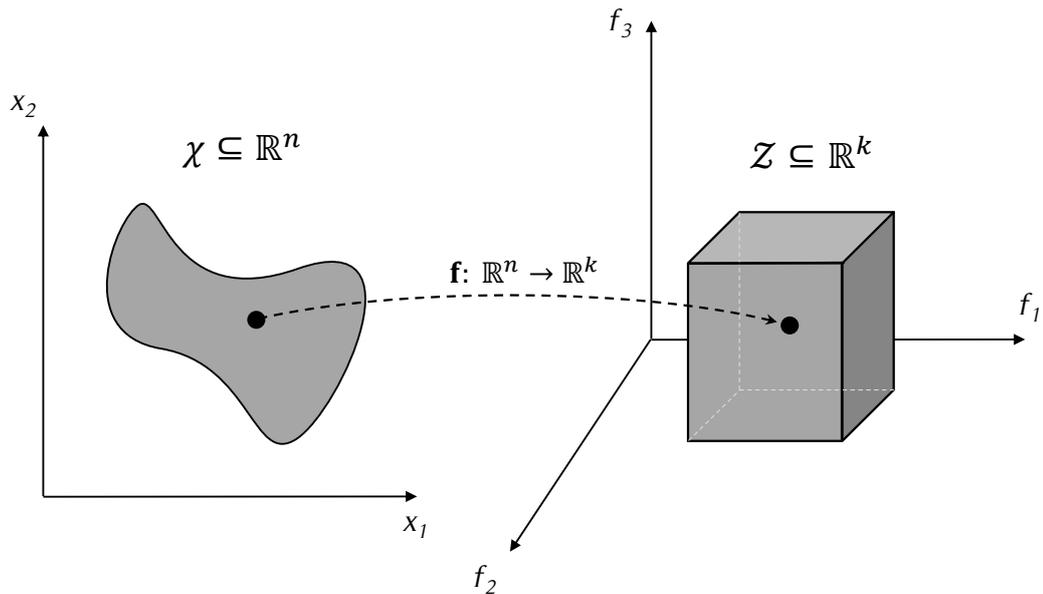
$$\text{Minizar } f(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)]^T \quad (3.9)$$

$$\text{Sujeito a } x \in \chi \quad (3.10)$$

O vetor  $x \in \mathbb{R}^n$  é formado por  $n$  variáveis de decisão representando as quantidades para as quais os valores devem ser escolhidos no problema de otimização. O conjunto viável  $\chi \subseteq \mathbb{R}^n$  é implicitamente determinado por um conjunto de restrições de igualdade e desigualdade. A função vetorial  $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^k$  é composta por  $k$  funções objetivo escalares  $f_i : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  ( $i = 1, \dots, k; k \geq 2$ ). Na otimização multiobjetivo, os conjuntos  $\mathbb{R}^n$  e  $\mathbb{R}^k$  são conhecidos como espaço variável de decisão e espaço de função objetivo, respectivamente (Jaimes *et al.* (2009)).

A Figura 3.5 exibe o espaço de  $\chi$  sob a função  $f$  e o subconjunto do espaço de função objetivo denotado por  $Z = f(\chi)$  e referido como o conjunto viável no espaço de função objetivo.

Para definir com precisão o problema de otimização multiobjetivo indicado na definição na Eq. 3.9, estabelece-se o significado de minimização em  $\mathbb{R}^k$ . Isto é, define-se como os vetores  $f(x) \in \mathbb{R}^k$  devem ser comparados para diferentes soluções  $x \in \mathbb{R}^n$ . Na otimização multiobjetivo, adota-se geralmente a relação de dominância de Pareto. A Figura 3.6 ilustra o



**Figura 3.5:** Espaços de busca em otimização multiobjetivo (adaptado de Jaimes *et al.* (2009)).

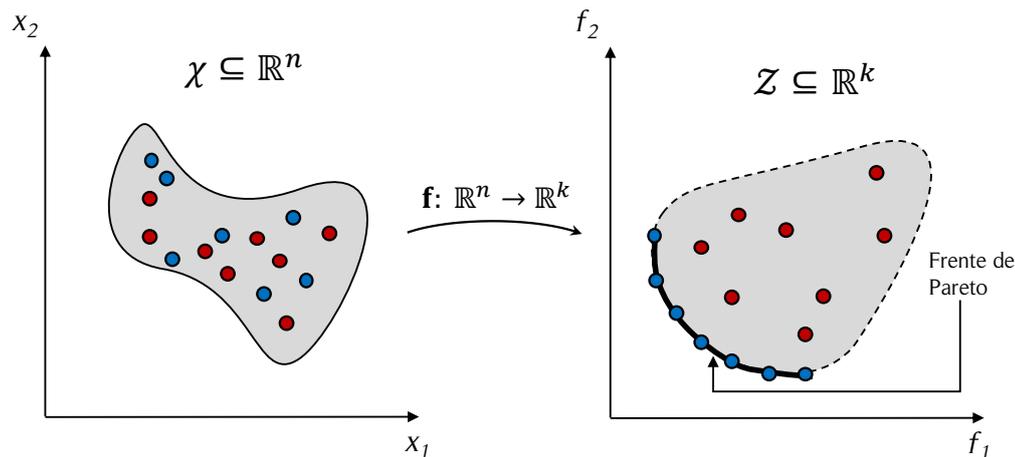
conceito de conjunto ótimo de Pareto e sua projeção no espaço objetivo, a frente de Pareto. Os pontos mais escuros indicam vetores ótimos de Pareto. No espaço das variáveis, esses vetores são referidos como vetores de decisão ótimos de Pareto, enquanto que no espaço objetivo, são chamados de vetores ótimos de Pareto. Como pode-se observar na Figura, a frente de Pareto é composta apenas por vetores não-dominados.

### Otimização multiobjetivo evolucionária

No contexto da otimização multiobjetivo, o princípio extremista de encontrar a solução ótima não pode ser aplicada a um único objetivo, quando o restante dos objetivos também são relevantes. Diferentes soluções podem produzir *trade-offs* (conflito de resultados entre objetivos) entre diferentes objetivos. Uma solução que é extrema (em um sentido melhor) com respeito a um objetivo requer um compromisso em outros objetivos. Isso impede que se escolha uma solução que seja ideal em relação a apenas um objetivo. Isso sugere claramente dois objetivos ideais de otimização multiobjetivo (Deb (2008)):

1. Encontrar um conjunto de soluções que se encontram na frente ótima de Pareto
2. Encontrar um conjunto de soluções que sejam suficientemente diversas para representar a frente de Pareto.

Os algoritmos evolutivos de otimização multiobjetivo tentam seguir ambos os princípios acima. Considere a Figura 3.7, na qual esboça-se como várias otimizações paramétricas independentes de um único objetivo que podem encontrar diferentes soluções Pareto-ótimas. A

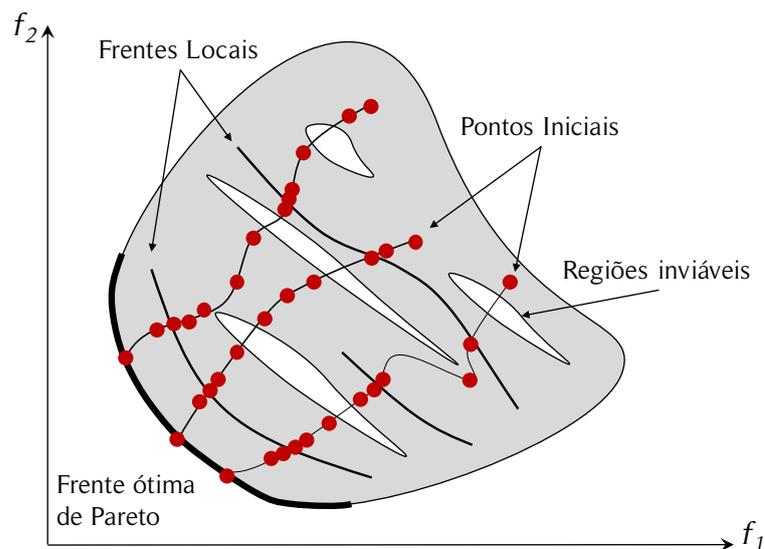


**Figura 3.6:** Conjunto ótimo de Pareto e sua frente (adaptado de Jaimes *et al.* (2009)).

frente ótima de Pareto corresponde a soluções ótimas globais de vários objetivos. No entanto, ao longo de um procedimento de otimização, os algoritmos devem superar uma série de dificuldades, tais como regiões inviáveis, soluções ótimas locais, regiões planas de funções objetivas, dentre outras, para convergir para a solução ótima global. Além disso, devido a limitações práticas, uma tarefa de otimização também deve ser concluída em um custo computacional razoável. Isso requer um algoritmo para encontrar um bom equilíbrio entre a extensão dessas tarefas que seus operadores devem realizar para superar as dificuldades acima mencionadas de forma confiável e rápida (Deb (2008)).

Como visto, a presença de múltiplos objetivos em um problema de otimização, em princípio, dá origem a um conjunto de soluções ótimas (conhecidas como soluções Pareto-ótimas), em vez de uma única solução ideal. Na ausência de qualquer informação adicional, uma destas soluções de Pareto-ótimas não pode ser considerada melhor do que outras. Isso exige encontrar tantas soluções Pareto-ótimas quanto possível. Métodos clássicos de otimização sugerem converter o problema de otimização multiobjetivo em um problema de otimização mono-objetivo, enfatizando uma solução Pareto-ótima. Quando um tal método é aplicado a fim de encontrar múltiplas soluções, o mesmo deve ser aplicado diversas vezes, esperando encontrar uma solução diferente em cada rodada do algoritmo (Wang *et al.* (2010)).

Na tentativa de contornar estes inconvenientes, algoritmos evolucionários são utilizados em otimização multiobjetivo, pois permitem que um conjunto de soluções ótimas de Pareto sejam encontradas com maior eficiência. Um exemplo clássico é o algoritmo genético elaborado por Deb *et al.* (2002), conhecido como NSGA-II (Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm), que implementa o conceito de dominância, ou seja, classificar a população total em *fronts* de acordo com o grau de sua dominância. Segundo o NSGA-II, os indivíduos que estão localizados no primeiro *front* são considerados as melhores soluções daquela geração, enquanto que no último *front* encontram-se as piores. Segundo o autor, usando esse conceito, pode-se encontrar



**Figura 3.7:** Otimização multiobjetivo empregando otimizações independentes (adaptado de Deb (2008)).

resultados mais consistentes (pontos mais próximos da região de Pareto) e que se adaptam melhor ao tipo do problema. Neste trabalho, o uso de algoritmo multiobjetivo evolucionário, como o NSGA-II, será aplicado na tentativa de solucionar o posicionamento de sensores com uso de múltiplas funções objetivos que será discutida no capítulo seguinte.

## 3.2 Redes Neurais Artificiais

As Redes Neurais Artificiais (RNAs) seguem a ideia do mecanismo de funcionamento dos neurônios biológicos do cérebro humano. Assim como os neurônios biológicos lidam com sinais eletroquímicos, RNAs lidam com entrada e saída de valores numéricos. Considerando que as redes neurais orgânicas aprendem com o ambiente que estão inseridas, RNAs aprendem a partir de um conjunto de determinada amostras de dados, a fim de prever os resultados desconhecidos de futuros conjuntos de dados (Hossain *et al.* (2016)).

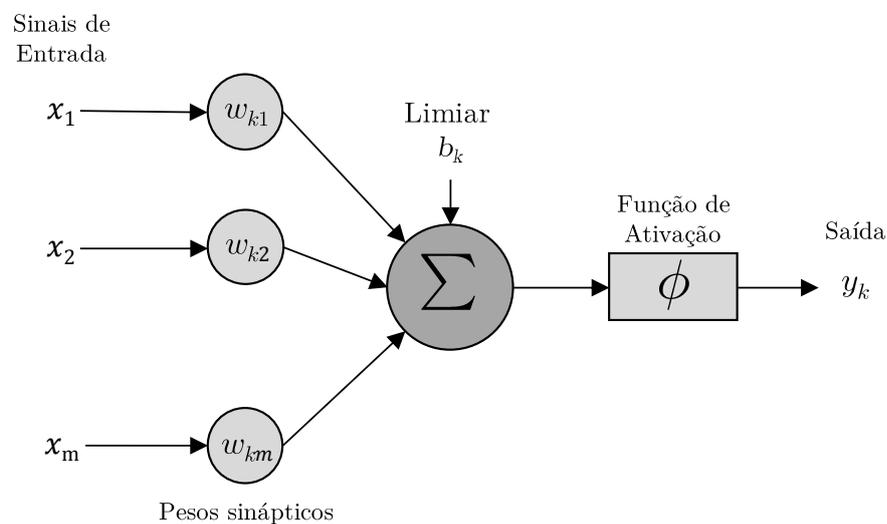
Uma ANN é uma estrutura que consiste em muitos números de neurônios interconectados como unidades de processamento. Cada unidade neural é estimulada pela soma dos sinais ponderados de entrada e transmite a resposta ativada para as outras unidades neurais conectadas. Uma rede neural é um processador distribuído massivamente em paralelo composto de unidades de processamento, que tem uma propensão natural para armazenar o conhecimento experiencial e torná-lo disponível para uso. As redes neurais artificiais se assemelham ao cérebro em dois aspectos (Gopalakrishnan *et al.* (2011b)):

1. O conhecimento é adquirido pela rede a partir do seu ambiente através de um processo de aprendizagem.

2. As forças de ligação entre neurônios, conhecidas como pesos sinápticos, são o conhecimento adquirido.

Um neurônio é uma unidade de processamento de informação que é fundamental para o funcionamento de uma rede neural. O diagrama de blocos mostrado na Figura 3.8 exibe o modelo de um neurônio, que constitui a base para a concepção de redes neurais. Os três elementos básicos da rede neural são:

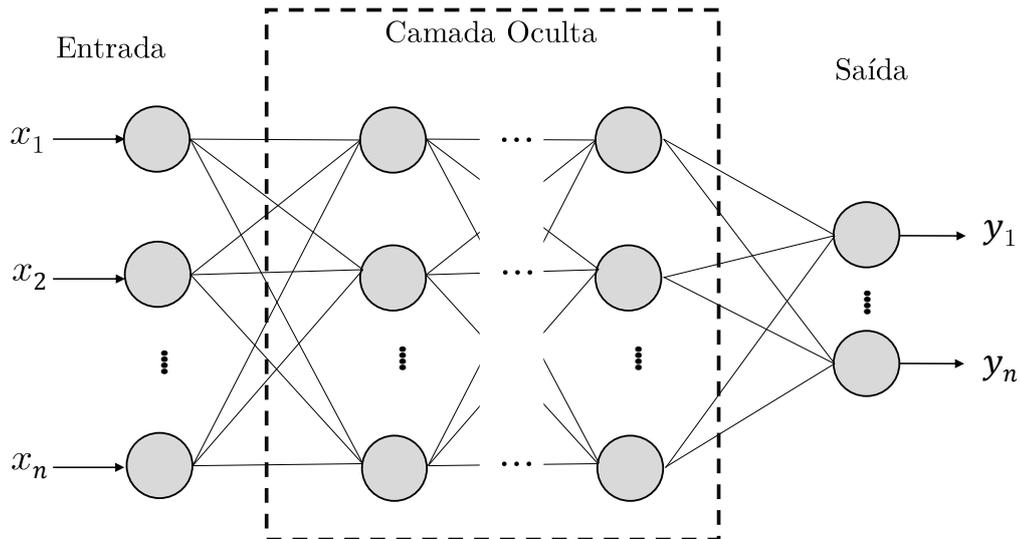
- **Sinapses:** representa os elos de ligação entre os neurônios. Especificamente, um sinal  $x_j$  na entrada da sinapse  $j$  conectado ao neurônio  $k$  é multiplicado pelo peso sináptico  $w_{ij}$ , sendo  $i$  o neurônio presente e  $j$  o neurônio em sequência.
- **Somador:** um somatório é usado para somar os sinais de entrada, ponderados por uma respectiva sinapses do neurônio. As operações aqui descritas constituem um neurônio linear.
- **Função de Ativação:** uma função de ativação é usada para limitar a amplitude da saída de um neurônio. Esta função de ativação inclui também o limiar, que é aplicado externamente e este, denotado por  $b_k$  tem o efeito de aumentar ou diminuir a entrada líquida da função de ativação.



**Figura 3.8:** Um exemplo de neurônio simples exibindo entrada, função de ativação e saída com uma camada escondida (adaptado de Gopalakrishnan *et al.* (2011b)).

Em termos matemáticos, o neurônio pode ser descrito como:

$$u_k = \sum_{j=0}^m w_{kj} x_j \quad (3.11)$$



**Figura 3.9:** Rede multicamada do tipo MLP (adaptado de Hossain *et al.* (2016)).

e

$$y_k = \phi(u_k + b_k) \quad (3.12)$$

sendo  $x_j$  os sinais de entrada e  $w_{kj}$  os pesos sinápticos do neurônio  $k$ . A saída do combinador linear  $u_k$  devido aos sinais de entrada,  $b_k$  é o limiar, enquanto que  $\phi(\cdot)$  é a função de ativação.

Existem diversos tipos de arquiteturas de redes neurais artificiais, cada uma possuindo características particulares. As RNAs costumam ser classificadas de acordo com sua construção e seus algoritmos de treinamento. Essa arquitetura é basicamente dada pela maneira em que os neurônios estão estruturados na rede. Em um âmbito geral, existem três classes principais de redes: *Single Layer Feedforward Networks*, *Multilayer Feedforward Networks* e *Recurrent Networks*. O tipo de rede escolhida neste trabalho é a rede com propagação progressiva, ou *Multilayer Perceptron* com aprendizagem pelo erro (*backpropagation*) (Gopalakrishnan *et al.* (2011b)).

### 3.2.1 Redes Multilayer Perceptron (MLP)

De acordo com a teoria contida em da Silva *et al.* (2016), redes MLP são redes de múltiplas camadas, compostas por camada de entrada, camada(s) oculta(s) e camada de saída (Figura 3.9). Os nós presentes nas camadas ocultas são chamados neurônios ocultos. Ao adicionar uma ou mais camadas ocultas, a rede é habilitada para extrair estatísticas de ordem superior. Diz-se que a rede neural está totalmente conectada no sentido de que cada nó em cada camada está conectado a cada outro nó na camada dianteira adjacente.

A especificação da configuração topológica de uma rede MLP, bem como o número de camadas intermédias e as suas respectivas número de neurônios, depende de vários fatores. O ajuste das ponderações e os limiares de cada uma de uma rede MLP é feito por meio do emprego de um processo de treinamento supervisionado, ou seja, para cada amostra de dados de entrada, que deve ser a respectiva saída desejado (resposta). O algoritmo de aprendizagem utilizados durante o processo de formação de uma MLP é chamado *backpropagation*.

O processo de formação de redes MLP usando o algoritmo *backpropagation* é feito pela aplicação sucessiva de duas fases específicas. A primeira fase é chamada de *forward propagation*, onde sinais de entrada  $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  de uma dada amostra a partir do conjunto de treinamento são inseridos nas entradas de rede e são propagadas camada por camada até a produção das saídas correspondentes. Nesta fase pretende-se obter as respostas a partir da rede, tendo em conta apenas os valores atuais dos pesos sinápticos e limiares de seus neurônios ( $b_k$ ), que permanecerá durante a execução não modificada nesta fase.

Em seguida, as respostas produzidas pelas saídas de rede estão disponíveis são comparadas com as respectivas respostas desejadas, uma vez que é um processo de aprendizagem supervisionada. Levando-se em consideração os erros obtidos pela resposta obtida e desejada, é aplicado um segundo estágio do algoritmo *backpropagation*, conhecido como *backward propagation*. Ao contrário da primeira fase, as modificações (ajustes) dos pesos sinápticos e limiares de todos os neurônios da rede são executados durante esta fase. Em suma, a aplicação sucessiva de *forward* e *backward propagation* permite com que os pesos sinápticos se ajustem a cada iteração, resultando em uma redução gradual da soma dos erros produzidos pelas respostas da rede em relação às respostas desejadas (da Silva *et al.* (2016)).

Geralmente, uma camada oculta é suficiente. Poucos neurônios na camada oculta tornarão difícil a aproximação da função, ao passo que muitos neurônios na camada oculta levarão a um *overlearning*, onde a rede neural perde sua capacidade de generalização. Selecionar o número adequado de neurônios na camada oculta é uma arte e normalmente é feito usando um procedimento de tentativa e erro para garantir que a rede neural funciona bem com dados de treinamento e teste. Alguns dados de *input-output* devem ser sempre reservados para testes e não devem ser usados para treinamento. Os dados de teste são inestimáveis na avaliação da capacidade de generalização de redes neurais. Se a rede apresentar um erro baixo com dados de treinamento, mas não tiver um bom desempenho com os dados do teste, então problemas de *overfitting* são considerados (Pawar e Ganguli (2011)).

# Capítulo 4

## Formulação Numérica do Problema de Identificação de Danos

### 4.1 Modelagem do Problema Direto por Elementos Finitos

Modelos matemáticos adequados são necessários para o pós-processamento da resposta para prever a localização dos danos. Dentre os modelos matemáticos mais utilizados está o método de elementos finitos (MEF). O MEF é uma técnica numérica poderosa para resolver problemas governados por equações diferenciais em domínios complexos. É normalmente adotado para resolver problemas diretos em estruturas, isto é, para um determinado carregamento (entrada), pode-se determinar as deformações que as estruturas sofrem (saída). No entanto, o monitoramento da integridade estrutural requer uma estimativa do estado da estrutura a partir da saída medida (deformação, tensões, frequências naturais, modos de vibração, etc.) para uma determinada entrada predefinida. Portanto, SHM cai sob o domínio do problema de identificação do sistema. Esses problemas também são chamados de problemas inversos (Gopalakrishnan *et al.* (2011a)). Neste capítulo, não vamos abordar a fundamentação teórica e procedimento do MEF como tal, já que muitos textos clássicos e com muita riqueza em detalhes já estão disponíveis nesta área. O uso do MEF neste trabalho se justifica pela aplicação da técnica de atualização de modelos ou *finite element updating*, onde o modelo numérico em elementos finitos será acoplado à técnicas inteligentes de processamento de sinais e ambas trabalharão em conjunto na tentativa de localizar danos estruturais.

De acordo com Simoen *et al.* (2015), a atualização estrutural do modelo em elementos finitos serve para uma ampla gama de propósitos. Pode, por exemplo, ser aplicada para verificação e validação de um *design*, para obter previsões melhoradas de resposta estrutural, ou simplesmente para identificar características desconhecidas do sistema. Uma das áreas de

aplicação mais proeminentes da atualização de modelos em vibração é encontrada no monitoramento de saúde estrutural (SHM). O princípio básico por trás disso consiste em assumir que o dano estrutural localizado resulta em uma redução local da rigidez. Como tal, a atualização dos parâmetros de rigidez do modelo em elementos finitos em vários estados de danos proporciona um meio (não destrutivo) para investigar minuciosamente e precisamente a condição da determinada estrutura.

Como mencionado por Boller (2000) e enfatizado por Ganguli (2001), não há necessidade de um sistema SHM para localizar danos com precisão milimétrica. O custo e o esforço envolvidos na previsão de danos a um alto nível de precisão pode ser proibitivo. Além disso, devido às imprecisões de medição, no modelo e no processamento de sinal, um sistema SHM que alega prever dano com grande precisão é susceptível de dar falsos alarmes. Uma ideia melhor, segundo Boller (2000) é localizar os danos em cerca de um metro de precisão usando a metodologia SHM e, em seguida, usar métodos de inspeção tradicionais para uma análise mais detalhada da área danificada. Logo, a modelagem do dano como uma redução de rigidez local neste trabalho justifica a escolha na interação com toda a metodologia proposta.

Como já exposto, o método é utilizado para calcular parâmetros modais, como frequência natural, modo de vibração e distribuição de energia de deformação de cada modo para uma placa composta laminada com ou sem delaminação. Introduzindo um sistema de coordenadas global cartesiano  $x, y, z$  em uma placa retangular com espessura uniforme, os deslocamentos de um ponto  $(x, y, z)$  na placa ao longo dos eixos  $x, y$  e  $z$  são  $u, v$  e  $w$ , respectivamente. O elemento finito usado neste papel é o elemento de casca retangular de oito nós. Para cada nó, existem seis graus de liberdade, isto é, translações e rotação nos eixos. Para um elemento finito de oito nós com seis graus de liberdade por nó, a matriz de rigidez do elemento pode ser escrita como (Yam *et al.* (2004)):

$$[K^e] = \int_{V_e} [B]^T [A] [C] [A]^{-1} [B] dV \quad (4.1)$$

sendo  $[C]$  a matriz de constante elástica do material,  $[A]$  a matriz de transformação de coordenadas e  $[B]$  representa a matriz relacionada à função de forma do elemento.

Assumindo que a placa composta possui um movimento harmônico com frequência angular  $\omega$ , e usando o princípio de Lagrange, a equação do movimento para a vibração livre da placa composta é reduzida a um problema padrão do autovalor como segue:

$$([K] - \omega^2 [M]) \{\delta\} = 0 \quad (4.2)$$

sendo  $[M]$  a matriz de massa global. Os parâmetros modais da placa, tais como modo de

**Tabela 4.1:** Propriedades do material considerado neste estudo.

Propriedade	Valor
$E_1$	83.02 MPa
$E_2$	5.13 MPa
$G_{12}$	8.37 MPa
$\nu_{12}$	0.32
$\rho$	1408.10 $kg/m^3$

vibração, frequência natural e a deformação modal, podem ser obtidos resolvendo a Equação 4.2.

Sobre o modelo empregado neste estudo, estudos bidimensionais em estruturas do tipo placas são considerados. A placa em questão foi modelada fazendo uso de elementos de casca (*shell*) com oito nós e seis graus de liberdade em cada um de seus nós. A qualidade de uma boa malha é imprescindível na obtenção de resultados confiáveis. Optou-se pelo uso de uma malha estruturada, pois a estrutura em questão é uniforme, bidimensional e ainda acrescenta-se o fato de se obter uma economia computacional optando-se por tal configuração. A quantidade de elementos foi também escolhida de tal forma a se obter uma convergência suficiente nos valores das respostas estudadas. O Capítulo 5 trará maiores informações sobre a decisão de se usar uma estrutura discretizada em  $10 \times 10$  elementos.

No tocante à geometria, o problema direto foi modelado como uma placa quadrada de lado igual a 30 centímetros. A estrutura se constitui de um laminado simétrico de material compósito constituído de 12 camadas de diferentes orientações dispostas da forma  $[0/90]_{3S}$ . Salienta-se que este trabalho visa exclusivamente o estudo do método de detecção de danos em laminados de material compósito, não dando ênfase nos parâmetros geométricos e características específicas do material laminado em questão. A Tabela 4.1 exibe o conjunto de propriedades principais que foram empregadas na modelagem do problema via MEF.

Neste estudo, os resultados modais calculados para diferentes condições estruturais (isto é, estados não danificados e danificados) são usados nos correspondentes algoritmos de identificação de danos para localizar danos simulados. Os seguintes pressupostos e passos, abordados por Bayissa e Haritos (2007), são utilizados para calcular os índices/desempenho de danos: (i) a força de excitação é assumida como um processo aleatório ergódico estacionário, (ii) os efeitos dos danos internos são mais aparentes em uma redução local da rigidez; (iii) a influência do amortecimento na exatidão global no método de identificação de danos global proposto é considerada não crítica enquanto forem utilizados modos de vibração de baixa frequência. Para frequências modais inferiores bem separadas, as mudanças nas propriedades de amortecimento devido a danos são assumidas como consistentes entre os modos. Por tal circunstância, desconsidera-se amortecimento na modelagem numérica do problema.

### 4.1.1 Redução de Rigidez local

Discutiu-se no Capítulo 1 que existe um acréscimo da redução de rigidez devido ao aumento do tamanho da delaminação (Lagace (1989)). Ainda, diversos outros trabalhos (Zhang *et al.* (1999); Takeda e Ogihara (1994); Zhang *et al.* (1994); Kashtalyan e Soutis (2000); Ogihara e Takeda (1995)) estudaram, abordaram e deixaram evidente a redução de rigidez devido aos danos de delaminações. Para isto, a modelagem de delaminações por meio de uma abordagem numérica da redução percentual de rigidez local é válida.

Segundo Dos Santos *et al.* (2000), para uma estrutura discreta, não danificada, a equação de autovalores pode ser escrita como:

$$Kq_i = \lambda_i Mq_i \quad \text{para } i = 1, \dots, n \quad (4.3)$$

sendo  $K$  e  $M$  as matrizes de rigidez e massa, respectivamente.  $\lambda_i$  o  $i$ -ésimo autovalor,  $q_i$  o  $i$ -ésimo autovetor e  $n$  é o número de modos avaliados ou disponíveis para a estrutura em questão.

Se a estrutura é então sujeita a algum tipo de dano, sua rigidez é então alterada (como visto no Capítulo 1, este campo de pesquisa trata o dano estrutural como uma alteração local de rigidez estrutural), logo a Equação 4.3 pode ser reescrita como:

$$\tilde{K}\tilde{q}_j = \tilde{\lambda}_j M\tilde{q}_j \quad \text{para } j = 1, \dots, m \quad (4.4)$$

sendo  $\tilde{K}$  a matriz de massa,  $\tilde{\lambda}_j$  o  $j$ -ésimo autovalor,  $\tilde{q}_j$  o  $j$ -ésimo autovetor e  $m$  o número de modos disponíveis ou calculados da estrutura danificada.

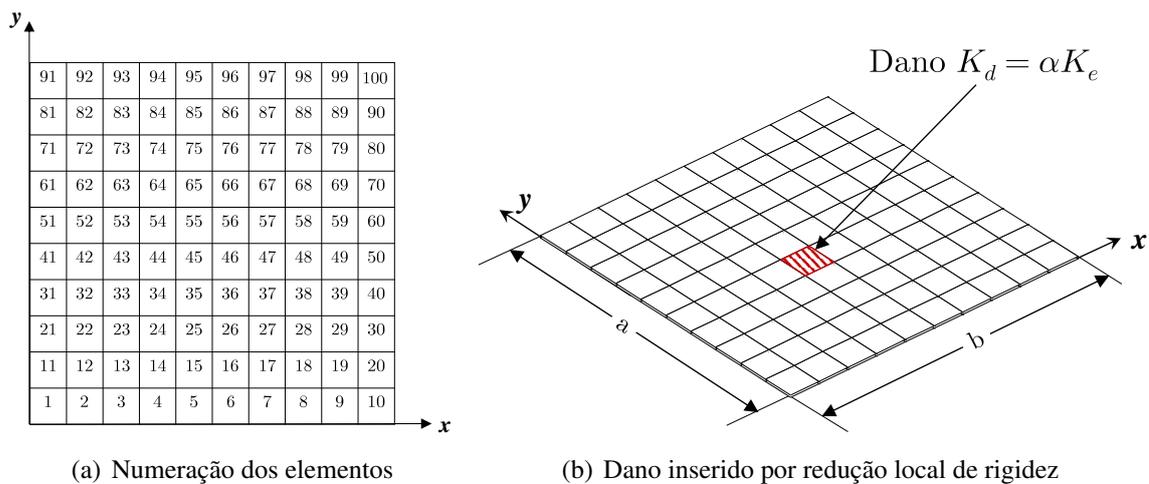
Aqui, a matriz de massa  $M$  da estrutura é mantida constante mesmo após a inserção do dano estrutural, o que traduz em caráter matemático o comportamento de uma delaminação, que se trata de um dano comum e perigoso em materiais compósitos, onde há desprendimento de camadas sem que haja perda de material (massa).

As matrizes  $K$  e  $M$  são assumidas como simétricas positivas definidas e, portanto, os autovalores são positivos e os autovetores podem ser tomados como  $K$ -ortogonais. Condições semelhantes se aplicam a  $\tilde{K}$ ,  $\tilde{\lambda}_j$  e  $\tilde{q}_j$ . Considerando a normalização de massa dos modos, as condições de ortogonalidade são definidas por:

$$\tilde{q}_i^T \tilde{K} \tilde{q}_j = \delta_{ij} \tilde{\lambda}_i \quad \text{com} \quad \begin{cases} \delta_{ij} = 0 & \text{para } i \neq j \\ \delta_{ij} = 1 & \text{para } i = j \end{cases} \quad (4.5)$$

Uma vez que a matriz de rigidez da estrutura danificada é dada por  $\tilde{K} = K - \delta K$ , a perturbação na matriz correspondente ao elemento  $e$  é dada por  $\delta K_e = \alpha K_e$ , sendo  $\alpha \in [0, 1]$  um multiplicador da rigidez local. O parâmetro  $\alpha$  traduz a severidade do dano estrutural, podemos escrever como  $\beta$  o percentual de redução de rigidez local como  $\beta = (1 - \alpha) \times 100$ .

Como mencionado anteriormente, a placa em estudo foi discretizada em 100 elementos finitos, o sistema de referência para tais elementos é exibido na Figura 4.1, ademais, um elemento será pré-definido como elemento danificado onde as metodologias computacionais aqui desenvolvidas serão aplicadas.



**Figura 4.1:** Modelagem da estrutura danificada por MEF e sistema de referência dos elementos.

## 4.2 Otimização do Posicionamento dos Sensores

O problema básico da detecção de danos e falhas é deduzir a existência de um dano em uma estrutura a partir de medições feitas em sensores distribuídos. Sabe-se que a qualidade destas medições, isto é, a qualidade do monitoramento estrutural, é em grande medida, dependente de onde os sensores estão localizados na estrutura. Questões de custo e praticidade impedem a instrumentação de todos os pontos de interesse na estrutura e levam à seleção de um conjunto menor de locais de medição (Barthorpe e Worden (2009)). O objetivo deste estudo é indicar o problema da otimização de posicionamento de sensores (*Sensor Placement Optimization - SPO*) e descrever alguns métodos que foram investigados para sua solução além de propor uma otimização alternativa de escolha do posicionamento ótimo destes sensores. A discussão a seguir centra-se em técnicas de otimização de sensores com base na dinâmica estrutural.

Tradicionalmente, uma distribuição bem sucedida de sensores tem sido fortemente dependente do conhecimento e da experiência daqueles que realizam testes experimentais. Métodos práticos, por exemplo, escolhendo locais próximos aos anti-nós do modos de vibração de baixa

frequência, são combinados para criar distribuições de sensores coerentes (Barthorpe e Worden (2009)). Contudo, por muita das vezes, um único modo de vibração não possui informação suficiente sobre um estado estrutural danificado, sendo necessário a utilização de um conjunto de modos. Logo, uma distribuição nos anti-nós não seria viável para um número pré-definido de sensores.

Segundo a teoria abordada em (Barthorpe e Worden (2009)), o objetivo do posicionamento do sensor pode ser declarado como a necessidade de selecionar um subconjunto de locais de medição a partir de um grande conjunto finito de localizações, de modo a representar o sistema com a maior precisão possível utilizando um número limitado de graus de liberdade acessível. Isso pode ser visto como um processo de decisão em três etapas:

- Quantidade de sensores - Quantos sensores precisam ser colocados na estrutura para permitir um teste dinâmico satisfatório ?
- Otimização de posicionamento de sensores - Onde estes sensores devem estar localizados para obter dados com maior precisão?
- Avaliação - Como pode o desempenho de diferentes configurações de sensores ser medido?

Em geral, sobre o primeiro aspecto, o requisito mínimo para que o sistema seja observável é que o número de sensores requeridos não pode ser menor do que o número de modos a ser identificado, com um limite superior normalmente imposto pelo custo ou disponibilidade do equipamento. O segundo aspecto é a área que tem atraído a maior parte do interesse, e objeto de estudo neste trabalho. Para o número limitado de sensores disponíveis, o problema é o desenvolvimento de uma medida de desempenho de posicionamento de sensor adequada a ser otimizada e a seleção de um método apropriado. Algumas abordagens requerem um único cálculo a ser realizado, algumas são iterativas e muitas outras assumem a forma de uma função objetivo à qual uma técnica de otimização deve ser aplicada. O terceiro e último aspecto inclui várias possibilidades para avaliar o desempenho de conjuntos de sensores escolhidos. Neste trabalho, preferencialmente o item de posicionamento será abordado, onde um número pré-definido de sensores será fixado.

Além disso, a questão da colocação de sensores atrai muita atenção da academia e da indústria, especialmente devido ao número crescente de grandes estruturas instrumentadas para monitoramento na última década. Isto deve-se em parte a razões econômicas, ao elevado custo dos sistemas de aquisição de dados (sensores e seus instrumentos de apoio), em parte devido às limitações de acessibilidade estrutural (Rao *et al.* (2014)).

O conjunto de graus de liberdade medidos na maioria das estruturas de grande porte, geralmente os deslocamentos dos modos em baixa frequência, fornecem informações suficientes

para descrever o comportamento dinâmico de um sistema estrutural com precisão suficiente para permitir que seu estado de estrutural e/ou modificações relevantes sejam determinadas de forma eficaz. Assim, o problema fundamental é quantas e quais graus de liberdade devem ser considerados no processo de identificação estrutural. Para resolver este problema, devem ser tidos devidamente em conta fatores econômicos que podem exigir que um número limitado de sensores seja colocado em locais acessíveis na estrutura real (Rao e Anandakumar (2007)). Ainda segundo Rao e Anandakumar (2007), é crucial que os sensores estejam localizados nos locais mais vantajosos. Caso contrário, as propriedades modais incompletas serão medidas e uma avaliação precisa do monitoramento da saúde estrutural será impossível.

Alguns índices de desempenho foram desenvolvidos para o problema da distribuição de sensores, mas é apenas comparativamente recente que o problema foi considerado na perspectiva em SHM, segundo Rao e Anandakumar (2007). Neste trabalho, adotou-se algumas estratégias para o posicionamento ótimo dos sensores. Primeiramente, fez-se uso de alguns dos principais critérios matriciais existentes na literatura. Uma segunda alternativa, aqui proposta, diz respeito à interpolação de superfície para a reconstrução dos modos de vibração e em uma terceira abordagem, lançou-se mão de otimização multiobjetivo ambicionando adquirir as características ótimas de cada uma das estratégias estudadas. A seguir, será realizada uma abordagem sintetizada sobre os índices de localização ótima de sensores utilizados neste estudo.

## 4.2.1 Métodos Matriciais para o posicionamento dos Sensores

### Matriz de informação de Fisher

Conforme mostrado por Kammer (1991), a disposição dos sensores pode ser dada na forma de um problema de estimação com uma correspondente matriz de informação de Fisher (FIM) dada por

$$Q = \phi_s^T W \phi_s \quad (4.6)$$

em que  $W$  é uma matriz de ponderação. A resposta modal é estimada com base nos dados medidos pelos sensores. A maximização de  $Q$  resulta na minimização da matriz de covariância de erro correspondente, o que resulta na melhor estimativa. Os sensores devem ser colocados de tal forma que  $Q$  seja maximizado numa norma matricial apropriada. A maximização do determinante FIM é um critério comumente usado para a estimação de parâmetros ótimos. A maximização do determinante da matriz de informação maximizará uma combinação da independência espacial das partições modais alvo e da sua intensidade de sinal nos dados do sensor (Kammer e Tinker (2004)).

Foi mostrado que a FIM pode ser decomposta nas contribuições de cada localização de sensor candidato na forma (Kammer (1991)):

$$Q = \sum_{i=1}^{n_c} \phi_{si}^T \phi_{si} = \sum_{i=1}^{n_c} Q_i \quad (4.7)$$

sendo  $\phi_{si}$  a  $i$ -ésima linha da matriz de partição de modo associado à  $i$ -ésima localização de sensor candidato,  $n_c$  é o número de sensores candidatos.

Então, os sensores devem ser colocados de modo a fornecer a melhor estimativa da resposta modal alvo. A maximização do determinante da matriz de informação é escolhida como o critério de posicionamento do sensor, pois resulta na maximização da intensidade do sinal e na independência das direções principais (Rao *et al.* (2015)).

## Entropia de Informação

Um método potencial na categoria de distribuição ótima de sensores, a chamada entropia de informação (ou entropia de Shannon), é amplamente adotado para abordar a incerteza de medição, encontrando a melhor combinação de testes estruturais que podem minimizar a consequência negativa da incerteza (Zhou *et al.* (2017)). A importância da entropia é que é uma medida de incerteza nos valores dos parâmetros, uma vez que avalia a desordem nas previsões (Papadopoulou *et al.* (2014)).

A distribuição ótima do sensor é obtida minimizando a alteração na entropia de informação  $H(D)$ , dada por:

$$H(D) = E_{\theta}[-\ln p(\theta|D)] = - \int p(\theta|D) \ln p(\theta|D) d\theta \quad (4.8)$$

sendo  $\theta$  é o conjunto de parâmetros incertos (por exemplo, rigidez, parâmetros modais, etc.),  $D$  são os dados dos testes dinâmicos e  $E_{\theta}$  é a esperança matemática com respeito a  $\theta$ .

## Independência efetiva

O objetivo do método da Independência Efetiva (Efi) é selecionar as posições das medições que tornam os modelos de interesse tão linearmente independentes quanto possível, fornecendo informações suficientes sobre as respostas modais alvo nas medições. Segundo Zhu *et al.*

(2015), a resposta estrutural medida pode ser expressa como:

$$u = \Phi q + w = \sum_{i=1}^N q_i \phi_i + w \quad (4.9)$$

sendo  $\Phi$  é a matriz contendo os modos de vibração alvo obtidos pelo MEF,  $q$  é o coeficiente do vetor de resposta e também é coordenada modal, e  $w$  é um vetor de ruído de sensor, assumindo o processo aleatório estacionário com um valor médio zero. Assumindo que este processo é uma estimativa imparcial efetiva, a matriz de covariância  $J$  é obtida como:

$$J = E [(q - \hat{q}) - (q - \hat{q})^T] - [\sigma^{-2} \Phi^T \Phi]^{-1} = Q^{-1} \quad (4.10)$$

sendo  $Q$  a matriz de informação de Fisher assumindo que o ruído medido é independente e tem as mesmas propriedades estatísticas. A matriz  $Q$  pode ser escrita como

$$Q = \sigma^{-2} \Phi^T \Phi = \sigma^{-2} A \quad (4.11)$$

Então, a maximização de  $Q$  é equivalente à maximização de  $A$ , e assim  $A$  pode ser usada para simplificar FIM. Construindo a matriz  $E_D$ , tem-se:

$$E_D = \Phi [\Phi^T \Phi]^{-1} \Phi^T \quad (4.12)$$

no qual  $E_D$  é a matriz de independência efetiva. Os elementos diagonais da matriz  $E_D$  representam a contribuição dos pontos candidatos à matriz modal linearmente independente.

### Energia cinética

O método da energia cinética (*Kinetic Energy* - KE) assume que os sensores terão a máxima observabilidade dos modos de interesse se os sensores forem colocados em pontos de KE máxima. Segue-se um procedimento semelhante ao utilizado no método EfI. A energia cinética é definida como (Barthorpe e Worden (2009)):

$$KE_{ij} = \Phi_{ij} \sum_s M_{is} \Phi_{sj} \omega_j^2 \quad (4.13)$$

sendo  $M$  a matriz de massa. A localizações dos sensores que oferecem as mais elevados índices de  $KE$  são selecionados como os pontos de medição. Como o método seleciona os locais do sensor com o maior sinal de amplitude, as relações sinal/ruído tendem a ser elevadas, tornando o método atraente para uso em condições ruidosas. No entanto, em contraste com EfI, o método KE não considera a independência linear dos modos alvo, uma consideração importante para a identificação modal.

### Resíduo do ponto de condução médio

Uma desvantagem da abordagem da EfI é que o algoritmo pode selecionar localizações de sensores que exibem baixa força de sinal, tornando o sistema vulnerável a condições ruidosas. O método de resíduo do ponto de condução médio (*Average Driving-Point Residue* - ADPR) oferece uma medida da contribuição de qualquer ponto para a resposta modal global. Se os  $j = 1 \dots N$  modos de interesse devem ser medidos e  $\omega_j$  é o autovalor do  $j$ -ésimo modo, o ADPR no  $i$ -ésimo grau de liberdade pode ser calculado a partir da equação (Barthorpe e Worden (2009)):

$$ADPR_i = \sum_{j=1}^N \frac{\Phi_{ij}^2}{\omega_j} \quad (4.14)$$

### Produto de autovetores

O método do Produto dos Autovetores (*Eigenvalue Vector Product* - EVP) calcula o produto dos componentes dos autovetores para a localização dos sensores candidatos para a gama de  $N$  modos a serem medidos: um máximo para este produto é um ponto candidato ótimo de medição. O EVP do  $i$ -ésimo grau de liberdade é calculado como (Barthorpe e Worden (2009)):

$$EVP_i = \prod_{j=1}^N |\Phi_{ij}| \quad (4.15)$$

## 4.2.2 Interpolação dos Modos de Vibração

Alternativamente aos critérios matriciais de posicionamento ótimo dos sensores, propõe-se, em uma abordagem alternativa, a obtenção de posições ótimas dos sensores a partir da reconstrução dos modos por meio de interpolação dos pontos de sensoriamento. A ideia principal do critério de interpolação é combinar o modo de vibração completo (obtido numericamente por MEF) com o modo de vibração reduzido obtido por meio de interpolação com os pontos

ótimos colhidos por meio da otimização dos sensores. Diz que o modo de vibração é reduzido, pois o mesmo será reconstruído a partir de um número reduzido de pontos (sensores). Quanto menor a diferença entre os dois modos de vibração, mais forte será a capacidade do plano de otimização a capturar a característica modal da estrutura.

Para tal, a partir de um número fixo de sensores, o método de otimização busca por melhores posições dos sensores em que se possa reconstruir o modo de deformação modal de maneira mais fiel possível. Talvez para um modo particular essa tarefa possa até parecer simples se considerando um estrutura simples ou unidimensional optando pela localização dos anti-nós. Contudo, quando se deseja obter o maior grau de reconstrução possível para um número  $n$  de modos, em uma estrutura mais complexa, tal tarefa se torna altamente complexa.

Para tal interpolação, fez-se uso de uma *spline* de suavização de placas finas a partir de  $x$  pontos distintos no plano, sendo estes pontos considerados os sensores, e os valores conhecidos nestes pontos  $y$ . A *spline* de suavização de placa fina  $f$  é o minimizador da soma ponderada (MathWorks (2002)):

$$pE(f) + (1 - p)R(f) \quad (4.16)$$

Com  $E(f)$  a medida de erro:

$$E(f) = \sum_j |y - f(x)|^2 \quad (4.17)$$

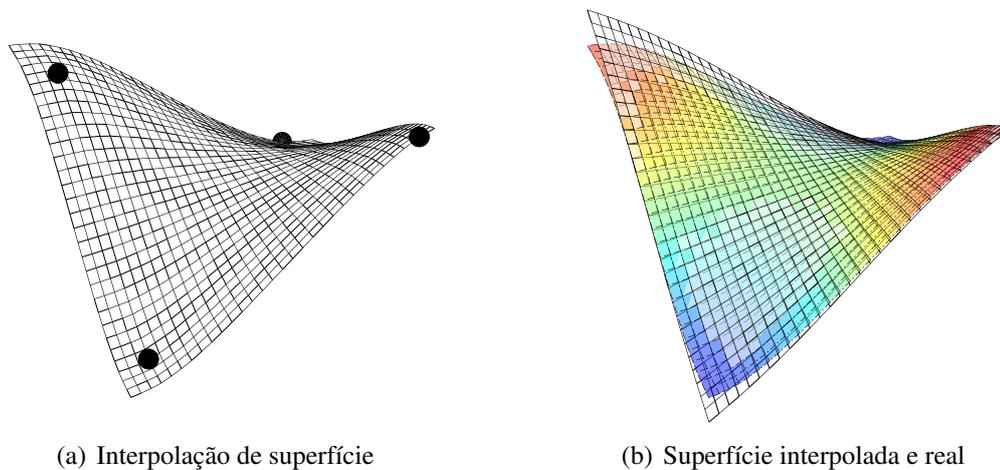
E  $R(f)$  a medida de regosidade:

$$R(f) = \int (|D_1 D_1 f|^2 + 2|D_1 D_2 f|^2 + |D_2 D_2 f|^2) \quad (4.18)$$

$D_i f$  denota a derivada parcial de  $f$  em relação ao seu  $i$ -ésimo argumento. O parâmetro de suavização  $p$  é escolhido de modo que  $(1 - p)/p$  seja igual à média das entradas diagonais da matriz  $A$ , com  $A + (1 - p)/p * I(n)$  a matriz de coeficientes do sistema linear para os  $n$  coeficientes da *spline* de suavização a serem determinados, sendo  $I$  definida como a matriz identidade.

Logo, o problema de otimização da posição dos sensores para a reconstrução ótima dos modos de deformação modais é obtido tomando a minimização da função objetivo  $J_7 = \min(\|\Phi^{FEM} - \Phi^{Interpolado}\|_F)$ , sendo  $\Phi^{FEM}$  o modo numérico obtido por elementos finitos, onde se tem conhecimento da informação modal em diversos pontos nodais da estrutura, e

$\Phi^{Interpolado}$  o modo reconstruído a partir de um número limitado de sensores em localização ótimas, que será obtida pelos algoritmos genéticos. A minimização da diferença da norma Frobenius resultará na melhor disposição dos sensores. Optou-se pelo uso da norma Frobenius pois esta norma não depende do número de linhas e colunas de determinada matriz, que segundo Angeles e Park (2008) é mais significativa na engenharia. A norma ponderada de Frobenius, na verdade, produz o valor raiz quadrático médio (rms) do conjunto de valores singulares. A Figura 4.2 exibe a interpolação do primeiro modo de vibração de uma placa laminada quadrada a partir de quatro sensores. A posição destes sensores foi obtida pela minimização da função  $J_7$  em questão, gerando um superfície modal realmente fiel ao modo de deformação original.



**Figura 4.2:** Interpolação de superfície a partir da posição ótima dos sensores. Modo real (a) e superfície interpolada (b).

### 4.2.3 Modelagem do problema inverso de otimização de sensores

Ainda convém lembrar que o algoritmo genético torna-se um algoritmo útil neste estudo, pois o problema de otimização de posicionamento dos sensores é caracterizado pelo fato de que as variáveis de projeto não são contínuas, mas discretas, por isso emprega-se o uso de programação inteira. O objetivo nesta parte do trabalho é aplicar o método evolutivo de otimização de posicionamento de sensores utilizando algoritmo genético, para a identificação modal precisa em estruturas mecânicas. Um problema de otimização de tipo discreto usando algoritmo genético é formulado definindo as posições do sensor de acordo com os critérios citados nos parágrafos anteriores. Os parâmetros modais (isto é, modos de vibração e frequências naturais) da estrutura real são obtidos numericamente utilizando o modelo em elementos finitos.

Resumidamente, o problema de distribuição ótima dos sensores é exibido na Tabela 4.2, onde os critérios devem ser maximizados ou minimizados.

**Tabela 4.2:** Estudo da convergência de malha para os primeiros modos de vibração.

Método	Função Objetivo
Matriz de Informação de Fisher	$J_1 = \max \det(Q) $
Entropia de Informação	$J_2 = \min(H(D))$
Independência Efetiva	$J_3 = \max(E_D)$
Energia Cinética	$J_4 = \max(KE)$
Ponto de Condução Médio	$J_5 = \max(ADPR)$
Produto dos Autovetores	$J_6 = \max(EVP)$
Interpolação dos Modos	$J_7 = \min(\ \Phi^{FEM} - \Phi^{Interpolado}\ _F)$

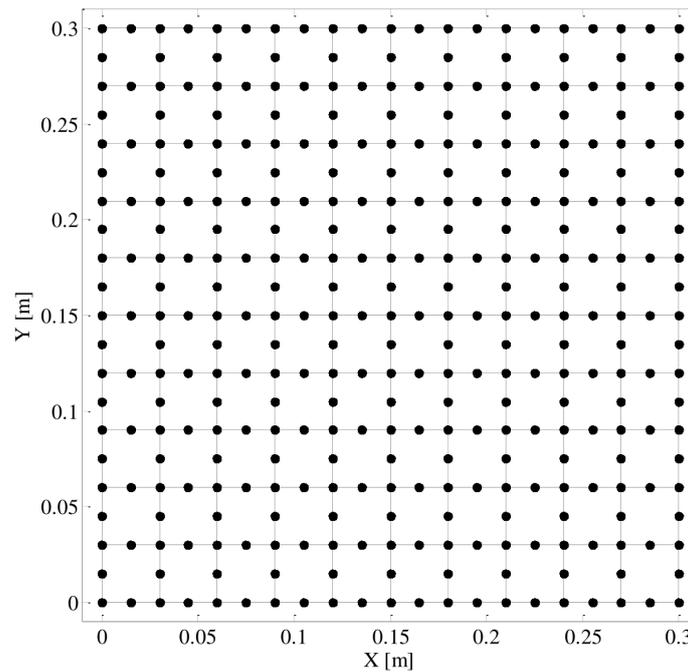
Assim, para identificar a localização ótima de  $n$  candidatos sensores, algoritmos globais de otimização serão empregados para tal fim. Por exemplo, tratando-se na hipótese de se trabalhar com 9 sensores distribuídos na superfície da estrutura, levando-se em consideração um espaço de busca composto por 341 nós possíveis, isto resultaria em uma combinação de  $1.55 \times 10^{17}$  possíveis localizações. O tempo de avaliação em todas estas possíveis combinações justifica o uso de métodos avançados de otimização.

A formulação matemática do problema inverso pode ser resumida em maximizar ou minimizar  $J_i$ , com  $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$ . Sujeito as restrições impostas de limites inferiores e superiores em relação ao número máximo de nós e do tipo  $x_i - x_{i-1} \geq 1$ , sendo  $x_i$  a posição do nó candidato. Esta restrição é necessária para não obter múltiplos sensores em uma mesma localização. O espaço de busca é exibido na Figura 4.3 onde as possíveis 341 posições de sensores são consideradas.

Adicionalmente, para o caso particular de interpolação dos modos de vibração, todas as restrições anteriores são consideradas, todavia é necessário a adição de uma outra equação de restrição para que as posições dos sensores na placa não sejam colineares, pois assim não seria possível a interpolação destes pontos para a reconstrução do modo. Para solucionar esse viés, incorporou-se a restrição  $g_7(x) : \bar{R}^2(x_i) < 1$ , sendo  $\bar{R}^2$  o coeficiente de determinação de uma curva por meio de ajuste linear. Sendo este valor sempre menor que 1, significa que os pontos (sensores) nunca serão colineares entre si.

### 4.3 Critérios e Métricas para a Identificação de Danos

Um método de identificação de danos não-destrutivo confiável e eficaz é crucial para manter a segurança e a integridade das estruturas. As técnicas de identificação de danos não destrutivos mais comuns incluem a inspeção visual e os ensaios não destrutivos convencionais. No entanto, as técnicas de inspeção visual são incapazes de detectar danos que estão embutidos em uma estrutura ou invisível aos olhos humano, enquanto inspeções convencionais requerem que a vizinhança danificada seja conhecida *a priori* e esteja acessível para os testes (Fan e Qiao (2012)). Assim, os esforços de pesquisa em todo o mundo têm sido focados na resposta à



**Figura 4.3:** Configuração das possíveis posições dos sensores.

vibração método de identificação de danos para superar essas dificuldades. Como reportado nos parágrafos anteriores, sabe-se que a mudança local de rigidez induz a uma alteração da resposta dinâmica, uma vez que esta última é dependente da matriz de massa e rigidez. Para comprovar que de fato a resposta modal, mais precisamente a deformação modal é alterado em função da presença de um dano local, duas métricas relevantes serão introduzidas: a diferença dos modos de vibração e a curvatura modal.

### 4.3.1 Método da diferença dos modos de vibração

O já amplamente conhecido problema de autovalor de um sistema dinâmico pode ser definido como (Zhou *et al.* (2017) *apud* Rao e Yap (2011)):

$$[K - \lambda_i M] \Phi_i = 0 \quad (4.19)$$

sendo  $K$  e  $M$  as matrizes de rigidez e massa,  $\Phi_i$  e  $\lambda_i$  o autovetor e autovalor associado ao  $i$ -ésimo modo de vibração.

Uma vez que as propriedades estruturais (seja do material ou da geometria) são modificadas devido a danos, a matriz de rigidez e massa também são modificadas de certo modo. Para fins de simplicidade, assume que somente a rigidez é reduzida, mantendo-se a massa constante

neste caso particular de dano, o problema do autovalor da estrutura danificada é expresso como:

$$[(K + \Delta K) - (\lambda_i + \Delta\lambda_i)M](\Phi_i + \Delta\Phi_i) = 0 \quad (4.20)$$

sendo  $\Delta\lambda_i$  e  $\Delta\Phi_i$  o  $i$ -ésimo autovalor e variação do modo de vibração com respeito à redução da rigidez  $\Delta K$ , respectivamente.

A equação 4.20 pode ser simplificada negligenciando os termos de segunda ordem:

$$(K - \lambda_i M)\Delta\Phi_i = \Delta\lambda_i M\Phi_i - \Delta K\Phi_i \quad (4.21)$$

A variação no modo de vibração  $\Delta\Phi_i$  pode ser descrita como uma combinação linear dos modos da estrutura dita "sadia" (Zhao *et al.* (2008)), como:

$$\Delta\Phi_i = \sum_{k=1}^P d_{ik}\Phi_k \quad (4.22)$$

sendo  $d_{ik}$  um fator escalar correspondente aos  $i$ -modos do sistema original e  $P$  o número de total modos.

Para determinar  $d_{ik}$ , a Equação 4.22 é substituída na Equação 4.21, onde ambos lados são multiplicados por  $\Phi_r^T$  ( $r \neq i$ ). O coeficiente  $d_{ir}$  pode então ser computado como:

$$d_{ir} = -\frac{\Phi_r^T \Delta K \Phi_i}{\lambda_r - \lambda_i} \quad (4.23)$$

Aqui,  $r = i$  e nenhuma variação é presente na matriz de massa do sistema,  $d_{ii} = 0$ , usando o princípio de ortogonalidade ( $\Phi_i^T M \Phi_i = 1$ ). Substituindo as Equações 4.22 e 4.23 na Equação 4.21, a variação no  $i$ -ésimo modo de vibração devido ao dano pode ser expressa como:

$$\Delta\Phi_i = \sum_{r=1, r \neq i}^p \frac{-\Phi_r^T \Delta K \Phi_i}{\lambda_r - \lambda_i} \Phi_r \quad (4.24)$$

É notoriamente difícil a modelagem de um tipo geral de dano em seus detalhes. Nesta pesquisa, o dano é modelado como uma perda de rigidez local, isto é, simulada como um

multiplicador escalar na matriz global de rigidez:

$$\Delta K = \sum_{k=1}^N \alpha_k K_k \quad (4.25)$$

sendo  $K_k$  a rigidez do k-elemento e  $\alpha_k$  o coeficiente correspondente à redução da rigidez deste mesmo elemento e  $L$  o número total de elementos na estrutura. Cabe salientar que  $0 \leq \alpha_k < 1$ .

Este modelo é adequado para a maioria dos tipos de danos em estruturas reais. Ele funciona mesmo para um dano cuja mudança não é proporcional à rigidez elementar, porque esta suposição dá apenas um pequeno erro para uma estrutura grande e não altera a essência das exigências na localização de danos (Shi *et al.* (2000)). Substituindo as Equações 4.25 4.24, a mudança do i-ésimo modo pode ser representada como uma soma da contribuição de cada dano à forma modal na estrutura. Assim 4.24 torna-se:

$$\Delta \Phi_i = \sum_{k=1}^L \alpha_k \sum_{r=1, r \neq i}^n \frac{-\Phi_r^T K_k \Phi_i}{\lambda_r - \lambda_i} \Phi_r = F(K) \delta A \quad (4.26)$$

Sendo:

$$F(K) = \left( \sum_{r=1, r \neq i}^n \frac{-\Phi_r^T K_1 \Phi_i}{\lambda_r - \lambda_i} \Phi_r \quad \sum_{r=1, r \neq i}^n \frac{-\Phi_r^T K_2 \Phi_i}{\lambda_r - \lambda_i} \Phi_r \dots \sum_{r=1, r \neq i}^n \frac{-\Phi_r^T K_L \Phi_i}{\lambda_r - \lambda_i} \Phi_r \right) \quad (4.27)$$

Com:

$$\delta A = \{\alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_L\}^T \quad (4.28)$$

sendo  $F(K)$  o vetor de coeficientes de sensibilidade da i-ésima forma modal em relação ao vetor de dano  $\delta A$ . Se vários modos forem usados,  $\Delta \Phi_i$  se tornaria a matriz de mudança de forma do modo medido e  $F(K)$  se tornaria a matriz de sensibilidade para os modos selecionados.

### 4.3.2 Curvatura modal

Derivadas do modo de vibração, tais como curvatura são amplamente utilizadas como uma alternativa para os métodos de detecção de danos com base em mudanças da forma modal,

que podem ser tratadas para obter informações sobre alterações de vibração. Pandey *et al.* (1991) indicaram que a mudança absoluta na forma de curvatura do modo de vibração pode ser um índice efetivo para identificar defeitos em estruturas. O método de diferença finita central foi utilizado para obter a curvatura em um ponto da estrutura, tal que (Navabian *et al.* (2016)):

$$\Phi''_{i,j} = \frac{\Phi_{i-1,j} - 2\Phi_{i,j} + \Phi_{i+1,j}}{h^2} \quad (4.29)$$

sendo  $h$  a distância entre os pontos medidos.  $\Phi_{i,j}$  é definido como o deslocamento modal do nós  $i$  em referência ao modo  $j$ .

A curvatura do modo de vibração (*Mode Shape Curvature* - MSC) é então dada por (Pandey *et al.* (1991))

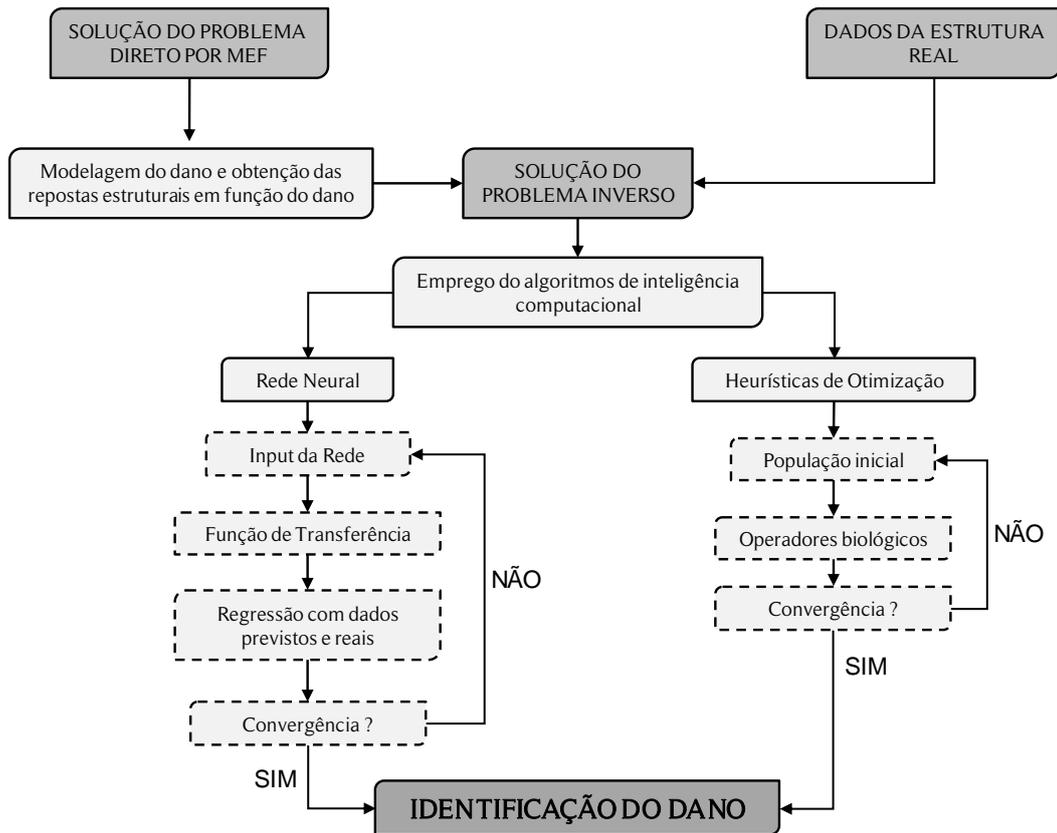
$$MSC_i = \sum_{j=1}^k |(\Phi_{i,j}^{dano})'' - (\Phi_{i,j}^{sem\ dano})''| \quad (4.30)$$

sendo  $k$  o número de modos levados em consideração.

## 4.4 Modelagem do Problema Inverso

A premissa para estas técnicas é que os danos causam uma mudança nas propriedades físicas estruturais, principalmente na rigidez e amortecimento nos locais danificados. Essas mudanças nas propriedades estruturais, por sua vez, alteram o comportamento de resposta dinâmica da estrutura a partir de seu estado inicial. Portanto, o monitoramento das mudanças nos parâmetros de resposta estrutural pode ser uma ferramenta importante para a avaliação da integridade estrutural, identificando os danos o mais cedo possível. Com base na técnica utilizada para tratar as respostas medidas para identificação de danos, a metodologia utilizada pode ser classificada como um método "não baseado em modelo" ou "baseado em modelo" (Bayissa e Haritos (2007)). Os métodos baseados em modelos são capazes de lidar com todos os níveis de danos, tais como a localização e quantificação da gravidade dos danos. Por outro lado, os métodos não baseados em modelos são frequentemente usados para identificar e localizar danos baseados em dois conjuntos de dados - dos estados não danificados e danificados.

A avaliação do dano estrutural pode ser realizada por meio de uma comparação entre os dados medidos (dados reais) e os simulados. Para fornecer os dados simulados, um código numérico é necessário no qual um modelo do problema é usado por um algoritmo de problema inverso. Para o problema direto, um modelo é necessário para se obter informações sobre a resposta de interesse da estrutura com dano, para isto, as condições de contorno e o posicionamento do dano são considerados. Para o problema inverso, um modelo é requerido para



**Figura 4.4:** Modelagem do problema inverso de detecção de danos usando técnicas inteligentes.

o procedimento de localizar o dano na estrutura, fornecendo algumas informações (parciais) sobre a quantidade de interesse em algumas localizações específicas (Lopes *et al.* (2010)).

#### 4.4.1 Identificação por Heurística de Otimização

Discutiu-se anteriormente a vasta aplicabilidade dos algoritmos evolutivos de otimização e sua grande importância em problemas de engenharia, onde encontrar a melhor solução para um determinado problema nem sempre é trivial. A ideia de usar algoritmos genéticos nesta parte do trabalho é devido à realidade de que um problema de detecção de danos é de fato um problema inverso. Sabe-se que um dano, seja ele traduzido como uma alteração nas propriedades geométricas ou mecânicas, promove uma alteração nas respostas estruturais que se diferem daquelas tomadas como resposta de base de uma estrutura inicial sem presença de danos. O objetivo do método inverso é empenhar-se na busca pelo resposta de uma pergunta proposta ao algoritmo de otimização, ou seja, a partir das repostas adquiridas de uma estrutura, espera-se que o otimizador seja capaz de solucionar o problema apresentando a possível localização do dano.

Para que o algoritmo seja capaz de resolver o problema de identificação, é necessário

**Tabela 4.3:** Operadores genéticos utilizados para o problema de identificação de parâmetros.

Operador Genético	Identificação de Danos	Posicionamento de Sensores
	Valor	Valor
População	$10 \times N_{var}$	$10 \times N_{var} \times N_{modos}$
Cruzamento	60%	60%
Mutação	1%	1%
Elitismo	1	1
Gerações	100	1000

introduzir funções objetivos, que quando devidamente construídas e minimizadas, sejam capazes de fornecer a solução global esperada, que em nosso caso, se traduz em posição do dano. Assim, para o processo de identificação de danos proposto, a função  $J_{\Phi}$  é construída sendo:

$$J_{\Phi} = \sum_{i=1}^n \left( 1 - \frac{\phi_{i,s}^{calculado}}{\phi_{i,s}^{real}} \right)^2 \quad (4.31)$$

sendo  $\phi_{i,s}^{calculado}$  os deslocamentos nodais obtidos em cada iteração pelo algoritmo de otimização referente ao modo  $i$  e  $\phi_{i,s}^{real}$  os deslocamentos conhecidos da estrutura que possivelmente possui algum dano estrutural, obtidos nos "pontos nodais ótimos"  $s$ .

Outro aspecto importante se refere aos parâmetros utilizados no otimizador. Neste caso, utilizou-se os algoritmos genéticos por sua elevada eficiência comprovada em casos análogos. A configuração dos principais parâmetros do GA foi estabelecida após a realização de casos testes até que um conjunto de valores satisfatório fossem obtidos. A Tabela 4.3 exibe os operadores genéticos utilizados nesta parte da pesquisa. Fixou-se o tamanho da população em  $10 \times N_{var}$ , sendo  $N_{var}$  o número total de variáveis de projeto presentes no problema, isto é, no caso em que almeja-se identificar a posição do dano e sua severidade local, existem duas variáveis de projeto envolvidas  $\vec{x} = [N_e, \alpha]$ , logo uma população de 20 indivíduos foi suficiente para atingir convergência na solução do problema. O critério de para o problema foi definido pelo número máximo de gerações dos indivíduos do GA, ou seja, 100. Para a problemática do posicionamento ótimo dos sensores, onde a modelagem do problema inverso já foi discutida nos itens anteriores deste capítulo, necessitou-se ampliar o número de indivíduos presentes na população para  $10 \times N_{var} \times N_{modos}$ , sendo  $N_{modos}$  o número de modos considerados no processo de posicionamento ótimo dos sensores. O critério de parada foi também estabelecido como o número máximo de gerações, porém acrescido para 1000 gerações para se atendesse critério de convergência suficiente.

### 4.4.2 Identificação por Redes Neurais Artificiais

O problema básico da detecção de falhas é deduzir a existência de um defeito em uma estrutura a partir de medidas tomadas em sensores distribuídos na estrutura. Neste caso, o problema é essencialmente um de reconhecimento de padrões. As redes neurais artificiais mostram uma promessa considerável para o diagnóstico de falhas. Na abordagem mais básica de aprendizagem supervisionada, a rede é apresentada com vetores de dados, sendo a entrada o vetor de medições do sistema e a saída sendo a classificação de falha desejada. Em cada apresentação dos dados, a estrutura interna da rede é modificada para trazer as saídas de rede reais em correspondência com as saídas desejadas. Este procedimento iterativo é terminado quando as saídas de rede têm as propriedades necessárias sobre todo o conjunto de treinamento (Worden e Burrows (2001)).

Neste estudo, optou-se pelo uso de múltiplas entradas, pois, é identificado que redes neurais artificiais treinadas com múltiplas respostas modais geram resultados mais precisos de detecção de danos em comparação com a precisão de redes neurais artificiais treinadas com funções de resposta de individuais (Bandara *et al.* (2014)). Atacando o problema proposto, criou-se redes neurais para o mesmo problema avaliando duas entradas distintas. Em uma primeira tentativa, decidiu-se como entrada da rede neural dados referentes às 6 primeiras frequências naturais, não nulas, da estrutura danificada com dano conhecido em somente alguns elementos. Então a rede foi construída a partir de uma série de tentativa e erro até que se obtivesse um conjunto de parâmetros ótimos para arquitetura neural. A resposta avaliada e desejada na saída da rede é a localização do dano (elemento) e sua severidade/gravidade.

Dando sequência à identificação por meio de RNA, construiu-se uma segunda arquitetura de rede neural visando ainda identificar a localização dos danos estruturais, agora modificado por sua entrada. A entrada avaliada para esta segunda rede é correspondente ao modo de vibração, isto é, avaliou-se as amplitudes locais em um número ótimo de pontos (calculados a partir da distribuição ótima de sensores) e a partir daí espera-se que a rede seja capaz de tratar suficiente bem estes dados e poder prever danos a partir de dados não treinados. Uma discussão mais detalhada e conveniente sobre as especificações de cada rede gerada (por entrada de frequências e modos) será abordada no capítulo seguinte, pois em cada caso haverá particularidades envolvidas e evita-se redundância de informações na abordagem detalhada neste tópico da tese.

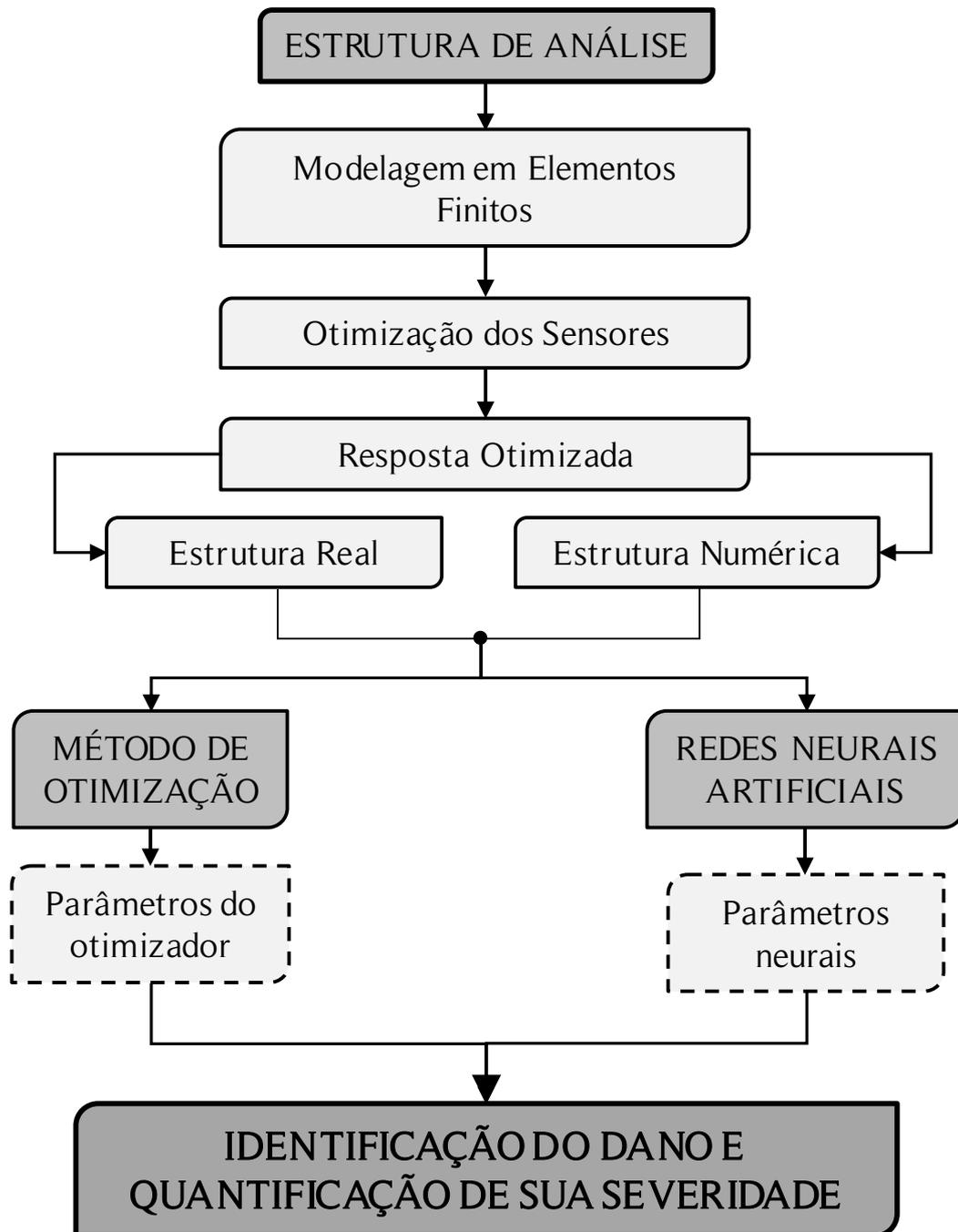
De modo resumido a Figura 4.5 exibe o fluxograma da metodologia de trabalho adotada neste trabalho em uma sequência lógica. Primeiramente, é necessário conhecer a estrutura em que se deseja aplicar e desenvolver o monitoramento estrutural. Em seguida a modelagem numérica de determinada estrutura se faz necessária, onde então a configuração ótima dos sensores é aplicada e obtida. Pode-se então dizer que a partir daí obtêm-se "respostas otimizadas", isto é, respostas com quantidade suficiente de informação e sem redundância para a aplicação das

ferramentas de detecção de danos (algoritmos específicos). A partir deste ponto o trabalho toma dois caminhos diferentes: um primeiro por meio de algoritmos de otimização (GA e SFO) e outro por meio de redes neurais artificiais.

O método de otimização requer que dados da estrutura nos pontos ótimos sejam adquiridos e então, uma comunicação com o modelo numérico em elementos finitos é realizada, onde o otimizador, a partir de seus operadores específicos, é capaz de minimizar um função objetivo escrita em função da resposta estrutural avaliada até que o modelo numérico apresente dano(s) de modo que sua resposta seja idêntica ou o mais próximo possível da resposta da estrutura real.

Optando-se pelo segundo método (redes neurais), em um primeiro instante, somente o modelo numérico é necessário. Uma base de danos deve ser levantada adquirindo a resposta estrutural "otimizada" em diversos cenários de dano, ou seja, repostas modais em função de danos em diferentes posições e intensidades (dimensão/intensidade). Com base nesta base dados, efetua-se o treinamento da rede neural artificial, onde então após esta fase, espera-se que a rede seja capaz de identificar e quantificar o dano a partir de danos que ela desconhece (que não foram utilizados na sua fase de treinamento).

É importante destacar que o método proposto neste trabalho é desenvolvido com potencial aplicação para estruturas mecânicas de maior porte, por exemplo, em estruturas civis, na indústria naval, aeroespacial e outras. De modo geral espera-se encontrar por das técnicas aqui apresentadas uma localização aproximada do dano, fazendo com que haja uma elevada economia de tempo e custos com inspeção, uma vez que pode-se conhecer a possível localização e/ou vizinhança de uma provável região que esteja sujeita a falhas. Não existe uma restrição clara sobre qual o limite mínimo sobre o tamanho do dano detectado pela metodologia. Desde que a resposta estrutural da estrutura real seja alterada a partir de um limite pré-estabelecido, o algoritmo é capaz de fornecer uma possível localização do dano.



**Figura 4.5:** Fluxograma resumido da metodologia de trabalho adotada neste trabalho.

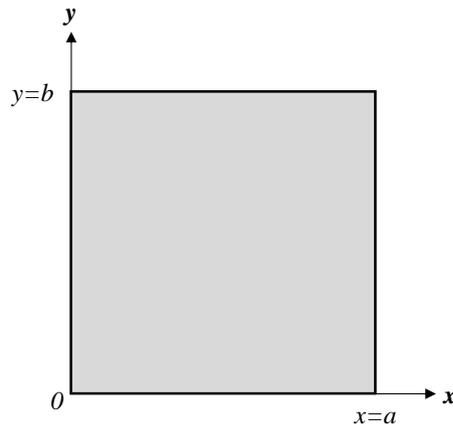
# Capítulo 5

## Resultados e Discussão

Neste capítulo, serão apresentados e discutidos os principais resultados do trabalho, abordados em ordem cronológica a saber: *i*) resultados preliminares referentes à modelagem numérica e efeito direto do dano na resposta estrutural; *ii*) resultados obtidos pelas diversas estratégias adotadas no posicionamento ótimo dos sensores; *iii*) resultados da identificação de danos por meio de heurísticas de otimização e *iv*) resultados da localização de danos por meio de redes neurais artificiais.

### 5.1 Resultados Iniciais de Modelagem

O problema direto foi modelado segundo uma placa quadrada de lados iguais  $a = b = 30 \text{ cm}$ , conforme exibido na Figura 5.1. A estrutura se constitui de um laminado simétrico de material compósito constituída de 12 camadas de diferentes orientações. As espessuras de camadas são todas de  $0.18 \text{ mm}$  orientados de maneira simétrica  $[0/90]_{3S}$ . Salienta-se que este trabalho visa exclusivamente o estudo do método de detecção de danos em laminados de material compósito, não dando ênfase nos parâmetros geométricos e características específicas do material laminado.



**Figura 5.1:** Sistema de referência da placa para aplicação das condições de contorno.

### 5.1.1 Influência da Condição de Contorno

Antes de discretizar o modelo em elementos finitos, e até mesmo antes de construí-lo, é importante pensar sobre o conceito da malha. Sendo assim, tomou-se elementos de casca (*shell*) gerados mapeadamente sobre a superfície estrutural com oito nós e seis graus de liberdade cada. A Tabela 5.1 exibe os resultados obtidos no estudo de convergência da malha.

A Tabela 5.1 exibe os valores das 6 primeiras frequências naturais não-nulas para a placa livre em condições de contorno (FFFF - *Free-Free-Free-Free*). Justifica-se a escolha de discretizar a placa em  $10 \times 10$  elementos pelo fato de se economizar esforço computacional, uma vez que esta modelagem leva a obter informações sem perda de qualidade quando comparada a uma modelagem mais refinada.

**Tabela 5.1:** Estudo da convergência de malha para os primeiros modos de vibração.

	$\omega_1$ (Hz)	$\omega_2$ (Hz)	$\omega_3$ (Hz)	$\omega_4$ (Hz)	$\omega_5$ (Hz)	$\omega_6$ (Hz)
Malha $5 \times 5$	62.72	123.85	155.26	176.08	198.78	322.08
Malha $10 \times 10$	62.54	123.61	154.95	176.01	198.67	320.94
Malha $15 \times 15$	62.53	123.60	154.93	175.99	198.65	320.89
Malha $20 \times 20$	62.53	123.59	154.93	175.99	198.65	320.87
Malha $25 \times 25$	62.53	123.59	154.93	175.99	198.65	320.87
Malha $30 \times 30$	62.53	123.59	154.93	175.99	198.65	320.87

Em adição, uma análise dos erros de discretização do modelo em elementos finitos é estimada tendo como critério o método de extrapolação de Richardson (Richards (1997)). Neste método, o erro estimado da solução numérica devido a um tamanho de malha grosseira  $h_1$  é

definido pela Equação (Guratzsch (2007)):

$$\epsilon = \frac{y_2 - y_1}{1 - r^p} \quad (5.1)$$

sendo a taxa de refinamento de malha  $r = h_2/h_1 = h_3/h_2$ ,  $y_1$  e  $y_2$  as repostas obtidas usando uma malha grosseira e refinada, respectivamente.

A ordem de convergência  $p$  pode ser estimada como:

$$p = \frac{\ln\left(\frac{y_3 - y_2}{y_2 - y_1}\right)}{\ln(r)} \quad (5.2)$$

sendo  $y_3$  a resposta obtida pelo menor tamanho de malha.

A Tabela 5.2 mais uma vez exhibe os resultados da análise numérica por elementos finitos considerando diferentes tamanhos de malha com uma taxa de refinamento  $h = 0.5$  aplicada duas vezes na discretização da malha  $5 \times 5$  ( $h_1 = 0.30/5 = 0.06$ ), obtendo-se  $y_1$  para de valores de  $h_1 = 0.06$ ,  $y_2$  para  $h_2 = 0.03$  e  $y_3$  correspondente a  $h_3 = 0.015$ . A partir dos valores de  $\epsilon$  da Tabela 5.2, pode-se assumir qual seria o valor considerando uma malha extremamente refinada.

Após os devidos cálculos obtidos pela Equação 5.1, obtêm-se o maior erro calculado ocorre no sexto modo de vibração (Tabela 5.2) em um valor de 0.36%, portanto, conclui-se que o erro de discretização do modelo não é relevante. Logo, a estrutura discretizada em  $10 \times 10$  elementos é adequada, dadas as restrições adequadas.

**Tabela 5.2:** Quantificação dos erros da discretização do modelo.

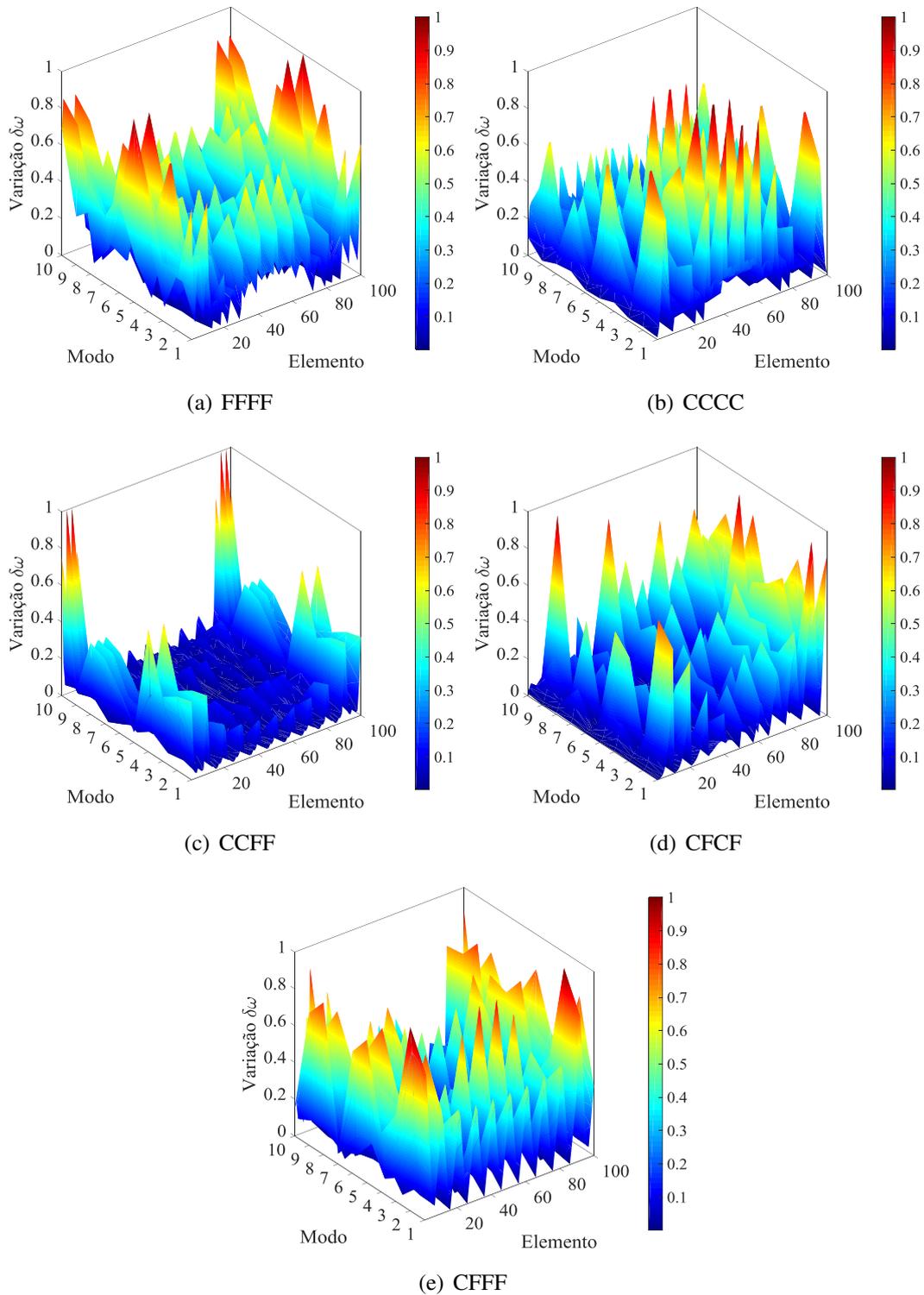
Modo	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$\epsilon$	$y_{estimado}$	Erro (%)
1	62.720	62.544	62.53	-0.1912	62.37	0.28
2	123.85	123.61	123.59	-0.2618	123.37	0.19
3	155.26	154.95	154.93	-0.3314	154.64	0.20
4	176.08	176.01	175.99	-0.0980	175.94	0.04
5	198.78	198.67	198.65	-0.1344	198.56	0.06
6	322.08	320.94	320.87	-1.2146	319.90	0.36

Outro fator que intervém no processo de detecção de danos diz respeito às condições de contorno da estrutura. Ao se restringir movimentos (translação e/ou rotação) em direções e em eixos específicos, determinadas respostas estruturais, que em nosso caso, se refere às respostas modais, são alteradas. O sistema de referência utilizado para a aplicação das condições de contorno é exibido na Figura 5.1. A Figura 5.2 exhibe o comportamento estrutural para condições de contorno para em bordas livres (*free* - F) e engastadas (*clamped* - C). A nomenclatura FFFF quer dizer que todas os quatro lados da placa estão livres em restrições. A Figura 5.1 exhibe a

variação das 10 primeiras frequências naturais não nulas em função da posição do dano (para isso, variou-se a posição do dano do elemento 1 ao 100), em diferentes combinações de restrição no contorno da placa. A Figura 5.2 exibe o resultado de  $\delta\omega$  normalizado.

Pode-se observar que efetivamente a condição de contorno possui uma contribuição no processo de detecção de danos. Neste estudo, optou-se pela utilização da placa em na condição FFFF, isto é, condições livres de restrições em todos seus contornos devido às condições práticas de operacionalidade. Mais adiante, algumas abordagens específicas serão realizadas e discutidas para a placa engastada (CCCC).

(intencionalmente deixado em branco)

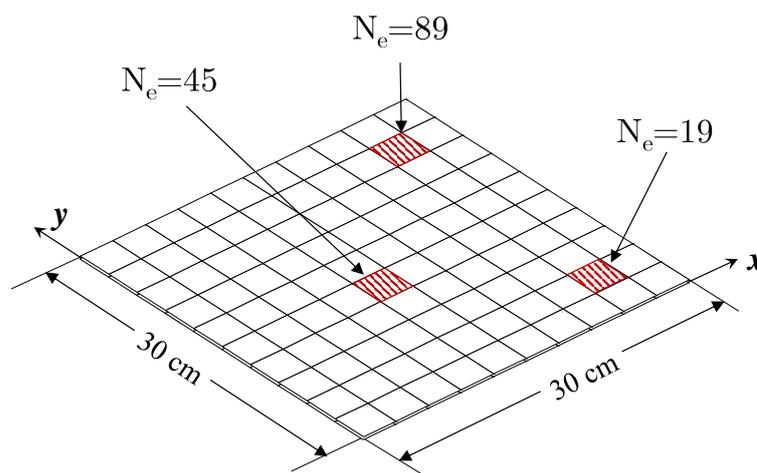


**Figura 5.2:** Variação das frequência dos primeiros 10 modos em função da localização do dano.

### 5.1.2 Efeito direto do dano

Neste trabalho, adotou-se o dano como uma redução local de rigidez<sup>1</sup>. Como exposto no Capítulo 1, é de praxe adotar esta modelagem no estudo de danos em estruturas. O dano então é considerado pela multiplicação do elemento  $N_e$  por uma perda de rigidez  $\alpha$ . A placa então é composta por 100 elementos, numerados em ordem crescente a partir da origem. A Figura 5.3 exibe a numeração e localização dos danos considerados em estudo neste trabalho, isto é, os elementos de números 19, 45 e 89. A numeração destes elementos foi escolhida propositalmente, de modo a estudar um dano na posição central (elemento 45), e dois danos assimétricos em relação a um dos eixos de referência, no caso, o eixo  $y$  (elementos 19 e 89). Em consequência, a inserção de um dano estrutural modifica a resposta dinâmica e a partir desta ordem de variação, é que pode-se tratar por meio de processamento inteligente até que se obtenha a localização do dano esperado.

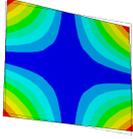
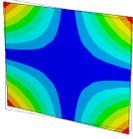
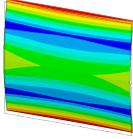
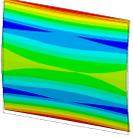
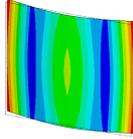
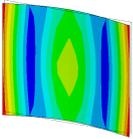
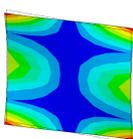
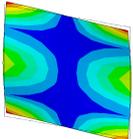
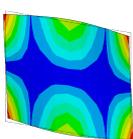
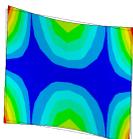
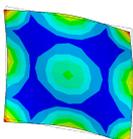
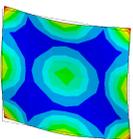
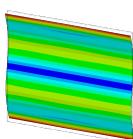
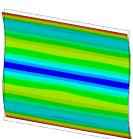
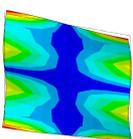
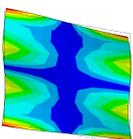
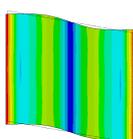
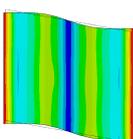
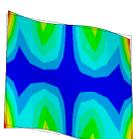
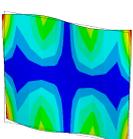
A Tabela 5.3 exibe a estrutura na condição não danificada e a mesma após a inserção de um dano no elemento 45. Pode-se observar que aparentemente a forma modal praticamente não é alterada (mas de fato é) e existe uma variação nas frequências naturais da estrutura. A variação  $|1 - \frac{\omega_{com\ dano}}{\omega_{sem\ dano}}|$  aparentemente não é muito elevada pois aqui o trabalho desenrola-se em uma estrutura com pequenas dimensões. A ideia principal da metodologia aqui desenvolvida é a aplicação em estruturas de dimensões de ordem mais elevada, tendo como critério global de identificação de danos. A identificação da localização de danos em ordem muito pequena já possui métodos muitos mais eficientes, como por exemplo, o ultrassom.



**Figura 5.3:** Localização dos danos estudados na placa.

<sup>1</sup>Na seção 5.4.3 será adotada um caso particular de dano (furo circular) à título de comparação, isto é, capacidade do método em detectar danos tratados como mudanças em propriedades geométricas

**Tabela 5.3:** Frequências Naturais da placa intacta e danificada, considerando um dano induzido no elemento  $N_e = 45$  com  $\alpha = 0.2$ .

Modo	Sem Dano		Com Dano		$ 1 - \frac{\omega_{com\ dano}}{\omega_{sem\ dano}} $ (%)
	Forma	$\omega_{sem\ dano}$	Forma	$\omega_{com\ dano}$	
1		62.544		62.063	0.769
2		123.610		122.080	1.238
3		154.950		152.890	1.329
4		176.010		175.900	0.063
5		198.670		198.540	0.065
6		320.940		319.240	0.529
7		341.020		340.340	0.199
8		387.310		386.620	0.178
9		426.510		425.390	0.263
10		434.380		463.610	0.159

## 5.2 Influência do Dano nos Modos de Vibração

O objetivo de um sistema de identificação de danos é a solução de um problema inverso, isto é, a identificação de um sistema que descreve a relação entre uma entrada desconhecida e uma saída conhecida. Isso significa que o objetivo de identificação de danos é a descrição de um modelo estrutural já existente, com base em dados obtidos experimentalmente ou simulados. Dado o exposto, é necessário averiguar se com a inserção de um dano localizado, a reposta avaliada neste trabalho (modos de vibração) são realmente afetados de modo significativo. Duas métricas interessantes são avaliadas nesta seção: a primeira pela diferença dos modos de vibração e uma segunda pela diferença da curvatura dos modos de vibração. Para isto, fez-se uso dos modos da estrutura intacta (sadia) e da estrutura após a inserção do dano em uma localização conhecida.

A Figura 5.4 exibe, a título de exemplo, os resultados obtidos pela diferença absoluta dos modos de vibração para o terceiro modo de vibração da placa em estudo, ou seja, a Figura 5.4 é o resultado da superfície gerada por  $|\Phi_{\text{sem dano}} - \Phi_{\text{com dano}}^e|$ , sendo  $e$  o elemento danificado. Pode-se concluir que de fato a diferença dos modos de vibração resulta em picos de amplitude de vibração em pontos bem próximos ao dano (elemento danificado), como visto pela imagem. Contudo existem regiões adjacentes com amplitudes menores conhecidas como "efeito de vizinhança" que podem ocasionar problemas de detecção de falsos positivos na identificação de danos.

Para lidar com o problema de outros picos menores, utiliza-se o conceito de técnica de teste de hipóteses estatísticas (Rucevskis *et al.* (2016)). Por esta razão, os índices de danos determinados para cada nó são padronizados e o conceito de teste de hipóteses estatísticas é usado para classificar locais danificados e não danificados, ainda para localizar danos dependendo do valor de limiar de dano pré definido. O índice de danos padronizado  $Z_i$  no nó  $i$  é obtido da seguinte forma:

$$Z_i = \frac{ID_i - \mu_{ID}}{\sigma_{ID}} \quad (5.3)$$

sendo  $\mu_{ID}$  e  $\sigma_{ID}$  o valor médio e o desvio padrão dos índices de danos (ID), respectivamente.

A decisão sobre a localização dos danos é estabelecida com base no nível de significância utilizado no teste de hipóteses, que pode ser determinado a partir de um critério de classificação pré-atribuído. Os valores típicos de limiar de dano para o índice de dano padronizado amplamente utilizado na literatura incluem 1.28, 1.645, 1.96 e 2.575 para níveis de confiança de 80%, 90%, 95% e 99% para a presença de dano, respectivamente (Rucevskis *et al.* (2016)).

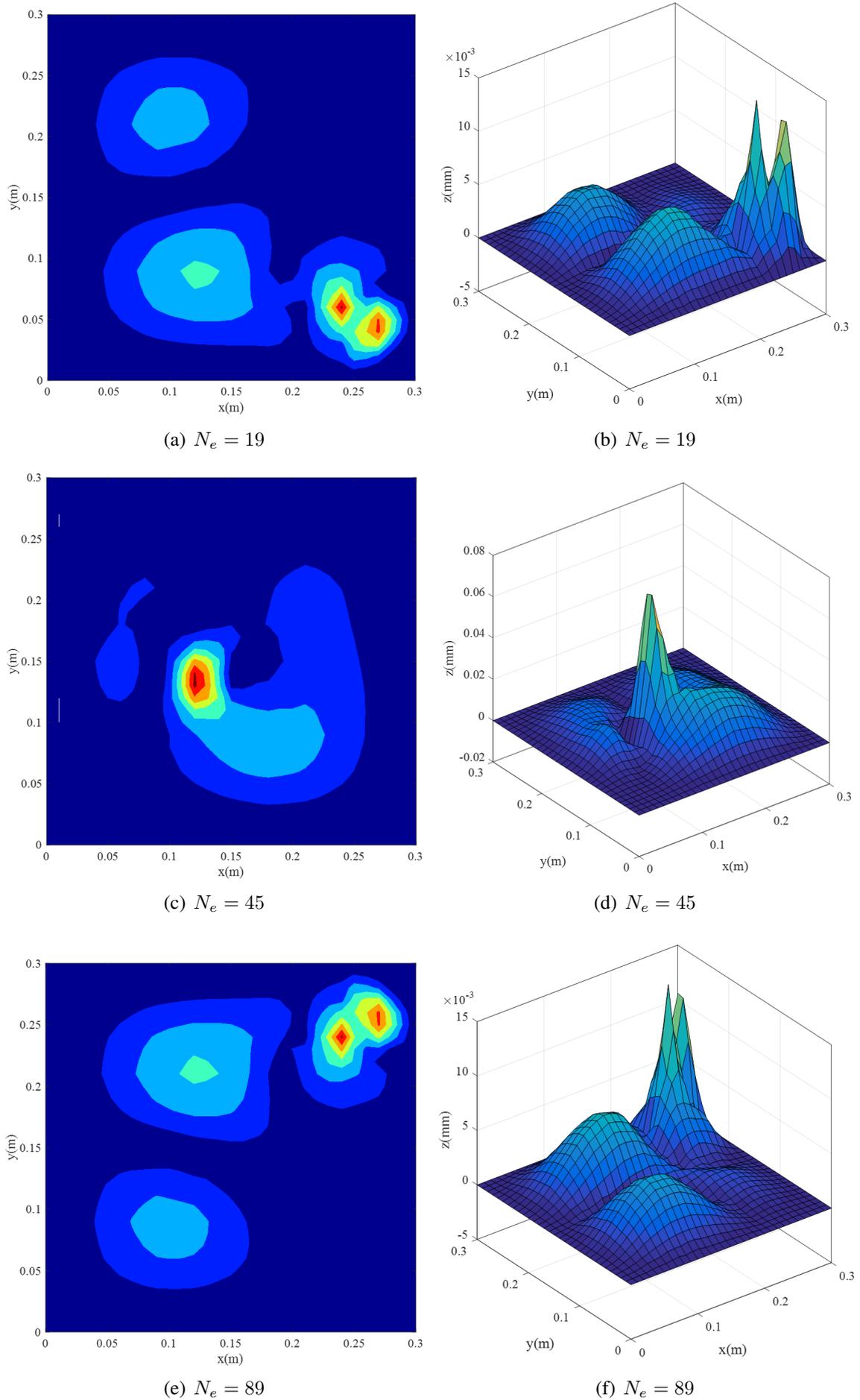
Convém lembrar que neste tópico não pretende-se lidar estatisticamente com o dano, mas sim, refinar a região de modal com diversas amplitudes de vibração. Com isso, como pode-se

observar por meio da Figura 5.5, a localização do dano estrutural na placa torna-se aparentemente mais visível, podendo evitar uma desorientação ou equívoco em determinado algoritmo empregado para tratar os sinais de forma inteligente.

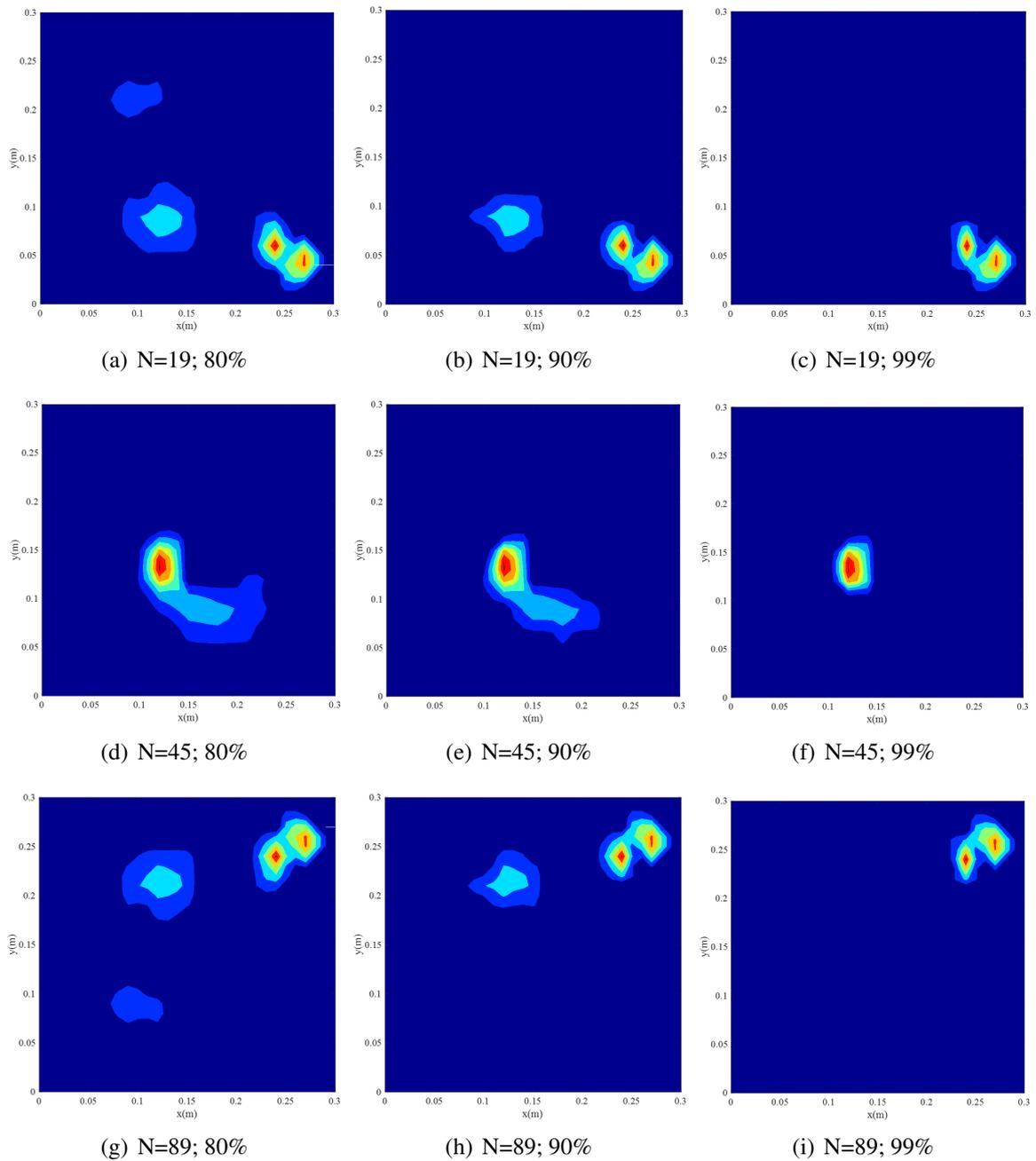
Em uma outra frente, abordou-se o conceito de curvatura modal, ou seja, as segundas derivadas de superfície dos modos de deformação modal. Para tal, fez-se uso do método de diferença finita central para o cálculo diferencial usando a posição dos nós, como discutido no capítulo anterior. Em geral, os métodos baseados nas segundas derivadas da forma modal parecem demonstrar um maior nível de sensibilidade aos danos do que aqueles baseados nas formas de modo em si.

Pode se perceber por meio da Figura 5.6 que de fato a curvatura modal é mais sensível à resposta ao dano do que às superfícies da Figura 5.6. É apropriado por em evidência que estes resultados são resultados que servem como base para o trabalho de pesquisa aqui desenvolvido, justificando mais uma vez que realmente a resposta modal é qualitativamente sensível ao dano estudado. Assim sendo, espera-se que as ferramentas computacionais evolutivas e inteligentes empregadas a seguir sejam capazes de identificarem/preverem suficientemente bem a localização de danos.

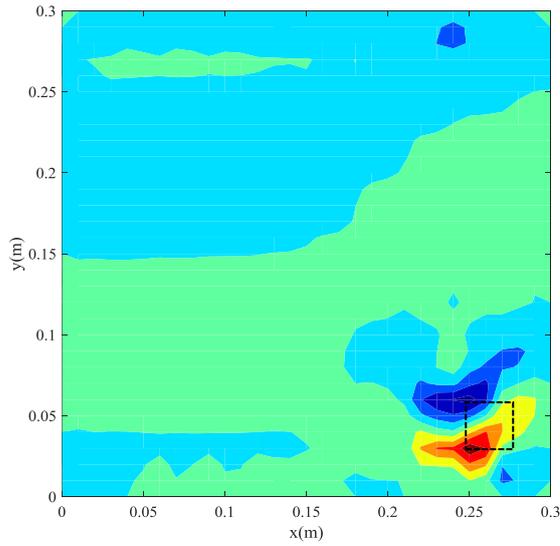
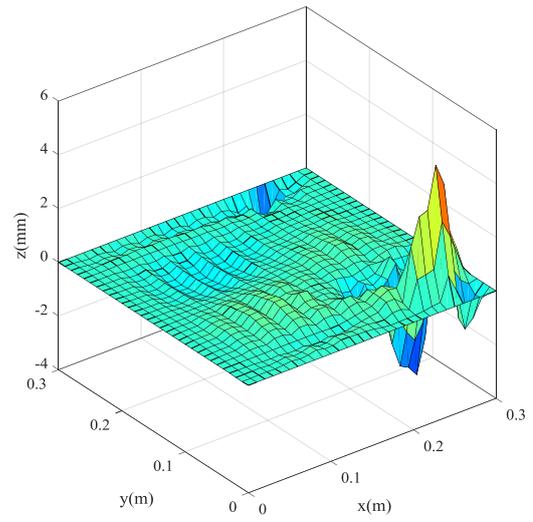
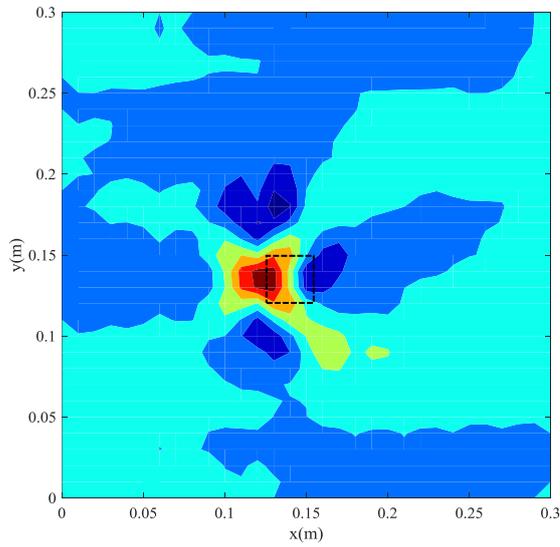
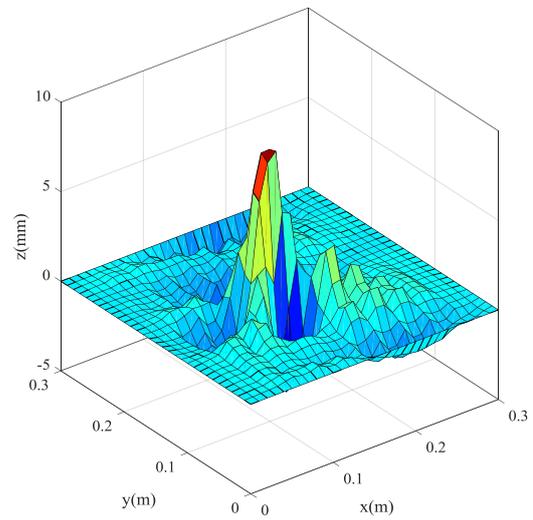
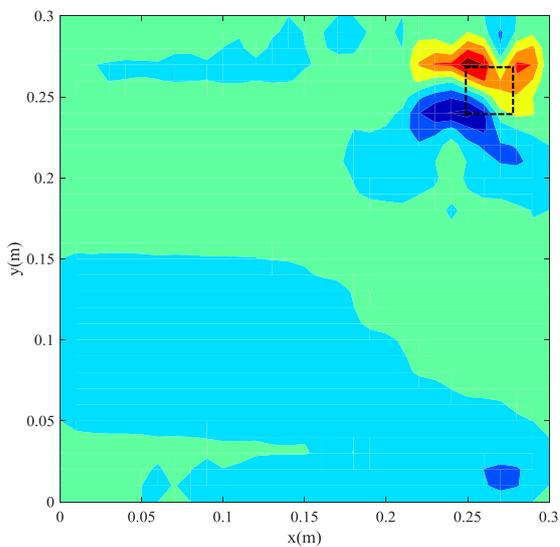
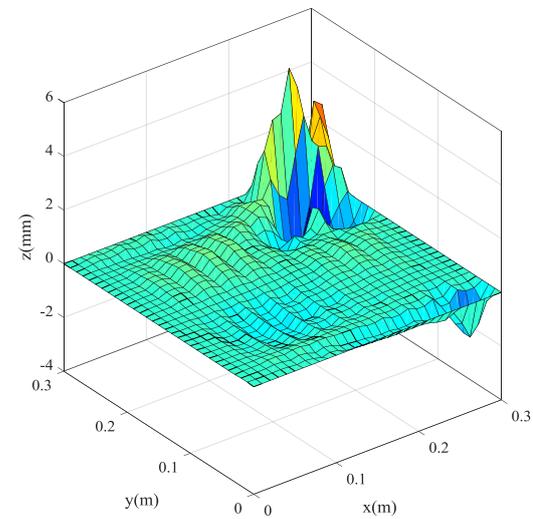
Como visto pelos resultados deste tópico, de fato o dano estrutural produz uma certa descontinuidade nas formas modais e quando devidamente tratado (diferença dos modos ou diferença das curvaturas), pode indicar a possível localização de determinadas falhas. Entretanto, obter em caráter completo o modo de vibração de certa estrutura mecânica pode ser uma tarefa onerosa. Na tentativa de contornar todos os problemas oriundos de uma aquisição e sensoria-mento modal completo, lança-se mão de estratégias de posicionamento ótimo de sensores, em que a partir de um número específico de pontos, otimamente distribuídos, consegue-se obter uma quantidade de informação modal estrutural sem que haja perda ou redundância de informação. A seguir serão expostos os resultados obtidos pelos métodos de posicionamento de sensores, e a partir destes resultados, a capacidade dos métodos de identificação de danos serão abordadas.



**Figura 5.4:** Diferença dos modos de vibração em diferentes posições do dano.



**Figura 5.5:** Diferença entre os modos de vibração com índices padronizados.

(a)  $N_e = 19$ (b)  $N_e = 19$ (c)  $N_e = 45$ (d)  $N_e = 45$ (e)  $N_e = 89$ (f)  $N_e = 89$ **Figura 5.6:** Diferença dos modos de vibração em diferentes posições do dano.

## 5.3 Posicionamento dos Sensores

Distribuir sensores de forma eficiente em uma estrutura é crucial em caráter operacional, onde nem sempre todos pontos de aquisição estão disponíveis, além do fator de economia de peso estrutural e custos relativos à sensoriação em uma estrutura, por exemplo aeroespacial, são critérios de peso na tomada de decisão sobre o sensoriação estrutural.

O posicionamento (localização) dos sensores na placa estudada foi obtida por duas frentes diferentes: a primeira, por meio de critérios matriciais já existentes na literatura e uma segunda, por meio de interpolação por meio de superfícies de placas finas (*thin-plate splines*). Ainda, introduziu-se nesta seção uma otimização multiobjetivo em que particularidades de cada método são agregadas no critério de escolha da obtenção das posições ideais sobre a placa. A seguir, serão apresentados os resultados dos critério adotados.

### 5.3.1 Critérios Matriciais

Os critérios matriciais adotados foram: *i*) critério de Fisher, *ii*) Independência Efetiva (EfI), *iii*) Energia Cinética (KE), *iv*) Entropia de Informação, *v*) Produto dos Autovetores (EVP) e *vi*) Ponto de Resíduo Médio (ADPR).

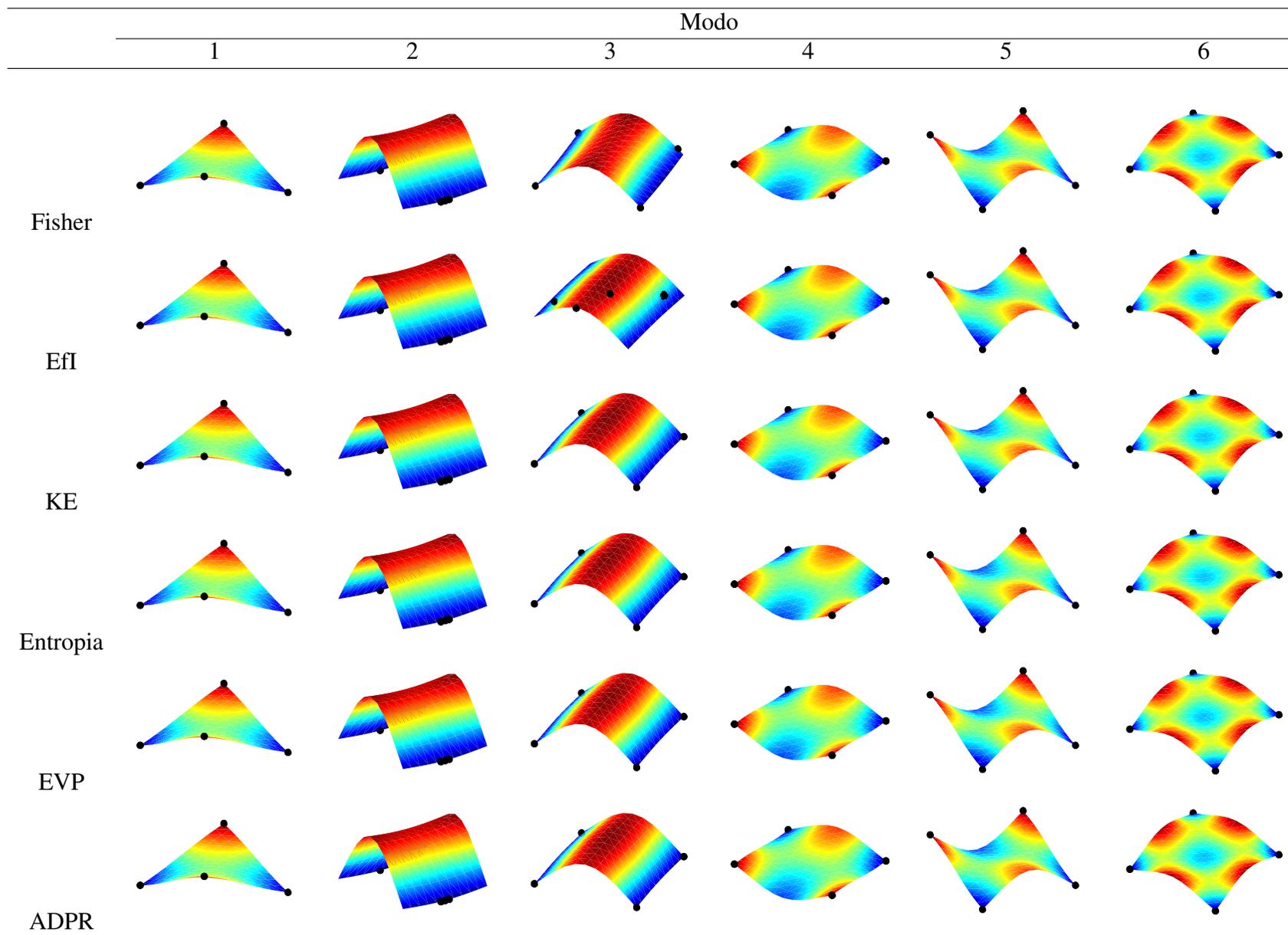
O *layout* ótimo da distribuição dos sensores foi obtida por método de otimização por uso do algoritmo genético. O entendimento básico comum destes métodos é obter posições ideais dos sensores em que se obtenha a maior quantidade de informação modal possível. Adotou-se com critério de otimização somente a posição de uma quantidade pré-definida de sensores em 4, 6 e 9. Os sensores então foram distribuídos nas posições nodais da placa. Convém lembrar ainda que o tipo de sensor adotado se trata de um sensor ideal, onde não são levadas em consideração suas características físico-mecânicas, como peso e rigidez, o que poderia acarretar algumas pequenas variações estruturais.

A Tabela 5.4 exhibe os resultados da otimização para 4 sensores. Pode ser visto que a distribuição ótima dos sensores ocorreu próximo as bordas placa na maioria dos modos. Isto de deve pelo fato que a estrutura está livre em condições de contorno, e seu pontos de maior deformação modal são justamente nas extremidades. Expandindo para 6 o número de sensores sobre a placa, mais opções de conjuntos de sensores são disponíveis. A Tabela 5.5 apresenta os resultados gráficos obtidos pelo GA. De modo semelhante, os resultados obtidos pelo critério matriciais, geraram valores ótimos nas proximidades de maior deformação/amplitude modal da placa para a maioria dos métodos e modos estudados. Além disso, as figuras da Tabela 5.6 exibem um mesmo fenômeno no comportamento para 9 sensores distribuídos. Exceto para o terceiro modo de vibração estudado pelo critério da EfI, os pontos ótimos foram obtidos mais uma vez nas proximidades e nos nós de maior amplitude de vibração. Em um aspecto geral, todos os métodos obtiveram desempenho semelhante, gerando uma distribuição de sensores

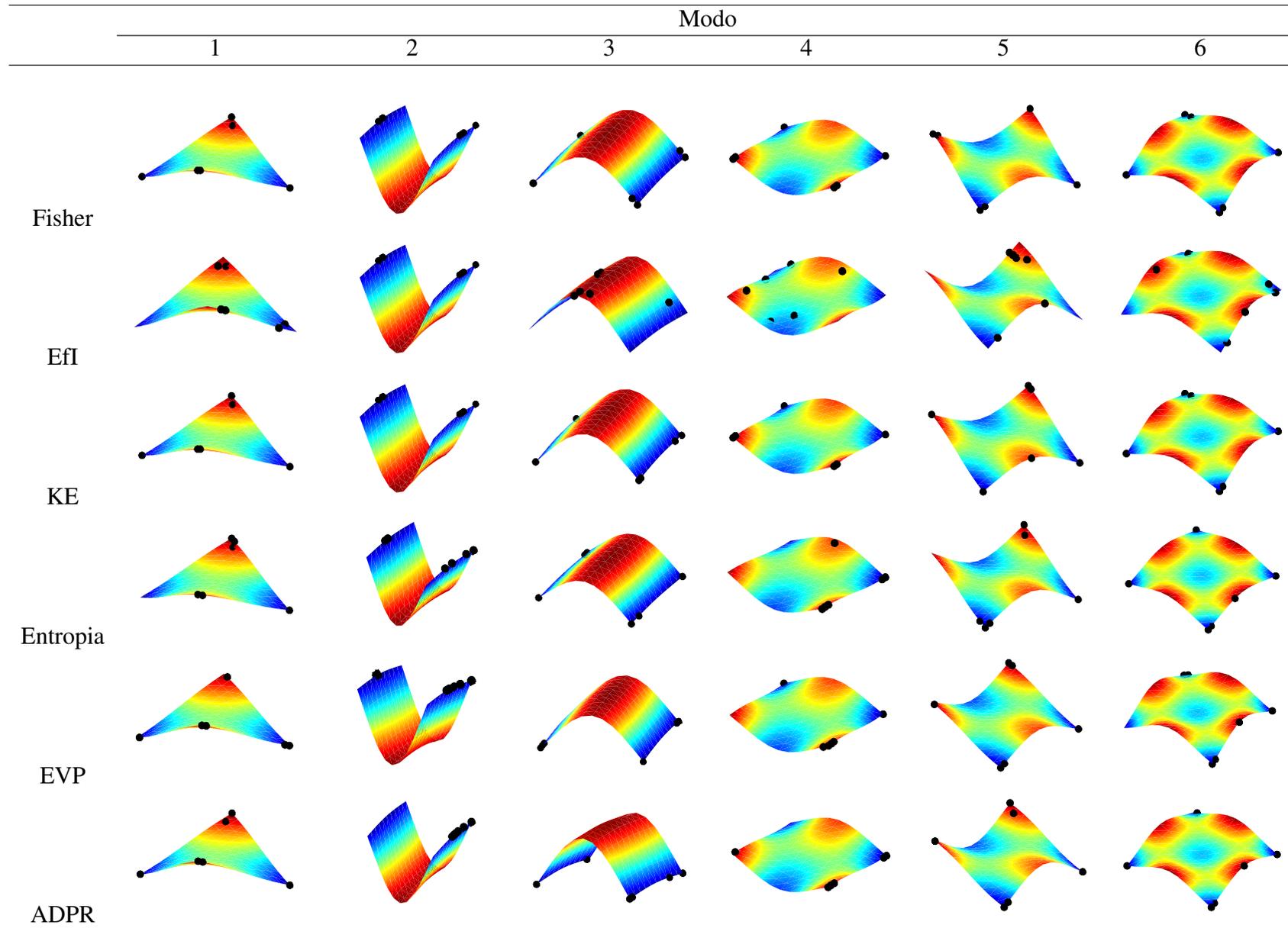
em anti-nós dos modos de vibração. Um caso particular se dá pelo método da Independência efetiva, que possui certa discrepância em relação aos demais critérios. Uma possível explicação para este fenômeno, como exposto por Barthorpe e Worden (2009), é que este critério pode selecionar localizações de sensores que exibem baixa força de sinal, que pode ser considerado como uma desvantagem.

(intencionalmente deixado em branco)

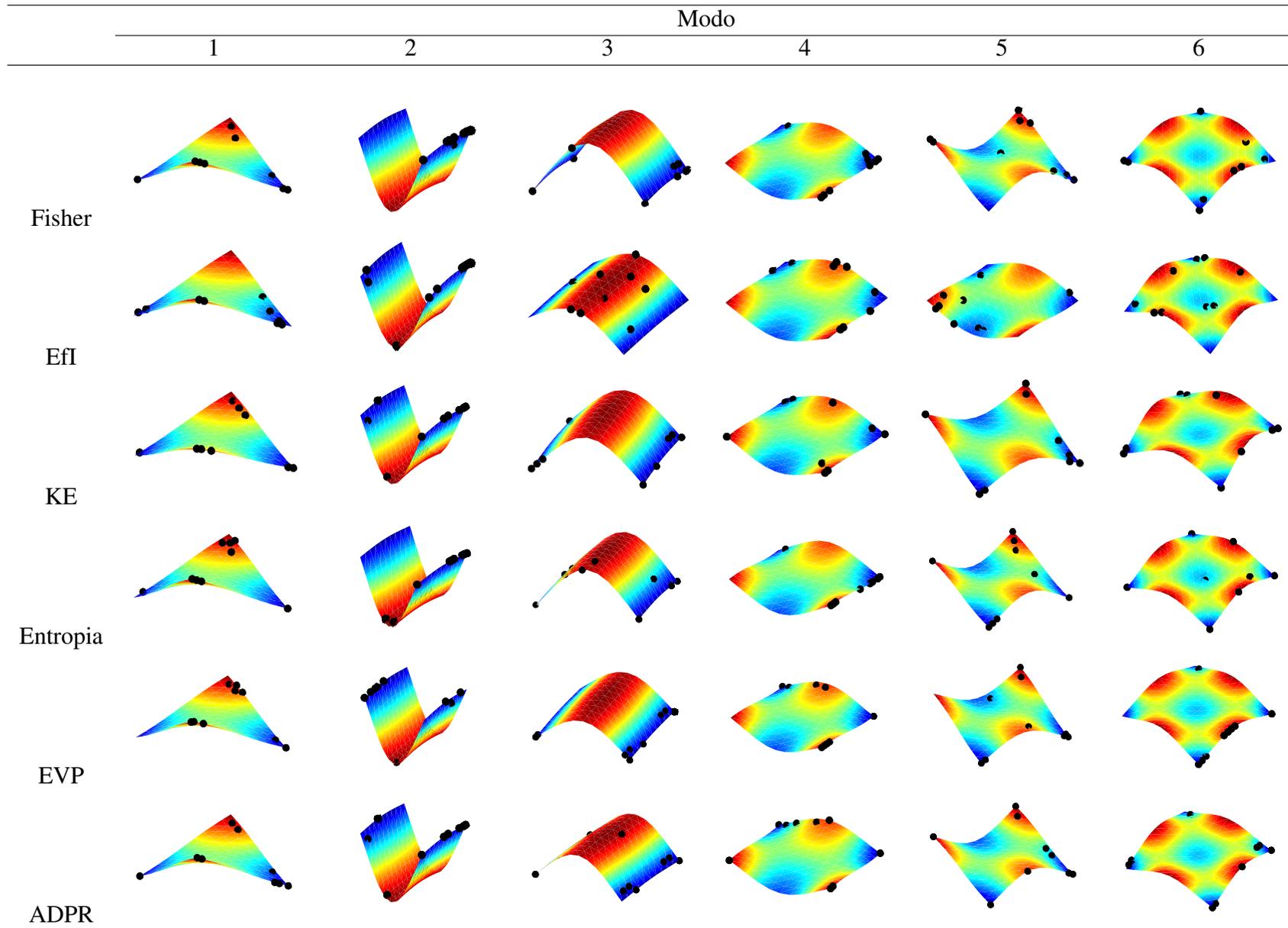
**Tabela 5.4:** Resultados do posicionamento ótimo considerando 4 sensores.



**Tabela 5.5:** Resultados do posicionamento ótimo considerando 6 sensores.

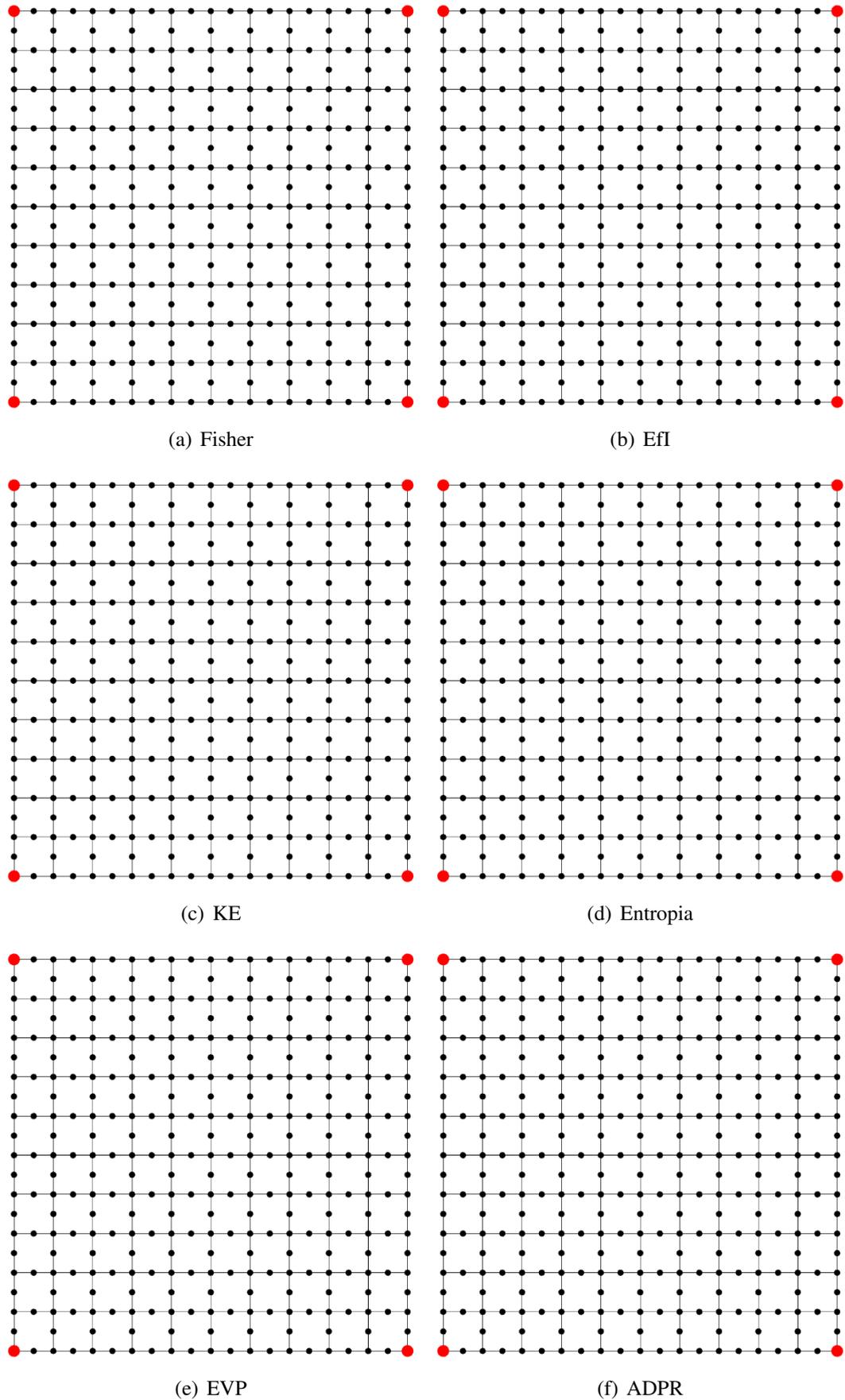


**Tabela 5.6:** Resultados do posicionamento ótimo considerando 9 sensores.

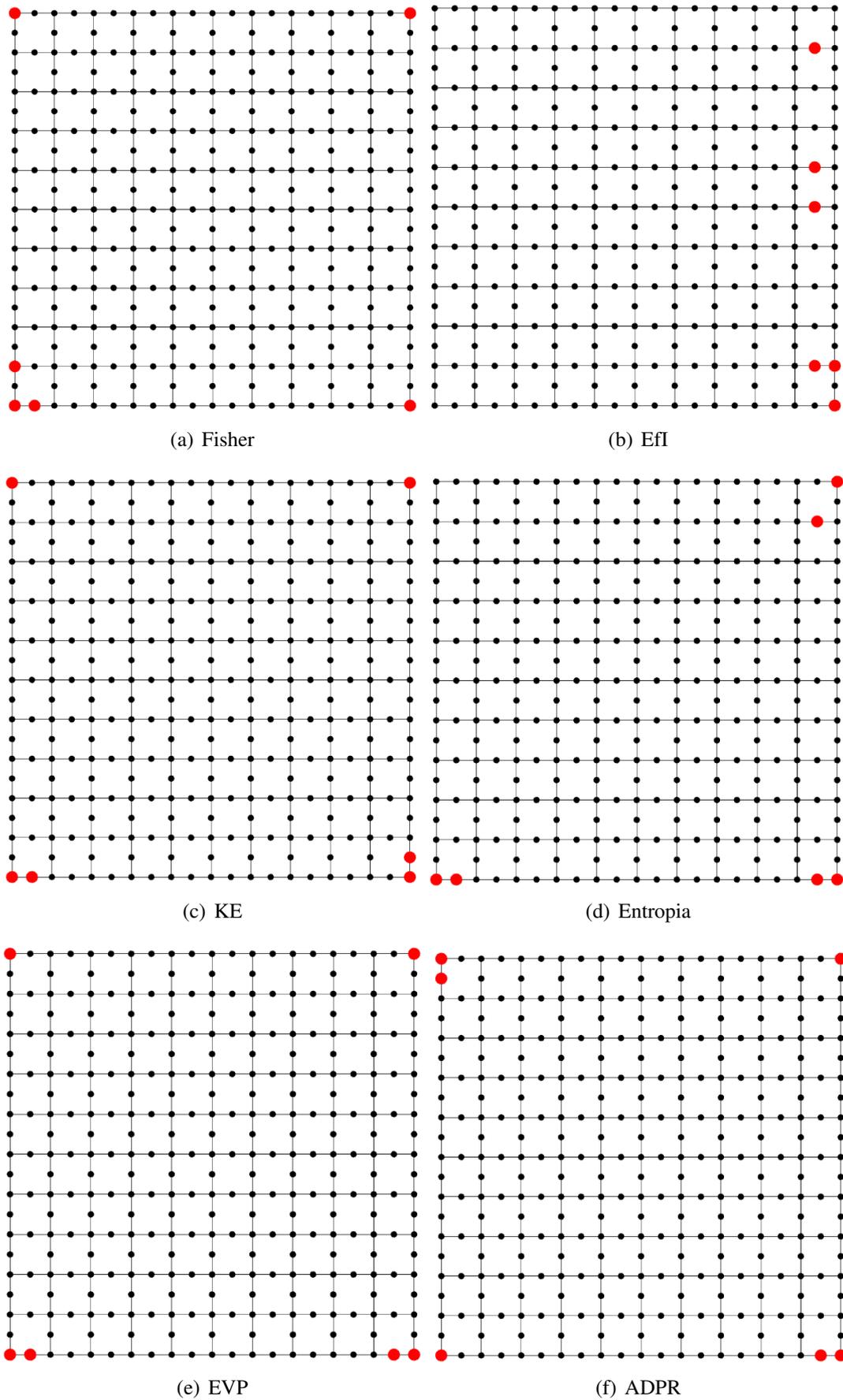


De certo modo, pode-se pensar que talvez seja evidente que a localização ótima dos sensores seja ideal em pontos de maior amplitude de vibração, evitando-se assim os pontos nodais com amplitudes nulas em determinados modos. Porém, ao se tratar de uma geometria de maior complexidade geométrica, a avaliação destes pontos máximos se acrescenta em complexidade. Ainda que obter distribuições ótimas de sensores sobre um modo de vibração seja obtido, a ideia aqui é obter o conjunto de localização dos sensores que levam em consideração dos 6 primeiros modos de vibração, resultando em um problema complexo e nada trivial, sendo necessário métodos eficientes de otimização.

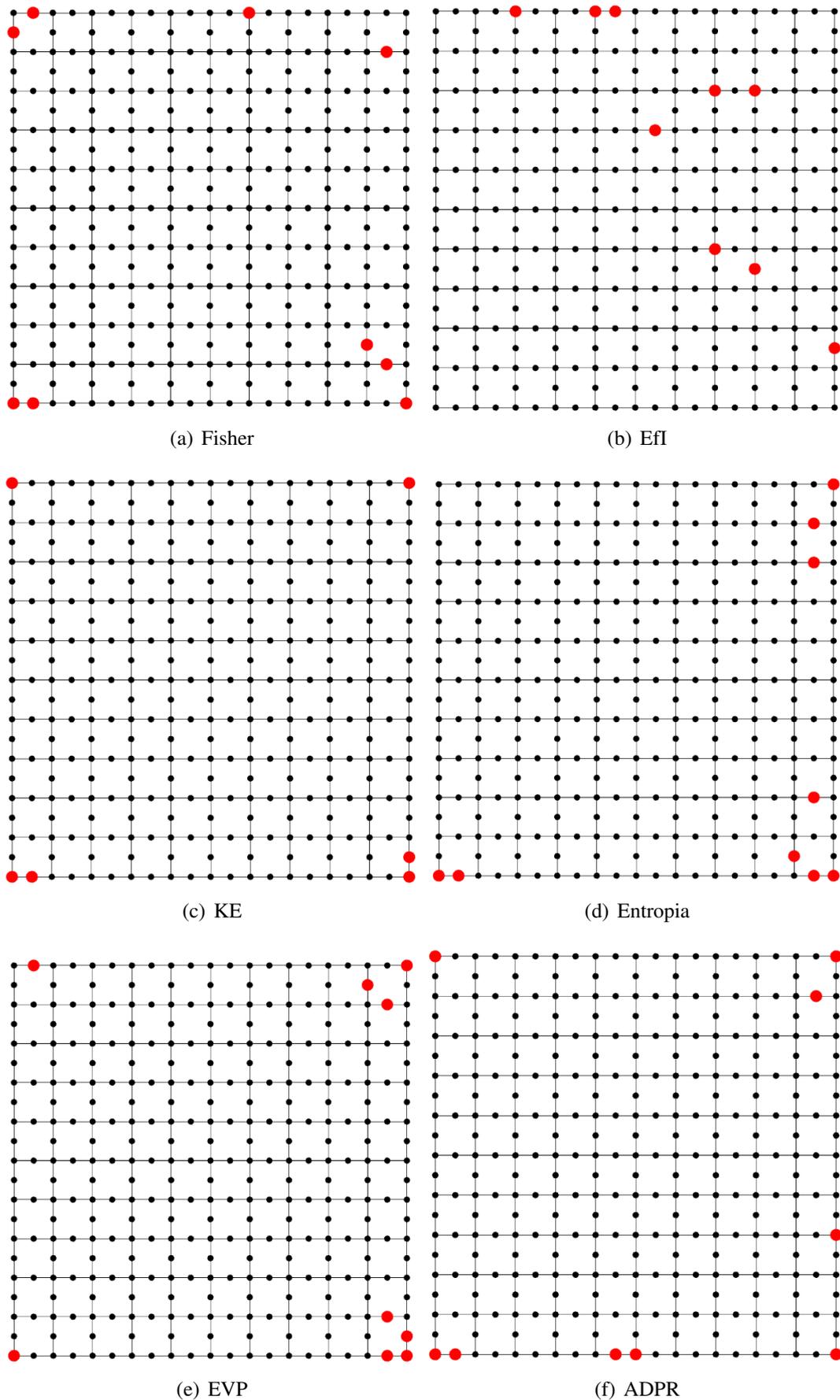
As Figuras 5.7, 5.8 e 5.9 exibem os resultados finais da otimização do  $n = 6$  primeiros modos de vibração da placa em questão. Pode-se verificar que o resultado final ainda foi constituída de pontos de sensoriamentos, no geral, em pontos nas extremidades da placa. A limitação de 4, 6 e 9 sensores talvez ainda seja baixa o suficiente para a não obtenção de pontos de certa forma mais distribuídos ainda somado pelo fato que a estrutura estudada, se tratar de uma placa quadrada simétrica. Na investida de refinar o resultado da distribuição ótima obtida pelos critério de informação modal apresentados neste tópico, optou-se pela introdução de um segundo critério de otimização baseando-se na interpolação modal, que será discutido no item seguinte.



**Figura 5.7:** Resultado geral do posicionamento de 4 sensores por meio de diversos métodos (localização ótima destacada em vermelho).



**Figura 5.8:** Resultado geral do posicionamento de 6 sensores por meio de diversos métodos (localização ótima destacada em vermelho).



**Figura 5.9:** Resultado geral do posicionamento de 9 sensores por meio de diversos métodos (localização ótima destacada em vermelho).

### 5.3.2 Critério de Interpolação dos Modos

O sensoriamento completo em uma estrutura mecânica é na maioria das vezes difícil ou até mesmo impossível, por isso surge a necessidade de se otimizar os pontos em que se pretende adquirir informações a respeito do comportamento estrutural. A segunda tentativa de se otimizar os pontos de sensoriamento se estabeleceu pelo uso do critério de interpolação dos modos de vibração. O conceito aqui abordado objetiva reconstruir o mais fielmente possível o modo de deformação a partir de um número pré-estabelecido de sensores (4, 6 e 9) por meio de interpolação de superfícies.

Os sensores serão otimizados segundo suas posições nodais então pelo minimização da função objetivo  $J_7 = \min(\|\Phi^{FEM} - \Phi^{Interpolado}\|_F)$ , sendo  $\Phi^{FEM}$  os modos obtidos numericamente e  $\Phi^{Interpolado}$  a superfície gerada a partir dos pontos ótimos.

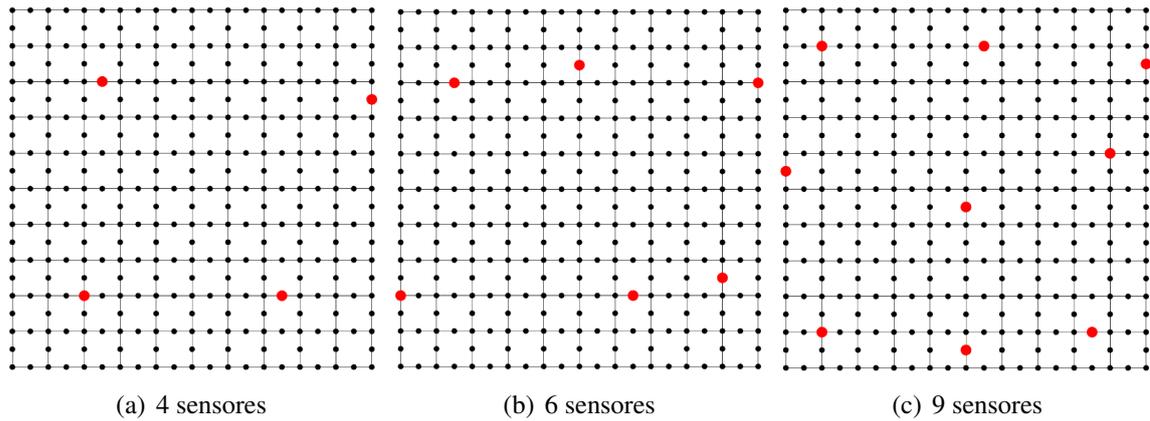
A título de exemplificação, a Tabela 5.7 exhibe a interpolação realizada para os modos em baixa frequência (6 primeiros) considerando 4, 6 e 9 sensores. Fica claro que com o aumento do número de sensores, mais fielmente a superfície modal interpolada é reproduzida em relação ao modo real (numérico). Observa-se ainda que para 4 sensores, modos de ordem mais elevada (a partir do modo 4), houve discrepância significativa entre o real e interpolado. Todavia, para 6 e 9 sensores, os modos corresponderam bem à interpolação pretendida.

Em virtude do que foi mencionado no tópico anterior, objetiva-se a otimização dos sensores lançando mão não somente de um modo interpolado, mas sim pelo conjunto de  $n$  modos de vibração definidos, no caso, tomou-se  $n = 6$ . Observa-se, que otimizar a configuração de sensores distribuídos em uma superfície estrutural visando a interpolação ótimo de um conjunto simultâneo de  $n$  modos não é uma tarefa trivial. Devido às dificuldades envolvidas, faz-se necessário o uso de algoritmos eficientes de otimização, que neste caso, utilizou-se o GA.

A Figura 5.10 exhibe o resultado final do exaustivo trabalho de otimização empregado. Observa-se que diferentemente dos resultados obtidos pelos critério anteriores (Figuras 5.7, 5.8 e 5.9), o resultado aqui gerou sensores mais uniformemente distribuídos, e em posições que não poderiam ser obtidas inicialmente sem que houvesse o emprego de um método computacional robusto de otimização e bem modelado segundo um função objetivo ideal. Pode se traduzir o resultado da configuração obtida, como a distribuição ótima de sensores para a melhor reconstrução dos modos de deformação.

### 5.3.3 Posicionamento Ótimo por Otimização Multiobjetivo

Como visto nos dois tópicos anteriores, sabe-se que os critérios matriciais resultam em pontos nodais ótimos (sensores) em que obtém a maior quantidade e qualidade de informação modal, contudo, os resultados obtidos geraram configurações ótimas de sensores que tenderam a se fixar (localizar) nas extremidades da placa em questão. Em consequência disso, elaborou-



**Figura 5.10:** Resultado de interpolação considerando o conjunto dos 6 primeiros modos de vibração.

se um segundo método para a reconstrução dos modos a partir de uma distribuição ótima de sensores, o que demonstrou ser muito eficaz para tal objetivo, isto é, a partir de uma distribuição ótima de sensores em localizações específicas, consegue-se interpolar uma *spline* de superfície, sendo esta capaz de reconstruir o modo de vibração completo.

Por todos esses aspectos particulares de cada método, pretendeu-se realizar uma otimização multiobjetivo destas duas metodologias anteriormente discutidas. Para tal, lançou-se mão da otimização multiobjetivo evolucionária, fazendo uso do algoritmo NSGA-II (Deb *et al.* (2002)). Este terceiro critério de seleção da configuração ótima dos sensores visa agregar os valores de pontos com maiores quantidades de informação modal (método 1) e os pontos que conseguem reproduzir fielmente os modos de vibração (método 2). O procedimento matemático em essência, é tratado como a otimização dos múltiplos objetivos da Equação 5.4.

$$\begin{cases} \text{Maximizar } J_1 = |\det(Q)| \\ \text{Minimizar } J_7 = \min(\|\Phi^{FEM} - \Phi^{Interpolado}\|_F) \end{cases} \quad (5.4)$$

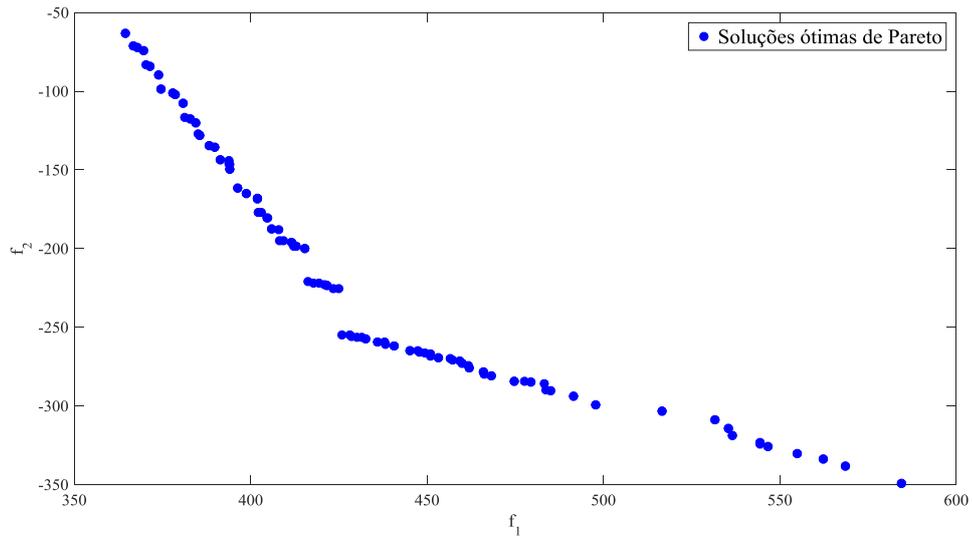
sendo  $J_1$  a função objetivo contendo a matriz de informação de Fisher, e  $J_7$  a função de interpolação dos modos. Obviamente este problema ainda possui restrições, sendo estas as mesmas introduzidas para cada caso separado, isto é, os limites inferiores e superiores de busca do espaço das variáveis de projeto limitados pelo número máximo de nós estruturais, ou seja,  $1 \leq x_i \leq 341$  sendo  $i$  o número de sensores considerados, além de restrições lineares para não se obter sensores em um mesmo nó  $x_i - x_{i-1} \geq 1$  e a restrição não-linear de não colinearidade dos sensores, a fim de se obter um surface,  $\bar{R}^2(x_i) < 1$ .

A Figura 5.11 exhibe os resultados finais obtidos pela otimização multiobjetivo das funções  $J_1$  e  $J_7$ . Nota-se pelos resultados obtidos a formação de um frente de pontos, gerando

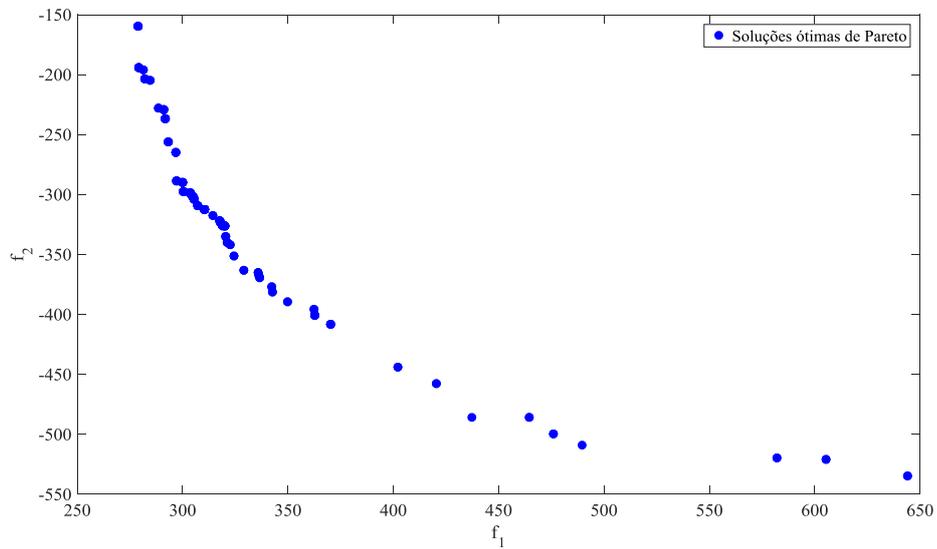
a conhecida frente de Pareto. Essa frente é caracterizada por um conjunto de soluções não-dominadas, isto é, uma solução não-dominada é aquela em que a melhoria determinada pela função  $J_i$  só pode ser alcançada à custa de uma deterioração de outra função  $J_{i+1}$ . Logo, não existe um único ponto de ótimo no problema multiobjetivo em questão, mas sim, um conjunto Pareto-ótimo, onde todas as soluções são ótimas e satisfazem de forma diferente os objetivos envolvidos no processo.

Contudo, devido ao grande número de soluções ótimas obtidas, faz-se necessário a escolha de um ponto que fornece o *layup* ótimo dos sensores. Neste parte do estudo, optou-se pelo ponto que minimizaria simultaneamente  $J_1$  e  $J_7$  com um menor valor possível, ou seja  $J_1 + J_7$  com o menor resultado. Ainda não é muito claro os critérios de tomada de decisão em otimização multiobjetivo, e em geral, a tomada de decisão pela escolha de uma solução ótima dentre todas as disponíveis no conjunto de soluções ditas não-dominadas depende de cada caso particular.

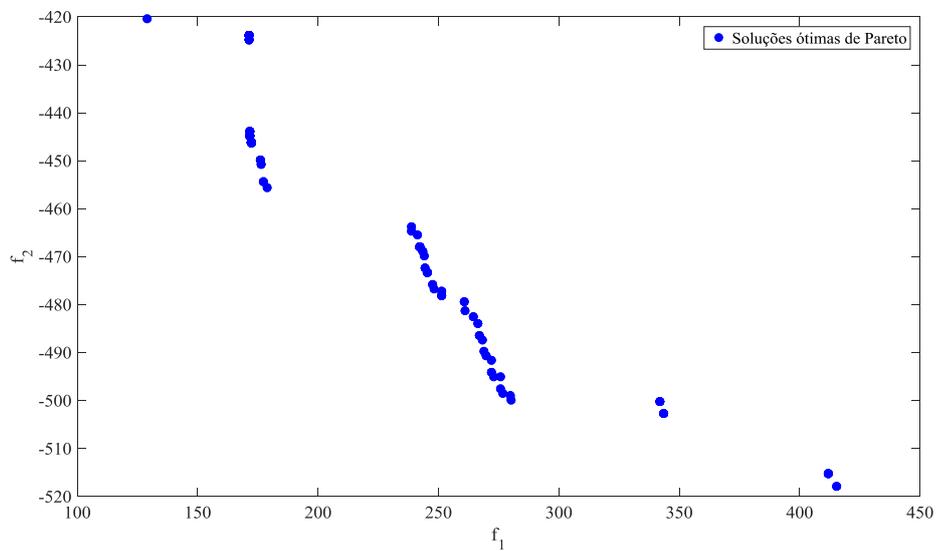
Como critério de tomada de decisão, optou-se pela escolha do ponto B da Figura 5.12, pois este ponto atende os dois objetivos simultaneamente. Os pontos A e C são correspondentes aos valores mínimos das funções  $f_1 = J_7$  e  $f_2 = J_1$ , respectivamente. Como discutido no parágrafo anterior, não existe uma melhora em uma função sem que haja perda em outra, por isso a escolha do ponto B. A configuração ótima dos sensores também são exibidas nas Figuras 5.12a, 5.12b e 5.12c, mostrando a diferença dentre as configurações nas soluções ótimas. Acrescenta-se ainda que para o caso de 9 sensores, o ponto A coincidiu com o ponto B escolhido, retificando a escolha do ponto B como solução escolhida. Logo, as posições obtidas nas soluções multiobjetivos serão consideradas para que se possa fazer uso de método inverso de otimização para identificação de danos a partir do modo de vibração reduzido. Mais adiante fará uso desta configuração ótima para a identificação inteligente de danos usando redes neurais artificiais.



(a) 4 sensores

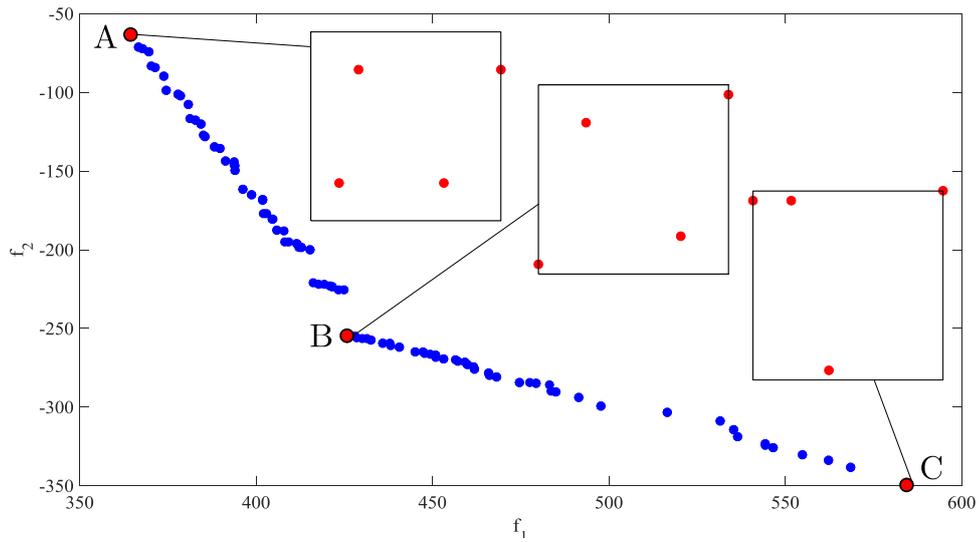


(b) 6 sensores

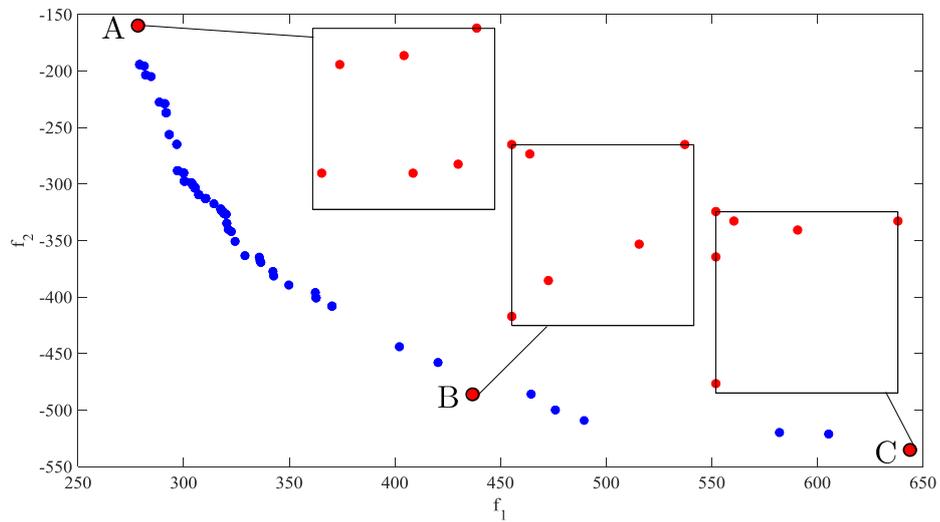


(c) 9 sensores

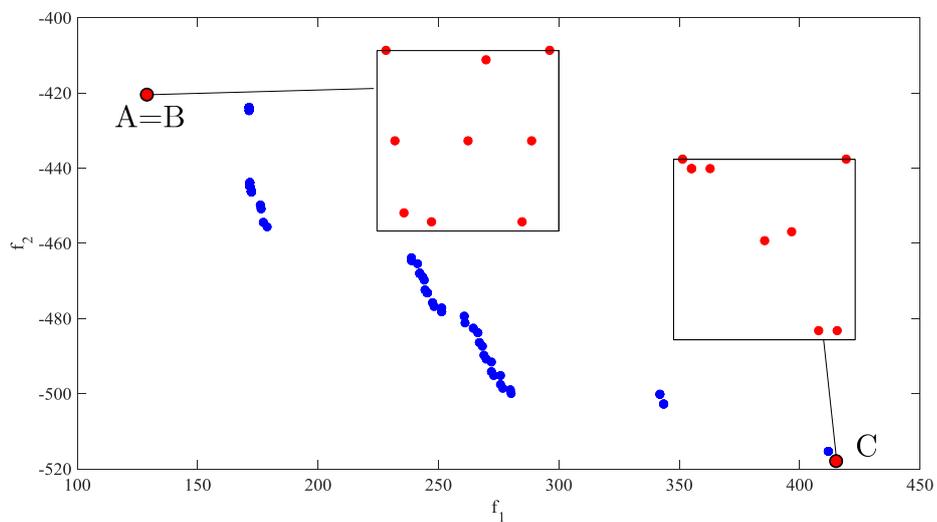
**Figura 5.11:** Resultado da otimização multiobjetivo considerando os seis primeiros modos de vibração.



(a) 4 sensores



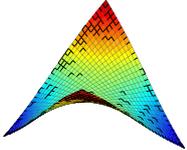
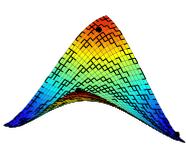
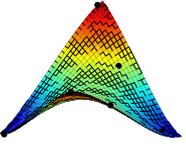
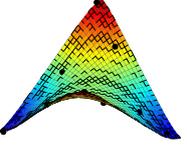
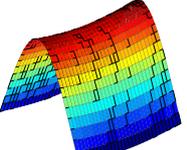
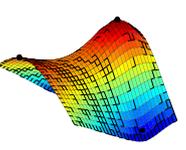
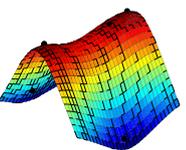
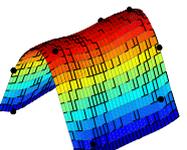
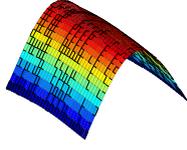
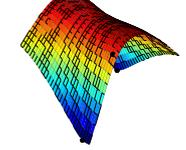
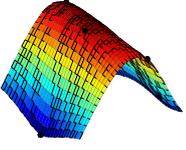
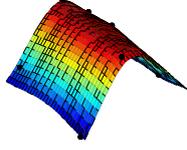
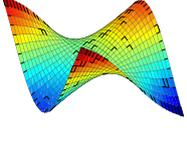
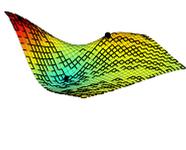
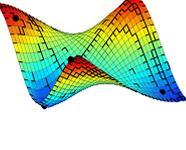
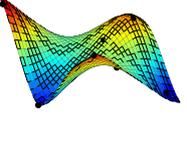
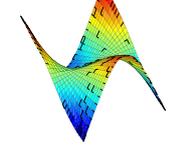
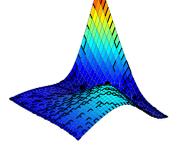
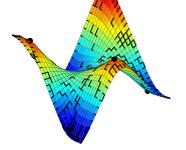
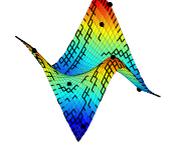
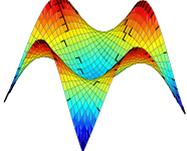
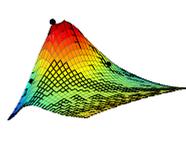
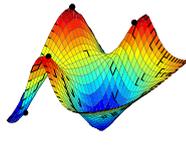
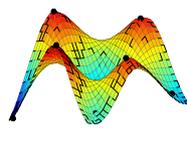
(b) 6 sensores



(c) 9 sensores

**Figura 5.12:** Resultados multiobjetivos exibindo as posições dos sensores e tomada de decisão.

**Tabela 5.7:** Resultado de interpolação dos modos de vibração usando um número reduzido de pontos em localização ótimas

Modo	Original	Interpolado		
		4 sensores	6 sensores	9 sensores
1				
2				
3				
4				
5				
6				

## 5.4 Identificação de Danos por meio de Heurísticas de Otimização

A primeira metodologia computacional abordada para detecção de danos é referente às técnicas heurísticas de otimização. Neste trabalho optou-se pelo uso dos algoritmos genéticos devido suas vantagens citadas nos capítulos anteriores deste trabalho. Como o problema aqui trata do uso de funções implícitas (não existe uma função que modela a resposta modal em função do dano), justifica-se o uso de tais técnicas evolucionárias. Levando-se em consideração a problemática de detecção de danos e da importância dos algoritmos evolucionários na solução do problema inverso, propõe-se uma nova heurística de otimização a partir da modificação do algoritmo de polinização de flores por meio de uma reprodução orientada, aplicado à detecção de danos, modelados como furos circulares.

Em estudos de detecção de danos, é importante obter e avaliar mais de uma técnica de identificação de danos, pois a partir dos resultados obtidos para cada uma, independentemente, pode-se validar a metodologia estudada. No caso dos métodos de otimização, faz-se uso de dois algoritmos distintos, algoritmo genético e *SunFlower*. Os resultados obtidos por ambos métodos de otimização serão comparados entre si e ainda o uso de redes neurais artificiais mais adiante será empregada e ainda de mesmo modo, contraposta aos outros métodos utilizados (AG e SFO). Os resultados obtidos para ambos algoritmos serão discutidos na sequência do Capítulo.

### 5.4.1 Resultados obtidos pelo algoritmo genético

Como o algoritmo genético é um método de ordem zero, ou seja, independe de derivadas de função, é necessário que se obtenha uma média a partir de várias simulações, a fim de se obter uma média global do resultado. De tal modo, efetuou-se o estudo considerando uma média para 4 simulações. Este valor foi obtido considerando um fatorial completo onde se é necessário um número de experimentos da ordem de  $2^n$  (Montgomery (1991)), sendo  $n$  o número de variáveis. Como no problema avaliado  $n = 2$ , pois o dano está modelado como uma redução local de rigidez no elemento  $N_e$  com uma determinada severidade  $\alpha$ , resulta-se no total de  $2^2 = 4$  buscas aleatórias para que se obtenha certo nível de confiabilidade nos resultados obtidos pela otimização. A Tabela 5.8 exhibe os resultados da busca pelo dano nas posições conhecidas (objetivo). Considerou-se três possíveis cenários de danos neste estudo, considerando danos em diferentes posições da placa.

O dano foi então obtido por meio do problema inverso considerando a minimização da

função objetivo  $J_{\Phi}$ :

$$J_{\Phi} = \sum_{i=1}^n \left( 1 - \frac{\phi_{i,s}^{\text{calculado}}}{\phi_{i,s}^{\text{real}}} \right)^2 \quad (5.5)$$

Para tal minimização considerou-se a aquisição dos deslocamentos nodais em posições ótimas de pontos, que foram obtidas pelo método de posicionamento ótimo dos sensores discutido nos tópicos anteriores. Optou-se pelo uso de 4 sensores na medição, a posição destes sensores é referente ao ponto de múltipla minimização dos objetivos da Figura 5.12a.

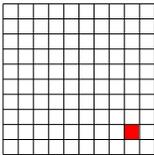
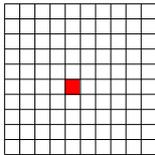
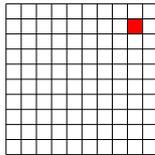
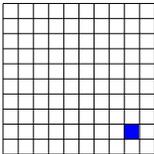
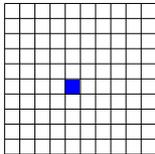
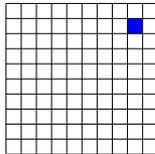
Os resultados obtidos da Tabela 5.8 exibem o bom desempenho do algoritmo na identificação do dano, particularmente na posição do dano. Houveram pequenos erros em relação à identificação da severidade do dano, todavia, o alvo que mais se almeja neste trabalho se refere à localização do dano, sendo a severidade um passo à frente na metodologia SHM, referente ao prognóstico de falhas, o que não é o objetivo deste trabalho.

A Tabela 5.9 exibe os resultados gráficos da identificação de danos, exibindo a perfeita identificação na posição exata do objetivo (dano inserido com localização conhecida).

**Tabela 5.8:** Resultados da identificação do dano usando GA em um número reduzido de pontos sensorizados.

	Cenário I		Cenário II		Cenário III	
	$N_e$	$\alpha$	$N_e$	$\alpha$	$N_e$	$\alpha$
Objetivo	19	20%	45	20%	89	20%
Busca 1	19	20.0046	45	20.0016	89	20.0110
Busca 2	19	19.9998	45	20.0079	89	20.0030
Busca 3	19	20.0002	45	20.0000	89	19.9966
Busca 4	19	19.9999	45	19.9287	89	20.0116
Média	19	20.0011	45	19.9846	89	20.0056
Desvio	0	0.0023	0	0.0374	0	0.0071

**Tabela 5.9:** Resultados da gráficos da identificação de danos usando GA, sem ruído.

	Cenário I	Cenário II	Cenário III
Objetivo			
Resultado			

Mais adiante, neste estudo, a fim de verificar a robustez e sensibilidade do método, a adição de ruído gaussiano branco será considerada nas respostas obtidas pelos sensores.

### 5.4.2 Resultados obtidos pelo algoritmo SunFlower

A segunda técnica evolutiva abordada neste estudo faz referência ao algoritmo de polinização de flores. Nesta parte, introduziu-se uma nova proposição de algoritmo, tendo como base o fototropismo inerente aos girassóis. A contribuição nesta parte se dá pela introdução de uma nova heurística global de otimização, fazendo com que a reprodução das flores seja de modo aleatório (o que caracteriza um método estocástico), porém de modo direcionado em uma direção específica. Semelhantemente ao tópico anterior, o algoritmo aqui introduzido, chamado *SunFlower Optimization* ou simplesmente otimização por polinização de girassol, foi aplicado à detecção de delaminações em laminados compósitos, na tentativa de identificar a localização do dano (elemento estrutural danificado) e sua severidade (perda de rigidez local).

Antes mesmo de atacar o problema de detecção de danos com o novo algoritmo aqui proposto, fez-se necessário um estudo preliminar do desempenho do mesmo em funções conhecidas como funções de teste. O Anexo C trata os resultados em relação da eficiência do algoritmo para determinados caso de teste.

Para a aplicação do algoritmo, precisa-se de antemão definir suas variáveis, isto é, seus operadores biológicos. Tais operadores são fundamentais e de certo modo regem e ditam o ritmo do algoritmo pela busca por regiões ótimas. Neste estudo, chegou-se a um conjunto de valores interessantes que são exibidos na Tabela 5.10. Os resultados referentes aos parâmetros do algoritmo SFO são discutidos com detalhes no Anexo A.

**Tabela 5.10:** Operadores biológicos do algoritmo SunFlower aplicado à identificação de delaminação.

Operador	Valor
População	$10 \times N_{\text{variáveis}}$
Taxa de Polinização	0.10
Taxa de Mortalidade	0.10
Taxa de Sobrevivência	0.80
Número de Sóis	1
Gerações	100

A Tabela 5.11 exhibe os resultados da solução do problema inverso construído. A solução deste problema, se deu pela minimização da mesma função objetivo  $J_{\Phi}$  mencionada anteriormente. Como pode ser visto pela Tabela 5.11, o algoritmo empregado exhibe excelente desempenho no que se diz respeito a identificação da localização de danos. Em relação a identificação da severidade do dano, isto é, quantificar o termo  $\alpha$ , o método obteve ótima atuação. Nesta

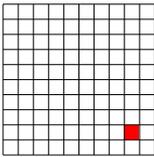
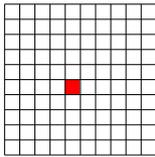
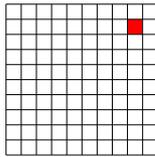
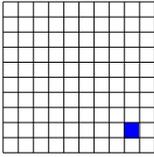
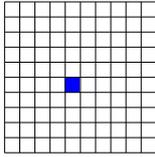
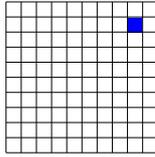
parte, uma modificação no algoritmo *SunFlower* foi necessário, para o tratamento de variáveis inteiras (programação inteira).

A Tabela 5.12 exibe os resultados gráficos do algoritmo para a detecção dos danos em três cenários distintos de danos. Pode-se observar que o algoritmo identificou o dano real (simulado) conhecido com precisão. Ressalta-se ainda que o algoritmo empregado fez uso de uma população de indivíduos de  $10 \times N_{variveis}$ , sendo o número de variáveis  $N_{variveis}$  deste estudo igual a 2, ou seja, uma população de 20 indivíduos, evoluindo ao longo de 100 gerações, resulta em um número total de 2000 avaliações de função objetivo, o é um número relativamente pequeno de avaliações ao considerar que o problema aqui tratado é complexo com funções multimodais.

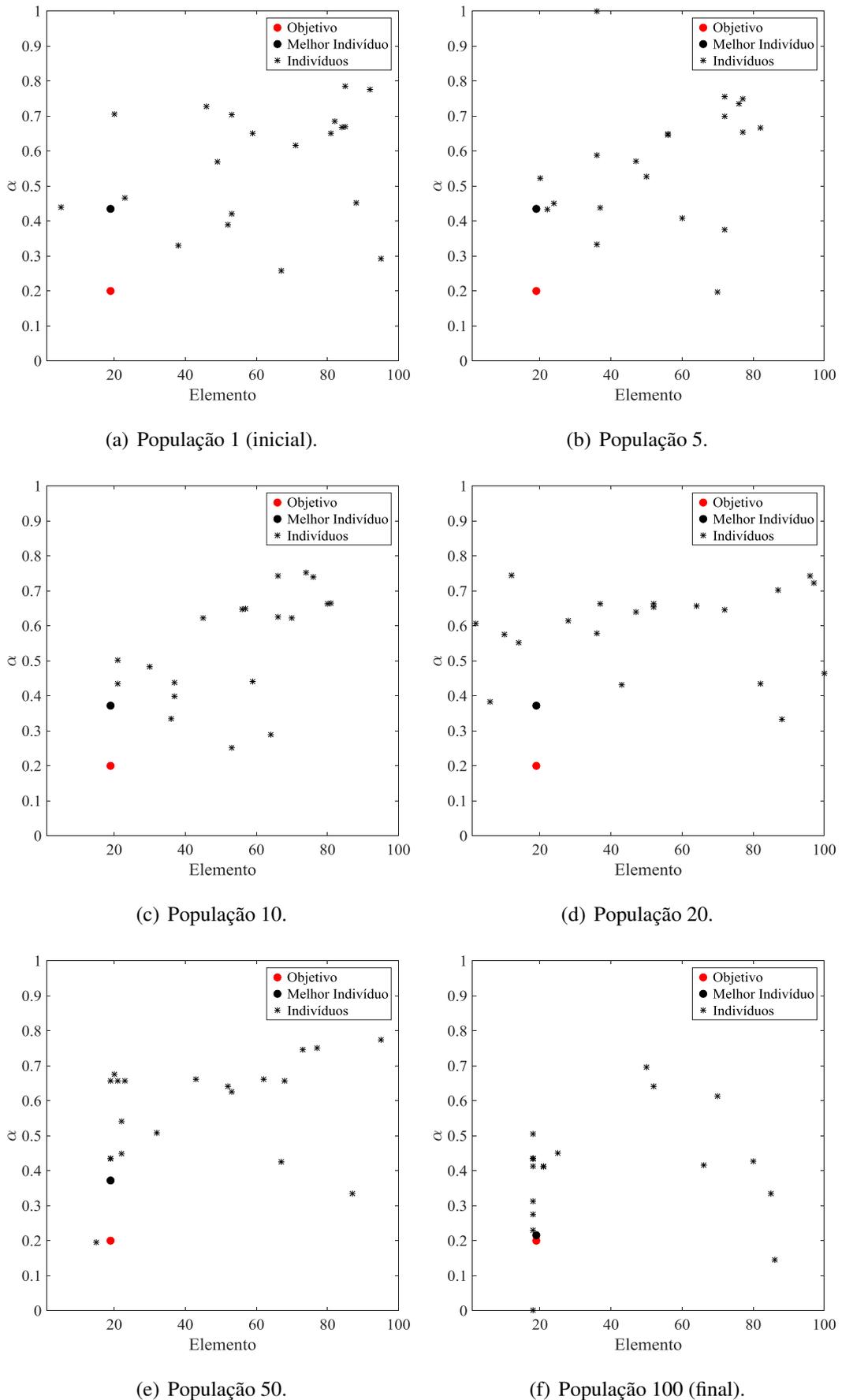
**Tabela 5.11:** Resultados da identificação do dano usando *Sunflower Optimization* em um número reduzido de pontos sensoriados.

	Cenário I		Cenário II		Cenário III	
	$N_e$	$\alpha$	$N_e$	$\alpha$	$N_e$	$\alpha$
Objetivo	19	20%	45	20%	89	20%
Busca 1	19	21.4353	45	21.4101	89	20.0583
Busca 2	19	18.0224	45	21.1615	89	20.0008
Busca 3	19	18.4827	45	20.1561	89	19.9926
Busca 4	19	18.3692	45	19.8912	89	18.3615
Média	19	19.0774	45	20.6547	89	19.6033
Desvio	0	1.5841	0	0.7436	0	0.8284

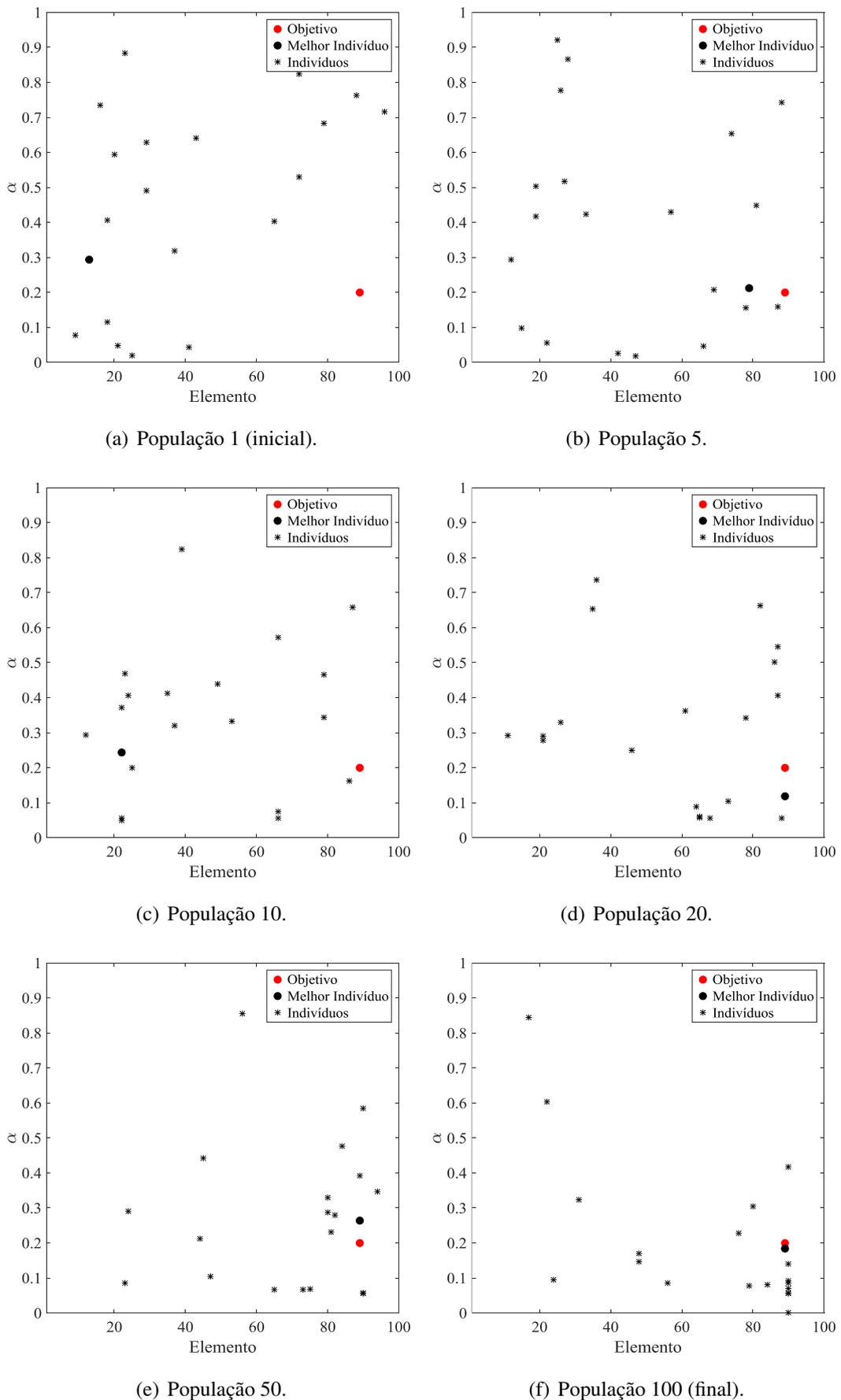
**Tabela 5.12:** Resultados da gráficos da identificação de danos usando *Sunflower Optimization*, sem ruído.

	Cenário I	Cenário II	Cenário III
Objetivo			
Resultado			

Justamente com os resultados da identificação de delaminações pelo algoritmo SFO, pode-se observar claramente o aspecto evolutivo do método por meio das Figuras 5.13 e 5.14. Pode-se observar que a população inicial de indivíduos evolui de maneira controlado segundo seus operadores biológicos da Tabela 5.10 até que estejam próximas suficientes do melhor indivíduo, aqui, tratado como o sol, recebendo a maior quantidade de fonte de calor possível. O operador de mortalidade  $m_p$  ainda adiciona certa variabilidade ao método, fazendo que o algoritmo não fique preso em regiões sub-ótimas, conhecidas como mínimos locais.

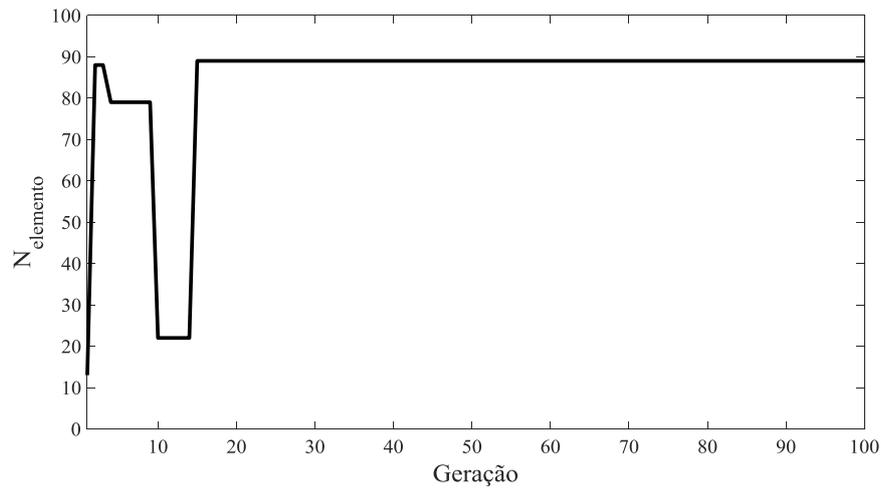


**Figura 5.13:** Convergência na população de girassol para detecção de delaminação no elemento 19.

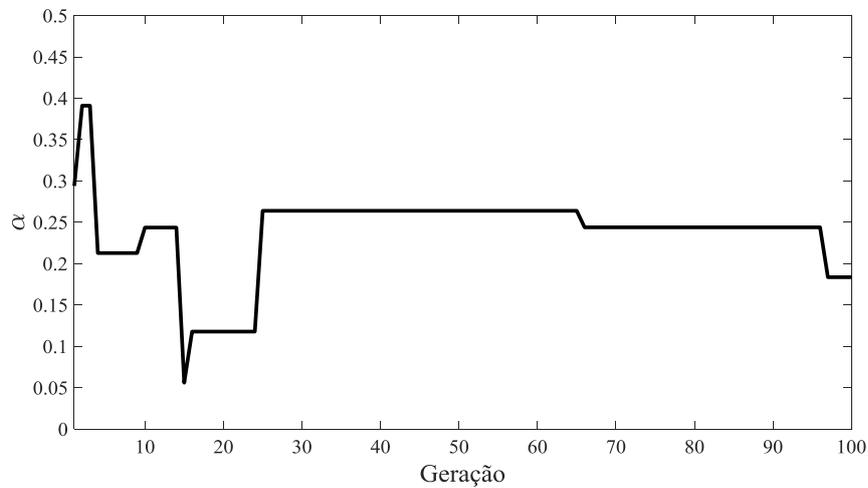


**Figura 5.14:** Convergência na população de girassol para detecção de delaminação no elemento 89.

No que se diz respeito à convergência da otimização, a Figura 5.15 exibe a variação das duas variáveis de projeto ( $N_{elemento}$  e  $\alpha$ ) ao longo do processo evolutivo (gerações) para a identificação de dano no elemento 89. A posição do dano foi identificado com maior agilidade pelo método, sendo a segunda variável  $\alpha$  apresentando maior oscilação ao longo do tempo. De fato, este termo de severidade do dano é menos propenso à identificação do que a sua localização estrutural propriamente dito.



(a)



(b)

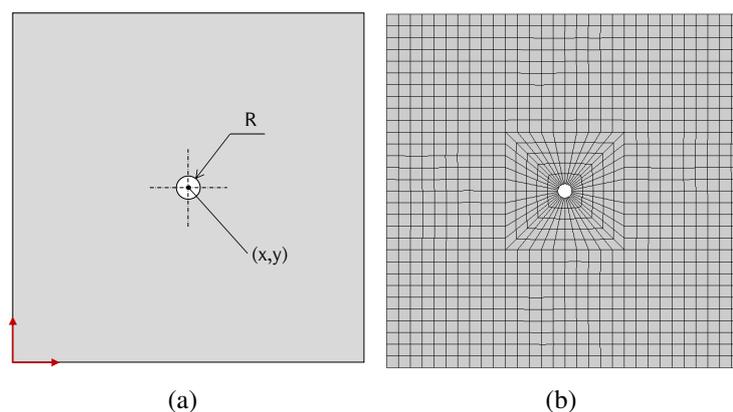
**Figura 5.15:** Variação das variáveis de projeto ao longo das gerações.

### 5.4.3 Caso particular de detecção de furos circulares

Particularmente tratando sobre este tópico, objetivou-se o estudo da detecção de danos, sendo estes, modelados como furos circulares, ou seja, o dano aqui é tratado como uma modificação nas propriedades geométricas da estrutura. Este estudo específico sobre detecção de furos circulares tem como um de seus intuitos, verificar a capacidade dos métodos numéricos de otimização, principalmente sobre o método *SunFlower* proposto, em detectar danos mais complexos. O dano como um furo é dito mais complexo em termos de modelagem numérico-matemática, pois o vetor de variáveis de projeto possui agora 3 variáveis (posição  $x$  e  $y$  do furo e seu raio  $r$ ).

Entende-se que de certo modo, agrega-se um maior nível de complexidade por meio deste dano às respostas estruturais em termos numéricos, uma vez que o furo circular, além de promover uma alteração na rigidez estrutural (assim como as delaminações) ainda acarreta a uma redução da massa local estrutural. As respostas modais não são então de fácil previsão.

Antes de construir o modelo em elementos finitos, é importante pensar se uma malha livre ou uma malha mapeada é apropriada para a análise. Neste trabalho, uma malha estruturada foi usada visando economizar custo computacional e evitar problemas de convergência na resposta modal de um laminado composto. As dimensões da estrutura são as mesmas para o caso anterior, ou seja, um laminado quadrado de lado  $a = 30\text{cm}$ , e com as mesmas orientações das fibras formando um laminado  $[0/30]_{3S}$  com espessura  $t = 0.18\text{mm}$ . O dano por sua vez foi introduzido na estrutura sob a forma de um furo circular e parametrizado conforme a posição do seu centro  $x$  e  $y$  além do seu raio  $R$ . A Figura 5.16 exhibe a estrutura na presença do dano em uma posição central na placa. Utilizou-se elementos de casca (*shell*) na modelagem de laminado e optou-se pela malha estruturada, evitando problemas na obtenção de respostas modais.



**Figura 5.16:** Modelagem do dano como um furo circular.

Para a obtenção dos parâmetros desconhecidos do dano, tais como sua localização  $(x,y)$  e extensão ( $R$ ), pode-se lançar mão de um problema inverso com uso da diferença entre os

valores conhecidos ou medidos das frequências naturais e os valores calculados obtidos a partir do algoritmo de otimização. A minimização desta função, permite que o algoritmo de detecção de danos encontre os parâmetros desconhecidos do dano. Os valores estruturais simulados foram obtidos por meio do MEF. Nesta seção, a função objetivo  $J_8$  é construída com base na variação de frequências naturais definida em Gomes (2016), da seguinte forma:

$$J_8(\alpha) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{\omega_i^{real}}{\omega(\alpha)_i^{optimization}}\right)^2} \quad (5.6)$$

sendo  $\omega_i^{real}$  as frequências naturais obtidas da estrutura real (danificada) e as frequências obtidas pelo procedimento de otimização definidas por  $\omega_i^{otimizada}$ . O vetor que contém as variáveis de projeto é definido por  $\alpha$ , sendo composto pela posição do centro do furo e seu raio, isto é,  $\alpha = \{x, y, r\}$  e o número total de frequências analisadas neste caso foram  $n = 6$ .

Implementou-se também o uso de algoritmos genéticos para a detecção dos furos circulares. O uso dos GAs é pretendido para que se obtenha a solução do problema inverso para a detecção dos furos e também para que se tenha um parâmetro de campanha com o algoritmo de polinização (SFO). Os parâmetros de controle do GA e SFO são apresentados na Tabela 5.13. Cabe ressaltar que a detecção dos furos por meio do algoritmo SFO foi estabelecida em duas frentes: uma primeira, utilizando parâmetros definidos arbitrariamente e em uma segunda abordagem utilizando parâmetros ótimos. Os parâmetros ótimos do SFO foram obtidos por meio de critério estatístico de *design* de misturas (Anexo A). Em todos os casos aqui estudados, assumiu-se como critério de parada o número total de iterações (gerações para GA e dias para SFO).

**Tabela 5.13:** Paramêntros principais dos algoritmos GA e SFO.

Algoritmo Genético		SunFlower		SunFlower ótimo	
Operador	Valor	Operador	Valor	Operador	Valor
População	100	Flores	100	Flores	100
Crossover	0.60	Polinização	0.60	Polinização	0.10
-	-	Mortalidade	0.00	Mortalidade	0.10
-	-	Sobrevivência	0.40	Sobrevivência	0.80
Elitismo	1	Número de Sóis	1	1	
Gerações	100	Gerações (Dias)	100	100	

A Tabela 5.14 exhibe os resultados obtidos de 8 simulações realizadas sequencialmente para o problema de detecção de danos. É conveniente efetuar várias simulações pois as técnicas de otimização aqui empregadas neste trabalho, incluindo a otimização SFO, são técnicas heurísticas, ou seja, se baseiam em buscas aleatórias. Então, o número de 8 simulações foram estabelecidas, completando um fatorial completo ( $2^n$ ). Nesse caso  $n = 3$  com  $\alpha = \{x, y, r\}$ .

**Tabela 5.14:** Resultados da detecção de danos usando GA e SFO.

	GA			SFO			SFO otimizado		
	$x(m)$	$y(m)$	$r(mm)$	$x(m)$	$y(m)$	$r(mm)$	$x(m)$	$y(m)$	$r(mm)$
Objetivo	0.1500	0.1500	6.0000	0.1500	0.1500	6.0000	0.1500	0.1500	6.0000
Busca 1	0.1551	0.1510	6.2149	0.1558	0.1422	6.5224	0.1499	0.1460	6.5009
Busca 2	0.1324	0.1329	7.7145	0.1329	0.1253	5.8584	0.1412	0.1594	6.6434
Busca 3	0.1547	0.1264	6.7659	0.1746	0.1155	6.7098	0.1546	0.1411	5.5111
Busca 4	0.1603	0.1625	6.3470	0.1570	0.1361	5.2669	0.1456	0.1417	6.9744
Busca 5	0.1674	0.1584	7.7267	0.1712	0.1428	5.2302	0.1501	0.1474	7.1244
Busca 6	0.1534	0.1424	7.3959	0.1515	0.1461	6.6132	0.1458	0.1569	5.0965
Busca 7	0.1603	0.1263	6.7658	0.1324	0.1329	7.7145	0.1392	0.1535	8.6959
Busca 8	0.1603	0.1624	7.3469	0.1513	0.1389	7.3950	0.1628	0.1421	6.1086
Média	0.1555	0.1453	7.0347	0.1533	0.1350	6.4138	0.1487	0.1485	6.5819
Desvio	0.0103	0.0155	0.5926	0.0154	0.0102	0.9117	0.0076	0.0072	1.1023

Como pode ser visto a partir da Figura 5.17, os resultados da busca pelo dano foram suficientemente satisfatórios (convergiu a uma região bem próxima quase concêntrica e/ou tangencial). Em ambos os métodos (GA e SFO), os resultados obtidos da estimativa do dano foram semelhantes ao dano conhecido (induzido). No entanto, o método de otimização SFO proposto apresentou um desempenho ainda inferior se comparado com o GA. Isso ocorre porque o método proposto ainda está em uma versão *beta*, programado em algumas dezenas de linhas de comando em programas comerciais de engenharia, e o GA já é um método com uma grande contribuição de vários pesquisadores e programação muito bem elaborada em softwares comerciais.

Contudo, os resultados obtidos por meio do SFO otimizado (com parâmetros de controle ótimos) apresentou desempenho muito superior ao algoritmo SFO e até mesmo ao GA (Figuras 5.17c e 5.17d). Uma taxa de mortalidade de 10% introduziu uma certa ordem de aleatoriedade na busca pelo dano e ainda a taxa de 80% para a taxa de sobrevivência (passos aleatoriamente controlados das flores em direção ao sol) contribuiu significativamente para esta melhoria observada.

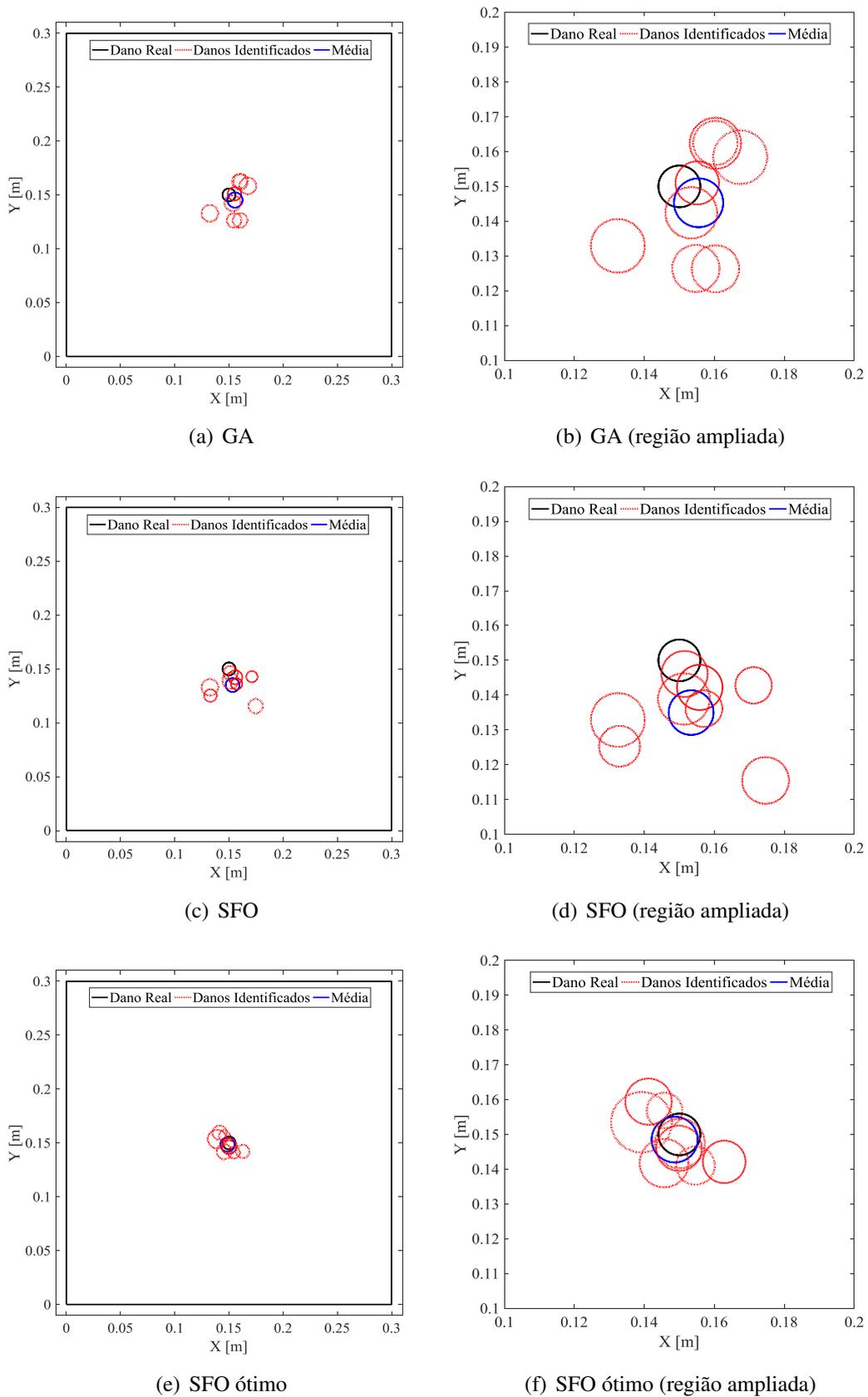
A Figura 5.18 mostra a distribuição da população final em ambos algoritmos. A população final do GA (Figura 5.18a) apresenta uma maior variabilidade em relação ao ótimo global encontrado em comparação ao SFO. Este fato pode ter promovido um melhor resultado de detecção de danos do GA em relação ao SFO inicial, e ainda favoreceu à não estagnação local. Como o algoritmo SFO inicial não aprestou taxa de mortalidade de uma parcela dos indivíduos, a população final ficou muito concentrada próximo ao ponto ótimo final identificado (Figura 5.18b).

Em referência ao algoritmo SFO ótimo, a população final, por sua vez, apresentou um comportamento com um nível de variabilidade bem maior do que o SFO inicial. Diz-se variabilidade fazendo menção ao espaçamento dos indivíduos da população final em relação ao

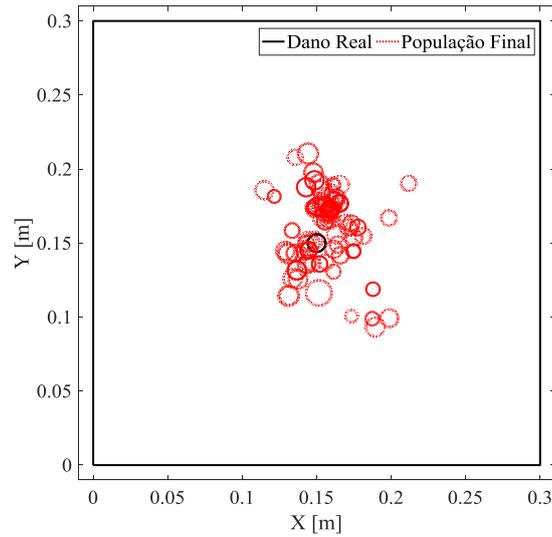
ótimo global conhecido (dano induzido na posição central da placa). Pode-se então dizer que, uma taxa de sobrevivência  $p_s$  elevada, juntamente com uma taxa de mortalidade  $p_m$  da ordem de 10% contribuiu para a melhoria significativa do algoritmo em detectar os danos. Os danos detectados pelo SFO ótimo por sua vez, foram mais precisos do que o próprio AG utilizado em *software* comercial de engenharia.

Em relação à convergência do algoritmo, a Figura 5.19 exibe a variação das variáveis de projeto ao longo das gerações para uma execução específica dos algoritmos. É perceptível notar que a variável  $r$ , relacionada com a extensão do dano, foi a variável mais difícil à identificação, isto é, teve um maior desvio padrão (Tabela 5.14) do que as variáveis  $x$  e  $y$  da posição do furo (Figura 5.19). A Figura 5.20 exibe iterativamente a variação das populações de indivíduos (flores) ao longo das gerações, com alvo de detecção do dano real induzido na placa e complementarmente a Figura 5.21 exibe o melhor indivíduo de populações específicas ao longo das gerações para uma execução específica do algoritmo de identificação de danos.

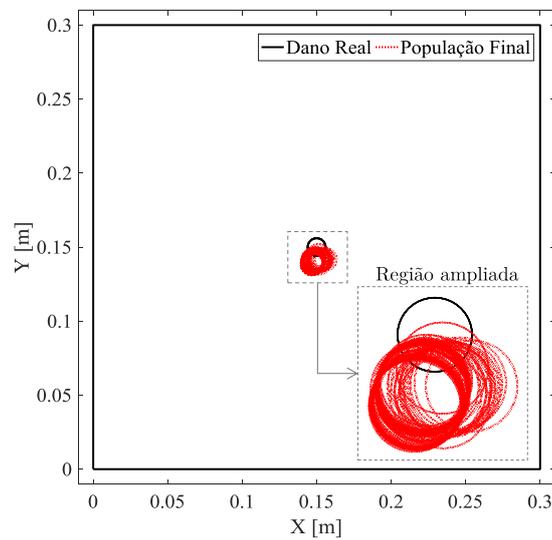
(intencionalmente deixado em branco)



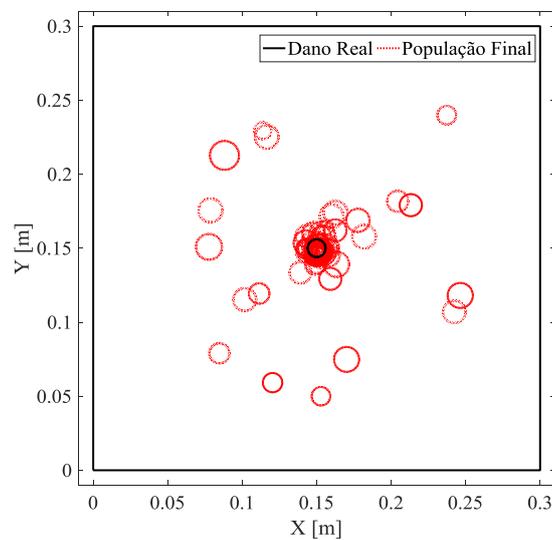
**Figura 5.17:** Resultados da detecção de dano (furos) em placa laminada usando GA, SFO e SFO com parâmetros otimizados.



(a) População final GA

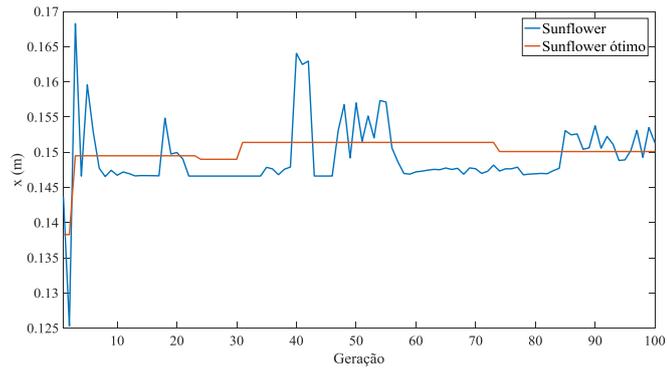
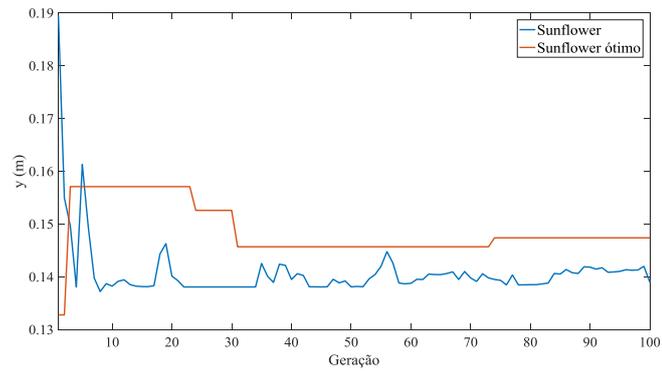
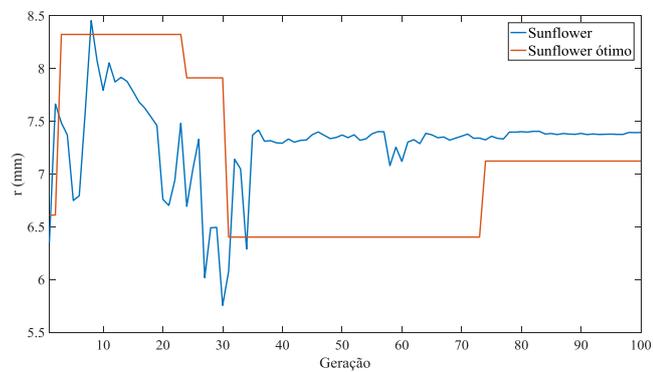
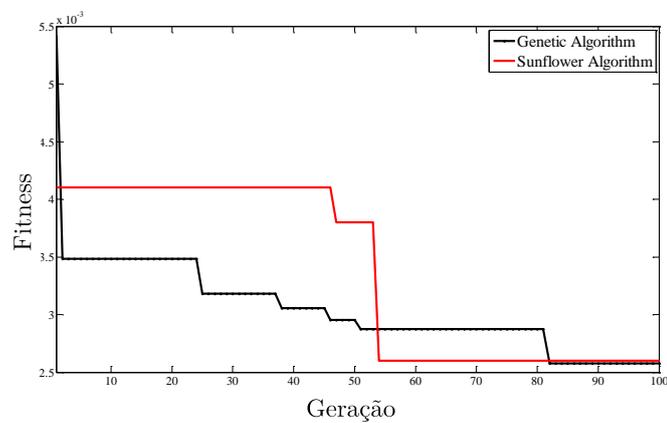


(b) População final SFO



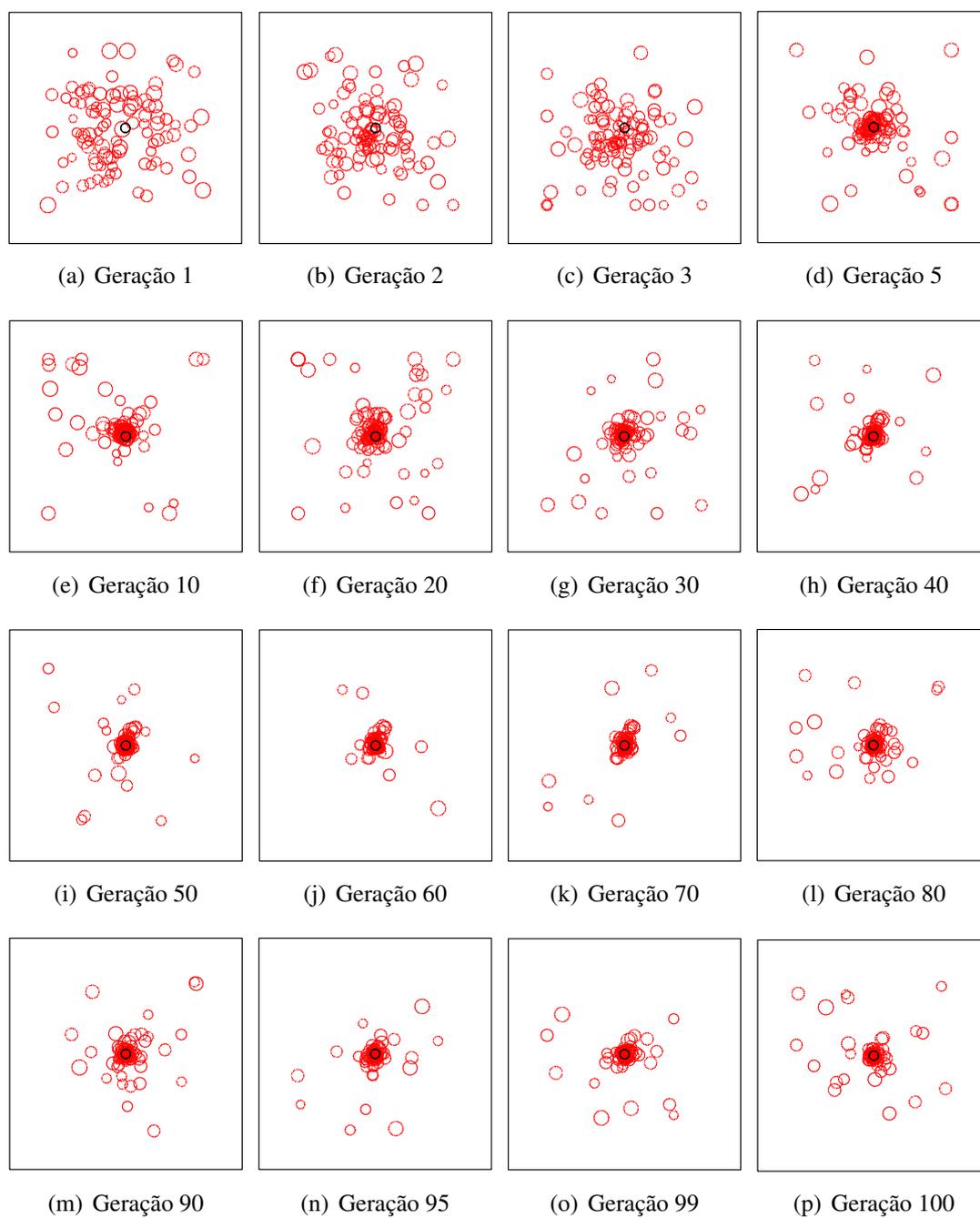
(c) População final SFO ótimo

**Figura 5.18:** Resultados da população final para detecção de dano (furos) em placa laminada usando GA, SFO e SFO com parâmetros otimizados.

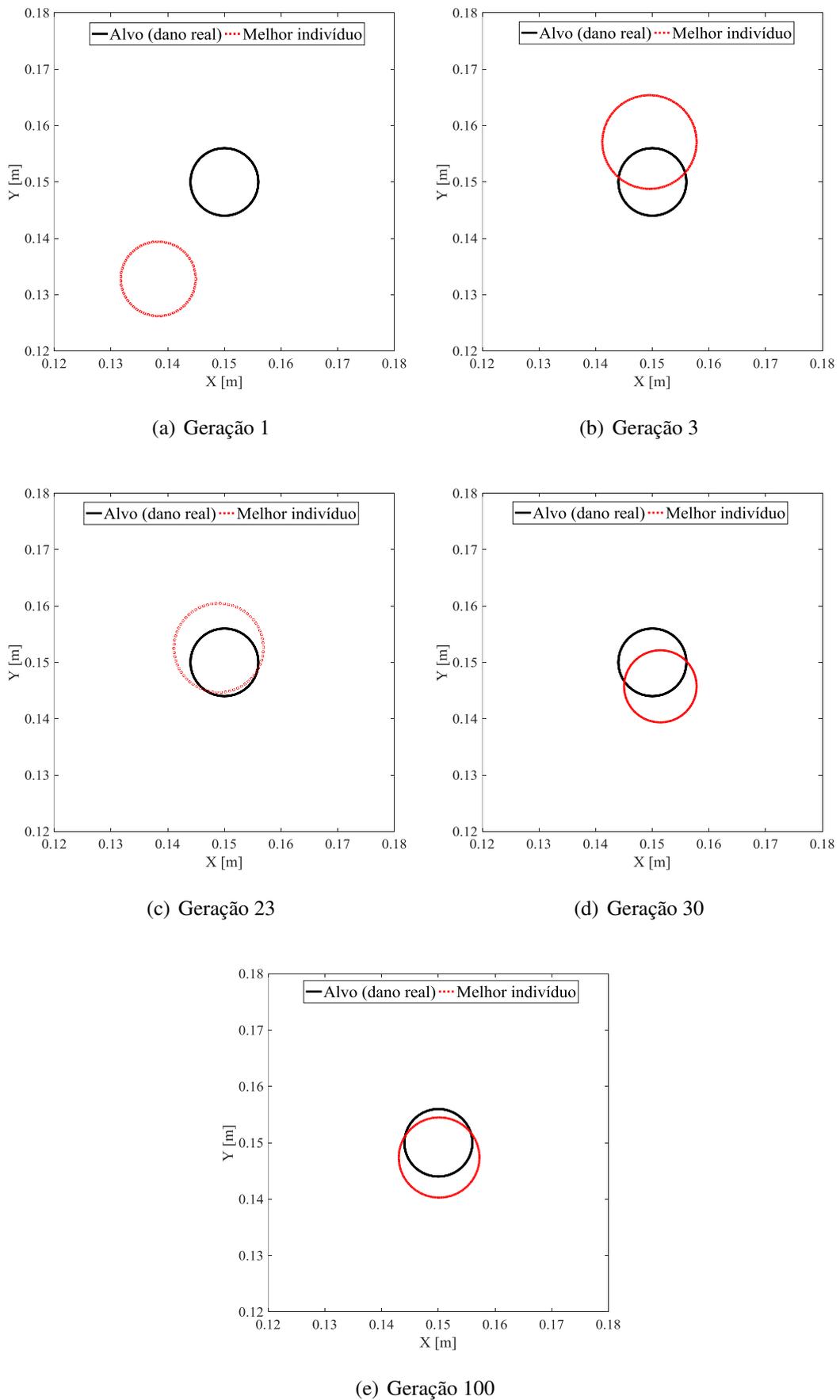
(a) Variável  $x$ (b) Variável  $y$ (c) Variável  $r$ 

(d) Função Objetivo

**Figura 5.19:** Variação das variáveis  $x$ ,  $y$  e  $r$  e da função objetivo  $J_8$  durante a otimização.



**Figura 5.20:** Variação da população de indivíduos ao longo das gerações para o algoritmo SFO.



**Figura 5.21:** Variação da do melhor indivíduo ao longo das gerações para o algoritmo SFO.

## 5.5 Identificação de Danos por meio de Redes Neurais Artificiais

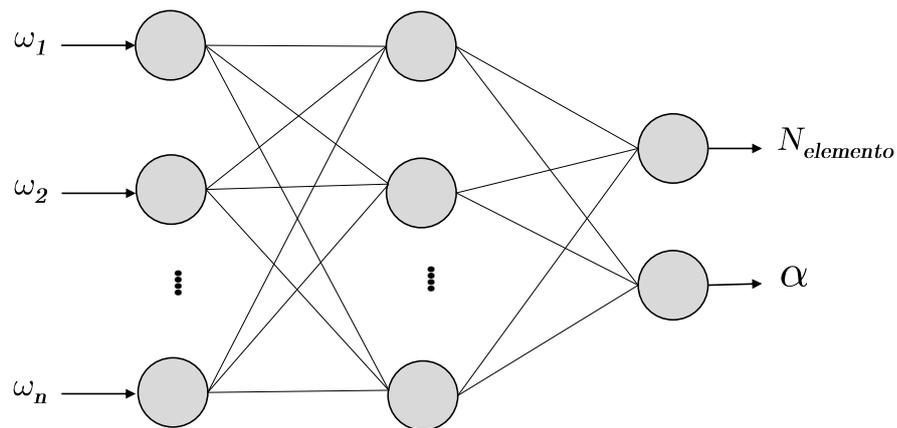
### 5.5.1 Redes Neurais baseadas em Frequências Naturais

O modelo numérico foi criado de acordo com a modelagem abordada nos tópicos anteriores deste trabalho. O dano por sua vez, foi introduzido no elemento  $K_e$  por uma redução de sua rigidez, isto é,  $K_{dano} = \alpha K_e$  (Gomes *et al.* (2016a)). Nesta parte, nenhuma regra, lei ou metodologia específica foi estabelecida para determinar um número ótimo de camadas ocultas e neurônios em cada camada da rede neural, todavia decidiu-se por tentativa e erro monitorando o erro quadrático médio (MSE) como critério de desempenho da rede. Quando os parâmetros definidos na rede conduzem a erros muito pequenos, problema de *overfitting* podem aparecer. Isto ocorre pois a rede memorizou os exemplos de treinamento e não foi capaz de generalizar novas situações. Então, após diversos casos rodados e várias configurações testadas, a melhor delas foi na presença de somente uma camada oculta, com 100 neurônios. A Figura 5.22 exibe a arquitetura da rede utilizada na tentativa de previsão da localização de danos. As entradas são compostas pelas 6 primeiras frequências naturais, que devidamente tratadas, deverão ser capazes de fornecer uma estimativa da posição do dano (elemento danificado), bem como sua severidade. Um resumo dos principais parâmetros de configuração da RNA utilizados são exibidos na Tabela 5.15.

**Tabela 5.15:** Parâmetros da rede para detecção de danos considerando frequências naturais.

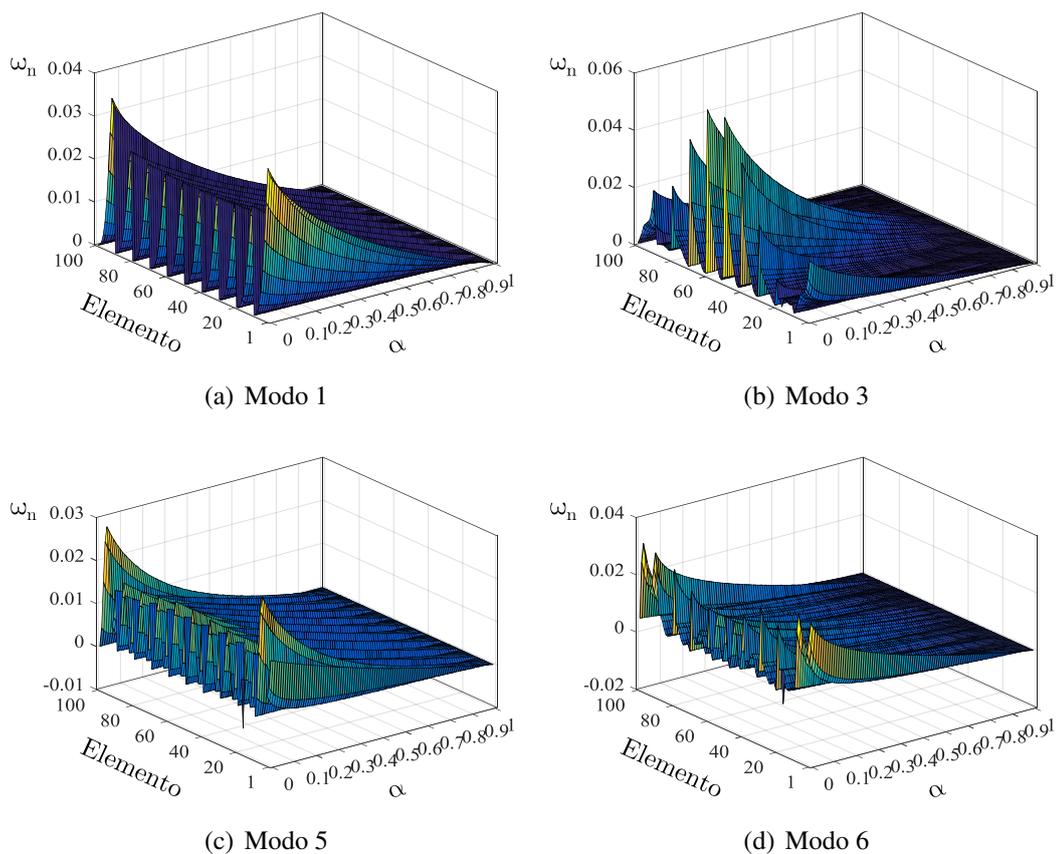
Variável	Valor
Função de Treinamento	Levenberg-Marquardt
Função de Ativação	Bayesian Regulation
Erro	$10^{-3}$
Número de Neurônios	100
Taxa de Aprendizagem	0.02
Iterações	10000

Uma análise inicial exibida nos itens anteriores demonstrou que uma redução local de rigidez, de fato, promove uma alteração da resposta modal estrutural. Aprofundando a relação entre a redução de rigidez e severidade do dano com tais repostas, empregou-se FEM para levantar uma base de dados suficientemente grande que servirá como dados de treinamento da rede. Determinar com precisão a localização de um dano estrutural causado por variação de determinada frequência natural não é uma tarefa simples, contudo, empregando-se um conjunto de variações de  $n$  frequências naturais, este problema pode ser minimizado. O treinamento da rede foi executado considerando danos nos elementos ímpares  $N = [1, 3, 5, \dots, 99]$ , combinados com diferentes severidades de dano ( $\alpha$ ). No entanto, percebeu-se que não existe variação significativa na resposta para  $\alpha$  maior que 0.30, como pode ser visto na Figura 5.23. Ainda



**Figura 5.22:** Arquitetura da rede neural com seis entradas, uma camada oculta e duas saídas.

assim, valores de  $\alpha = [0, 0.1, 0.2, \dots, 0.5]$  foram incorporados na fase de treinamento da rede. A principal razão para a utilização de frequências naturais é que estes parâmetros são fáceis de determinar com um nível de confiança relativamente elevado.



**Figura 5.23:** Variação das frequências naturais em função da localização do dano e sua severidade.

Tomou-se então as entradas  $E_i$  da rede neural como a variação relativa das frequências na-

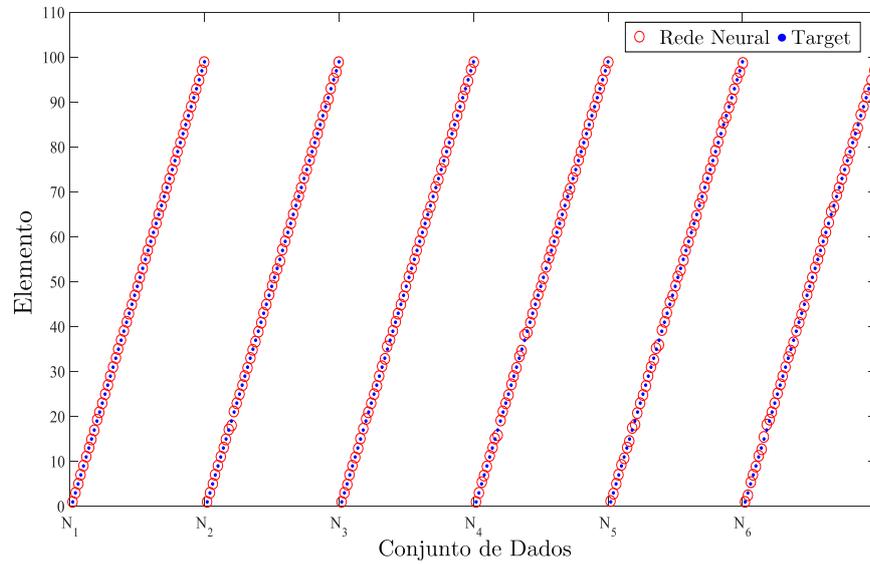
turais da forma  $E_i = \left(1 - \frac{\omega_{d,i}^e}{\omega_{sd,i}}\right)$ , sendo  $\omega_{sd,i}$  as frequências naturais da estrutura sem presença de dano para os  $i$  modos de vibração,  $\omega_{d,i}^e$  as frequências correspondentes ao dano localizado no elemento  $e$ .

Existem razões práticas pelas quais a normalização das entradas de uma rede pode tornar o treinamento mais rápido e reduzir as chances de ficar preso em um ponto de ótimo local, devido a isto, encontrou-se que uma normalização das entradas em um gama de  $[0 - 0.9]$  melhorou significativamente os resultados de treinamento e previsão da rede.

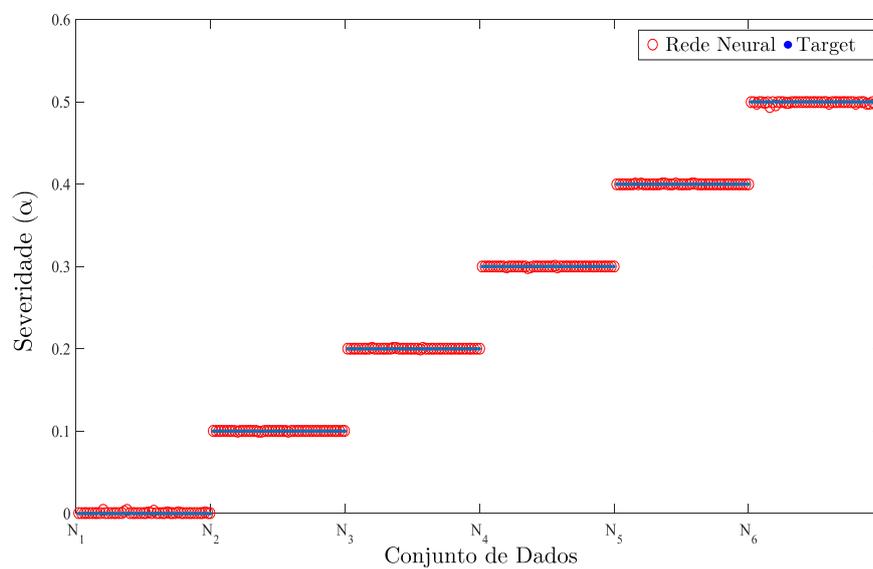
De acordo com a Figura 5.24, pode-se verificar bons resultados em respeito a localização e severidade do dano a partir de variações nas frequências. Os resultados mostram que a aplicação do algoritmo *Bayesian Regulation* permite a uma qualidade elevada nas respostas (Figura 5.25 exibe os resultados do treinamento da rede). Por outro lado, visando testar a rede, um novo conjunto de dados foi introduzido que não fizeram parte dos dados de validação. A Figura 5.26 apresenta o resultado final da previsão do dano para dados não treinados. Logo, os resultados não foram considerados como satisfatórios. Tal empecilho pode ser oriundo do segundo termo do treinamento, isto é, a severidade do dano. O parâmetro  $\alpha$  pode apresentar influências complexas na resposta aqui estudada.

Na tentativa de superar todas os inconvenientes mencionados no parágrafo anterior, o termo de severidade  $\alpha$  do dano foi removido. Em seguida, o treinamento da rede foi feito considerando as mesmas entradas de frequências naturais, mesmo número de camadas ocultas, neurônios e outros parâmetros neurais. Pela saída desejada, apenas foi escolhida a localização dos possíveis danos (elementos danificados). A Tabela 5.16 mostra os resultados da fase de treinamento e validação. Nesse caso, os elementos  $N = [1, 2, \dots, 30]$  foram treinados e validados nos elementos  $N = [31, 32, \dots, 50]$ . Este conjunto foi escolhido porque a estrutura estudada tem características simétricas, o que pode contribuir significativamente para uma confusão generalizada da rede criada. Além disso, a Figura 5.27 mostra os resultados gráficos da detecção de possíveis danos utilizando a metodologia aqui expressada por meio de RNAs. Uma alternativa ainda visando melhorar os resultados, seria optar pelo uso de altas frequências, pois estas, podem levar a melhores resultados para a avaliação da severidade do dano (Fu *et al.* (2016)).

A Figura 5.28 exibe os valores de regressão na fase de treinamento e para dados de validação (dados desconhecidos da rede neural). Os resultados obtidos traduzem o bom funcionamento para este tipo de modelagem.

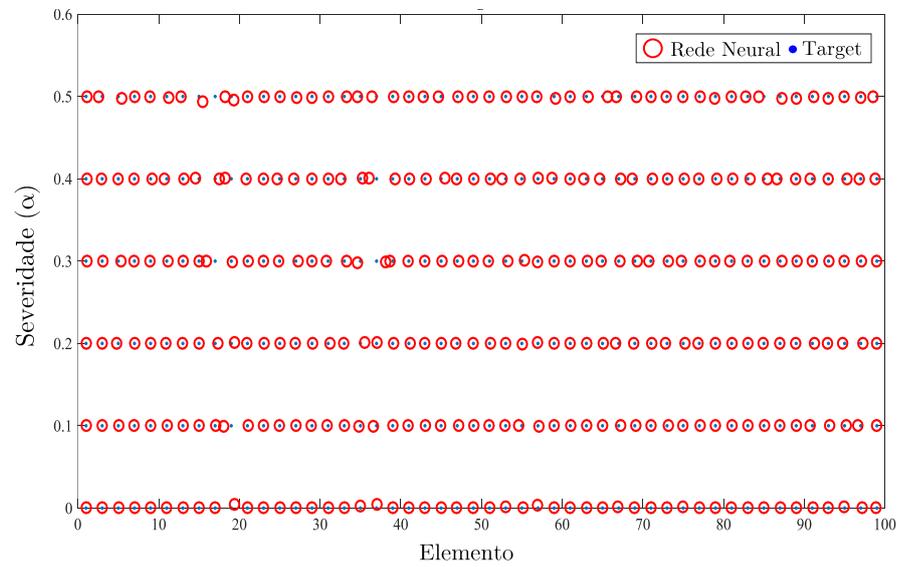


(a) Localização

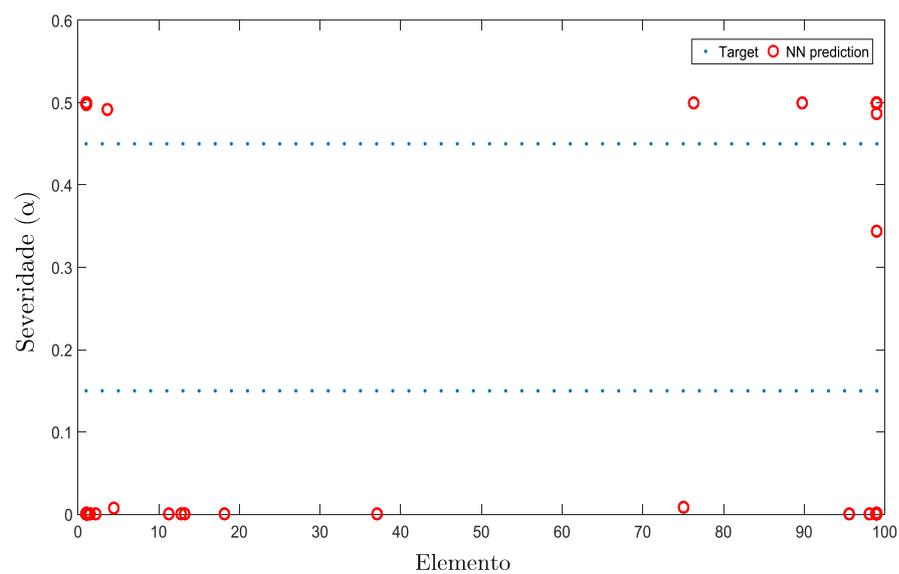


(b) Severidade

**Figura 5.24:** Resultados globais da placa danificada para (a) elemento e (b) severidade. Os resultados obtidos para os valores alvos mostram boa eficiência para um método de identificação em tempo real.



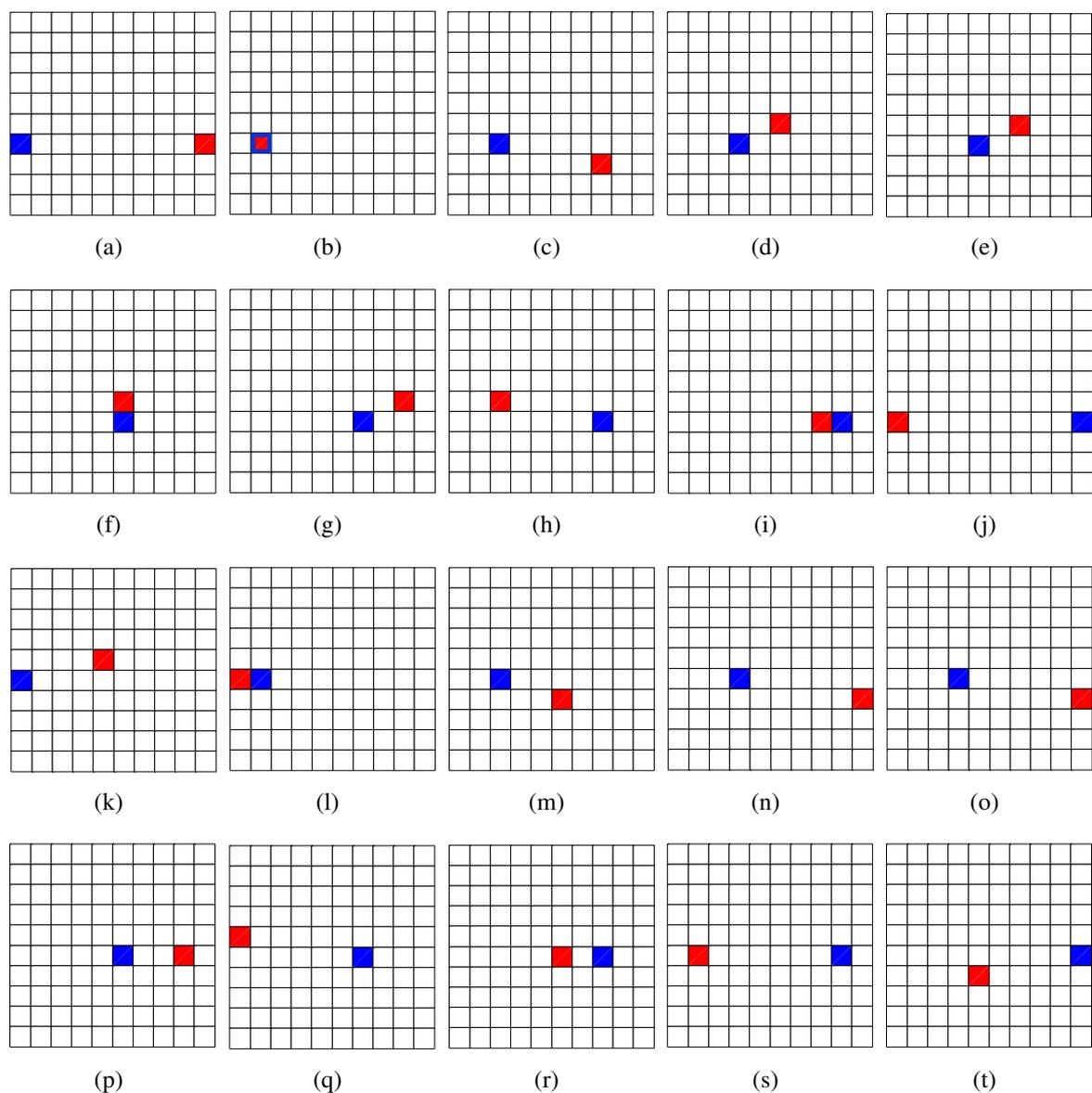
**Figura 5.25:** Resultado global do treinamento para elemento e severidade

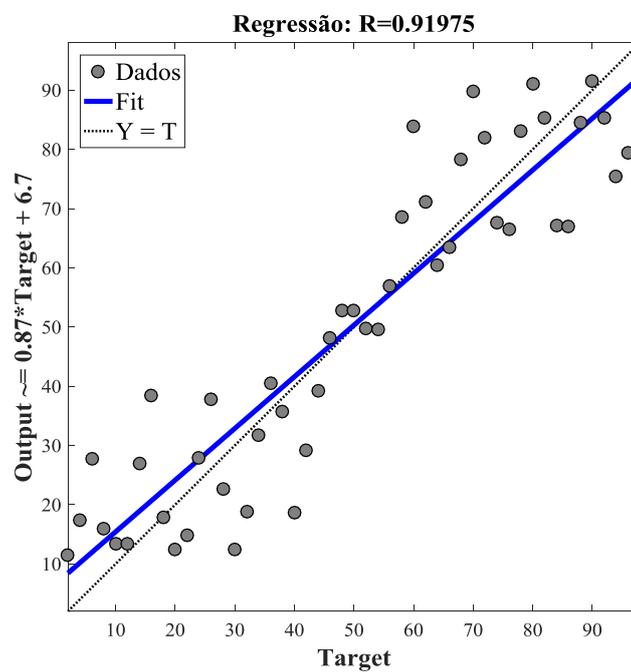
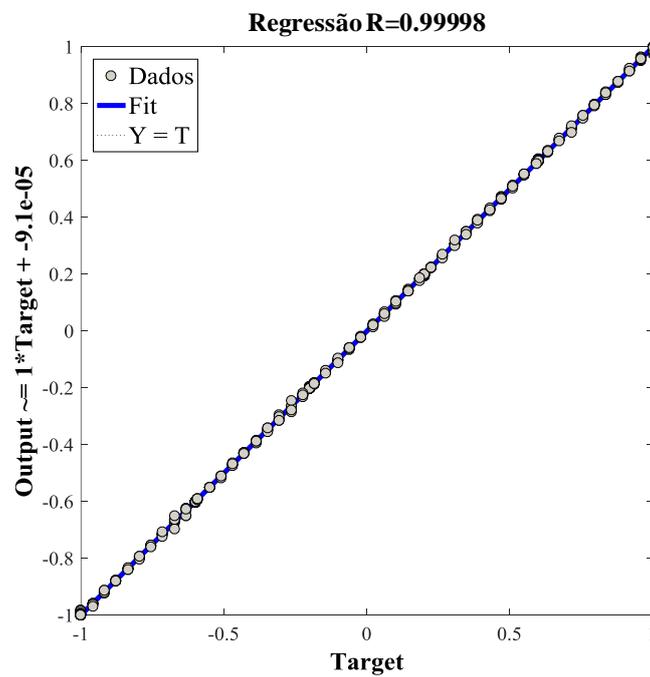


**Figura 5.26:** Previsão da rede neural considerando dados não treinados.

**Tabela 5.16:** Previsão dos danos considerando apenas uma saída.

Índice	$N_e$ Target	$N_e$ ANN	Índice	$N_e$ Target	$N_e$ ANN
a	31	40	k	41	55
b	32	32	l	42	41
c	33	28	m	43	36
d	34	46	n	44	40
e	35	47	o	45	42
f	36	46	p	46	49
g	37	49	q	47	51
h	38	43	r	48	46
i	39	38	s	49	42
j	40	31	t	50	36

**Figura 5.27:** Resultados gráficos da saída da rede neural para dados não treinados (legenda: ■ Target, ■ Rede Neural).



**Figura 5.28:** Regressão dos dados de entrada e saída da rede neural considerando frequências naturais.

## 5.5.2 Redes Neurais baseadas em Modos de Vibração Reduzidos

Como visto nos capítulos anteriores, de acordo com toda a filosofia SHM, frequências naturais possuem informações referentes em caráter global de danos. Contudo, quando devidamente combinadas, considerando um conjunto  $n$ , podem agregar informações interessantes sobre o possível estado estrutural, isto é, na tentativa de localizar danos. Evoluindo as análises para um condição mais local, lança-se mão dos modos de vibração no treinamento da rede neural. Para isto, considerou-se os modos reduzidos de vibração, ou melhor dizendo, as vibrações em um número limitado de pontos, sendo estes pontos obtidos pela distribuição ótima dos sensores.

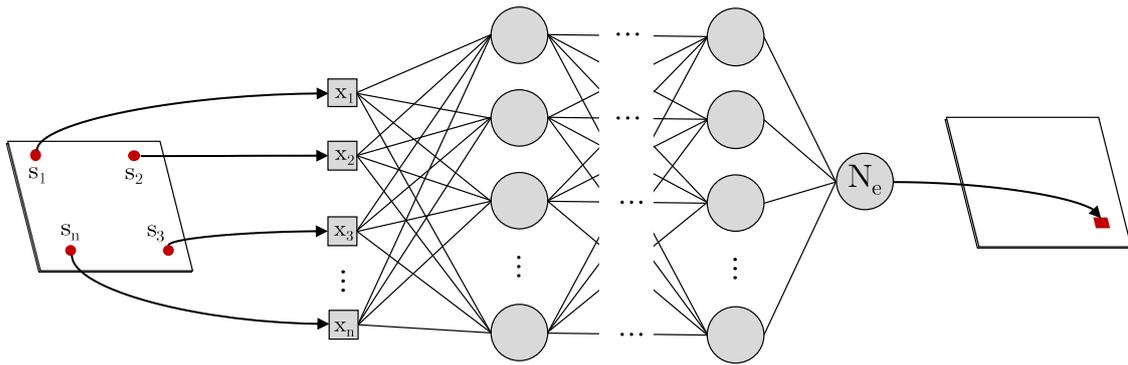
Após numerosos testes com a rede neural, chegou-se a uma configuração dita ideal que pudesse prever com melhor eficiência dados não treinados. A arquitetura da rede neural foi concebida considerando  $n$  entradas, sendo  $n$  o número de sensores distribuídos na placa. Optou-se por um número mínimo de neurônios,  $N_n=10$ , evitando-se assim um confundimento adicional desnecessário na rede neural. Somente uma camada oculta foi suficiente e as saídas desejadas foram modeladas somente como a possível localização do dano. Mais uma vez, omitiu-se o termo de severidade  $\alpha$  do dano pois entende-se que este termo adiciona certo nível de desorientação na previsão da localização do dano, e neste estudo, tal termo é de certo modo supérfluo.

A entrada  $E$  (Equação 5.7) da rede possui informações referentes aos deslocamentos nodais  $\phi_{s_i}$  nos sensores  $s_i$ . Utilizou-se 70% dos dados para treinamento, ou seja, 70 dos 100 elementos estruturais da placa foram tomados na fase de treinamento em caráter aleatório. A entrada  $E$  ainda leva em consideração os 6 primeiros modos de vibração da placa, de tal modo a obter a maior quantidade possível de informação do estado estrutural. A arquitetura da rede neural é exibida na Figura 5.29 e os elementos utilizados aleatoriamente na fase de treinamento são expostos na Figura 5.30.

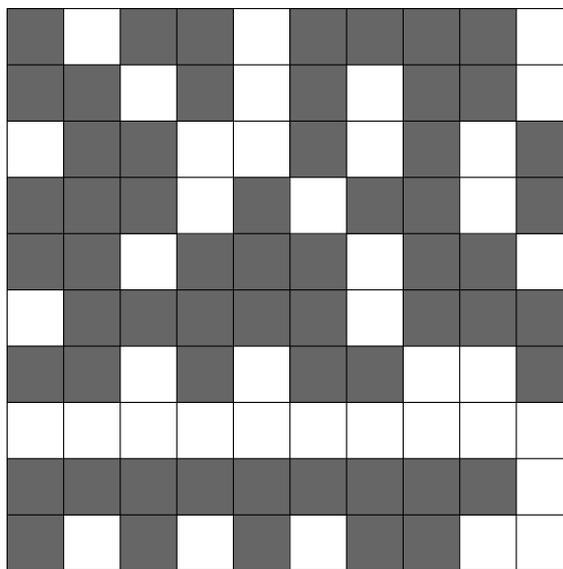
$$E = \begin{bmatrix} s_1^1 & s_1^2 & s_1^e \\ s_2^1 & s_2^2 & s_2^e \\ s_3^1 & s_3^2 & s_3^e \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ s_n^1 & s_n^2 & s_n^e \end{bmatrix}_{N_{\text{sensores}} \times N_{\text{elementos}}} \quad (5.7)$$

sendo  $s_n^e = \phi_1^{n,e}$ .

Nesta etapa, a rede treinada é testada com dados que não estão presentes no conjunto de dados de treinamento. Quando uma rede neural é bem treinada, ela possui elevada capacidade de generalização. A qualidade de suas previsões depende fortemente da arquitetura de rede, bem como a riqueza do conjunto de dados de treinamento. Assim, mudanças na arquitetura de rede e no conjunto de dados de treinamento foram feitas e durante todo o processo de treinamento



**Figura 5.29:** Arquitetura da rede neural usando modos reduzidos na identificação de danos.



**Figura 5.30:** Elementos utilizados aleatoriamente na fase de treinamento da rede neural artificial.

e testado/repetido por diversas vezes antes de chegar a uma arquitetura ideal, que não só leva a uma rede bem treinada, mas também garante subsequente previsão razoavelmente precisa quando expostos ao conjunto de dados desconhecidos (Chakraborty (2005)). Uma vez que a rede foi treinada para o nível desejado de precisão, ela foi testada para conjunto de dados desconhecidos e somente após um desempenho satisfatório na previsão das saídas do conjunto de dados desconhecido foi obtida, a aprendizagem da rede foi interrompida.

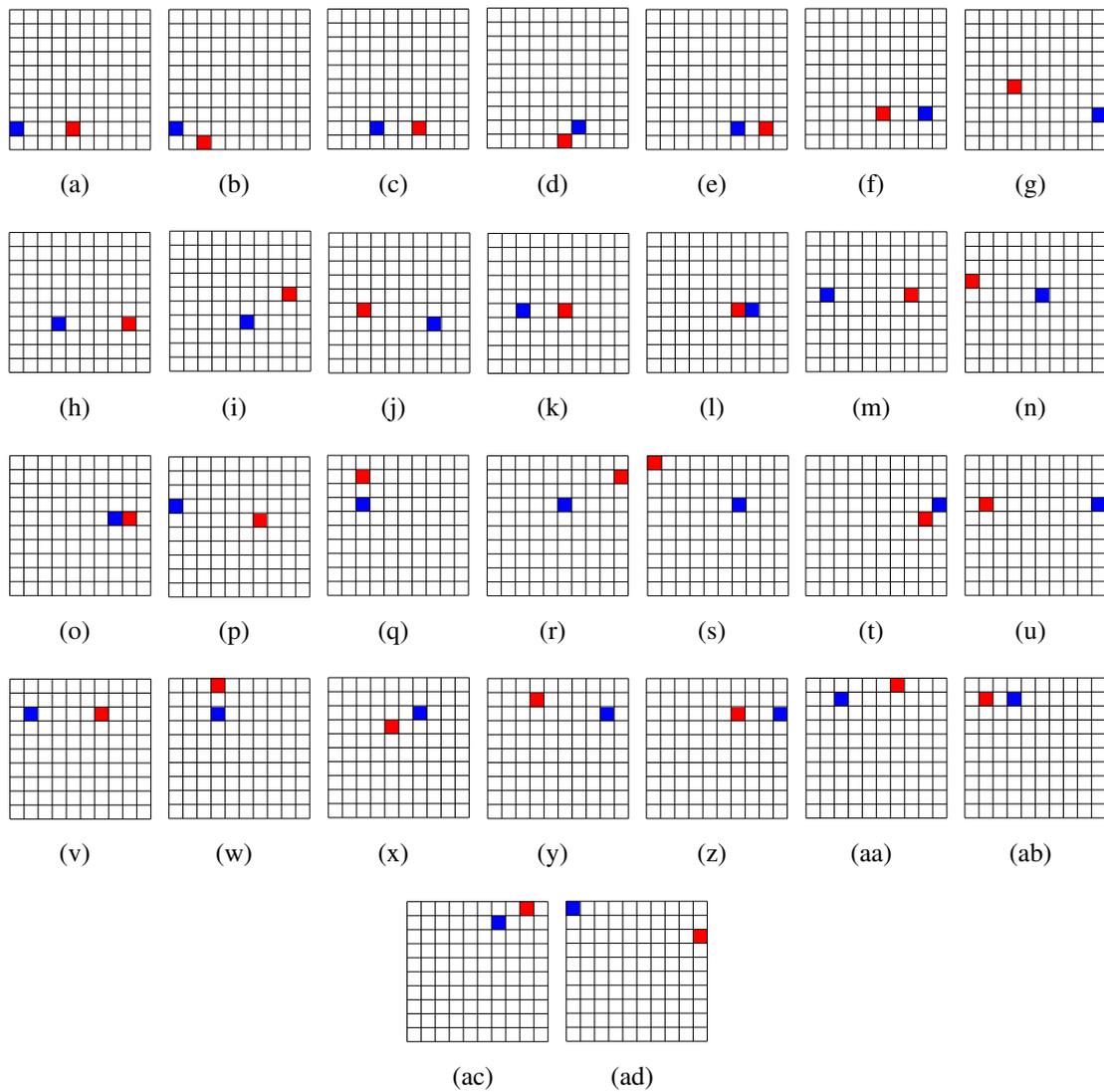
A Figura 5.32 apresentam os resultados de regressão da rede neural na fase de treinamento e de validação. Como pode ser constatado, a rede apresentou um excelente valor de regressão na fase de treinamento e um bom resultado na previsão dos resultados. Destaca-se ainda que para o treinamento da rede, fez-se uso somente dos modos de vibração reduzidos (em um número limitado de pontos) da estrutura danificada. Neste quesito, a metodologia aqui abordada exhibe grandes vantagens em relação às outras técnicas abordadas nesta tese, uma vez que não se faz

mais necessário o uso de um modelo de referência no processo de identificação de danos. A Tabela 5.17 exhibe os resultados de validação da rede neural.

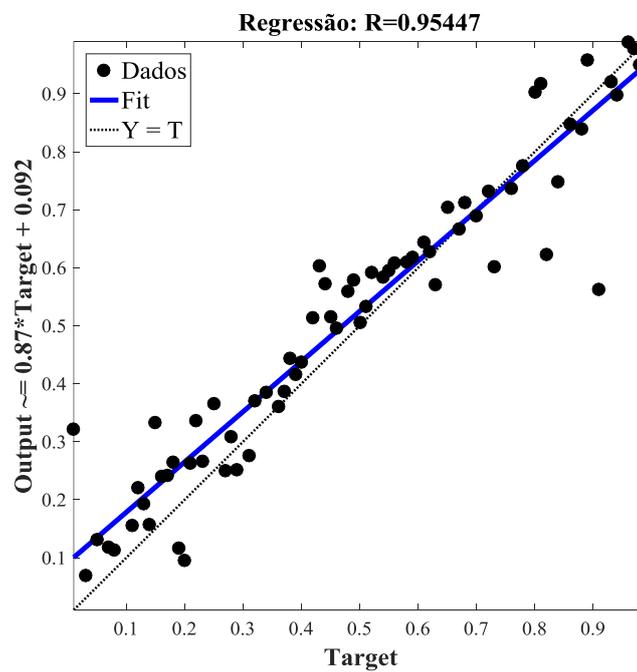
**Tabela 5.17:** Previsão dos danos considerando somente os modos de vibração danificados.

Índice	$N_e$ Target	$N_e$ ANN	Índice	$N_e$ Target	$N_e$ ANN
a	11	15	p	61	57
b	12	3	q	63	83
c	14	17	r	66	90
d	17	6	s	67	91
e	18	19	t	70	59
f	29	26	u	70	62
g	30	44	v	72	77
h	34	39	w	74	94
i	36	59	x	77	65
j	38	43	y	79	84
k	43	46	z	80	77
l	48	57	aa	83	97
m	52	58	ab	84	82
n	56	61	ac	87	99
o	58	59	ad	91	80

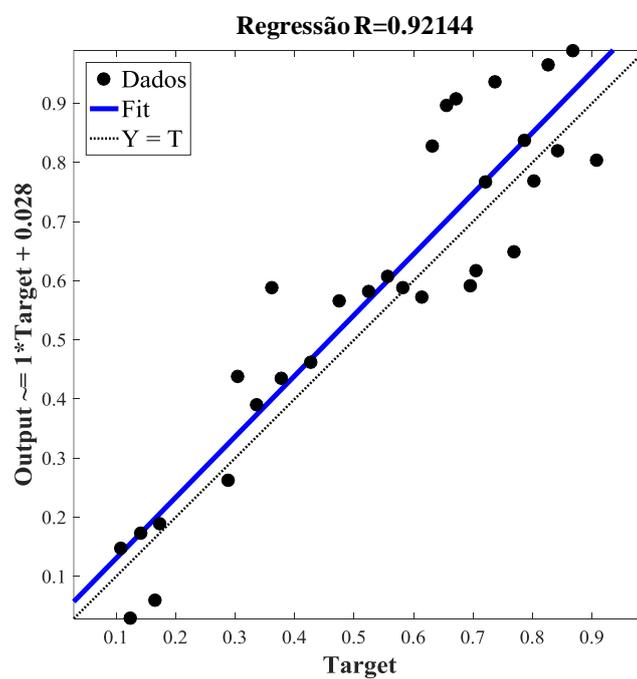
A Figura 5.31 mostra os resultados gráficos. Pode ser visto que a rede foi capaz de prever com certa eficiência a localização do dano. Não objetiva-se por meio desta metodologia precisão milimétrica no processo de identificação de danos. Os resultados gerados podem ser considerados em sua maioria como satisfatórios, pois utiliza-se os resultados obtidos como resultados globais no processo da localização de defeitos em estruturas. Existem inúmeras ferramentas específicas que são capazes de detectar danos em escala mili e micrométrica e não projeta-se substituí-los por meio deste.



**Figura 5.31:** Resultados gráficos da saída da rede neural para dados não treinados para os modos de vibração (legenda: ■ Target, ■ Rede Neural).



(a) Treinamento



(b) Validação

**Figura 5.32:** Regressão dos dados de entrada e saída da rede neural considerando os modos de vibração.

Embora as abordagens baseadas em redes neurais tenham sido bem sucedidas devido às suas capacidades de generalização, elas demonstraram requerer número relativamente grande de casos de treinamento. Nesta etapa, utilizou-se 70% de dados na fase de treinamento. A capacidade de previsão da localização dos danos pode ser melhorada considerando uma maior quantidade de dados na fase de treinamento da rede.

Apesar dos resultados obtidos pela RNA não resultarem exatamente na localização ideal real do dano, a rede concede resultados bem próximos do dano existente, o que de fato é objetivo deste estudo por meio de métricas modais, sendo utilizado como critério global inicial. A partir da obtenção de uma possível localização estrutural fragilizada, outras técnicas convencionais de inspeção (visual, ultrassom, etc.) são utilizadas. Assim, por meio desta técnica ganha-se tempo, economia e confiabilidade.

Em geral, pode-se concluir que toda a metodologia desenvolvida para a identificação de delaminações foi realizada com sucesso. Os algoritmos de otimização conseguiram identificar com precisão mesmo a severidade de determinado dano estrutural. As redes neurais artificiais em adição, foram capazes de efetuar uma previsão satisfatória da possível localização de danos a partir de dados de validação desconhecidos. Os três diferentes métodos abordados (GA, SFO e RNAs) foram validados entre si.

Para se verificar a robustez de determinado método numérico, é imprescindível que se trabalhe com a inserção de ruídos na medição, ou seja, que dados de entrada ou saída sejam afetados por determinado fator externo aleatório. Neste trabalho, ruídos foram incluídos nas respostas obtidas pelo  $n$  sensores, individualmente, para investigar o seu efeito sobre a precisão da detecção de danos. O Anexo B.9 exhibe os resultados obtidos para diferentes níveis de ruídos Gaussianos.

## 5.6 Resultados Experimentais

Após todo o desenvolvimento numérico da metodologia de identificação de danos, onde um estudo detalhado e aprofundado foi realizado, objetivou-se a aplicação dos métodos em ensaios experimentais em estruturas reais. A aplicação ocorreu a partir do momento em que se obteve um nível de maturidade suficientemente do método proposto.

O desenvolvimento experimental ocorreu em estruturas de testes, sendo estas cordialmente cedidas pela Empresa Brasileira de Aeronáutica (EMBRAER®). Para os testes experimentais duas placas foram analisadas. A primeira, tomou-se como a estrutura de referência, sendo esta, uma placa quadrada, de lado  $a = 1m$ , com 16 camadas com sequência de empilhamento  $[0/45/-45/90]_{4S}$  com espessura  $t = 0.19mm$  em cada camada. Uma segunda placa é tomada, sendo esta com as mesmas características geométricas da primeira, exceto pelo fato de apresentar danos de delaminação. Os danos na placa danificada foram realizados por meio de insertos de *teflon* e em 4 tamanhos distintos e inseridos em 8 diferentes localizações (8 danos). A Figura 5.33 exibe as estruturas laminadas em compósito carbono/epóxi utilizadas nesta parte do estudo.

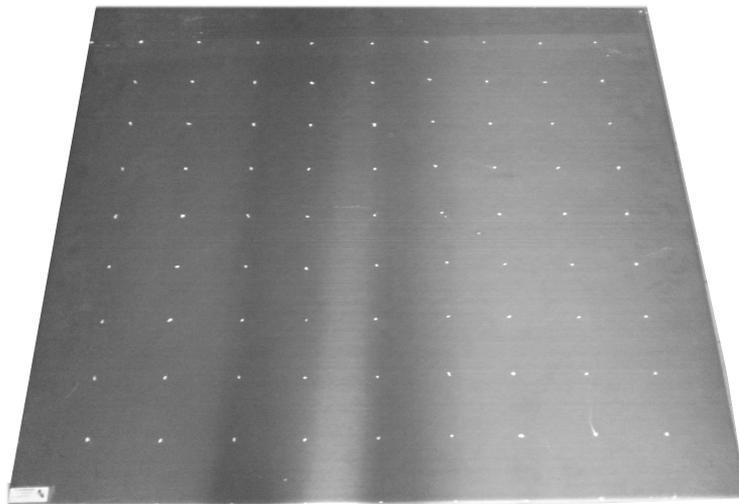
As propriedades mecânicas das estruturas são desconhecidas *a priori*, devido a isso um método inverso para estimar tais propriedades foi realizado e será discutido nas seções seguintes.

### 5.6.1 Descrição do Ensaio

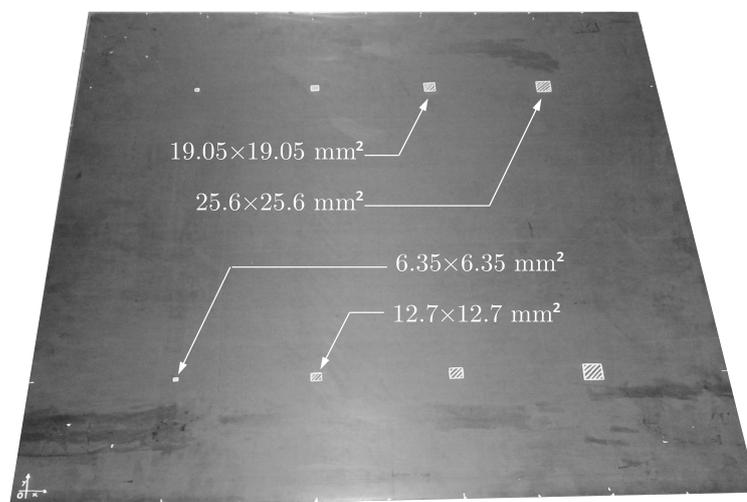
Para os testes laboratoriais utilizou-se um vibrômetro laser (marca: Ometron, modelo: VQ-500-D), um sistema de aquisição de dados (marca: Brüel & Kjær, modelo: Photon+), um martelo de impacto (marca: Brüel & Kjær), *software* de análise (RT Pro Photon) e a estrutura propriamente dita. A Figura 5.34 exibe o esquema de montagem da bancada experimental para a realização dos experimentos de detecção de danos. Optou-se pela condição de contorno livre das placas, onde fios de *nylons* foram utilizados na fixação da placa.

Adiante, as placas laminadas foram discretizadas em  $10 \times 10$  elementos e considerou-se 4 nós por elemento, totalizando em 121 pontos nodais. Foram então coletados sinais de vibração em todos os pontos nodais para ambas as placas, no estado "sem dano" e "com dano". A Figura 5.35a exibe os pontos nodais em destaque onde efetuou-se a aquisição do sinal de vibração (frequências naturais, deslocamento em função do tempo, função coerência e funções de resposta em frequência real e imaginária). O ponto de excitação por meio do martelo de impacto foi efetuado no centroide da placa (coordenadas  $x = 0.50m$  e  $y = 0.50m$ ) para todos os testes (Figura 5.35b).

Após a realização do ensaio e devido tratamento dos numerosos danos experimentais, obteve-se dados quantitativos e qualitativos sobre ambos estados estruturais (duas placas). A



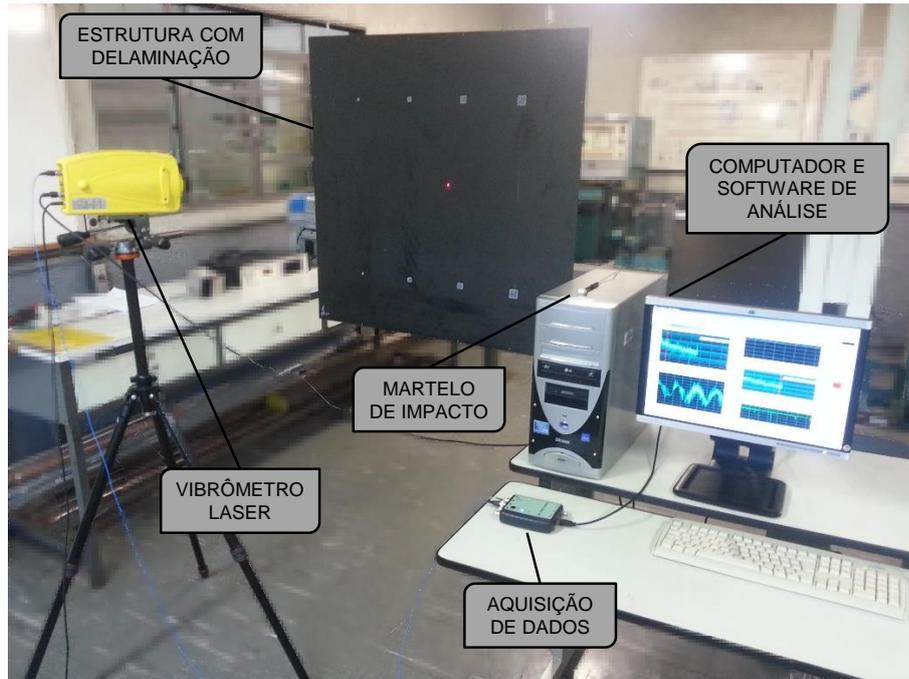
(a) Placa sem dano.



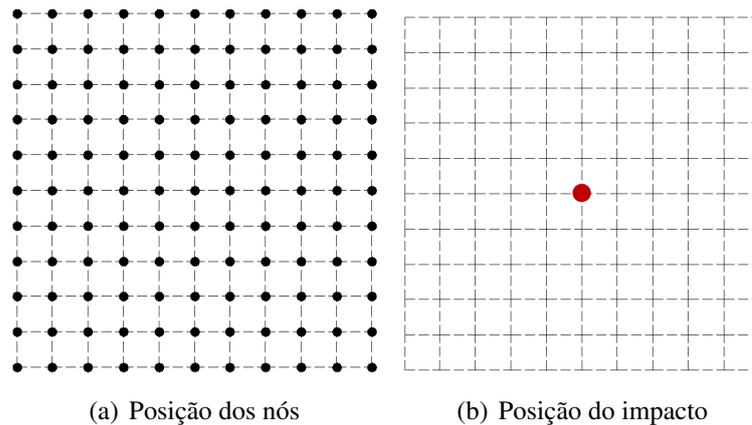
(b) Placa com dano.

**Figura 5.33:** Estruturas de teste utilizadas neste trabalho, cordialmente cedidas pela EMBRAER®.

Figuras 5.36a e 5.36b exibem as funções de resposta em frequência para os dois estados estruturais avaliados considerando os 121 sinais de vibração adquiridos. A Figura 5.36c exibe o resultado dos laminados sem e com dano, considerando uma média dos 121 valores (FRF) para cada estado tomado individualmente. Pode-se verificar que a inserção dos insertos de teflon



**Figura 5.34:** Esquema da bancada experimental.

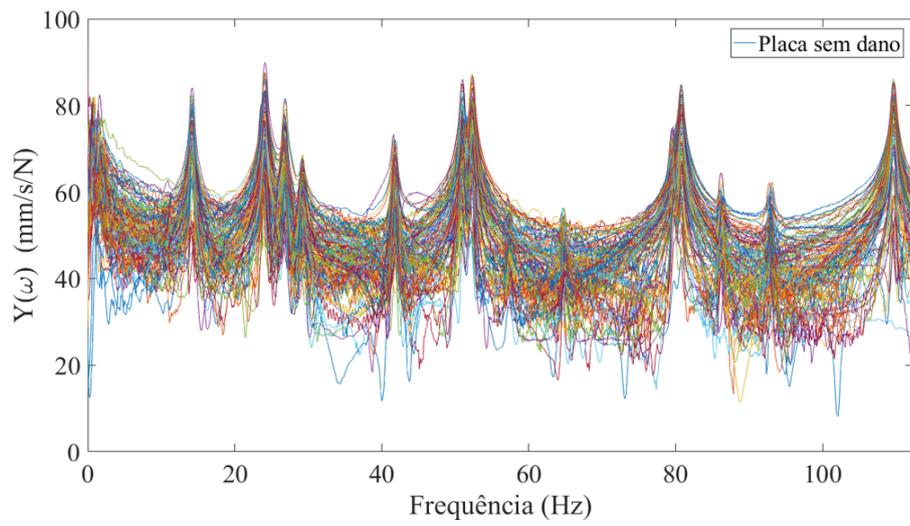


**Figura 5.35:** Sistema de referência para aquisição de vibração e ponto de impacto

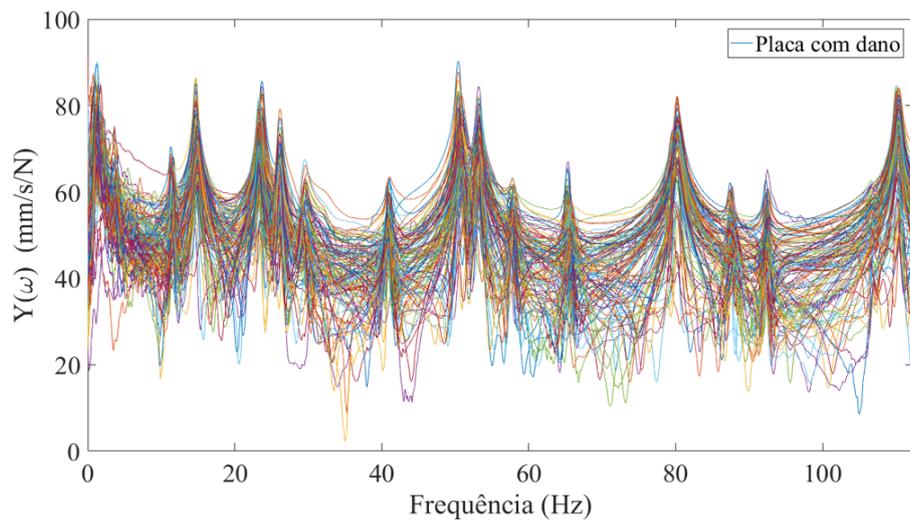
(delaminações) de fato promove uma alteração nas matrizes estruturais, que por sua vez promove uma alteração na resposta modal (frequências naturais). A Tabela 5.18 exibe os valores numéricos para alguns modos específicos para ambos os estados estruturais avaliados.

**Tabela 5.18:** Resultados experimentais das estruturas sem e com danos.

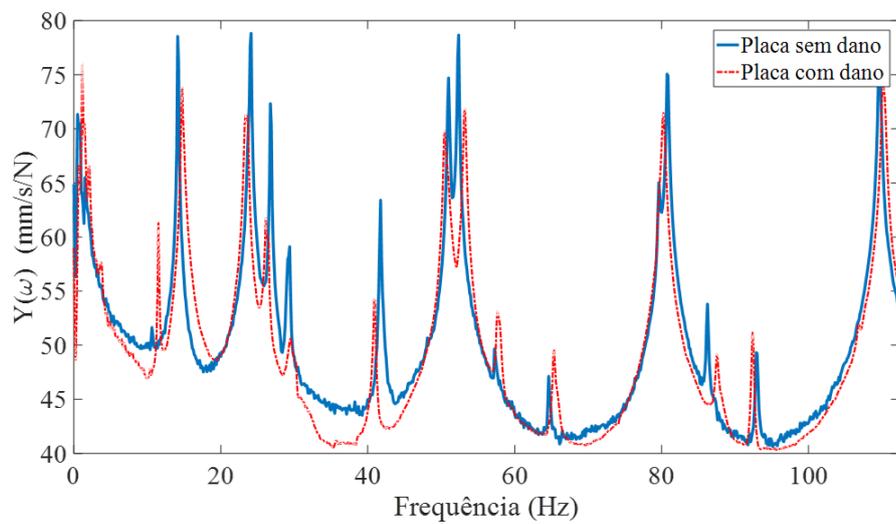
Modo	$\omega_n$ sem dano (Hz)	$\omega_n$ com dano (Hz)
2	14.20	14.75
4	26.70	26.00
5	29.20	29.50
8	52.30	53.25



(a) FRF placa sem dano.



(b) FRF placa com dano.



(c) FRF de ambas placas.

**Figura 5.36:** Função de resposta em frequência para as placas de estudo.

## 5.6.2 Problema Inverso de Ajuste de Modelo Numérico-Experimental

Métodos experimentais são passíveis de perturbações externas e passíveis de erros devidos a fatores nem sempre 100% controláveis. Normalmente, modelos numéricos são baseados em um conjunto de hipóteses, que na prática são sensíveis a erros (Bledzki *et al.* (1999)).

Neste estudo de identificação de danos, um método numérico-experimental tido como pilar fundamental da metodologia, onde dados de uma estrutura real é comparado com dados de uma estrutura numérica. Para que o método funcione com máximo desempenho, faz-se necessário que os modelos numéricos e experimentais (estrutura sem dano) andem em harmonia. Para que isto corra, é necessário ajustar o modelo numérico ao modelo experimental, onde o uso de algoritmos de otimização se fazem necessários.

O problema de ajuste do modelo numérico ao modelo experimental propriamente dito ocorre pela minimização da função objetivo  $J_a$  (Equação 5.8), onde dados da estrutura "sadia" são obtidos e comparados com o modelo numérico em elementos finitos (modelo de referência). Segundo Hwang e He (2006), testes de vibração combinados com um métodos numéricos são uma potencial estratégia alternativa para determinar as constantes elásticas de materiais devido seu caráter não destrutivo, sendo um único teste normalmente necessário e ainda capaz de produzir propriedades médias.

$$J_a(\vec{X}) = \sum_i (\omega(\vec{X})_i^{exp} - \omega_i(\vec{X})^{ajuste})^2 \quad (5.8)$$

sendo  $\vec{X} = \{E_1, E_2, \nu_{12}, G_{12}, \rho\}$ ,  $\omega(\vec{X})_i^{exp}$  as frequências naturais da estrutura real e  $\omega_i(\vec{X})^{ajuste}$  as frequências calculadas pelo algoritmo de otimização para os  $i$  modos levados em consideração.

Para simplificar o problema de identificação tridimensional para um bidimensional, suposições sobre a paridade adicional de constantes elásticas são introduzidas (Equação 5.9) (Raugaskas e Belevičius (2009)).

$$\begin{cases} E_3 = E_2 \\ \nu_{13} = \nu_{23} = \nu_{12} \\ G_{13} = G_{12} \\ G_{23} = \frac{E_2}{2(1+\nu_{23})} \end{cases} \quad (5.9)$$

Em adição, é necessário adicionar equações estruturais de restrição de modo que se obtenha uma matriz de elasticidade definida positiva para a estrutura laminada em questão. Segundo

Bledzki *et al.* (1999), as equações são definidas na Equação 5.10.

$$\begin{cases} g_1(x) : \frac{E_2}{E_1} > 0 \\ g_2(x) : \frac{G_{12}}{E_1} > 0 \\ g_3(x) : \frac{G_{23}}{E_1} > 0 \\ g_4(x) : \sqrt{\frac{E_2}{E_1}} - |\nu_{12}| > 0 \end{cases} \quad (5.10)$$

Para a solução do problema de otimização da função objetivo  $J_a$ , algoritmos genéticos foram empregados. Em relação ao *setup* do otimizador, utilizou-se uma taxa de cruzamento de 60%, população de 10 vezes o número de variáveis de projeto, ou seja,  $10 \times 5 = 50$ , mutação de 2%, elitismo de 1 único indivíduo e número máximo de gerações igual a 1000, sendo este último o critério de parada adotado.

Segundo Pinfold (1995), variação em propriedades mecânicas dos dados experimentais são aceitáveis para a modelagem de materiais compósitos para fins de projeto inicial, visto que geralmente não se é possível projetar em tolerâncias estritamente apertadas na maioria dos casos. Sendo assim, definiu-se como os limites inferiores e superiores das variáveis de projeto com uma banda de 15%

A Tabela 5.19 exhibe o resultado final do processo de otimização. Várias otimizações foram realizadas, contudo neste caso não pretende-se mais obter uma média, mas sim a melhor solução dentre as que foram obtidas. Pode-se verificar que o resultado obtidos dos parâmetros da placa (ajustados) foram satisfatórios, e ainda os resultados numéricos obtidos por elementos finitos se assemelham fielmente aos resultados experimentais. Logo, a partir deste ponto, pode-se partir para o processo de identificação de danos propriamente dito, uma vez que a estrutura de referência está em concordância com o modelo numérico que será tomado como base.

**Tabela 5.19:** Resultado geral do ajuste dos modelos numérico-experimental.

	Experimental	Numérico Inicial	Numérico Ajustado
$E_1$ (MPa)	*	88.8	85.09
$E_2$ (MPa)	*	6.3	7.2513
$\nu_{12}$	*	0.29	0.3096
$G_{12}$ (MPa)	*	7.6	8.7519
$\rho$ ( $kg/m^3$ )	*	1400	1294.5
$\omega_2$ (Hz)	14.20	13.67	14.22
$\omega_4$ (Hz)	26.70	24.79	26.01
$\omega_5$ (Hz)	29.20	27.95	29.35
$\omega_8$ (Hz)	52.30	49.87	52.16

### 5.6.3 Resultados da Detecção de Danos por meio de Mudanças nas Frequências Naturais

Desenvolveu-se o método de identificação de danos nesta seção em caráter experimental. Para isto, tomou-se informações modais referentes à placa delaminada, onde por sua vez, tem-se conhecimento das localizações das delaminações inseridas. O problema da identificação de danos propriamente dito foi resolvido por meio de problema inverso fazendo-se uso de algoritmos genéticos.

A abordagem do problema real propriamente dito ocorreu pela minimização da função objetivo da Equação 5.11. Sabe-se que a presença das pequenas delaminações no laminado levou a uma alteração nas frequências de ressonância e a partir deste episódio, espera-se obter a possível localizados de tais danos a partir da minimização de  $J_{exp}$ . Sabe-se que a variação de uma frequência natural é uma excelente métrica global do estado estrutural (Farrar *et al.* (2003); Doebling *et al.* (1996); Doebling *et al.* (1998); Sohn *et al.* (2003)), isto é, indica o estado estrutural em que se encontra a estrutura. Em outras palavras, é um valor confiável que indica se existe ou não a presença de um dano.

Ainda que a análise da variação de um único modo não apresente quantidade de informação significativa a respeito da possível localização de um dano, o uso de um conjunto de modos, pode agregar maior quantidade de informação a respeito do indicativo da localização de danos estruturais.

$$J_{exp} = \sqrt{\sum_{i=2}^6 \left(1 - \frac{\omega_i^{GA}}{\omega_i^{real}}\right)^2} \quad (5.11)$$

sendo  $\omega_i^{real}$  a frequências natural da placa delaminada,  $\omega_i^{GA}$  as frequências que são calculadas pelo algoritmo genético em função das variáveis de projeto, e  $i$  os modos analisados.

A função objetivo  $J_{exp}$  é composto pelo seis primeiros modos não-nulos (não levou-se em consideração os modos de corpo rígido da estrutura com condições de contorno "livre" e ainda o modo fundamental (primeiro) apresentou um nível de ruído indesejável, justificando a escolha dos modos  $i = 2, \dots, 5$ . De maneira similar aos problemas de identificação numéricos tratados neste capítulo utilizou-se os mesmo operadores genéticos (cruzamento de 60%, elitismo de 1 indivíduo, mutação de 2%, população de 10 vezes o número de variáveis e numero máximo de gerações igual a 100). Os limites de busca do dano foram definidos pelo numero máximo de elementos estruturais ( $1 < N_e < 100$ ) e a grau de severidade total da placa ( $0 \leq \alpha < 1$ ).

No tocante ao modelo numérico em elementos finitos, em relação à modelagem do dano, um nível de severidade  $\alpha$  é associado a um elemento danificado. Todavia, quando múltiplos elementos são considerados, somente um valor de  $\alpha$  pode ser considerado.

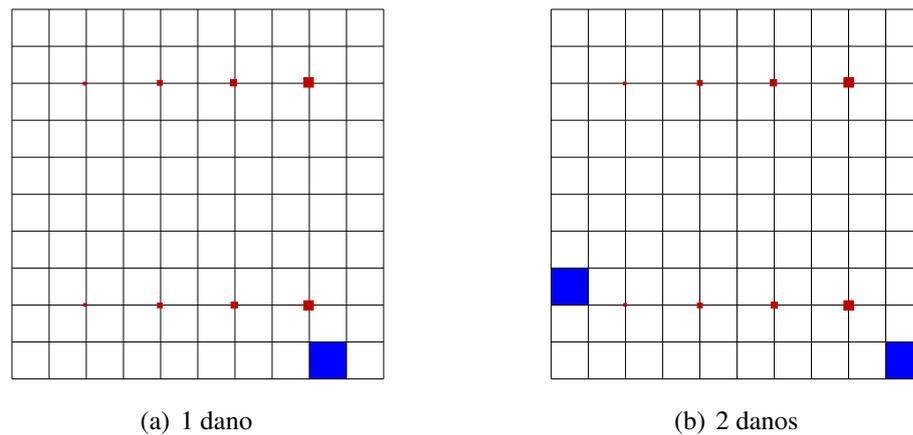
Como a placa danificada apresenta danos extremamente pequenos para a aplicação desta metodologia, que por sua vez possui maior desempenho para estruturas de grande porte, tem-se com intuito principal detectar pelo menos a localização aproximada (vizinhança) dos maiores danos (dimensão de uma polegada quadrada). Os danos menores ( $6.35 \times 6.35 \text{mm}^2$ ) correspondem a uma área de aproximadamente 0.004% da área total da estrutura. Danos de uma polegada quadrada ( $25.4 \times 25.4 \text{mm}^2$ ) por sua vez representam aproximadamente 0.0645% da área total da estrutura.

Após a realização do ensaio modal para aquisição das informações modais, as mesmas foram as entradas utilizadas no algoritmo do problema inverso de minimização da função objetivo  $J_{exp}$  (Equação 5.11). Apesar do conhecimento prévio dos danos induzidos na placa, o algoritmo não possui conhecimento da localização do dano, da posição do dano, da severidade dos danos e ainda sobre a quantidade de danos presentes na estrutura. Em relação a isto, abordou-se a solução do problema inverso tratando a placa com diferentes quantidades de danos, isto é, assumindo a existência de 1, 2 e 8 danos. A ideia é verificar a capacidade do método desenvolvido em identificar a localização de danos induzidos.

Em virtude dos fatos mencionados, lançou-se a otimização e obteve resultados considerando diferentes quantidades de danos. A Figura 5.37 exhibe os resultados finais obtidos considerando um e dois danos presentes na placa. Considerando a detecção de somente um dano (Figura 5.37a), obteve-se o dano no elemento  $N_e = 9$ . Levando em consideração sua proximidade com o elemento  $N_e = 19$  considerando o elemento danificado, tem-se uma área de busca extremamente reduzida, isto é, o dano identificado está localizado na vizinhança do dano real. Uma vez que cada elemento possui uma área de  $0.1 \times 0.1 = 0.01 \text{m}^2$ , a área a ser inspecionada equivalente a  $4 \times 0.01 = 0.04$  (4 elementos em vizinhança), ou seja, a 4% da área total da placa. Tendo-se assim, uma economia de 96% de área a ser inspecionada, o que garante: ganho de tempo, economia de mão-de-obra e redução de custo com inspeção.

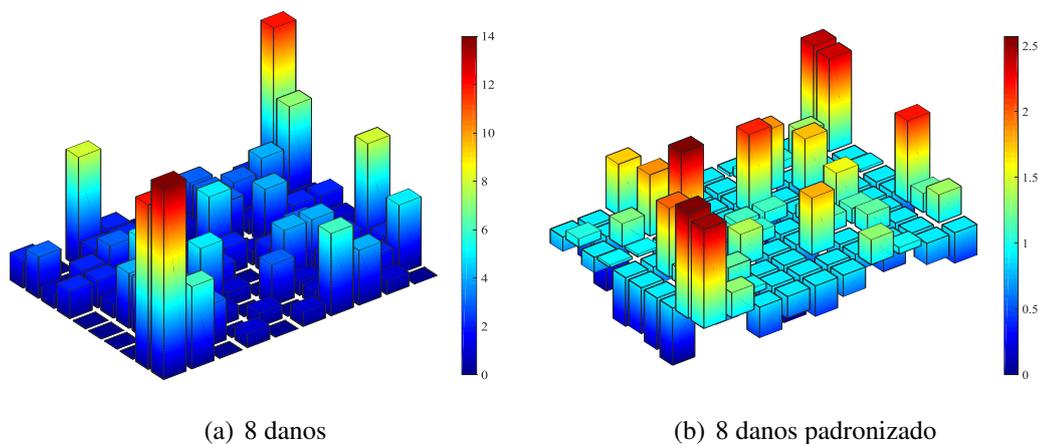
Ainda sobre os resultados, tendo em vista a detecção de dois danos, a Figura 5.37b, encontrou-se os danos nos elementos  $N_e = 10$  e  $N_e = 21$ . Assumindo que os danos reais encontram-se  $N_e = 22$  e  $N_e = 19$ , tem-se uma área total de inspeção equivalente a 8% da área total da placa, o que gera, mais uma vez, uma grande economia de tempo de inspeção e todos seus outros benefícios.

Na sequência, abordou-se o problema de identificação de danos tratando a identificação de 8 (oito) danos simultâneos. Devido à grande quantidade de danos e simetria do sistema, tem-se uma tarefa bastante complexa para o otimizador. A Figura 5.38a exhibe o resultado da identificação de 8 danos. Este resultado foi obtido considerando 8 variáveis de projeto (número de danos) e 20 execuções do algoritmo genético, a fim de se obter uma média, uma vez que o AG é um método heurístico e não determinístico. Ainda a respeito da Figura 5.38a, observa-se que o grande número de danos identificados pelo otimizador ocorreu nas bordas da placa e muitos outros (com menor intensidade) distribuídos com certa aleatoriedade sobre a placa.



**Figura 5.37:** Resultado da identificação de dano na placa delaminada considerando 1 e 2 danos presentes (legenda: ■ dano detectado, ■ danos reais).

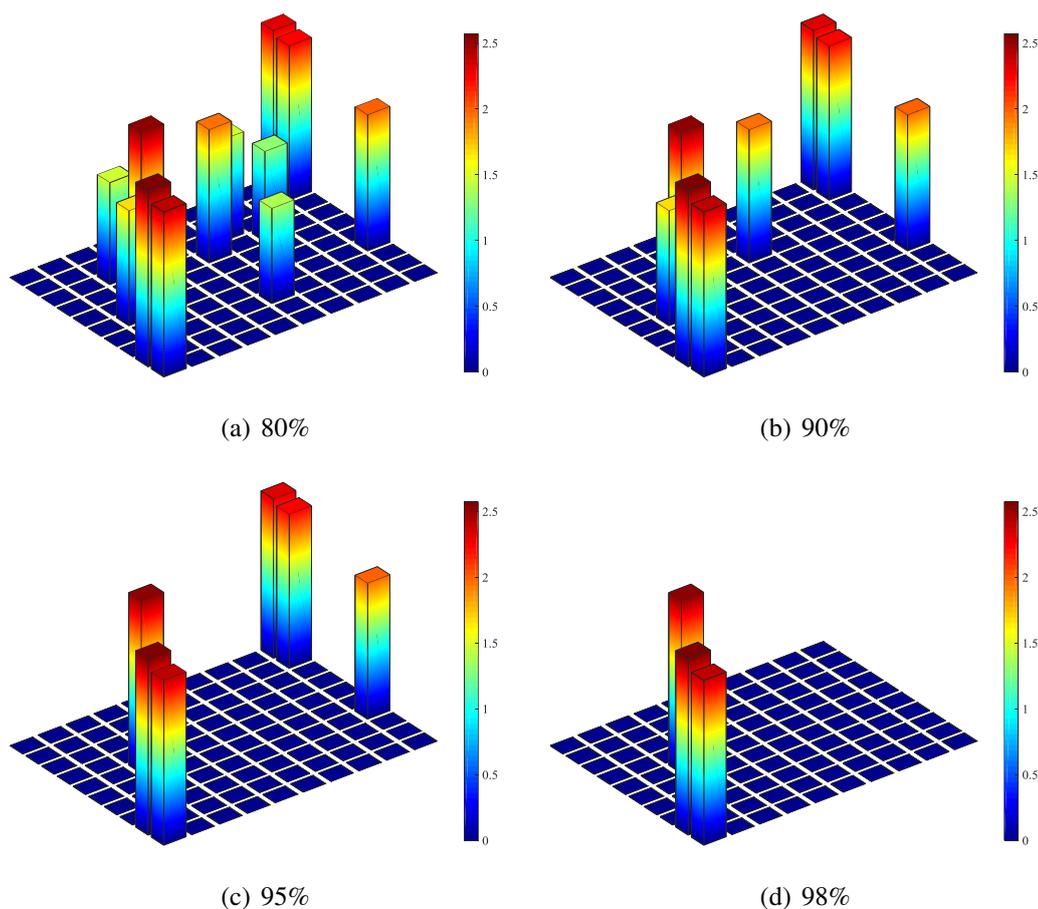
Para tratar com este tipo de incerteza, os índices de danos determinados para cada elemento são padronizados pela distribuição normal padrão acumulada  $Z_i$  da forma  $Z_i = \frac{ID_i - \mu_{ID}}{\sigma_{ID}}$ , sendo  $\mu_{ID}$  e  $\sigma_{ID}$  o valor médio e o desvio padrão dos índices de danos (ID), respectivamente. A Figura 5.38b exibe o resultado padronizado da Figura 5.38a.



**Figura 5.38:** Resultado da identificação de dano na placa delaminada considerando oito danos estruturais.

Observa-se que ainda assim com valores padronizados em seus estado bruto, não pode-se concluir muito a respeito das possíveis localizações do dano. Contudo, uma vez o conjunto de dados padronizado segundo a distribuição  $Z$ , pode-se lançar mão de valores limites já conhecidos para intervalos de confiança estatísticos. Os valores para os limites de decisão de dano para o índice de dano padronizado utilizado na literatura incluem 1.28, 1.645, 1.96 e 2.33 para níveis de confiança de 80%, 90%, 95% e 98% para a presença de dano, respectivamente (Rucevskis *et al.* (2016)). Assim, fixou-se igual a zero todos os valores abaixo do limite  $Z$  correspondente ao nível de confiança estabelecido.

A Figura 5.39 exibe os resultados para quatro diferentes limites para o índice padronizado. Não pretende-se, por meio destes resultados, abordar o critério estatístico propriamente dito, mas sim, estabelecer uma alternativa simples e rápida para tomada de decisão em averiguar a possível localização dos danos. Pode-se observar que para limites de 80% e 90% (Figuras 5.39a e 5.39b) os resultados foram significativamente "filtrados" em relação ao resultado inicial (Figura 5.38b), que satisfatoriamente se encontram próximos e/ou dentro da região pré-estabelecida como danificada.



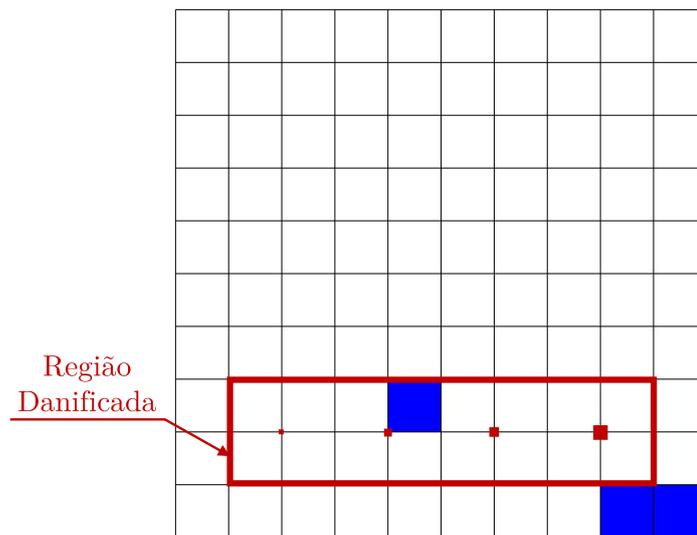
**Figura 5.39:** Resultado da identificação de dano na placa delaminada considerando oito danos estruturais.

Segregando particularmente o resultado da Figura 5.39d (o caso mais extremo com maior probabilidade de se obter o dano real detectado), observa-se uma boa correspondência dos resultados, onde os danos foram detectados nos elementos  $N_e = 9$ ,  $N_e = 10$  e  $N_e = 25$ , sendo o elemento  $N_e = 25$  coincidente com a região danificada e os demais localizados na vizinhança da região danificada (Figura 5.40). De modo geral, a identificação de danos foi bem-sucedida, uma vez que conseguiu detectar a região danificada ou na vizinhança desta região. A área máxima desta vizinhança corresponde a 4% da área total da estrutura. Algumas considerações são feitas a respeito de estabelecer somente a região inferior como danificada: a placa é quadrada e simé-

trica, com danos simétricos, livre de condição de contorno e espessura constante. Devido a isto, restringiu-se o problema somente para uma parte simétrica da estrutura. Ainda, os resultados em geral obtidos, se agruparam em somente uma região.

A título de exemplo, a área total de uma aeronave AIRBUS® A-380 é de aproximadamente  $920m^2$  (Simonot *et al.* (2005)), aplicando a metodologia desenvolvida neste estudo nesta estrutura de grande porte, reduz-se a área total de  $980m^2$  para uma região a ser inspecionada para  $0.04 \times 980 = 39.2$ . Este valor, representa aproximadamente a título de comparação a cerca de um quinto da área do estabilizador horizontal da aeronave Simonot *et al.* (2005)). De fato o resultado do método empregado neste trabalho acarreta em vários benefícios relacionados à manutenção, finanças e confiabilidade mecânica.

Por fim, destaca-se que o dano aqui estudado trata-se de um dano pequeno e inserido por meio de insertos de *teflons* a fim de simular o comportamento mecânico de regiões delaminadas. Na prática, o dano de laminação não é concentrado e normalmente é muito mais severo, podendo se espalhar e atingir diversas camadas. Espera-se que os resultados experimentais aqui obtidos ainda tenham rendimento ainda melhor para delaminações em estruturas reais.



**Figura 5.40:** Resultado final da identificação de danos com possível localização do(s) dano(s) (legenda: ■ dano detectado, ■ danos reais).

# Capítulo 6

## Conclusões

### 6.1 Conclusões

Esta pesquisa foi norteadada pela identificação de danos em placas laminadas por meio de técnicas computacionais inteligentes. Para isto, avaliou-se as respostas modais da estrutura, como frequências naturais e modos de vibração. A modelagem numérica foi realizada por meio do método dos elementos finitos e o problema inverso e de reconhecimento de padrões foi desempenhado por heurísticas de otimização global (GA e SFO) e redes neurais artificiais, respectivamente.

O método dos elementos finitos utilizado como ferramenta de modelagem do problema direto neste trabalho, mostrou-se ser uma ferramenta poderosa e essencial para a obtenção das respostas estruturais. Tais repostas servem como base no processo de avaliação da saúde estrutural na metodologia SHM. Neste estudo, dados modais foram avaliados como respostas base devido às vantagens mencionadas, contudo, o MEF permite que inúmeras outras repostas estruturais sejam avaliadas, o que dependerá de cada caso em particular.

Em uma análise direta inicial, constatou-se que de fato o dano promove uma alteração nas respostas modais estruturais. Ficou constatado que especificamente o modo de vibração é alterado e quando devidamente tratado, consegue indicar a possível localização dos defeitos.

Deu-se início à otimização da identificação de danos estruturais levando em conta o estudo sobre a distribuição ótima do posicionamento dos sensores. Fixou-se o número de sensores em 4, 6 e 9 e visou-se a distribuição ótima formada por estas unidades. Diversos métodos matriciais foram aplicados e de certo modo todos foram eficientes trazendo um resultado bem parecido entre eles. A posição ótimas dos sensores gerada por tais objetivos resultou em pontos onde se tinha a maior quantidade de informação modal disponível. Contudo, devido às condições de contorno da placa, os pontos resultantes foram obtidos nas bordas. Adicionalmente, abordou-se a problemática de otimização dos sensores pela introdução de um critério de interpolação de su-

perfícies. O resultado da interpolação foi muito satisfatório a partir de 6 sensores selecionados, podendo inclusive tratar a interpolação de diversos modos em baixa frequência ( $\leq 400Hz$ ).

Devido ao episódio duplo sobre a otimização dos sensores, abordou-se então uma terceira frente, lançando mão de da otimização multiobjetivo. Esse tipo de estratégia intenta agregar os benefícios da otimização matricial (maior qualidade de informação modal) e pela interpolação dos modos (maior qualidade na reconstrução dos modos). O resultado desta estratégia gerou uma quantidade suficientemente elevada de configurações ótimas dos sensores, sendo todas estas, soluções ótimas. O critério de tomada de decisão normalmente depende de cada caso em específico, nos resultados obtidos, decidiu-se pela solução que minimizasse os múltiplos objetivos de do modo igual (ponto B das frentes de Pareto).

No que concerne à identificação propriamente dita, fez-se uso dos resultados da otimização dos sensores para a obtenção das repostas modais nestes pontos. As amplitudes de vibração nestes pontos foram então combinadas de tal forma que se pudesse obter uma função objetivo. Quatro sensores foram utilizados para a identificação dos danos usando o algoritmo genético. Os resultados do problema inverso mostram que a metodologia proposta foi bem sucedida, sendo capaz de detectar a localização do dano, bem como sua gravidade.

Em relação ao caso particular de detecção de furos circulares, o algoritmo SFO otimizado (composto por parâmetros de controle ótimos) apresentou desempenho notável, demonstrando ser mais preciso na identificação dos danos do que o algoritmo genético.

É importante destacar que não atribuiu nenhuma forma específica do dano, salvo para o caso da detecção de furos circulares, pois o conceito principal da identificação deste trabalho sugere um identificação prévia e global, dando um noção da possível localização do dano em uma região confiável. Pretende-se desenvolver o trabalho aqui abordado para a emprego em grandes estruturas, pois já existem técnicas muito confiáveis e disponíveis para a detecção de danos com precisão milimétrica.

Este trabalho propôs uma nova técnica heurística de otimização (*SunFlower Optimization* - SFO), baseado no comportamento biológico de girassóis, aplicado a problemas de detecção de danos estruturais. Os resultados da otimização mostraram que o método de otimização introduzido foi capaz de encontrar pontos de ótimo em funções de teste, o que comprovou seu bom desempenho. Pretende-se melhorar a versão do algoritmo SFO para maior variabilidade no processo de geração de novos indivíduos de modo que não haja estagnação em sub-regiões de ótimo. Em relação à aplicação do algoritmo em um problema de solução não-trivial real, o mesmo ainda foi capaz de resolver a identificação de danos e obteve desempenho muito semelhante ao amplamente conhecido e utilizado algoritmo genético. Ainda, um estudo estatístico sobre os parâmetros do SFO mostrou com o parâmetro de sobrevivência foi o mais significativo e que de fato, este parâmetro, possui a maior contribuição dentre os demais.

A segunda estratégia computacional abordada nesta tese se refere ao uso de redes neurais

artificiais. Em um primeiro instante, fez uso das redes tendo em vista a previsão de danos nas placas laminadas estudadas. Em uma fase inicial optou-se pelo uso das 6 primeiras frequências naturais como entrada da rede e tendo a saída como a localização do dano ( $N_e$ ) e sua severidade ( $\alpha$ ). O termo da severidade do dano gerou certo grau de confundimento da rede, logo, removendo-se esse termo da fase de treinamento, constatou-se uma significativa melhoria dos resultados.

Com referência a entrada da rede neural considerando os modos de vibração reduzidos captados pelos sensores otimamente distribuídos, constatou-se excelente resultados. Como mencionado na literatura, os modos de vibração possuem maior quantidade de informações locais quando comparados com as frequências naturais. Acrescenta-se ainda que os modos considerados como entrada na rede foram obtidos somente para a placa danificada, assim, não fez-se uso de um modelo de referência. Este tipo de abordagem possui grande vantagem, uma vez que testes experimentais permitem a aplicação do método em qualquer tipo de estrutura sem que necessariamente se tenha conhecimento prévio de seu comportamento estrutural em um estado sem danos. Todavia, ainda não pode-se afirmar que a rede neural teve um desempenho inferior aos métodos de otimização. Talvez a pequena discrepância em relação às heurísticas aqui estudadas pode ser oriunda da configuração e dos parâmetros estipulados para a rede em questão.

Obstáculos esperados apareceram no momento da inserção dos ruídos nas repostas obtidas pelos sensores. Os ruídos foram adicionais na resposta modal obtida para a reconstrução dos modos de vibração. No tocante à identificação de danos por meio dos algoritmos genéticos, ruídos da ordem de 5% mostraram não afetar significativamente a metodologia. Quando elevado para níveis da ordem de 10%, os resultados obtidos já apresentaram discrepância significativa em relação ao dano real (induzido). Semelhantemente, o algoritmo SFO teve um comportamento muito interessante, mesmo na presença de ambientes ruidosos. Em alguns casos, foi apresentado desempenho superior ao GA. Talvez pelo fato do SFO esteja em uma versão incipiente e ainda não seja tão sensível como o GA, este tipo de ajuste permitiu uma robustez adicional na identificação de danos na presença de ruídos.

Ensaio experimentais foram realizados e resultados satisfatórios foram obtidos considerando minimização da função objetivo composta somente pela combinação de algumas frequências naturais. Resultados pós-processados do método de identificação geraram resultados dentro da região danificada (100%) e resultados na vizinhança da região danificada (96%).

Em geral, a Tabela 6.1 exibe em síntese uma conclusão geral das vantagens e desvantagens do método proposto em relação às técnicas convencionais de inspeção. Entende-se como técnicas convencionais de inspeção aquelas que já são de praxe na literatura (por exemplo: técnicas de ultrassom, emissão acústica, partículas magnéticas, inspeção visual e outras). Aqui, não aborda-se a fundo cada particularidade e/ou inovação específica de cada método convencional em caráter específico.

**Tabela 6.1:** Conclusão sobre o método proposto em relação às técnicas convencionais de inspeção.

	Presente Estudo		Técnicas Convencionais
	(GA, SFO)	RNAs	
Custo computacional	Baixo	Médio	Muito Baixo
Tempo de inspeção	Muito Baixo	Muito Baixo	Elevado
Preparação da estrutura	Muito Baixo	Muito Baixo	Elevado
Custo com instrumentação	Baixo	Baixo	Elevado
Habilidade do operador	Muito Baixo	Muito Baixo	Alta
Acessibilidade da estrutura	Baixo	Muito Baixo	Elevado
Conhecimento de uma vizinhança do dano	Muito Baixo	Muito Baixo	Alta
Possível prognóstico automático do dano	Médio	Muito Baixo	Alta

## 6.2 Recomendações Para Trabalhos Futuros

Alguns itens ainda são pertinentes para a sequência deste trabalho, dentre eles, destacam-se:

- Identificar múltiplos danos de tamanhos diferentes e ainda atribuir um valor de severidade  $\alpha$  para cada elemento independentemente.
- Levantar em consideração os estudos de diversos tipos de danos, seja em materiais compósitos ou metálicos.
- Evoluir a metodologia desenvolvida nesta tese para estruturas complexas.
- Adicionalmente, incorporar estudos de POD (*Probability of Detection*) às metodologias de otimização das distribuições ótimas de sensores.
- Estudar e elaborar critérios de tomada de decisão na tentativa de se obter a melhor escolha dentre as soluções ótimas de Pareto para o problema de múltiplos objetivos na otimização dos sensores.
- Desenvolver, melhorar e implementar o algoritmo SFO em diversos outros tipos de problemas, inclusive em relação à implementação de otimização multiobjetivo.
- Efetuar um estudo sobre técnicas de tratamento de incertezas.
- Otimizar a rede neural desenvolvida por meio de técnicas de processamento das entradas.
- Ampliar a metodologia aplicada neste estudo utilizando técnicas de impedância mecânica.

# Referências Bibliográficas

- Abdeljaber et al.(2017)** Osama Abdeljaber, Onur Avci, Serkan Kiranyaz, Moncef Gabbouj, e Daniel J Inman. Real-time vibration-based structural damage detection using one-dimensional convolutional neural networks. *Journal of Sound and Vibration*, 388:154–170.
- Adams et al.(1978)** RD Adams, P Cawley, CJ Pye, e BJ Stone. A vibration technique for non-destructively assessing the integrity of structures. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 20(2):93–100.
- Ågårdh(1991)** Lennart Ågårdh. Modal analyses of two concrete bridges in sweden. *Structural Engineering International*, 1(4):35–39.
- Angeles e Park(2008)** Jorge Angeles e Frank C Park. Performance evaluation and design criteria. Em *Springer Handbook of Robotics*, páginas 229–244. Springer.
- Ashory et al.(2016)** Mohammad-Reza Ashory, Ahmad Ghasemi-Ghalebahman, e Mohammad-Javad Kokabi. Damage detection in laminated composite plates via an optimal wavelet selection criterion. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 35(24):1761–1775.
- Bakhary et al.(2007)** Norhisham Bakhary, Hong Hao, e Andrew J Deeks. Damage detection using artificial neural network with consideration of uncertainties. *Engineering Structures*, 29(11):2806–2815.
- Bandara et al.(2014)** Rupika P Bandara, Tommy HT Chan, e David P Thambiratnam. Structural damage detection method using frequency response functions. *Structural Health Monitoring*, 13(4):418–429.
- Barai e Pandey(1995)** SV Barai e PC Pandey. Vibration signature analysis using artificial neural networks. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 9(4):259–265.
- Barthorpe e Worden(2009)** Robert J Barthorpe e Keith Worden. Sensor placement optimization. *Encyclopedia of structural health monitoring*.
- Bayissa e Haritos(2007)** WL Bayissa e Nicholas Haritos. Structural damage identification in plates using spectral strain energy analysis. *Journal of Sound and Vibration*, 307(1):226–249.

- Bayraktar et al.(2013)** Zikri Bayraktar, Muge Komurcu, Jeremy A Bossard, e Douglas H Werner. The wind driven optimization technique and its application in electromagnetics. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 61(5):2745–2757.
- Beygzadeh et al.(2014)** Sahar Beygzadeh, Eysa Salajegheh, Peyman Torkzadeh, Javad Salajegheh, e Seyed Sadegh Naserlavi. An improved genetic algorithm for optimal sensor placement in space structures damage detection. *International Journal of Space Structures*, 29(3):121–136.
- Bledzki et al.(1999)** AK Bledzki, A Kessler, R Rikards, e A Chate. Determination of elastic constants of glass/epoxy unidirectional laminates by the vibration testing of plates. *Composites Science and Technology*, 59(13):2015–2024.
- Boller(2000)** Christian Boller. Next generation structural health monitoring and its integration into aircraft design. *International Journal of Systems Science*, 31(11):1333–1349.
- Boller(2013)** Christian Boller. Structural health monitoring—its association and use. Em *New Trends in Structural Health Monitoring*, páginas 1–79. Springer.
- Borissova et al.(2012)** Daniela Borissova, Ivan Mustakerov, e Lyubka Doukovska. Predictive maintenance sensors placement by combinatorial optimization. *International Journal of Electronics and Telecommunications*, 58(2):153–158.
- Braun et al.(2015)** Carlos E Braun, Leonardo D Chiwiacowsky, e Arthur T Gomez. Variations of ant colony optimization for the solution of the structural damage identification problem. *Procedia Computer Science*, 51:875–884.
- Bussieck e Pruessner(2003)** Michael R Bussieck e Armin Pruessner. Mixed-integer nonlinear programming. *SIAG/OPT Newsletter: Views & News*, 14(1):19–22.
- Cawley e Adams(1979)** Peter Cawley e RD Adams. The location of defects in structures from measurements of natural frequencies. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 14(2):49–57.
- Cha e Buyukozturk(2015)** Young-Jin Cha e Oral Buyukozturk. Structural damage detection using modal strain energy and hybrid multiobjective optimization. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 30(5):347–358.
- Chakraborty(2005)** D Chakraborty. Artificial neural network based delamination prediction in laminated composites. *Materials & design*, 26(1):1–7.
- Chandrashekhhar e Ganguli(2016)** M Chandrashekhhar e Ranjan Ganguli. Damage assessment of composite plate structures with material and measurement uncertainty. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 75:75–93.

- Coote et al.(2005)** JE Coote, NAJ Lieven, e GW Skingle. Sensor placement optimisation for modal testing of a helicopter fuselage. Em *Proceedings of the 24th International Modal Analysis Conference (IMAC-XXIII), Orlando, Fl.* Citeseer.
- Cornwell et al.(1999)** Phillip Cornwell, Scott W Doebling, e Charles R Farrar. Application of the strain energy damage detection method to plate-like structures. *Journal of sound and vibration*, 224(2):359–374.
- Curadelli et al.(2008)** RO Curadelli, JD Riera, D Ambrosini, e MG Amani. Damage detection by means of structural damping identification. *Engineering Structures*, 30(12):3497–3504.
- da Silva et al.(2016)** Ivan Nunes da Silva, Danilo Hernane Spatti, Rogerio Andrade Flauzino, Luisa Helena Bartocci Liboni, e Silas Franco dos Reis Alves. *Artificial Neural Networks: A Practical Course*. Springer.
- da Silva Lopes(2010)** Patricia da Silva Lopes. *Modelagem de problema inverso de detecção de danos por técnicas de identificação de parâmetros e de otimização*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Itajubá.
- Deb(2008)** Kalyanmoy Deb. Introduction to evolutionary multiobjective optimization. Em *Multiobjective Optimization*, páginas 59–96. Springer.
- Deb et al.(2002)** Kalyanmoy Deb, Amrit Pratap, Sameer Agarwal, e TAMT Meyarivan. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: Nsga-ii. *IEEE transactions on evolutionary computation*, 6(2):182–197.
- Dessi e Camerlengo(2015)** Daniele Dessi e Gabriele Camerlengo. Damage identification techniques via modal curvature analysis: overview and comparison. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 52:181–205.
- Devivier et al.(2013)** C Devivier, F Pierron, e MR Wisnom. Impact damage detection in composite plates using deflectometry and the virtual fields method. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 48:201–218.
- Doebling et al.(1996)** Scott W Doebling, Charles R Farrar, Michael B Prime, e Daniel W Shevitz. Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: a literature review.
- Doebling et al.(1998)** Scott W Doebling, Charles R Farrar, Michael B Prime, et al. A summary review of vibration-based damage identification methods. *Shock and vibration digest*, 30(2): 91–105.

- Dos Santos et al.(2000)** JV Araujo Dos Santos, CM Mota Soares, CA Mota Soares, e HLG Pina. Development of a numerical model for the damage identification on composite plate structures. *Composite Structures*, 48(1):59–65.
- Eskew e Jang(2017)** Edward Eskew e Shinae Jang. Optimal sensor placement for parameter estimation of bridges. Em *SPIE Smart Structures and Materials+ Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*, páginas 101702F–101702F. International Society for Optics and Photonics.
- Eun et al.(2014)** Hee-Chang Eun, Su-Yong Park, e Rae-Jung Kim. Damage detection using the variation in the frf data depending on mass addition.
- Fan e Qiao(2009)** Wei Fan e Pizhong Qiao. A 2-d continuous wavelet transform of mode shape data for damage detection of plate structures. *International Journal of Solids and Structures*, 46(25):4379–4395.
- Fan e Qiao(2011)** Wei Fan e Pizhong Qiao. Vibration-based damage identification methods: a review and comparative study. *Structural Health Monitoring*, 10(1):83–111.
- Fan e Qiao(2012)** Wei Fan e Pizhong Qiao. A strain energy-based damage severity correction factor method for damage identification in plate-type structures. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 28:660–678.
- Farrar e Worden(2012)** Charles R Farrar e Keith Worden. *Structural health monitoring: a machine learning perspective*. John Wiley & Sons.
- Farrar et al.(2003)** Charles R Farrar, Hoon Sohn, Francois M Hemez, Mark C Anderson, Matthew T Bement, Phillip J Cornwell, Scott W Doebling, JF Schultze, N Lieven, e AN Robertson. Damage prognosis: current status and future needs. *Report. Los Alamos, NM, USA: Los Alamos National Laboratory*.
- Fendzi et al.(2014)** Claude Fendzi, Julien Morel, Marc Rebillat, Mikhail Guskov, Nazih Mechbal, e Gérard Coffignal. Optimal sensors placement to enhance damage detection in composite plates. Em *7th European Workshop on Structural Health Monitoring*, páginas 1–8.
- Friswell et al.(1998)** MI Friswell, JET Penny, e SD Garvey. A combined genetic and eigensensitivity algorithm for the location of damage in structures. *Computers & Structures*, 69(5): 547–556.
- Friswell(2007)** Michael I Friswell. Damage identification using inverse methods. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 365(1851):393–410.

- Fu et al.(2016)** YZ Fu, JK Liu, ZT Wei, e ZR Lu. A two-step approach for damage identification in plates. *Journal of Vibration and Control*, 22(13):3018–3031.
- Ganguli(2001)** Ranjan Ganguli. A fuzzy logic system for ground based structural health monitoring of a helicopter rotor using modal data. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 12(6):397–407.
- Garcia et al.(2015)** D Garcia, R Palazzetti, I Trendafilova, C Fiorini, e A Zucchelli. Vibration-based delamination diagnosis and modelling for composite laminate plates. *Composite Structures*, 130:155–162.
- Garcia-Palencia et al.(2015)** Antonio Garcia-Palencia, Erin Santini-Bell, Mustafa Gul, e Necati Catbas. A frf-based algorithm for damage detection using experimentally collected data. *Structural Monitoring and Maintenance*, 2(4):399–418.
- Garg(1988)** Amar C Garg. Delamination a damage mode in composite structures. *Engineering Fracture Mechanics*, 29(5):557–584.
- Gomes et al.(2016a)** Guilherme Gomes, Sebastião Cunha Jr., e Antonio Ancelotti Jr. Structural damage localization in composite plates using finite element method and optimization algorithm. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 10(14):124–131.
- Gomes et al.(2016b)** Guilherme Gomes, Sebastião Cunha Jr., Antonio Ancelotti Jr., e Mirian Melo. Damage detection in composite materials via optimization techniques based on dynamic parameters changes. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 6(5):157–166.
- Gomes(2016)** Guilherme Ferreira Gomes. *Detecção de Danos Estruturais em Material Compósito Laminado via Método de Otimização e Parâmetros Dinâmicos*. Dissertação de mestrado, UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ.
- Gopalakrishnan et al.(2011a)** Srinivasan Gopalakrishnan, Massimo Ruzzene, e Sathyanarayana Hanagud. Application of the finite element method in shm. Em *Computational Techniques for Structural Health Monitoring*, páginas 157–175. Springer.
- Gopalakrishnan et al.(2011b)** Srinivasan Gopalakrishnan, Massimo Ruzzene, e Sathyanarayana Hanagud. Computational techniques for damage detection, classification and quantification. Em *Computational Techniques for Structural Health Monitoring*, páginas 407–461. Springer.
- Gu et al.(2016)** Guimei Gu, Yu Zhao, e Xin Zhang. Optimal layout of sensors on wind turbine blade based on combinational algorithm. *International Journal of Distributed Sensor Networks*.

- Guan et al.(2017)** Xuefei Guan, Yongxiang Wang, e Jingjing He. A probabilistic damage identification method for shear structure components based on cross-entropy optimizations. *Entropy*, 19(1):27.
- Guo et al.(2004)** HY Guo, L Zhang, LL Zhang, e JX Zhou. Optimal placement of sensors for structural health monitoring using improved genetic algorithms. *Smart Materials and Structures*, 13(3):528.
- Guratzsch(2007)** Robert Frank Guratzsch. *Sensor placement optimization under uncertainty for structural health monitoring systems of hot aerospace structures*. Tese de Doutorado, Citeseer.
- Hakim e Abdul Razak(2013)** SJS Hakim e H Abdul Razak. Adaptive neuro fuzzy inference system (anfis) and artificial neural networks (anns) for structural damage identification. *Struct Eng Mech*, 45(6):779–802.
- Hassiotis e Jeong(1995)** Sophia Hassiotis e Garrett D Jeong. Identification of stiffness reductions using natural frequencies. *Journal of engineering mechanics*, 121(10):1106–1113.
- Hearn e Testa(1991)** George Hearn e Rene B Testa. Modal analysis for damage detection in structures. *Journal of Structural Engineering*, 117(10):3042–3063.
- Heredia-Zavoni e Esteva(1998)** Ernesto Heredia-Zavoni e Luis Esteva. Optimal instrumentation of uncertain structural systems subject to earthquake ground motions. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 27(4):343–362.
- Heslehurst(2014)** Rikard Benton Heslehurst. *Defects and damage in composite materials and structures*. CRC Press.
- Hoell e Omenzetter(2016)** Simon Hoell e Piotr Omenzetter. Improved damage detectability in a wind turbine blade by optimal selection of vibration signal correlation coefficients. *Structural Health Monitoring*, página 1475921716657016.
- Holland e Goldberg(1989)** JH Holland e D Goldberg. Genetic algorithms in search, optimization and machine learning. ed: Addison-Wesley, Reading, MA.
- Hossain et al.(2016)** Md Sazzad Hossain, Ong Zhi Chao, Zubaidah Ismail, Siamak Noroozi, e Khoo Shin Yee. Artificial neural networks for vibration based inverse parametric identifications: A review. *Applied Soft Computing*.
- Hu e Wang(2009)** Huiwen Hu e Jieming Wang. Damage detection of a woven fabric composite laminate using a modal strain energy method. *Engineering Structures*, 31(5):1042–1055.

- Hu e Wu(2009)** Huiwen Hu e Chengbo Wu. Development of scanning damage index for the damage detection of plate structures using modal strain energy method. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 23(2):274–287.
- Hwang e He(2006)** Shun-Fa Hwang e Rong-Song He. A hybrid real-parameter genetic algorithm for function optimization. *Advanced Engineering Informatics*, 20(1):7–21.
- Ihesiulor et al.(2013)** Obinna K Ihesiulor, Krishna Shankar, Zhifang Zhang, e Tapabrata Ray. Efficiencies of algorithms for vibration-based delamination detection: A comparative study. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 8(5):247–281.
- Jafarkhani e Masri(2011)** Reza Jafarkhani e Sami F Masri. Finite element model updating using evolutionary strategy for damage detection. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 26(3):207–224.
- Jaimes et al.(2009)** Antonio López Jaimes, Saúl Zapotecas Martínez, e Carlos A Coello Coello. An introduction to multiobjective optimization techniques. *Optimization in Polymer Processing*, páginas 29–57.
- Jamison et al.(1984)** Russell D Jamison, Karl Schulte, Kenneth L Reifsnider, e Wayne W Stinchcomb. Characterization and analysis of damage mechanisms in tension-tension fatigue of graphite/epoxy laminates. Em *Effects of defects in composite materials*. ASTM International.
- Jung et al.(2015)** BK Jung, JR Cho, e WB Jeong. Sensor placement optimization for structural modal identification of flexible structures using genetic algorithm. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 29(7):2775–2783.
- Kammer(1991)** Daniel C Kammer. Sensor placement for on-orbit modal identification and correlation of large space structures. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 14(2): 251–259.
- Kammer e Tinker(2004)** Daniel C Kammer e Michael L Tinker. Optimal placement of triaxial accelerometers for modal vibration tests. *Mechanical systems and signal processing*, 18(1): 29–41.
- Kao e Hung(2003)** CY Kao e Shih-Lin Hung. Detection of structural damage via free vibration responses generated by approximating artificial neural networks. *Computers & Structures*, 81(28):2631–2644.
- Kashtalyan e Soutis(2000)** M Kashtalyan e C Soutis. The effect of delaminations induced by transverse cracks and splits on stiffness properties of composite laminates. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 31(2):107–119.

- Katunin(2014)** A Katunin. Damage identification based on stationary wavelet transform of modal data. *Modelowanie Inżynierskie*, 20(51):35–41.
- Katunin(2011)** Andrzej Katunin. Damage identification in composite plates using two-dimensional b-spline wavelets. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 25(8):3153–3167.
- Katunin et al.(2015)** Andrzej Katunin, Krzysztof Dragan, e Michał Dziendzikowski. Damage identification in aircraft composite structures: a case study using various non-destructive testing techniques. *Composite structures*, 127:1–9.
- Kaw(2005)** Autar K Kaw. *Mechanics of composite materials*. CRC press.
- Kawiecki(2001)** Grzegorz Kawiecki. Modal damping measurement for damage detection. *Smart Materials and Structures*, 10(3):466.
- Kim et al.(2003)** Jeong-Tae Kim, Yeon-Sun Ryu, Hyun-Man Cho, e Norris Stubbs. Damage identification in beam-type structures: frequency-based method vs mode-shape-based method. *Engineering structures*, 25(1):57–67.
- Kunwar et al.(2013)** Anshuman Kunwar, Ratneshwar Jha, Matthew Whelan, e Kerop Janoyan. Damage detection in an experimental bridge model using hilbert–huang transform of transient vibrations. *Structural Control and Health Monitoring*, 20(1):1–15.
- Lagace(1989)** Paul A Lagace. *Composite materials: fatigue and fracture, second volume*, volume 1012. ASTM International.
- Law et al.(1990)** SS Law, L Xun, e HS Ward. A vibration technique for structural stiffness identification. Em *Proceedings, International Conference on Vibration Problems in Engineering, Wuban-Chungqing*, volume 1, páginas 698–683.
- Lee(2000)** Jaehong Lee. Free vibration analysis of delaminated composite beams. *Computers & Structures*, 74(2):121–129.
- Li(2012)** Dongsheng Li. Sensor placement methods and evaluation criteria in structural health monitoring.
- Li et al.(2002)** YY Li, L Cheng, LH Yam, e WO Wong. Identification of damage locations for plate-like structures using damage sensitive indices: strain modal approach. *Computers & structures*, 80(25):1881–1894.
- Lifshitz e Rotem(1969)** Jacob M Lifshitz e Assa Rotem. Determination of reinforcement unbonding of composites by a vibration technique. *Journal of Composite Materials*, 3(3):412–423.

- Liu et al.(2008)** Wei Liu, Wei-cheng Gao, Yi Sun, e Min-jian Xu. Optimal sensor placement for spatial lattice structure based on genetic algorithms. *Journal of Sound and Vibration*, 317(1):175–189.
- Lopes et al.(2010)** Patricia da Silva Lopes, Ariosto Bretanha Jorge, e Sebastiao Simoes Cunha Jr. Detection of holes in a plate using global optimization and parameter identification techniques. *Inverse Problems in Science and Engineering*, 18(4):439–463.
- Maia et al.(2003)** NMM Maia, JMM Silva, EAM Almas, e RPC Sampaio. Damage detection in structures: from mode shape to frequency response function methods. *Mechanical systems and signal processing*, 17(3):489–498.
- MathWorks(2002)** Inc MathWorks. *Curve fitting toolbox: for use with MATLAB®: user's guide*. MathWorks.
- Mehrjoo et al.(2008)** Mohsen Mehrjoo, Naser Khaji, H Moharrami, e A Bahreininejad. Damage detection of truss bridge joints using artificial neural networks. *Expert Systems with Applications*, 35(3):1122–1131.
- Meo e Zumpano(2005)** Michele Meo e G Zumpano. On the optimal sensor placement techniques for a bridge structure. *Engineering structures*, 27(10):1488–1497.
- Michele Frizzarin et al.(2008)** ã Michele Frizzarin, Maria Q Feng, Paolo Franchetti, Serdar Soyoz, e Claudio Modena. Damage detection based on damping analysis of ambient vibration data.
- Mimovich(1988)** ME Mimovich. Experimental diagnosis of fracture damage in structures by the modal frequency method.
- Mistry et al.(2011)** S Mistry, MR Mofakhami, e J Pinsonnault. Evolving fuselage designs by incorporating shm technologies. *The Aeronautical Journal*, 115(1174):749–759.
- Mohan et al.(2013)** SC Mohan, Dipak Kumar Maiti, e Damodar Maity. Structural damage assessment using frf employing particle swarm optimization. *Applied Mathematics and Computation*, 219(20):10387–10400.
- Montalvão et al.(2006)** Diogo Montalvão, Nuno Manuel Mendes Maia, e António Manuel Relógio Ribeiro. A review of vibration-based structural health monitoring with special emphasis on composite materials. *Shock and Vibration Digest*, 38(4):295–324.
- Montgomery(1991)** Douglas C Montgomery. Design and analysis of experiments.
- Montgomery(2017)** Douglas C Montgomery. *Design and analysis of experiments*. John Wiley & Sons.

- Moradalizadeh(1990)** Mohammed Moradalizadeh. *Evaluation of crack defects in framed structures using resonant frequency techniques*. Tese de Doutorado, University of Newcastle upon Tyne. 1990.
- Moreno-García et al.(2014)** P Moreno-García, JV Araújo dos Santos, e H Lopes. A new technique to optimize the use of mode shape derivatives to localize damage in laminated composite plates. *Composite Structures*, 108:548–554.
- Munoz et al.(2016)** Victor Munoz, Benjamin Vales, Marianne Perrin, Marie-Laetitia Pastor, Hélène Weleman, Arthur Cantarel, e Moussa Karama. Damage detection in cfrp by coupling acoustic emission and infrared thermography. *Composites Part B: Engineering*, 85:68–75.
- Nanda et al.(2012)** Bharadwaj Nanda, Damodar Maity, e Dipak Kumar Maiti. Vibration based structural damage detection technique using particle swarm optimization with incremental swarm size. *International Journal Aeronautical and Space Sciences*, 13(3):323–331.
- Navabian et al.(2016)** N Navabian, M Bozorgnasab, R Taghipour, e O Yazdanpanah. Damage identification in plate-like structure using mode shape derivatives. *Archive of Applied Mechanics*, 86(5):819–830.
- Niemann et al.(2010)** Hanno Niemann, Joseph Morlier, Amir Shahdin, e Yves Gourinat. Damage localization using experimental modal parameters and topology optimization. *Mechanical systems and signal processing*, 24(3):636–652.
- Ogihara e Takeda(1995)** Shinji Ogihara e Nobuo Takeda. Interaction between transverse cracks and delamination during damage progress in cfrp cross-ply laminates. *Composites Science and Technology*, 54(4):395–404.
- Ooijevaar(2014)** Theodorus Hendricus Ooijevaar. *Vibration based structural health monitoring of composite skin-stiffener structures*. Universiteit Twente.
- Pandey et al.(1991)** AK Pandey, M Biswas, e MM Samman. Damage detection from changes in curvature mode shapes. *Journal of sound and vibration*, 145(2):321–332.
- Papadimitriou(2004)** Costas Papadimitriou. Optimal sensor placement methodology for parametric identification of structural systems. *Journal of sound and vibration*, 278(4):923–947.
- Papadopoulou et al.(2014)** Maria Papadopoulou, Benny Raphael, Ian FC Smith, e Chandra Sekhar. Hierarchical sensor placement using joint entropy and the effect of modeling error. *Entropy*, 16(9):5078–5101.
- Pawar e Ganguli(2011)** Prashant M Pawar e Ranjan Ganguli. *Structural health monitoring using genetic fuzzy systems*. Springer Science & Business Media.

- Penny et al.(1994)** JET Penny, MI Friswell, e SD Garvey. Automatic choice of measurement locations for dynamic testing. *AIAA journal*, 32(2):407–414.
- Pieczonka et al.(2013)** L Pieczonka, F Aymerich, G Brozek, M Szwedko, WJ Staszewski, e T Uhl. Modelling and numerical simulations of vibrothermography for impact damage detection in composites structures. *Structural Control and Health Monitoring*, 20(4):626–638.
- Pinfold(1995)** Martyn Keith Pinfold. *Composite mechanical properties for use in structural analysis*. Tese de Doutorado, University of Warwick.
- Prabhu e Atamturktur(2012)** Saurabh Prabhu e Sez Atamturktur. Selection of optimal sensor locations based on modified effective independence method: case study on a gothic revival cathedral. *Journal of Architectural Engineering*, 19(4):288–301.
- Qiao et al.(2007)** Pizhong Qiao, Kan Lu, Wahyu Lestari, e Jialai Wang. Curvature mode shape-based damage detection in composite laminated plates. *Composite Structures*, 80(3):409–428.
- Quek et al.(2003)** S Tua Quek, PS Tua, e Q Wang. Detecting anomalies in beams and plate based on the hilbert–huang transform of real signals. *Smart materials and structures*, 12(3):447.
- Ragauskas e Belevičius(2009)** Paulius Ragauskas e Rimantas Belevičius. Identification of material properties of composite materials. *Aviation*, 13(4):109–115.
- Raju e O'brien(2008)** IS Raju e TK O'brien. Fracture mechanics concepts, stress fields, strain energy release rates, delamination initiation and growth criteria. *Delamination behaviour of composites*, páginas 3–27.
- Rao e Anandakumar(2007)** A Rama Mohan Rao e Ganesh Anandakumar. Optimal placement of sensors for structural system identification and health monitoring using a hybrid swarm intelligence technique. *Smart materials and Structures*, 16(6):2658.
- Rao et al.(2014)** A Rama Mohan Rao, K Lakshmi, e S Krishnakumar. A generalized optimal sensor placement technique for structural health monitoring and system identification. *Procedia Engineering*, 86:529–538.
- Rao et al.(2015)** A Rama Mohan Rao, K Lakshmi, e S Krishna Kumar. Detection of delamination in laminated composites with limited measurements combining pca and dynamic qps. *Advances in Engineering Software*, 86:85–106.
- Rao e Rao(2009)** Singiresu S Rao e Singiresu S Rao. *Engineering optimization: theory and practice*. John Wiley & Sons.

- Rao e Yap(2011)** Singiresu S Rao e Fook Fah Yap. *Mechanical vibrations*, volume 4. Prentice Hall Upper Saddle River.
- Richards(1997)** SHANE A Richards. Completed richardson extrapolation in space and time. *Communications in numerical methods in engineering*, 13(7):573–582.
- Rucevskis et al.(2016)** Sandris Rucevskis, Rims Janeliukstis, Pavel Akishin, e Andris Chate. Mode shape-based damage detection in plate structure without baseline data. *Structural Control and Health Monitoring*.
- Rucka e Wilde(2006)** MAGDALENA Rucka e KRZYSZTOF Wilde. Application of continuous wavelet transform in vibration based damage detection method for beams and plates. *Journal of Sound and Vibration*, 297(3):536–550.
- Rucka e Wilde(2010)** Magdalena Rucka e Krzysztof Wilde. Neuro-wavelet damage detection technique in beam, plate and shell structures with experimental validation. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 48:579–604.
- Rytter(1993)** Anders Rytter. Vibrational based inspection of civil engineering structures.
- Salawu(1997)** OS Salawu. Detection of structural damage through changes in frequency: a review. *Engineering structures*, 19(9):718–723.
- Sampaio et al.(1999)** RPC Sampaio, NMM Maia, e JMM Silva. Damage detection using the frequency-response-function curvature method. *Journal of Sound and Vibration*, 226(5):1029–1042.
- Sawyer e Rao(2000)** James P Sawyer e Singiresu S Rao. Structural damage detection and identification using fuzzy logic. *AIAA journal*, 38(12):2328–2335.
- Sharif-Khodaei et al.(2015)** Z Sharif-Khodaei, M Ghajari, e MH Aliabadi. Impact damage detection in composite plates using a self-diagnostic electro-mechanical impedance-based structural health monitoring system. *Journal of Multiscale Modelling*, 6(04):1550013.
- Shi et al.(2000)** ZY Shi, SS Law, e LM Zhang. Optimum sensor placement for structural damage detection. *Journal of Engineering Mechanics*, 126(11):1173–1179.
- Simoen et al.(2015)** Ellen Simoen, Guido De Roeck, e Geert Lombaert. Dealing with uncertainty in model updating for damage assessment: A review. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 56:123–149.
- Simonot et al.(2005)** Marc Simonot, Air France, Gerhard Mischka, Austrian Airlines, Nicholas Holland, British Airways, Hartmut Krause, Lufthansa Hans-Erik Boström, SAS Rolf Bühler, et al. Recommendations for de-icing/anti-icing of aircraft on the ground–20 th edition.

- Sinou(2009)** Jean-Jacques Sinou. A review of damage detection and health monitoring of mechanical systems from changes in the measurement of linear and non-linear vibrations. *Mechanical vibrations: measurement, effects and control*, páginas 643–702.
- Sohn et al.(2003)** Hoon Sohn, Charles R Farrar, Francois M Hemez, Devin D Shunk, Daniel W Stinemates, Brett R Nadler, e Jerry J Czarnecki. A review of structural health monitoring literature: 1996–2001. *Los Alamos National Laboratory*.
- Staszewski et al.(2004)** Wieslaw Staszewski, Chr Boller, e Geoffrey R Tomlinson. *Health monitoring of aerospace structures: smart sensor technologies and signal processing*. John Wiley & Sons.
- Stepinski et al.(2013)** Tadeusz Stepinski, Tadeusz Uhl, e Wieslaw Staszewski. *Advanced structural damage detection: from theory to engineering applications*. John Wiley & Sons.
- Sundararaman et al.(2003)** S Sundararaman, D Adams, e E Rigas. Complementary methods for characterizing damage in heterogeneous structures. *Proceedings of the 16th U.S. Army Symposium on Solid Mechanics*, páginas 125–126.
- Surace et al.(2014)** Cecilia Surace, R Saxena, Marco Gherlone, e H Darwich. Damage localisation in plate like-structures using the two-dimensional polynomial annihilation edge detection method. *Journal of Sound and Vibration*, 333(21):5412–5426.
- Suveges(2016)** Jean Michel Carvalho Suveges. *Estudo Acerca da detecção de danos em estruturas via método de otimização*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Itajubá.
- Sweers et al.(2012)** Greg Sweers, Bruce Birch, e John Gokcen. lightning strikes: Protection, inspection, and repair. *Aero Magazine*, 4:19–28.
- Szewczyk e Hajela(1994)** Z Peter Szewczyk e Prabhat Hajela. Damage detection in structures based on feature-sensitive neural networks. *Journal of computing in civil engineering*, 8(2): 163–178.
- Takeda e Ogihara(1994)** Nobuo Takeda e Shinji Ogihara. Initiation and growth of delamination from the tips of transverse cracks in cfrp cross-ply laminates. *Composites science and technology*, 52(3):309–318.
- Telegraph(2016)** The Telegraph. Bird strike destroys passenger jet’s nose. <http://www.telegraph.co.uk/news/aviation/12192721/Bird-strike-destroys-passenger-jets-nose.html>, 2016. (Acessado em 27/03/2017).
- Vincenzi e Simonini(2017)** Loris Vincenzi e Laura Simonini. Influence of model errors in optimal sensor placement. *Journal of Sound and Vibration*, 389:119–133.

- Vo-Duy et al.(2016)** Trung Vo-Duy, Vinh Ho-Huu, Hau Dang-Trung, Du Dinh-Cong, e Trung Nguyen-Thoi. Damage detection in laminated composite plates using modal strain energy and improved differential evolution algorithm. *Procedia Engineering*, 142:182–189.
- Wang et al.(2010)** Hongtao Wang, Chengming He, e Yutian Liu. Pareto optimization of power system reconstruction using nsga-ii algorithm. Em *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2010 Asia-Pacific*, páginas 1–5. IEEE.
- Wang et al.(1997)** Z Wang, RM Lin, e MK Lim. Structural damage detection using measured frf data. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 147(1-2):187–197.
- Wenk e Bockenheimer(2014)** Lorenz Wenk e Clemens Bockenheimer. Structural health monitoring: A real-time on-board stethoscope for condition-based maintenance. *Airbus technical magazine, Flight Airworthiness Support Technology*, 54:22–29.
- WenQin et al.(2016)** Han WenQin, Luo Ying, Gu AiJun, e Fuh-Gwo Yuan. Damage modes recognition and hilbert-huang transform analyses of cfrp laminates utilizing acoustic emission technique. *Applied Composite Materials*, 23(2):155–178.
- Worden e Manson(1999)** K Worden e G Manson. Visualisation and dimension reduction of high-dimensional data for damage detection. Em *Proc. 17th Int. Modal Analysis Conf.*
- Worden e Burrows(2001)** Keith Worden e AP Burrows. Optimal sensor placement for fault detection. *Engineering structures*, 23(8):885–901.
- Worden e Friswell(2009)** Keith Worden e Michael I Friswell. Modal–vibration-based damage identification. *Encyclopedia of Structural Health Monitoring*.
- Worden et al.(2007)** Keith Worden, Charles R Farrar, Graeme Manson, e Gyuhae Park. The fundamental axioms of structural health monitoring. Em *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, volume 463, páginas 1639–1664. The Royal Society.
- Worden et al.(2009)** Keith Worden, Wieslaw Staszewski, Graeme Manson, Aldo Ruotulo, e Cecilia Surace. Optimization techniques for damage detection. *Encyclopedia of Structural Health Monitoring*.
- Wu et al.(1992)** X Wu, J Ghaboussi, e J Hr Garrett. Use of neural networks in detection of structural damage. *Computers & structures*, 42(4):649–659.
- Xiang e Liang(2012)** Jiawei Xiang e Ming Liang. A two-step approach to multi-damage detection for plate structures. *Engineering Fracture Mechanics*, 91:73–86.
- Xu e Zhu(2017)** Yongfeng Xu e Weidong Zhu. Non-model-based damage identification of plates using measured mode shapes. *Structural Health Monitoring*, 16(1):3–23.

- Yam et al.(2002)** LH Yam, YY Li, e WO Wong. Sensitivity studies of parameters for damage detection of plate-like structures using static and dynamic approaches. *Engineering structures*, 24(11):1465–1475.
- Yam et al.(2003)** LH Yam, YJ Yan, e JS Jiang. Vibration-based damage detection for composite structures using wavelet transform and neural network identification. *Composite Structures*, 60(4):403–412.
- Yam et al.(2004)** LH Yam, Z Wei, e L Cheng. Nondestructive detection of internal delamination by vibration-based method for composite plates. *Journal of Composite Materials*, 38(24): 2183–2198.
- Yan et al.(2006)** YJ Yan, LH Yam, L Cheng, e L Yu. Fem modeling method of damage structures for structural damage detection. *Composite Structures*, 72(2):193–199.
- Yan et al.(2007)** YJ Yan, L Cheng, ZY Wu, e LH Yam. Development in vibration-based structural damage detection technique. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 21(5):2198–2211.
- Yang e Oyadiji(2017a)** Chen Yang e S Olutunde Oyadiji. Damage detection using modal frequency curve and squared residual wavelet coefficients-based damage indicator. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 83:385–405.
- Yang e Oyadiji(2017b)** Chen Yang e S Olutunde Oyadiji. Delamination detection in composite laminate plates using 2d wavelet analysis of modal frequency surface. *Computers & Structures*, 179:109–126.
- Yang et al.(2016)** Tao Yang, Jufeng Li, e Yu Du. Delamination detection in composite structures based on modal flexibility curvature. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 35(10): 853–863.
- Yang(2012)** Xin-She Yang. Flower pollination algorithm for global optimization. Em *International Conference on Unconventional Computing and Natural Computation*, páginas 240–249. Springer.
- Yi et al.(2011)** Ting-Hua Yi, Hong-Nan Li, e Ming Gu. Optimal sensor placement for structural health monitoring based on multiple optimization strategies. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 20(7):881–900.
- Yi et al.(2015)** Ting-Hua Yi, Hong-Nan Li, e Chuan-Wei Wang. Multiaxial sensor placement optimization in structural health monitoring using distributed wolf algorithm. *Structural Control and Health Monitoring*.

- Yong e Hong(2001)** X Yong e H Hong. A genetic algorithm for structural damage detection based on vibration data. Em *Proc. 19th International Modal Analysis Conference*, páginas 1381–1387.
- Zaher(2003)** Mostafa Seleem Amin Abdel Zaher. *An Integrated Vibration-Based Structural Health Monitoring System*.
- Zang e Imregun(2001)** C Zang e M Imregun. Structural damage detection using artificial neural networks and measured frf data reduced via principal component projection. *Journal of Sound and Vibration*, 242(5):813–827.
- Zhang et al.(1994)** J Zhang, C Soutis, e J Fan. Strain energy release rate associated with local delamination in cracked composite laminates. *Composites*, 25(9):851–862.
- Zhang et al.(1999)** Junqian Zhang, Jinghong Fan, e KP Herrmann. Delaminations induced by constrained transverse cracking in symmetric composite laminates. *International Journal of Solids and Structures*, 36(6):813–846.
- Zhang et al.(2013a)** Yao Zhang, Longqi Wang, Seng Tjhen Lie, e Zhihai Xiang. Damage detection in plates structures based on frequency shift surface curvature. *Journal of Sound and Vibration*, 332(25):6665–6684.
- Zhang et al.(2013b)** Zhifang Zhang, Krishna Shankar, Tapabrata Ray, Evgeny V Morozov, e Murat Tahtali. Vibration-based inverse algorithms for detection of delamination in composites. *Composite Structures*, 102:226–236.
- Zhao et al.(2008)** J Zhao, J Tang, e KW Wang. Enhanced statistical damage identification using frequency-shift information with tunable piezoelectric transducer circuitry. *Smart Materials and Structures*, 17(6):065003.
- Zhao et al.(2007)** Xiaoliang Zhao, Huidong Gao, Guangfan Zhang, Bulent Ayhan, Fei Yan, Chimam Kwan, e Joseph L Rose. Active health monitoring of an aircraft wing with embedded piezoelectric sensor/actuator network: I. defect detection, localization and growth monitoring. *Smart materials and structures*, 16(4):1208.
- Zhou et al.(2017)** Kai Zhou, Zheng Yi Wu, Xiao Hua Yi, Da Peng Zhu, Rahul Narayan, e Ji Zhao. Generic framework of sensor placement optimization for structural health modeling. *Journal of Computing in Civil Engineering*.
- Zhu e Wu(2014)** Futao Zhu e Yunjie Wu. A rapid structural damage detection method using integrated anfis and interval modeling technique. *Applied Soft Computing*, 25:473–484.
- Zhu et al.(2015)** Lihua Zhu, Jun Dai, e Guoliang Bai. Sensor placement optimization of vibration test on medium-speed mill. *Shock and Vibration*, 2015.

---

**Zou et al.(2000)** Yi Zou, LPSG Tong, e Grant P Steven. Vibration-based model-dependent damage (delamination) identification and health monitoring for composite structures—a review. *Journal of Sound and vibration*, 230(2):357–378.

# Anexo A

## Otimização dos Sensores para Condição de Contorno de Engastamento

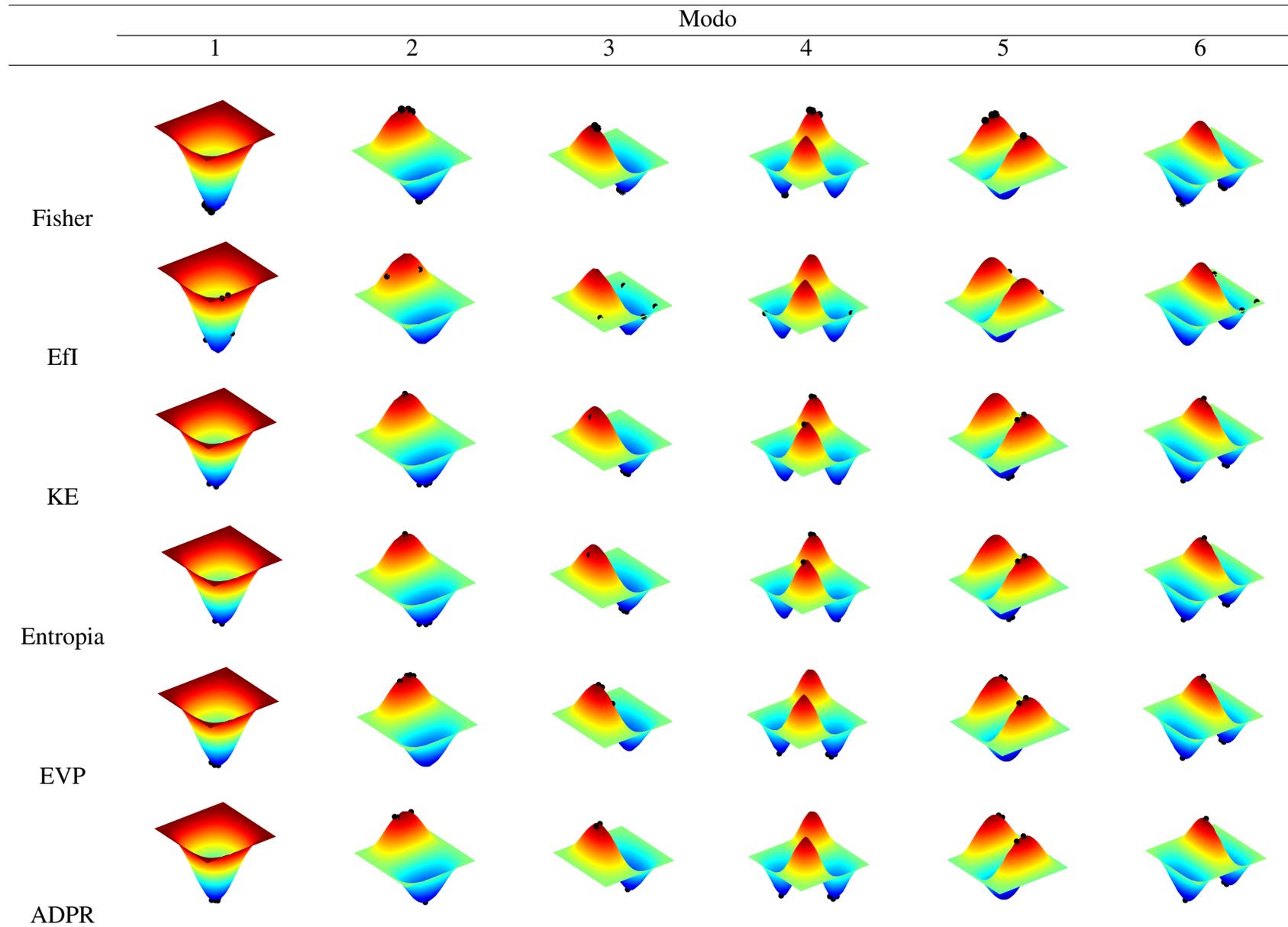
Para a estrutura teste deste trabalho, preservou-se todas as características geométricas e físicas, modificando-se apenas as condições de contorno. Neste anexo, exibe-se os resultados obtidos pela técnica de distribuição ótima dos sensores para a placa em condição de contorno fixas, isto é, todos os lados da placa estão engastados, não possuindo quaisquer movimento de translação e rotação nos eixos cartesianos. Tomou-se como nomenclatura essa condição de contorno como CCCC (*clamped-clamped-clamped-clamped*).

### A.1 Otimização por meio de Critério de Informação Modal

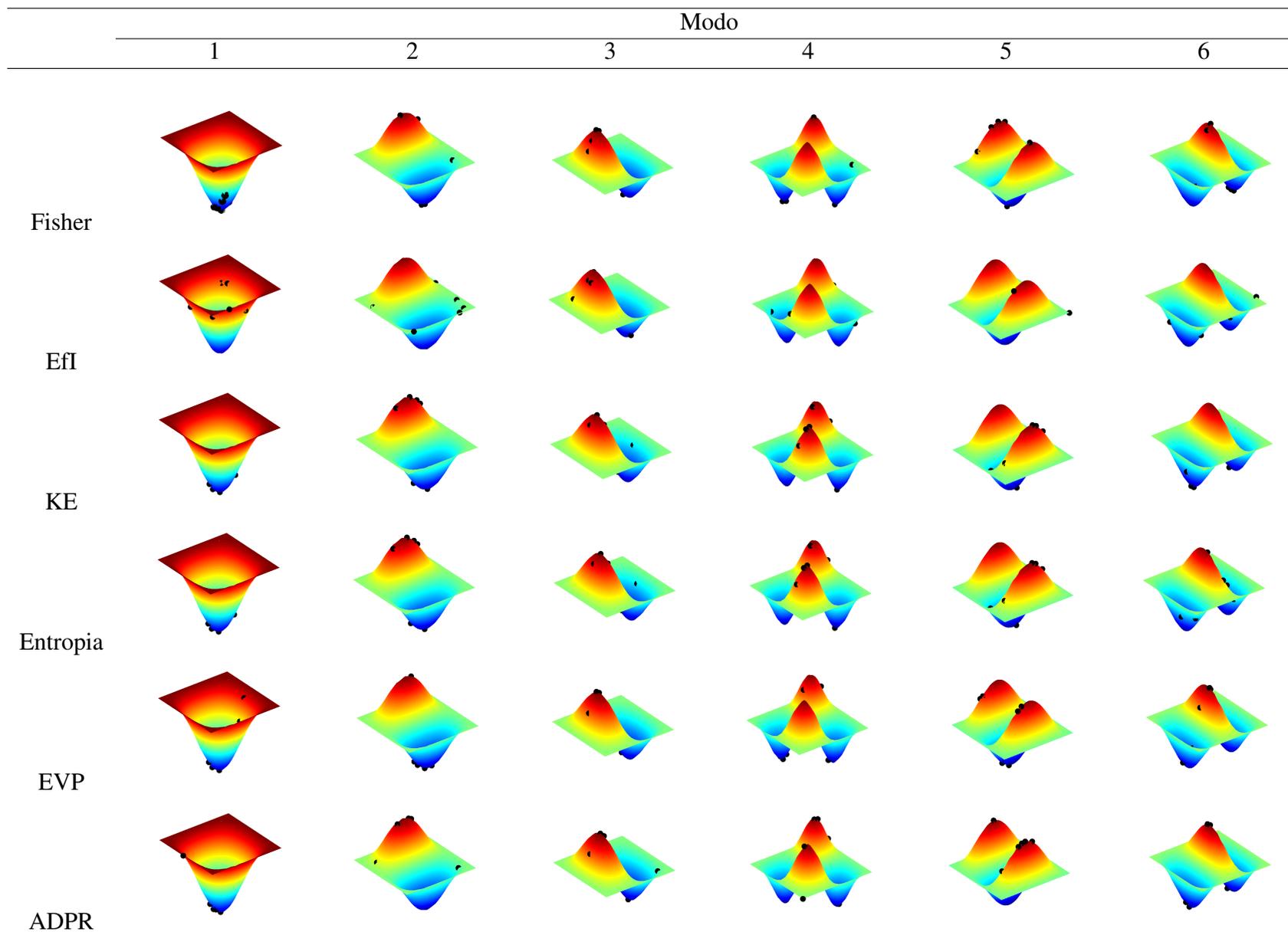
As Tabelas A.1, A.2 e A.3 exibem os resultados da distribuição ótima dos sensores considerando 4, 6 e 9 sensores, respectivamente. Pode-se observar que para a maioria dos métodos, os pontos "ótimos" encontram-se próximos aos locais de amplitude máxima de vibração. Alguns métodos específicos apresentaram um desempenho mais satisfatório do que outros. Por exemplo, o critério de entropia de informação conseguiu distribuir os sensores em pontos de picos (anti-nós) de vibração, enquanto que, o método de Independência Efetiva (EfI), apresentou rendimento inferior, como notado anteriormente no caso da placa livre de condição de contorno.

As Figuras A.1, A.2 e A.3 exibem o resultado considerando como função objetivo o conjuntos dos  $n = 6$  primeiros modos. Constata-se que, os pontos ótimos se localizam nas proximidades centrais da placa considerando sobretudo 4 sensores. Para 6 e 9 sensores, pode-se verificar que a distribuição passa a não ser trivial e não assume nenhuma tendência específica.

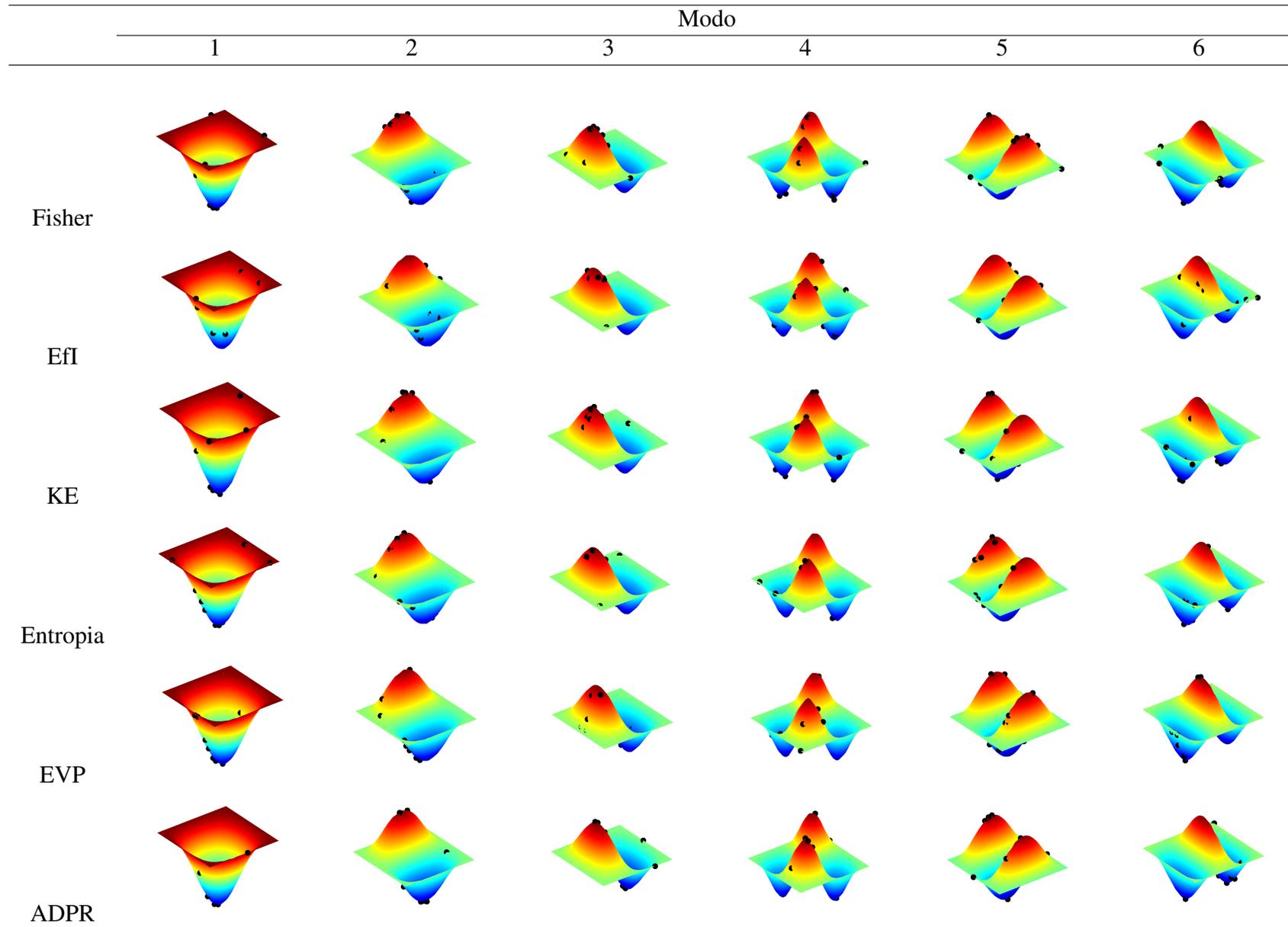
**Tabela A.1:** Resultados do posicionamento ótimo considerando 4 sensores.

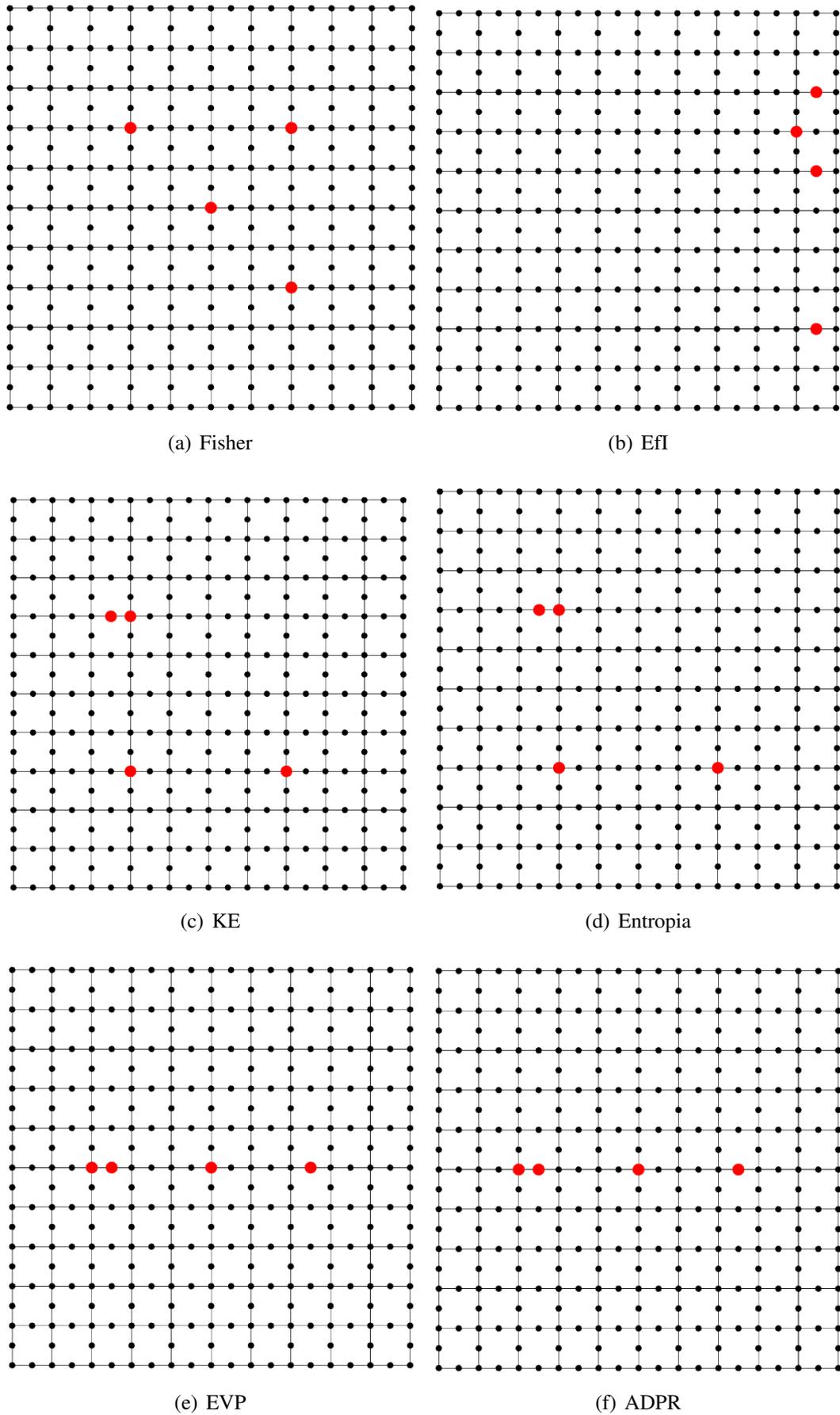


**Tabela A.2:** Resultados do posicionamento ótimo considerando 6 sensores.

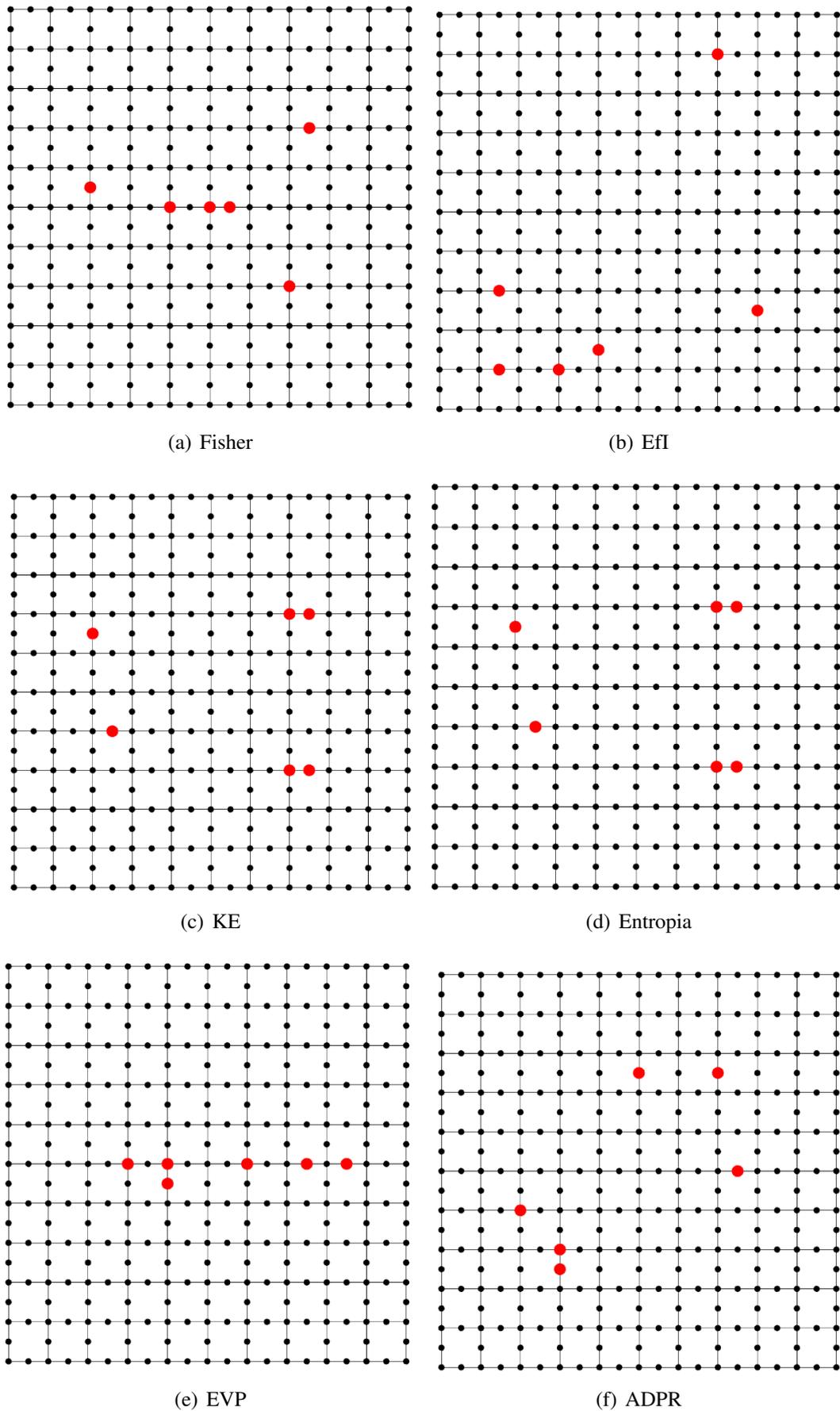


**Tabela A.3:** Resultados do posicionamento ótimo considerando 9 sensores.

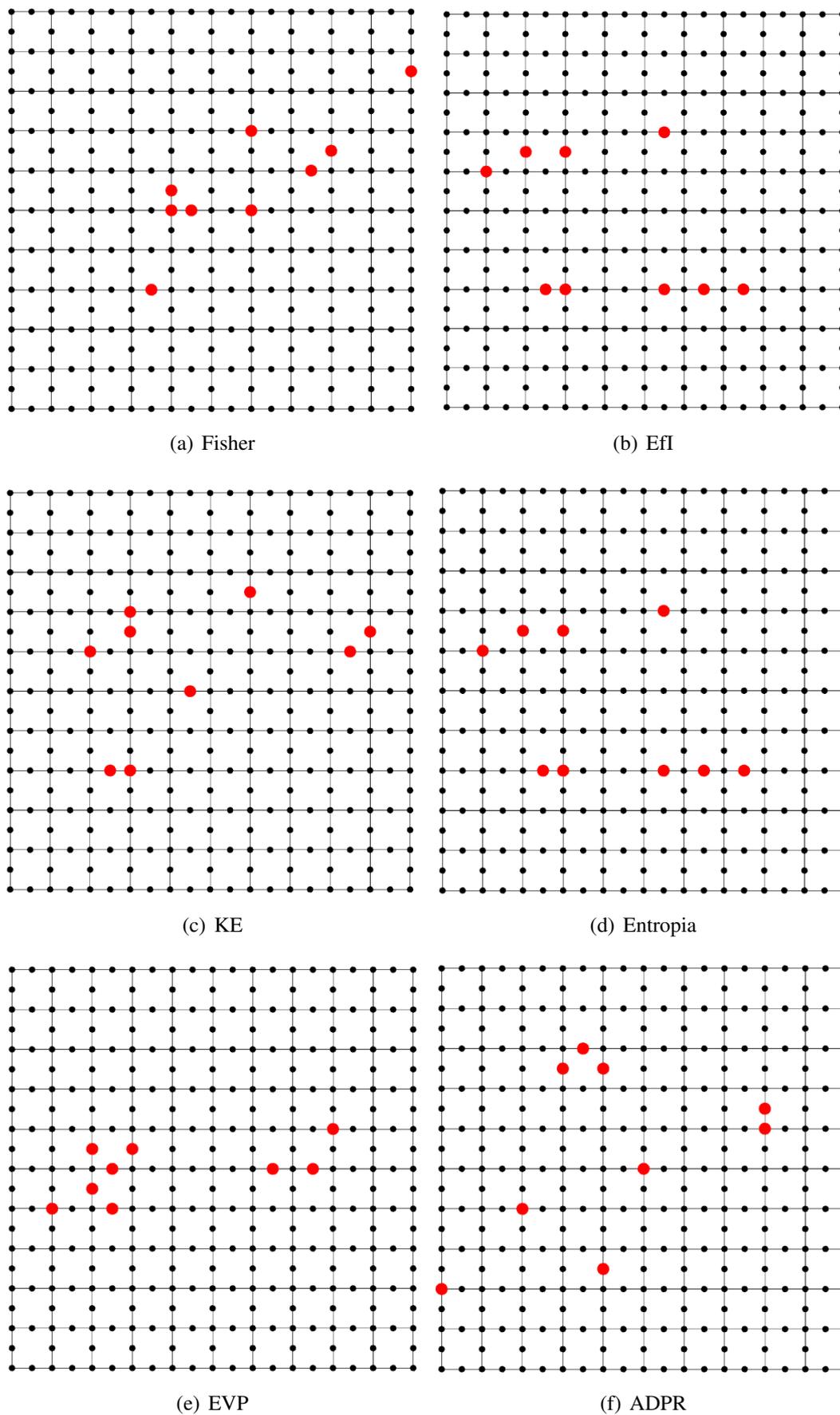




**Figura A.1:** Resultado geral do posicionamento de 4 sensores por meio de diversos métodos.



**Figura A.2:** Resultado geral do posicionamento de 6 sensores por meio de diversos métodos.



**Figura A.3:** Resultado geral do posicionamento de 9 sensores por meio de diversos métodos.

## A.2 Otimização da Interpolação dos Modos

A Tabela A.4 exibe os resultados da interpolação dos modos de vibração considerando 4, 6 e 9 sensores. Destaca-se que para a interpolação dos modos não restringiu-se a a interpolação em si, isto é, apesar de ter conhecimento que os lados da placa não possuem vibração, o algoritmo foi livre em escolher os pontos ótimos para a interpolação. Optou-se então em dar liberdade máxima para a otimização da interpolação com intuito de verificar a capacidade de método em reconstruir a forma modal da placa a partir de um número ótimo e pequeno de sensores.

O resultado da interpolação para cada modo individual exibido na Tabela A.4 mostra que para 4 sensores somente, o resultado foi pobre, ou seja, não foi tão capaz de prever o modo original (obtido numericamente). Para 9 sensores, os modos interpolados já foram eficientes em reconstruir os modos, mas não tão eficientes quanto considerou-se a placa em condições livres FFFF (*Free-Free-Free-Free*).

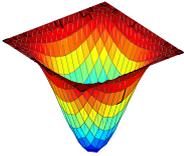
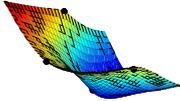
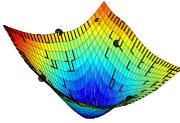
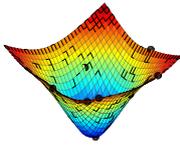
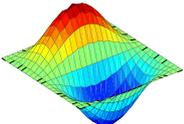
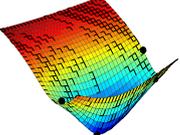
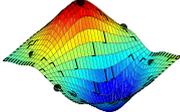
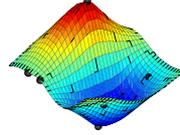
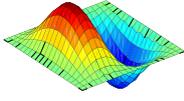
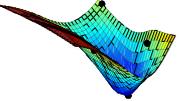
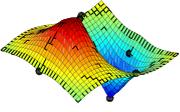
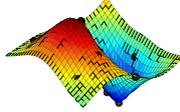
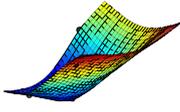
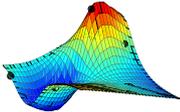
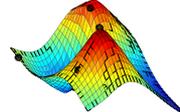
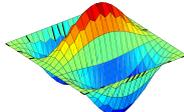
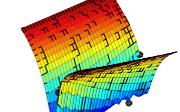
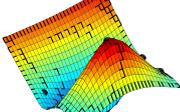
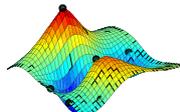
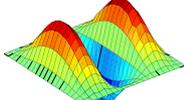
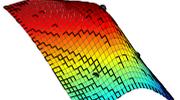
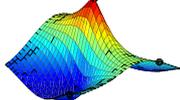
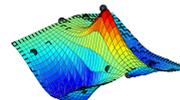
A Figura A.4 exibe o resultado da distribuição ótimas dos sensores para o conjunto de  $n = 6$  modos de vibração. Observa-se que para 4 sensores, a distribuição foi praticamente simétrica. Ao passo que para 6 e 9 sensores a distribuição apresentou leve distorção de simetria, contudo, em geral, apresentou um resultado muito diferente em relação aos critério matriciais de informação discutidos nos tópicos anteriores.

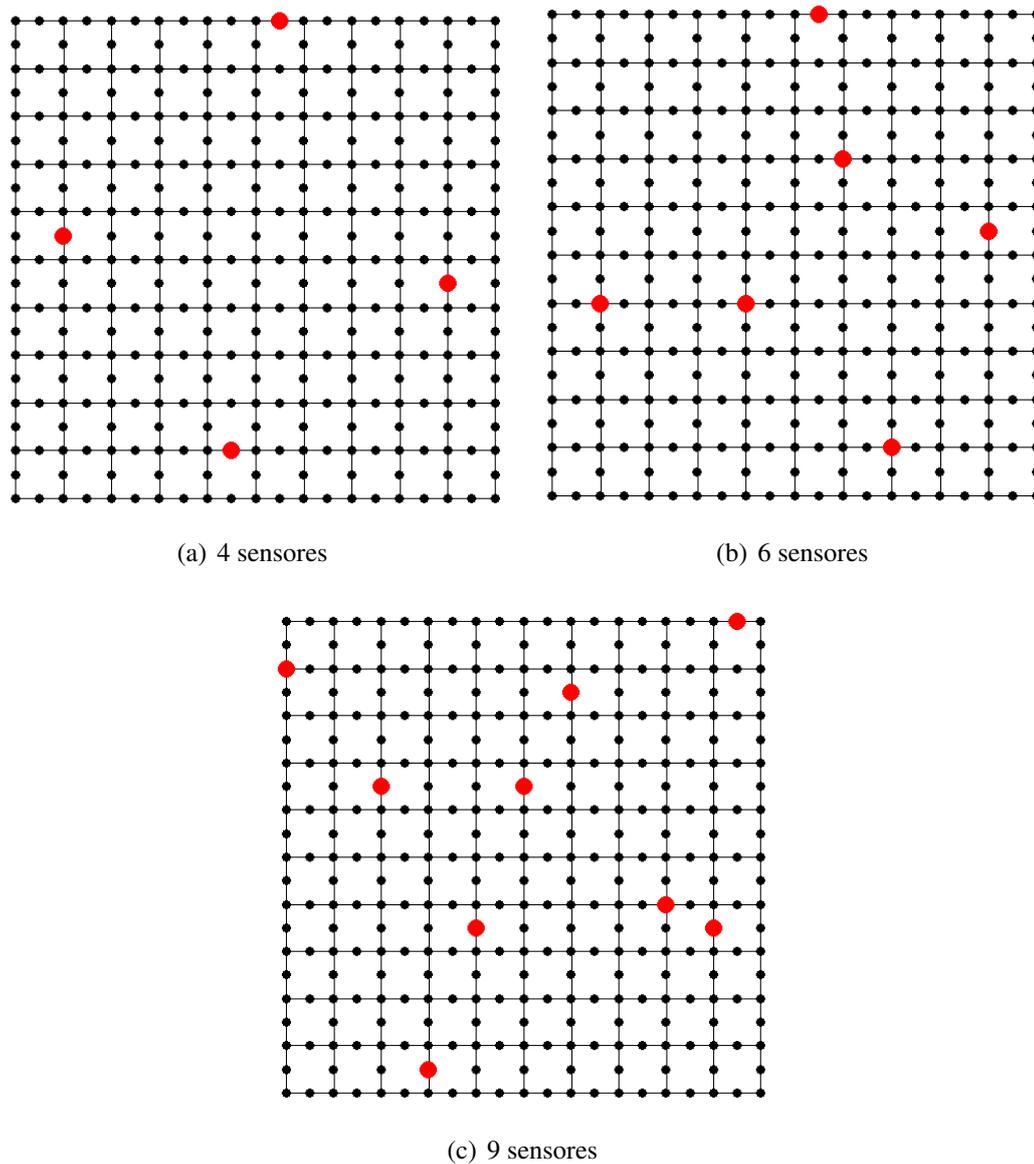
## A.3 Otimização Multiobjetivo

Com o propósito de agregar informação referentes aos critério matriciais e ao critério de interpolação, lança-se mão da otimização de múltiplos objetivos. A Figura A.5 exibe o resultado final da otimização multiobjetivo, considerando como  $f_1$  o critério de Fisher e  $f_2$  o objetivo de interpolação dos modos. Similarmente, 3 pontos (A, B e C) são destacados nas Figuras.

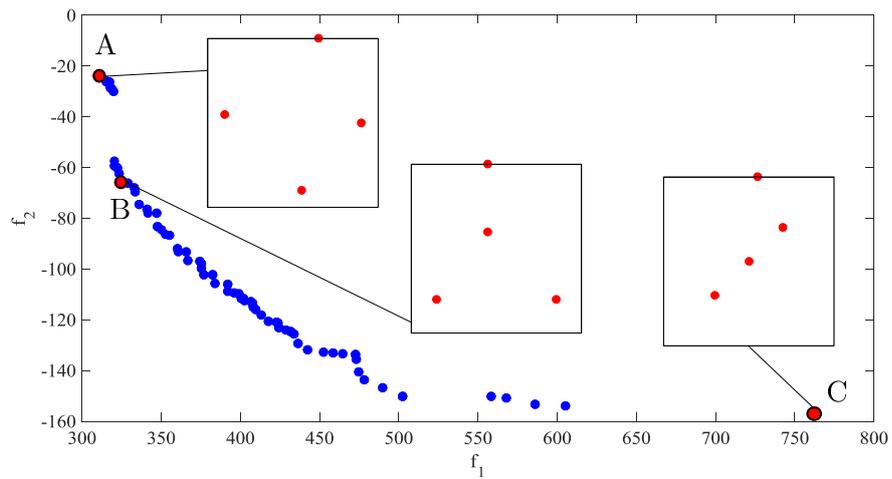
Pode-se verificar que para o Ponto A existe uma certa tendência de simetria da distribuição dos sensores. Levando em consideração os pontos B e C, agrega-se à resposta maior quantidade de informação à respeito dos critério matriciais (no caso, de Fisher). Nesta condição, uma perturbação maior à simetria é detectada.

**Tabela A.4:** Resultado de interpolação dos modos de vibração usando um número reduzido de pontos em localização ótimas para a placa em CCCC.

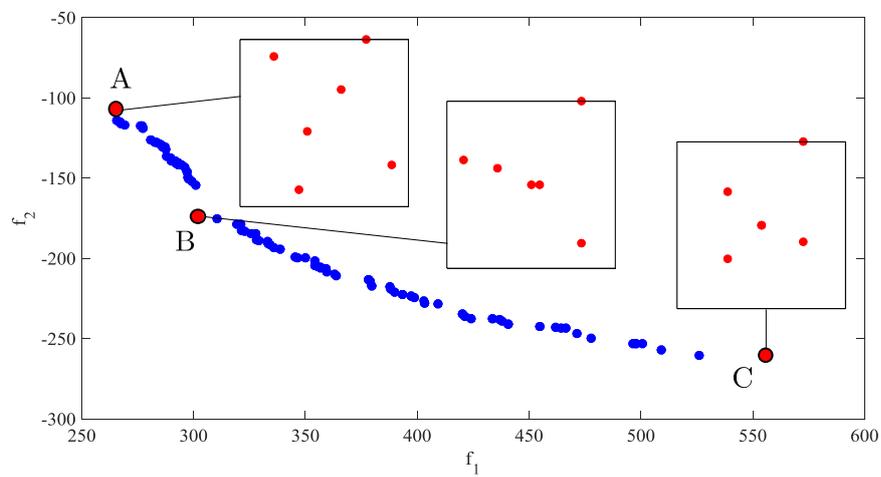
Modo	Original	Interpolado		
		4 sensores	6 sensores	9 sensores
1				
2				
3				
4				
5				
6				



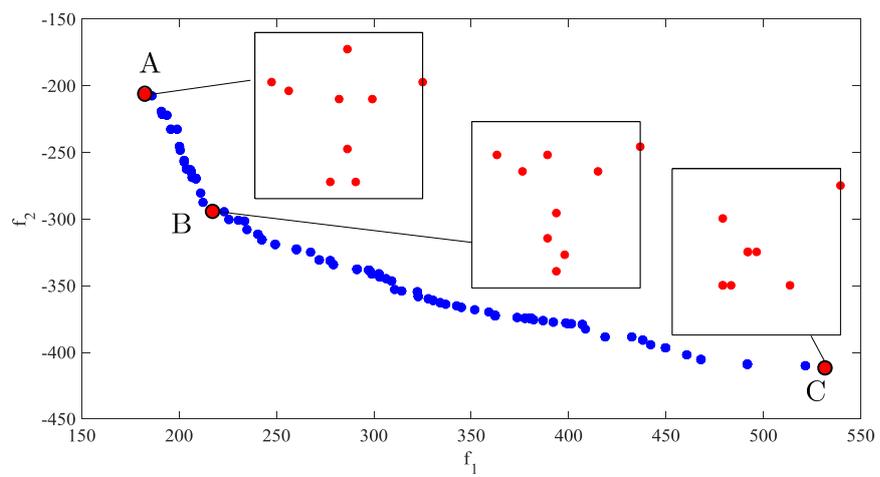
**Figura A.4:** Resultado de interpolação considerando o conjunto dos 6 primeiros modos de vibração para placa em CCCC.



(a) 4 sensores



(b) 6 sensores



(c) 9 sensores

**Figura A.5:** Resultados multiobjetivos exibindo as posições dos sensores e tomada de decisão para a placa em CCCC.

## Anexo B

# Identificação de Danos Considerando Ruídos na Medição

Na prática, ruídos aleatórios captados pelos sensores são inevitáveis. O desempenho da predição de resposta e identificação de dano sem ruído com certeza será melhor do que com ruído.

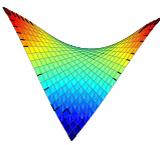
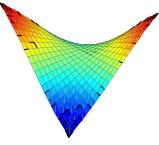
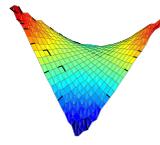
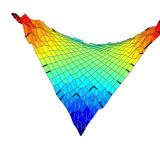
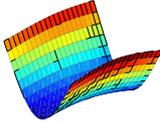
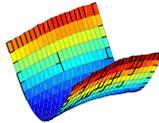
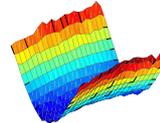
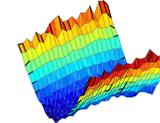
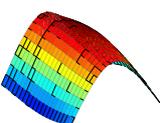
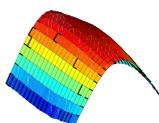
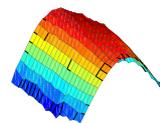
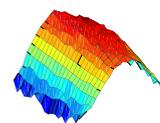
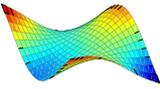
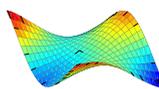
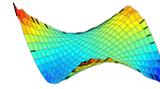
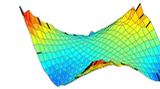
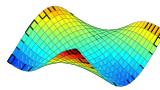
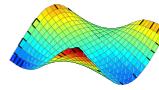
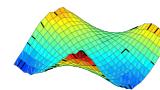
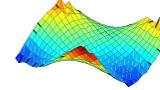
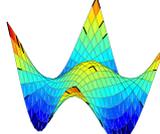
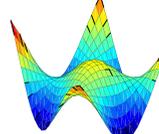
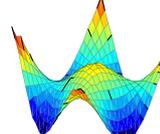
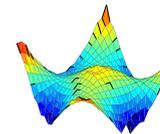
O sistema é testado usando dados simulados contaminados por ruído. O ruído adicional nos dados simula a incerteza presente nas medidas experimentais e no processo de modelagem. No caso das frequências naturais, dado um delta de medição de frequência  $\Delta\omega$ , um número aleatório  $u$  no intervalo  $[-1, 1]$  e um parâmetro de nível de ruído  $\alpha$ , Para os modos de vibração, a inclusão de incertezas é dada pelo delta de medição ruidoso (Ganguli (2001)):

$$\Delta\phi_{ruído} = \Delta\phi(1 + u\alpha) \tag{B.1}$$

sendo o número aleatório gerado por meio de uma distribuição normal de média zero, ou simplesmente conhecido como ruído Gaussiano branco  $N(0, 1)$ . A fim de examinar a sensibilidade do método proposto sobre o ruído neste trabalho, resultados com 1%, 5% e 10% de ruídos são adicionados nas respostas.

A Tabela B.1 exibe o resultado da inserção de incertezas (ruídos) nos modos de vibração considerando os três níveis distintos. Pode-se observar que para valores de ruídos em níveis de 10% o modo é suficientemente modificado.

**Tabela B.1:** Visão geral dos modos de vibração compostos por diferentes níveis de ruído.

Modo	0%	1%	5%	10%
1				
2				
3				
4				
5				
6				

## B.1 Detecção de Danos por meio de Algoritmos Genéticos e Dados Ruidosos

Dados obtidos por meio de qualquer medição são geralmente contaminados por ruídos oriundos de diferentes origens (fatores ambientais, erros humanos, precisão dos dispositivos de medição, sistemática de erros, dentre outros), afetando de maneira direta os dados medidos. Por estas razões acrescentou-se ruídos em três níveis distintos com intuito de se avaliar a robustez da metodologia adotada. Inicialmente acrescentou-se um nível de ruído de 1% nas leituras dos sensores e em seguida aumentou-se para 5% e 10%.

As Tabelas B.2, B.3 e B.2 exibem os resultados do processo de identificação de danos considerando adição de ruído gaussiano branco nos níveis de 1%, 5% e 10%, respectivamente. Pode-se observar por ainda por meio dos resultados gráficos da Tabela B.5 que a o algoritmo foi bem eficiente com ruídos da ordem de 1%, sendo ainda capaz de prever a severidade  $\alpha$  do dano com precisão. Elevando-se os níveis ruidosos para 5% igualmente obtêm-se resultados bem precisos, exceto pelo cenário II onde o dano identificado pelo GA ocorreu no elemento  $N_e = 44$  e o dano real se tratava no elemento  $N_e = 45$ .

Contudo a proximidade dos danos encontrados ainda considera-se muito eficaz. Acerca dos resultados da detecção considerando ruídos elevados, ou seja, na faixa de 10%, os resultados apresentaram ser bem discrepantes, não sendo capaz de identificar a localização do dano com certa performance esperada.

**Tabela B.2:** Resultados da identificação do dano usando GA com 1% de ruído na medição.

	Cenário I		Cenário II		Cenário III	
	$N_e$	$\alpha$	$N_e$	$\alpha$	$N_e$	$\alpha$
Objetivo	19	20%	45	20%	89	20%
Busca 1	19	19.5827	45	23.8690	89	19.9331
Busca 2	19	19.5810	45	20.4178	89	20.1646
Busca 3	19	19.5806	45	20.2461	89	19.9169
Busca 4	19	19.7727	44	42.0884	89	19.8674
Média	19	19.6168	45	26.6553	89	19.9705
Desvio	0	0.0706	0	10.4232	0	0.1324

**Tabela B.3:** Resultados da identificação do dano usando GA com 5% de ruído na medição.

	Cenário I		Cenário II		Cenário III	
	$N_e$	$\alpha$	$N_e$	$\alpha$	$N_e$	$\alpha$
Objetivo	19	20%	45	20%	89	20%
Busca 1	19	14.5100	44	37.4466	46	19.8827
Busca 2	19	14.5090	44	37.4531	56	58.2144
Busca 3	19	44.5961	45	19.0769	64	12.6460
Busca 4	19	16.6624	44	37.4241	64	12.6472
Média	19	22.5694	44	32.8502	57	25.8476
Desvio	0	14.7195	0.5	9.1822	8.5	21.8458

**Tabela B.4:** Resultados da identificação do dano usando GA com 10% de ruído na medição.

	Cenário I		Cenário II		Cenário III	
	$N_e$	$\alpha$	$N_e$	$\alpha$	$N_e$	$\alpha$
Objetivo	19	20%	45	20%	89	20%
Busca 1	77	0.0103	3	9.1749	79	22.5504
Busca 2	46	82.8620	3	9.1732	78	22.5421
Busca 3	46	82.8532	3	15.5857	79	23.6838
Busca 4	77	0.0130	3	9.1749	87	14.4818
Média	62	41.4346	3	10.7772	81	20.8145
Desvio	17.9	47.8311	0	3.2057	4.2	4.2558

**Tabela B.5:** Resultados gerais da detecção de dano considerando ruídos brancos em diferentes níveis.

	Cenário I	Cenário II	Cenário III
Objetivo			
Resultado (1% de ruído)			
Resultado (5% de ruído)			
Resultado (10% de ruído)			

## B.2 Detecção de Danos por meio do Algoritmos SunFlower e Dados Ruidosos

Da mesma maneira que a seção anterior, inseriu-se ruídos em três níveis diferentes na resposta obtida pelos sensores agora considerando a verificação da robustez do algoritmo *SunFlower*.

As Tabelas B.6, B.7 e B.8 mostram os resultados para níveis de 1%, 5% e 10% de ruído, respectivamente. Pode-se observar que semelhantemente ao algoritmo genético, o SFO obteve resultados com elevado desempenho de identificação até em níveis de 5% de ruídos. Em níveis críticos (10% de ruído) o SFO ainda conseguiu identificar com eficiência o dano na posição de elemento 19, sendo discrepante nos elementos 45 e 89. No que se diz respeito à identificação da gravidade do dano ( $\alpha$ ), o algoritmo apresentou certa dificuldade.

Entretanto, em caráter global, pode-se dizer que o algoritmo obteve excelente eficiência mesmo em ambientes ruidosos, sendo capaz da identificação da localização do dano (objetivo principal deste estudo). A Tabela B.9 exhibe os resultados gráficos gerais nos três cenários de danos tratados com os níveis de ruídos inseridos. É grande a vantagem de se obter um método robusto para este caso, pois normalmente dados referentes aos modos de vibração são ruidosos e ainda incompletos, e neste caso obteve-se êxito em ambos quesitos.

**Tabela B.6:** Resultados da identificação do dano usando SFO com 1% de ruído na medição.

	Cenário I		Cenário II		Cenário III	
	$N_e$	$\alpha$	$N_e$	$\alpha$	$N_e$	$\alpha$
Objetivo	19	20%	45	20%	89	20%
Busca 1	19	20.1390	44	41.5069	89	14.1574
Busca 2	19	19.4229	44	42.9630	89	29.8346
Busca 3	19	21.7194	44	41.4415	89	21.8547
Busca 4	19	20.0786	44	42.9601	89	14.1574
Média	19	19.7982	44	42.2189	89	20.0010
Desvio	0	0.4469	0	0.8592	0	7.4929

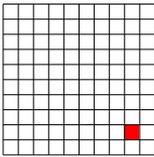
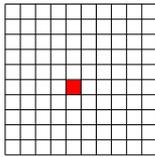
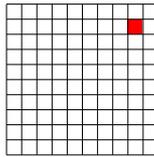
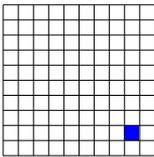
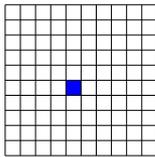
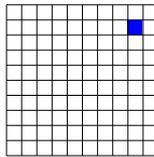
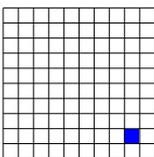
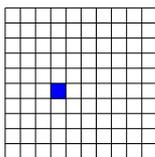
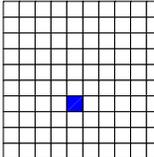
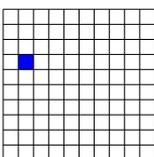
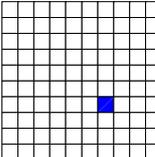
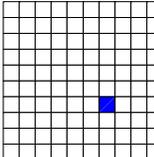
**Tabela B.7:** Resultados da identificação do dano usando SFO com 5% de ruído na medição.

	Cenário I		Cenário II		Cenário III	
	$N_e$	$\alpha$	$N_e$	$\alpha$	$N_e$	$\alpha$
Objetivo	19	20%	45	20%	89	20%
Busca 1	19	19.4229	47	35.6135	47	17.2677
Busca 2	19	20.2786	44	43.0620	22	21.5017
Busca 3	19	20.0787	44	36.0380	36	13.5391
Busca 4	19	19.4125	44	44.7637	36	14.7425
Média	19	19.7982	45	39.8693	35	16.7627
Desvio	0	0.4469	1.5	4.7238	10.2429	3.5207

**Tabela B.8:** Resultados da identificação do dano usando SFO com 10% de ruído na medição.

	Cenário I		Cenário II		Cenário III	
	$N_e$	$\alpha$	$N_e$	$\alpha$	$N_e$	$\alpha$
Objetivo	19	20%	45	20%	89	20%
Busca 1	19	18.5440	37	35.9769	37	18.4592
Busca 2	19	13.8898	37	42.9650	37	21.4974
Busca 3	19	17.6863	37	36.0660	37	22.3825
Busca 4	19	18.5261	37	33.1301	37	19.9263
Média	19	17.1615	37	37.0345	37	20.5664
Desvio	19	2.2176	0	4.1822	0	1.7335

**Tabela B.9:** Resultados gerais da detecção de dano considerando ruídos brancos em diferentes níveis para o algoritmo SFO.

	Cenário I	Cenário II	Cenário III
Objetivo			
Resultado (1% de ruído)			
Resultado (5% de ruído)			
Resultado (10% de ruído)			

## Anexo C

# Eficiência do Algoritmo SunFlower

A eficiência de um algoritmo de otimização é estudada por meio de um conjunto de funções, chamadas de funções de teste. Diversos tipos destas funções, envolvendo diferentes números de variáveis, sendo estas dispostas com múltiplos pontos de mínimos locais são dispostas na literatura. A finalidade de testar determinado algoritmo por meio de funções de teste é mostrar o quão bem o algoritmo funciona comparado com outros algoritmos. Algumas das funções de teste comumente usadas são dadas na Tabela C.1 (Rao e Rao (2009)). Mediu-se então a eficiência do algoritmo proposto por meio de três funções de teste exibidas na Tabela C.1.

Cada uma das funções selecionadas possui propriedades diferentes, que permitem tirar conclusões sobre o desempenho de determinado algoritmo estudado. As funções escolhidas são multimodais e para esta parte de validação, tomou-se como parâmetro do SFO  $N_{flores} = 20$ , taxa de polinização de 60% e número máximo de dias (gerações)  $N = 100$ . Para todas as funções, a população foi gerada na gama dos limites inferiores e superiores de -5 a 5 em todas as dimensões. Como pode ser visto na Tabela C.2, o algoritmo foi capaz de convergir para a região ideal (ótimo global) de forma eficiente com parâmetros ainda não refinados. Por exemplo, a Figura C.1 exibe uma convergência do algoritmo, em caráter iterativo, considerando a função de teste quadrática.

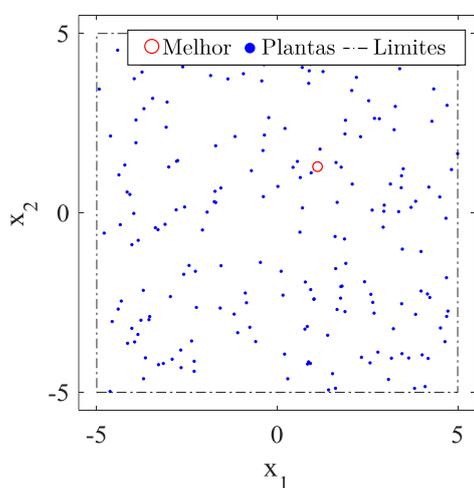
Adicionalmente, por se tratar de um algoritmo inédito, optou-se por um estudo estatístico sobre os operadores biológicos do algoritmo *SunFlower*. Para tal, fez-se uso de arranjo de misturas. Em uma mistura, os fatores independentes são proporções de diferentes componentes, e a otimização da propriedade desejada dependerá das proporções de cada elemento no conjunto

**Tabela C.1:** Funções de teste escolhidas para testar o algoritmo de polinização modificado.

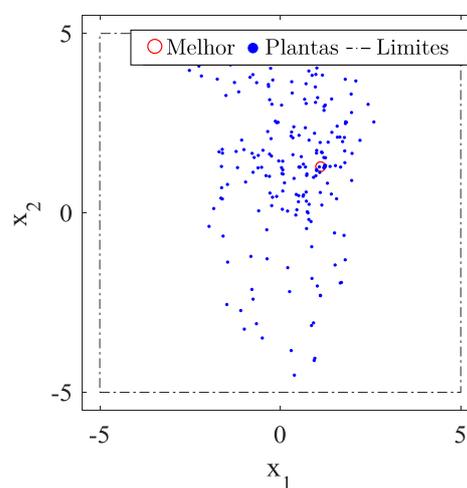
Função	Equação $f(x_1, x_2)$
Rosenbrok	$100(x_2 - x_1^2)^2 + (1 - x_1)^2$
Quadrática	$(x_1 + 2x_2 - 7)^2 + (2x_1 + x_2 - 5)^2$
Beales	$[1.5 - x_1(1 - x_2)]^2 + [2.25 - x_1(1 - x_2^2)]^2$

**Tabela C.2:** Resultados do algoritmo SFO aplicado em funções de teste.

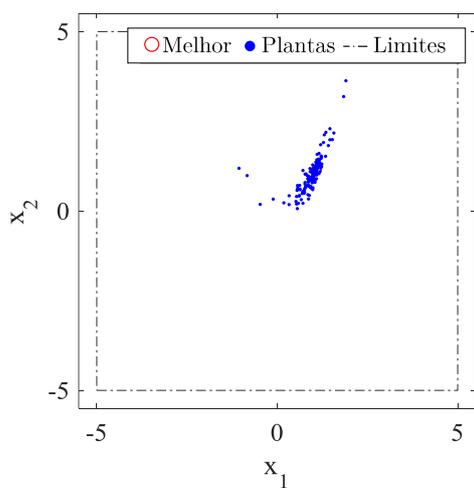
Função	Mínimo Global $X^*$	SFO Mínimo $X_{SFO}^*$
Rosenbrok's	$\begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} 1.000000 \\ 1.000000 \end{Bmatrix}$
Função Quadrática	$\begin{Bmatrix} 1 \\ 3 \end{Bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} 0.999999 \\ 3.000000 \end{Bmatrix}$
Beales's function	$\begin{Bmatrix} 3 \\ 0.5 \end{Bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} 2.999999 \\ 0.499999 \end{Bmatrix}$



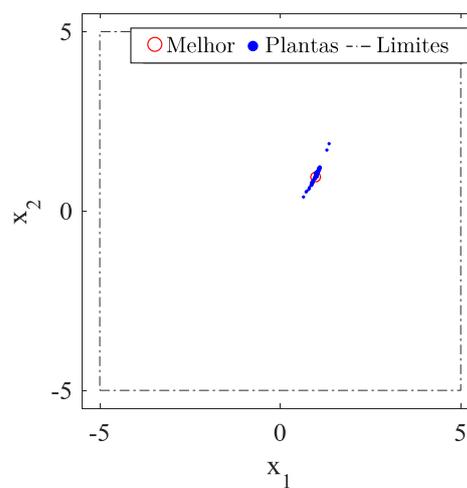
(a) Geração 5.



(b) Geração 10.



(c) Geração 15.



(d) Geração 20.

**Figura C.1:** Convergência na população através dos dias (gerações).

---

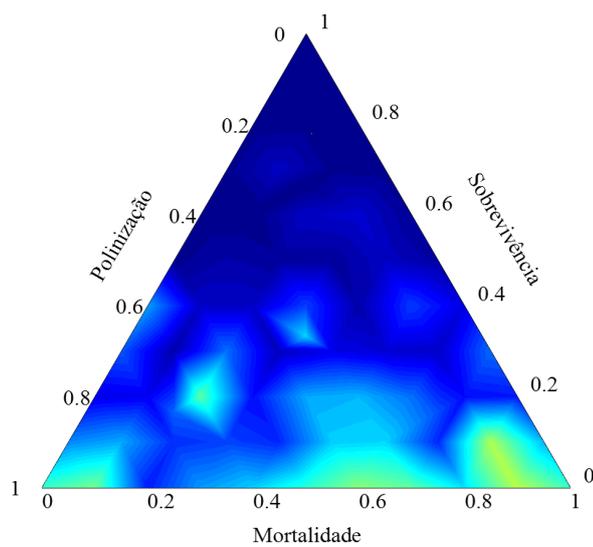
(Montgomery (2017)). Este é um método, portanto, que determinará proporções ótimas dos parâmetros do algoritmo em estudo.

São três os parâmetros principais do algoritmo: *i*) taxa de polinização local, *ii*) taxa de mortalidade e *iii*) taxa de sobrevivência, sendo esta última o principal parâmetro do algoritmo. A taxa de sobrevivência diz respeito ao comportamento aleatório controlado dos indivíduos da população em busca da maior taxa de radiação, isto é, em busca do sol.

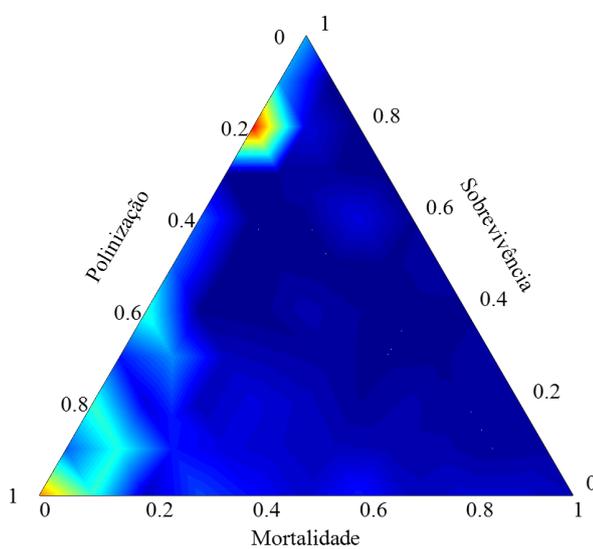
O arranjo foi realizado considerando diferentes combinações dos três parâmetro do algoritmo, totalizando em 140 casos possíveis. Em cada caso avaliado, tomou-se o valor da média de dez otimizações realizados pelo algoritmo nas funções de teste definidas.

A Figura C.2 exibe o resultado final do arranjo de misturas. O arranjo triangular permite que a relação entre os parâmetros (componentes da mistura) dos três elementos sejam visualizados. Em uma mistura, os componentes se restringem mutuamente, uma vez que a sua soma deve ser igual à unidade.

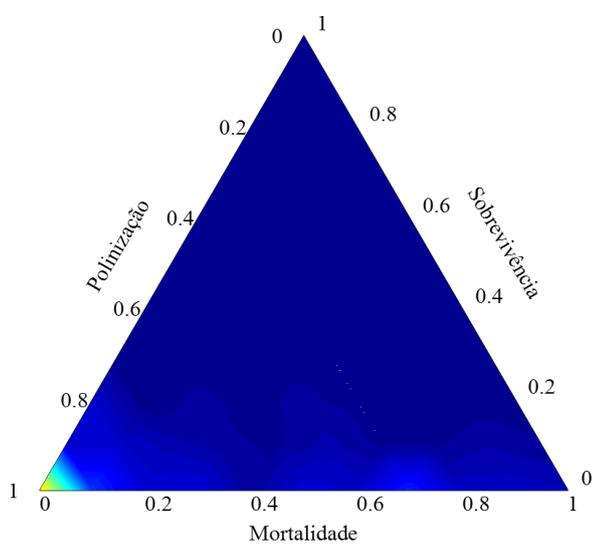
Como resultado final, obteve-se que a melhor combinação dos parâmetros, sendo a configuração ótima do algoritmo obtida ao considerar taxas de polinização de até 10%, mortalidade de 5 a 10% e sobrevivência de 80% a 90%. O fato pertinente à este resultado é que o parâmetro de maior significância do *SunFlower* é a taxa de sobrevivência. O resultado do arranjo de misturas constatou que este parâmetro tem a maior contribuição e significância no processo de otimização.



(a) Rosenbrok



(b) Quadrática



(c) Beale

**Figura C.2:** Resultado do arranjo de mistura para diferentes funções de teste.