

Thiago Carreta Moro

**Monitoramento da Integridade Estrutural de um
edifício de dois andares utilizando Sistemas
Imunológicos Artificial**

Brasil

Dezembro de 2022

Thiago Carreta Moro

Monitoramento da Integridade Estrutural de um edifício de dois andares utilizando Sistemas Imunológicos Artificial

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" – UNESP, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Brasil
Dezembro de 2022

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

Moro, Thiago Carreta.
M867m Monitoramento da integridade estrutural de um edifício de dois andares
utilizando sistemas imunológicos artificial / Thiago Carreta Moro. -- Ilha
Solteira: [s.n.], 2022
92 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) -
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2022

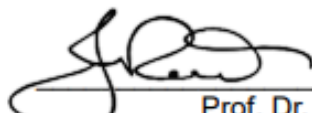
Orientador: Adriano Souza
Coorientador: Fabio Roberto Chavarette
Inclui bibliografia

1. Engenharia estrutural. 2. Monitoramento de integridade estrutural. 3.
Inteligência artificial.

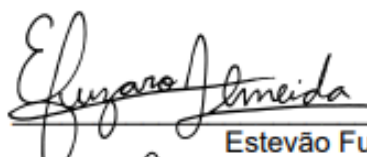
Thiago Carreta Moro

Monitoramento da Integridade Estrutural de um edifício de dois andares utilizando Sistemas Imunológicos Artificial

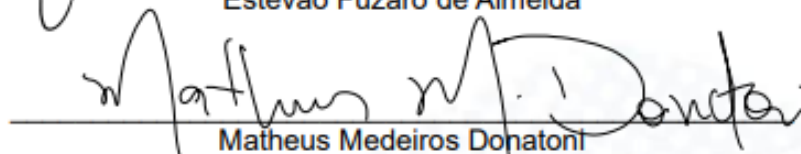
Trabalho aprovado. Brasil, 13 de dezembro de 2022:

 **Fabio Roberto Chavarette:15473115845**
Assinado de forma digital por Fabio Roberto Chavarette:15473115845
Dados: 2022.12.20 10:18:09 -03'00'

Prof. Dr. Fábio Roberto Chavarette
Presidente (Co-Orientador)

 **Estevão Fuzaro de Almeida**
Assinado de forma digital por Estevão Fuzaro de Almeida
Dados: 2022.12.20 10:27:57 -03'00'

Estevão Fuzaro de Almeida

 **Matheus Medeiros Donatoni**

Matheus Medeiros Donatoni

 **Thiago Carreta Moro**
2022.12.20 11:37:11 -03'00'

Thiago Carreta Moro
Aluno

Brasil
Dezembro de 2022

Resumo

Os grandes edifícios e arranha céus apresentam vulnerabilidade as solicitações ambientais, temporais e antropológicas gerando desgastes que podem levar a esse imponente social e econômico ao colapso. Com os avanços tecnológicos exige sistemas de monitoramento para proteger o ramo estrutural e assim sanar essa vulnerabilidade estrutural. Assim, o Sistema de Integridade Estrutural é a medida exata da proteção dos imponentes edifícios garantindo não só o desenvolvimento econômico, mas também a segurança da sociedade. Por isso, este trabalho de pesquisa apresenta a proposta inovadora do Sistema de Monitoramento de Integridade Estrutural voltado para os edifícios, tendo por base e diferencial um processamento baseado em inteligência artificial para a análise e monitoramento da integridade estrutural. A metodologia será aplicada aos dados experimentais obtidos do modelo de *shear building* que representa esses imponentes arranha-céus. A partir da aquisição e processamento dos sinais obtidos será elaborado e aplicado o algoritmo de seleção negativa (sistemas imunes artificiais) no processo de tomada de decisão para realizar a identificação, localização e quantificação de possíveis danos estruturais. Observando os resultados, este trabalho provou ser eficiente, robusto e economicamente viável, tendo um alto desempenho e representando a medida perfeita no monitoramento dos grandes edifícios e arranha céus.

Palavras-chave: Engenharia Estrutural, Sistema de integridade Estrutural, Inteligência Artificial

Lista de ilustrações

Figura 1 – Exemplificação da função comprometida em sistemas estruturais	15
Figura 2 – Curva da banheira Típica	23
Figura 3 – Processo do SHM	28
Figura 4 – Analogia entre o corpo humano e uma estrutura	29
Figura 5 – Organização do SHM	30
Figura 6 – Diagnóstico passivo e Diagnóstico ativo	32
Figura 7 – Ponte do Rio Mianus	34
Figura 8 – Ponte do Rio Injaka	34
Figura 9 – Sensor MFC	37
Figura 10 – Exemplo de Análise de sinais na aceleração	38
Figura 11 – Gráfico típico de resposta de frequência	40
Figura 12 – Diagrama de Nyquist	41
Figura 13 – Exemplo Órbitas	43
Figura 14 – Componentes Celulares	46
Figura 15 – Componentes Intracelulares	48
Figura 16 – Processo de fagocitose	49
Figura 17 – Órgãos que compõem o SIB	50
Figura 18 – Processos realizados pelo plasmócito	54
Figura 19 – Receptor de antígeno da célula B	55
Figura 20 – Receptor de antígeno da célula T	56
Figura 21 – Etapas de Funcionamento de SIB	57
Figura 22 – Diagrama de bloco da Fase de Censuriamento	62
Figura 23 – Diagrama de bloco da Fase de Monitoramento	63
Figura 24 – Modelo do edifício	67
Figura 25 – Componentes utilizados do modelo do edifício	68
Figura 26 – Montagem experimental	69
Figura 27 – Excitação sísmica	71
Figura 28 – Diagrama do algoritmo de Seleção negativa	75
Figura 29 – Transformada da Amplitude	77
Figura 30 – Transformada da Aceleração sem falha	78
Figura 31 – Transformada da Aceleração com falha	78
Figura 32 – Comparação entre as transformações	79
Figura 33 – Taxa de acerto para cada iteração	81
Figura 34 – Tempo de processamento para cada iteração	81
Figura 35 – Taxa de acerto para cada iteração	82
Figura 36 – Tempo de processamento para cada iteração	83

Figura 37 – Taxa de acerto para quatro sinais normais por interação	84
Figura 38 – Tempo de processamento para cada interação	84
Figura 39 – Taxa de acerto para três sinais normais por interação	85
Figura 40 – Tempo de processamento para cada interação	85
Figura 41 – Taxa de acerto para dois sinais normais por interação	86
Figura 42 – Tempo de processamento para cada interação	86
Figura 43 – Taxa de acerto para um sinal normal por interação	87
Figura 44 – Tempo de processamento para cada interação	87
Figura 45 – Comparação entre os tempos de alocação	89
Figura 46 – Comparação entre as porcentagens de acerto	90

Lista de tabelas

Tabela 1 – Modos de Falhas Estruturais	18
Tabela 2 – Principais parâmetros associados ao sistema estruturais	69
Tabela 3 – Massa acionadas em cada andar	72
Tabela 4 – Número de Falhas implementados na análise	82

Sumário

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Objetivos	12
1.1.1	Objetivo Principal	12
1.1.2	Objetivos Secundários	12
2	CONCEITO DE FALHA	14
2.1	Introdução	14
2.2	Classificação	15
2.2.1	Classificação pelos Aspectos	15
2.2.1.1	Extensão	15
2.2.1.2	Criticidade	16
2.2.1.3	Velocidade	16
2.2.1.4	Expressão	16
2.2.1.5	Idade	16
2.2.1.6	Origem	16
2.2.2	Classificação por MMC	16
2.3	Modos de falha	17
2.3.1	Modo de falhas estruturais	17
2.3.2	Mecanismo de falhas	18
2.3.2.1	Modelagem estocástica	18
2.3.2.2	Confiabilidade	19
2.3.2.3	Taxa de falha	19
2.4	Classificação de mecanismos de falha	19
2.4.1	Desgaste progressivo	20
2.4.2	Falha intemperista	21
2.4.3	Desgaste por fadiga	21
2.4.4	Mortalidade infantil	22
2.5	Curva da banheira	22
2.6	Métodos de Manutenção	23
2.6.1	Manutenção Corretiva	24
2.6.2	Manutenção Preventiva	24
2.6.3	Manutenção Preditiva	25
3	MONITORAMENTO DA SAÚDE ESTRUTURAL	26
3.1	Introdução	26
3.2	Processo e implementação de um SHM	27

3.2.1	Composição Básica	29
3.2.2	Níveis de SHM	30
3.3	Diagnóstico e Prognóstico	32
3.4	Motivação para o SHM	33
3.5	Técnicas abordadas	35
4	MONITORAMENTO DA SAÚDE ESTRUTURAL VIBRACIONAL .	36
4.1	Introdução	36
4.2	Captação	36
4.3	Análise vibracional	37
4.3.1	Analísadores de espectro	38
4.3.2	Análise de sinais aleatórios	39
4.3.3	Determinação de parâmetros modais pelo diagrama de Nyquist	41
4.4	Técnicas de monitoramento da vibração	42
4.4.1	Monitoramento no domínio da frequência	42
4.4.1.1	<i>Formas de onda de tempo</i>	42
4.4.1.2	<i>Órbitas</i>	42
4.4.2	Métodos estatísticos	43
4.4.2.1	Curva de densidade de probabilidade	43
4.4.2.2	Momentos	43
4.4.3	Monitoramento do domínio de Frequência	44
5	SISTEMA IMUNOLÓGICO BIOLÓGICO	45
5.1	Introdução	45
5.2	Componentes do Sistema Imunológico Biológico	46
5.2.1	Componentes Extracelulares	47
5.2.2	Componentes Intramolecular	47
5.2.3	Componentes de produção	50
5.3	Resposta Imune	51
5.3.1	Inata	52
5.3.2	Adaptativa	52
5.4	Reconhecimento de Padrão	54
5.5	Funcionamento	56
6	SISTEMA IMUNOLÓGICO ARTIFICIAL	59
6.1	Conceito Geral	59
6.2	Principais Vertentes	60
6.2.1	Medula Óssea	60
6.2.2	Algoritmo Clonal G	61
6.2.3	Algoritmo das Redes Imunológicas	61

6.3	Algoritmo de Seleção Negativa	62
6.3.1	Censoriamento	62
6.3.2	Monitoramento	63
6.3.3	Critério de casamento e afinidade	64
7	METODOLOGIA	66
7.1	Modelo Estrutural	66
7.2	Metodologia Experimental	70
7.2.1	Funcionamento do modelo estrutural	70
7.2.2	Metodologia usada	70
7.3	Processamento de dados e Tomada de decisão	73
7.3.1	Discretização do ANS	74
7.3.2	Processamento dos sinais	76
8	RESULTADOS E DISCUSSÕES	77
8.1	Resultado do Processamento Sequenciado	80
8.2	Resultado do Processamento Randômico Não Próprio	81
8.3	Resultado do Processamento Randômico Próprio	83
8.4	Discussão	88
8.4.1	Tempo de processamento	88
8.4.2	Relação do Não Próprio	89
8.4.3	Relação do Próprio	89
9	CONCLUSÃO	91
	REFERÊNCIAS	92

1 Introdução

O desenvolvimento estrutural, determinante na consolidação civil, não esta passível do desgaste desenvolvido por fatores temporais, por fatores ambientais e por fatores humanos e logo tal determinante encontra-se vulnerável a falhas.

Todavia, tomando por exemplo as obras de arte (Pontes , Hidrelétricas e Arranha Céus) a ocorrência de falhas não representa somente um prejuízo econômico contingente, mas a perda de vidas humanas, caracterizará tal fenômeno como um acidente catastrófico.

Com isso a sociedade, conforme GOPALAKRISHNNAN, RUZZENE e HANAGUD (2011) aponta, dispõem de três ações que contrastam o preço e a influência da estrutura com a medida para lidar com as falhas estruturais:

Ação 1 : Aguardar até que a estrutura se quebre e elimine-a (preço de etiqueta baixo em relação ao custo de reparação, baixa criticidade)

Ação 2 : Aguardar até que a estrutura se quebre e repara-la (preço de etiqueta alto em relação ao custo de reparo, baixa criticidade)

Ação 3 : Examinar em intervalos periódicos e determinar se é necessária ou não uma ação corretiva, criticamente.

Contudo, estruturas com um alto grau de solicitação e a exigência de um diminuto grau de instabilidade (conforme os exemplos), restringem a sociedade à terceira ação que, segundo GOPALAKRISHNNAN, RUZZENE e HANAGUD (2011), provou-se ser extremamente cara e com um alto grau de incerteza. A base dessa ideia é a negligência na constatação da falha, que contrapõem o tempo de inatividade estrutural e, principalmente, a inércia do erro humano.

Neste cenário que surge o Sistema de Monitoramento da Integridade Estrutural (referenciado do inglês como SHM - *Structure Health Monitoring*) que, de maneira eficiente, confiável e robusta, detecta danos iniciais a estrutura e assim abre a possibilidade de interação e resolução de tal dano, garantindo o cessamento de falhas estruturais e, conseqüentemente, de acidentes catastróficos.

Para isso o sistema concisamente é caracterizado por um monitoramento baseado na captação de parâmetros estruturais, análise e processamento destes parâmetros e a tomada de decisão por meio do diagnostico da estrutura.

Dentro das características do SHM, uma das principais etapas é o processamento dos parâmetros captados e por conseguinte, o diagnostico. Todavia, para esse processamento

ser eficiente e confiável é exigido um reconhecimento de padrões que consiga abranger a gama de dados oriundo do monitoramento.

Através dessa dificuldade encontrada no desenvolvimento do SHM, o caminho que dentro da literatura científica, apresentou-se mais eficiente foi a implementação da Inteligencia Artificial (IA).

A inteligencia artificial advém do trabalho de diversos pesquisadores especializados em ciência da computação, que se inspiraram nos fatores da natureza para propor novos métodos de resolução de problemas.

Entre os fenômenos naturais observados pelos pesquisadores computacionais, os mecanismos de defesas biológicos são os que mais se destacam apresentando inúmeras implementações, ferramentas e algoritmos. Deles que surge o método para a solução e otimização para o processamento dos parâmetros captados. Essa subdivisão da computação inteligente é denominada por Sistema Imunológico Artificial que teve inspiração no Sistema Imunológico Biológico

Neste contexto, este trabalho apresenta a proposta inovadora para o desenvolvimento de SHMs com processamento e tomada de decisão através da inteligencia artificial do Sistema Imunológico Artificial aplicado em um modelo de shear building de prédio com dois andares. A partir da aquisição e processamento dos sinais, aplica-se a inteligencia artificial para identificar e caracterizar as falhas, através da dinâmica estrutural.

Visualizando, a importância estrutural e os imensuráveis riscos e perdas oriundos de sua falha, a necessidade do monitoramento de integridade estrutural é inquestionável e inovador quando associado a inteligencia artificial. O SHM é considerado por muitos o futuro, que associa os conceitos tecnológicos em prol da economia e, principalmente, em prol da sociedade.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Principal

Este trabalho tem por objetivo principal a implementação de um sistema de integridade estrutural com processamento baseado na inteligencia artificial - sistema imunológico artificial- para realizar a identificação e caracterização das falhas estruturais em um de edifício de dois andares.

1.1.2 Objetivos Secundários

Para consolidação do objetivo principal, qualificou-se como objetivos secundários:

-
- Embasamento teórico a respeito do prognóstico falhas
 - Definir um modelo de Sistema de Integridade Estrutural com monitoramento, captação, processamento e tomada de decisão
 - Implementar A inteligência artificial na base do processamento de dados com foco na tomada de decisão

2 Conceito de Falha

2.1 Introdução

Sistema ou conjunto global é um complexo de elementos, materiais ou ideais, entre os quais se possa encontrar uma relação. O objetivo de um sistema é garantir para o usuário a ação indicada, ou programada a ele com uma performance específica, definida como função.

Entretanto, qualquer sistema posto a ação, desenvolve desgastes oriundos de fatores ambientais, temporais ou humanos. Esta deterioração diminui a resistência do equipamento e, diante do esforço exigido desse conjunto global, ocasiona a falha do sistema.

Falha é um fenômeno que apresenta reflexo direto na função do sistema, consistindo na interrupção ou alteração de um item, ou componente, de desempenhar a função requerida ou esperada, tendo reflexo no sistema total. Segundo XENOS (1998), uma falha ocorre sempre que os esforços ultrapassarem a resistência do material.

A falha é um fenômeno indesejado em qualquer sistema apresentando consequências significantes, definida como a violação da :

- Segurança de pessoal
- Qualidade do meio ambiente
- Operação do processo
- Economia do processo

Por ser um fenômeno com alta periculosidade, a identificação da falha é a etapa primordial para garantir a segurança do sistema. Tal etapa é caracterizada pela observação da função do sistema, visto que se a falha age diretamente na função do componente global, este apresentará variações, conforme a Figura 1 que exemplifica funções comprometidas no sistema estrutural.

Figura 1 – Exemplificação da função comprometida em sistemas estruturais



Fonte: CHAVES (2016)

A identificação da falha, possibilita instaurar a manutenção desta. Entretanto, isso é impossível se não compreender todo o conceito de falha. O intuito desse capítulo é entender o universo da falha. Assim, é indiscutível a necessidade de conceituar a classificação de falhas, modos de falhas e os mecanismos de falha. Compreendendo tais aspectos principais, abre-se espaço para instaurar/definir os métodos de manutenção possíveis para um sistema.

2.2 Classificação

Baseando-se em SIQUEIRA (2005), as falhas apresentam dois tipos de classificação: uma definida sobre seus Aspectos (Extensão, Criticidade, Idade, Expressão, Velocidade e Origem), e outra oriunda da Manutenção Centrada na Confiabilidade (MMC).

2.2.1 Classificação pelos Aspectos

2.2.1.1 Extensão

De acordo com sua extensão, as falhas se subdividem em *parciais* e *completas*. As parciais referem-se a um desvio de alguma característica funcional do item, além dos limites especificados, porém sem perder a funcionalidade total. Já a falha completa, provoca a perda total da função requerida do item.

2.2.1.2 Criticidade

Observando a criticidade, pode-se definir que *falhas críticas* apresentam uma condição perigosa ou insegura para quem usa, mantém ou depende do item, ou tem potencial para danos materiais ou ambientais. Nessa logica, as *falhas não críticas* não produzem/apresentam fatores de insegurança tão elevados.

2.2.1.3 Velocidade

Determinado pela velocidade , a classificação é realizada de acordo com a rapidez da falha. Se esta ocorrer de forma perceptível ou previsível, considera-se como *falhas graduais*. Entretanto, se a falha ocorrer de forma inesperada e imprevista, ela é tida como uma *falha repentina*.

2.2.1.4 Expressão

A expressão da falha pode ser *Degradativa*: quando ocorre um simultaneidade de um falha parcial e gradual que pode vir a ser completa no decorrer temporal; *Catastrófica*: quando ocorre ao mesmo tempo falhas repentinas e completas; ou por fim , *Intermitentes*: definidas por fases cíclicas de falha e recuperação que persistem por tempo ilimitado.

2.2.1.5 Idade

Observando o tempo de ação do sistema, pode haver a classificação da falha segundo a idade do sistema. Assim, *falhas prematuras* são definidas pela ocorrência de falha durante o período inicial do sistema e pode ser associadas a erros grosseiros de fabricação. As *falhas aleatórias* são falhas imprevisíveis durante toda a vida útil do sistema. Por fim, as *falhas progressivas* são falhas que ocorreram após a vida útil do sistema como resultado do desgaste, deterioração e envelhecimento do item.

2.2.1.6 Origem

Falhas podem ter *origem primaria*, quando decorrem de deficiências próprias de um componente, dentro dos limites normais de operação. As falhas de *origem secundaria* , se derivam de operações fora dos limites normais, como exemplo a sobrecarga, descargas atmosféricas etc. E falhas de *controle* se sucedem de ordens errôneas do operador ou usuário

2.2.2 Classificação por MMC

Dentro das características de MMC, de acordo com SIQUEIRA (2005), define-se apenas duas classificações, que advém do efeito que a falha pode ocasionar no sistema. Assim, definindo-as:

- **Falha Funcional** - definida pela incapacidade de um item desempenhar sua função específica dentro de limites desejados de performance.
- **Falhas Potenciais** - Definida como uma condição identificável e mensurável, que indica uma falha funcional pendente ou em processo de ocorrência.

2.3 Modos de falha

Segundo SIQUEIRA (2005), o modo de falha é definido como um evento ou uma condição física que gera uma falha funcional, ou visto como o estado de falha de um item em uma função requerida. Ou seja, o modo de falha está associado ao evento ou fenômeno físico que causa a transição de um estado normal para um estado anormal do sistema ou componente. Assim, o estudo e modelagem dos mecanismos de falha específicos, constituem as ferramentas básicas nesse tópico

2.3.1 Modo de falhas estruturais

O modo de falha apresenta exemplificações estruturais, mecânicas, elétricas e humanas. Entretanto, por um fator do projeto, o modo de falha estrutural apresenta total vínculo e por isso foi destacado. Segundo a norma IEC 60300-3-11, os modos de falhas de elementos estruturais, especialmente edificações podem ser definidos segundo :

- **Dano Acidental** - caracterizado pela ocorrência de eventos discretos aleatórios que possam reduzir o nível inerente de resistência residual;
- **Deterioração Ambiental** - definida pela deterioração estrutural oriundo de um ambiente adverso
- **Dano por Fadiga** - caracterizado pelo início e propagação de fraturas devido ao carregamento cíclico da estrutura.

Assim, através da tabela 4, pode-se visualizar a associação dos modos de falha com seus respectivos exemplos.

Tabela 1 – Modos de Falhas Estruturais

Modo de falha	Tipo de falha	Causa da falha
Dano acidental	Manutenção	Erro na execução da manutenção
	Erosão	Incidente de chuva e vento
	Abrasão	Ocorrência de chuva de granizo
	Elétrico	Incidência de raio
Deterioração Ambiental	Corrosão	Ação (eletro)química do ambiente
	Deterioração	Própria de materiais não-metálicos
Dano por fadiga	Mecânica	Erro na execução da manutenção
	Térmica	Incidente de chuva e vento
	Irradiação	Ocorrência de chuva de granizo

Fonte: (SIQUEIRA, 2005)

2.3.2 Mecanismo de falhas

O mecanismo de falha tem por objetivo a classificação dos tipos de comportamento anômalos de materiais e equipamentos e assim identificar as atividades profiláticas e corretivas que melhor se adéqua, de acordo com (SIQUEIRA, 2005). Para isso, o mecanismo de falha se apossa do conceito de taxa de falhas, oriunda da modelagem estocástica dos fenômenos envolvidos antes, durante e depois das ocorrências.

2.3.2.1 Modelagem estocástica

Um processo estocástico é uma variável que se comporta, durante o tempo, de uma maneira onde pelo menos parte é considerada aleatória. Neste caso, a variável aleatória diz respeito a falha de um componente ou do sistema. Sendo assim, o estudo matemático estocástico, inicia-se na modelagem da variação temporal da probabilidade de falha funcional do item, por unidade de tempo. Isto seguindo SIQUEIRA (2005), é representado por uma função de distribuição de probabilidade dada por:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (2.1)$$

Sendo que $f(t)$ é a função densidade de probabilidade de falha, e $F(t)$ é a distribuição de probabilidade acumulada de falhas, em um determinado instante, ou entre dois instantes de tempo t_1 e t_1 , tal que :

$$F(t) = \int_{-\infty}^t f(t)dt \quad (2.2)$$

$$F(t_2) - F(t_1) = \int_{t_1}^{t_2} f(t)dt \quad (2.3)$$

2.3.2.2 Confiabilidade

Conforme o dicionário Aurélio, confiabilidade é a capacidade de um instrumento não variar em seus resultados, sendo utilizado por diferentes operadores. Dentro do conceito de falha, confiabilidade é a probabilidade de que um certo item sobreviva, sendo definida por :

$$R(t) = \int_t^\infty f(t)dt = 1 - \int_{-\infty}^t f(t)dt = 1 - F(t) \quad (2.4)$$

A confiabilidade $R(t)$, a densidade de probabilidade de falha $f(t)$ e a probabilidade acumulada de falha $F(t)$, de acordo com SIQUEIRA (2005), se inter-relacionam pela função de taxa de falha do item.

2.3.2.3 Taxa de falha

A taxa de falha refere-se a probabilidade condicional da ocorrência de falha em um intervalo dt . A função de taxa de falha é representada matematicamente pela expressão:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{d \log R(t)}{dt} \quad (2.5)$$

Esta função também é conhecida por Função de Risco, sendo que por ela, é possível classificar os diferentes mecanismos de falha definido na próxima seção.

2.4 Classificação de mecanismos de falha

O mecanismo de falha objetiva a identificação das características diferenciais entre as diversas formas como as falhas ocorrem, ajudando a escolher a melhor estratégia de manutenção. Três comportamentos básicos dos equipamentos são identificados ao longo da vida útil com relação a taxa de falhas: (SIQUEIRA, 2005)

1. Alguns itens mostram uma idade bem definida de desgaste, onde ocorre um aumento rápido na probabilidade condicional de falha, por unidade de tempo
2. Outros itens podem mostrar um crescimento constante da probabilidade condicional de falhas, por unidade de tempo.

3. Outros itens podem não apresentar qualquer degradação funcional ao longo da vida útil

Esses comportamentos tem por causa quatro mecanismos típicos, derivados do modo de falhas e encontrados em qualquer sistema. São eles:

- Desgaste Progressivo
- Falha Intempestiva
- Desgaste por fadiga
- Mortalidade infantil

O estudo de cada um desses mecanismos, esta associado a curva de densidade de probabilidade, curva de probabilidade acumulada de falha e a curva de sobrevivência .

A curva de de densidade de probabilidade, é oriunda da função utilizada para representar a distribuição de probabilidade (expressa na Equação e59) definindo a forma da curva e a probabilidade de ocorrência de cada valor da variável aleatória contínua, que nesse caso é o limite especificado ao sistema ou componente analisado.

A curva de probabilidade acumulada, é definida pela função de distribuição acumulada (expressa na Equação e60) e demonstra como as probabilidades são associadas aos valores ou aos intervalos de valores de uma variável aleatória.

A curva de sobrevivência, corresponde à probabilidade que um determinado sistema de atingir uma certa função. Trata-se de uma representação gráfica da probabilidade de sobrevivência desse sistema ao longo de um período de tempo e apresenta relação com a vida útil desse sistema.

2.4.1 Desgaste progressivo

O desgaste progressivo é caracterizado pela diminuição gradativa da capacidade funcional ou resistente à falha, ao longo da vida útil. Essa diminuição, com o decorrer do tempo, provoca um limite de desempenho funcional, caracterizado como falha.

Nota-se, nesse componente, que ha pequenas variações da taxa de desgaste da capacidade fundamental gerando uma curva de densidade de probabilidade de falha, em forma de sino, no ponto de cruzamento com a linha de funcionalidade, quando ocorre a falha. O ponto de inicio da curva é denominado vida útil do item, sendo o valor médio obtido da curva, correspondente a sua vida media. Usualmente, tal curva é representada

por uma distribuição normal, na qual a vida média é a mediana e o desvio padrão expressa a taxa de desgaste do sistema.

Integrando a curva de densidade de probabilidade de falha, desde o início da vida útil, obtêm-se a curva de probabilidade acumulada de falha. Esta, mantém-se reduzida e constante na maior parte da vida útil do sistema, apresentando um crescimento gradual a partir do ponto limite da vida útil. Em consequência, a taxa de falha apresentará um crescimento acentuado, a partir do final da vida útil.

Por fim, a curva de sobrevivência, expressa pela fração de itens que sobrevivem ao longo do tempo, mostra uma região plana próxima à população inicial, quando a quantidade de itens sobreviventes permanece estável, decrescendo gradualmente após o término da vida útil.

2.4.2 Falha intemperista

O mecanismo de falha intemperista é caracterizado pela perda brusca e total da capacidade funcional ou resistência à falha, ao longo da vida útil. Como não há variação nas taxas de desgaste, a frequência de distribuição das falhas mantém-se, aproximadamente, constante ao longo do ciclo operacional, supondo que haja correção das falhas após cada ocorrência.

Assim, a curva de probabilidade de falha, toma a forma exponencial negativa, com taxa de decréscimo, constante, com o ponto de máximo no instante inicial. Com relação a curva de probabilidade acumulada de falha, obtida pela integração da exponencial de densidade de falha, também apresenta um comportamento exponencial de forma crescente. Sua inversa, expressa a curva de sobrevivência, em forma exponencial negativa.

Por fim a probabilidade condicional de falha, será uma reta horizontal com a taxa de falha constante ao longo de todo o ciclo operacional.

2.4.3 Desgaste por fadiga

O desgaste por fadiga é caracterizado pela diminuição gradativa do número de ciclos necessários para a falha, em função da amplitude dos ciclos.

O declive da curva de desgaste cíclico, gera uma distribuição de densidade de probabilidade de falha deslocada para a esquerda. Esta característica resulta em uma curva de sobrevivência decrescente e em uma curva de probabilidade condicional de falha crescente.

A distribuição de Weibull pode ser utilizada para modelar o desgaste por fadiga, afinal apresenta uma grande variedade de formas, todas com uma propriedade básica: a sua função de taxa de falha é monótona, isto é, ela é estritamente crescente, estritamente decrescente ou constante. Ela descreve adequadamente a vida de mancais, componentes eletrônicos, cerâmicas, capacitores e dielétricos.

2.4.4 Mortalidade infantil

A Mortalidade infantil caracteriza-se pela perda brusca da capacidade funcional no início da vida do item. Sua ação, demonstra defeitos incipientes, introduzidos antes do período operacional. Isso é oriundo, segundo (SIQUEIRA, 2005), por erros em vários processos como:

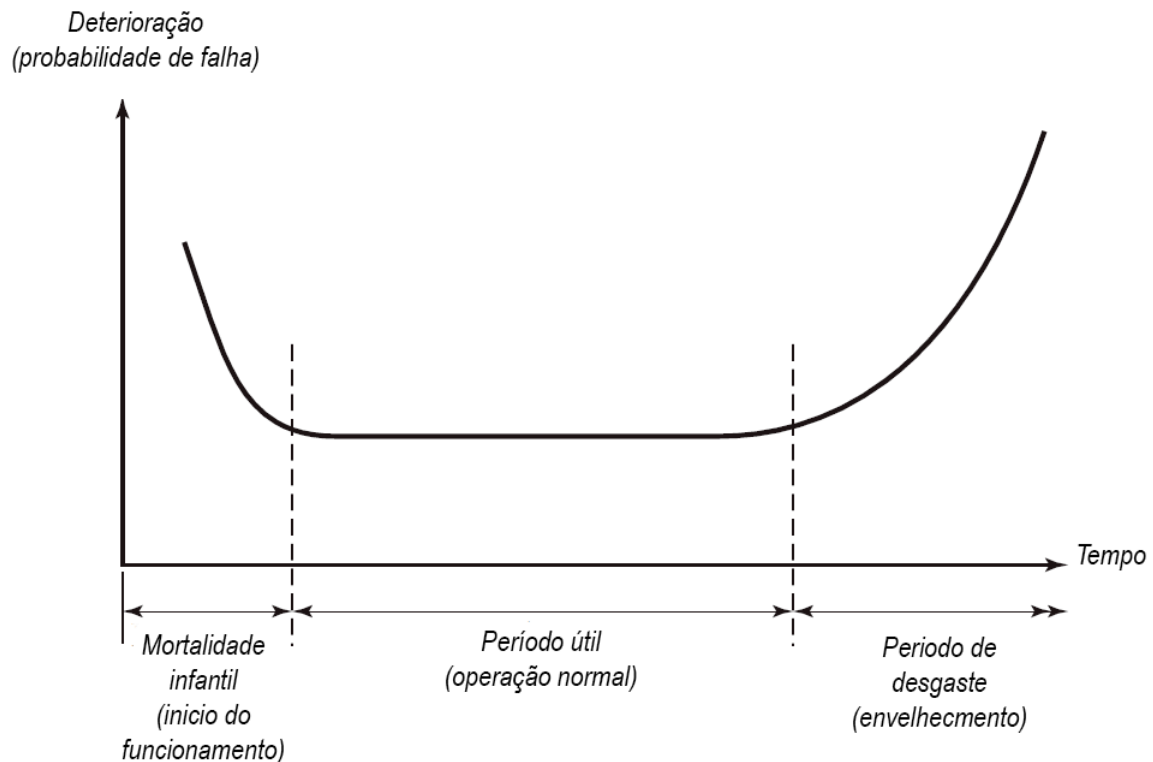
- Especificação de projeto
- Inspeção e controle de qualidade
- Fabricação, estoque e transporte
- Fornecimento de peças e materiais de insumo
- Montagem e integração
- Comissionamento e ativação

Assim, a distribuição de densidade de probabilidade de falha, apresenta uma acentuação no início da vida útil, resultando em uma curva de probabilidade condicional de falha decrescente, também acentuada a partir do início da vida operacional, estatizando-se após o período de mortalidade infantil.

2.5 Curva da banheira

A curva da banheira é uma curva que expressa a probabilidade condicional de falhas, estabelecida para sistemas complexos (composto de muitos componentes). A curva de probabilidade condicional de falhas, será a combinação dos mecanismos de falha, ponderados pela participação de cada item, e sua influência temporal, conforme expresso na Figura 2.(SIQUEIRA, 2005)

Figura 2 – Curva da banheira Típica



Fonte: RAO (2009).

Três regiões são expressa pela curva e, de acordo com SIQUEIRA (2005), definidas como:

1. A parte inicial, que determina probabilidade condicional de falha decrescente, correspondente à contribuição dos componentes do sistema com um mecanismo de falha por mortalidade infantil. Por isso, tal período é denominado também por *Mortalidade Infantil*.
2. A parte central ou *Período Útil*, apresenta uma probabilidade condicional de falha constante, decorrente da contribuição dos componentes com mecanismos de falhas aleatórias.
3. A parte final ou *Período de Desgaste*, apresenta uma propriedade condicional de falha crescente, no final da vida útil, resultante do envelhecimento dos componentes com o mecanismo de falha sujeito a desgaste ou fadiga.

2.6 Métodos de Manutenção

Manutenção é definido, segundo XENOS (1998), o ato necessário para a conservação ou permanência de alguma coisa, ou de uma situação, ou como cuidado técnico indispensável ao funcionamento regular e permanente de equipamentos. Ou seja, significa fazer tudo que for preciso para assegurar que um equipamento continue a desempenhar as funções para as quais foi projetado, em um nível exigido.

Com a evolução técnica, atualmente o conceito de manutenção evoluiu e deixou de ser somente o método de inercia material, conforme se observa nos seus métodos abaixo.

2.6.1 Manutenção Corretiva

A manutenção corretiva é utilizada após a falha ocorrer. É a forma mais básica e seu uso demonstra que dentro do conceito econômico, é mais barato consertar uma falha do que tomar medidas preventivas. O único problema do uso desse método é a inatividade do equipamento, que é extenso.

Além disso, destaca-se, de acordo com XENOS (1998), outros fatores que determinam o uso de tal método:

- A insistência de ações preventivas que evitam a falha do equipamento
- Ações, tecnicamente, inviáveis economicamente que previnam a falha desse componente
- Ocorrência de falhas imprevisíveis
- A possibilidade de paradas abruptas no equipamento para a manutenção
- Recursos necessários em grande quantidade para realizar a manutenção rapidamente: peças de reposição, mão-de-obra e ferramentas.

2.6.2 Manutenção Preventiva

A manutenção preventiva é realizada, de forma periódica, antes que o sistema ou equipamento entre em falha. Se comparada com a Manutenção Corretiva, esta é mais cara pois, exige que equipamentos sejam trocados e componentes sejam reformados antes de atingirem seu limite de vida. Em compensação, o tempo de inatividade e o número de falhas diminuem consideravelmente.

Sua realização envolve medidas sistemáticas, definidas por XENOS (1998), como a inspeção: definido pela análise, periódica e macroscópica, de todos os componentes que formam o sistema geral; e a reforma e troca de peças: ao localizar componentes com

potenciais para falha este é analisado, se possível utiliza-se medidas corretivas e retorna tal componente para o sistema geral , ou substitui essa subparte do sistema geral.

2.6.3 Manutenção Preditiva

Tida como a modalidade mais cara com maior retorno e rentabilidade, a manutenção preditiva permite otimizar a troca ou reforma das peças e estender o intervalo de manutenção, pois viabiliza quando a peça ou componente estão próximos do seu limite de vida.

Tal método é oriundo do avanço tecnológico e indicado, principalmente, para sistemas que não podem ter falhas potenciais. Tem-se por exemplo o ramo estrutural em um prédio: é impossível parar a função estrutural de um prédio, visto que se isso ocorrer o sistema entra em colapso. Neste caso, a manutenção age como um fator de segurança, pois, garante um sistema sem falhas.

3 Monitoramento da Saúde Estrutural

3.1 Introdução

O Monitoramento da Saúde Estrutural, referenciado por SHM (oriundo do inglês, *Structural Health Monitoring*), é descrito na obra CHAPUIS e SJERVE (2017), como um método de implementação de estratégias, na identificação de falhas estruturais, abrangendo a Engenharia Civil, Mecânica e Aeroespacial.

Observando sua atuação, vê-se que tal método pode ser considerado uma manutenção preditiva, afinal, como definido por BALAGEAS, FRITZEN e GÜEMES (2010), GOPALAKRISHNNAN, RUZZENE e HANAGUD (2011) e CHAPUIS e SJERVE (2017), o SHM tem por objetivo a avaliação do estado da estrutura (um *diagnóstico*) e a previsão da vida remanescente desta (um *prognóstico*).

O processo de monitoramento, segundo SANTOS e OTHERS (2014), resume-se na gravação de dados de forma permanente, contínua, periódica ou periódica contínua, de parâmetros que refletem no desempenho estrutural. Para isso, deve-se levar em questão os fatores ambientais, a constituição material, os esforços esperados e os fenômenos de degradação que circunscrevem tal estrutura e assim definir o monitoramento para parâmetros mecânicos, físicos e/ou químicos.

Com a supervisão dos parâmetros analisados, é possível estabelecer relações entre dados sem defeito e dados com defeito e, através de métodos estatísticos, definir a situação da estrutura em um intervalo de tempo. Assim, o monitoramento apresenta dois aspectos: a medição da magnitude do parâmetro monitorado e registro do tempo e do valor da medição

Este monitoramento pode ser desenvolvido em um nível material (vigas, pilares, lajes, cabos, etc) ou em um nível estrutural (pontes, barragens, prédios, etc), de forma não destrutiva (NDE), a curto prazo (geralmente até alguns dias), a médio prazo (alguns dias até algumas semanas), a longo prazo (alguns meses até alguns anos), ou durante a vida útil da estrutura. Isso é tido como um fator de grande inovação e oriundo do avanço tecnológico, como aponta BALAGEAS, FRITZEN e GÜEMES (2010). Conforme expresso em CHAVES (2016), o sistema de SHM é definido por alguns princípios básicos fundamentais, dentre eles :

1. Falhas e defeitos estão presentes em todo tipo de material
2. É necessário a comparação entre dois estados estruturais para avaliação de um determinado dano
3. A identificação da existência e a da localização de um dano pode ser oriundo de um aprendizado não supervisionado, todavia para identificação do tipo de dano e seu grau é necessário um aprendizado supervisionado
4. É necessário a coleta de dados e seu processamento para conversão do mesmo em dados relevantes e sem ruídos
5. Por meio de mudanças na dinâmica do sistema é possível dimensionar o dano sendo este inversamente proporcional a faixa de frequência de excitação

3.2 Processo e implementação de um SHM

O processo, definido na Figura 3, de implementação do SHM, restringe-se a quatro partes:

- I. Observação da estrutura ao longo do tempo através de medições periódicas
- II. Extração de características sensíveis ao dano por meio das medições realizadas
- III. Transmissão e análise destas características para que se possa determinar o estado atual da estrutura analisada
- IV. Implementação de técnicas de SHM.

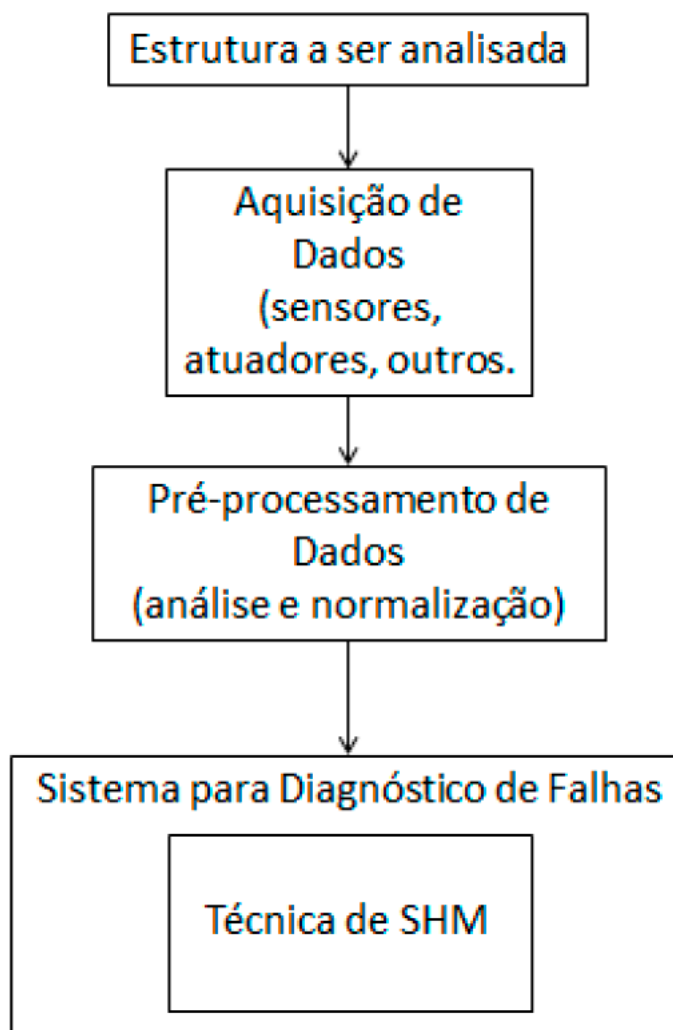
Na primeira parte ocorre a captação dos dados ou sinais da estrutura analisada. Nesta fase, pode haver a integração de sensores, tipos de malhas, etc. Entretanto, é necessário o cuidado com o intervalo de tempo que os dados serão gravados e a forma em que eles serão coletados.

Já na segunda fase, é preciso refinar os dados que foram coletados com ruídos. Para isso utiliza-se, segundo CHAVES (2016), filtros a fim de reduzir os ruídos e técnicas de normalização, para beneficiar a interpretação dos dados, caracterizando tal etapa como de suma importância para o êxito do processo de SHM.

Após o pós-processamento, há terceira fase, que consiste na transmissão das características para o sub sistema e a análise desse dado. Em um sistema concentrado na detecção de falha, ele analisará a constituição de falhas ou não, e a resposta constituirá o diagnóstico estrutural.

Por fim, são empregadas técnicas de SHM, que podem ser sistemas inteligentes, algoritmos genéticos ou outras técnicas NDEs. Tal técnica constituirá a saída final do sistema.

Figura 3 – Processo do SHM



Fonte: SANTOS e OTHERS (2014)

Através dessa sistemática, muitos autores assimilam o processo de SHM com o corpo humano: primeiramente o individuo identifica que esta com uma patologia localizando a dor, seguidamente, vai ao medico onde com exames, diagnostica a patologia e por fim, o medico indica o processo de cura para o individuo. Tal relação é demonstrada na Figura 4, na qual identifica-se, o mau funcionamento estrutural necessitando de uma inspeção. Com esta inspeção, é possível definir um diagnostico sobre a estrutura e assim encaminhar o reparo.

Figura 4 – Analogia entre o corpo humano e uma estrutura



Fonte: (SANTOS et al., 2014)

3.2.1 Composição Básica

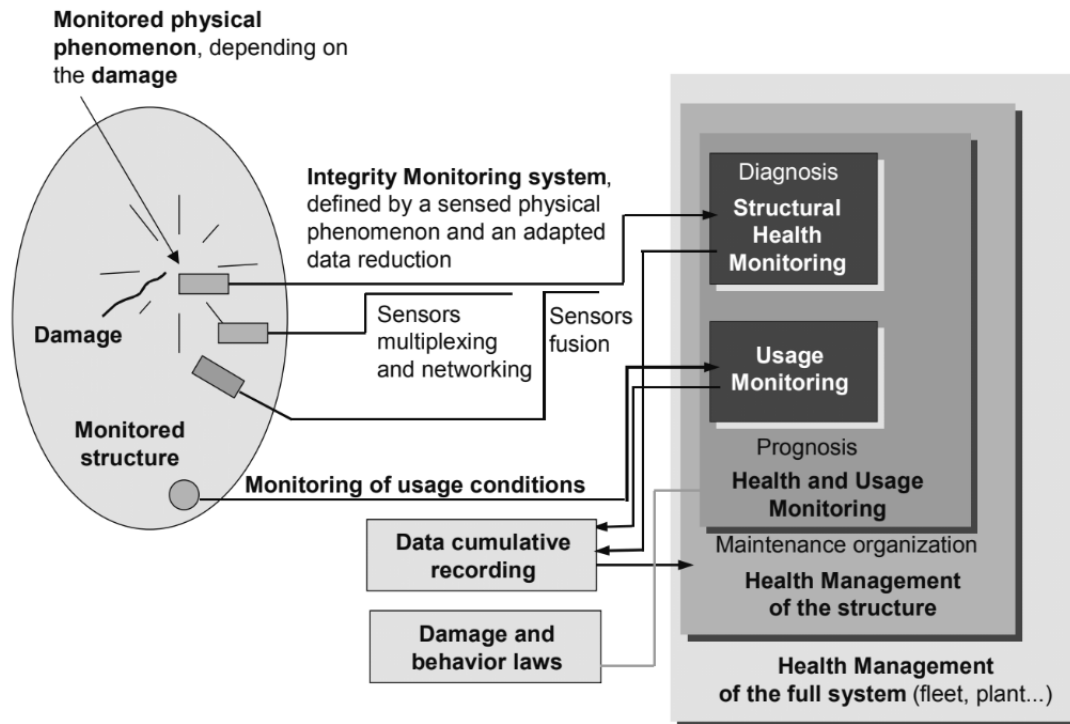
A base que compõem o desenvolvimento de SHM pode ser definido principalmente por:

- Estrutura avaliada
- Sensores
- Aquisição de dados
- Processamento
- Modelagem e algoritmos de detecção de danos
- Transferência e armazenamento de dados
- Manipulação de dados e gestão

De um forma simplista, dentro da composição típica do SHM, segundo BALAGEAS, FRITZEN e GÜEMES (2010), sensores, que constituem um sistema de integridade estrutural, adjuntos ou não da estrutura, são os responsáveis pela captação e emissão dos dados da integridade estrutural para o sub sistema. Esses dados, geralmente enviados como um sinal elétrico, em associação com os dados prévios registrados, são usados pelo controlador para criar um diagnostico da estrutura analisada. E a partir de tal diagnostico, associando as informações do sub sistema de integridade estrutural, com a memoria baseada em mecanismos de danos e leis de comportamento, gera o prognostico e a gestão da saúde do

sistema estrutural (previsão de falha, organização de manutenção, operação de reparos entre outros), conforme é representado na Figura 5.

Figura 5 – Organização do SHM



Fonte : BALAGEAS, FRITZEN e GÜEMES (2010)

Por esse motivo, conforme expresso BALAGEAS, FRITZEN e GÜEMES (2010), CHAPUIS e SJERVE (2017) e GOPALAKRISHNNAN, RUZZENE e HANAGUD (2011), o monitoramento da saúde estrutural é um método multidisciplinar que exige o conhecimento na tecnologia de sensores, materiais inteligentes, aspectos de modelagem e tecnologia de computação.

3.2.2 Níveis de SHM

O nível SHM refere-se a uma subpartição da sua execução, relacionado ao grau de dificuldade de sua implementação, seja pela complexa modelagem ou seja pelo grau elevado de processamento de dados. Assim, de acordo com GOPALAKRISHNNAN, RUZZENE e HANAGUD (2011), pode-se sintetizar em cinco níveis a informação estrutural gerada pelo SHM :

Nível 1: Detecção do dano

Nível 2: Localização e orientação do dano

Nível 3: Avaliação da gravidade do dano

Nível 4: Controle do dano

Nível 5: Determinação da vida remanescente da estrutura

O Nível 1, do SHM, pode ser alcançado através do monitoramento de certas propriedades da estrutura ao longo do tempo. Propriedades como energia de tensão, frequência natural fundamental, informação de fase, redução de rigidez são alguns dos parâmetros, que podem fornecer respostas em relação à presença de dano.

O Nível 2 SHM, apresenta um maior grau de dificuldade que o nível 1 SHM, afinal, a partir da entrada conhecida e da saída medida, é necessário determinar a localização da falha e possivelmente a sua extensão e orientação. Uma maneira simples de executar essa ação, segundo GOPALAKRISHNAN, RUZZENE e HANAGUD (2011), é disparar um sinal experimentalmente com conteúdo de alta frequência e medir a saída em algum local. A saída terá uma reflexão de onda adicional da falha. Sabendo a velocidade do meio e o tempo de chegada do pulso refletido, podemos localizar a localização da falha. Porém, em muitos casos, devido ao número de reflexões de contorno, não é possível identificar claramente as reflexões, coibindo a precisão para a localização da falha devido aos ruídos experimentais .

Depois que o dano é previsto no estágio de Nível 2, é necessário determinar a gravidade do dano no Nível 3 de SHM. Entretanto, para isso é necessário a identificação da estrutura monitorada, pois, tomando como exemplo, se o dano é uma rachadura então precisa-se estimar o Fator de Intensidade de Estresse (SIF) ou a taxa da liberação de Energia de Tensão (SERR) da trinca. Se o SIF ou SERR atingir seus valores limite, o crack começará a crescer. Tendo o dimensionamento de falha estrutural, para avaliar a severidade da fissura, é necessário correlacionar os históricos de tensão com os parâmetros de trinca como SIF ou SERR .

O nível 5 está intimamente associado ao Nível 4 do SHM , em que a estimativa dos parâmetros de fratura são usados para realizar a análise de fadiga e assim determinar a vida útil remanescente da estrutura. Esses dois últimos níveis exigem um forte processamento do banco de dados e de correlações estatísticas aplicada aos novos dados coletados, para seu desenvolvimento. Todavia, intrínseco ao Nível 4, se o dano localizado for bastante severo (SIF maior que o limite SIF), medidas imediatas devem ser tomadas para impedir a falha estrutural.

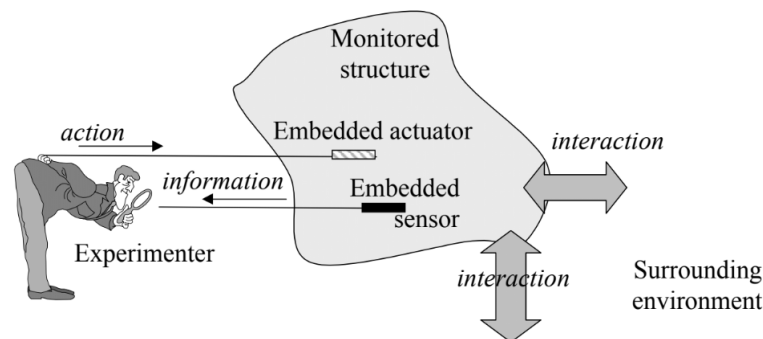
3.3 Diagnóstico e Prognóstico

Dentro da concepção do Monitoramento , o **Diagnóstico** é o primeiro fator informado sobre o sistema estrutural. Assim, a cada momento, durante a vida da estrutura, é apresentado o estado dos materiais que a constituem, possibilitando, sob o banco de dados, a determinação e localização de falhas iniciais. Contudo, segundo GOPALAKRISHNNAN, RUZZENE e HANAGUD (2011), o procedimento de diagnostico é dividido em *Diagnóstico Passível* e *Diagnóstico Ativo*, exibidos na Figura ??.

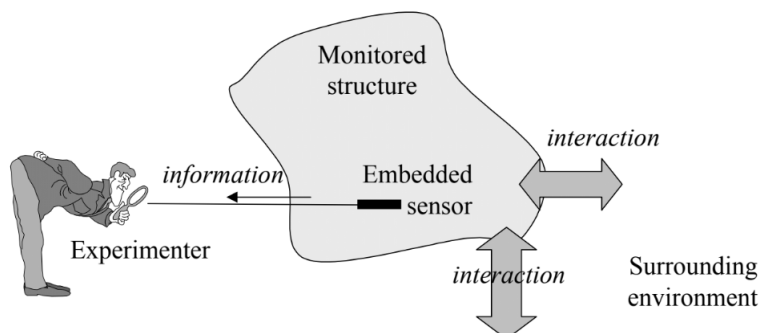
O Diagnóstico Passível é determinado pelo uso de sensores passivos ou seja que não interferem na estrutura, aferindo o sistema estrutural sem a mediação de vibração, de acústica entre outros. Com isso, define-se o Monitoramento da Saúde Estrutural como passivo.

Já o Diagnóstico Ativo, é implementado pelo uso de sensores que excitam o sistema estrutural utilizando atuadores acústicos , térmicos , etc. Assim constituem um Monitoramento da Saúde estrutural Ativa.

Figura 6 – Diagnóstico passivo e Diagnóstico ativo



a) Diagnóstico passível constituinte de um SHM Passivo



b) Diagnóstico Ativo constituinte de um SHM Ativo

Fonte : BALAGEAS, FRITZEN e GÜEMES (2010)

Após o desenvolvimento do diagnóstico, o **Prognóstico** envolverá o cálculo da severidade da trinca em termos de parâmetros mecânicos da fratura e sua vida residual. Para isso, fatores estatísticos referente a falha (curva de densidade de falha, probabilidade acumulada de falha confiabilidade e curva de sobrevivência) e o desenvolvimento do banco de dados, desenvolveram a gestão estrutural que possibilitara a organização de manutenção e operações de reparos mais eficiente.

3.4 Motivação para o SHM

A implementação do Monitoramento da Saúde Estrutural, apresentou-se muito vantajoso nos setores tecnológicos, econômicos e, principalmente, social afinal, de acordo com BALAGEAS, FRITZEN e GÜEMES (2010), tal sistema :

- Permite a otimização estrutural pois, permite a diminuição do tempo de inatividade e a prevenção de falhas catastróficas
- Permite ao construtor a possibilidade de melhoria dos materiais que constituem o sistema estrutural
- Permite uma chance drástica para serviços de manutenção pois, há substituição do agendamento periódico de inspeção, pela manutenção baseada no desempenho estrutural, a curto ou longo prazo. Isso, reduz o desmontar de peças sem defeito, o tempo de inatividade e, principalmente o erro humano.
- A melhoria da segurança, prevenindo acidentes estruturais recíprocos a Figura 7, colapso da ponte do rio Mianus, e a Figura ??, ruptura da ponte Injaka. Ambos acidentes ocasionados pelo envelhecimento estrutural. Conforme o levantamento estatístico, expresso em WANG, SATPATHI e HEO (1997), em 576.000 pontes rodoviárias, no final dos anos 80 dos EUA, 236.000 foram classificadas como deficientes pelos padrões atuais.
- A motivação econômica é mais forte. Com efeito, para estruturas com sistemas SHM, os benefícios previstos são custos de manutenção e confiabilidade constantes, em vez de aumentar os custos de manutenção e diminuir a confiabilidade de estruturas clássicas sem SHM .

Figura 7 – Ponte do Rio Mianus



Fonte : *A 100-foot section of the Mianus River Bridge, which carried I-95 over the river in the Cos Cob section of Greenwich, collapsed on June 28, 1983. (Hartford Courant)*

Figura 8 – Ponte do Rio Injaka



Fonte: BALAGEAS, FRITZEN e GÜEMES (2010)

3.5 Técnicas abordadas

Neste tópico, será apresentado as técnicas mais abordadas no desenvolvimento da técnica de SHM, baseado nos autores BALAGEAS, FRITZEN e GÜEMES (2010), GOPA-LAKRISHNNAN, RUZZENE e HANAGUD (2011) e CHAVES (2016) destaca-se:

- Ultrassom: utiliza um feixe sonoro de alta frequência no material ou componente de interesse, com o objetivo de detectar, localizar e dimensionar descontinuidades internas ou superficiais.
- Partículas magnéticas: utilizada a fim de encontrar descontinuidades superficiais e sub-superficiais. É uma técnica rápida e relativamente fácil de ser aplicada, pois é feita por meio de campos magnéticos aplicados ao material e o uso de pequenas partículas magnéticas. Estas se acumulam em regiões da superfície do material onde ocorre uma saída de fluxo magnético ocasionada pela presença de uma descontinuidade.
- Ensaio radiográfico: consiste em utilizar feixes de radiação X através do elemento a ser analisado e registrar as características da radiação emergente, utilizando um meio adequado, como um filme radiográfico, ou dispositivos eletrônicos de detecção de imagem radiográfica.
- Impedância: foram desenvolvidas utilizando a característica de acoplamento eletromecânico dos materiais piezoelétricos. O conceito básico desta técnica é monitorar as variações na impedância mecânica da estrutura causada pela presença de danos.

4 Monitoramento da Saúde Estrutural Vibracional

4.1 Introdução

A implantação do monitoramento da saúde estrutural abre espaço para o desenvolvimento de técnicas multidisciplinares, ou seja, permite a incorporação de teorias adicionais em seu processo. Com base no trabalho almejado, a aplicação dos conceitos de vibração associado ao SHM, mostrou-se ser mais vantajoso visto que:

- A vibração é uma propriedade intrínseca em todos os materiais
- A captação dos dados pode ocorrer mais facilmente se comparado com outros métodos
- A sensibilidade estrutural a frequência de excitação é maior, permitindo uma análise global ou local, segmentado pelo tamanho de frequência abordada.
- A frequência natural ser sensível a micro mudanças estruturais

Nesse capítulo, será definido o aspecto da vibração no âmbito do SHM (Coleta de dados, Processamento, Diagnostico e Prognostico). Assim, será apresentado o modo de captação dos dados, a análise vibracional da estrutura e as principais técnicas de monitoramento vibracional com base na revisão bibliográfica.

4.2 Captação

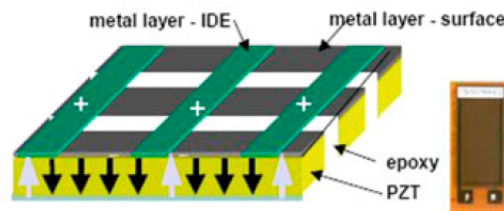
A captação de dados de qualquer SHM é oriundo de sensores instalados ou não na estrutura a ser analisada. No caso do SHM vibracional, os sensores podem ser estáticos ou dinâmicos.

No caso dos sensores serem estáticos é definido um monitoramento passível pois, o sensor não excita a estrutura para captação de dados. As medidas são aferidas aproveitando a excitação própria da estrutura a fatores externos, como exemplo, a vibração oriunda da excitação do vento em um prédio ou por excitações realizada na estrutura, como a excitação da base de uma estrutura realizada por um abalo sísmico, por exemplo.

Já no caso de sensores dinâmicos, é oriundo do conceito de sensor ativo, no qual o sensor atua como atuador estrutural, excitando a estrutura para a captação dos dados.

Um exemplo são os sensores MFC (Figura 9), um atuador inovador produzido pela Smart Material Corporation e originalmente desenvolvido no Centro de Pesquisa Langley da NASA, ele apresenta atuadores que aplicando uma tensão longitudinal através de eletrodos interdigitados, podendo captar a resposta do sistema estrutural.

Figura 9 – Sensor MFC



Fonte: GOPALAKRISHNNAN, RUZZENE e HANAGUD (2011).

Os sensores especializados em captar vibrações são denominados transdutores, que transformam variáveis físicas em sinais elétricos, facilitando o transporte e armazenamento dos dados. Dentre os principais transdutores, destaca-se o transdutores piezoelétricos.

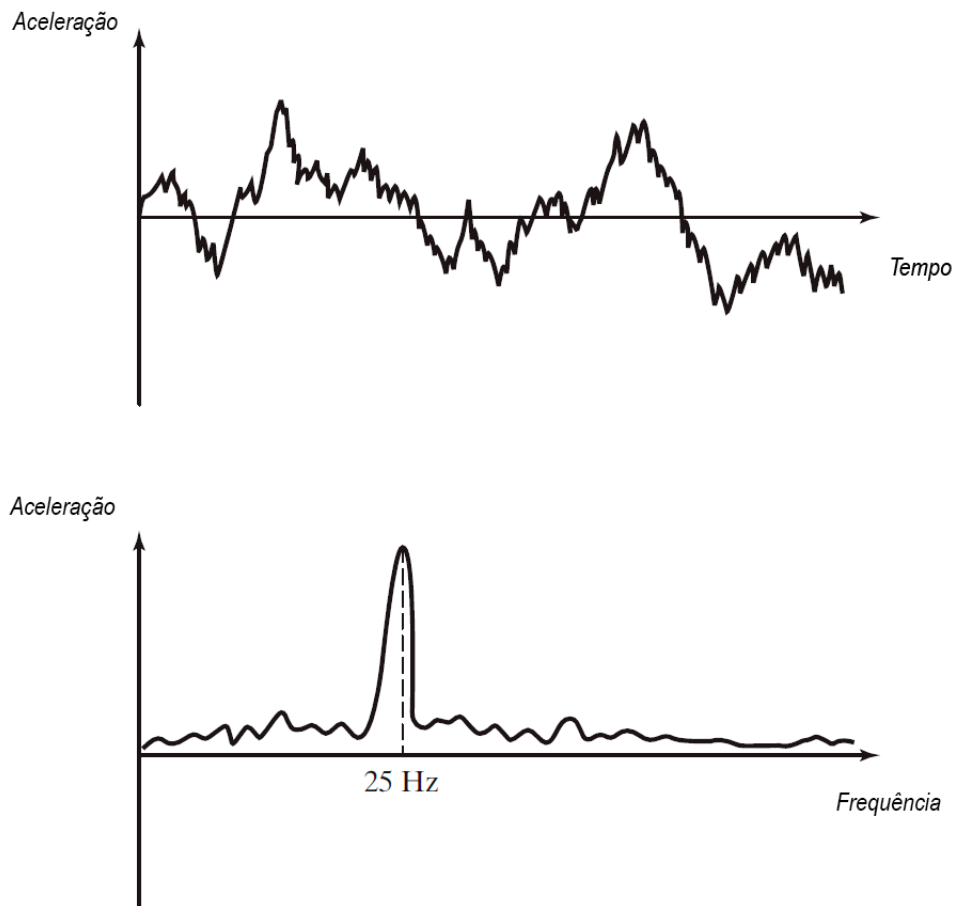
O piezoelétrico é um polímero, inócuo ao sistema estrutural, que apresenta uma deformação transiente que é transformada em sinais elétricos quando exposto a uma excitação aplicada em sua superfície. Além de apresentar um ótimo custo benefício, os tradutores piezoelétricos são altamente eficientes para a captação de dados, conforme expresso em BALAGEAS, FRITZEN e GÜEMES (2010) e RAO (2009).

Qualquer excitação vibracional tem uma área de abrangência, sendo a propagação da excitação inversamente proporcional ao seu modulo. Por isso, o desenvolvimento do monitoramento com base vibracional em um nível global, exige um grande número de sensores localizados na estrutura. Assim, a excitação terá o mesmo modulo nos sensores e, conseqüentemente, estes podem desempenhar, de uma maneira ótima, sua função.

4.3 Análise vibracional

Posterior a captação, a análise vibracional trata da *análise do sinal*: que de acordo com RAO (2009), determina a resposta do sistema analisado sob a excitação e expressa esta resposta em uma forma conveniente, conforme a Figura 10; e a *análise modal*: que trata da determinação de frequências naturais, fatores de amortecimento e formas modais por meio de teste de vibrações.

Figura 10 – Exemplo de Análise de sinais na aceleração



Fonte: RAO (2009).

Dentre as Análises, destaca-se Analisadores de espectro, Análise de sinais aleatórios e Determinação de parâmetros modais pelo diagrama de Nyquist. Deve-se destacar que a primeira análise trata-se de uma análise de sinal enquanto as duas ultimas tem por forma a análise modal.

4.3.1 Analisadores de espectro

Analisadores de espectro ou de frequência são dispositivos que analisam o sinal no domínio da frequência, separando a energia do sinal em varias bandas de frequência. A separação da energia do sinal é obtida pelo uso de filtros que caracterizam o tipo do analisador. Por exemplo, analisadores que utilizam filtros de faixa oitavadas são denominados de *analisadores de faixa oitavada*.

Dentre os vários filtros e, conseqüentemente, os analisadores, destaca-se a Transformada de Fourier que, segundo THOMSON (1978), é um caso limite da serie de Fourier à

medida que o período se estende para o infinito. Tal filtro é definido pela Equação 4.1 e 4.2 .

$$X(i\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\zeta)e^{-i\omega\zeta}d\zeta \quad (4.1)$$

$$X(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(i\omega)e^{i\omega t}d\omega \quad (4.2)$$

Sendo que $X(i\omega)$ é a transformada de Fourier de $x(t)$, e as duas equações acima são denominadas como o par da transformada de Fourier. A equação 4.1, reduz a função de $-x(t)$ a seus componentes harmônicos, enquanto a equação 4.2 reúne estes componentes na função original $x(t)$.

4.3.2 Análise de sinais aleatórios

A entrada dos sinais, geralmente, apresentam ruídos experimentais ou em alguns casos é utilizado excitações aleatórias, dificultando a análise determinística. Por isso, a análise de vibrações aleatórias faz-se necessário.

Assim, se $x(t)$ for um sinal aleatório, sua media e sua variança, representados, respectivamente, por $\bar{x}$ e $\bar{x}^2$, segundo (RAO, 2009) são definidos como:

$$\bar{x}(t) = \int_0^T x(t)dt \quad (4.3)$$

$$\bar{x}^2(t) = \int_0^T x^2(t)dt \quad (4.4)$$

O valor da raiz quadrada do valor médio ao quadrado (RMS) de $x(t)$ é dado por

$$x_{RMS} = \sqrt{\bar{x}^2} \quad (4.5)$$

A função autocorrelação de um sinal aleatório representada por $R(t)$ dá a medida da velocidade com a qual o sinal muda o domínio do tempo e é definida como

$$R(t) = x^2 = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(\tau)x(\tau+t)d\tau \quad (4.6)$$

A densidade espectral de potencia (PDS) de um sinal aleatório, representado por $S(\omega)$ dá a medida da velocidade de mudança do sinal no domínio da frequência e é definida pela Transformada de Fourier de $R(t)$. Assim, as definições de funções autocorrelação e PDS podem ser estendidas para dois sinais diferentes, como constituído em (RAO, 2009),

um sinal de deslocamento $x(t)$ e um sinal de força aplicada $f(t)$, o que resulta na correlação cruzada $R_{xf}(t)$ e na função PSD cruzada, $S_{xf}(\omega)$:

$$R_{xf}(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(\tau) f(\tau + t) d\tau \quad (4.7)$$

$$s_{xf}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_{xf}(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (4.8)$$

Estas equações permitem a determinação das funções de transferência da estrutura que esta sendo testada. Se substituir $f(\tau + t)$ por $x(\tau + t)$, obtém-se $R_{xx}(t)$ e, conseqüentemente, S_{xx} , sendo que esta define função resposta de frequência, $H(i\omega)$:

$$S_{xx}(\omega) = |H(i\omega)|^2 S_{ff}(\omega) \quad (4.9)$$

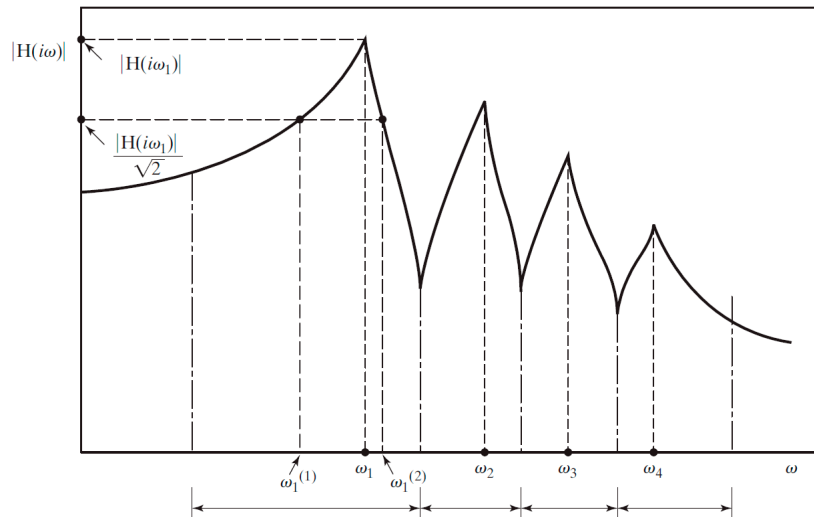
$$S_{fx}(\omega) = H(i\omega) S_{ff}(\omega) \quad (4.10)$$

$$S_{xx}(\omega) = H(i\omega) S_{xx}(\omega) \quad (4.11)$$

A função $S_{xx}(\omega)$, expressa na equação 4.9, contém informação sobre a magnitude da função de transferência do sistema(estrutura ou maquina), enquanto $S_{xf}(\omega)$ e $S_{xx}(\omega)$, dadas pelas equações 4.10 e 4.11, contém informações sobre a magnitude e fase.

No teste de vibração o analisador calcula, primeiro as funções densidade espectral diferentes correspondentes a saída do transdutores, seguidamente, calcula a resposta de frequência usando as equações 4.10 e 4.11, na Figura 11 trata de um gráfico típico de resposta de frequência.

Figura 11 – Gráfico típico de resposta de frequência

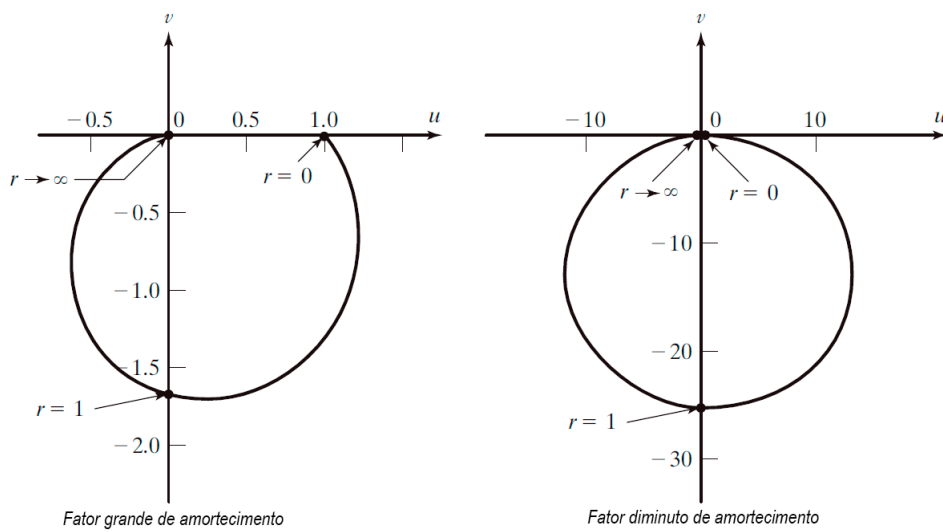


Fonte: RAO (2009).

4.3.3 Determinação de parâmetros modais pelo diagrama de Nyquist

Este método supõe que um único modo domina a na vizinhança de sua frequência natural na função de resposta em frequência. O *Círculo de Nyquist* ou *Diagrama de Nyquist* (Figura 12) diz respeito à representação das partes imaginárias e reais da função resposta em frequência de um sistema de um grau de liberdade. Isso é plotado ao longo dos eixos verticais e horizontais de um gráfico pela faixa de frequência resultando em um círculo.

Figura 12 – Diagrama de Nyquist



Fonte: RAO (2009).

Assim pode-se definir com base em RAO (2009) que a função resposta em frequência pode ser escrita como:

$$\alpha(i\omega) = \frac{1}{1 - r^2 + i2\zeta r} = u + iv \quad (4.12)$$

onde

$$u \text{ representa a parte real de } \alpha(i\omega) = \frac{1 - r^2}{(1 - r^2)^2 + 4\zeta^2 r^2} \quad (4.13)$$

$$v \text{ representa a parte imaginaria } \alpha(i\omega) = \frac{-2\zeta r}{(1 - r^2)^2 + 4\zeta^2 r^2} \quad (4.14)$$

O analisador apresenta os valores de excitação ω e os valores calculados de $u = Re(\alpha)$ e $v = Im(\alpha)$ oriundos dos dados medidos. Para grande valores de amortecimento (ζ) o

gráfico é parecido como um círculo. Porém, a medida que o fator de amortecimento vai diminuindo, assume gradativamente a forma de um círculo, conforme a Figura 12.

4.4 Técnicas de monitoramento da vibração

Apos a análise que permite identificação de parâmetros essenciais para determinação do estado da sistema analisado, o monitoramento dos sinais puros constituirá o diagnostico do sistema. Esse diagnostico leva em consideração, que toda anomalia em um sistema-falha, dano, fadiga, desgaste - provoca o aumento do nível de vibração.

Dito isso, discretiza-se nesse método o monitoramento no domínio do tempo, métodos estatísticos e o monitoramento no domínio da frequência.

4.4.1 Monitoramento no domínio da frequência

O monitoramento no domínio de frequência pode utilizar as *Formas de onda de tempo* ou as *Órbitas* para aferir e definir o diagnostico.

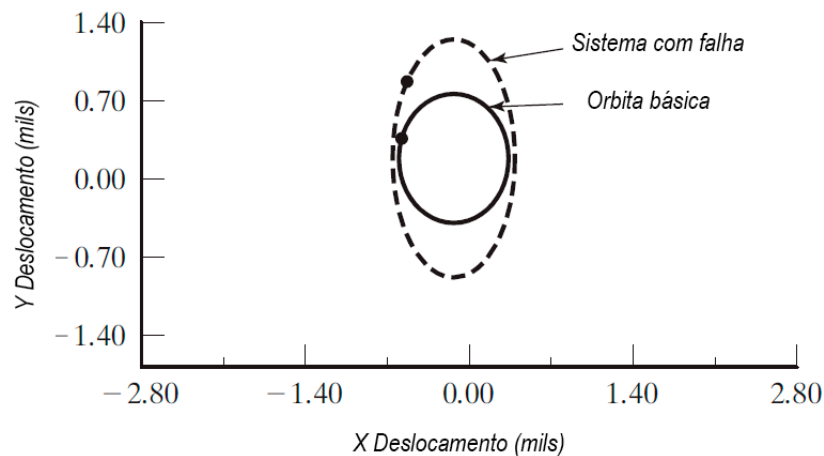
4.4.1.1 *Formas de onda de tempo*

O monitoramento é realizado sobre o histórico do tempo do sinal(forma de onda). O sinal pode ser armazenado em um osciloscópio no qual quaisquer impulso não estáveis ou transitórios são observados. Tomando o exemplo do RAO (2009), em uma análise no período em uma caixa de engrenagem definiu que o pinhão estava com falha. Essa análise baseou-se que o período normal do do sistema deveria estar em 20,9 ms porem pelo gráfico da aceleração pelo tempo mostrou que o sistema estava em 20ms. Como o pinhão apresentava o período de 20ms, então ele estava influenciando no sistema e consequentemente apresentava falha.

4.4.1.2 *Órbitas*

Observando as formas de ondas no tempo, obtidas por dois transdutores cujas saídas estão deslocadas em 90° , pode-se conhecer certos padrões conhecido como Figura de Lissajou. A saída desses padrões ou dessas orbitas podem ser usadas para referenciar uma falha no sistema, conforme exemplo da figura 13.

Figura 13 – Exemplo Órbitas



Fonte: RAO (2009).

4.4.2 Métodos estatísticos

O monitoramento com base nos métodos estatísticos pode utilizar como ferramenta de análise as *Curva de densidade de probabilidade* ou os *Momentos* para aferir e definir o diagnóstico.

4.4.2.1 Curva de densidade de probabilidade

A curva de densidade de probabilidade é uma função que descreve a probabilidade relativa de uma variável aleatória tomar um valor dado. Dentro do conceito de vibração, a curva de densidade de probabilidade é definida como a probabilidade de um sinal atingir uma certa amplitude definindo uma forma característica para cada sinal. Normalmente, a forma de onda oriunda de sistemas sem falhas apresentam a curvas de densidade de probabilidade em forma de sino. Traves disso é possível determinar o status de um sistema analisado visto que curvas constituídas por ondas de sinais com falhas apresentam uma curva densidade de probabilidade que diferenciará da normal.

4.4.2.2 Momentos

A curva de densidade de probabilidade apresenta momentos que podem ser usados para monitoramento dos sinais. Os quatro momentos principais de uma curva são conhecidos como media, desvio padrão, assimetria e curtose. Para os momentos ímpares (media e assimetria), segundo RAO (2009), estão próximos de zero e momentos pares (desvio padrão e curtose) representam a impulsividade do sinal. Além disso, costumam usar o momento de quarta ordem, curtose, para definir o diagnóstico sistema: um aumento do valor da curtose pode ser atribuído à falha de um componente.

4.4.3 Monitoramento do domínio de Frequência

O sinal no domínio de frequência ou espectros de frequência é uma representação da resposta de vibração em função de frequência e pode ser derivado pela análise digital e pela transformada de Fourier da forma de onda do tempo. Segundo RAO (2009), a resposta de qualquer sistema analisado é exclusiva e restrita, por isso o espectro de frequência é uma assinatura do sistema.

Se o sistema apresenta falhas então sua resposta a excitação será diferente e o seu espectro de frequência também será diferente. Assim, a constituição do sistema analisado é definido pela comparação entre o domínio de frequência normal e o domínio de frequência com falha.

A vantagem do uso espectro de frequência, é a possibilidade de análise global ou seja através da resposta do sistema frente a entrada (análise Lagrangiana), por formulas matemáticas específicas, determinar o componente que apresenta falha, definindo uma análise global em conjunto com uma análise local.

5 Sistema Imunológico Biológico

5.1 Introdução

Conforme destacado, o Sistema Imunológico Artificial apresenta reciprocidade com o Sistema Imunológico Biológico. Por isso, para compreender o Artificial, é preciso entender como que desenvolve-se o Biológico.

O corpo humano é constituído por inúmeros sistemas que, em sincronia, mantém o organismo funcionando sem defeitos fatais. Dentre os Sistemas, o Imunológico é sem duvida um dos mais importantes a sobrevivência dos seres vivos. Isto é destacado pelo Calich et al. (2001), sem um mecanismo de defesa os animais estariam a merce de inúmeros agentes infecciosos presentes no ambiente que invadiriam o corpo humano e causariam o colapso dos sistemas que o compõem.

O Sistema Imune Biológico, referenciado por SIB, é a barreira e o combatente que impede os microrganismos de colonizarem o meio intracelular. Esse combate é denominado como uma *Resposta Imune* que associa sistemas, órgão, tecidos e células em uma defesa passiva extracelular e uma defesa ativa no espaço intracelular aos agentes infecciosos, denominados antígenos.

Esse complexo sistema, chama muito a atenção do ponto de vista biológico e de engenharia, pois, apresenta-se como características principais :

- **Reconhecimento de padrões:** internos e externos ao sistema: as células e moléculas que não pertencem ao organismo são reconhecidas e eliminadas pelo SIB;
- **Detecção de anomalia:** o SIB pode detectar e reagir a agentes patogênicos (causadores de anomalias) a que o organismo nunca havia sido exposto anteriormente;
- **Detecção imperfeita** (tolerância a ruídos): um reconhecimento perfeito não é necessário para que o SIB reaja contra um elemento causador de patologia (patógeno);
- **Diversidade:** existe uma quantidade limitada de células e moléculas no SIB que são utilizadas para se obter o reconhecimento de um número praticamente infinito de elementos, incluindo aqueles sintetizados em laboratório;

- **Aprendizagem por reforço:** a cada encontro com o mesmo patógeno, o sistema imunológico melhora a qualidade de sua resposta; e
- **Memória:** os componentes do SIB bem sucedidos no reconhecimento e combate às patologias são armazenados para uma resposta futura mais intensa e efetiva.

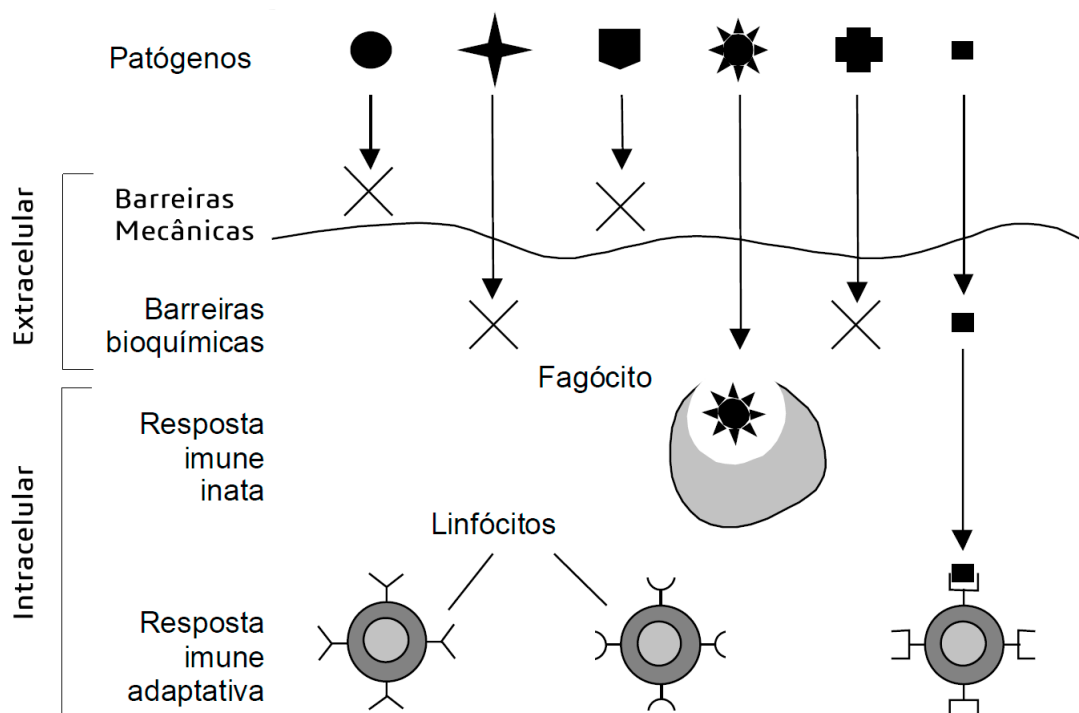
Este capítulo visa apresentar uma visão concisa dos principais elementos e processos envolvidos em uma resposta imune, de forma que o leitor adquira subsídios para compreender a abordagem do sistemas imunológicos artificiais.

Por isso o capítulo esta dividido em: Componentes, onde será apresentado os principais componentes do SIB; Resposta Imune, explicitando sua divisão; Reconhecimento de Padrões, como ocorre a característica mais marcante do SIB para a engenharia; e Funcionamento, usado para exemplificar o combate a um antígeno.

5.2 Componentes do Sistema Imunológico Biológico

Os Componentes Principais do Sistema Imunológico Biológico são subdividido em Componentes Extracelulares, Componentes Intracelulares, (conforme a Figura 14) e Componentes de Produção.

Figura 14 – Componentes Celulares



Fonte: Castro (2001).

5.2.1 Componentes Extracelulares

A parte extracelular tem como objetivo coibir os antígenos de invadirem o corpo humano e chegarem ao meio intracelular. Esta primeira linha de defesa passiva tem por constituinte a associação de barreiras mecânicas e barreiras químicas, constituindo uma barreira natural. De acordo com Calich et al. (2001), as principais barreiras naturais são:

Pele: além de ser uma barreira mecânica, a pele atua na inibição da instalação de micro-organismos através de suas secreções. Assim, o ácido láctico, a lisozima, os ácidos graxos insaturados e o pH ácido eliminam inúmeros micro-organismos ou tem efeito citostático sobre eles (inibição de reprodução)

Trato respiratório : No trato respiratório, o movimento constante dos cílios e o aglutinamento do muco ocasionam o arrastamento de partículas maiores para a faringe onde serão deglutidas.

Trato digestivo : Iniciando na boca, a saliva apresenta substâncias bactericidas e bacteriostáticas que devido a um fluxo constante encaminha para o estômago. No estômago, o baixo pH mata a maioria dos micro-organismos. Já no intestino os líquidos pancreáticos e biliares neutralizam o pH, sendo o controle do desenvolvimento de micro-organismos patogênicos realizado pela flora intestinal.

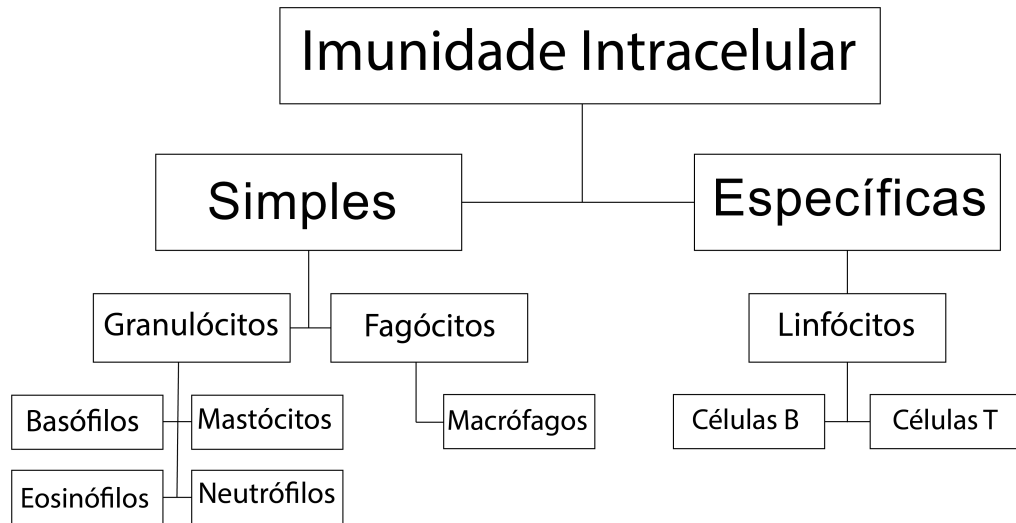
Trato geniturinário: O fluxo de urina e o pH ácido limitam o crescimento de bactérias.

Conjuntiva dos olhos: A presença de lisozimas é efetiva contra vários organismos patogênicos, pois causa a despolimerização de polissacarídeos da membrana de bactérias gram-positivas e gram negativas. Além disso, o constante fluxo de lágrimas atua como transporte, arrastando os possíveis antígenos para as fossas nasais.

5.2.2 Componentes Intramolecular

Por outro lado, muitos patógenos acabam tendo uma transmissão ativa, ultrapassando as barreiras naturais. Por esse motivo o SIB apresenta uma Imunidade intracelular. Esta é desenvolvida em sua maioria por células brancas do sangue, podendo ser dividida em Células Simples e em Células específicas, representado na Figura 15.

Figura 15 – Componentes Intracelulares



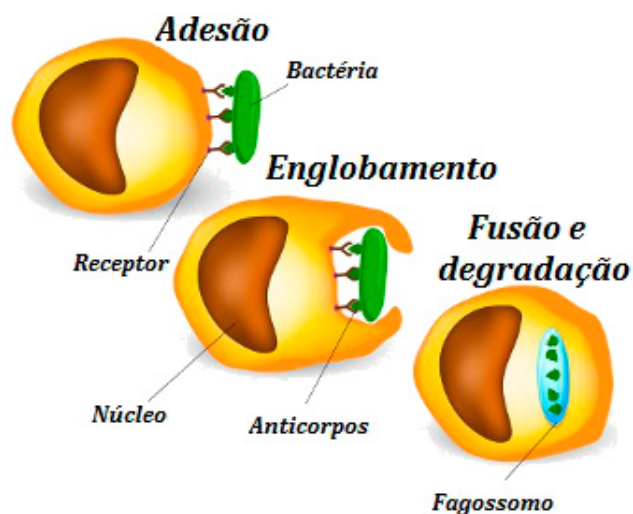
Fonte: Adaptado de Castro (2001).

As Células Simples, são caracterizadas por serem corpos celulares com baixa especificidade. Entretanto, conforme aponta Calich et al. (2001), desempenham um papel crucial na iniciação e posterior direcionamento das Células Específicas, principalmente, devido ao fato que estas demoram um certo período de tempo (da ordem de dias) para exercer seus efeitos. Portanto, as células simples desempenham um papel muito importante no controle das infecções durante esse tempo. As principais células de defesa simples são:

Granulócitos: Os granulócitos, podem ser divididos em quatro categorias: Basófilos, Eosinófilos, Mastócitos e Neutrófilos. Esse grupos celular, possui a função de agir durante reações alérgicas ou imunológicas do organismo com o objetivo de destruir agentes invasores através da sua absorção.

Fagócitos Mononucleares: Tendo como principal componente o Macrófago, tem a função de neutralizar, internalizar e destruir as partículas dos organismos infecciosos. Este processo é possível pelo seu processo de fagocitoses, representado na Figura 16.

Figura 16 – Processo de fagocitose



Fonte: Calich et al. (2001).

Com relação as Células Específicas, as células branca que constituem esse grupo são denominadas Linfócitos. Estes constituem células extremamente especializadas atuando na localização, reconhecimento, contenção e combate aos antígenos. Os linfócitos são subdivididos em:

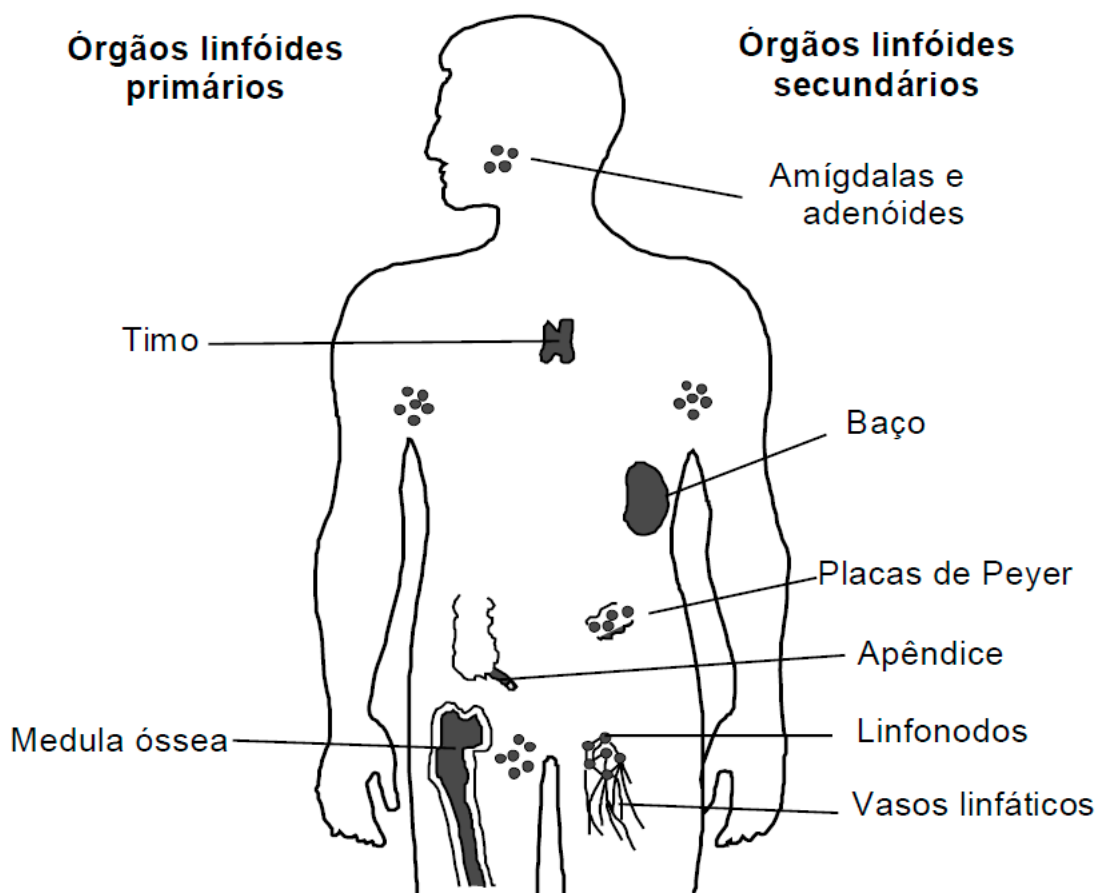
Célula B: Os linfócitos B, tem como função a localização, contenção e memorização dos antígenos. Cada célula B esta geneticamente programada para codificar um receptor de superfície específico para um determinado antígeno. Após localizar o antígeno, o linfócito B inicia o processo de divisão celular, se diferenciando em anticorpos e em uma nova célula B que funciona como memória imunológica do antígeno específico combatido.

Célula T: Os linfócitos T apresentam varias sub populações com uma grande variedade de funções. Dentre as principais funções , de acordo com Roitt et al. (1999), as que mais se destacam são: interação com os fagócitos mononucleares, os auxiliando na destruição de patógenos intracelulares, conhecidos por Ta1 ; interação com os linfócitos B os auxiliando na divisão e diferenciação celular e na produção de anticorpos, conhecidos por Ta2 e na destruição das células do hospedeiro que se tornara infectadas por vírus ou outros parasitas intracelulares, conhecidos por T citotóxicas (Tc).

5.2.3 Componentes de produção

Os componente de produção, caracterizam os órgão que produzem os corpos celulares e as substancias que compõem o SIB. Estes componentes, espalhados pelo corpo podem ser divididos, segundo Castro (2001), em órgãos linfóides primários e órgãos linfóides secundários, representados pela Figura 17.

Figura 17 – Órgãos que compõem o SIB



Fonte: Calich et al. (2001).

Entre os órgãos linfóides primários principais destaca-se :

Medula Óssea: a medula é responsável pela hematopoese: produção de hemácias, monócitos, leucócitos polimorfonucleares, linfócitos B e plaquetas. Além disso, nos mamíferos, a medula é o sitio de desenvolvimento das células B e a fonte de células-tronco que dão origem aos linfócitos T após a migração para o timo (CASTRO, 2001).

Timo: localizado na parte superior do tórax, é responsável pela multiplicação e amadurecimento dos Linfócitos T que chegam da medula óssea. Este amadurecimento

é denominado seleção negativa e tem por base a identificação/destruição dos linfócitos ruins. A seleção do linfócito T é definida por duas fases:

Seleção Positiva: ocorre a definição de detectores próprios, através da eliminação dos linfócitos T que não reconhecem elementos estranhos ao meio intracelular.

Seleção Negativa: processo de seleção negativa é definida pela eliminação apoptótica dos linfócitos T que se ligaram aos elementos do corpo humano com elevada afinidade, ou seja que atacam o próprio corpo.

Entre os órgãos linfóides secundários destaca-se:

Amígdalas e Adenoides: constituem grandes agregados de células linfóides organizadas como parte do sistema imune associado a mucosas ou ao intestino;

Baço: é o maior órgão linfóide secundário. É também o único órgão linfóide entreposto na corrente sanguínea constituindo-se, portanto, no local onde os linfócitos combatem os organismos que invadem a corrente sanguínea. Contém uma polpa vermelha responsável pela remoção de células sanguíneas envelhecidas, e uma polpa branca de células linfóides que responde aos antígenos levados ao baço pelo sangue;

Apêndice e Placas de Peyer: linfonodos especializados, contendo células imunológicas destinadas a proteção do sistema gastrointestinal;

Linfonodos: atuam como regiões de convergência de um extenso sistema de vasos que coletam o fluido extracelular dos tecidos, fazendo-o retornar para o sangue. Este fluido celular é produzido continuamente por filtração do sangue e é denominado de linfa. É também o ambiente onde ocorre a resposta imune adaptativa;

Vasos Linfáticos: rede de canais que transporta a linfa para o sangue e órgãos linfóides. Os vasos aferentes drenam o líquido dos tecidos e carregam as células portadoras dos antígenos dos locais de infecção para os órgãos linfáticos (linfonodos). Nos linfonodos, as células apresentam o antígeno aos linfócitos que estão recirculando, os quais elas ajudam a ativar. Uma vez que estes linfócitos específicos passaram por um processo de proliferação e diferenciação, eles deixam os linfonodos como células efetoras através dos vasos linfáticos eferentes.

5.3 Resposta Imune

Como dito anteriormente, a resposta imune é a nomenclatura dada ao combate do corpo humano a um determinado antígeno que invade o espaço intracelular. Esse combate tem por foco a localização, neutralização e por fim a eliminação do patógeno invasor.

Entretanto, devido a uma especialização celular, a resposta imune é dividida em : *Resposta Imune Inata* e *Resposta Imune Adaptativa*.

5.3.1 Inata

A palavra inato, advém do latim *innātu*, e é definido como algo que nasce com o indivíduo; que é independente do que se apreende ou experimenta depois do nascimento; algo natural. A resposta imune inata é aquela que o indivíduo herda da mãe tendo por principais características, de acordo com Calich et al. (2001), a defesa a uma ampla variedade de patógenos, sem exigir prévia exposição aos mesmos, e uma atuação recíproca em todos os indivíduos normais.

Sua resposta imune é realizada pelas células simples, ou seja fagócitos e granulócitos. Estes, são responsáveis pela:

- Localização: por apresentarem em grande quantidade no corpo, são responsáveis pela localização de substâncias estranhas
- Neutralização: através do processo de fagocitose, podem circunscrever e inibir o deslocamento de possíveis patógenos
- Eliminação: após a fagocitose, muitos micro-organismos comuns reconhecidos como patógenos são eliminados do corpo humano pelo processo de digestão dos fagócitos mononucleares dos antígenos comuns; ou
- Apresentação de substâncias: após a neutralização se não é reconhecido o possível patógeno, os macrófagos apresentam o antígeno para a resposta adaptativa, através da proteína MCH. Esta etapa é responsável por ativar a resposta adaptativa

5.3.2 Adaptativa

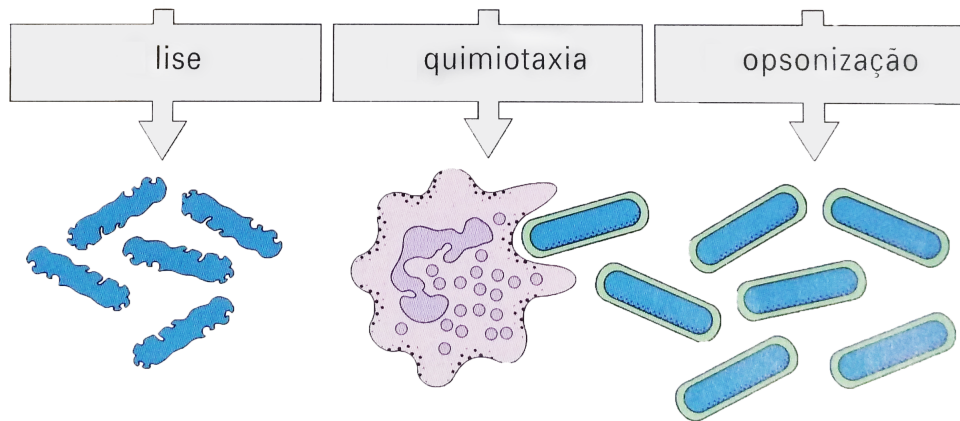
A resposta imune inata apresenta baixa especificidade de reconhecimento de antígenos, afinal sua memória é oriunda/herdada dos conhecimentos da mãe. Assim, o corpo ficaria sem resposta ao ataque de "patógenos novos", ou seja, que apresentam uma mutação em seu material genético. Entretanto, com o decorrer da evolução, desenvolveu-se uma resposta que solucionasse esse problema: a Resposta Imune Adaptativa.

Tal resposta tem por característica principal o aprendizado e a memória imunológica. Portanto, esta resposta não só consegue aprender/identificar um novo patógeno no meio extracelular, mas também, memorizar tal patógeno, logo, se o mesmo atacar, o sistema imune adaptativo o reconhecerá mais rapidamente e o eliminará com mais eficiência.

Sua resposta imune é realizada pelas Células Especializadas, ou seja, a classe dos linfócitos. Estes, são responsáveis pela:

- Reconhecimento de Antígenos: as células B e T são as responsáveis pela diferenciação de patógenos novos. Este processo é possível pelo reconhecimento de padrões abordado mais detalhadamente na Seção 5.4
- Identificação de Células Infectadas: as células T apresentam receptores que identificam células do corpo contaminadas por antígenos.
- Alerta: Após identificarem o antígeno, os linfócitos ativados liberam interferons, uma substância química que alerta o corpo para a invasão de patógenos. Com isso, os vasos sanguíneos diminuem sua vazão dilatando-se, coibindo assim a movimentação do corpo estranho; as células tornam-se mais resistentes ao ataque; e abre-se espaço para a atuação das células de defesa.
- Neutralização: As células B ao serem ativadas se multiplicam e se diferenciam em plasmócitos (anticorpo). Este, segundo (ROITT et al., 1999), são responsáveis pelo processo representado pela Figura 18 de:
 1. Lise: processo de quebra da membrana proteica que protege os antígenos
 2. Opsonização: processo de envolvimento do antígeno, coibindo sua reprodução e infecção do meio intracelular. Além disso, este processo é responsável por atraírem os fagócitos para eliminarem o corpo celular estranho
 3. Quimiotaxia: processo de auxílio do anticorpo no processo de fagocitose do macrófago.

Figura 18 – Processos realizados pelo plasmócito



Fonte: Roitt et al. (1999)

- Limpeza: Os linfócitos T citotóxicos (Tc) são os responsáveis pela destruição das células infectadas pelo antígeno.
- Memória: Com a ativação e diferenciação das células B, esta se transforma em anticorpos e células de memória que guardam o material genético do antígeno para poder identificá-lo se acaso ele atacar novamente

Sua ativação pode ser realizada através da associação macrófago/linfócito T ou pela combinação genética do linfócito com o material genético do antígeno.

Vale destacar que a diferenciação da resposta imune diz respeito a células que o compõem, como pode-se perceber. Entretanto, a eliminação de antígenos é realizada em grande maioria pela associação das duas respostas, ou melhor dos dois tipos de células intramoleculares. Isto é reflexo da baixa especificidade de identificação das Células Simples e pela falta de células especializadas em fagocitose, por parte das Células Especializadas.

5.4 Reconhecimento de Padrão

No Sistema Imunológico Biológico, o reconhecimento de padrões é, inquestionavelmente, um ponto muito importante. Se este não houvesse, primeiramente, no decorrer da evolução, os seres vertebrados ficariam vulneráveis aos agentes infecciosos diferenciais ("antígenos novos"), ocasionando a morte da classe vertebrada. E em segundo ponto, poderia gerar um irreconhecimento das células do próprio corpo, ocasionando patologias autoimunes que autodestruiria o ser vivo.

Entretanto, se esse mecanismo existisse de forma ineficiente e impreciso, aquelas consequências ocorreriam em uma menor probabilidade, porém uma pequena falha do

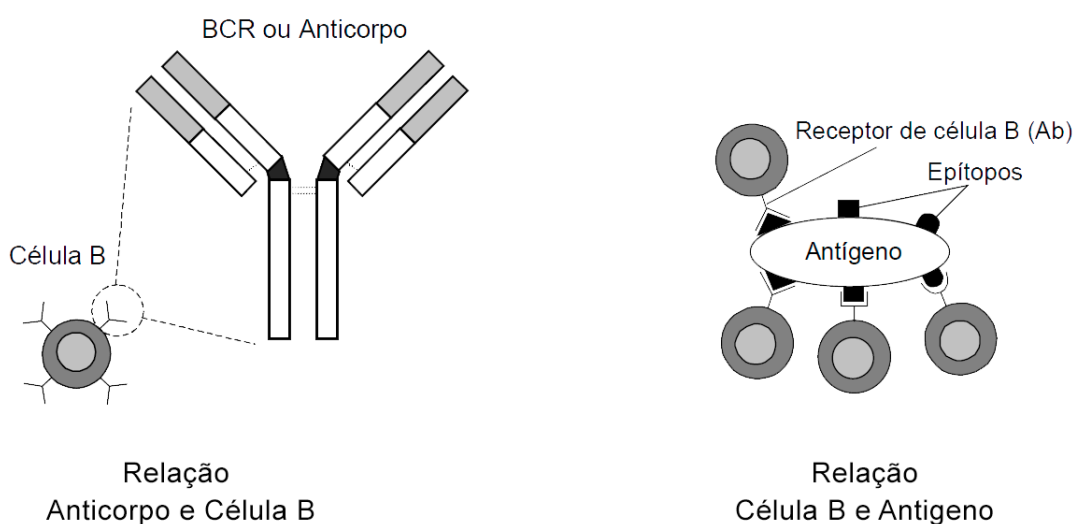
SIB destrói o corpo humano. Por isso, o reconhecimento de padrões é um ponto muito importante, pois, é caracterizado pela precisão, acurácia e eficiência.

O reconhecimento de padrões é realizado pela identificação do Próprio/Não-Próprio, ou seja, elementos que pertencem ao meio intracelular do corpo são denominados Próprios, já os elementos que invadem o meio intracelular são os denominados Não-Próprios. Este reconhecimento tem por base a especificidade molecular dos linfócitos.

De acordo com Castro (2001), as células B e T possuem moléculas receptoras (reconhecedoras) em suas superfícies capazes de reconhecer antígenos. Estes receptores reconhecem antígenos com características distintas. O receptor da célula B pode interagir com moléculas antigênicas livres em solução, enquanto o receptor das células T reconhece antígenos processados e ligados à uma molécula de superfície.

O receptor de antígeno da célula B (BCR – B cell receptor) é o anticorpo ligado à membrana, e que será secretado quando a célula for ativada. As principais funções da célula B, incluem a produção e secreção de anticorpos como resposta aos agentes patogênicos. Cada célula B produz um tipo específico de anticorpo, capaz de reconhecer e se ligar a uma determinada proteína. O reconhecimento imunológico ocorre em nível molecular e é baseado na complementaridade entre a região de ligação do receptor e uma porção do antígeno chamada epítopo, representada pela Figura 19. Enquanto os anticorpos possuem um único tipo de receptor, os antígenos podem possuir múltiplos epítomos, significando que um único antígeno pode ser reconhecido por diferentes moléculas de anticorpo.

Figura 19 – Receptor de antígeno da célula B

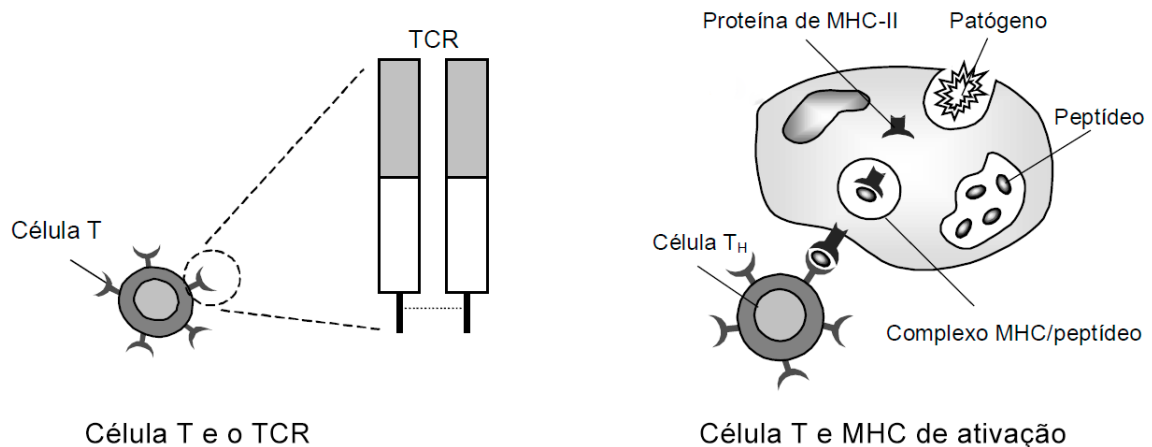


Fonte: Adaptado Castro (2001)

O receptor de antígeno da célula T (TCR – T cell receptor) possui algumas diferenças estruturais em relação aos receptores das células B. Enquanto o BCR é capaz de

reconhecer antígenos livres, o TCR reconhece apenas antígenos processados (fragmentados sob a forma de peptídeos) e ligados à uma molécula de superfície chamada complexo de histocompatibilidade principal, ou MHC. O MHC (Major Histocompatibility Complex), é uma proteína difundida, principalmente, nos macrófagos e utilizada para apresentar o material genético do antígeno para o linfócito T, conforme representada pela Figura 20. Assim que é desencadeado a ativação do linfócito e iniciada uma das formas da resposta imune.

Figura 20 – Receptor de antígeno da célula T

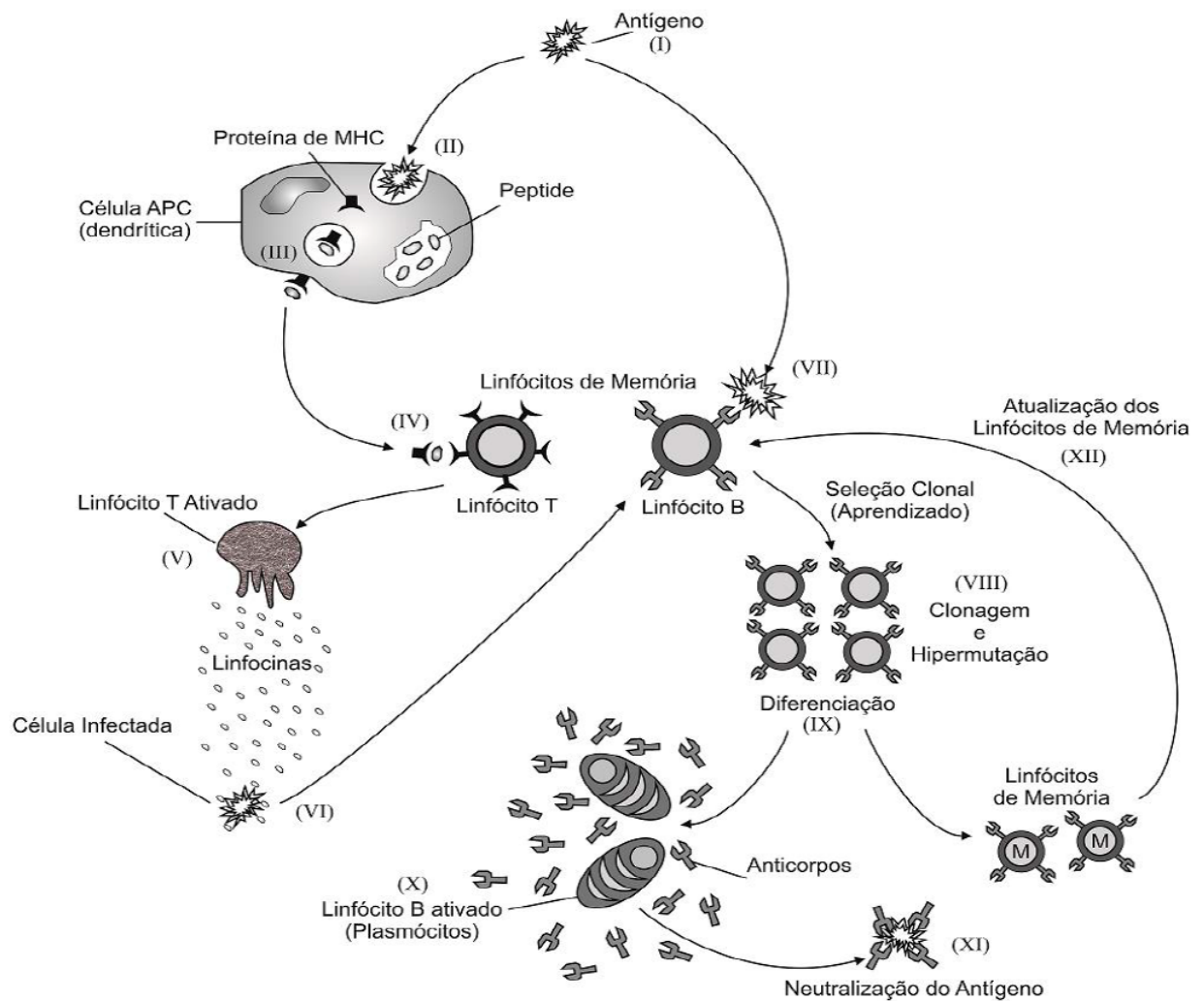


Fonte: Adaptado Castro (2001)

5.5 Funcionamento

Conforme demonstrado anteriormente, o SIB apresenta diversas células e moléculas que se associam harmoniosamente em etapas, objetivando respostas aos agentes estranho no organismo. Assim através da Figura 21, é possível compreender essas etapas e consequentemente como os corpos celulares se associam para cumprir seus objetivos.

Figura 21 – Etapas de Funcionamento de SIB



Fonte:Lima (2014).

Na Etapa (I) ocorre a exposição do SIB a um antígeno (agente infeccioso) demonstrando a falha na barreira natural. Isso pode ocorrer com patógenos com resistência química e/ou com contaminação ativa - que apresenta resistência as barreiras mecânicas

Dessa forma o SIB, pode reagir de duas formas :

1. Através da resposta imune inata, realizada pelos fagócitos e iniciada na Etapa II. Isto representa que o agente infeccioso é desconhecido pelo SIB e, portanto, é necessário identifica-lo e sinalizar a célula identificada para que posteriormente o sistema imune adaptativo possa identifica-lo.
2. Através da resposta imune adaptativa, realizada pelos linfócitos e iniciada na Etapa IV: representa que o antígeno é conhecido pelo SIB, e o processo de detecção é realizado pelos linfócitos de memória presentes no organismo

Ao seguir pela Etapa II, os macrófagos (principais representantes dos fagócitos mononucleares) fagocitam o antígeno, realizando sua neutralização. Nesta fase, os antígenos são digeridos, fragmentados em peptídeos antigênicos. No passo (III), os fragmentos de peptídeos se ligam a moléculas MHC, conforme aponta Castro (2001).

Os linfócitos apresentam moléculas receptoras de MCH/peptídeos capazes de reconhecer/identificar os antígenos processados pela fagócitos mononucleares. Assim, na Etapa IV, quando existe a ligação (combinação), ocorre o reconhecimento de um antígeno, e assim o estado do linfócito passa a ser de ativação. De acordo com Lima (2016), este passo representa a discriminação próprio/não próprio realizada pelo organismo que através do reconhecimento de padrões, consegue diferenciar células próprias dos agentes infecciosos.

O reconhecimento imunológico ocorre em nível molecular e é baseado na complementaridade entre a região de ligação do receptor e uma porção do antígeno chamada epítopo. Enquanto os anticorpos possuem um único tipo de receptor, os antígenos podem possuir múltiplos epítopos, significando que um único antígeno pode ser reconhecido por diferentes moléculas de anticorpo.

Posterior a detecção do antígeno, na Etapa V, os linfócitos T ativados, secretam sinais químicos (linfocina) que sinalizam para outros componentes do SIB que há uma substância patológica intracelular, ou que uma célula está infectada.

Na etapa V, o linfócito B recebe a sinalização da linfocina e assim pode buscar as células infectadas e iniciar o processo de aprendizado a respeito do antígeno. Este aprendizado é conhecido como princípios de Seleção Clonal (Etapa VII), sendo possível o reconhecimento dos antígenos livres sinalizados no organismos, sem a necessidade de uma célula branca mediadora.

A Seleção Clonal é o processo de aprendizagem do SIB, onde os linfócitos passam por um processo de clonagem e hipermutação gerando um conjunto de linfócitos B no organismo. Na sequência, ocorre um processo de diferenciação (Etapa IX), em que os linfócitos B com maiores afinidades são separados para fazer parte do conjunto de memória e os linfócitos B com baixa afinidade são ativados, se transformando em plasmócitos (Etapa X), secretando anticorpos. No passo (XI), os antígenos detectados pelo SIB são neutralizados pelos anticorpos gerados, levando a destruição da ameaça (doença).

Por fim, na Etapa XII, os linfócitos separados no processo de diferenciação se transformam em linfócitos de memória, substituindo os antigos linfócitos com baixa afinidade. Os novos linfócitos de memória passam a circular pelo organismo garantindo uma resposta eficiente e rápida a uma futura exposição ao mesmo tipo de antígeno (agente infeccioso).

6 Sistema Imunológico Artificial

6.1 Conceito Geral

O Sistema Imunológico Artificial, referenciado por SIA, surge no espaço científico da inspiração pelo Sistema Imunológico Biológico que chama a atenção pela eficiência, precisão e confiança. Características estas repassadas também ao SIA , ocasionando, conforme aponta Castro (2001), em dez anos sua consolidação não só no meio acadêmico mas também no meio empresarial.

Este sistema artificial, representa uma classe ampla da computação inteligente que tem por princípio a implementação de algoritmos que representam metodologias de manipulação de dados, classificação, representação e raciocínio que seguem um paradigma biológico plausível: o sistema imunológico humano. Assim, tais algoritmos configuram ao SIA a capacidade e sucesso na implementação de problemas relacionados:

- Reconhecimento de padrões;
- Aproximação de funções;
- Otimização de processos;
- Análise de dados e clusterização;
- Aprendizagem de máquina;
- Memórias associativas;
- Geração e manutenção de diversidade;
- Programação e computação evolutiva;
- Detecção de falhas e anomalias;
- Controle e Scheduling;
- Segurança computacional e de rede; e
- Geração de comportamentos emergentes

Por esse motivo, o Sistema Imunológico Artificial é destacado por Lima (2016), como sendo uma Engenharia Imunológica. Isto é baseado na característica de metasíntese, o qual define ferramentas de solução ou otimização de problemas baseando-se nas características do próprio problema, para posterior resolução, o caracterizando como uma engenharia imunológica. Com isso, foge do paradigma da reconstrução parcial ou total do sistema, buscando implementar modelos pragmáticos que preservem algumas das propriedades essenciais e que se mostrem passíveis de implementação computacional e eficaz no desenvolvimento de ferramentas de engenharia.

Portanto, de acordo com Calich et al. (2001), partindo dos conceitos apresentados para os sistemas imunológicos artificiais e dos propósitos vinculados à engenharia imunológica, é possível propor uma visão mais abrangente para o elenco total de componentes dos sistemas imunológicos artificiais, sendo possível acrescentar ao seu escopo de atuação os seguintes itens:

- Estruturas e algoritmos híbridos baseados em mecanismos ou metáforas imunológicas;
- Algoritmos computacionais inspirados em princípios imunológicos; processo também denominado de computação imunológica; e
- Engenharia imunológica e suas aplicações.

6.2 Principais Vertentes

Através do embasamento teórico, vislumbrou-se diversas vertentes de algoritmos constituídos na filosofia do SIA. Dentre eles destaca-se: Algoritmo de Medula óssea, Algoritmo Clonal G, Algoritmo das Redes Imunológicas e o Algoritmo de Seleção Negativa. Afim de compreender a escolha do algoritmo utilizados neste trabalho, estes algoritmos serão discretizados resumidamente abaixo.

Todavia, Observando, as principais características do problema de processamento do SHM: tomada de decisões e reconhecimento de padrões, denotou-se que o Algoritmo de Seleção Negativa seria a solução, afinal as outras linhas de algoritmos imunes artificiais divergem do exigido pelo SHM. Por esse motivo, tal algoritmo foi melhor discretizado na Seção 6.3.

6.2.1 Medula Óssea

O Modelo de medula óssea é baseado na geração de células artificiais, recíproco a propriedade de hematopoese da medula óssea dos vertebrados.

Toda célula biológica apresenta no seu meio intracelular o material genético que guarda as principais informações a respeito do ser vivo, denominado genoma. O objetivo deste algoritmo é gerar um grande número de diferentes moléculas, recíproco ao sistema de inspiração, e codificar um genoma para as células artificiais. Com isso, o uso de genes específicos das bibliotecas permite guardar informações úteis nos segmentos de genes.

A ideia básica dos algoritmo é em um modelo simplificado gerar cadeias, ou vetores, de tamanho L usando um gerador de números pseudo-aleatórios.

6.2.2 Algoritmo Clonal G

Este algoritmo tem por inspiração o sistema de diferenciação realizado pelas células B. Esta diferenciação resulta nos anticorpos e nas células de memória. Ele leva em consideração duas características centrais da seleção clonal definidos pela mutação e pela seleção proporcional à afinidade.

Em seu funcionamento os padrões a serem reconhecidos são representados por vetores de atributos que correspondem a uma população de antígenos (Ag) a ser reconhecida. Estes padrões são comparados a um conjunto de anticorpos (cadeias próprias) gerados aleatoriamente. Se o antígeno não for reconhecido, dependendo da afinidade entre anticorpo/antígeno, o sistema sofre uma mutação gerando uma nova cadeia que reconhece o antígeno.

Este funcionamento é denominado aprendizado continuado e é muito utilizado no processo de otimização de dados.

6.2.3 Algoritmo das Redes Imunológicas

O algoritmo das Redes Imunológica tem por base reproduzir uma dinâmica comportamental das células que as possibilitam reconhecer umas as outras independentemente de estímulos externos, sob a ótica das redes.

A abordagem de redes imunológicas é muito interessante, pois considera diversas propriedades como, aprendizado, memória, tolerância ao próprio, tamanho e diversidade da população das células, e também interações entre os elementos da rede e entre eles e o ambiente.

Os primeiros modelos de algoritmos eram baseados em equações diferenciais apresentando portanto uma vertente discreta e uma vertente continua de redes imunológicas

6.3 Algoritmo de Seleção Negativa

Circunscrito pelo SIA, o algoritmo de Seleção Negativa proposto por Forrest et al (1994), baseia-se no processo de seleção que ocorre no interior do Timo. Este processo trabalha na diferenciação das células próprias e não próprias do corpo (Lima, 2016). Assim o ANS apresenta a característica de detectar mudanças em estados de sistemas.

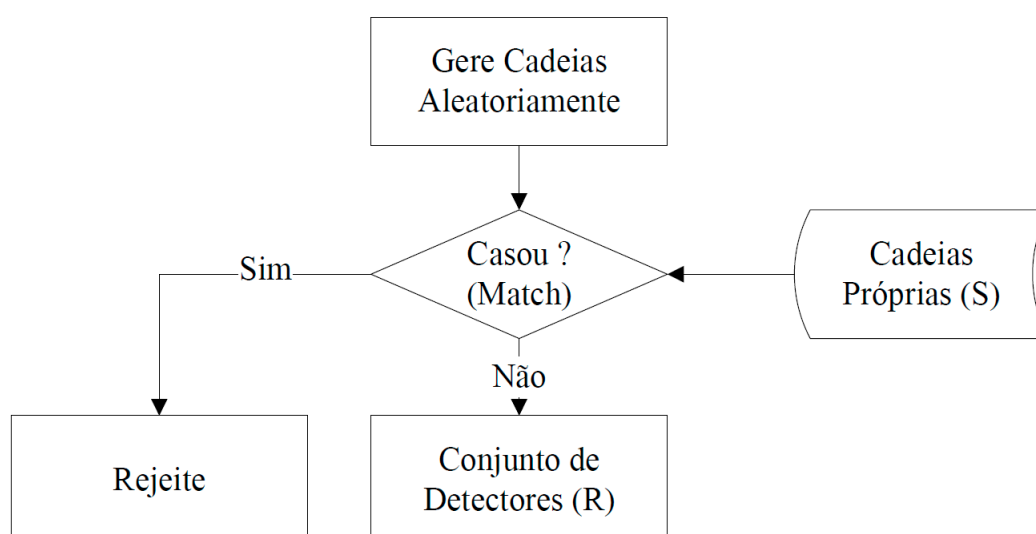
Este tópico tem por princípio a explicação das principais partes do algoritmo proposto por Forrest et al. (1994) com o princípio de reprodução e adaptação do mesmo , focado no processo de monitoramento estrutural. Para isso , de acordo com o Lima (2014) e Castro (2001), o algoritmo apresenta três pontos importantes: Censoriamento, Monitoramento (as duas fases de implementação do algoritmo) e o critério de casamento e afinidade (característica de reconhecimento de padrões).

6.3.1 Censoriamento

Conforme, destaca a figura 22, a primeira fase tem por objetivo :

- Definir o conjunto de cadeias próprias (S) que deseja-se proteger
- Gerar cadeias aleatórias e avaliar a afinidade (match) entre cada uma delas e as cadeias próprias. Caso a afinidade seja superior a um limiar estipulado, rejeitar a cadeia. Caso contrário, armazene-a em um conjunto de detectores (R)

Figura 22 – Diagrama de bloco da Fase de Censoriamento



Fonte: Lima (2014)

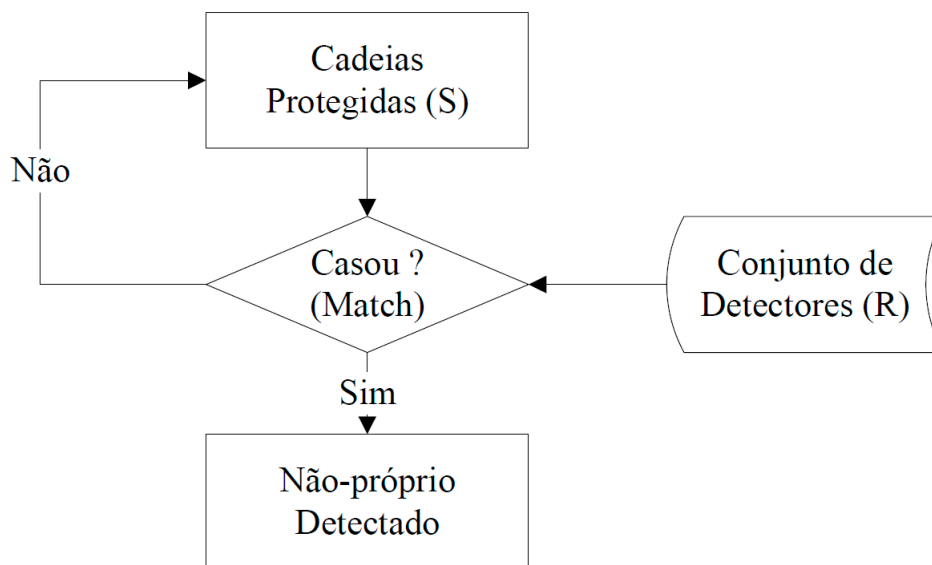
Na fase de sensoriamento do ASN, são definidos os detectores próprios, conhecidos também como cadeias próprias (S), representam a condição normal do problema, tendo reciprocidade com a seleção positiva. Em seguida, produz-se o conjunto de detectores (R), que possuem a capacidade de reconhecer padrões não próprios. Portanto, com a leitura dos dados, verifica-se a afinidade de cadeias aleatórias, comparando estas cadeias ao conjunto de cadeias próprias. Se a afinidade estiver acima de um limiar preestabelecido a cadeia é rejeitada. Entretanto se a afinidade estiver abaixo do limiar, a cadeia é adicionada ao conjunto de detectores sendo utilizada na classificação durante o monitoramento dos dados.

6.3.2 Monitoramento

Conforme, destaca a figura 23, a segunda fase tem por objetivo :

- Dado o conjunto de cadeias que se deseja proteger (cadeias protegidas), avaliar a afinidade entre cada uma delas e o conjunto de detectores. Se a afinidade for superior a um limiar preestabelecido, então um elemento não próprio é identificado

Figura 23 – Diagrama de bloco da Fase de Monitoramento



Fonte: Lima (2014)

Na fase de monitoramento, é realizado o monitoramento dos dados com o objetivo de identificar anomalias de comportamento das amostras, recíproco a seleção negativa. Assim, com o conjunto de detectores oriundo da fase de sensoriamento, classificar esta anomalia. Deste modo, comparando as cadeias protegidas (S) com o conjunto de detectores

(R), afere-se a afinidade entre as cadeias. Caso a afinidade seja superior a um limiar preestabelecido, é identificado e classificado um elemento não próprio.

6.3.3 Critério de casamento e afinidade

O critério de casamento ou combinação, segundo Forrest et al. (1994), é utilizado para avaliar a afinidade entre as cadeias (antígeno e anticorpo) e comprovar se estas são semelhantes ou iguais. Este casamento pode ser perfeito ou parcial.

Se o casamento for perfeito, significa que as duas cadeias analisadas apresentam os mesmos valores e logo ambas devem ser perfeitamente iguais. Entretanto, se apenas uma quantidade de posições entre os padrões possuírem o mesmo valor este casamento é definido como parcial. Neste caso, a quantidade de posições iguais obedece a um limiar preestabelecido e denominado taxa de afinidade.

Conforme Lima (2014), o casamento perfeito entre as cadeias e dados é quase impossível de ser alcançado experimentalmente, devido as inúmeras variáveis que permeiam e alteram os dados empíricos. Por isso a utilização do casamento parcial e a taxa de afinidade mostram-se muito mais vantajosos.

A taxa afinidade utilizada como o grau de semelhança necessário para que ocorra o casamento parcial, avaliada para os números reais, é definida, de acordo com Lima (2014) como:

$$Taf = \frac{An}{At} * 100 \quad (6.1)$$

Sendo:

Taf : Taxa de afinidade

An : Numero de cadeias normais no problema (Cadeias próprias)

At : Numero total de cadeias do problema (Cadeias próprias e não próprias)

Além da Taxa de afinidade, para analisar os padrões de cadeia é utilizado a Afinidade total, definida como:

$$Aft = \frac{\sum_{i=1}^L Pc}{L} * 100 \quad (6.2)$$

Onde:

Aft : finidade entre os padrões analisados

L : quantidade total de posições

Pc : Posições casadas

Assim, caso Aft for maior o igual a Taf ocorre o casamento perfeito e as cadeias são consideradas semelhantes. Por outro lado, se a Aft for menor que a Taf , o detector não reconhece a cadeia, e logo não ocorre o casamento entre os padrões.

7 Metodologia

Independentemente do modo, as falhas estruturais são consequência de fatores naturais e forçantes que modificam os parâmetros espaciais e, conseqüentemente, ocasionam a repercussão nas características dinâmicas estruturais: funções de respostas em frequência, frequências de ressonância, razão de amortecimento e modos próprios da estrutura (ATALLA; SGARD, 2015)

Por isso, a metodologia tem por objetivo a captação da resposta dinâmica da estrutura em um estado normal e em um estado de falha, respeitando a avaliação não destrutiva para posterior aplicação do ANS e, por conseguinte, identificação do estado estrutural

Com base no objetivo de desenvolvimento de SHMs com processamento e tomada de decisão através da inteligência Artificial do Sistema Imunológico Artificial, a metodologia apresenta três vertentes:

1. Modelo Estrutural
2. Metodologia Experimental
3. Processamento de Dados e Tomada de decisão

7.1 Modelo Estrutural

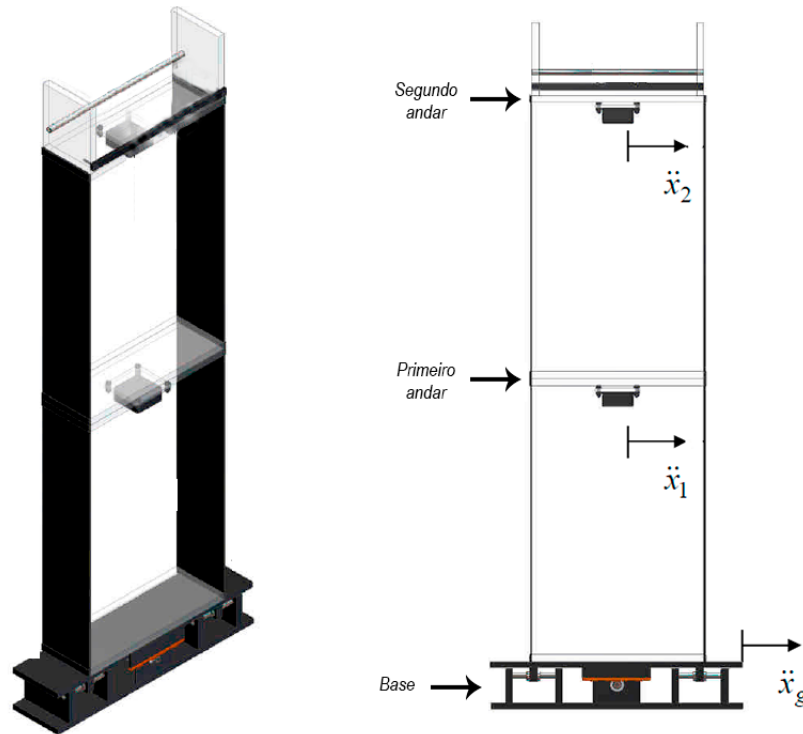
Para este trabalho a proposta de uma metodologia baseou-se no modelo de *shear building* de um prédio de dois andares representado na Figura 24.

O Modelo de *shear building* caracteriza uma estrutura real em uma ótica reduzida e com algumas simplificações teóricas, definidas por:

- Somente o deslocamento horizontal
- As massas são concentradas sobre os nós estruturais
- Despreza-se a massa das colunas,
- Rigidez infinitas das lajes,
- As ações são aplicadas apenas no planos dos pórticos,

- A curva de tensão/deformação é considerada elasto- plástica ideal

Figura 24 – Modelo do edifício



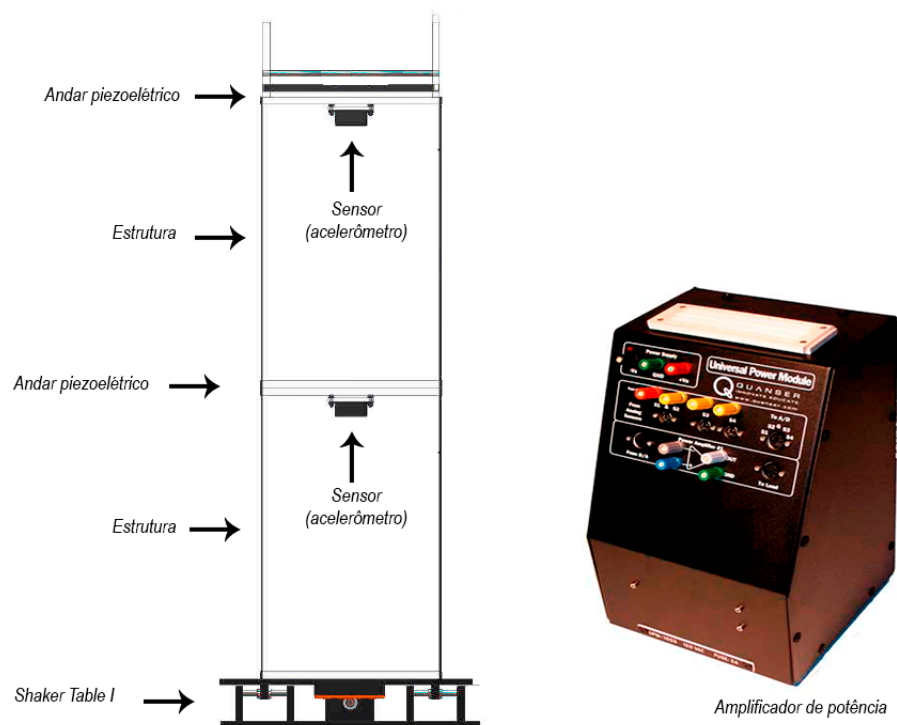
Fonte: elaborado pelo autor

Através dessas simplificações que se baseia a estrutura utilizada, sendo esta composta por uma estrutura manufaturada pela Quanser Consulting Inc, constituída por uma armação de aço que representa um edifício flexível desenvolvida com dois andares.

A estrutura, que representa um prédio de dois andares, é dimensionada com 1125 mm de altura, sendo cada coluna de aço com uma seção de 1,75x108 milímetros. A massa total da estrutura é de 4,52 kg, onde a massa do primeiro piso m_1 é de 1,16 kg, a massa do segundo piso m_2 é 1,38 kg.

A estrutura apresenta além dos itens estruturais (piso dos andares e as colunas de aço), os aparatos internos da estrutura, representados pela Figura ??

Figura 25 – Componentes utilizados do modelo do edifício



Fonte: elaborado pelo autor

- **Sensores:** Cada piso dos andares, apresenta um capacitor DC acelerômetro piezoelétrico, que mede as acelerações $\ddot{x}_1$ e $\ddot{x}_2$. Este acelerômetro é fabricado pela *Quanser Consulting Inc* e apresenta uma saída de $\pm 5V$ com um intervalo de $\pm 5g$.
- **Shaker Table I:** O shaker table, ou mesa de agitação, localizado na base do modelo de edifício, produz uma força externa na base da estrutura, definindo uma aceleração $\ddot{x}_g$. Este agitador pode ser usado, por exemplo, para simulação de terremotos, possibilitando a avaliação o comportamento de tal modelo estrutural.
- **Controle Digital:** Usou-se um controlador MultiQ-PCI. Este foi usado para controlar a aquisição de dados e o controle do amplificador de potência da base. Os recursos do quadro incluem um conversor de 8 canais analógico-digital, com um intervalo de entrada de $\pm 10V$, resolução de 14 bits. Além disso, o quadro contém 8 canais conversor digital-analógico com faixa de saída de $\pm 10V$ e resolução de 12 bits.
- **Amplificador de potência :** Além dos elementos que compõem o modelo do edifício de dois andares, usou-se um amplificador de potência, responsável por alimentar a mesa de agitação. O amplificador, de modelo UPM 1503, é manufaturado pela *Quanser*.

O modelo do edifício junto com o amplificador, foram fixados em uma mesa inercial. Esta tem por objetivo garantir a estabilidade do experimento, reduzindo os ruídos experimentais. A composição total da montagem experimental é representada na Figura ??

Figura 26 – Montagem experimental



Fonte: elaborado pelo autor

A tabela 2 lista e caracteriza os principais parâmetros (especificações mecânicas) associados ao modelo experimental.

Tabela 2 – Principais parâmetros associados ao sistema estruturais

Parâmetro	Símbolo	Valor
Massa do primeiro andar	m_1	1,16 kg
Massa do Segundo Andar	m_2	1,38 kg
Rigidez Linear Primeiro piso	k_1	500 N / m
Rigidez Linear do Segundo piso	k_2	500 N / m
Coefficiente de amortecimento Primeiro piso	c_1	$10^{-3} Nm$
Coefficiente de amortecimento Segundo piso	c_2	$10^{-3} Nm$

Fonte: Elaborado pelo autor.

7.2 Metodologia Experimental

7.2.1 Funcionamento do modelo estrutural

Antes de expor a metodologia adotada na captação dos dados, é preciso entender o funcionamento do modelo de edifício e seus componentes. Pode-se dividir esse funcionamento e, quatro partes:

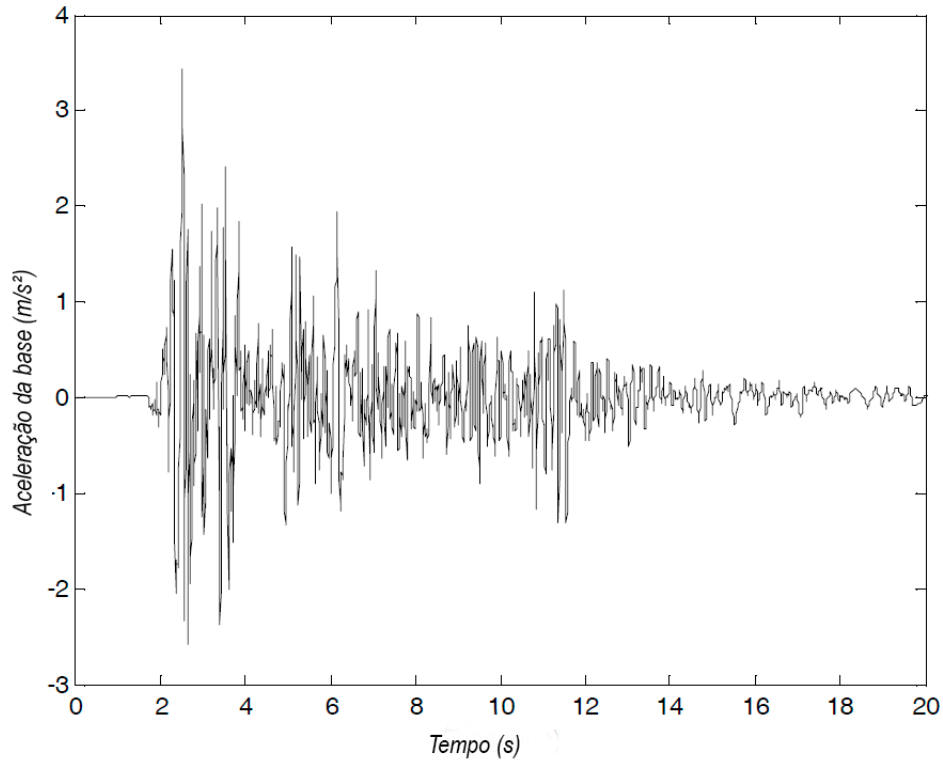
1. **Definição:** Nesta parte, ocorre a determinação do tipo excitação. Isso é realizado definindo os parâmetros da função forçante no computador por meio de softwares.
2. **Comando:** Esses parâmetros forçantes são enviados ao controlador. Ao chegar no controlador o comando é gerado e repassado para o amplificador de potência e para o shaker table
3. **Execução:** Com o comando, o shaker localizado na base da estrutura, associado ao amplificador, realiza a excitação no modelo do edifício
4. **Captação:** Tal excitação provoca uma aceleração nos componentes da estrutura. Essa resposta do sistema é captada transformada em sinais elétricos. Por isso os dados obtidos do modelo experimental são denominados de sinais. Tais sinais são enviados ao computador e armazenados

7.2.2 Metodologia usada

O objetivo da parte experimental era a coleta de sinais referente a excitação imposta ao modelo do edifício. Tais sinais deveriam ser representativos de uma estrutura normal e uma estrutura com falha. Para isso realizou-se:

1. **Definição da Excitação:** definiu-se uma excitação do tipo terremoto, introduzida no sistema agitador como fonte de excitação. Esta excitação sísmica, possibilita a análise estrutural para amplitudes variadas de excitação podendo, desenvolver um estudo abrangente da relação resposta do sistema e falhas estruturais. Assim a bancada de testes de construção, na mesa de agitação, estava excitada com a escala do El Centro, tal sinal é exemplificado na Figura 27.

Figura 27 – Excitação sísmica



Fonte: elaborado pelo autor

O mais comumente usado modelo estocástico de terremotos é a raiz quadrada do espectro de Kanai-Tajimi W_g , definida por:

$$W_g = \frac{\sqrt{S_0}(2\zeta_g\omega_g s + \omega_g^2)}{s^2 + 2\zeta_g\omega_g s + \omega_g^2} \quad (7.1)$$

onde os parâmetros do espectro Kanai-Tajimi, utilizados neste trabalho, são $S_0 = 0.005$, $\zeta_g = 0.5$ e $\omega_g = 15 \text{ rad/s}$.

Qualquer estrutura é excitada por diferentes frequências, oriundas por diferentes fontes de excitação, como por exemplo a ação do vento, a ação da movimentação de veículos, a solicitação estrutural, entre outros.

Por isso, a escolha de uma excitação sísmica que neste caso, por apresentar um tempo e uma potência diminuta, não apresenta risco estruturais ao modelo predial e possibilita um monitoramento completo da estrutura frente às variadas fontes e frequências de excitação que há em uma estrutura predial real.

2. **Captação dados representativos de Falha:** Para se representar uma falha estrutural no modelo de edifício, utilizou-se massas adicionais vinculadas ao protótipo e que indicam um acréscimo de massa estrutural.

Utiliza-se massas extras na estrutura para que haja uma alteração do parâmetro espacial e por conseguinte no parâmetro dinâmico recíproco ao trabalho de uma falha em uma estrutura real.

Desta forma não é preciso o ensaio destrutivo do protótipo estrutural e contextualiza um monitoramento baseado no diagnóstico de falhas antes da estrutura atingir os estados limites

A tabela 3 demonstra o dimensionamento das massas que poderiam ser adicionadas, sendo que, m_1 refere-se as massas acrescentadas no primeiro andar e m_2 refere-se as massas acrescentadas no segundo andar.

A configuração de adição das massas foi variado. Havia dez configurações possíveis de massa para o primeiro andar e idem para o segundo. Assim, houve 100 configurações de massas possíveis de adição de massas no modelo estrutural, além da possibilidade de, somente, um andar estar sem massa adicionada.

Tabela 3 – Massa adicionadas em cada andar

m_1 (gramas)	m_2 (gramas)
10,5	12
19,5	24
28	33
36,5	38
45	43
53,5	48
61,5	53
69,5	58
77,5	63
85,5	68

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para captar os dados com falha realizou-se:

- Adicionou-se uma massa adicional no primeiro e no segundo andar do modelo de edifício, em posições aleatórias, utilizando uma fita dupla face.
- Utilizando os parâmetros já definidos de excitação sísmica, iniciou a execução do *Octave*, fazendo com que a estrutura comece-se a vibrar.
- Coletou-se cerca 6 segundos de sinais que apresentavam o tempo, a amplitude de excitação momentâneo, e com os acelerômetros, os dados de aceleração do segundo andar da estrutura. O tempo de coleta foi definido vislumbrando a

resistência de uma estrutura real a uma excitação sísmica com um numero de sinais ideais para a análise estrutural.

- d) Após os seis segundos, desligava-se a excitação e arquivava os sinais obtidos da estrutura constituindo um banco de dados representativos de falha.

Tais operações foram repetidas para as outras configurações de massas adicionais.

- 3. **Captação de dados Normais** : Caracterizou-se como dado normal, a estrutura sem acréscimo de massa ou como um acréscimo diminuto (representativo do desvio padrão estrutural), cerca de 1% da massa do piso ($m_1 = 10,5$ gramas e $m_2 = 12$ gramas).

Assim, captou-se um sinal com a estrutura sem massa adicional, dois sinais com uma massa adicional (uma no primeiro andar ou no segundo andar) e por fim um sinal com duas massas adicionadas à estrutura.

Para captar os dados normais realizou-se quatro vezes :

- a) Utilizando os parâmetros já definidos de excitação sísmica, iniciou a execução do *Octave*, fazendo com que a estrutura começa-se a vibrar.
- b) Coletou-se cerca 6 segundos de sinais que apresentavam o tempo, a amplitude de excitação momentâneo, e com os acelerômetros, os dados de aceleração do segundo andar da estrutura
- c) Após os seis segundos, desligava-se a excitação e arquivava os sinais obtidos da estrutura constituindo um banco de dados representativos de falha.

Assim definiu-se um banco de dados com sinais normais.

7.3 Processamento de dados e Tomada de decisão

Para o processamento de dados,houve a implementação do Algoritmo de seleção negativa (ANS) em um processamento supervisionado. Por esse motivo, para melhor explicar essa implementação do SIA ao SHM, esta seção foi dividida em:

Discretização do ANS: onde será apresentado uma síntese sobre o algoritmo programado que tem reciprocidade com o proposto no embasamento teórico;

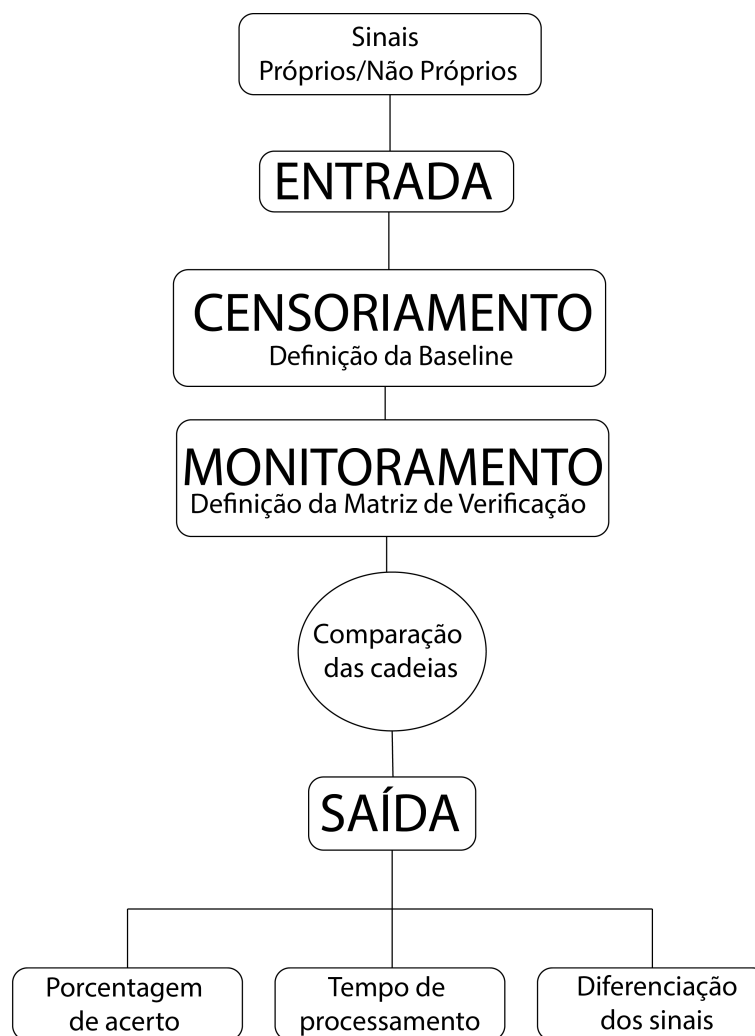
Processamento dos sinais: o processamento deve apresentar uma metodologia para avaliar o algoritmo. Assim, esta seção explicará como foi dividido e a justificativa para esse tipo de implementação;

7.3.1 Discretização do ANS

Antes de iniciar a implementação do algoritmos em si, é necessário explicar o funcionamento do Algoritmo de Seleção Negativa desenvolvido. Assim, sob a proposta de ANS estudada por Forrest et al. (1994) e Lima (2014), foi desenvolvido o algoritmo subdividido em cinco partes, conforme é demonstrado na Figura 28.

1. **Entrada:** Esta é a primeira parte do algoritmo que representa a entrada do linfócito prematuro no timo. Entretanto neste caso o que entrará será os sinais coletados do modelo estrutural. Nesta etapa é definido o número de sinais próprios/não-próprios que serão processados.
2. **Censoriamento:** Como expresso, nesta parte realiza-se a definição dos detectores próprios que representam uma estrutura sem falhas. Como o modelo estrutural apresenta a configuração de quatro sinais sem falha, neste segunda etapa, é definida um conjunto de cadeias próprias. Este conjunto de cadeias é denominado de *Baseline*, por isso tal etapa é caracterizada pela definição da *Baseline*.
3. **Monitoramento:** diferindo um pouco dentro da nomenclatura desenvolvida por Forrest et al. (1994), esta etapa tem por função a definição da matriz de verificação. A matriz de verificação é utilizada para abrigar todos os sinais que serão discretizados numericamente em próprios e não próprios.
4. **Comparação das cadeias:** Esta etapa com o monitoramento é definido como uma única fase dentro da nomenclatura teórica. Nesta fase, é comparado cada sinal da matriz de verificação com os sinais próprios da *Baseline*. Se estes apresentarem uma taxa de combinação constituída no intervalo das taxa de afinidade mais ou menos o desvio padrão é definido um casamento parcial e definido o sinal como Próprio da estrutura. Foi utilizado um desvio padrão de 3% com base na diferença de amplitude do sinal.
5. **Saída:** Ao fim do processo de processamento, o algoritmo demonstra o tempo de processamento dos sinais, a porcentagem de acerto visto a definição do número de sinais que entram no algoritmo e diferencia o número de sinais próprios e não próprios que estão estabelecidos na matriz de verificação

Figura 28 – Diagrama do algoritmo de Seleção negativa



Fonte: Elaborado pelo autor.

7.3.2 Processamento dos sinais

Observando o algoritmo e o banco de dados, implementou-se um processamento que focasse na avaliação completa do algoritmo. Desde sua eficiência até as relações dos componentes que o compõem. Assim, o processamento dos sinais foi implementado de três formas:

- **Processamento Sequenciado**
- **Processamento Randômico Não Próprio**
- **Processamento Randômico Próprio**

A diferença dos processamentos, é definido pelo números de sinais próprios/não-próprios que são adicionados na Entrada no algoritmo e a forma de implementação dos sinais na Matriz de Verificação. No Processamento Sequenciado, foi utilizado todos os sinais, sendo sequenciada a implementação dos sinais na matriz de verificação, ou seja, os sinais foram adicionados em uma escala crescente do módulo de falha. Neste caso, a forma sequencia é utilizada para verificar o funcionamento e implementação correta do algoritmo.

Com relação ao Processamento Randômico Não Próprio, utilizou-se um número randômico de sinais com falhas, na entrada, mantendo constante o número de sinais próprios. Além disso, a composição dos sinais próprios e sinais não próprios, na matriz de verificação, foi feita em ordem aleatória. Assim, pode-se visualizar o funcionamento do algoritmo para valores variados de afinidade e a verificação, mais especificamente, da relação dos sinais não próprios com a eficiência do algoritmo

Por outro lado, com relação ao Processamento Randômico Próprio, utilizou-se um número decrescente, na entrada, dos sinais sem falhas, porém continuou-se com a composição dos sinais próprios e sinais não próprios, na matriz de verificação, em ordem aleatória. Assim, pode-se visualizar o funcionamento do algoritmo para valores variados de afinidade, mais especificamente a relação dos sinais próprios com a eficiência do algoritmo

A alocação aleatória na Matriz de verificação simula a implementação do algoritmo para um processamento online, ou seja, diretamente interligado a estrutura. Sua eficiência e precisão, demonstrara a viabilidade técnica de implementação proposta neste trabalho.

8 Resultados e Discussões

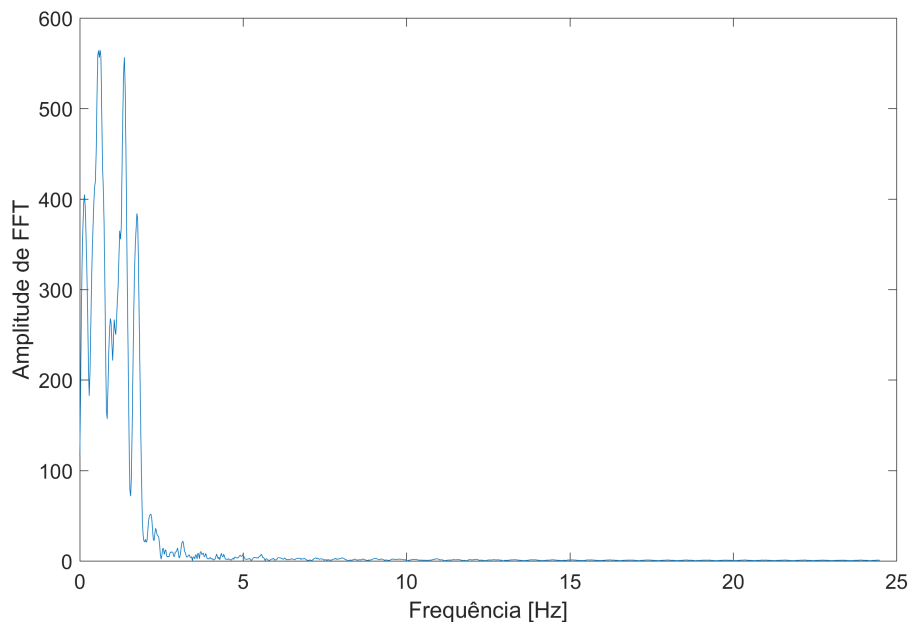
Com o termino do procedimento experimental, obteve-se 121 sinais que continham o vetor do tempo de excitação, o vetor da amplitude de excitação e o vetor de aceleração do segundo andar. Desses sinais 117 constituirão o banco de dados representativos de falha estrutural e 4 sinal representativo de uma estrutura normal.

Todavia, para conseguir analisar e diferenciar os sinais com falha e sem falha, realizou-se a Transformada de Fourier, sendo possível a análise pico a pico de todos os sinais. Tomando, para exemplificação um sinal anormal (que apresenta no primeiro andar um acréscimo de 36,5 gramas e no segundo andar de 68 gramas) e um sinal normal(sem acréscimo de massa) vê-se que:

- **Amplitude**

A amplitude plotada em relação a frequência, apresenta a mesma constituição para o sinal normal e com falha, conforme a Figura 29.

Figura 29 – Transformada da Amplitude



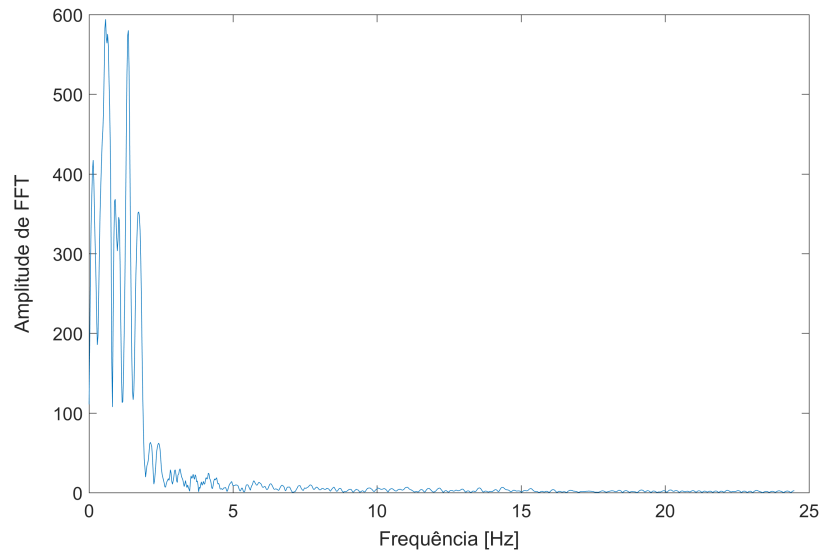
Fonte: elaborado pelo autor

Isso é resultado da excitação exercida pelo *shaker table* , que apresenta o mesmo tipo de excitação sísmica para toda a bateria do procedimento experimental. Assim, graficamente é comprovada a constituição do mesmo tipo de excitação validando que a análise da variação de resposta estrutural seja oriunda da falha ou não falha.

- **Aceleração do Segundo Andar**

Com relação ao sinal sem falha, após a transformada de Fourier, plotando a parte absoluta da transformação em relação a frequência, da origem a Figura 30.

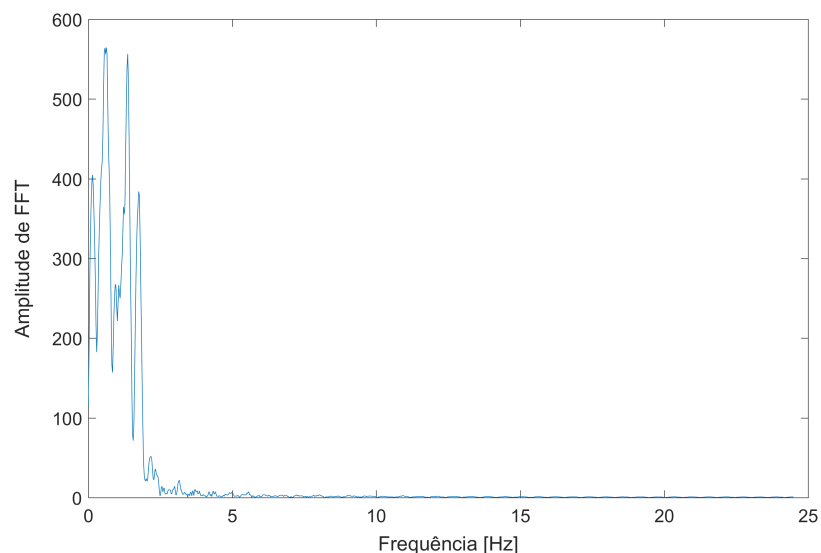
Figura 30 – Transformada da Aceleração sem falha



Fonte: elaborado pelo autor

Com relação ao sinal com falha, após a transformada de Fourier, plotando a parte absoluta da transformação em relação a frequência, da origem a Figura 31.

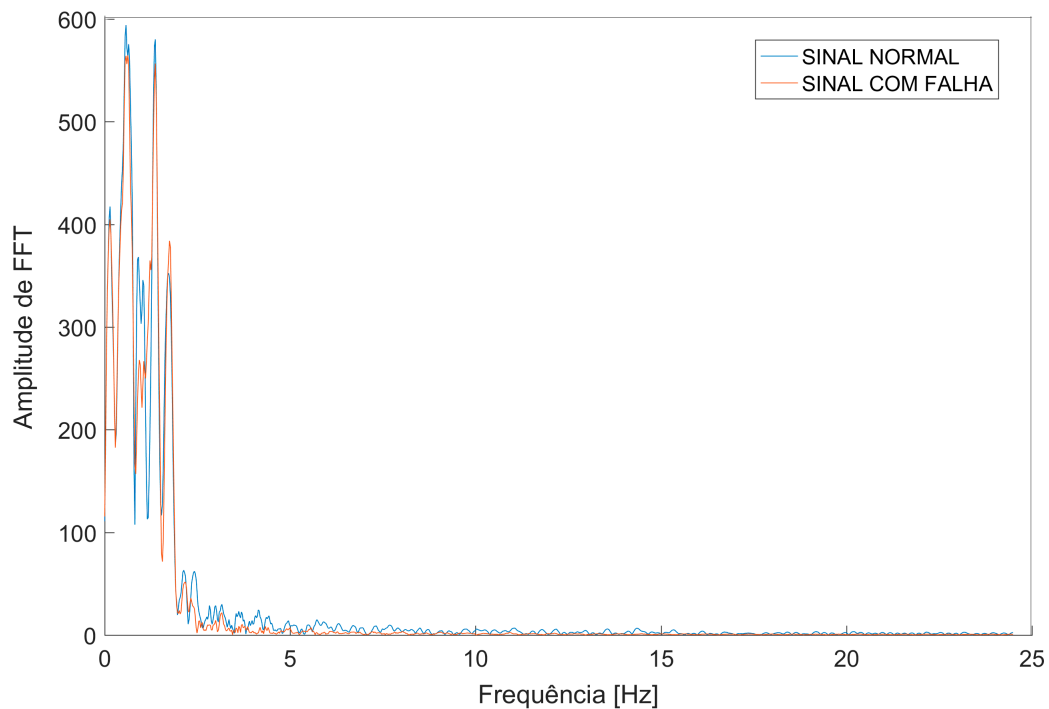
Figura 31 – Transformada da Aceleração com falha



Fonte: elaborado pelo autor

Comparando os dois gráficos, conforme a Figura 32 pode-se denotar, que a resposta acelerativa da estrutura normal e com falha apresenta uma diferença na amplitude. Através dessa diferença é possível determinar o estado estrutural.

Figura 32 – Comparação entre as transformações



Fonte: elaborado pelo autor

Assim ao fim do Experimento, obteve-se dois bancos de dados um com características de falha estrutural e outro característico de uma estrutura normal, já discretizados pela Transformada de Fourier.

Entretanto, o processamento de dados e a tomada de decisão seria inviável pela análise humana devido a quantidade de pontos e a premissa do erro humano. Por isso, os resultados advêm da etapa de saída oriunda do processamento do algoritmo de seleção negativa estabelecido na inteligência artificial.

O algoritmo tem por saída, conforme dito anteriormente, o tempo de processamento, a taxa de acerto e o número de sinais com e sem falhas identificados definindo assim a tomada de decisão.

É válido destacar que o processamento de dados foi supervisionado afim de averiguar o sistema implementado. Desta forma, o processamento foi subdividido em três tipos: processamento sequenciado, processamento Randômico Não Próprio, processamento Randômico Próprio, simulando situações adversas e reais.

Por isso o resultados também será dividido apresentando o Resultado do Processamento Sequenciado, o Resultado do Processamento Randômico Não Próprio e o Resultado do Processamento Randômico Decrescente Próprio .

Entretanto ao implementar uma vez o algoritmo não é estatisticamente comprovada sua normalidade e logo tais dados podem ser idealizados Observando a ferramenta de

validação de amostras estatística (Teoria da Curva Padrão), um resultado é tido com real, se a amostra representar a característica de distribuição normal. Tal distribuição é garantida pela composição de no mínimo trinta amostras, sendo, portanto, o valor numérico real definido pela media das amostras. Por isso implementou-se para cada caso trinta iterações do algoritmo

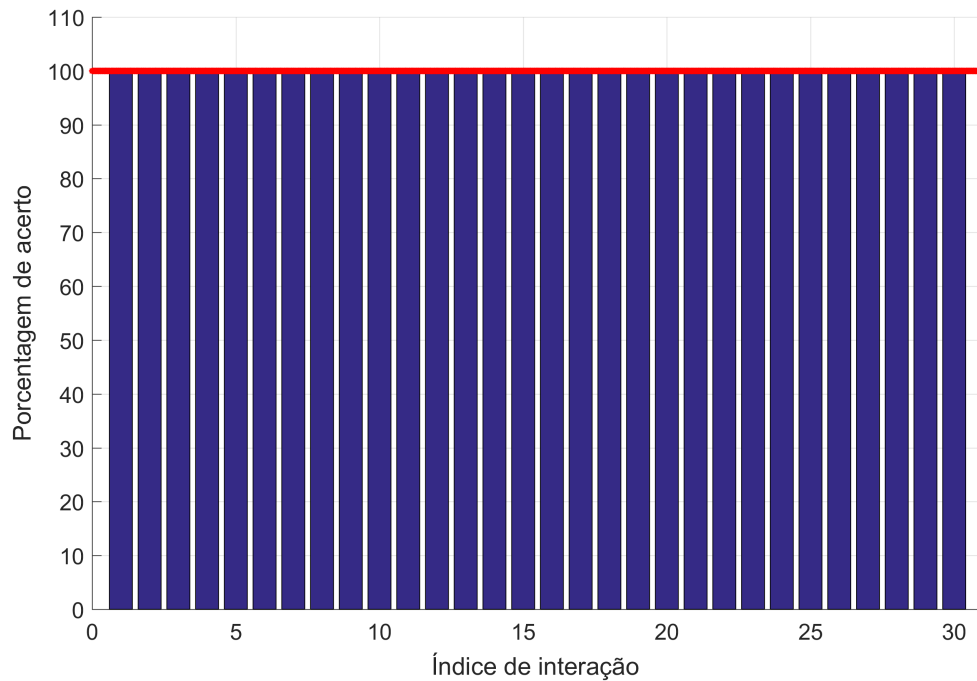
Vale destacar que esses resultados foram apresentados de forma concisa em um gráfico de barras que representa a cada iteração o módulo da saída oriunda do processamento: tempo de processamento ou porcentagem de acerto. Sendo a linha vermelha a media desses parâmetros.

8.1 Resultado do Processamento Sequenciado

O Processo Sequenciado foi definido como entrada 4 sinais próprios e 117 sinais não próprios. Após o processamento inicial, obteve-se uma taxa de acerto de 100% com um tempo de processamento de 0.34 segundos. Como houve um acerto máximo o algoritmo identificou que a matriz de verificação era constituída de 4 sinais próprios e 117 sinais não próprios

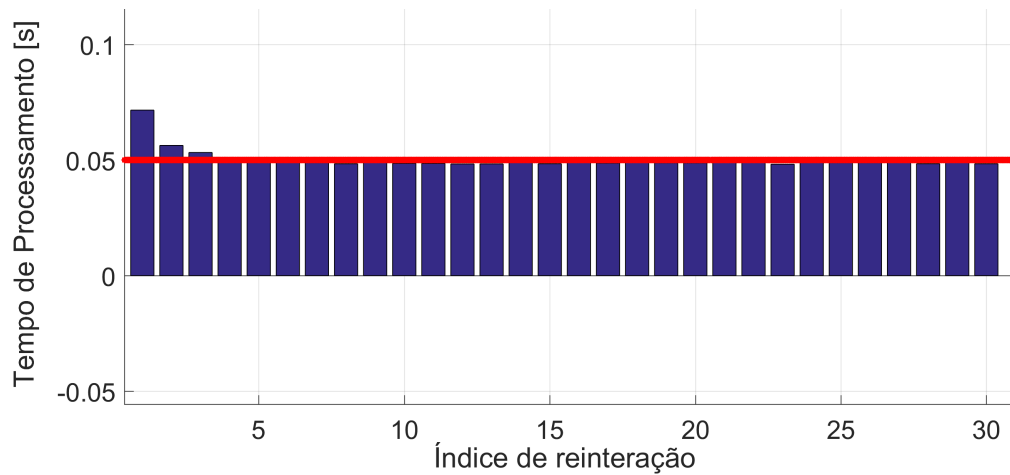
Entretanto, conforme definido, este resultado pode ser idealizado. Por isso, ao repetir trinta vezes o algoritmo, obteve-se por resultado o gráfico de porcentagem de acerto, representado na 33 e o gráfico do tempo de processamento, representado pela figura 34. Observando os valores médios houve uma Taxa de acerto de 100% com um tempo de processamento de 0.05 segundos.

Figura 33 – Taxa de acerto para cada iteração



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 34 – Tempo de processamento para cada iteração



Fonte: Elaborado pelo autor.

8.2 Resultado do Processamento Randômico Não Próprio

Neste método foi utilizado fixamente quatro sinais normais e variado, randomicamente, o número de sinais não próprios estruturais a cada iteração. Com esse método, é avaliado a eficiência do algoritmo para varias taxas de afinidade mas também representa a relação entre o processamento e o conhecimento a respeito dos sinais com falhas.

Por isso a Tabela 4, representa para as trintas iterações realizadas, o número de sinais com falha usados.

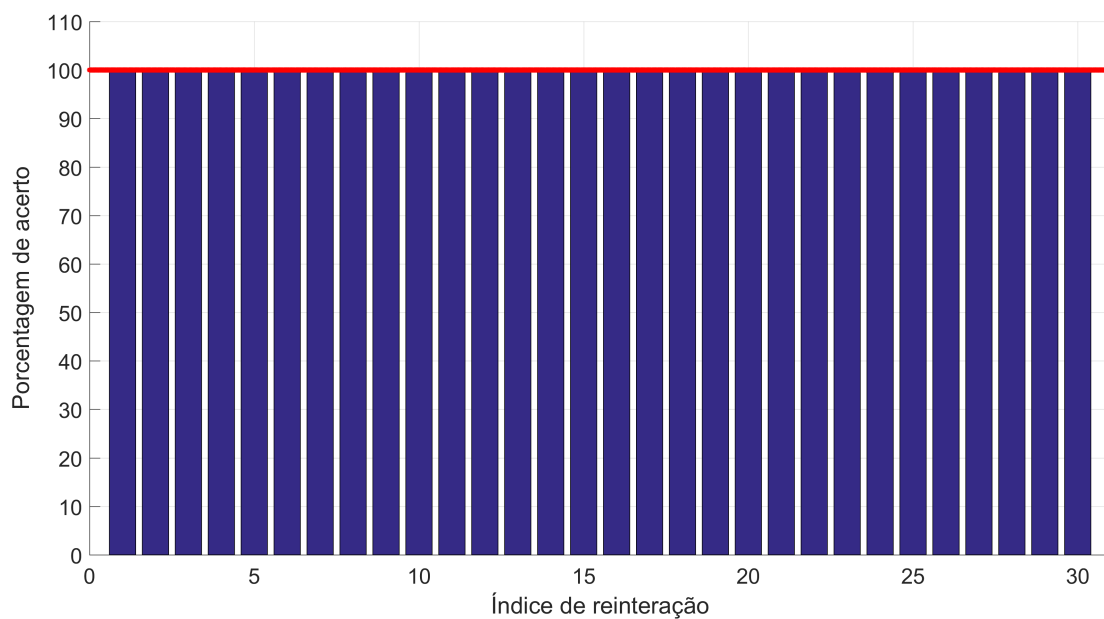
Tabela 4 – Número de Falhas implementados na análise

Iterações	Número de Sinais com Falhas	Iterações	Número de Sinais com Falhas
1	7	16	33
2	105	17	107
3	76	18	116
4	16	19	21
5	113	20	85
6	73	21	66
7	23	22	50
8	81	23	41
9	35	24	15
10	66	25	99
11	14	26	37
12	105	27	71
13	10	28	117
14	25	29	97
15	25	30	92

Fonte: Elaborado pelo autor

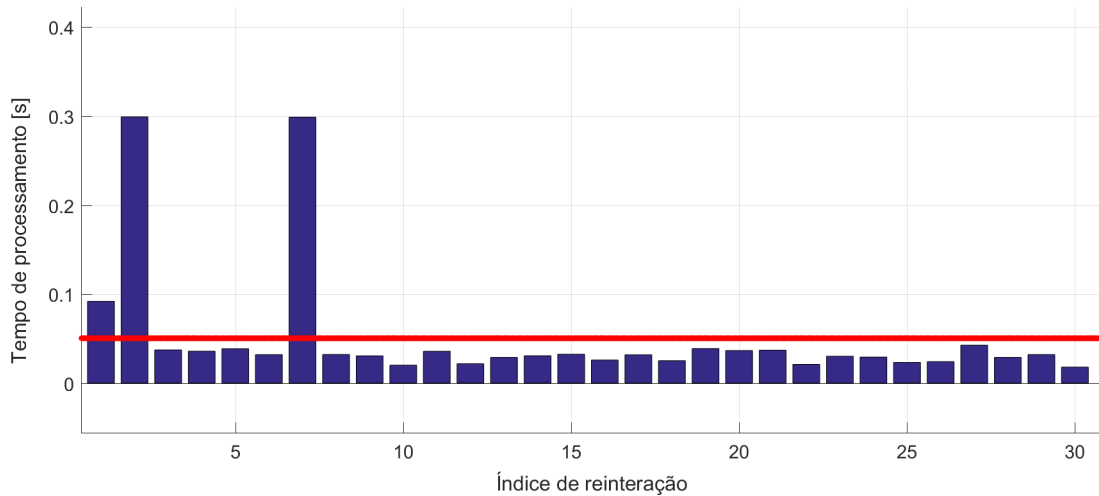
Obteve-se por resultado o gráfico de porcentagem de acerto, representado na 35 e o gráfico do tempo de processamento, representado pela figura 36. Observando os valores médios houve uma Taxa de acerto de 100% com um tempo de processamento de 0.0504 segundos.

Figura 35 – Taxa de acerto para cada iteração



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 36 – Tempo de processamento para cada iteração



Fonte: Elaborado pelo autor.

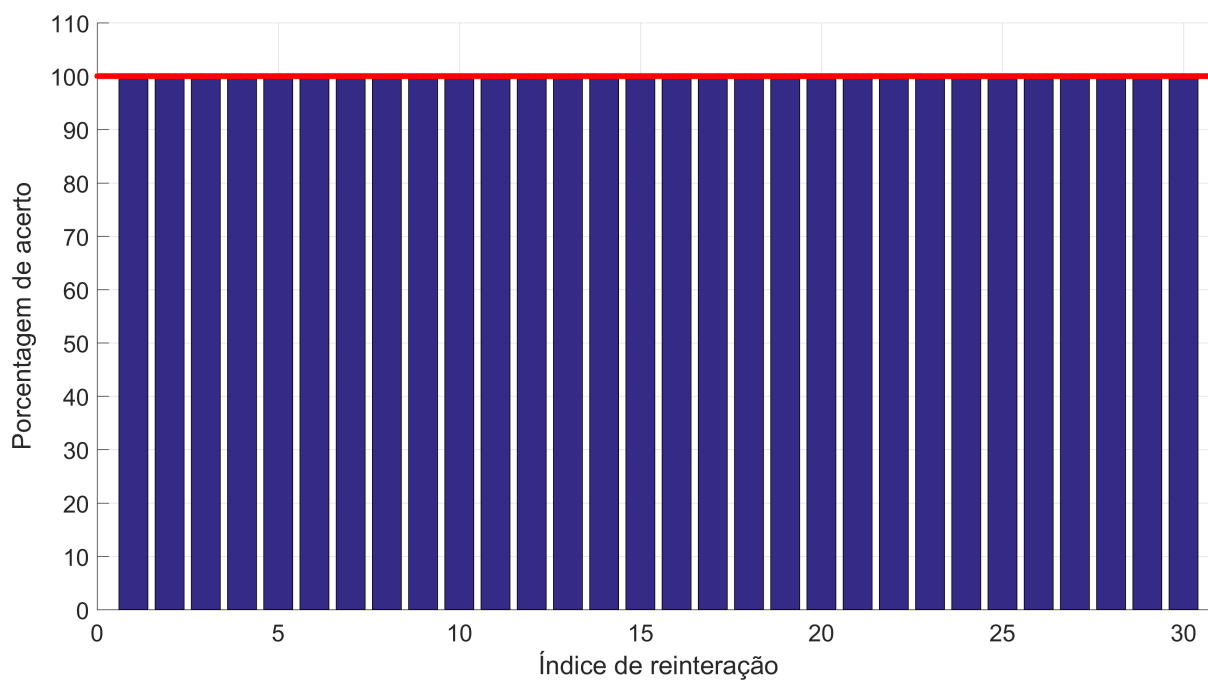
8.3 Resultado do Processamento Randômico Próprio

Neste método foi utilizado fixamente 117 sinais com falhas e variado, decrescentemente, o número de sinais próprios estruturais a cada iteração. Com esse método, é avaliado a eficiência do algoritmo para varias taxas de afinidade, mas também, representa a relação entre o processamento e o conhecimento a respeito dos sinais sem falhas.

Como este banco é constituído por quatro sinais normais, desenvolveu-se uma entrada decrescente do número de sinais sem falha iniciando com quatro sinais e finalizando com um sinal. Vale destacar que a alocação dos sinais para composição da Matriz de verificação foi realizado de ordem randômica.

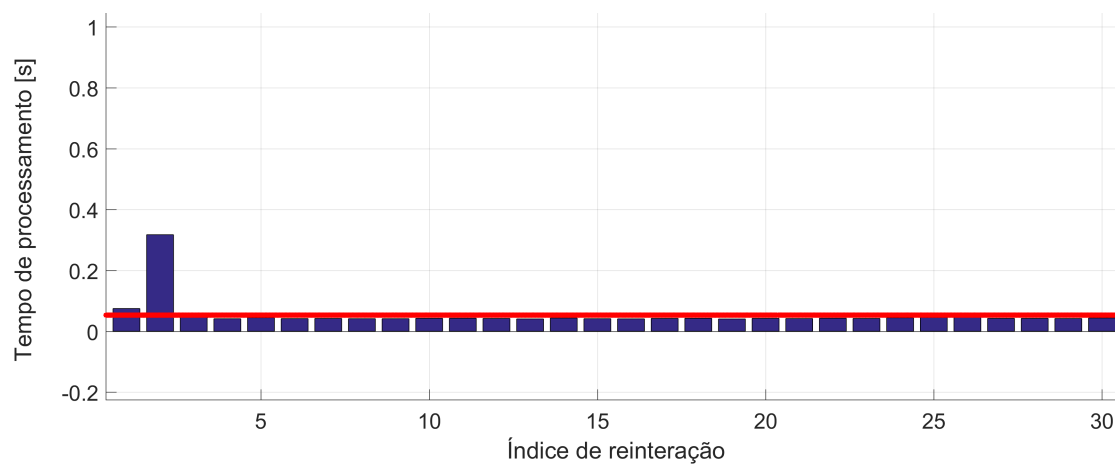
Para o desenvolvimento com quatro sinais próprios, obteve-se por resultado o gráfico de porcentagem de acerto, representado na Figura 37 e o gráfico do tempo de processamento, representado pela Figura 38. Observando os valores médios houve uma Taxa media de acerto de 100% com um tempo de processamento de 0.0531 segundos.

Figura 37 – Taxa de acerto para quatro sinais normais por interação



Fonte: Elaborado pelo autor.

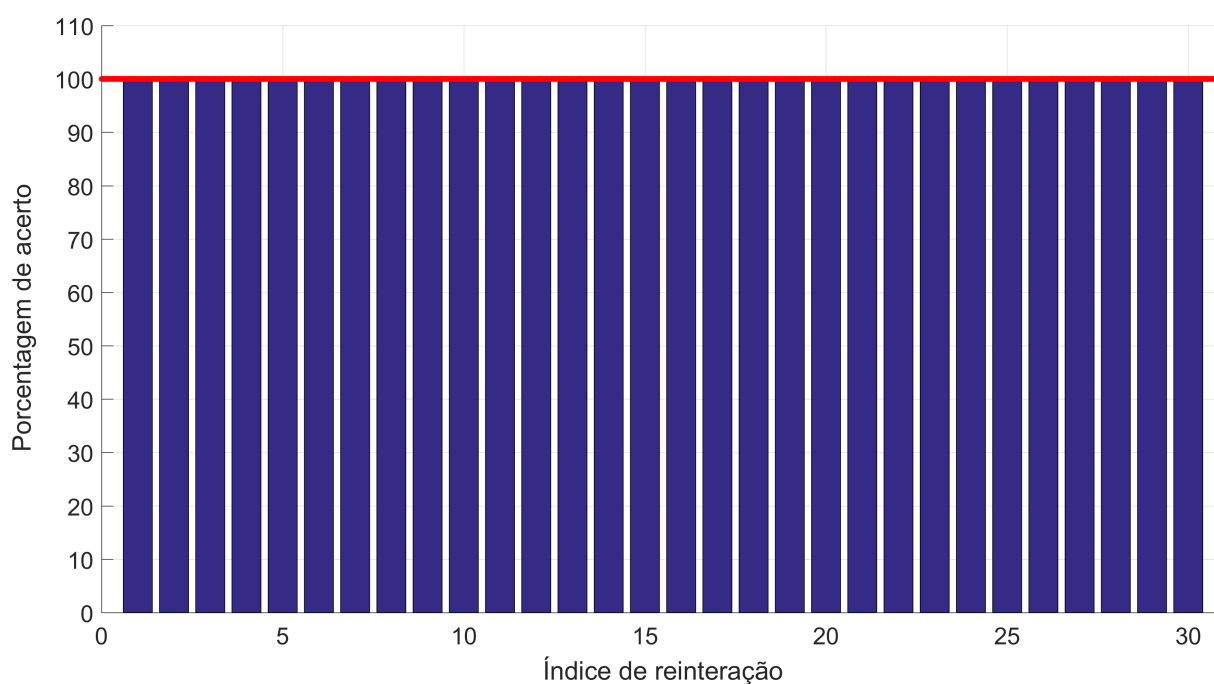
Figura 38 – Tempo de processamento para cada interação



Fonte: Elaborado pelo autor.

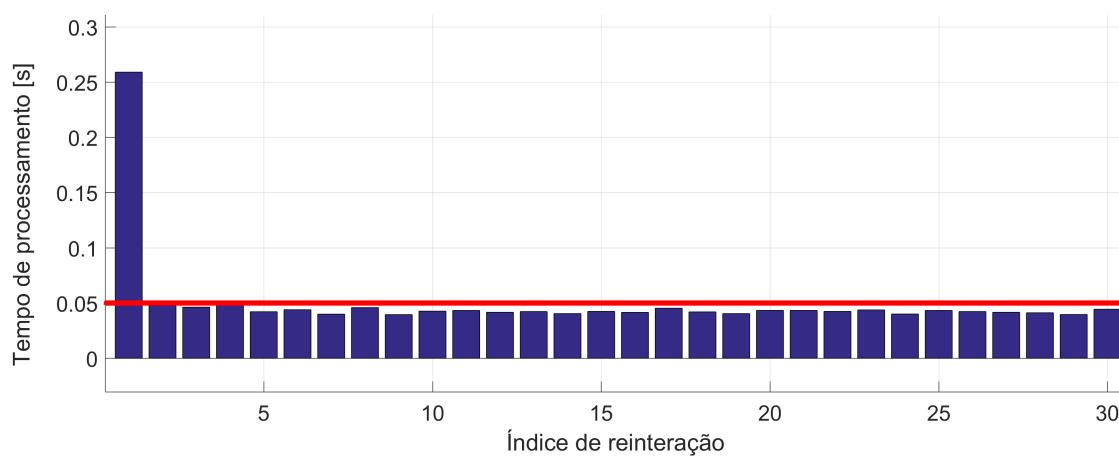
Para o desenvolvimento com três sinais próprios, obteve-se por resultado o gráfico de porcentagem de acerto, representado na Figura 39 e o gráfico do tempo de processamento, representado pela Figura 40. Observando os valores médios houve uma Taxa de acerto de 100% com um tempo de processamento de 0.05 segundos.

Figura 39 – Taxa de acerto para três sinais normais por interação



Fonte: Elaborado pelo autor.

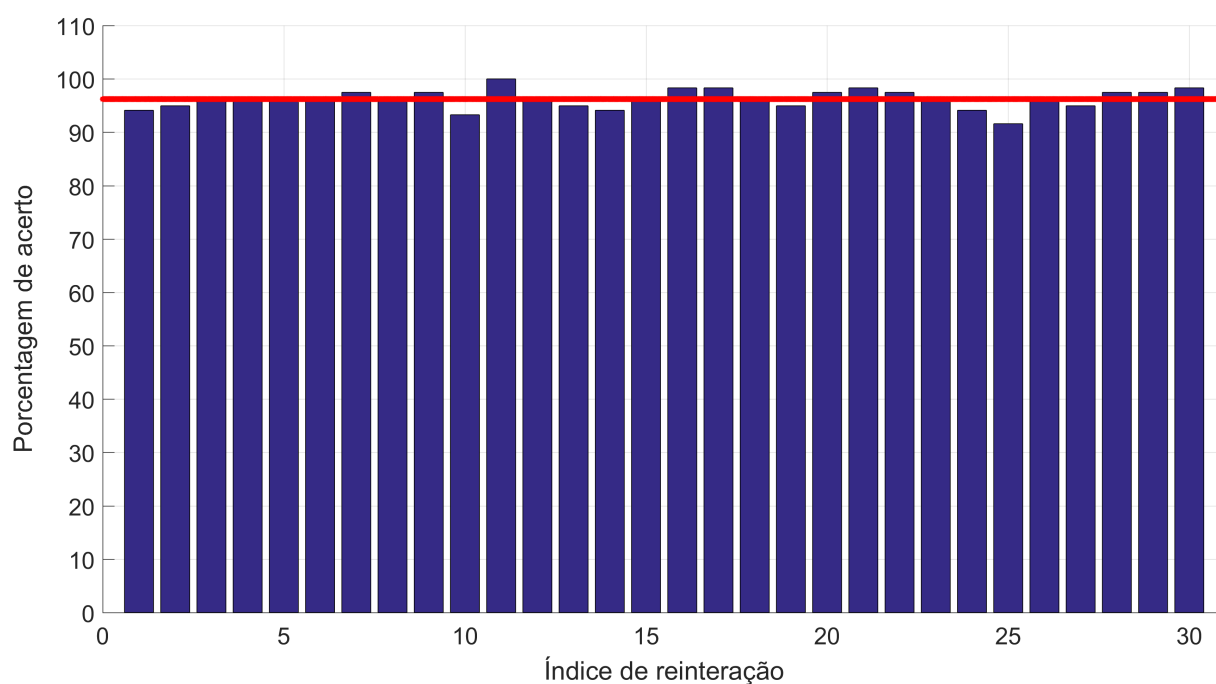
Figura 40 – Tempo de processamento para cada interação



Fonte: Elaborado pelo autor.

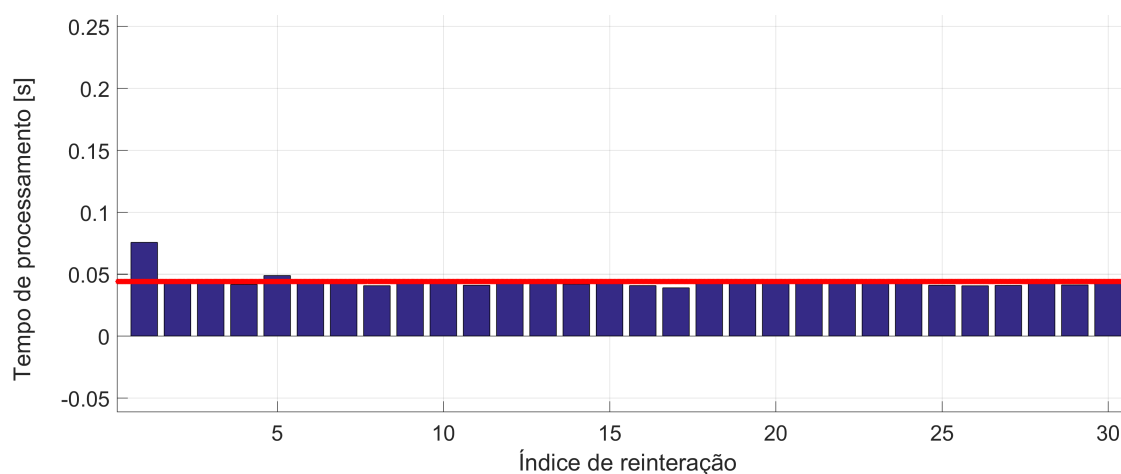
Para o desenvolvimento com dois sinais próprios, obteve-se por resultado o gráfico de porcentagem de acerto, representado na Figura 41 e o gráfico do tempo de processamento, representado pela Figura 42. Observando os valores médios houve uma Taxa de acerto de 98.32% com um tempo de processamento de 0.044 segundos.

Figura 41 – Taxa de acerto para dois sinais normais por iteração



Fonte: Elaborado pelo autor.

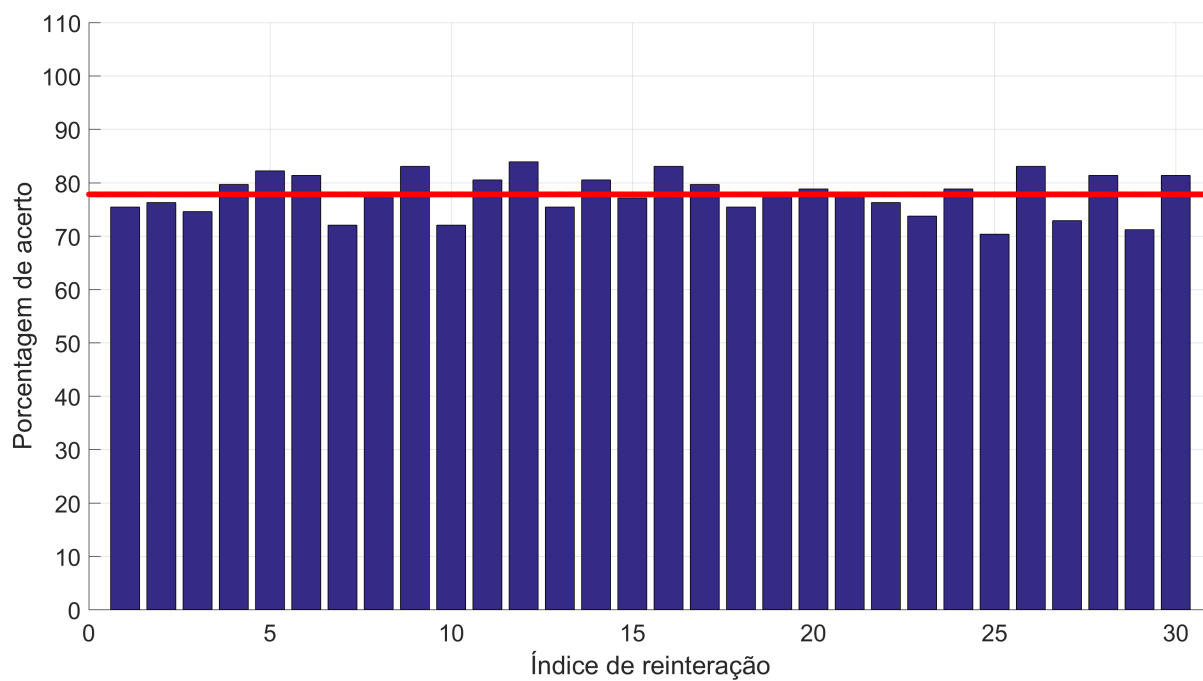
Figura 42 – Tempo de processamento para cada interação



Fonte: Elaborado pelo autor.

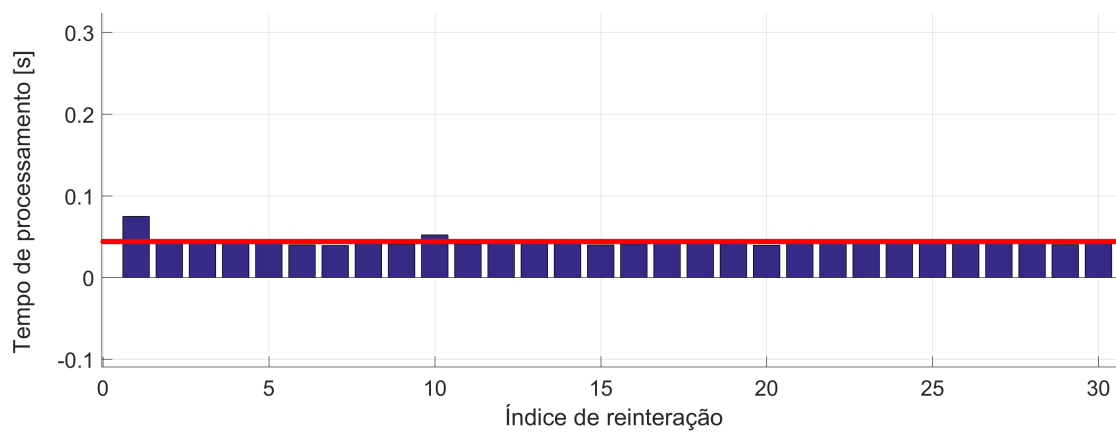
Para o desenvolvimento com um sinal próprio, obteve-se por resultado o gráfico de porcentagem de acerto, representado na Figura 43 e o gráfico do tempo de processamento, representado pela Figura 44. Observando os valores médios houve uma Taxa de acerto de 81.36% com um tempo de processamento de 0.04 segundos.

Figura 43 – Taxa de acerto para um sinal normal por interação



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 44 – Tempo de processamento para cada interação



Fonte: Elaborado pelo autor.

8.4 Discussão

Observando os resultados obtidos, há muitos pontos a serem discutidos. Para haver um entendimento e uma melhor organização, essa discussão foi subdividida: Tempo de processamento, Relação do Não Próprio e Relação Própria.

8.4.1 Tempo de processamento

Primeiramente ao observar todos os gráficos, denotou-se um pico inicial nas primeiras iteração. Este pico inicial representa a fase de aprendizagem do algoritmo (Censoriamento). Logo após o ANS definir sua *Baseline*, o processamento é realizado mais rapidamente.

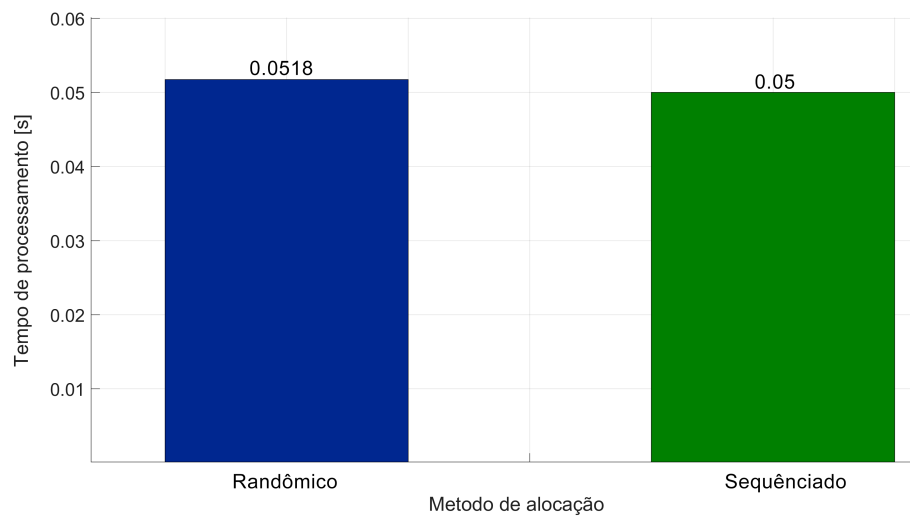
Estudando mais afim este pico inicial, pelos resultados finais (Processamento Randômico Próprio), Foi possível compreender que o este pico está relacionado ao número de sinais próprios estabelecidos na entrada, afinal denota-se um decréscimo no tempo de processamento com o decréscimo do número de sinais próprios utilizados nas interações iniciais.

Este resultado tem haver com a definição da *Baseline* (conjunto de cadeias próprias). Conforme houve a diminuição do número de sinais próprios, o processamento na etapa de Censoriamento ocorreu mais rapidamente.

Entretanto, obviamente após a etapa inicial de Censoriamento, o número de sinais monitorados influência o tempo de processamento. Isto é representado na Figura 36, com o aumento do número de sinais não próprios utilizado houve um aumento proporcional do tempo de processamento.

Ademais, vale destacar que ao observar especificamente tal parâmetro nas formas de Alocação na Matriz de Verificação, percebe-se uma grande diferença, destacado na Figura 45. Esta diferença é normal conforme aponta o embasamento teórico, pois este sistema funciona de uma maneira condicionado a gerar um número randômico para cada linha da matriz.

Figura 45 – Comparação entre os tempos de alocação



Fonte: Elaborado pelo autor.

Apesar da diferença dos métodos, em uma análise global, o algoritmo apresenta um tempo de processamento muito rápido (menos de um segundo). Isto é muito vantajoso na análise estrutural, afinal o dano estrutural pode evoluir para uma falha estrutural em segundos.

8.4.2 Relação do Não Próprio

O processamento Randômico não próprio foi realizado para uma análise a respeito da precisão do algoritmo em varias taxas de afinidade (diversificados valores de sinais com falha).

Observando o gráfico de acertos, denota-se que a variação do números de sinais não próprios, que é avaliada, não influênciava a taxa de acerto, afinal esta foi de 100%.

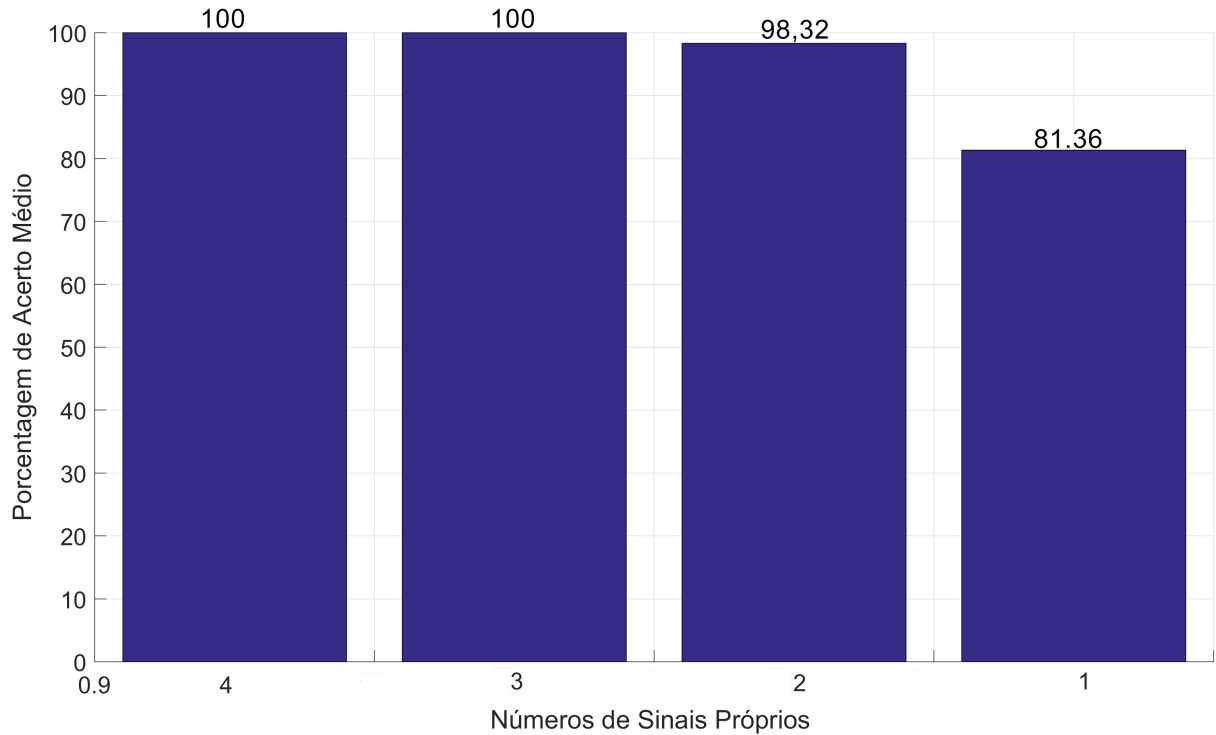
Isto dentro da teoria era o esperado, a precisão do ANS não apresenta relação com os sinais não próprios, pois, o Censoriamento esta interligado ao aprendizado e memória dos sinais próprios. Além disso tudo, o acerto estar estabelecido em 100% marca uma excelente precisão e um correto funcionamento.

8.4.3 Relação do Próprio

Conforme dito anteriormente e estabelecido no embasamento teórico, O ANS é estritamente ligado a Etapa de Censoriamento e consequentemente com os sinais próprios. Por esse motivo, os resultados do Processamento Randômico Próprio simbolizavam um ponto importante para a avaliação do algoritmo.

Ao observar os resultados, ou melhor, a taxa de acerto do algoritmo, fica evidente que esta intrinsecamente relacionado ao número de sinais próprios, representado pela Figura 46.

Figura 46 – Comparação entre as porcentagens de acerto



Fonte: Elaborado pelo autor.

Através desses gráficos, denota-se que a precisão do Algoritmo de Seleção Negativa é oriundo dos aprendizado desenvolvido na etapa de Censoriamento. Logo, é evidente que quanto mais sinais próprios, mais aprendizado o algoritmo obterá e melhor será sua precisão.

9 Conclusão

Este trabalho teve por foco a implementação de um sistema de integridade estrutural para realizar a identificação e caracterização das falhas estruturais em um de edifício de dois andares, tendo por diferencial o processamento e tomada de decisão baseado na Inteligência artificial.

Observando os resultados obtidos a associação do SHM com processamento inteligente apresentou-se altamente eficiente tendo, mesmo com um baixo aprendizado uma acurácia e precisão superior a 80% associado a um tempo de processamento inferior a um segundo. Isto demonstra seu potencial de não só processar os dados obtidos do SHM, mas também, otimiza-lo.

Portanto, para resolver o grande problema da sociedade, a falha estrutura, esta pesquisa desenvolveu um sistema de Monitoramento de Integridade Estrutural que apresentasse uma alta viabilidade e associá-lo ao Sistema Imunológico Artificial, caracterizado por uma alta eficiência. Assim, a detecção de falhas com o SHM e o SIA pode ocorrer de forma viável, robusta e eficiente.

Todavia, é valido destacar que, o sistema de manutenção preditivo proposto para ser implementado em uma estrutura real necessita de evoluções.

O Sistema de Integridade Estrutural é definido como uma Manutenção Preditiva. Assim, este sistema não se sintetiza somente na detecção de falhas, mas também, na localização da falha na estrutura analisada e a quantificação desta na estrutura.

Além disso, observando uma estrutura real, a caracterização do dano varia com os fatores ambientais, temporais e humano e logo o algoritmo de processamento necessita ter a habilidade de um aprendizado não supervisionado, ou seja "autodidata".

Desta forma, com a capacidade evolutiva de detectar, localizar e quantificar as falhas estruturais e ter um autoaprendizado, o Sistema de Integridade Estrutural com processamento baseado em inteligência artificial apresentará capacidade de monitorar não só um edifício real de dois andares mas qualquer estrutura civil mecânica ou elétrica.

Mesmo assim observando o trabalho total, o Sistema de Monitoramento de Integridade Estrutural associado ao Sistema Imunológico Artificial já caracteriza uma inovação para o ramo estrutural, pois, transforma o principal determinante estrutural em um "corpo humano". Ou seja, em uma máquina complexa e perfeita com todas as suas partes funcionando em sincronia e sem falhas potenciais.

Referências

- ATALLA, N.; SGARD, F. *Finite element and boundary methods in structural acoustics and vibration*. [S.l.]: CRC Press, 2015.
- BALAGEAS, D.; FRITZEN, C.-P.; GÜEMES, A. *Structural health monitoring*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2010. v. 90.
- CALICH, V. L. G. et al. *Imunologia*. [S.l.]: Livraria e Editora RevinteR Ltda., 2001.
- CASTRO, L. N. de. Engenharia imunológica: desenvolvimento e aplicação de ferramentas computacionais inspiradas em sistemas imunológicos artificiais. *Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP*, 2001.
- CHAPUIS, B.; SJERVE, E. *Sensors, Algorithms and Applications for Structural Health Monitoring: IIW Seminar on SHM, 2015*. [S.l.]: Springer, 2017.
- CHAVES, J. S. Monitoramento e classificação de falhas em estruturas utilizando redes neurais artificiais. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2016.
- FORREST, S. et al. Self-nonsel self discrimination in a computer. In: IEEE. *Research in Security and Privacy, 1994. Proceedings., 1994 IEEE Computer Society Symposium on*. [S.l.], 1994. p. 202–212.
- GOPALAKRISHNNAN, S.; RUZZENE, M.; HANAGUD, S. *Computational techniques for structural health monitoring*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2011.
- LIMA, F. P. d. A. Monitoramento e identificação de falhas em estruturas aeronáuticas e mecânicas utilizando técnicas de computação inteligente. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2014.
- LIMA, F. P. d. A. Diagnóstico de distúrbios de tensão em sistemas de distribuição baseado num sistema imunológico artificial com aprendizado continuado. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2016.
- RAO, S. S. *Vibrações mecânicas*. [S.l.]: Pearson Educación, 2009.
- ROITT, I. et al. *Imunologia, 5ª Edição*. [S.l.]: Editora Manole LTDA São Paulo-SP, 1999.
- SANTOS, A. D. F. D.; OTHERS. Proposta de gerenciamento de dados para monitoramento de saúde estrutural utilizando redes de sensores ópticos fbg. Universidade Federal do Pará, 2014.
- SIQUEIRA, I. P. D. *Manutenção centrada na confiabilidade*. [S.l.]: Qualitymark Editora Ltda, 2005.
- THOMSON, W. T. *Teoria da vibração com aplicações*. [S.l.]: Intersciencia, 1978.
- WANG, M.; SATPATHI, D.; HEO, G. Damage detection of a model bridge using modal testing. *Technomic Publishing Co, Inc, Structural Health Monitoring: Current Status and Perspectives(USA)*, p. 589–600, 1997.

XENOS, H. G. Gerenciando a manutenção produtiva. *Belo Horizonte: Editora de Desenvolvimento Gerencial*, v. 171, 1998.