



Universidade Federal do Rio de Janeiro

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**IGOR LEÃO DOS SANTOS**

SENSOR-SHM: um algoritmo localizado baseado em fusão de informação para monitoramento da integridade de estruturas civis usando redes de sensores sem fio

RIO DE JANEIRO  
2013



Instituto de Matemática



Instituto Tércio Pacitti de Aplicações  
e Pesquisas Computacionais

Igor Leão dos Santos

SENSOR-SHM: um algoritmo localizado baseado em fusão de informação para monitoramento da integridade de estruturas civis usando redes de sensores sem fio

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Informática da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Informática.

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Luci Pirmez, D. Sc.

Rio de Janeiro

2013

S237 Santos, Igor Leão dos S..

Sensor-SHM: um algoritmo localizado baseado em fusão de informação para monitoramento da integridade de estruturas civis usando redes de sensores sem fio / Igor Leão dos Santos. -- 2013. 126 f.: il.

Dissertação (Mestrado em Informática) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-graduação em Informática, Instituto de Matemática, Instituto Tércio Pacitti, Rio de Janeiro, 2013.

Orientadora: Luci Pirmez.

1. Rede de Sensores Sem Fio. 2. Structural Health Monitoring. 3. Fusão de Informação. 4. Algoritmos Localizados – Teses. I. Pirmez, Luci (Orient.). II. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Programa de Pós-graduação em Informática. Instituto de Matemática. Instituto Tércio Pacitti. III. Título.

CDD:

Igor Leão dos Santos

Sensor-SHM: um algoritmo localizado baseado em fusão de informação para monitoramento da integridade de estruturas civis usando redes de sensores sem fio

Dissertação de Mestrado submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Informática da Universidade Federal do Rio de Janeiro e à banca externa convidada como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Informática.

Aprovada em: Rio de Janeiro, \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_.

---

Prof<sup>a</sup>. Luci Pirmez – Orientadora  
D. Sc., COPPE/UFRJ, Brasil.  
UFRJ/PPGI

---

Prof<sup>a</sup>. Flávia Coimbra Delicato  
D. Sc., COPPE/UFRJ, Brasil.  
UFRJ/PPGI

---

Prof. Raphael Carlos Santos Machado  
D. Sc., COPPE/UFRJ, Brasil.  
INMETRO

Rio de Janeiro

2013

Dedico esse trabalho a toda a minha família, em especial aos meus pais Matilde e Maurício, e à minha tia Vera.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por ter me permitido estar nesse caminho e alcançar esse resultado tão sonhado, me mantendo forte e determinado nos momentos mais difíceis.

Aos meus familiares, todos, por todo o suporte, compreensão e incentivo durante essa caminhada e todas as outras anteriores.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), que contribuiu com recursos essenciais para a realização dessa pesquisa.

Aos colegas do Laboratório de Redes Sem Fio e Multimídia (Labnet) do PPGI/UFRJ, por onde muitos alunos passaram ao longo de cinco anos. Agradeço a todos (e não apenas aos que por lá estiveram durante os últimos dois anos do mestrado) pela oportunidade de convivência e troca de conhecimento valioso.

Especialmente, aos colegas Érico T. Lemos e Maicon M. Alves, que concluíram suas dissertações sobre temas relacionados ao do presente trabalho. Sem dúvida qualquer visão construída no presente trabalho é fruto também da participação de vocês. Ao colega Claudio M. de Farias, que frente às inúmeras tarefas autoimpostas no cotidiano sempre encontrou alguma forma de desviar sua atenção para ajudar a mim, assim como a todos os colegas do Labnet. À colega Emanuele N. de L. F. Jorge, por torcer e conseguir me convencer de que há muito mais coisas ao alcance do que eu conseguia enxergar. E ao colega João H. V. da Silva, que me ofereceu a primeira oportunidade de organizar meus conhecimentos de forma didática e me permitiu desenvolver novas capacidades.

À minha orientadora, Luci Pirmez, que com muita sabedoria e paciência guiou todos os passos e abriu todas as portas necessárias para a conclusão desse trabalho, e de todos os outros. São mais de cinco anos de orientação sempre presente e dedicada, nos quais aprendi valiosas lições através de sua visão apurada, que viabilizaram a construção de todos os meus trabalhos. Agradeço especialmente também por toda a sua ajuda desempenhada além do papel de orientadora, o que se torna essencial em um período de longa convivência.

Também aos demais professores do PPGI, em especial a: Flávia C. Delicato, Silvana Rossetto, e Luiz F. Rust da Costa Carmo, pelos ensinamentos, orientações, correções e coautorias em diversos trabalhos. Sem suas ajudas seria impossível concluir tantos trabalhos.

Aos professores do LEDAV/COPPE/UFRJ, especialmente Luiz Vaz e Ulisses Monteiro, por todo o conhecimento básico na área de análise de vibração, sem o qual esse trabalho seria inviável.

Ao professor Maurício Arouca do Programa de Planejamento Energético da COPPE/UFRJ, pela disponibilidade de tempo e recursos. E também aos sócios e colaboradores da Enersud, principalmente Luiz Cezar e Claudio pelo apoio técnico.

*“When you use information from one source,  
It’s plagiarism;  
When you use information from many,  
It’s information fusion”.*

*– Dr. Belur V. Dasarathy*

Editor-in-Chief  
Information Fusion Journal (2013)

## RESUMO

SANTOS, Igor Leão dos. **SENSOR-SHM**: um algoritmo localizado baseado em fusão de informação para monitoramento da integridade de estruturas civis usando redes de sensores sem fio. 2013. 126 f. Dissertação (Mestrado em Informática) – Programa de Pós-Graduação em Informática, Instituto de Matemática, Instituto Tércio Pacitti, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

O monitoramento da integridade estrutural, ou *Structural Health Monitoring* (SHM) tem provado ser um domínio de aplicação apropriado para Redes de Sensores Sem Fio (RSSF), cujas técnicas procuram avaliar autonomamente a integridade das estruturas, por vezes com o objetivo de detectar e localizar danos. Nesse trabalho propõe-se um algoritmo localizado e apoiado por técnicas de fusão de informação em vários níveis para permitir a detecção, localização e determinação da extensão dos locais de dano, usando o ambiente de recursos limitados de uma RSSF. Cada um dos nós participa em diferentes tarefas da rede e possui uma visão local da situação. Mecanismos de colaboração e técnicas de fusão de informação em vários níveis são os principais artifícios dessa proposta para atingir seu objetivo. Os resultados experimentais, com a plataforma de RSSF MICAz mostraram que o algoritmo opera de forma satisfatória em termos da utilização dos recursos da rede.

Palavras-chave: Rede de Sensores Sem Fio. *Structural Health Monitoring*. Fusão de Informação. Algoritmo Localizado

## ABSTRACT

SANTOS, Igor Leão dos. **SENSOR-SHM**: um algoritmo localizado baseado em fusão de informação para monitoramento da integridade de estruturas civis usando redes de sensores sem fio. 2013. 126 f. Dissertação (Mestrado em Informática) – Programa de Pós-Graduação em Informática, Instituto de Matemática, Instituto Tércio Pacitti, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

Structural Health Monitoring (SHM) has been proving to be a suitable application domain for wireless sensor networks, whose techniques attempt to autonomously evaluate the integrity of structures, occasionally aiming at detecting and localizing damage. In this paper, we propose a localized algorithm supported by multilevel information fusion techniques to enable detection, localization and extent determination of damage sites using the resource constrained environment of a wireless sensor network. Each node partakes in different network tasks and has a localized view of the whole situation, so collaboration mechanisms and multilevel information fusion techniques are key components of this proposal to efficiently achieve its goal. Experimental results with the MICAz mote platform showed that the algorithm performs well in terms of network resources utilization.

Keywords: Wireless Sensor Networks. Structural Health Monitoring. Information Fusion. Localized Algorithm

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Visão geral do algoritmo Sensor-SHM.....	51
Figura 2.	Diagramas de componentes para (a) nós sensores e (b) nós CH.....	67
Figura 3.	Ambiente da simulação.....	79
Figura 4.	Ambiente com nós sensores reais.....	80
Figura 5.	Topologias utilizadas no conjunto de experimentos A.1.....	87
Figura 6.	Resultados obtidos no experimento A.1.....	90
Figura 7.	Topologias dos cenários do experimento A.2.1.....	91
Figura 8.	Topologias dos cenários do experimento A.2.2.....	92
Figura 9.	Resultados do experimento A.2.1.....	93
Figura 10.	Resultados do experimento A.2.2.....	94
Figura 11.	Topologia utilizada no experimento B.1.....	97
Figura 12.	Variações de $\omega_{i,t}$ para nós 1, 3 e 5.....	99
Figura 13.	Variação de $C_{j,t}$ por cluster durante as fases de coleta de dados.....	101

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Síntese da proposta de classificação.....	46
Tabela 2.	Padrões de dano.....	74
Tabela 3.	Possíveis casos de atribuições de padrões de dano.....	75
Tabela 4.	Comparação do Sensor-SHM com trabalhos relacionados.....	109

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AR – Autoregressive  
ARMA – Autoregressive Moving Average  
CDED – Collaborative Damage Event Detection  
CH – Cluster-Head  
DAI-DAO – Data In–Data Out  
DAI-FEO – Data In–Feature Out  
DDID – Distributed Damage Index Detection  
DEI-DEO – Decision In–Decision Out  
DFD – Data-Feature-Decision  
DLAC – Damage Localization Assurance Criterion  
DMS – Dynamic Modulation Scaling  
DVS – Dynamic Voltage Scaling  
ERA – Eigensystem Realization Algorithm  
FEI-DEO – Feature In–Decision Out  
FEI-FEO – Feature In–Feature Out  
FFT – Fast Fourier Transform  
FPCF – Fractional Polynomial Curve-fitting  
LEACH – Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy  
MAC – Medium Access Control  
MDLAC – Multiple Damage Localization Assurance Criterion  
MEMS – Micro Electromechanical Systems  
MEF – Modelagem de Elementos Finitos  
RAM – Random Access Memory  
ROM – Read Only Memory  
RASSF – Rede de Atuadores e Sensores sem Fio  
RSSF – Rede de Sensores sem Fio  
SHM – Structural Health Monitoring  
SKATER – Spatial “K”luster Analysis Through Edge Removal  
UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>16</b>
1.1	Objetivo.....	18
1.2	Contribuições .....	20
1.3	Organização do trabalho .....	21
<b>2</b>	<b>Conceitos básicos .....</b>	<b>22</b>
2.1	Redes de Sensores Sem Fio .....	22
2.2	Fusão de informação .....	24
2.3	<i>Structural Health Monitoring</i> .....	28
2.4	Requisitos das técnicas modais em soluções de SHM .....	31
2.5	Considerações finais sobre conceitos básicos.....	34
<b>3</b>	<b>Proposta de classificação das soluções de SHM que usam redes de sensores.....</b>	<b>35</b>
3.1	Critérios de classificação .....	35
3.2	A primeira geração de soluções de SHM que usam redes de sensores.....	36
3.3	A segunda geração de soluções de SHM que usam redes de sensores .....	37
3.4	A terceira geração de soluções de SHM que usam redes de sensores .....	39
3.5	A quarta geração de soluções de SHM que usam redes de sensores.....	45
3.6	Considerações finais sobre a proposta de classificação.....	46
<b>4</b>	<b>Descrição do algoritmo Sensor-SHM.....</b>	<b>49</b>
4.1	Visão geral do algoritmo Sensor-SHM.....	49
4.2	Estruturas de dados.....	51
4.2.1	Estruturas de dados definidas nos sensores .....	51
4.2.2	Estruturas de dados definidas nos CHs .....	52
4.2.3	Tipos e formatos de mensagens de dados .....	53
4.2.4	Tipos e formatos de mensagens de controle .....	54
4.3	Procedimento de setup do Sensor-SHM .....	55
4.4	Ciclo de operação do algoritmo .....	56
4.4.1	Fase de coleta de dados .....	56
4.4.2	Fase de tratamento de dados .....	56
4.4.3	Detecção de dano.....	58
4.4.4	Localização e determinação da extensão de dano .....	59
4.5	Discussão sobre a <i>clusterização</i> frente às necessidades da aplicação SHM .....	61
4.6	Discussão sobre a sincronização frente às aplicações de SHM.....	64
<b>5</b>	<b>Implementação .....</b>	<b>66</b>
5.1	Ambiente de implementação do protótipo .....	66

5.2	Implementação do protótipo .....	66
5.3	Implementação das mensagens de dados e controle.....	68
<b>6</b>	<b>Configurações.....</b>	<b>69</b>
6.1	Implementação de técnicas usadas na fase de tratamento de dados.....	69
6.2	Configuração de parâmetros do Sensor-SHM.....	70
6.3	Limitações no ambiente dos experimentos .....	71
6.3.1	Parâmetros para simular dados de aceleração coletados .....	72
6.3.2	Parâmetros para simular dano na estrutura.....	73
6.4	Simplificações no protótipo do Sensor-SHM .....	76
<b>7</b>	<b>Experimentos com o Sensor-SHM.....</b>	<b>78</b>
7.1	Ambientes dos experimentos .....	78
7.1.1	Ambiente de simulação.....	79
7.1.2	Ambiente com nós sensores reais.....	80
7.1.3	Modelo de energia do simulador Avrrora: AEON.....	81
7.2	Métricas.....	82
7.2.1	Métricas para avaliar o impacto do Sensor-SHM na RSSF .....	82
7.2.2	Métricas para avaliar a eficácia do Sensor-SHM.....	83
7.3	Conjunto de experimentos A: impacto do Sensor-SHM na RSSF.....	85
7.3.1	Descrição dos cenários do conjunto de experimentos A.1.....	86
7.3.2	Resultados do conjunto de experimentos A.1 .....	88
7.3.3	Descrição dos cenários do conjunto de experimentos A.2 .....	91
7.3.4	Resultados do conjunto de experimentos A.2 .....	92
7.4	Conjunto de experimentos B: avaliação da eficácia do Sensor-SHM.....	96
7.4.1	Descrição do cenário do experimento B.1 .....	97
7.4.2	Resultados do experimento B.1 .....	98
7.4.3	Descrição do cenário do experimento B.2 .....	103
7.4.4	Resultados do experimento B.2 .....	106
7.5	Análise comparativa entre o Sensor-SHM e outros trabalhos.....	107
7.5.1	Descrição dos trabalhos escolhidos .....	107
7.5.2	Critérios de comparação .....	108
7.5.3	Consumo de memória .....	109
7.5.4	Latência .....	110
7.5.5	Tráfego de rede .....	111
7.5.6	Tempo de vida da RSSF .....	112
7.5.7	Considerações finais sobre as comparações com outros trabalhos .....	112

<b>8</b>	<b>Conclusões .....</b>	<b>114</b>
8.1	Trabalhos futuros .....	116
<b>9</b>	<b>Referências .....</b>	<b>119</b>

## 1 Introdução

Os avanços crescentes nas áreas de tecnologias sem fio e *Micro Electromechanical Systems* (MEMS) possibilitaram o surgimento de Redes de Sensores Sem Fio (RSSF). As RSSFs representam um novo domínio de computação distribuída que tem atraído grande interesse de pesquisa nos últimos anos. Uma RSSF é composta por um grande número de minúsculos dispositivos, denominados nós sensores, *smart sensors*, ou motes, equipados com uma ou mais unidades de sensoriamento, processador, memória e rádio sem fio. Os sensores são alimentados por baterias não recarregáveis e devem operar sem assistência humana por longos períodos de tempo. Como a maior fonte de consumo de energia nos nós sensores é a transmissão de dados, os protocolos de comunicação para RSSFs visam propor soluções para minimizar a quantidade e o alcance das transmissões a fim de estender o tempo de vida da RSSF. A maioria dos protocolos baseia-se na comunicação de curto alcance em múltiplos saltos (*multihop*) e adota algum mecanismo de fusão ou agregação de informação a fim de reduzir a quantidade de dados a ser transmitida.

Na década recente tem crescido o interesse na utilização de RSSFs (YICK et al. 2008; HATLER et al. 2010) em diferentes aplicações de diversos setores da indústria, como nos setores de exploração e distribuição da indústria de Petróleo e Gás (P&G), e no setor de energias renováveis, particularmente em parques eólicos. Nesses setores, um domínio de aplicação promissor para RSSFs, com vários benefícios potenciais não alcançáveis por meio de técnicas tradicionais de monitoramento, é o monitoramento da saúde das estruturas civis, ou *Structural Health Monitoring* (SHM) (DOEBLING et al. 1996; SOHN et al. 2004).

O SHM denota o monitoramento de estruturas físicas que estão no domínio da engenharia civil, que permite a caracterização de danos e, por conseguinte, a programação adequada de procedimentos de manutenção necessários de forma a evitar acidentes de grandes proporções. Um dano, no domínio de aplicação de SHM, é definido como a presença de uma quantidade imperceptível (a olho nu) de microfissuras sobre um elemento estrutural, em seus estágios iniciais de surgimento. A presença de microfissuras provoca alterações nas propriedades geométricas e/ou do material da estrutura, afetando o seu desempenho (SOHN et al. 2004). Tais microfissuras tendem a crescer lentamente nos estágios iniciais de surgimento do dano, mas tendem a crescer mais rapidamente assim que o momento de ruptura completa do elemento estrutural está prestes a ocorrer, o que pode causar grandes acidentes. Assim, os estágios iniciais do surgimento de danos, onde ocorrem pequenas mudanças nas propriedades estruturais, são os momentos mais indicados para realizar a caracterização de danos, pois

ainda há suficiente tempo para a realização de ações de manutenção. Para a detecção das pequenas mudanças nas propriedades estruturais, é necessária a utilização de dispositivos sensores de alta precisão instalados em múltiplas posições de sensoriamento sobre a estrutura, exigindo flexibilidade de instalação da infraestrutura de comunicação e sensoriamento, e assim tornando apropriada a utilização de uma RSSF.

Nos sistemas de SHM que fazem uso de RSSF como infraestrutura de comunicação e sensoriamento, os dispositivos de sensoriamento são utilizados para realizar medições analógicas de propriedades em muitas posições diferentes da estrutura, bem como medições de eventos externos, que podem afetar tais propriedades. Os dispositivos de sensoriamento normalmente utilizados em RSSFs para aplicações de SHM são, entre outros, sensores de umidade (higrômetros), de temperatura (termômetro) e vibração (acelerômetros). Os acelerômetros são usados para obter informações de vibração que permitem extrair as frequências modais da estrutura a fim de identificar alterações estruturais que denotem a presença de dano (WALFORD e ROBERTS 2006). Os termômetros e higrômetros são utilizados para a medição de propriedades ambientais, que também afetam o estado da estrutura.

Tradicionalmente, nas aplicações de SHM, as RSSF são usadas apenas como uma infraestrutura de comunicação e sensoriamento para entregar as medições coletadas para o nó sorvedouro, onde é feito o processamento para avaliar a integridade estrutural, como descrito, por exemplo, em Xu et al. (2004), Chintalapudi et al. (2006a) e Kim et al. (2007). Obviamente, usar RSSFs como a infraestrutura de comunicação e sensoriamento para os sistemas de SHM, frente aos tradicionais sistemas cabeados, traz várias vantagens imediatas como, por exemplo: (i) redução da necessidade de especialistas (engenheiros) para executar tarefas de verificação *in situ* sobre a integridade estrutural, (ii) a possibilidade de mudar dinamicamente o layout da rede, (iii) a facilidade e flexibilidade de instalação de nós sensores sem fios, incluindo as zonas onde o acesso é difícil ou caro através de cabos, (iv) a reconfiguração fácil e rápida da RSSF, e (v) um custo mais baixo do sistema.

Se por um lado as redes de sensores trazem novas e amplas perspectivas para o monitoramento de estruturas civis (SHM), por outro lado, a utilização dessas redes também como infraestrutura de processamento, além de comunicação e sensoriamento, para os sistemas de SHM origina uma série de desafios que ainda devem ser superados, e que, portanto, propiciam um vasto campo para pesquisa. Por exemplo, um dos principais desafios é o de como adaptar as técnicas de processamento de sinais ou outras, já disponíveis no

domínio de engenharia estrutural, para realizar tantas reduções de dados dentro da rede quanto for possível, reduzindo a necessidade de transmissões com o intuito principal de economizar energia. Outro novo desafio consiste em desenvolver metodologias descentralizadas que possibilitem detectar, localizar e determinar a extensão do dano dentro da própria rede. Por fim, tais metodologias devem utilizar, de maneira mais eficiente possível, a energia da rede, prolongando assim sua vida útil.

### 1.1 Objetivo

O presente trabalho propõe um algoritmo, denominado Sensor-SHM, considerado eficaz, descentralizado, localizado, e baseado em técnicas de fusão de informação em múltiplos níveis, com o objetivo de detectar, localizar e determinar a extensão de danos em estruturas que pertencem ao domínio da engenharia civil, fazendo uso de uma RSSF organizada de forma hierárquica. O Sensor-SHM é dito ser eficaz porque é capaz de ter um bom desempenho em termos de acertos na detecção, localização e determinação da extensão do dano.

Ao contrário de outras abordagens na literatura, como as de Xu et al. (2004), Chintalapudi et al. (2006a) e Kim et al. (2007), esse algoritmo é considerado descentralizado, porque todo o processo decisório (da detecção localização e determinação da extensão de dano) é executado dentro da rede (processamento “*in-network*”) por todos os seus nós, sem qualquer auxílio por parte do nó sorvedouro. Os nós da RSSF colaboram entre si com a finalidade de aumentar a confiabilidade do resultado da detecção de danos.

O algoritmo Sensor-SHM é considerado localizado (MEGUERDICHIAN et al., 2001), pois não se baseia em interação ou informação global. Pelo fato do Sensor-SHM ser localizado, cada nó da rede possui apenas uma visão parcial da situação global e, assim sendo, os nós sensores precisam colaborar entre si, compartilhando seus pontos de vista parciais para atingir o objetivo final (de caracterizar danos).

A fusão de informação e a clusterização são características comumente adotadas na elaboração de soluções de RSSF para reduzir o consumo de energia (YE et al., 2005). Além do benefício de redução do consumo de energia, a adoção de técnicas de fusão de informação, especificamente, também pode visar um aumento da acurácia das informações/decisões providas pela RSSF, ao auxiliar o processo de obtenção e tratamento de dados oriundos de múltiplas fontes, uma característica desejável não só para as aplicações de SHM, mas também para aplicações de mineração de dados e descoberta de conteúdo (FAYYAD et al., 1996) na

era do *Big Data* (BOYD e CRAWFORD, 2011). O Sensor-SHM é classificado como um algoritmo de fusão de informação, pois emprega técnicas de fusão de informação principalmente com o intuito de reduzir a quantidade de dados a serem transmitidos dentro da rede e, conseqüentemente, diminuir o consumo de energia na rede. Especificamente, o Sensor-SHM é considerado como um algoritmo de fusão de informação de múltiplos níveis (*multilevel fusion*), uma vez que engloba uma seqüência de procedimentos de fusão de informação, cada um dos quais atua em um ou mais dos três níveis de abstração de dados (*measurement*, *feature* e *decision*) mencionados por Nakamura et al. (2007). O nível *measurement*, lida com sinais uni ou multidimensionais originados dos sensores (em geral dados brutos). O nível de *feature* lida com características (atributos, ou *features*), que são extraídas de sinais (como, por exemplo, um sinal de aceleração obtido de um acelerômetro localizado sobre uma estrutura em avaliação). O nível *decision* lida com as decisões ou representações simbólicas fornecidas como insumos para a tomada de uma decisão mais confiante, ou global sobre as amostras de dados. Os benefícios da fusão de informação são obtidos incrementalmente ao passo que a fusão de informação é aplicada em mais de um nível de abstração de dados. Por essa razão, algoritmos de fusão de informação de múltiplos níveis, como o Sensor-SHM, são capazes de reduzir ao máximo os dados dentro da RSSF.

Em paralelo, mecanismos de clusterização, ou mecanismos hierárquicos, são especialmente eficazes quando aplicados para aumentar a escalabilidade da RSSF e reduzir a latência de dados, e têm sido amplamente explorados (YE et al., 2005). Diversos trabalhos comprovam e justificam a utilização de topologias hierárquicas em soluções de RSSF. Em Younis e Fahmy (2004), por exemplo, demonstrou-se que a clusterização pode reduzir o custo de comunicação (*overhead*) com destino ao nó sorvedouro tanto para redes *single-hop* (nas quais todos os nós possuem um link direto com os demais nós) quanto para redes *multi-hop* (nas quais os nós são alcançáveis por quaisquer outros através de múltiplos links intermediários). A redução no custo de comunicação é obtida ao inserir nós líderes como saltos intermediários obrigatórios para um conjunto de nós, concentrando a transferência de dados por uma menor variedade de rotas, e assim facilitando a coordenação, pelo nó líder, da transferência dos dados originados pelos nós do *cluster*. No Sensor-SHM, portanto, utiliza-se um mecanismo hierárquico, onde os nós sensores estão agrupados em clusters e cada cluster é gerenciado por um líder de cluster, ou Cluster-Head (CH).

## 1.2 Contribuições

Entre as contribuições da presente proposta destaca-se, em **primeiro** lugar, a concepção de um algoritmo localizado, denominado Sensor-SHM, que é capaz de, além de detectar dano em estruturas civis, também realizar sua localização e determinar sua extensão. A **segunda** contribuição desse trabalho é que o Sensor-SHM é eficaz, em termos de acertos na detecção, localização e determinação da extensão de danos, sem comprometer (sobrecarregar) o consumo de recursos de comunicação e energia da RSSF. Para contribuir nesse sentido, o Sensor-SHM possui um mecanismo de cooperação entre os nós CH que garante sua eficácia, e permite sua operação de forma descentralizada (*in-network*). Sendo assim, o Sensor-SHM é a única proposta completamente descentralizada que realiza a detecção, localização e determinação da extensão de danos utilizando uma RSSF. Como uma **terceira** contribuição, o Sensor-SHM é uma solução escalável e capaz de atingir um longo tempo de vida (superior a um ano), pois apresenta diversos mecanismos para reduzir o consumo de recursos, respectivamente, de comunicação e energia. Por um lado, o Sensor-SHM é classificado como um algoritmo de fusão de informação em múltiplos níveis, uma vez que emprega tais técnicas principalmente com o intuito de reduzir a quantidade de dados a serem transmitidos dentro da rede e, conseqüentemente, diminuir o consumo de energia na rede. Por outro lado, a descentralização dos procedimentos do algoritmo e a adoção da topologia hierárquica permitem reduzir (visando eliminar) a necessidade de transmissões com destino ao nó sorvedouro. Essas primeiras três contribuições foram publicadas em Santos et al. (2010) e Santos et al. (2014).

Uma **quarta** contribuição, que é apresentada na Seção 2.4 e foi efetuada durante o presente trabalho, consiste no levantamento dos principais requisitos de soluções de SHM com foco na detecção, localização e determinação da extensão de danos que fazem uso de RSSFs. A **quinta** contribuição apresentada nesse trabalho é a proposta de uma nova classificação das soluções de SHM que usam redes de sensores, em quatro gerações. Cada uma das gerações difere segundo o grau de redução dos dados obtido e o nível de descentralização de cada uma das soluções de SHM que usam redes de sensores encontradas na literatura. No Capítulo 3 empregou-se essa nova classificação para identificar cada uma das soluções de SHM que usam redes de sensores apresentadas na literatura. As quarta e quinta contribuições são descritas em Delicato et al. (2013).

### **1.3 Organização do trabalho**

Esse trabalho está organizado em 8 Capítulos. O Capítulo 2 apresenta conceitos básicos sobre os temas abordados na concepção da proposta, necessários para sua compreensão. São revistos conceitos básicos sobre fusão de informação, SHM e RSSFs. O Capítulo 3 apresenta uma proposta de classificação de soluções de SHM que usam redes de sensores, as quais são propostas por diversos trabalhos relacionados na literatura. O conteúdo dos Capítulos 2 e 3 resultou na publicação em Delicato et al. (2013). O Capítulo 4 apresenta a proposta do presente trabalho, o algoritmo Sensor-SHM, discutindo e detalhando seus procedimentos. O conteúdo desse capítulo resultou na publicação em Santos et al. (2010) de forma resumida, e em Santos et al. (2014) de forma completa, contendo por sua vez uma visão atrelada aos conceitos de fusão de informação. Os Capítulos 5 e 6 discutem as questões envolvidas na implementação e configuração de um protótipo utilizado para avaliar o Sensor-SHM. O Capítulo 7 detalha os experimentos realizados para avaliar o algoritmo Sensor-SHM em termos do seu impacto sobre o consumo de recursos (comunicação e energia) da RSSF, assim como a sua eficácia e sua aplicabilidade em uma situação real (em termos de acertos de detecção, localização e determinação da extensão de danos). Os resultados foram publicados em Santos et al. (2010) e Santos et al. (2014). Finalmente, o Capítulo 8 conclui este trabalho, estabelecendo as direções futuras de pesquisa.

## 2 Conceitos básicos

O foco principal desse capítulo, cujo conteúdo foi publicado em Delicato et al. (2013), é apresentar uma visão geral dos conceitos básicos necessários para a compreensão da proposta do presente trabalho, o algoritmo Sensor-SHM. Na Seção 2.1 o conceito de **RSSFs** é apresentado. Na Seção 2.2 é introduzido o conceito de  **fusão de informação**. Na Seção 2.3 discute-se o conceito de **SHM**. Na Seção 2.4 são levantados os requisitos de técnicas modais em soluções de SHM. Na Seção 2.5 são apresentadas as considerações finais sobre os conceitos básicos.

### 2.1 Redes de Sensores Sem Fio

As RSSF são sistemas compostos por centenas de milhares de dispositivos de baixo custo e tamanho reduzido, alimentados por baterias e dotados de capacidades distribuídas de processamento, sensoriamento e comunicação sem fios. RSSFs típicas são compostas por um ou mais nós sorvedouro (também chamados de estações base) e vários nós sensores distribuídos por uma grande área geográfica de interesse (a área de monitoramento). Os dados são coletados por nós sensores a partir da área de monitoramento, e então transmitidos para o nó sorvedouro, tipicamente utilizando um protocolo de comunicação de múltiplos saltos (*multihop*).

Exemplos de aplicações que podem se beneficiar do uso de RSSF são: o Monitoramento estrutural (SHM) (XU et al. 2004), o monitoramento do habitat (MAINWARING et al., 2002), da vida selvagem (LIU et al., 2004) e ambiental (WERNER-ALLEN et al., 2006), monitoramento de condição de máquinas (GAO e FAN, 2006), sistemas de vigilância (ARORA et al., 2004), acompanhamento médico (SHNAYDER et al., 2005), rastreamento (CHEN et al., 2010), entre outros.

Em uma RSSF, cada nó sensor engloba componentes de software e hardware. O hardware do nó sensor possui quatro componentes principais: (i) um subsistema de sensoriamento, incluindo um ou mais sensores (com conversores analógico-digitais associados) para aquisição de dados, (ii) um subsistema de processamento, incluindo um microcontrolador e memória, possibilitando a execução de protocolos complexos e também o processamento de dados local pela aplicação, (iii) um subsistema de comunicação sem fio, para comunicação dos dados, e (iv) um subsistema de fornecimento de energia. Os componentes de software consistem na lógica da aplicação, protocolos e sistemas operacionais, que em conjunto coordenam as tarefas da RSSF.

Nós das RSSFs são dotados de fontes de alimentação limitadas, normalmente representadas por uma bateria não recarregável. A principal característica dessas redes é a sua capacidade de operar automaticamente, de forma autônoma, sem intervenção humana, e por longos períodos de tempo. Considerando-se que RSSFs muitas vezes possuem centenas ou milhares de nós sensores, e que devem trabalhar de forma autônoma, uma vez que a bateria do nó se esgota, a substituição das baterias de cada nó sensor é uma tarefa indesejável, ou mesmo inviável. Uma possível forma de minimizar este inconveniente é utilizar estratégias para a captação de energia a partir do ambiente, isto é, a partir de fontes naturais, como sugerem Roundy e Frechette (2005). No entanto, a energia obtida a partir de fontes naturais é muitas vezes pouco confiável e estável ao longo do tempo. Portanto, é essencial que as RSSFs estejam conscientes de sua própria quantidade de energia disponível, e sejam capazes de lidar de forma inteligente com o seu consumo, para maximizar o seu tempo de vida.

As técnicas atualmente adotadas para melhorar a eficiência energética da RSSF incluem projetos de hardware de baixa potência (HILL et al., 2000), que incidem sobre o consumo de energia no nível do circuito e da arquitetura *de um único nó* (WENTZLOFF et al., 2004) e protocolos e estratégias energeticamente eficientes (AKYILDIZ et al. 2002; AL-KARAKI e KAMAL 2004; DEMIRKOL et al. 2006), que atuam *no nível de toda a RSSF*, em diferentes camadas da pilha de protocolos como, por exemplo, roteamento, escalonamento, controle de acesso ao meio e aplicação.

No nível do nó, uma vez que uma grande quantidade de energia é consumida pelos componentes do nó, mesmo se eles não se encontram em uso, as técnicas de gestão de energia podem ser utilizadas para desligar temporariamente os componentes dos nós que não são necessários. Além disso, técnicas de reconfiguração dinâmica como a *Dynamic Modulation Scaling* (DMS) (usada para reconfigurar esquemas de modulação durante a comunicação) e *Dynamic Voltage Scaling* (DVS) (usada para reconfigurar tensão e frequência de operação dos processadores), permitem reconfigurar dinamicamente o hardware do nó sensor, para este se adaptar à dinâmica externa do ambiente de monitoramento, proporcionando maior economia no consumo de energia (YEH, 2008).

No nível de toda a RSSF, as políticas de eficiência energética exploram o conhecimento sobre o comportamento global da RSSF para realizar economias de energia mais significativas do que considerando apenas cada nó individualmente. Essas políticas são implementadas como programas de software que atuam nas diferentes camadas de protocolos (camadas de enlace de dados, MAC, roteamento e aplicação) da pilha de RSSF. Na camada de

aplicação a utilização de algoritmos de agregação e/ou fusão de informação é uma possível estratégia para a economia de energia, uma estratégia adotada para o tema do presente trabalho. Algoritmos de fusão de informação exploram a capacidade de processamento em rede dos nós sensores e a redundância inerente aos dados gerados pelo nó sensor, com o objetivo de reduzir as necessidades de transmissões de dados, trocando assim os custos energéticos de comunicação por custos de processamento. Além de reduzir o consumo de energia, as técnicas de fusão de informação também podem contribuir para aumentar a precisão e confiabilidade dos dados gerados pelos nós sensores em aplicações como o SHM. Portanto, tais estratégias desempenham um papel importante nas RSSFs aplicadas ao domínio de SHM. Uma revisão sobre o conceito de fusão de informação é realizada a seguir, na Seção 2.2.

## **2.2 Fusão de informação**

Segundo o departamento de defesa dos EUA (WHITE, 1991), de uma forma mais geral a fusão de informação pode ser vista como “um processo de múltiplos níveis que lida com a detecção, associação, correlação e estimação de dados provenientes de múltiplos sensores”. No domínio das RSSF, simples técnicas de agregação de dados (médias aritméticas, a busca por máximos e mínimos, dentre outras) têm sido usadas para a redução do tráfego de dados com o intuito de reduzir o consumo de energia dos nós sensores.

A agregação de dados pode ser definida como a combinação de dados de diferentes nós fontes usando funções triviais (i.e, máximo, mínimo, média) que realizam a supressão de mensagens redundantes e, conseqüentemente, reduzem a quantidade de dados. A agregação de dados difere da fusão de informação, pois visa alocar dados correlacionados em uma mesma mensagem, preservando suas formas originais e apenas evitando o custo de gerar e transmitir mensagens e informações de cabeçalho redundantes. Em contraponto, a fusão de informação visa a aplicação de técnicas (funções) de transformação em si dos dados, resultando em uma nova informação diferente das originais e possivelmente de representação menos custosa, em termos de memória. A eficiência dos algoritmos de agregação de dados depende da correlação entre os dados gerados pelas diferentes fontes de informação. A correlação pode ser espacial, quando os valores gerados por sensores próximos são relacionados; temporal, quando as leituras de sensores mudam lentamente ao longo do tempo; ou semântica, quando as informações de diferentes mensagens de dados podem ser classificadas sob o mesmo grupo semântico, como, por exemplo, os dados que são gerados

por sensores colocados em uma mesma sala. Assim, a agregação dos dados favorece a eliminação de redundância, mas pode garantir também a acurácia dos dados.

A acurácia pode ser definida como o grau de proximidade entre a medição observada e o seu valor real esperado. Quando se tem uma correlação eficiente entre os dados originados por diferentes fontes de informação é possível alcançar uma maior redução da quantidade de dados e ao mesmo tempo garantindo a acurácia dos dados agregados. Por outro lado, é importante observar que quando não se obtém uma correlação eficiente entre os dados originados por diferentes fontes de informação, é possível que a sumarização dos dados pode também resultar em uma perda na acurácia (NAKAMURA et al., 2007).

Outros dois conceitos importantes para a eficiência do mecanismo de agregação de dados são: grau e latência. O grau de agregação é definido como o número de mensagens agregadas em um único pacote de transmissão. A latência pode ser medida como o intervalo de tempo entre o momento em que os dados são gerados nos nós e o momento em que são recebidos no nó sorvedouro (RAJAGOPALAN e VARSHNEY, 2006). É importante que a relação entre esses dois conceitos seja equilibrada para que haja eficiência na redução da quantidade de dados por um lado, mas que também por outro lado não haja atrasos exagerados na entrega final dos dados.

A fusão de informação pode ser categorizada por diversos aspectos, a saber: (i) relacionamento entre fontes de dados, (ii) nível de abstração de dados e (iii) o propósito da fusão de informação. Esses aspectos são revistos mais recentemente e de maneira integrada por Nakamura et al. (2007).

De acordo com (i) **o relacionamento entre fontes de dados**, a fusão de informação pode ser classificada como complementar, redundante e cooperativa (DURRANT-WHYTE 1988). A fusão de informação é denominada **complementar** quando a informação provida pelas fontes representa pedaços de um cenário maior, logo a fusão pode ser aplicada para obter informações mais completas sobre o cenário. A fusão complementar busca a completude, formando uma nova informação através da composição de diversas outras (como sensores que verificam a presença de danos em várias posições diferentes de uma estrutura e fundem essas informações para obterem a visão completa da estrutura). A fusão de informação é classificada como **redundante** quando duas ou mais fontes independentes proveem o mesmo pedaço de informação. Estes pedaços podem ser fundidos para aumentar a confiabilidade da informação. A fusão de redundância pode ser usada para aumentar a confiabilidade, precisão e credibilidade da informação. Em RSSFs, a fusão de redundâncias

pode prover informação de alta qualidade e prevenir nós sensores de transmitirem dados iguais (por exemplo, vários sensores avaliando a temperatura de uma caldeira industrial). Por fim, classifica-se a fusão de informação como **cooperativa** quando a informação provida por duas fontes é fundida em uma nova informação (normalmente mais complexa do que a original), que, do ponto de vista da aplicação, representa melhor a realidade (por exemplo, um sensor de temperatura e um sensor de fumaça combinando informações para detectar um incêndio).

De acordo com (ii) **o nível de abstração de dados** (LUO et al. 2002), a fusão de informação pode ser classificada em três níveis: *measurement*, *feature* e *decision*. O nível *measurement*, lida com sinais uni ou multidimensionais originados dos sensores (em geral dados brutos). A fusão de informação nesse nível pode ser usada em aplicações de tempo real ou como um passo intermediário entre fusões. Dados brutos são fornecidos como entrada para o processo de fusão e são combinados em uma nova quantidade de dados mais precisos, possivelmente com menor ruído (e assim uma maior precisão). O nível de *feature* lida com características (atributos, ou *features*), que são extraídas de sinais (como, por exemplo, um sinal de aceleração obtido de um acelerômetro localizado sobre uma estrutura em avaliação). Os atributos e características de amostras de dados individuais são fundidos para obter um *feature map*, que descreve toda a área monitorada. O nível *decision* lida com as decisões ou representações simbólicas tomadas como insumos para a tomada de uma decisão mais confiante, ou global sobre as amostras de dados. Neste nível de abstração de dados, a informação é um símbolo que representa uma decisão (um símbolo pode ser, por exemplo, um dado indicando a ação “acionar alarme”, em caso de incêndio). Ainda de acordo com (ii) o nível de abstração de dados, a fusão da informação também pode ser classificada como uma fusão de múltiplos níveis, ou *multilevel fusion*, quando a fusão de informação utiliza dados de diferentes níveis de abstração de dados. A proposta do presente trabalho, o algoritmo Sensor-SHM, possui procedimentos que atuam nos três níveis de abstração de dados, e por isso o Sensor-SHM é classificado como um algoritmo de múltiplos níveis de fusão de informação.

E finalmente, de acordo com (iii) **propósito da fusão de informação**, ou seja, que tipo de informação busca-se extrair dos dados coletados (NAKAMURA et al. 2007), a fusão de informação pode ser realizada com diferentes objetivos: inferência, estimação, classificação, agregação ou compressão. Métodos de inferência são muitas vezes aplicados em fusões de decisão. Nesse caso, uma decisão é tomada baseada no conhecimento da situação percebida. A inferência se refere à transição de uma proposição provavelmente verdadeira, à qual a

veracidade é creditada como resultado de uma inferência anterior. Um método clássico de inferência é a Inferência Bayesiana (BAYES, 1763). Métodos de compressão e agregação são usados apenas para a redução do volume de dados. Os métodos de compressão não necessariamente são classificados como métodos de fusão de informação propriamente ditos, uma vez que eles apenas consideram as estratégias de codificação dos dados. A agregação é usada para resolver os problemas de implosão e *overlapping*. No problema de implosão, os dados sensorizados são duplicados na rede devido a alguma estratégia de roteamento. Já o problema de *overlapping* acontece quando dois nós diferentes disseminam os mesmos dados.

Para classificar os procedimentos específicos que compõem o Sensor-SHM, o presente trabalho faz uso da terminologia presente em Dasarathy et al. (1997), que apresenta outra classificação para a fusão de informação. Essa classificação, por sua vez, leva em consideração a abstração dos dados de entrada e saída do processo de fusão, mantendo dessa forma a mesma lógica da classificação em níveis de abstração de dados. Por essa razão, essa classificação possui maior grau de detalhe, sendo mais adequada para classificar os procedimentos de fusão de informação do Sensor-SHM. Na classificação *Data In–Data Out* (DAI-DAO), a fusão de informação lida com dados em nível de sinal e o resultado também em nível de sinal, possivelmente mais preciso ou confiável. Na classificação *Data In–Feature Out* (DAI-FEO), a fusão de informação usa dados brutos como entrada para extrair atributos ou características que descrevem de forma mais sintética uma área de monitoramento. Na classificação *Feature In–Feature Out* (FEI-FEO), a fusão de informação trabalha sobre um conjunto de características para melhorar ou refinar uma característica ou atributo, ou para extrair novos. Na classificação *Feature In–Decision Out* (FEI-DEO), a fusão de informação usa uma série de características extraídas previamente, gerando uma representação simbólica, ou seja, uma decisão. Por fim, na classificação *Decision In–Decision Out* (DEI-DEO), decisões podem ser fundidas de forma a obter novas decisões ou dar ênfase a decisões anteriores. Essas cinco classificações vistas na terminologia de Dasarathy et al. (1997) são consideradas elementares, isto é, indivisíveis, porém não há impedimento à utilização de classificações derivadas dessas. Por exemplo, o Sensor-SHM como um todo é considerado um algoritmo *Data In–Decision Out* (DAI-DEO), ao fazer uso de diversas técnicas de fusão de informação em todos os múltiplos níveis de abstração de dados. Em outras palavras, uma técnica de fusão de informação DAI-DEO pode ser decomposta em diversas técnicas de fusão de informação realizadas em sequência, e classificadas como, por exemplo, DAI-FEO, FEI-FEO, e FEI-DEO.

### 2.3 *Structural Health Monitoring*

O trabalho de Sohn et al. (2004) apresenta uma extensa revisão sobre as técnicas tradicionais de SHM. Esta seção detalha apenas as técnicas de SHM baseadas em análise modal (técnicas modais, ou *modal-based techniques*), uma vez que são estas as técnicas utilizadas nesse trabalho. O trabalho de Farrar e Doebling (1997) apresenta uma revisão das técnicas modais para SHM. Apesar do fato de que as técnicas modais possam também ser utilizadas para monitorar a integridade de sistemas mecânicos, como, por exemplo, máquinas rotativas, o foco principal desta seção é quando estas podem ser utilizadas no monitoramento de estruturas de engenharia civil.

Baseado em Sohn et al. (2004), SHM é definido como uma estratégia para a avaliação da integridade estrutural. Em outras palavras, o SHM permite que técnicos identifiquem danos em estruturas. Os principais **objetivos do SHM** (FARRAR *et al.* 2001) são: (i) medir a carga que atua na estrutura em questão, (ii) caracterizar o tipo de dano causado pela carga na estrutura, (iii) medir a evolução do dano com o passar do tempo e (iv) antecipar-se à quebra da estrutura.

A **carga** é definida como a alteração da massa ou das forças atuantes na estrutura. A carga pode ser aplicada de duas formas: natural ou artificialmente. A carga natural é definida como sendo os fatores ambientais que atuam sobre a estrutura, como por exemplo, o vento, a temperatura e a umidade. A carga artificial é definida como sendo as ações que o homem artificialmente provoca na estrutura de modo a testá-la como, por exemplo, um martelo de vibração (ADAMS 2007).

O “**defeito**” ou “**fratura**” é definido genericamente como “alterações introduzidas no sistema que afetam negativamente o desempenho atual ou futuro da estrutura”. O “defeito” ou “fratura” é categorizado hierarquicamente de dois modos: o dano e a falha (SOHN *et al.* 2004).

O **dano** é inerente ao material, isto é, todo material possui certo grau de dano. Em estruturas sadias, o grau de dano é imperceptível e estas operam de maneira ótima. No entanto, durante a sua utilização, pode ocorrer fadiga de algum material que foi utilizado para construir a estrutura. Neste caso, o grau de dano aumenta (diz-se que a estrutura apresenta um dano, ou seja, o mesmo passa a ser perceptível) e faz com que ela opere em maneira não ótima. É importante salientar que a presença do dano não implica a perda da funcionalidade da estrutura e sim a sua operação em maneira não ótima. A **falha** é um dano acumulado durante um longo período de tempo e resulta na perda da funcionalidade da estrutura.

Nos trabalhos apresentados por (ADAMS 2007; LYNCH 2007; FARRAR e WORDEN 2007) são apontadas as principais motivações que contribuem para a continuidade dos estudos realizados na área de SHM. Dentre elas, destacam-se as seguintes: a potencialidade de salvar vidas das pessoas que utilizam a estrutura; o impacto econômico no negócio, reduzindo as maquinarias disponíveis; a diminuição do tempo entre as vistorias das partes da estrutura; a troca do tipo de manutenção da estrutura pelo seu estado e não pelo seu tempo estimado de uso da estrutura; a diminuição dos riscos inerentes das grandes estruturas; a diminuição dos valores dos contratos de seguro; e, por fim, atender regulamentações de órgãos governamentais reguladores em todo o mundo (na área da aviação principalmente).

Segundo (Santos et al. 2010; Santos et al. 2014; Delicato et al. 2013). SHM é uma estratégia que pode compreender (i) **detecção** de danos, o que significa a detecção da presença de ao menos um dano, independentemente da sua posição na estrutura, (ii) **localização** de danos, que se destina a definir a posição exata do local danificado, e (iii) a determinação da **extensão** de danos, cuja intenção é a de definir a quantidade de locais com danos e/ou a sua gravidade.

A avaliação da gravidade do dano visa descobrir o momento exato em que a presença de um dano crítico irá ocorrer. Um dano crítico é definido como um dano de maiores proporções (possivelmente maior do que as microfissuras) que é capaz de criticamente colocar a estrutura fora de funcionamento ou causar falhas catastróficas. O dano crítico é, portanto, um dos últimos estágios, no tempo, de danos na estrutura. Cada dano, considerando-se que um dano inicia-se com um pequeno conjunto de microfissuras, tende a evoluir para esse último estágio, e, para reduzir os custos de substituição dos componentes estruturais, é importante desempenhar a predição de dano, descobrindo o momento exato para a substituição de tais componentes.

Definem-se também estratégias de monitoramento globais e locais. Estratégias de monitoramento globais estão centradas em parâmetros globais da estrutura, como, por exemplo, as frequências e formas modais da estrutura, enquanto estratégias de monitoramento locais estão centradas em inspeções locais, fazendo uso de técnicas baseadas em emissões de infravermelho, acústicas ou medições ultrassônicas. Estratégias globais e locais para o acompanhamento da saúde de estruturas também são denominadas como o monitoramento global da integridade e monitoramento local da integridade, como em Chang et al. (2013). Estratégias de monitoramento locais são mais caras e demoradas do que as estratégias globais de monitoramento. Além disso, o acesso de seres humanos para a posição escolhida para

realizar a avaliação não é sempre possível em estratégias de monitoramento locais. Assim, as estratégias globais de monitoramento são amplamente utilizadas para monitorar a saúde de estruturas. No entanto, na estratégia global de monitoramento é relativamente fácil detectar a presença de danos, mas é difícil de definir a localização e a extensão de danos, que, em contraponto, são mais fáceis de definir utilizando estratégias de monitoramento locais. Idealmente, ambos os tipos de estratégias são necessárias em conjunto, mas, devido a limitações técnicas, financeiras e de segurança, geralmente é preferível utilizar apenas uma estratégia de monitoramento global. Uma vez que as estratégias globais de monitoramento são as mais amplamente utilizadas na literatura pesquisada, a maioria dos trabalhos relacionados concentra-se apenas na detecção de danos, enquanto apenas alguns desses trabalhos também realizam a localização de dano.

O dano é definido como a presença de uma quantidade imperceptível (a olho nu) de microfissuras sobre um elemento estrutural, quando o dano se encontra em suas fases iniciais. Estas microfissuras causam uma alteração na massa da estrutura, alterando o seu momento de inércia e fazendo a sua resposta dinâmica atual (em estado danificado) diferir da sua resposta original (em um estado não danificado anterior). Assim, existe um princípio básico para a definição de uma estratégia para monitoramento da integridade de uma estrutura: danos só podem ser avaliados quando se comparam dois estados diferentes da mesma estrutura, como mencionado por Sohn et al. (2004). Portanto, é inevitável a necessidade de informações sobre um estado em que a estrutura é considerada saudável, para efetuar comparações.

Existem diferentes técnicas para adquirir as informações necessárias para tal comparação. Os valores de referência do estado saudável podem ser extraídos a partir de (i) um modelo analítico, ou teórico como, por exemplo, aqueles desenvolvidos através de Modelagem em Elementos Finitos (MEF) (HUEBNER, 1975), (ii) um monitoramento inicial nos primeiros estágios da existência da estrutura, quando esta se encontra totalmente operacional e (iii) uma análise estatística de um período de monitoramento de longo prazo. Cada técnica tem as suas próprias desvantagens. O MEF, por exemplo, requer uma grande quantidade de poder computacional, depende da complexidade da modelagem realizada por um engenheiro e pode não considerar variáveis ambientais e de ruído que podem afetar a estrutura real. No que diz respeito ao monitoramento inicial, consideram-se valores reais e correntes da estrutura, que está sofrendo o efeito das variáveis ambientais. Também serão obtidos valores considerando quaisquer alterações fora dos planos originais de construção que tenham ocorrido durante a construção da estrutura, e que possam afetar seu comportamento. O

monitoramento inicial é computacionalmente barato, mas pode não considerar todos os possíveis eventos que podem ocorrer durante a existência estrutura (uma vez que não é possível prever todos eles). A análise estatística possui inconvenientes semelhantes aos das técnicas anteriores, mas fornece uma estimativa mais precisa dos valores médios das variáveis, uma vez que um período mais longo é considerado para análise, assim, um amplo conjunto de diferentes eventos e interferências pode ser considerado na avaliação. No entanto, esta técnica é computacionalmente mais demorada, e pode não ser adequada para o rápido desenvolvimento de um sistema de SHM. O uso da própria rede de sensores instalada sobre a estrutura monitorada é uma possibilidade para auxiliar a aplicação das técnicas (ii) e (iii).

#### **2.4 Requisitos das técnicas modais em soluções de SHM**

Técnicas modais (FARRAR e DOEBLING 1997), como já mencionadas, estão entre as técnicas aplicadas em estratégias globais. Estas técnicas modais baseiam-se na premissa de que a presença de danos na estrutura provoca alterações nas propriedades geométricas e/ou do material da estrutura, afetando os seus modos de vibração, causando assim uma alteração da resposta dinâmica estrutural, quando em agitação. Dessa forma, o dano pode ser avaliado através das alterações dos parâmetros dos vários modos de vibração da estrutura, tais como as frequências modais e formatos dos modos de vibração. Uma grande estrutura de engenharia civil como, por exemplo, uma ponte ou edifício, geralmente possui diferentes modos de vibração, que podem ser excitados. Tais modos vibram em diferentes frequências e apresentam formatos diferentes. A maioria das técnicas globais de monitoramento da saúde das estruturas está centrada em alguma das propriedades ou ambas, ou seja, procura mudanças nas frequências modais e/ou mudanças nos formatos dos modos de vibração da estrutura.

Em uma análise de vibração, com a utilização de agitadores (*shakers*) e acelerômetros, é possível fazer a aquisição de medições a partir de diferentes pontos da estrutura, a fim de definir a forma resultante do modo de vibração percebido. Este modo de vibração percebido é mais semelhante ao modo de vibração que possui a frequência modal mais parecida com a frequência de excitação. Assim, os modos de vibração percebidos durante a agitação são aqueles que entram em ressonância com a frequência de excitação. A premissa de que as mudanças nas características dinâmicas de uma estrutura indicam danos é comprometida pelo fato de que a temperatura, a umidade e outros fatores ambientais se alteram, produzindo alterações nos modos de vibração percebidos e nas características dinâmicas da estrutura em geral. Tais modificações podem ser consideradas como ruídos das medições, e devem ser tratadas de modo a permitir que estas técnicas funcionem adequadamente. Alterações nos

modos de vibração percebidos e nas características dinâmicas da estrutura decorrentes de fatores ambientes não são investigadas nesse trabalho.

A avaliação das frequências modais requer o sensoriamento da aceleração em pelo menos um ponto da estrutura. Este sinal de aceleração deve ser adquirido com certa taxa de amostragem. A taxa de amostragem deve ser pelo menos duas vezes o valor da maior frequência de interesse no espectro de frequência, para satisfazer o critério de *Nyquist*. Uma técnica de processamento de sinais, com objetivo de transformar os dados do domínio da frequência para o domínio do tempo como, por exemplo, a Transformada de Fourier (GETACHEW e MITIKU, 2011), deve ser aplicada sobre este sinal de aceleração adquirido, e o espectro de frequência resultante pode então ser analisado.

Em geral as técnicas de processamento de sinais que transformam os dados do domínio do tempo para o domínio da frequência são variações da Transformada de Fourier. Há diversas denominações para as diferentes implementações da transformada de Fourier como, por exemplo, a Transformada de Fourier Discreta, ou *Discrete Fourier Transform* (DFT), a Transformada Rápida de Fourier, ou *Fast Fourier Transform* (FFT) e a Transformada de Fourier Inteira, ou *Integer Fourier Transform* (IFT), dentre outras. Essas implementações variam em termos de forma, desempenho e precisão do espectro de frequência resultante, porém elas possuem em comum o objetivo de transformar os dados do domínio do tempo para o domínio da frequência.

As frequências modais podem ser obtidas a partir desse espectro de frequência gerado pela aplicação de uma técnica de processamento de sinais. O conjunto de frequências modais da estrutura é denominado assinatura da estrutura. A quantidade de dados coletados durante uma amostragem deve ser suficiente para gerar uma boa resolução do espectro na taxa de amostragem definida. Por essa razão, quando se está interessado em frequências locais, que são mais elevadas e necessitam de uma taxa de amostragem mais elevada, a quantidade de dados coletados deve ser muito maior.

Devido ao tamanho e às conexões existentes entre os elementos estruturais (componentes da estrutura civil), os efeitos das vibrações podem ser ecoados por toda a estrutura e tornar o entendimento das frequências mais complicado. Ou seja, supondo que existam dois elementos estruturais conectados, a não ser que exista um amortecimento projetado, a vibração de um elemento estrutural ecoará para o outro.

Sendo assim, os modos de vibração que se propagam por toda a estrutura, isto é, por seus vários elementos estruturais, estão associados com grandes quantidades de massa. Essa grande quantidade de massa impede que a movimentação das partículas que compõem a estrutura seja conduzida de forma veloz, o que resulta em uma frequência modal baixa. Por outro lado, os modos de vibração que se concentram em certas localidades (concentrados em poucos elementos estruturais), estão associados com pequenas quantidades de massa, que vibram de forma mais veloz, o que resulta em uma frequência modal mais elevada.

Segundo Adams (2007), as baixas frequências modais (frequências modais globais) são identificadas por todos os sensores dispostos na estrutura, independentemente das suas posições. Ao contrário das altas frequências modais (frequências modais locais), que são identificadas apenas por nós sensores mais próximos do elemento estrutural onde se localiza o modo de vibração associado.

Dessa forma conclui-se que as mudanças nas altas frequências modais significam mudanças nos modos de vibração locais. Portanto, quando há mudanças nas altas frequências modais, deduz-se que há alguma alteração (associada à presença de dano) nos elementos estruturais mais próximos do nó sensor que detectou essas mudanças. De forma similar, mudanças em um único elemento estrutural podem ser transmitidas através dos demais elementos estruturais conectados a este, que permanecem saudáveis. Nesse caso, a mesma alteração pode causar uma (pequena) influência sobre os modos de vibração globais da estrutura.

Em suma, os requisitos das técnicas modais em soluções de SHM levantados nesse trabalho são: (i) definição do uso da estratégia global e/ou local de monitoramento, e, conseqüentemente, a definição dos locais, ou pontos de monitoramento sobre a estrutura (ao menos um ponto para estratégias globais ou vários pontos para estratégias locais) (ii) definição da necessidade (ou se há necessidade) de agitação da estrutura para excitar os seus modos de vibração de interesse, utilizando *shakers*, (iii) a forma de obtenção de assinaturas da estrutura, (iv) definição de qual unidade de sensoriamento será utilizada para aquisição de dados, (v) consideração sobre os fatores ambientais e isolamento das suas influências sobre as assinaturas da estrutura, (vi) definição da taxa de aquisição e do número de amostras adquiridas pelas unidades de sensoriamento.

## 2.5 Considerações finais sobre conceitos básicos

Nesse capítulo foram apresentados os conceitos básicos de RSSFs, fusão de informação, e SHM; e foram também levantados os requisitos das soluções de SHM usando redes de sensores. Ressalta-se que, em virtude da natureza combinatória explosiva dos requisitos apresentados nesse capítulo como, por exemplo, elevadas taxas de amostragem (o dobro da maior frequência de interesse) combinadas com múltiplos pontos de monitoramento da estrutura, a elaboração de técnicas que viabilizem a manipulação (em termos de processamento e comunicação) da grande quantidade de dados coletados pela RSSF torna-se um requisito de suma importância. Essa grande quantidade de dados coletados em aplicações de SHM inspirou o desenvolvimento de diversas técnicas para a fusão de informação, que são baseadas em processamento de sinais junto ao emprego de demais técnicas de agregação e fusão de informação (NAKAMURA et al. 2007). Tais técnicas, que podem ser associadas com o grau de descentralização e processamento *in-network*, são a principal inspiração para o conceito de gerações de soluções de SHM que usam redes de sensores, apresentado a seguir no Capítulo 3.

### 3 Proposta de classificação das soluções de SHM que usam redes de sensores

Nesse capítulo é proposta uma classificação para os trabalhos encontrados na literatura pesquisada sobre as soluções de SHM. Essa classificação se baseia no conceito de “gerações de soluções de SHM que usam redes de sensores”, e é uma expansão para o conceito de “*first-generation wireless structural monitoring system*”, brevemente mencionado em Xu et al. (2004). A seguir são apresentadas as quatro gerações de soluções de SHM que usam redes de sensores, e os correspondentes trabalhos relacionados, classificados em cada geração. Por fim, são apresentadas as considerações finais do capítulo.

#### 3.1 Critérios de classificação

A classificação proposta, de gerações de soluções de SHM que usam redes de sensores, foi empregada para identificar cada uma das soluções de SHM que usam redes de sensores apresentadas na literatura. A classificação proposta se baseia nos seguintes critérios: (i) o uso de redes de sensores cabeadas ou RSSF pela solução de SHM e (ii) o nível de descentralização (processamento *in-network*) das soluções. Enquanto o critério (i) é trivial, sendo consideradas apenas duas possibilidades de classificação, quanto ao critério (ii) considera-se que uma solução SHM (independente do tipo de rede, cabeada ou sem fio, sobre a qual essa solução foi implantada) pode ser (i) **centralizada**, onde todo o processamento para avaliar a integridade estrutural é feito no sorvedouro, (ii) **parcialmente descentralizada**, em que uma parte do processamento para avaliar a integridade estrutural é feita dentro da rede, através de colaboração entre os nós sensores, e (iii) **descentralizada**, onde todo o processamento é feito apenas pelos nós sensores, categoria que se refere às abordagens plenamente centradas em rede (*network-centric*).

Considerando os critérios citados, a **primeira** geração de soluções de SHM que usam redes de sensores (Seção 3.2) compreende soluções centralizadas e baseadas em dispositivos cabeados, enquanto a **segunda** (Seção 3.3), **terceira** (Seção 3.4) e **quarta** (Seção 3.5) gerações de soluções de SHM que usam redes de sensores estão relacionadas ao uso de dispositivos sem fio. As segunda, terceira e quarta gerações são numeradas consecutivamente, de acordo com o maior grau de descentralização apresentado por seus trabalhos relacionados (soluções centralizadas, parcialmente descentralizadas e descentralizadas, respectivamente).

As quatro gerações surgiram na ordem em que são apresentadas, mas os trabalhos de todas as gerações continuam evoluindo cronologicamente em paralelo. Tais trabalhos tendem a evoluir para maiores níveis de descentralização e processamento *in-network* (XU et al., 2004), o que sugere que os assuntos abordados nas gerações mais recentes de soluções de

SHM que usam redes de sensores permanecerão como um campo de pesquisa potencial por um tempo mais longo do que os assuntos abordados pelas primeiras gerações.

### **3.2 A primeira geração de soluções de SHM que usam redes de sensores**

Esta primeira geração é voltada para redes de sensores cabeadas, e compreende as propostas centralizadas, isto é, sem processamento *in-network* para avaliar a integridade estrutural. A abordagem comum das soluções na primeira geração é completamente oposta ao conceito de soluções *network-centric*, bem como a presença de fios proíbe implantações de larga escala, devido a questões técnicas e econômicas.

Os trabalhos de Cawley e Adams (1979), Messina et al. (1996) e Contursi et al. (1998), foram todos desenvolvidos baseando-se na utilização de sensores com fio, e referem-se à primeira geração de soluções de SHM que usam redes de sensores. Nessa primeira geração, o uso de dispositivos cabeados era a única forma de aquisição de medições das estruturas monitoradas. Energia e recursos de comunicação não eram restrições nesse cenário, mas o monitoramento era caro e de baixa flexibilidade. Os trabalhos citados apresentam resultados práticos da aplicação de técnicas baseadas em correlação (*correlation-based techniques*) para localizar danos. Técnicas baseadas em correlação fazem uso de parâmetros modais da estrutura. Por isso, elas são também consideradas técnicas modais. Pela ordem cronológica em que estes trabalhos surgiram, uma evolução cronológica das técnicas baseadas em correlação para localizar danos pode ser observada. A essência dessas técnicas é correlacionar conjuntos de frequências teoricamente ideais com um conjunto de frequências obtidas experimentalmente. As técnicas modais permitem a detecção, a localização e a determinação da extensão de danos nas estruturas. A detecção de danos através de tais técnicas é relativamente simples, enquanto que a localização e a determinação da extensão nem sempre são fáceis. As técnicas baseadas em correlação visam localizar dano por meio da análise da correlação linear entre as taxas de variação de frequências modais coletadas e as frequências modais teóricas.

Em Cawley e Adams (1979), foi desenvolvido um dos primeiros estudos com base no conceito de correlação linear para detectar danos em estruturas, no qual foram apresentadas métricas para localizar danos com base na variação das frequências modais da estrutura. Uma aplicação dos princípios da técnica desenvolvida em Cawley e Adams (1979) é encontrada em Messina et al. (1996), onde uma técnica similar, denominada “*Damage Location Assurance Criterion*” (DLAC) foi apresentada. Esta técnica mede o grau de correlação entre um vetor experimental, com as taxas de variação das frequências modais, e vários vetores com taxas de

variação analíticas das frequências modais. Esses vetores, tanto o obtido experimentalmente quanto aqueles obtidos por meio de diversos modelos analíticos, contêm informações sobre as frequências dos primeiros modos de vibração da estrutura. O número de modos de vibração depende da profundidade da análise executada. Estes vetores analíticos são extraídos de um Modelo de Elementos Finitos (MEF) da estrutura, cada um deles relativo a danos presentes em diferentes posições. A correlação mais perfeita entre o vetor experimental e um vetor analítico revela a localização do dano na estrutura, pois se sabe de antemão onde se encontra o dano em cada MEF analítico da estrutura. Esta técnica permite a localização de um único local de dano na estrutura, sendo o local de dano representado por uma perda de massa, representada através de uma redução da área da secção transversal de um elemento que compõe a estrutura usada nos experimentos relatados por Messina et al. (1996). Para localizar vários locais de danos na estrutura, uma técnica chamada “*Multiple Damage Location Assurance Criterion*” (MDLAC) é proposta em Contursi et al. (1998).

Ao contrário de Messina et al. (1996) e Contursi et al. (1998), que usam valores analíticos das frequências modais da estrutura obtidos a partir de um modelo de elementos finitos, o Sensor-SHM utiliza valores de frequências obtidos quando a estrutura está saudável. Outra diferença é que o Sensor-SHM roda nos nós sensores da RSSF, enquanto o algoritmo de Messina et al., denominado *Damage Location Assurance Criterion* (DLAC), é executado no nó sorvedouro.

### **3.3 A segunda geração de soluções de SHM que usam redes de sensores**

A segunda geração de soluções de SHM que usam redes de sensores é composta por soluções de RSSFs, mas que ainda são centralizadas. Nessa geração de soluções de SHM que fazem uso de redes de sensores utiliza-se a compressão dos dados coletados, agregação ou fusão de informação para minimizar as transmissões e economizar energia dos sensores sem fio, e o processamento exigido para avaliar a integridade estrutural (pelas técnicas de engenharia estrutural) ainda é realizado quase totalmente no nó sorvedouro.

A maior parte do processamento *in-network* apresentado pelos trabalhos dessa geração ocorre no nível de abstração de dados denominado *measurement*, o suficiente para garantir apenas o transporte confiável e eficiente de dados brutos. Exemplos de trabalhos que se encaixam nessa geração são Xu et al. (2004), Paek et al. (2005) e Kim et al. (2007).

Em Xu et al. (2004) e Paek et al. (2005), um sistema denominado “Wisden” é discutido. Os autores de ambos os trabalhos classificam o Wisden como um sistema de aquisição de

dados estruturais, que possui um pequeno grau de processamento dentro da rede. O Wisden lança foco sobre a questão do transporte de sinais de aceleração brutos para o nó sorvedouro, para posterior análise estrutural centralizada. Para esse propósito, o Wisden aborda como requisitos (i) o **transporte confiável de dados** (gerenciamento de topologia, roteamento e recuperação de erros), (ii) a **compressão de dados** (excluindo do conjunto de dados os períodos de inatividade e realizando técnicas de compressão baseadas em *wavelets*) e (iii) a **sincronização de dados** (XU et al. 2004). A RSSF onde o Wisden foi implantado apresentou diversas restrições de recursos, como a baixa taxa de amostragem (de 100Hz) alcançada pelos dispositivos de aquisição de dados de vibração, e também a baixa largura de banda disponível na rede (CAFFREY et al., 2004). Originalmente, o Wisden foi desenvolvido para a plataforma MICA2, mas em Paek et al. (2005) o Wisden foi implantado também para a plataforma MICAz. Paek et al. compararam a implementação do Wisden usando a plataforma MICA2 com a implementação usando a plataforma MICAz. Os resultados mostraram que a plataforma MICAz apresentou um melhor desempenho em termos de comunicação, apresentando uma maior taxa de transmissão, melhor qualidade de sinal, menor latência na entrega de dados coletados, e menor perda de pacotes.

Em Kim et al. (2007), os autores descrevem uma RSSF para monitoramento remoto da ponte *Golden Gate*, nos Estados Unidos. A “*46-hop network*”, como denominada pelos autores, monitora o estado estrutural da ponte através da aquisição e interpretação das vibrações. Os requisitos de necessidade de transporte confiável de dados, alta compressão de dados e necessidade sincronização de dados (mencionados anteriormente), bem como os requisitos de uma elevada taxa de amostragem (1 kHz foi adotado por Kim et al.) e de uma redução dos efeitos das fontes de ruído de monitoramento durante a aquisição de dados estão contidos nos seis principais requisitos de RSSF para SHM definidos em Kim et al. (2007). É importante ressaltar que no trabalho de Kim et al. (2007) foi implantada a maior RSSF (rede de até 46 saltos até o nó sorvedouro) já vista em seu tempo. Kim et al. também notaram que o Wisden não é capaz de realizar uma amostragem de dados a uma taxa superior a 160 Hz, o que está muito abaixo do requisito de 1kHz definido por esses mesmos autores.

O Sensor-SHM difere do Wisden, bem como de todos os trabalhos relacionados da segunda geração de soluções de SHM que usam redes de sensores, pois o Sensor-SHM foi concebido para realizar seu processamento de forma descentralizada, *in-network*, através da aplicação de técnicas de fusão de informação em múltiplos níveis de abstração de dados. Alguns requisitos da segunda geração de soluções de SHM que usam redes de sensores, como

o transporte confiável e a sincronização de dados, se tornam menos difíceis de atender à medida que o volume de dados diminui. No Sensor-SHM a descentralização e a fusão de informação resultam em uma quantidade de dados trafegados consideravelmente menor, o que torna tais requisitos mais fáceis de atender, ou menos desafiadores. Por outro lado surgem novos desafios como, por exemplo, desenvolver metodologias descentralizadas que possibilitem detectar, localizar e determinar a extensão do dano dentro da própria rede, utilizando da maneira mais eficiente possível, a energia da rede, e prolongando assim sua vida útil. Outra diferença principal é que no Sensor-SHM adota-se as técnicas de fusão de informação, propriamente ditas, em vez de apenas simples técnicas de compressão ou agregação de dados.

### **3.4 A terceira geração de soluções de SHM que usam redes de sensores**

A terceira geração de soluções de SHM que usam redes de sensores aponta na direção de soluções centradas em rede, compreendendo muitas soluções parcialmente descentralizadas. Na terceira geração o foco está na tentativa de descentralizar parte do processamento requerido pelas técnicas (já bem estabelecidas no domínio da engenharia estrutural) de avaliação da integridade física da estrutura entre os nós sensores sem fio.

A razão para adotar uma abordagem parcialmente descentralizada é a redução no número de mensagens transmitidas, o que causa principalmente uma redução do consumo de energia e permite atingir um maior tempo de vida da RSSF. No entanto, a adoção de uma abordagem parcialmente descentralizada apresenta novos desafios. No ambiente de recursos limitados da RSSF, a falta de memória e processamento geralmente impõe restrições (*trade-offs*), que podem afetar negativamente a precisão e exatidão das decisões obtidas de forma descentralizada. Além disso, as restrições de energia tornam necessário realizar tarefas de amostragem e decisão em menor quantidade, ou seja, reduzir a frequência dos ciclos de amostragem e decisão, para economizar energia.

Trabalhos classificados na terceira geração de soluções de SHM que usam redes de sensores são assim caracterizados pela presença de algum grau de descentralização em suas propostas. Alguns destes trabalhos visam o cálculo de “índices dano”, que possuem um significado valioso para a caracterização de dano, e ao mesmo tempo podem ser eficientemente transmitidos entre os nós da RSSF. Além disso, alguns níveis de fusão de informação são apresentados por esses trabalhos. Entretanto, o nível de abstração de dados que trata das decisões em torno da caracterização de danos em estruturas (*decision*) ainda é realizado de forma centralizada no nó sorvedouro.

Caffrey et al. (2004) apresentam um novo algoritmo para SHM usando RSSFs. Esse algoritmo é classificado como sendo pertencente à terceira geração de soluções de SHM que usam redes de sensores porque ele se baseia mais em processamento *in-network*, assumindo uma perspectiva parcialmente descentralizada para caracterizar os danos. A técnica de monitoramento definida em Caffrey et al. (2004) utiliza *shakers* eletrodinâmicos para gerar vibrações na estrutura, e usa os acelerômetros dos nós sensores para coletar dados por alguns segundos para captar essas vibrações. Para realizar uma análise estrutural, a técnica de processamento de sinais denominada *Fast Fourier Transform* (FFT) é aplicada sobre os dados de aceleração coletados em cada nó sensor, convertendo o sinal no domínio do tempo em um sinal no domínio da frequência. Depois, o espectro de frequência é analisado, e as frequências dos modos de vibração da estrutura, cujos valores correspondem aos picos do espectro de potência, são extraídas. Então, um nó sensor é eleito entre todos os demais nós sensores para ser o responsável por obter um resultado mais preciso, agregando todas as medidas de frequências modais e suas energias associadas (amplitudes dos picos de frequências modais), extraídos de todos os nós da rede. Finalmente, este resultado agregado é enviado para o servidor e, em seguida, a análise da variação das frequências pode ser realizada.

Existem outros diferentes métodos de SHM que podem ser usados juntamente com RSSFs, que também realizam processamento descentralizado. Alguns desses métodos são apresentados por Chintalapudi et al. (2006a), onde são descritos três métodos para detectar danos em estruturas. O primeiro é um método que realiza a redução de dados dentro da rede, e baseia-se em uma série temporal dos sinais de aceleração. Neste método a resposta da estrutura é modelada usando um modelo de séries temporais, que pode ser um modelo linear Autorregressivo (AR), ou *Autoregressive Moving Average* (ARMA). O dano é detectado por uma variação significativa nos coeficientes AR/ARMA, em relação aos coeficientes da estrutura intacta (saudável). Nesse método, cada nó sensor pode computar localmente esses coeficientes e encaminhá-los, em vez de transmitir todos os dados brutos de aceleração coletados. Então, se cada nó sensor envia 40 conjuntos de AR/ARMA coeficientes em vez de 5.000 amostras de dados de aceleração, mais de 99% em sobrecarga de comunicação é economizado. O segundo método utiliza as técnicas modais, onde a detecção de danos em estruturas é identificada fazendo uso da variação da assinatura da estrutura. Esta variação é observada ao comparar as assinaturas obtidas quando a estrutura está saudável e as assinaturas obtidas quando a estrutura está danificada. As variações nos formatos dos modos de vibração podem ser mais sensíveis aos danos, dependendo da estrutura analisada. O último método faz

uso de uma rede neural para detectar a possibilidade de danos. A maioria dos trabalhos encontrados na literatura adota o segundo método, incluindo a proposta do presente trabalho, o algoritmo Sensor-SHM. Por exemplo, os trabalhos de Cawley e Adams (1979), Messina et al. (1996) e Contursi et al. (1998), todos pertencentes à primeira geração de soluções de SHM que usam redes de sensores, também se baseiam em técnicas modais, porém todos consideram a aplicação dessas técnicas suportadas por redes cabeadas.

Hackmann et al. (2008), faz uso de uma RSSF para monitorar as condições estruturais. O estudo realizado resultou no surgimento de novos desafios para RSSFs, uma vez que essas redes passaram a ser utilizadas não só como uma infraestrutura para transportar a informação da solução de SHM, mas os nós sensores passaram a incorporar também parte do núcleo da solução em si. O trabalho mencionado propõe um algoritmo parcialmente descentralizado para ser usado juntamente com o método DLAC. No algoritmo, os dados são coletados e parcialmente processados pelos próprios nós sensores no interior da rede (o denominado *in-network processing*). No nó sorvedouro os valores de frequência que compõem a assinatura da estrutura são extraídos, através da resolução de uma equação matemática que expressa um ajuste de curva de um espectro de frequência resultante do processamento realizado dentro da RSSF. Depois, o algoritmo DLAC roda no nó sorvedouro para detectar e localizar danos, recebendo dados de entrada de duas fontes: (i) os dados sensorizados relativos à resposta de frequência estrutural e (ii) os dados relativos às respostas de um modelo analítico para o mesmo cenário. O modelo analítico é desenvolvido através de uma modelagem de elementos finitos. A descentralização parcial do processo de detecção de danos, permitindo que os nós sensores realizem processamento sobre os dados coletados, reduz significativamente o consumo de energia, uma vez que minimiza o número de transmissões necessárias. No entanto, é importante notar que a detecção de danos e a localização por meio do método DLAC ainda foram realizadas de modo centralizado, no nó sorvedouro.

Observa-se também na literatura o uso generalizado de coeficientes de danos semelhantes ao DLAC. Em geral, os valores numéricos desses coeficientes são extraídos a partir de dados brutos por meio de técnicas de fusão de informação, e os seus valores indicam a intensidade de uma ocorrência de danos, se estes existem, ou a proximidade de um local em relação ao local de um dano. Wang et al. (2007) analisam os requisitos para a concepção de aplicações de SHM baseadas em RSSF e discutem os desafios que surgem ao adotar abordagens de processamento descentralizado em RSSFs. Nesse trabalho de Wang et al. são propostos dois algoritmos. O primeiro algoritmo, *Distributed Damage Index Detection*

(DDID), é uma versão descentralizada de um algoritmo centralizado anteriormente proposto em Chen e Xu (2005). O segundo algoritmo, denominado *Collaborative Damage Event Detection* (CDED), usa os resultados fornecidos pelo algoritmo DDID e visa melhorar a confiabilidade e a precisão do relatório de danos através da troca de dados entre os nós sensores. O DDID é, de fato, uma medida da probabilidade de ocorrência de danos, isto é, uma medida de como os dados brutos coletados pelos nós sensores se desvia do seu estado normal, tal como referido em Park et al. (2010). Usando o algoritmo DDID, cada nó sensor inspeciona os dados brutos e determina os candidatos a danos. Uma vez que os candidatos são obtidos, os nós sensores em um grupo usam o algoritmo CDED para elaborar cooperativamente o relatório de danos contendo as informações sobre a localização, escala, e índice do dano. Os algoritmos CDED e DDID são algoritmos complementares em que a fusão de informação é realizada em diferentes níveis de abstração. No DDID, os níveis *measurement* e *feature* são mais evidentes, enquanto que no CDED o nível *decision* é mais evidente, o que caracteriza a proposta como um todo do trabalho relacionado como uma proposta de fusão multinível. Nesse trabalho, os nós sensores estão agrupados, e a rede é constituída por duas camadas, uma contendo os nós sensores, e a outra contendo os nós mestre. Nesse trabalho de Wang et al. são tratadas duas questões principais: (i) quanta informação ainda deve ser enviada de volta ao servidor, a fim de garantir a eficiência no uso da energia dos nós sensores e a precisão dos resultados, e (ii) como automatizar a decisão sobre a existência, localização e extensão de danos, que é originalmente tomada através da interferência humana.

Ainda no contexto dos coeficientes de dano, existe a possibilidade de realização de técnicas de fusão de informação sobre os dados brutos a partir de diferentes fontes para calcular o coeficiente de dano. É o caso do fator de dano apresentado por Yuan et al. (2008), um trabalho em que uma tecnologia descentralizada de SHM aplicável a estruturas de engenharia de larga escala é discutida. O fator de danos de Yuan et al. é calculado multiplicando as diferenças entre o valor saudável e o valor da corrente de duas variáveis diferentes: a amplitude e o *time-of-flight* do sinal captado por sensores piezo elétricos. Este tipo de fusão de informação é classificado como fusão cooperativa (NAKAMURA et al., 2007).

Existem trabalhos que apresentaram propostas de infraestruturas, como o NetSHM (CHINTALAPUDI et al., 2006b) e o Tenet (GNAWALI et al., 2006), que se destinam a permitir o uso de diferentes técnicas de SHM em uma única solução. O NetSHM é um

sistema programável por software para implementação de técnicas de SHM. Esse sistema permite que os engenheiros civis empreguem técnicas de SHM juntamente com RSSFs, sem a necessidade de entender profundamente o funcionamento e as especificidades dessas RSSFs (CHINTALAPUDI et al., 2006b). É importante mencionar que o Tenet é projetado para apoiar outras aplicações de outros domínios de aplicação além do domínio de SHM. O Tenet proposto em Gnawali et al. (2006) pode simplificar em muito o desenvolvimento de aplicações baseadas em RSSFs. O Tenet adota uma topologia hierárquica, que consiste de dois níveis. Um nível contém os nós mestre e outro contém os nós escravos. Nós mestre são responsáveis por executar a lógica principal da aplicação. Funcionalidades de fusão de informação de múltiplos nós e lógicas mais complexas de aplicação devem ser implantados apenas em nós mestres. Nós escravos são responsáveis pela aquisição de dados e, via software, são acessados através de uma interface simplificada, pelos nós mestre. Ambas as infraestruturas mencionadas não são soluções completas de SHM, mas buscam, principalmente, agir como uma camada de suporte à camada de aplicação da RSSF, dessa forma permanecendo logo abaixo da camada de aplicação, para apoiar o desenvolvimento de soluções em geral que funcionem sobre elas. Embora o NetSHM e o Tenet apresentem uma abordagem semelhante à do Wisden, eles permitem o uso de técnicas de fusão de informação para extrair os índices de dano dos dados brutos coletados. Assim sendo, as técnicas de processamento de sinais (por exemplo, a FFT) podem ser realizadas *in-network*. Este fato explica a classificação das infraestruturas NetSHM e Tenet na terceira geração de soluções de SHM que usam redes de sensores.

Em relação aos trabalhos da terceira geração de soluções de SHM que usam redes de sensores, o Sensor-SHM difere de cada trabalho relacionado em alguns aspectos específicos. Em relação ao trabalho de Caffrey et al. (2004), o Sensor-SHM difere, pois realiza a análise da variação de frequências ainda dentro da rede, com a colaboração dos CHs. Sensor-SHM é inspirado principalmente no trabalho apresentado em Hackmann et al. (2008). Uma das diferenças entre o Sensor-SHM e o trabalho de Hackmann et al. é que no Sensor-SHM todo o processo de extrair os valores de frequência do espectro de frequência é realizado dentro dos nós sensores, enquanto em Hackmann et al. esse processo é realizado por uma fase de *Curve Fitting*, que ocorre parcialmente dentro da rede e parcialmente no nó sorvedouro. Ao contrário de outros algoritmos propostos na literatura, todo o processamento de SHM do algoritmo proposto no presente trabalho é realizado sobre os nós sensores e CH, sem a ajuda do nó

sorvedouro. E através da colaboração entre os nós CH é possível detectar, localizar e determinar a extensão dos danos.

Da mesma forma que o trabalho descrito em Wang et al. (2007), a proposta do presente trabalho também é baseada em técnicas de fusão de informação em vários níveis de abstração para gerar índices de danos, e também adota uma organização hierárquica da RSSF. Além disso, o trabalho em Wang et al. (2007) levanta duas questões principais: (i) quanta informação ainda deve ser enviada de volta ao servidor, a fim de garantir a eficiência no uso da energia dos nós sensores e a precisão dos resultados, e (ii) como automatizar a decisão sobre a existência, localização e extensão de danos, que é originalmente tomada através da interferência humana. Essas questões foram tratadas de forma eficaz por Wang et al. (2007), e ambos os problemas também são tratados no contexto do Sensor-SHM. Os principais pontos em que o Sensor-SHM se diferencia da proposta de Wang et al. (2007), são (i) na forma como é calculado o coeficiente de dano, uma vez que os coeficientes de dano do Sensor-SHM baseiam-se na análise das frequências modais, uma característica não explorada no DDID, que por sua vez faz uso diretamente de sinais de aceleração brutos, (ii) o Sensor-SHM propõe mais operações de fusão de informação em diferentes níveis para calcular os coeficientes de danos e (iii) No Sensor-SHM o significado do *cluster*, a razão para o agrupamento dos nós sensores, está intimamente relacionado com questões de SHM, e o comportamento do *cluster* é diferente.

O fator de danos visto em Yuan et al. (2008) é calculado multiplicando as diferenças entre um valor saudável e um valor corrente, ambas obtidas a partir de duas fontes diferentes: a amplitude e o *time-of-flight* do sinal captado pelos sensores piezo elétricos. Embora esse aspecto seja uma possibilidade viável, no Sensor-SHM apenas uma característica é extraída a partir dos dados brutos para calcular os coeficientes de danos. Trabalhos futuros podem abranger o aspecto que se encaixa no conceito de fusão cooperativa (NAKAMURA et al., 2007). No algoritmo proposto pelo presente trabalho, o Sensor-SHM, as técnicas de fusão de informação adotadas são classificadas como fusão complementar (NAKAMURA et al., 2007), no caso de informações fundidas entre CHs, e fusão redundante (NAKAMURA et al., 2007), no caso de fusão de informações entre os nós sensores pertencentes ao mesmo *cluster*.

E, finalmente, o Sensor-SHM difere das infraestruturas Tenet e NetSHM principalmente no fato de que o Sensor-SHM é uma solução que lida com todas as camadas da pilha de protocolos da RSSF, compreendendo também a camada de aplicação e lançando foco sobre

ela, enquanto no Tenet e no NetSHM o foco é lançado sobre camadas inferiores da rede, caracterizando-os como sistemas de apoio.

### **3.5 A quarta geração de soluções de SHM que usam redes de sensores**

A quarta geração de soluções de SHM que usam redes de sensores inclui os trabalhos que apresentam soluções de SHM totalmente centradas em rede (*network centric*), ou seja, compreendendo apenas as soluções de SHM descentralizadas (por completo). Nessa quarta geração de soluções de SHM que usam redes de sensores, os nós sensores assumem todas as responsabilidades de processamento, desde os níveis de abstração de dados *measurement* e *feature*, até o nível *decision*, resultando em total independência do nó sorvedouro para realizar qualquer processamento voltado para a caracterização de dano.

Nessa seção são apresentados três trabalhos que apresentam soluções que são consideradas de quarta geração, dentre as quais o Sensor-SHM, proposto nesse trabalho, é uma das primeiras soluções. A proposta do presente trabalho, o Sensor-SHM, que foi publicada em Santos et al. (2010) e Santos et al. (2014), é o único trabalho na literatura pesquisada que apresenta uma abordagem totalmente descentralizada para a caracterização de danos em estruturas que faz uso de uma RSSF hierárquica.

O segundo é o trabalho de Lemos et al. (2011) e Lemos (2012), que apresenta uma solução de SHM descentralizada para RSSFs com topologia plana. O trabalho de Lemos et al. (2011) e Lemos (2012) propõe um mecanismo descentralizado para detecção de danos em uma pá de aerogerador utilizando uma rede de atuadores e sensores sem fio (RASSF) com topologia plana. Para identificação do dano foi utilizada a análise modal, considerando a influência da temperatura. A principal contribuição em torno desse mecanismo descentralizado engloba a realização de todas as etapas de identificação do dano e atuação dentro da RASSF, isto é, sem o auxílio de agentes externos. Ou seja, o sensoriamento, o tratamento dos dados, o processo de decisão e a atuação ocorrem *in-network*, de forma descentralizada. Outra contribuição desse mecanismo é a proposta de um índice de dano (ID), que sintetiza informações sobre danos que afetam as variações de frequências modais tanto locais quanto globais. Os nós sensores colaboram entre seus vizinhos, trocando mensagens com esse ID, e obtém uma decisão final acurada. O Sensor-SHM e o mecanismo distribuído de Lemos (2012) são soluções que visam à aplicação de múltiplas técnicas de fusão de informação para caracterizar danos em estruturas, calculando um indicador de dano. Por essa razão, classifica-se esse mecanismo descentralizado na quarta geração de soluções de SHM que usam redes de sensores. Embora o Sensor-SHM pertença à mesma geração de soluções de

SHM que usam redes de sensores que o mecanismo distribuído citado, ambas as propostas apresentam diferenças fundamentais. Em primeiro lugar, o mecanismo distribuído de Lemos (2012) considera atuadores em sua proposta, mencionando o uso desses dispositivos dentro de uma RASSF. Outra diferença fundamental é que o mecanismo distribuído mencionado considera a variação dos parâmetros ambientais que podem influenciar o comportamento da assinatura da estrutura durante sua operação no cálculo do índice de dano. Na proposta do Sensor-SHM, os valores de frequências naturais são assumidos como ideais, isto é, a influência dos parâmetros ambientais não é tratada no presente trabalho. Outra diferença é que o mecanismo distribuído proposto utiliza uma rede plana, ao contrário do Sensor-SHM, que considera uma rede hierárquica.

O terceiro é o trabalho de Rocha et al. (2010), Rocha et al. (2012), e Rocha (2012), que propõe um *middleware* para redes de sensores autonômicas, denominado *SEmantic Middleware for Autonomic seNsor neTworkS* (SEMANTK), que provê uma abstração da rede através da especificação de relacionamentos de vizinhança semântica entre os nós. Os relacionamentos de vizinhança semântica são a base para um mecanismo de auto-organização e autoconfiguração, que proporciona o atendimento de requisitos importantes das RSSFs, como a eficiência em energia e a acurácia. O SEMANTK é uma proposta complementar ao Sensor-SHM, pois o SEMANTK é capaz de fornecer uma metodologia de clusterização aplicável ao domínio de SHM. Porém ressalta-se que o SEMANTK foi desenvolvido para aplicações de quaisquer domínios, além do domínio de SHM (ROCHA et al. 2010; ROCHA et al. 2012; ROCHA 2012).

### 3.6 Considerações finais sobre a proposta de classificação

Nesse capítulo foi apresentada a proposta de classificação dos trabalhos relacionados em “gerações de soluções de SHM que usam redes de sensores”. Foram apresentadas evidências de que os trabalhos estão evoluindo para abordagens completamente descentralizadas (*network-centric*), nas quais a descentralização do processo de caracterização de danos e o processamento *in-network* estão sendo almejados através da utilização de técnicas de fusão de informação. O Sensor-SHM é a primeira solução de SHM que faz uso de uma RSSF que pode ser classificada como sendo de quarta geração, na qual os trabalhos apresentam abordagens totalmente descentralizadas. Uma síntese da proposta de classificação das soluções de SHM que usam redes de sensores é apresentada na Tabela 1.

**Tabela 1. Síntese da proposta de classificação**

Geração de soluções de SHM que	Trabalhos pertencentes
--------------------------------	------------------------

usam redes de sensores	
<b>Primeira Geração</b>	- Cawley e Adams (1979) - Messina et al. (1996) - Contursi et al. (1998)
Redes Cabeadas (soluções centralizadas)	
<b>Segunda Geração</b>	- Xu et al. (2004)
RSSF (soluções centralizadas)	- Paek et al. (2005) - Kim et al. (2007)
	- Caffrey et al. (2004)
	- Gnawali et al. (2006)
<b>Terceira Geração</b>	- Chintalapudi et al. (2006a)
RSSF (soluções parcialmente descentralizadas)	- Chintalapudi et al. (2006b) - Wang et al. (2007) - Hackmann et al. (2008)
	- Yuan et al. (2008)
<b>Quarta Geração</b>	- Santos et al. (2010) e Santos et al. (2014) - Lemos et al. (2011) e Lemos (2012) - Rocha et al. (2010), Rocha et al. (2012) e Rocha (2012)
RSSF (soluções descentralizadas)	

É importante mencionar que todos os trabalhos apresentados e classificados nessa seção visam à adoção de técnicas de SHM baseadas na utilização de acelerômetros. Entretanto, outros trabalhos, que utilizam outros tipos de dispositivos de sensoriamento (como, por exemplo, *strain gauges*), também podem ser incluídos na classificação proposta de gerações de soluções de SHM que usam redes de sensores, seguindo a mesma lógica de maior grau de descentralização e de processamento *in-network*.

Ressalta-se também que uma completa solução de SHM que usa redes de sensores deve fornecer todos os benefícios das soluções de todas as gerações de soluções de SHM que usam redes de sensores. Em soluções de SHM, reunir os sinais de aceleração amostrados em um sorvedouro é útil para registro de dados, e também para realizar uma análise visual e personalizada por um especialista. Porém, ainda assim, a decisão sobre o dano pode ser mais adequada quando tomada de forma autônoma, *in-network*, e sobre indicadores simples (números/features) construídos através de técnicas de fusão de informação, acelerando a resposta do sistema e sua reação em forma de ativação de alarmes no caso de uma ocorrência de dano. Assim sendo, tanto o transporte de dados confiável e eficiente, com base na compressão dos sinais de aceleração, assim como a utilização de técnicas de fusão de

informação, em uma abordagem descentralizada, são características importantes a serem consideradas em um sistema de SHM completo, com base em RSSFs.

## 4 Descrição do algoritmo Sensor-SHM

O Sensor-SHM foi projetado para monitorar a saúde de estruturas civis fazendo uso de uma RSSF hierárquica, isto é, composta por duas camadas. Uma das camadas contém os nós sensores, organizados em *clusters*, que são responsáveis pela execução de técnicas de fusão de informação nos níveis de abstração de dados de *measurement* e *feature*. A outra camada contém CHs encarregados da execução de técnicas de fusão de informação no nível de abstração de dados denominado *decision*. Assim sendo, um *cluster* de nós sensores, composto por um CH e seus nós sensores subordinados, é considerado a “unidade de sensoriamento básica” na rede. Nós sensores executam tarefas de sensoriamento apenas, enquanto os CHs não realizam tarefas de sensoriamento, sendo responsáveis exclusivamente pela coordenação do processamento dentro de seus respectivos *clusters*.

O conjunto de CHs existentes é definido propriamente como o conjunto  $J$  de CHs, onde cada CH é identificado por  $j = \{1, 2, \dots, Z\}$  e cada CH  $j$  possui um subconjunto de nós sensores subordinados, onde cada sensor é identificado unicamente dentro de um mesmo cluster por  $k = \{1, 2, \dots, K\}$ . Todos os subconjuntos de nós sensores subordinados a cada CH fazem parte de outro conjunto definido por  $I$ , que inclui todos os  $N$  nós sensores na rede, onde cada sensor é identificado unicamente dentre todos os nós sensores da RSSF por  $i = \{1, 2, \dots, N\}$ .

Esse capítulo está organizado em seis seções. Na Seção 4.1 é apresentada uma visão geral dos procedimentos do Sensor-SHM. Na Seção 4.2 são apresentadas as estruturas de dados utilizadas pelo algoritmo. Na Seção 4.3 é descrito o procedimento de Setup do algoritmo. Na Seção 4.4 é descrito o ciclo de operação do algoritmo. A Seção 4.5 apresenta uma discussão sobre a clusterização frente às necessidades da aplicação de SHM. A Seção 4.6 apresenta uma discussão sobre a sincronização frente às necessidades da aplicação de SHM.

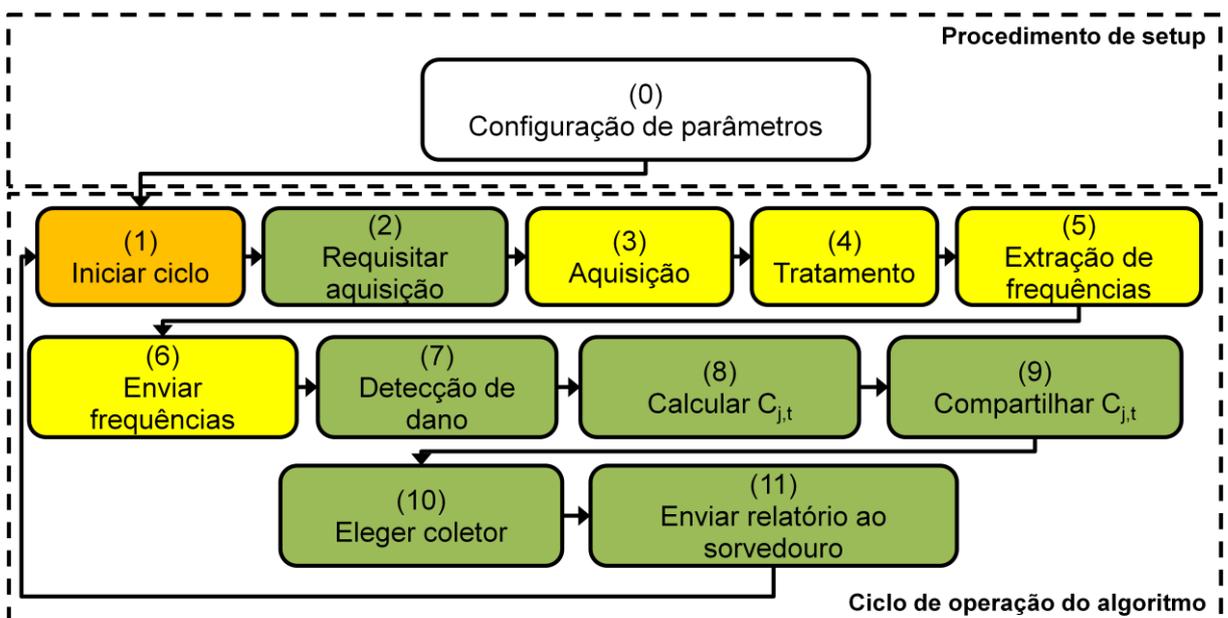
### 4.1 Visão geral do algoritmo Sensor-SHM

A descrição dos procedimentos em si do Sensor-SHM está dividida em dois procedimentos principais, mostrados na Figura 1. Inicialmente, um procedimento de **setup** é descrito, composto do procedimento 0 da Figura 1. O segundo procedimento consiste no **ciclo de operação do algoritmo**, composto dos procedimentos 1 a 11 da Figura 1.

O procedimento de setup do algoritmo consiste na configuração dos parâmetros iniciais necessários para a execução do Sensor-SHM (procedimento 0), efetuada antes de fazer a instalação da aplicação e a implantação da RSSF, ou seja, antes da instalação do

programa nos nós sensores e fixação do posicionamento desses na estrutura a ser monitorada. A realização da sincronização de todos os nós sensores da RSSF, que deve ser mantida e revista durante o ciclo de operação do algoritmo, deve ser realizada anteriormente ao procedimento de setup.

No Sensor-SHM o monitoramento estrutural é efetuado de forma periódica pelo procedimento de *loop* denominado ciclo de operação do algoritmo. Durante o ciclo de operação do algoritmo, iniciado pelo nó sorvedouro (procedimento 1), os nós CH solicitam aos nós sensores (procedimento 2) uma coleta de dados. Em seguida, os nós sensores, equipados com acelerômetros, coletam amostras de forma sincronizada da estrutura (procedimento 3). Em seguida, cada nó sensor executa uma Transformada de Fourier sobre a amostra coletada (procedimento 4) e aplica um método para extrair os valores de um dado número de frequências modais de interesse no espectro de frequência, relativas aos picos do espectro de frequência (procedimento 5). Após extrair esses valores, cada nó sensor os transmite para seus respectivos CHs (procedimento 6), onde é realizada a detecção de dano (procedimento 7) com base nesses valores. Caso seja detectado dano por um CH, um índice de danos é calculado para todo o *cluster* (procedimento 8) e trocado colaborativamente com outros CHs (procedimento 9) para que estes então realizem a localização e determinação da extensão do dano. Por fim, é eleito um nó CH denominado “coletor” (procedimento 10), para compor um relatório a ser enviado ao nó sorvedouro (procedimento 11).



### Figura 1. Visão geral do algoritmo Sensor-SHM

Uma fase de coleta de dados (procedimento 3), que ocorre no nível de abstração de dados *measurement*, é a fase que demora mais tempo para conclusão dentre as fases que compõem cada período do ciclo de operação do algoritmo. Além de ser a fase que leva mais tempo para conclusão, ressalta-se que há apenas uma fase de coleta de dados por período do ciclo de operação do algoritmo. Por esses dois motivos, escolheu-se referir-se a cada período do ciclo de operação do algoritmo pela sua “**fase de coleta de dados**”. Cada fase de coleta de dados é identificada por um número inteiro  $t$  (associado à ideia de tempo), que é incrementado em uma unidade para cada fase de coleta de dados (período do ciclo de operação do algoritmo) realizada.

## 4.2 Estruturas de dados

Nessa seção são apresentadas as estruturas de dados utilizadas pelo Sensor-SHM. São apresentadas as estruturas de dados definidas para serem usadas nos nós sensores (Seção 4.2.1) e as estruturas de dados definidas para serem usadas nos nós CH (Seção 4.2.2). Quanto aos tipos de mensagens utilizadas pelo Sensor-SHM, são apresentadas as **mensagens de dados** (Seção 4.2.3) e as **mensagens de controle** (Seção 4.2.4).

### 4.2.1 Estruturas de dados definidas nos sensores

As estruturas de dados definidas para serem utilizadas pelos nós sensores são: **base de dados de aquisição**, a **base de dados de parâmetros de aquisição** e a **assinatura da estrutura civil** ( $\omega_{i,t}$ ).

A **base de dados de aquisição** consiste em uma estrutura de dados utilizada para armazenamento dos dados coletados pelos acelerômetros dentro da memória dos nós sensores. Na **base de dados de parâmetros de aquisição** são armazenados os valores dos seguintes parâmetros: **período de coleta**, **número de amostras** e **taxa de amostragem**. O parâmetro período de coleta, que representa a duração de cada fase de coleta de dados (incluída em seu respectivo ciclo de operação), é definido em função de outros dois parâmetros: o número de amostras e a taxa de amostragem. Dessa forma, o período de coleta é definido como sendo o tempo suficiente para coletar um determinado número de amostras de aceleração a uma taxa de amostragem, o que resulta indiretamente em um período de coleta que se prolonga por um tempo equivalente à multiplicação do número de amostras pela taxa de amostragem. Ressalta-se que estes números não são fixos no algoritmo. Eles devem ser definidos para cada situação diferente de aplicação.

A **assinatura da estrutura civil**, denominada de forma simplificada “ $\omega_{i,t}$ ”, consiste de uma estrutura de dados utilizada para o armazenamento de uma assinatura de uma dada estrutura civil adquirida em relação a uma fase de coleta de dados “ $t$ ” (um inteiro sequencial que representa a passagem de tempo em fases de coleta de dados, e possui valor inicial  $t = 1$ ). Na estrutura de dados  $\omega_{i,t}$  são armazenadas  $M$  frequências modais percebidas em uma posição de sensoriamento identificada por um nó sensor “ $i$ ”. Portanto, por essa definição da assinatura da estrutura civil (aqui representada por um vetor  $\omega_{i,t}$  na Equação 1), diferentes nós sensores obtêm diferentes valores de assinaturas para a estrutura monitorada, dependendo das suas localizações e do instante de tempo.

$$\omega_{i,t} = \begin{bmatrix} \omega_{i,t}^1 \\ \omega_{i,t}^2 \\ \omega_{i,t}^3 \\ \dots \\ \omega_{i,t}^M \end{bmatrix} \quad (1)$$

#### 4.2.2 Estruturas de dados definidas nos CHs

As estruturas de dados definidas para serem utilizadas pelos nós CH são: **assinatura saudável da estrutura civil** ( $\omega_{i,0}$ ), a **diferença de assinaturas** ( $\Delta\omega_{i,t}$ ), **base de dados de coeficientes**, **base de dados de constantes**, **conjunto de CH vizinhos**, e **conjunto de nós sensores**.

A **assinatura saudável da estrutura civil** ( $\omega_{i,0}$ ) é definida de forma similar à assinatura da estrutura civil, porém para  $t = 0$ , o que representa uma convenção para o estado inicial das frequências modais, obtido antes do início do ciclo de operação do algoritmo. O ciclo de operação do algoritmo é composto pelas fases de coleta de dados  $t = 1$ ,  $t = 2$ ,  $t = 3$ , etc.. Essa estrutura de dados possui os  $M$  valores das frequências modais de referência do estado saudável da estrutura civil, para a posição representada pelo nó sensor  $i$ . Essa assinatura deve ser obtida quando a estrutura civil monitorada está sem dano. Um mesmo nó CH pode possuir diversas assinaturas saudáveis da estrutura civil, uma para cada nó sensor  $i$  subordinado.

A estrutura de dados **diferença de assinaturas** ( $\Delta\omega_{i,t}$ ) armazena valores resultantes de comparações efetuadas entre os valores armazenados nas estruturas de dados  $\omega_{i,t}$  e  $\omega_{i,0}$ . Assim sendo, a verificação da alteração das frequências modais de uma estrutura civil é realizada através da estrutura de dados  $\Delta\omega_{i,t}$ . Um mesmo nó CH pode possuir diversas estruturas de dados  $\Delta\omega_{i,t}$ , uma para cada nó sensor  $i$  subordinado.

A **base de dados de coeficientes** armazena os coeficientes  $D_{i,t}$  e  $C_{j,t}$ . O coeficiente  $D_{i,t}$  é definido de modo que o seu valor indica o quão próximo o nó sensor  $i$  está do local danificado. O coeficiente  $C_{j,t}$  é um indicador do quão próximo o dano se encontra do *cluster*  $j$  como um todo.

A **base de dados de constantes** armazena as constantes  $T_i$ ,  $A_i$  e  $L_j$ . Os valores de tolerâncias para cada modo de vibração (posição do vetor  $\Delta\omega_{i,t}$ ) são armazenadas no vetor  $T_i$ . É importante mencionar que o vetor  $T_i$  é determinado para cada sensor, e com base no conhecimento e análise dos locais em que cada sensor vai ser instalado. Além disso, o vetor  $T_i$  pode ser estatisticamente determinado após a obtenção de uma série de amostras experimentais. O objetivo de adotar o vetor de tolerância  $T_i$  é evitar que pequenas perturbações aleatórias, que não implicam a ocorrência de condições anormais de fato, sejam consideradas pelo procedimento de monitoramento como tal.  $A_i$  é definido como um vetor de pesos, atribuídos a cada frequência modal que compõe  $D_{i,t}$ .  $L_j$  é uma tolerância definida para cada CH, de modo semelhante ao da determinação dos valores do vetor de tolerância  $T_i$ , porém para o valor de  $C_{j,t}$ . Os valores de tolerância  $L_j$  dependem das características estruturais, e, portanto, devem ser determinados por um perito na estrutura, por exemplo, por meio de análise estatística.

A estrutura de dados **conjunto de CH vizinhos** informa a cada CH quem são seus vizinhos. Vizinhos de um CH são outros CHs, de outros *clusters*, com os quais é permitida a comunicação a fim de realizar as tarefas relacionadas com a localização e determinação da extensão de danos (procedimentos 8, 9 e 10 da Figura 1). A estrutura de dados **conjunto de nós sensores** informa a cada CH quais são os nós sensores a ele subordinados. Ao preencher essas duas estruturas de dados todas as comunicações necessárias ao algoritmo Sensor-SHM podem ser facilmente estabelecidas.

### 4.2.3 Tipos e formatos de mensagens de dados

**Mensagens de dados** são mensagens cuja área de dados (*payload*) contém informações sobre o estado da estrutura civil monitorada. As mensagens de dados são do tipo: **transmissão de assinatura, localização de dano, e relatório**.

A mensagem de dados do tipo **transmissão de assinatura** carrega em sua área de dados (*payload*) a estrutura de dados  $\omega_{i,t}$ , com dados sobre frequências modais gerados por um nó sensor  $i$ , e em um momento  $t$ . Esse tipo de mensagem é transmitido por cada um dos nós sensores para o seu respectivo CH. Cada mensagem transmissão de assinatura requer uma

quantidade de bytes variável em seu *payload*, de acordo com (i) a quantidade de bytes necessária para armazenar um valor de uma frequência modal e (ii) a quantidade  $M$  de frequências modais percebidas em uma posição de sensoriamento identificada por um nó sensor  $i$ . Ambas as quantidades (i) e (ii) variam de acordo com as especificidades da aplicação e da plataforma escolhida para implementação do Sensor-SHM.

A mensagem de dados do tipo **localização de dano** carrega em sua área de dados (*payload*) o valor de  $C_{j,t}$ , gerado por um CH  $j$ , e em um momento  $t$ . Esse tipo de mensagem pode ser transmitido apenas entre nós CH, para que estes sejam informados dos valores de  $C_{j,t}$  de seus vizinhos imediatos e possam realizar o procedimento de localização e determinação da extensão de dano. Cada mensagem de localização de dano requer a quantidade de bytes suficiente para a transmissão de um número, que seja capaz de representar o coeficiente  $C_{j,t}$  na plataforma onde for realizada a implementação do Sensor-SHM.

A mensagem de dados do tipo **relatório** carrega em sua área de dados (*payload*) todos os valores de  $\omega_{i,t}$  de todos os seus CHs vizinhos imediatos. A partir dessas informações é possível reproduzir a execução de todos os procedimentos que ocorreram durante o atual período do ciclo de operação do algoritmo. Esse tipo de mensagem pode ser transmitido apenas entre o nó CH, eleito como nó coletor, e o sorvedouro. Cada mensagem de relatório requer uma quantidade variável de bytes em seu *payload*, de forma similar às mensagens transmissão de assinatura, porém considerando além das quantidades (i) e (ii) também (iii) a quantidade de nós sensores por *cluster* e (iv) a quantidade de CHs vizinhos do CH eleito como coletor.

#### 4.2.4 Tipos e formatos de mensagens de controle

**Mensagens de controle** são mensagens com área de dados (*payload*) vazia, utilizadas para propósitos gerais (de gestão). As mensagens de controle são do tipo: **solicitação de coleta e confirmação**.

A mensagem de controle do tipo **solicitação de coleta** é utilizada para iniciar as fases de coleta de dados. Esse tipo de mensagem de controle é transmitido inicialmente pelo nó sorvedouro para os nós CH que, em seguida, retransmitem essa mensagem para os seus nós sensores subordinados.

A mensagem de controle do tipo **confirmação** é utilizada para confirmar a recepção de mensagens (de dados e de controle) consideradas vitais para a correta execução do algoritmo como, por exemplo, a mensagem de dados do tipo transmissão de assinatura e a mensagem de

controle do tipo solicitação de coleta. A mensagem de controle do tipo confirmação é transmitida, portanto, entre nós sensores e seus respectivos CH, bem como entre nós CH e o nó sorvedouro.

### 4.3 Procedimento de setup do Sensor-SHM

O procedimento de setup é necessário para preparar o Sensor-SHM para realizar o seu ciclo de operação. A seguir são descritos os parâmetros que devem ser configurados no Sensor-SHM durante o procedimento de setup (procedimento 0 da Figura 1).

Os parâmetros **período de coleta**, **número de amostras** e **taxa de amostragem**, armazenados na **base de dados de parâmetros de aquisição**, devem ser configurados durante o procedimento de setup. As constantes da **base de dados de constantes** também devem ser definidas no procedimento de setup, ou seja, antes da implantação do Sensor-SHM no sensor e instalação física da RSSF, embora não haja restrições que impeçam a alteração desses valores durante o ciclo de operação do algoritmo. Mecanismos que permitam a alteração desses valores, de acordo com os critérios do usuário, podem ser implementados. Por exemplo, novos valores podem ser informados aos nós de interesse do usuário através de mensagens originadas na estação base.

Outros parâmetros ainda devem ser preenchidos no procedimento de setup, tais como as estruturas de dados **conjunto de CH vizinhos** e **conjunto de nós sensores** que fazem parte de um *cluster*. É importante mencionar que o processo de formação de *clusters* e de seleção dos nós CH, que ocorre antes do procedimento de setup, pode ser realizado por um protocolo de clusterização, ou pode também ser realizado manualmente, através da definição direta sobre os programas controladores instalados nos nós sensores (de forma determinística). O funcionamento adequado do Sensor-SHM depende do resultado do processo de clusterização de rede, cujos resultados são utilizados pelo Sensor-SHM para alimentar as estruturas de dados conjunto de CH vizinhos e conjunto de nós sensores, para cada CH.

Depois de todas as configurações serem realizadas, a rede pode ser instalada fisicamente sobre a área de monitoramento (a estrutura civil escolhida), e os nós podem ser alocados às suas posições fixas. Em seguida, os sensores entram em modo de espera e aguardam o início do ciclo de operação do algoritmo.

É importante mencionar que cada período de coleta deve começar ao mesmo tempo em todos os nós sensores da RSSF, de modo que possa ser realizada uma comparação da assinatura obtida mais recentemente e a assinatura saudável dessa mesma estrutura por um

mesmo nó sensor, assim como comparações realizadas entre as assinaturas de diferentes nós sensores obtidas no mesmo momento. Assim sendo, é necessário assegurar a **sincronização** entre os dados coletados por cada nó sensor. O problema de sincronização é relatado e abordado em Kim et al. (2007) e Xu et al. (2004). O Sensor-SHM assume, para a correta execução de todos os seus procedimentos, que todos os nós da RSSF possuem seus relógios sincronizados. A sincronização deve ser realizada antes do procedimento de setup e deve ser revista periodicamente, durante o ciclo de operação do algoritmo.

#### **4.4 Ciclo de operação do algoritmo**

No Sensor-SHM o monitoramento estrutural é efetuado de forma periódica pelo procedimento de *loop* denominado **ciclo de operação do algoritmo**. Cada período repetido do ciclo de operação do algoritmo é composto de quatro fases, as fases de (i) coleta de dados (Seção 4.4.1), (ii) tratamento de dados (Seção 4.4.2), (iii) detecção de dano (Seção 4.4.3) e (iv) localização e determinação da extensão de dano (Seção 4.4.4).

##### **4.4.1 Fase de coleta de dados**

O nó sorvedouro, em um dado instante  $t$ , inicia a fase de coleta de dados. A mensagem de **solicitação de coleta** é enviada do nó sorvedouro para todos os CHs (procedimento 1 da Figura 1), e esses, por sua vez, são responsáveis pelo reenvio da mensagem de **solicitação de coleta** para todos os seus nós sensores subordinados para agendar o horário de início da próxima tarefa de coleta de dados (procedimento 2 da Figura 1). A partir do recebimento dessa mensagem de solicitação e coleta, todos os nós sensores da RSSF iniciam o processo de coleta no mesmo horário. Cada nó sensor retorna uma mensagem de **confirmação** ao respectivo CH, para informar que saiu do modo *sleep* e está coletando dados.

Assim, em cada fase de coleta de dados  $t$ , cada nó sensor coleta os dados de aceleração, no domínio do tempo e em relação à sua posição física sobre a estrutura (procedimento 3 da Figura 1). Os dados de aceleração são coletados segundo os parâmetros período de coleta, número de amostras e taxa de amostragem. Os dados coletados são armazenados na base de dados de aquisição de cada nó sensor.

##### **4.4.2 Fase de tratamento de dados**

Essa fase é iniciada com os nós sensores fazendo uso de alguma técnica de processamento de sinal com objetivo de transformar os dados do domínio do tempo para o domínio da frequência, ou seja, a técnica denominada **transformada de Fourier** (procedimento 4 da Figura 1).

A transformada de Fourier deve ser aplicada sobre o respectivo sinal de aceleração, que foi coletado na fase de coleta de dados. Essa técnica de processamento de sinais corresponde a uma técnica de fusão de informação DAI-DAO, que age no nível de abstração de dados *measurement*, e gera como resultado um espectro de frequência que pode ser analisado. A implementação dessa técnica de processamento de sinais deve ser escolhida de acordo com as especificidades da aplicação, e com a oferta de recursos da plataforma de hardware de RSSF escolhida. Há diversas denominações para as diferentes implementações da transformada de Fourier, como a DFT, FFT e a IFT, citadas na Seção 2.4.

Em seguida, outra técnica, que pode ser considerada uma técnica de fusão de informação DAI-FEO, é aplicada para extrair as frequências modais do espectro de frequência gerado pela Transformada de Fourier. A **técnica de extração de frequências modais** (procedimento 5 da Figura 1), aplicada após a Transformada de Fourier, tem o mesmo objetivo do ajuste de curva polinomial visto em Hackmann et al. (2008), mas deve ser muito menos dispendiosa em termos de processamento e consumo de energia, podendo ser totalmente implementada e executada dentro dos nós sensores. No entanto, essa técnica pode ser menos precisa, conduzindo a mais erros. Esta falta de precisão pode ser contornada aumentando o número de nós sensores em cada *cluster*, de forma a obter dados redundantes.

A técnica de extração de frequências modais pode ser composta de (i) um filtro média móvel (outro exemplo de técnica de fusão de informação DAI-DAO, onde o dado de entrada é o espectro de frequência e o dado de saída é o espectro de frequência suavizado) e (ii) da técnica de identificação e extração de valores de frequência, sobre os quais os picos de energia do espectro suavizado estão localizados.

Os valores de frequência extraídos do espectro de frequência gerado pela técnica de processamento de sinal adotada, assumindo que não há interferência de ruído, são relacionados às frequências modais da estrutura, ou seja, são as primeiras *features*, úteis, sobre as quais os CHs podem tomar decisões. Estes poucos valores (em relação ao tamanho do sinal original) de frequências modais são mais eficientemente manipuláveis entre os sensores. Os valores de frequência extraídos são armazenados na estrutura de dados  $\omega_{i,t}$  (Equação 1).

Finalmente, as estruturas de dados  $\omega_{i,t}$  geradas por cada nó sensor  $i$ , e em uma fase de coleta de dados  $t$ , são enviadas para seus respectivos CHs através de mensagens **transmissão de assinatura** (procedimento 6 da Figura 1), que respondem com uma mensagem de

**confirmação.** Essa transmissão da mensagem de assinatura, no nível de abstração de dados *feature*, sinaliza o fim da atividade do nó sensor para esta fase de coleta de dados, e ele entra em modo de espera. O CH, em seguida, inicia sua sequência de procedimentos de fusão de informação, classificados em dois níveis de abstração de dados (*feature* e *decision*).

#### 4.4.3 Detecção de dano

O CH é responsável por verificar a alteração das frequências modais de uma estrutura (procedimento 7 da Figura 1) comparando os valores das estruturas de dados  $\omega_{i,0}$  de cada nó sensor subordinado e os subsequentes valores das estruturas de dados  $\omega_{i,t}$ , gerados de forma semelhante aos valores da estrutura de dados  $\omega_{i,0}$ , e obtidos nas fases de coleta de dados  $t$ . Portanto, a verificação da alteração das frequências modais de uma estrutura é realizada comparando-se as estruturas de dados  $\omega_{i,t}$  e  $\omega_{i,0}$ , para um mesmo nó sensor. Essa comparação é realizada utilizando o valor absoluto da diferença entre  $\omega_{i,t}$  e  $\omega_{i,0}$ , e o resultado é armazenado na estrutura de dados  $\Delta\omega_{i,t}$ , como se vê na Equação 2. A título de ilustração, as estruturas de dados na Equação 2 são representadas por vetores.

$$\Delta\omega_{i,t} = |\omega_{i,0} - \omega_{i,t}| = \begin{bmatrix} |\omega_{i,0}^1 - \omega_{i,t}^1| \\ |\omega_{i,0}^2 - \omega_{i,t}^2| \\ |\omega_{i,0}^3 - \omega_{i,t}^3| \\ \dots \\ |\omega_{i,0}^M - \omega_{i,t}^M| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta\omega_{i,t}^1 \\ \Delta\omega_{i,t}^2 \\ \Delta\omega_{i,t}^3 \\ \dots \\ \Delta\omega_{i,t}^M \end{bmatrix} \quad (2)$$

Para quaisquer situações em que ao menos um dos valores de frequência modal obtida durante a fase de coleta de dados  $t$  seja diferente da frequência modal saudável, o CH pode assumir, considerando uma dada tolerância  $T_i$ , que houve uma alteração significativa na estrutura monitorada, o que pode indicar a presença de danos ou a ação de um evento externo temporário. Portanto, se algum (ao menos um) valor de qualquer posição da estrutura de dados  $\Delta\omega_{i,t}$  exceder a sua tolerância (especificada na mesma posição da estrutura de dados  $T_i$ ), para qualquer sensor  $i$  subordinado ao CH (decisão de detecção de dano), o CH prossegue para o passo seguinte do processo de monitoramento, referente à localização e determinação da extensão do dano, uma vez que foi detectada uma condição anormal da estrutura civil.

Esta decisão de detecção de dano é o resultado de uma técnica de fusão de informação FEI-DEO, e reduz o consumo de energia da RSSF em caso de não haver dano, uma vez que evita a execução desnecessária das próximas fases (e um consequente desperdício de energia). Em caso de haver dano, essa técnica de fusão de informação reduz os dados sobre os quais serão tomadas as decisões das próximas etapas.

#### 4.4.4 Localização e determinação da extensão de dano

O procedimento de localização e determinação da extensão de danos é classificado como uma técnica de fusão de informação FEI-DEO. Sabendo que as mudanças nas frequências dos modos de vibração mais elevados significam mudanças nos modos de vibração locais, como visto na Seção 2.4, cada CH analisa as estruturas de dados  $\Delta\omega_{i,t}$  (*features*) de todos os sensores localizados em seu *cluster* em busca desses tipos de mudanças. Essa análise é realizada através do cálculo dos coeficientes  $D_{i,t}$  e  $C_{j,t}$  (procedimento 8 da Figura 1).

Em cada CH, e para cada fase de coleta de dados  $t$ , essa análise é realizada com a ajuda do coeficiente  $D_{i,t}$ , que é calculado para cada sensor  $i$  que ultrapassa a tolerância determinada, no dado *cluster* (Equação 3). Esse cálculo é realizado através da soma dos resultados de cada multiplicação de variação de frequência modal, presente na estrutura de dados  $\Delta\omega_{i,t}$ , pelo seu respectivo valor de peso  $A_i$ . O coeficiente  $D_{i,t}$  é definido de modo que o seu valor indica o quão próximo o nó sensor  $i$  está do local danificado.  $A_i$  é definido como um vetor de pesos, atribuídos a cada frequência modal que compõe  $D_{i,t}$ . Para identificar os sensores que estão mais próximos do local danificado é possível atribuir valores mais elevados para os pesos associados às frequências modais mais altas.

$$D_{i,t} = A_i^T \Delta\omega_{i,t} = [A_i^1 \quad A_i^2 \quad A_i^3 \quad \dots \quad A_i^M] * \begin{bmatrix} \Delta\omega_{i,t}^1 \\ \Delta\omega_{i,t}^2 \\ \Delta\omega_{i,t}^3 \\ \dots \\ \Delta\omega_{i,t}^M \end{bmatrix} \quad (3)$$

Em seguida, em cada *cluster*  $j$  os coeficientes  $D_{i,t}$  são agregados, somando-se os valores para todos os  $K$  nós sensores no *cluster*, resultando em um coeficiente  $C_{j,t}$  (Equação 4). O coeficiente  $C_{j,t}$  é um indicador do quão próximo o dano se encontra do *cluster*  $j$  como um todo. O algoritmo utiliza principalmente este indicador para localizar e determinar a extensão de danos.

$$C_{j,t} = \sum_{i=1}^K D_{i,t} \quad (4)$$

De acordo com as Equações 3 e 4, cada um dos coeficientes  $D_{i,t}$  e  $C_{j,t}$  são resultados de técnicas de fusão de informação FEI-FEO. Os pesos  $A_i$ , que desempenham papel fundamental na técnica FEI-FEO que resulta no coeficiente  $D_{i,t}$ , devem ser escolhidos de modo que os nós sensores pertencentes a um dado *cluster* localizado perto do local do dano obtenham os

maiores coeficientes  $D_{i,t}$  de toda a RSSF. Em outros *clusters*, os coeficientes  $D_{i,t}$  devem ser menores, mas ainda assim diferentes de zero, uma vez que os valores das variações das frequências modais mais baixas da estrutura (cuja tendência é a igual identificação por todos os nós da RSSF) também serão alterados.

Em seguida é realizado um procedimento de colaboração (procedimento 9 da Figura 1). Neste procedimento, cada nó CH compara seu coeficiente  $C_{j,t}$  com um valor de tolerância  $L_j$ . Quando o coeficiente  $C_{j,t}$  exceder  $L_j$ , o CH envia uma mensagem **localização de dano** informando seu coeficiente  $C_{j,t}$  aos seus vizinhos imediatos, que são também CHs. Após o CH  $j$  transmitir o seu valor de  $C_{j,t}$  aos seus vizinhos CH imediatos, espera-se que alguns destes vizinhos também tenham excedido os seus respectivos valores de tolerância  $L_j$ , e, assim, tenham enviado mensagens **localização de dano** com seus respectivos valores de coeficientes  $C_{j,t}$  para os seus respectivos vizinhos CHs imediatos. A colaboração entre os CHs é classificada como uma técnica de fusão de informação DEI-DEO, já que cada CH toma a sua própria decisão local para assumir dano ou não, mas em seguida à tomada dessa decisão permite-se considerar as decisões de outros vizinhos imediatos para gerar uma decisão confiável.

Então, após o procedimento de colaboração, cada um dos CHs compara os valores de  $C_{j,t}$  recebidos com o seu próprio valor, e o CH que possuir o maior valor de  $C_{j,t}$  em uma determinada vizinhança assume o papel de um nó “coletor” (procedimento 10 da Figura 1). Ao adotar o maior valor de  $C_{j,t}$  entre os CHs, um método de agregação com base em uma função máximo está sendo aplicado para definir o nó coletor. O nó coletor é responsável por agregar as informações sobre os valores de  $\omega_{i,t}$  de todos os seus vizinhos CHs e construir um relatório a ser enviado para o nó sorvedouro, através de uma mensagem **relatório**, emitindo um aviso (procedimento 11 da Figura 1).

Para construir o relatório que será enviado para o nó sorvedouro, através de uma mensagem **relatório**, foram escolhidos os valores de  $\omega_{i,t}$  para a atual fase de coleta de dados  $t$ , pois a partir desses valores é possível deduzir todas as outras informações relevantes. Uma vez que o nó sorvedouro tem conhecimento dos valores das estruturas  $\omega_{i,0}$ , e de todos os valores de pesos e tolerâncias, é possível calcular todos os outros valores relacionados que foram mostrados anteriormente nesta explicação, e ainda ter uma visão sobre a realização de todos os passos do algoritmo por cada nó sensor e CH dentro da rede durante uma fase de coleta de dados  $t$ .

Assume-se que a localização e a extensão de danos são determinadas a partir das posições dos nós CH cujos coeficientes  $C_{j,t}$  tenham ultrapassado os valores das respectivas tolerâncias  $L_j$  em uma determinada fase de coleta de dados. Ressalta-se que as posições dos nós CH são conhecidas, pois são obtidas durante a instalação da RSSF e fixas. Em caso de múltiplas localidades de danos, ou grandes extensões de danos, que cubram uma grande área sobre a estrutura, a tendência é de que haja muitos nós coletores eleitos, e vários relatórios com origens de diversos locais da estrutura chegarão ao nó sorvedouro.

É importante notar que o nó sorvedouro apenas desempenha o papel de apoiar os CHs em suas tarefas, enviando uma mensagem **solicitação de coleta** para toda a rede agendando o momento de início da fase de coleta de dados, armazenando dados históricos no tempo (mensagens relatório) e realizando atividades de auditoria na RSSF. Nenhum cálculo relativo à detecção, localização e determinação da extensão de danos precisa ser feito no nó sorvedouro.

No nó sorvedouro a localização do dano é obtida através dos identificadores únicos e posições dos nós CHs que emitiram relatórios e seus nós sensores subordinados, e a extensão de danos é determinada pela área coberta por esses nós sensores e CHs. Através dos valores contidos no relatório é possível reproduzir a situação que ocorreu dentro da rede e tomar as decisões adequadas sobre a manutenção preditiva da estrutura.

A utilização conjunta de todos os procedimentos mencionados no algoritmo Sensor-SHM, cada um agindo em um ou mais níveis de abstração de dados é, portanto, a razão pela qual o algoritmo proposto é classificado como um processo de fusão de informação multinível, ou *Multilevel Fusion*.

#### **4.5 Discussão sobre a *clusterização* frente às necessidades da aplicação SHM**

É importante mencionar que o processo de formação de *clusters* e de seleção dos nós CH, que ocorre durante o procedimento de setup, pode ser realizado por um protocolo de clusterização, ou pode também ser realizado manualmente, através da definição direta sobre os programas controladores instalados nos nós sensores (de forma determinística). O funcionamento adequado do Sensor-SHM depende do resultado do processo de clusterização de rede, cujos resultados são utilizados pelo Sensor-SHM para alimentar as matrizes de nós sensores subordinados, para cada CH. O Sensor-SHM, por definição, é agnóstico a qualquer protocolo de clusterização específico. No entanto, o critério utilizado para criar *clusters* e eleger CHs precisa ser fortemente relacionado às necessidades da aplicação de SHM.

O número de *clusters* deve ser preferencialmente definido de acordo com o número de elementos estruturais homogêneos que se deseja sensoriar. Um elemento estrutural homogêneo pode ser definido como um componente contínuo de uma estrutura maior, delimitado por conexões, encaixes, ou quaisquer descontinuidades com outros elementos estruturais, e que possui, ao longo de todas as suas dimensões, propriedades físicas e químicas homogêneas, além de estar sob o efeito das mesmas condições ambientais ao longo de todas as suas dimensões. Exemplos de um elemento estrutural homogêneo são: uma barra, viga, laje, um pilar, ou um tubo, todos constituídos por um mesmo material cada, ao longo de suas dimensões. Para estruturas de grandes dimensões como, por exemplo, dutos de óleo e gás (NEŠIĆ, 2007), uma possibilidade seria interpretar cada seção do duto como um elemento estrutural homogêneo. Caso uma análise com maior grau de detalhe seja desejável, é possível considerar ainda cada elemento estrutural como sendo a parte delimitada por apoios, dentro de uma mesma seção. Dessa forma, apenas um especialista na estrutura é capaz de delimitar claramente quais serão os elementos estruturais homogêneos de interesse, sobre os quais os clusters serão instalados e, para isso, deve considerar as dimensões da estrutura como um importante fator.

O número de nós sensores por *cluster*, por sua vez, indica a quantidade de dados redundantes em torno de um mesmo elemento estrutural homogêneo (afeta a exatidão e a precisão da detecção de dano). O número de CHs é definido pelo número de *clusters* (um CH por *cluster*) e a vizinhança de cada CH deve ser definida de acordo com as semelhanças entre as propriedades estruturais dos elementos estruturais adjacentes, monitorados por cada *cluster*.

Assim sendo, apesar do fato do algoritmo Sensor-SHM ser agnóstico ao protocolo de clusterização adotado, quando se escolhe um dentre os demais protocolos existentes para utilizar juntamente ao Sensor-SHM, a escolha de um algoritmo de clusterização semântica (ROCHA et al. 2010; ROCHA et al. 2012; ROCHA 2012) é capaz de gerar melhores resultados porque considera as relações semânticas (verificadas através dos dados coletados por cada nó sensor) entre as posições dos nós e a área de monitoramento. Logo, a clusterização semântica é capaz de gerar clusters de nós instalados sobre o mesmo elemento estrutural homogêneo, a partir dos dados gerados pelos próprios nós sensores.

Escolher um protocolo de clusterização como o *Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy* (LEACH) (HEINZELMAN et al., 2000; HEINZELMAN et al., 2002) pode não ser uma escolha apropriada, uma vez que a eleição aleatória de CHs pode ignorar a correlação

semântica entre os nós sensores e suas posições na estrutura monitorada. Também no LEACH, o número de sensores em cada *cluster* é escolhido para minimizar a distância entre os sensores e CHs, o que pode resultar em atribuições de sensores semanticamente correlacionados a diferentes *clusters*, fazendo com que o coeficiente  $C_{j,t}$  passe a agregar dados de diferentes origens semânticas, isto é, dados originados de diferentes elementos estruturais. Dessa forma, o cálculo de  $C_{j,t}$  será realizado de forma equivocada, o que resultará em erros na detecção, localização e determinação da extensão de danos.

A escolha de um protocolo como o SKATER (ASSUNÇÃO et al., 2006) é uma escolha mais adequada, mas que ainda apresenta certas desvantagens. O protocolo SKATER assume uma organização da rede focada na correlação dos dados entre os nós. Portanto, a correlação entre os nós sensores e suas posições é mantida indiretamente, uma vez que os dados coletados por cada nó sensor estão diretamente correlacionados com a posição do sensor. No entanto, o algoritmo SKATER ainda prevê uma reeleição dinâmica de CHs, o que pode impor mudanças indesejadas no cenário usado para a análise da estrutura. Em aplicações de SHM, qualquer alteração nos locais de sensoriamento escolhidos pode fornecer uma análise não confiável, a menos que as relações semânticas entre os sensores e suas posições ainda sejam rigorosamente respeitadas com essa mudança.

A adoção de um dos protocolos citados pode resultar em erros na detecção, localização e determinação da extensão de danos, mas em contrapartida também pode proporcionar um maior tempo de vida para a RSSF. Por esta razão, a formulação de novos protocolos de clusterização semântica pode ser uma contribuição importante para o desempenho do algoritmo Sensor-SHM, buscando tanto evitar tais erros na detecção, localização e determinação da extensão de danos, quanto obter os benefícios de uma formação de *clusters* eficiente.

No entanto, ressalta-se que os protocolos de clusterização (e também de comunicação *multihop*) ainda podem ser escolhidos livremente (sem nenhuma restrição pelo Sensor-SHM) se o foco for apenas garantir eficientemente as capacidades e rotas de comunicação dos nós sensores, isto é, foco apenas sobre a formação de “*clusters* de comunicação”. Sendo assim, a coexistência dos *clusters* para atender aos requisitos da aplicação (*clusters* no nível da aplicação Sensor-SHM, para os quais a correlação semântica é fundamental para a caracterização de dano) e *clusters* (possivelmente diferentes, formados por nós diferentes) para realizar o transporte de dados de forma confiável e eficiente (os *clusters* de comunicação, no nível de rede e transporte), pode resultar num aumento de desempenho em geral da RSSF,

em troca de maior consumo de energia para gerenciar os dois tipos de *clusters*, coexistindo simultaneamente, mas em camadas diferentes.

#### 4.6 Discussão sobre a sincronização frente às aplicações de SHM

É importante mencionar que o processo de sincronização (iniciado durante a fase de setup do Sensor-SHM e revisto no início de cada ciclo de operação) é de fundamental importância para garantir a correlação espacial e temporal dos dados coletados por cada nó da RSSF, e assim garantir a confiabilidade das análises realizadas e decisões tomadas *in-network* pelos nós CH. O funcionamento adequado do Sensor-SHM depende, portanto, do resultado do processo de sincronização da rede, que determina se a RSSF será capaz de iniciar simultaneamente a aquisição de dados por cada nó sensor.

O Sensor-SHM, por definição, é agnóstico a qualquer protocolo de sincronização específico, isto é, o processo de sincronização pode ser realizado por quaisquer protocolos de sincronização encontrados na literatura. Não há discriminação, em termos de resultados de sincronização, entre os protocolos de sincronização presentes na literatura, que influencie a operação do algoritmo Sensor-SHM em si. Entretanto, a escolha do protocolo de sincronização deve levar em consideração (i) a baixa quantidade de recursos disponíveis nos nós da RSSF, de forma que o protocolo de sincronização apresente um impacto (em termos de comunicação, processamento e consumo de energia) que seja compatível com o impacto do Sensor-SHM na RSSF, isto é, o impacto resultante deve permitir a operação de ambos em simultâneo sobre a mesma RSSF, e (ii) as características da aplicação de SHM, e o grau de precisão desejado na análise da estrutura, ambos definidos por um especialista no cenário de aplicação (estrutura monitorada). Protocolos de sincronização amplamente difundidos na literatura que atingem precisão suficiente para aplicações de SHM, e que foram desenvolvidos especificamente para o ambiente de recursos restritivos das RSSF, são o *Reference-Broadcast Synchronization* (RBS) (ELSON et al. 2002), o *Timing-Sync Protocol for Sensor Networks* (TPSN) (GANERIWAL et al., 2003) e o *Flooding Time Synchronization Protocol* (FTSP) (MAROTI et al. 2004).

Elson et al. (2002) destacam que muitos protocolos de sincronização foram propostos ao longo dos anos, porém todos compartilham a mesma característica básica: um servidor periodicamente envia uma mensagem contendo seu *clock* local para um cliente. Entretanto, o RBS explora uma forma de sincronização que se diferencia desse modelo tradicional. A propriedade fundamental do RBS é que ele sincroniza um conjunto de nós receptores entre si, em oposição aos protocolos tradicionais, nos quais transmissores se sincronizam com

receptores. No RBS, os nós periodicamente transmitem mensagens *beacon* para seus vizinhos usando um canal de *broadcast* a nível físico. Os receptores usam o momento de recepção da mensagem como um ponto de referência para comparar entre si os seus *clocks*. A mensagem *beacon* não contém nenhum *timestamp* explícito, assim como não é importante saber o momento em que ela foi enviada.

De forma diferente do RBS, o TPSN busca reduzir uma das fontes de imprecisão existentes no processo de sincronização: as imprecisões causadas durante a transmissão das mensagens *beacon*. O TPSN causa essa redução propondo um mecanismo de “*time stamping*” ao nível da camada MAC, isto é, transmitindo o momento de transmissão da mensagem junto à mensagem *beacon*. Dessa forma, o protocolo TPSN possui um desempenho de sincronização melhor que o protocolo RBS, porém a um custo maior. Tratando-se de uma grande rede *multi-hop*, o desempenho do TPSN, que foi projetado para essas redes, é ainda melhor que o desempenho do RBS, pois o RBS precisará transmitir ainda mais *beacons* para a sincronização dos nós nesse caso.

O trabalho de Kim et al. (2007) propõe que a sincronização em uma aplicação de SHM é um dos seus seis maiores requisitos. Segundo Kim et al., a sincronização temporal no sensoriamento ao longo de toda a estrutura é necessária para realizar análises de correlação entre as vibrações estruturais, isto é, quando se deseja comparar dados obtidos de diversas posições em uma mesma estrutura. Kim et al. também destacam que essa questão é particularmente desafiadora por causa da derivação dos relógios (*clock drift*) independentes de cada um dos nós na RSSF que monitora a estrutura, e propõem a utilização de um protocolo denominado FTSP para garantir a sincronização entre os nós. O protocolo FTSP foi desenvolvido especialmente para se adaptar a aplicações que exigem precisão rigorosa quando rodando sobre as plataformas de recursos limitados das RSSF. O protocolo FTSP utiliza baixa largura de banda e é robusto contra falhas de nós e links. Essa robustez é alcançada utilizando inundações periódicas de mensagens de sincronização, o que possibilita que o protocolo continue funcionando mesmo quando há uma alteração na topologia da RSSF. Da mesma forma que o RBS e o TPSN, o FTSP também usa um mecanismo de “*time stamping*” ao nível da camada MAC, mas possui ainda um mecanismo para compensação de erros, incluindo estimativa de derivação dos relógios (*clock drift*). O erro médio de sincronização do FTSP é melhor do que o dos algoritmos RBS e TPSN, porém seu custo é maior.

## 5 Implementação

Esse capítulo discute as principais questões envolvidas na implementação de um protótipo utilizado para avaliar o Sensor-SHM. Esse capítulo está organizado em três seções.

Na Seção 5.1 é apresentado o ambiente de programação utilizado para desenvolver o protótipo. Na Seção 5.2 são apresentados os componentes de software utilizados para modelar o Sensor-SHM. Na Seção 5.3 são apresentadas as implementações das mensagens de dados e das mensagens de controle do Sensor-SHM.

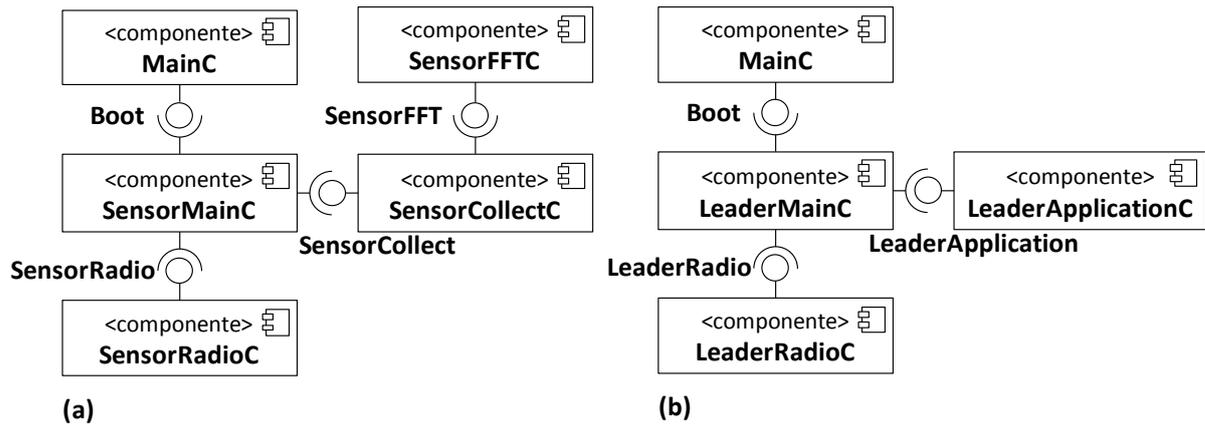
### 5.1 Ambiente de implementação do protótipo

Os nós sensores foram programados em linguagem NesC (LEVIS e GAY 2009), sob o ambiente de desenvolvimento do sistema operacional TinyOS (HILL et al., 2000), versão 2.1. A linguagem NesC é uma extensão da linguagem C que incorpora os conceitos estruturais e o modelo de execução do TinyOS, um sistema operacional baseado em eventos projetado para RSSFs. O TinyOS fornece uma série de componentes de software, incluindo componentes que implementam a pilha de protocolos de comunicação para RSSF.

Foram usadas as implementações de protocolos padrão fornecidas pelo TinyOS 2.1. Para lidar com a comunicação a nível físico foi adotada a implementação padrão da camada física do protocolo 802.15.4. Para lidar com a transmissão de mensagens ponto a ponto, em nível de enlace, foi adotado o protocolo *Active Message* (BUONADONNA et al., 2001). O tamanho máximo permitido para as áreas de dados das mensagens trocadas, limitado pelo TinyOS 2.1, é de 28 bytes.

### 5.2 Implementação do protótipo

A implementação do algoritmo Sensor-SHM, considerando todas as configurações e simplificações realizadas, engloba dois programas, um para execução dentro dos nós atribuídos como nós sensores comuns (Figura 2a) e outro para a execução em CHs (Figura 2b).



**Figura 2. Diagramas de componentes para (a) nós sensores e (b) nós CH**

Do ponto de vista dos nós de sensores, o Sensor-SHM foi implementado englobando quatro novos componentes principais (Figura 2a): **SensorMainC**, **SensorCollectC**, **SensorFFTC** e **SensorRadioC**. O componente **SensorMainC** gerencia todos os nós da RSSF. Para atingir seu objetivo o componente **SensorMainC** faz uso dos componentes **SensorCollectC** e **SensorRadioC**, acessados, respectivamente, através das interfaces **SensorCollect** e **SensorRadio**. **SensorCollectC** controla as tarefas de detecção de dano, usando outras interfaces básicas fornecidas pelo TinyOS 2.1. **SensorCollectC** também faz uso do componente **SensorFFTC**, que é responsável pela realização de uma FFT dentro do nó sensor, através da interface **SensorFFT**. **SensorFFTC** foi modelado como um componente separado para permitir a sua reutilização em outras aplicações, dada a sua generalidade e utilidade em diferentes domínios de aplicação. **SensorRadioC** usa as interfaces de rádio básicas do TinyOS 2.1, baseadas no protocolo *Active Message* (BUONADONNA, et al. 2001), e é responsável pela comunicação entre cada nó sensor e seu CH. Além destes, componentes básicos do TinyOS foram usados para implementar o rádio e placa de sensoriamento (HILL, 2000) (tais componentes básicos, próprios do TinyOS, foram ocultados na Figura 2 para privilegiar a clareza da figura). O componente **MainC** fornece a interface **Boot**, e é o componente primário do TinyOS, a partir do qual os nós inicializam seus programas.

Do ponto de vista dos nós CH, o algoritmo Sensor-SHM compreende três componentes principais (Figura 2b): **LeaderMainC**, **LeaderApplicationC** e **LeaderRadioC**. O componente **LeaderMainC** gerencia o algoritmo Sensor-SHM nos nós CH. **LeaderApplicationC** é usado para calcular os coeficientes  $C_{j,t}$  para o *cluster*, com base nos valores das frequências modais recebidos pelo rádio. O rádio do CH é gerenciado pelo

componente **LeaderRadioC**, que se utiliza das interfaces de rádio básicas do TinyOS 2.1, de forma similar ao componente **SensorRadioC**.

Como a topologia de RSSF adotada no protótipo é estática, os CHs são sempre os mesmos nós (não é assumida a rotação de CHs). Nesta situação, um nó CH nunca irá assumir o papel de um nó sensor, e vice-versa. Assim sendo, para evitar desperdício de memória no programa utilizado pelos nós sensores, apenas as tarefas referentes às atribuições de comunicação do nó sensor são incorporadas no componente de rádio dos nós sensores, que são mais simples do que as tarefas relativas ao lado do nó CH nas comunicações. Portanto, **LeaderRadioC** é responsável pela solicitação e coleta dos valores de frequência de todos os nós sensores dentro de seu respectivo *cluster*, enquanto o componente **SensorRadioC** implementa, para cada nó sensor, apenas a resposta às solicitações recebidas do seu único e respectivo CH.

### 5.3 Implementação das mensagens de dados e controle

Nessa seção são descritos os tamanhos (em bytes) dos formatos de mensagens de dados e de mensagens de controle implementadas no protótipo.

Cada mensagem de dados do tipo **transmissão de assinatura**, usada para transportar os valores das frequências modais, requer quatro bytes por frequência modal em sua área de dados. Como foram usadas cinco frequências modais, este tipo de mensagem de dados possui 20 bytes em sua área de dados. A mensagem de dados do tipo **localização de dano**, que carrega em sua área de dados o valor de  $C_{j,t}$  gerado por um CH, exige 4 bytes em sua área de dados. A mensagem de dados do tipo **relatório**, que carrega em sua área de dados todos os valores de  $\omega_{i,t}$  de todos os seus CHs vizinhos imediatos, exige uma quantidade variável de bytes em sua área de dados, de acordo com o número de nós sensores por CH. Entretanto, o valor requerido para transportar uma assinatura (de um nó sensor) foi definido em 20 bytes, o equivalente à área de dados da mensagem transmissão de assinatura. As mensagens de controle do tipo **solicitação de coleta** e do tipo **confirmação** possuem área de dados nula (zero byte). É importante mencionar que cada tipo de mensagem (tanto de dados, quanto de controle) necessita de 8 bytes em seu cabeçalho (no TinyOS 2.1) para ser transportada.

## 6 Configurações

Esse capítulo discute as principais questões, e as respectivas soluções encontradas, envolvidas na configuração do protótipo utilizado para avaliar o Sensor-SHM. Esse capítulo está organizado em quatro seções. A Seção 6.1 apresenta as questões relativas às técnicas de tratamento de dados. Na Seção 6.2 são discutidos como foram configurados os parâmetros do Sensor-SHM no protótipo. Na Seção 6.3 são discutidas as simplificações e limitações no ambiente dos experimentos, e como cada uma foi contornada. Na Seção 6.4 são relatadas as simplificações realizadas no protótipo do Sensor-SHM.

### 6.1 Implementação de técnicas usadas na fase de tratamento de dados

Nessa seção são apresentadas as configurações das implementações da transformada de Fourier e da técnica de extração de frequências modais usadas na fase de tratamento de dados do Sensor-SHM. Essas configurações foram realizadas para atender aos requisitos levantados na Seção 2.4.

Uma técnica de processamento de sinais, com objetivo de transformar os dados do domínio da frequência para o domínio do tempo (por exemplo, a Transformada de Fourier) deve ser aplicada sobre este sinal de aceleração adquirido, e o espectro de frequência resultante pode então ser analisado. Em geral as técnicas de processamento de sinais que transformam os dados do domínio do tempo para o domínio da frequência são variações da Transformada de Fourier. Há diversas denominações para as diferentes implementações da transformada de Fourier como, por exemplo, a Transformada de Fourier Discreta, ou *Discrete Fourier Transform* (DFT), a Transformada Rápida de Fourier, ou *Fast Fourier Transform* (FFT) e a Transformada de Fourier Inteira, ou *Integer Fourier Transform* (IFT), dentre outras. Essas implementações variam em termos de forma, desempenho e precisão do espectro de frequência resultante, porém elas possuem em comum o objetivo de transformar os dados do domínio do tempo para o domínio da frequência. No presente trabalho é adotada a FFT.

A **técnica de extração de frequências modais** é aplicada após a FFT. A técnica de extração de frequências modais é composta de (i) um filtro média móvel, onde o dado de entrada é o espectro de frequência e o dado de saída é o espectro de frequência suavizado e (ii) da técnica de identificação e extração de valores de frequência, sobre os quais os picos de energia do espectro suavizado estão localizados. Para identificação dos picos de frequência utiliza-se a técnica proposta em Santos et al. (2014), que recebe como entrada os intervalos de frequências desejadas e calcula a posição em frequência respectiva ao maior pico de energia naquele intervalo.

A técnica de extração de frequências modais foi configurada para extrair as primeiras cinco frequências modais do espectro de frequência. Ou seja, a quantidade  $M$  de frequências modais presente na estrutura de dados **assinatura da estrutura civil**, vista na Seção 4.2.1, foi configurada como  $M = 5$ . Essa quantidade  $M$  de frequências modais é suficiente para realizar a análise da saúde de uma estrutura civil na faixa do espectro de 500 Hz (metade da taxa de amostragem de 1,0 kHz escolhida na Seção 6.2, segundo o critério de *Nyquist*). Outros trabalhos como os de Gao et al. (2006) e Cho et al. (2008) também adotaram quantidades similares de frequências modais para realizarem seus experimentos.

## 6.2 Configuração de parâmetros do Sensor-SHM

Nessa seção são apresentadas as configurações dos parâmetros necessários para a execução do Sensor-SHM. Essas configurações também foram baseadas nos requisitos levantados na Seção 2.4.

Quanto ao requisito (i), nesse trabalho adotou-se estratégia global. Quanto ao requisito (ii), nesse trabalho foi definido que não há necessidade da utilização de *shakers* para a agitação da estrutura, para excitar os seus modos de vibração de interesse. Quanto ao requisito (iii), foram adotados os procedimentos das fases de coleta de dados e tratamento de dados (Seções 4.4.1 e 4.4.2) do Sensor-SHM, baseadas nas técnicas modais. Quanto ao requisito (iv), nesse trabalho adotaram-se acelerômetros como unidade de sensoriamento utilizada para aquisição de dados. Quanto ao requisito (v), nesse trabalho a influência dos fatores ambientais sobre as assinaturas da estrutura não foi considerada, isto é, todos os experimentos consideram uma estrutura ausente de interferências ambientais. Quanto ao requisito (vi), o período de coleta, que representa a duração de cada fase de coleta de dados (incluída em seu respectivo período do ciclo de monitoramento), é definido como sendo o tempo suficiente para coletar 512 amostras de aceleração, a uma taxa de amostragem de 1,0 kHz, o que resulta num período de coleta que se prolonga por cerca de 512ms.

O parâmetro **número de amostras coletadas** foi determinado pelos seguintes critérios: (i) deve ser suficiente para garantir uma boa resolução do espectro de frequências que será retornado pela FFT, o que implica em uma maior precisão na determinação de frequências modais, (ii) deve ser uma potência de 2, uma vez que este é um requisito para a entrada de dados no algoritmo da FFT, e (iii) não deve ultrapassar a capacidade de armazenamento dos nós sensores (memória RAM ou ROM, dependendo do esquema de armazenagem de dados escolhido na implementação).

Em Kim et al. (2007) uma taxa de amostragem de 1,0 kHz é utilizada, com equipamento semelhante ao usado no presente trabalho, mostrando que é possível atingir esta taxa de amostragem em uma situação prática.

Em Hackmann et al. (2008) um número de amostras de aceleração de 2048 é utilizado. Porém, Hackmann et al. utilizam a plataforma de hardware de RSSF Imote2 (MEMSIC, 2013), que é muito superior, em termos de memória disponível (256 kB de SRAM, 32 MB de RAM e 32 MB de SDRAM), às demais plataformas conhecidas. Em geral, as demais plataformas de hardware de RSSF possuem quantidades de memória em torno de 4 a 8 kB de RAM, similares às da plataforma MICAz (MEMSIC, 2013), considerada a mais comum, que possui 4 kB de RAM. Portanto, para que a implementação do Sensor-SHM pudesse ser compilada e instalada na maior parte das plataformas disponíveis, escolheu-se o número de 512 amostras.

O parâmetro **taxa de amostragem** é estabelecido de acordo com os seguintes critérios: (i) deve ser maior do que o valor das primeiras frequências modais de interesse, quantas forem, de modo que estas estejam presentes no espectro de frequência retornado pela FFT, (ii) deve ser suficientemente alta para garantir precisão no espectro de frequência, (iii) seu valor deve ser duas vezes a maior frequência modal de interesse, para atender ao critério de *Nyquist*.

### 6.3 Limitações no ambiente dos experimentos

Duas limitações decorrentes do ambiente dos experimentos foram encontradas e contornadas nesse trabalho: (i) a inexistência de acelerômetros reais disponíveis no laboratório e (ii) a indisponibilidade de dados de vibração que representassem com o grau de detalhe necessário a presença de dano em uma estrutura.

Com o intuito de contornar a limitação de inexistência de sensores de aceleração no nosso laboratório na época que esse trabalho foi realizado, os dados de aceleração coletados por cada nó sensor foram simulados.

Com o intuito de contornar a limitação de indisponibilidade de dados de vibração que representassem com o grau de detalhe necessário a presença de dano em uma estrutura, optou-se por elaborar uma metodologia de simulação dos dados de aceleração coletados que insere gradualmente dano na estrutura (a ser percebido através dos dados de aceleração coletados).

A Seção 6.3.1 apresenta a metodologia de simulação de dados coletados de aceleração. A Seção 6.3.2 apresenta a metodologia de simulação de dano na estrutura.

### 6.3.1 Parâmetros para simular dados de aceleração coletados

Os dados brutos de aceleração simulados correspondem a uma saída do acelerômetro no eixo z, denominado  $a_z(x)$ . A regra geral para gerar  $a_z(x)$  é definida pela Equação 5, como uma combinação linear amortecida de cinco funções seno, ponderadas pelas respectivas intensidades ( $I^m$ ), ou seja, a amplitude de cada frequência modal no sinal. Cada nó sensor executa localmente a Equação 5 (que deve ser implementada na memória de cada nó sensor) para gerar os seus dados durante cada fase de coleta de dados. Dessa forma, cada nó sensor consegue obter os seus dados independentemente de qualquer outro nó, e apenas através de sua visão local, exatamente como ocorreria em uma situação com acelerômetros reais.

$$a_z(x) = e^{(-0.5x)} \left[ \sum_{m=1}^5 (I^m \sin(2\pi\omega^m x)) \right] \quad (5)$$

Na Equação 5, o tempo ( $x$ ) varia de acordo com o período de tempo relacionado com a taxa de amostragem, e seu valor inicial é zero para todos os nós sensores. No início de cada fase de coleta de dados, o valor de  $x$  é zerado novamente em todos os nós, o que é suficiente para garantir que todos os nós gerarão dados correlacionados temporalmente. O valor inicial para cada parâmetro em cada nó é:  $\omega_{i,t}^1 = 20\text{Hz}$ ,  $\omega_{i,t}^2 = 40\text{Hz}$ ,  $\omega_{i,t}^3 = 60\text{Hz}$ ,  $\omega_{i,t}^4 = 80\text{Hz}$ ,  $\omega_{i,t}^5 = 100\text{Hz}$ , e todas as intensidades foram  $0,25g$  ( $1g = 9,8\text{m/s}^2$ ), independentemente do modo de vibração. O intervalo de 0 a 100 Hz do espectro é onde as frequências modais mais importantes de grandes estruturas se encontram (KIM et al., 2007).

Os valores de intensidade foram escolhidos iguais para todas as frequências para evitar mascarar alguma das frequências do espectro, evitando situações em que algumas frequências se apresentariam mais dominantes que outras. Além disso, as intensidades recebem valores pequenos, gerando dados no intervalo que os acelerômetros são capazes de coletar em situações reais. Por meio de simulações numéricas atingiu-se o valor de  $0,25g$ . A configuração por esse valor gera um sinal que pode ser tratado corretamente no algoritmo de extração de picos. Os resultados dos experimentos realizados em Hackmann et al. (2008) apresentam dados de aceleração semelhantes aos obtidos pela Equação 5, isto é, essa equação é capaz de reproduzir dados reais.

Em experimentos onde não há a necessidade de simular a presença de dano na estrutura para realizar as avaliações do Sensor-SHM, essa metodologia para simular dados de aceleração coletados é suficiente. É importante destacar que, nesses casos, os valores simulados de aceleração, coletados pelos nós sensores, são os mesmos para cada fase de

coleta de dados, o que garante que todos os dados de todos os nós sensores estarão correlacionados espacialmente.

E também, durante as fases de coleta de dados, cada sensor gera um erro padrão (desvio padrão) de  $\pm 2$  Hz na determinação das frequências modais, devido a imprecisões de cálculo (principalmente em relação às imprecisões próprias dos algoritmos da FFT e da técnica de extração de frequências modais), e truncamentos (os quais são necessários para transmitir os dados através do rádio). Todas as tolerâncias mencionadas na descrição do algoritmo foram ajustadas para zero. Por isso assume-se que em todas as fases de coleta de dados foram encontrados locais com presença de danos, o que é considerado o cenário mais exigente em termos de recursos da RSSF.

### 6.3.2 Parâmetros para simular dano na estrutura

Com base na experiência adquirida durante a realização desses experimentos, como já mencionado foram elaborados métodos diferentes para representar um estado danificado da estrutura. Os mais relevantes deles são: (i) aumentar o valor da intensidade de uma das frequências modais, (ii) adição de uma sexta frequência modal ( $\omega_{i,t}^6$ ) entre as frequências existentes, ou a remoção de uma das cinco já existentes, e (iii) deslocamento dos valores de uma ou mais frequências.

Os métodos (i) e (ii) não seriam percebidos diretamente pelo Sensor-SHM, mas os seus efeitos colaterais podem ainda ser percebidos. Em (i), um dos picos do espectro de frequência pode mascarar os outros picos ao aumentar sua amplitude. Por exemplo, se isso acontecer com o terceiro pico, ele pode ser percebido como o primeiro e provavelmente o único presente, o que vai ser interpretado como se o primeiro pico tivesse sido deslocado de seu valor original para a posição do terceiro pico. Em (ii), a adição ou remoção de um dos picos entre os primeiros cinco também faria com que os picos fossem percebidos de forma errada, gerando um efeito semelhante ao do método (i).

Assim, o método (iii) foi escolhido, uma vez que provoca diretamente as alterações esperadas e é de mais fácil depuração no Sensor-SHM. Para gerar os deslocamentos de frequência, novos fatores ( $B_m t$ ) foram inseridos na equação de cada nó sensor, resultando na Equação 6.

$$a_z(x) = e^{(-0.5x)} \left[ \sum_{m=1}^5 (I^m \sin(2\pi(\omega^m + (B_m t)x)) \right] \quad (6)$$

Esses fatores são funções de dois parâmetros diferentes: (i) o número  $t$  da atual fase de coleta de dados (para manter a correlação temporal entre os dados de cada nó sensor), e (ii) uma constante de magnitude  $B_m$  (para manter a correlação espacial entre os dados de cada nó sensor). Na Equação 6, para fazer com que cada frequência desloque-se a taxas diferentes, foi adicionada a variável  $t$ , juntamente com os valores de magnitude  $B_m$ . Assim, em cada fase de coleta de dados, a variável  $t$  aumenta em uma unidade e, para cada nó, cada frequência aumenta pelo pequeno valor de seu respectivo fator  $B_m t$ , que aumenta em cada fase de coleta de dados, portanto, como um múltiplo de  $B_m$ . Como  $B_m$  é uma constante, e todos os nós sempre estão cientes do início de uma nova fase de coleta de dados (e, logo, de quando devem incrementar sua variável  $t$ ), assegura-se que todos os dados de todos os nós sensores manterão suas correlações espaciais e temporais.

Os valores de  $B_m$  para cada nó são escolhidos de acordo com os seguintes critérios: (i) espera-se que  $B_m$  seja maior para as frequências dos modos de vibração que são mais sensíveis a danos na localidade nó, isto é, os modos de vibração mais elevados, e (ii) os valores de  $B_m$  são normalizados, de modo que o valor mais elevado de  $B_m$  é 1, para o modo mais sensível do nó que está mais próximo do dano. Para simular uma geração aleatória de dano, padrões de variação de frequências na presença de danos (padrões de dano) foram definidos, como mostrado na Tabela 2.

**Tabela 2. Padrões de dano**

<b>Padrão de dano</b>	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$B_4$	$B_5$
<b>A</b>	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
<b>B</b>	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5
<b>C</b>	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0

Para configurar os valores da Tabela 2, atribui-se em primeiro lugar o maior valor de  $B_m$  para o modo de vibração mais alto do nó sensor do *cluster* que está mais próximo do dano, de forma que o primeiro valor configurado é  $B_5$  do padrão A. Em seguida, atribui-se valores decrescentes para as outras magnitudes do padrão A, utilizando uma progressão aritmética de razão 0,2. Uma vez que o primeiro modo de vibração, relativo à magnitude  $B_1$ , é considerado global, e este modo de vibração é percebido igualmente por todos os nós sensores, a coluna de  $B_1$  recebeu o mesmo valor para todos os padrões. Os últimos valores do padrão B são os valores do padrão A divididos por 2, uma vez que o padrão B será atribuído aos nós que estão na vizinhança do local de dano, e não aos nós mais próximos desse local (que receberão, por sua vez, o padrão A). Com exceção do modo  $B_1$ , o padrão C recebe valores nulos para os outros modos, uma vez que este padrão será atribuído aos nós que estão distantes do local do

dano, e vão perceber apenas as mudanças em suas frequências globais (primeiro modo de vibração, nesse caso).

A Tabela 3 apresenta todos os casos possíveis de atribuição de padrões de dano para o experimento realizado. Uma vez atribuídos os padrões de dano durante o procedimento de setup da rede, as atribuições permanecem as mesmas até o final do experimento. Esta atribuição é feita de forma aleatória e cada um dos casos tem 25% de chance de ser escolhido para simular os dados de aceleração coletados em um cenário.

**Tabela 3. Possíveis casos de atribuições de padrões de dano**

Node ID	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
1 e 2	A	B	C	C
3 e 4	B	A	B	C
5 e 6	C	B	A	B
7 e 8	C	C	B	A

Uma vez que, devido à aleatoriedade na escolha do caso de atribuição do padrão de dano, não é possível saber onde se encontra o local de dano, as regras para escolher os valores de  $A_i$  se baseiam na regra geral que afirma que frequências de modos de vibração mais altos são mais sensíveis a danos. A fim de acelerar o processo de detecção, localização e determinação da extensão de danos, valores mais elevados são atribuídos para as frequências dos modos mais altos, de modo que  $C_{j,t}$  dependerá mais das variações das frequências modais mais altas. Além disso, os valores de  $A_i$  são normalizados, dentre os quais o valor mais alto é atribuído ao quinto modo, e são atribuídos valores decrescentes para os outros modos. A regra é semelhante à que foi utilizada para criar o padrão de dano A, na Tabela 2. Assim, para todos os nós sensores  $i$ ,  $A_i = \{0,2, 0,4, 0,6, 0,8 \text{ e } 1,0\}$ .

Após a realização de testes preliminares e simulações numéricas, através da adoção de uma metodologia empírica (baseada em tentativa e erro), descobriu-se que a definição do valor  $L_j = 20,0$  Hz para todos os *clusters* é suficiente para prevenir uma alta ocorrência de erros de detecção, localização e determinação da extensão de danos, especialmente nas primeiras fases de coleta de dados, e também suficiente para assegurar que os danos somente sejam sinalizados quando as frequências mudarem expressivamente, em comparação com os valores iniciais. Assim, para cada *cluster*  $j$ ,  $L_j = 20,0$  Hz.

Os valores de  $T_i$  são os mesmos para cada nó, e cada modo de vibração. A razão para isso é também evitar erros de detecção, localização e determinação da extensão de danos, pois cada nó sensor gera um erro padrão de  $\pm 2,0$  Hz na determinação das frequências modais, devido à imprecisão nos cálculos e truncamentos. Assim,  $T_i$  assume o valor de dois desvios

padrão. Isso é suficiente para supor que, em uma situação real, menos de 5% dos valores de frequência ultrapassem o limite  $T_i$  em uma situação de estrutura saudável. Para isso, assume-se que os valores de frequências extraídos seguem uma distribuição normal de média é bem estimada, usando sete amostras de frequência. Portanto, o limite  $T_i$  assume o valor de 4,0 Hz para cada modo de vibração e cada nó sensor.

É importante mencionar que as assinaturas saudáveis da estrutura civil,  $\omega_{i,0}$  devem ser preenchidas como parte do procedimento de setup dos nós sensores. Optou-se por cada nó sensor, durante o setup, realizar uma primeira coleta de dados de aceleração e extração de frequências modais, considerando a aquisição de dados simulados. Dessa forma, a assinatura saudável da estrutura civil possui valores de frequências modais extraídos dos dados simulados com  $t = 0$  na Equação 6. Supõe-se que neste momento a estrutura está no início da sua operação. Para cada sensor a assinatura saudável da estrutura civil é obtida na posição atual do nó sensor. Assim, cada sensor preenche seu vetor  $\omega_{i,0}$  e transmite-o para seu respectivo CH. Em seguida, os sensores entram em modo de espera e aguardam a próxima fase de coleta de dados, que será identificada por um valor de  $t = 1$ .

Finalmente, os valores da Tabela 2 e da Tabela 3 são armazenados dentro dos nós sensores e são utilizados para gerar os dados aleatórios coletados por cada nó sensor.

#### 6.4 Simplificações no protótipo do Sensor-SHM

Além das limitações nos ambiente dos experimentos apresentadas na Seção 6.3, foram efetuadas simplificações no protótipo do Sensor-SHM, que estão descritas em seguida, a saber: (i) não utilização de protocolos adicionais ao Sensor-SHM e (ii) obtenção de valores de  $\omega_{i,0}$  a partir de uma fase de coleta de dados inicial.

Quanto à simplificação (i), nenhum protocolo adicional (considerando, por exemplo, a formação de *clusters*, sincronização ou questões de roteamento) foi adotado no projeto e desenvolvimento do Sensor-SHM, uma vez que tais protocolos adicionais poderiam influenciar no impacto do Sensor-SHM na RSSF em termos de consumo de energia e de recursos de comunicação da rede.

O funcionamento adequado do Sensor-SHM depende do resultado do processo de clusterização de rede, cujos resultados são utilizados pelo Sensor-SHM para alimentar as estruturas de dados conjunto de CH vizinhos e conjunto de nós sensores, para cada CH. Como não foi considerado nenhum protocolo adicional para formação de *cluster* no protótipo, a topologia de RSSF adotada na abordagem do presente trabalho é estática, ou seja, assume-se

que os *clusters* da RSSF são formados de forma determinística durante o procedimento de setup. Portanto, os CHs são sempre os mesmos nós (não é assumida a rotação de CHs). Nesta situação, um nó CH nunca irá assumir o papel de um nó sensor, e vice-versa. As estruturas de dados conjunto de CH vizinhos e conjunto de nós sensores que fazem parte de um *cluster* são preenchidas no procedimento de setup com valores fixos, informados diretamente no programa que roda nos nós sensores.

O Sensor-SHM também assume, para a correta execução de todos os seus procedimentos, que todos os nós da RSSF possuem seus relógios sincronizados. Porém, essa necessidade de sincronização só é essencial quando se considera a coleta de dados reais (por acelerômetros reais) sobre uma estrutura. Uma vez que os dados de aceleração coletados foram simulados, da forma como descrito pelas metodologias apresentadas na Seção 6.3, a sincronização de dados não se faz necessária. Segundo a metodologia de simulação dos dados de aceleração coletados, todos os nós sensores coletam os dados de aceleração previstos para cada fase de coleta de dados  $t$ , independente do horário em que a coleta de dados se iniciou. O atraso com o qual cada nó sensor inicia a sua coleta de dados, em relação a um nó sensor que tenha iniciado sua coleta de dados anteriormente, é resultado somente do tempo de processamento e transmissão entre transmissões consecutivas de duas mensagens solicitação de coleta. No protótipo implementado em TinyOS, esse tempo é da ordem de 10ms.

Alguns trabalhos de RSSF encontrados na literatura (YICK et al., 2008; AKYLDIZ e KASIMOGLU, 2004) utilizam o esquema de transmissão de dados *multihop* em seus experimentos devido ao baixo alcance dos rádios integrados ao nó sensor e às grandes distâncias entre os nós sensores e o nó sorvedouro. Entretanto, nos experimentos realizados no presente trabalho, as distâncias entre os nós sensores e o sorvedouro são pequenas, assim como em trabalhos relacionados (HACKMANN et al. 2008) e, portanto, todos os nós se encontram dentro da mesma área de cobertura do sorvedouro, dispensando o uso do esquema de transmissão *multihop*. No caso de se adotar estruturas com dimensões maiores do que as adotadas no presente trabalho, o esquema de transmissão *multihop* deve ser revisto para possivelmente melhorar a escalabilidade da rede.

## 7 Experimentos com o Sensor-SHM

Nesse capítulo foram realizados dois conjuntos de experimentos com o Sensor-SHM: o **conjunto de experimentos A**, para analisar o impacto do Sensor-SHM na RSSF, em termos de consumo de recursos dos nós da RSSF, e o **conjunto de experimentos B**, para analisar a eficácia do Sensor-SHM proposto, em termos de acertos na detecção, localização e determinação da extensão dos danos, e sua aplicabilidade em uma situação real, em termos de acertos na detecção de danos e acertos na localização e determinação da extensão de danos, por sua vez considerando dados de um cenário real.

Com relação ao conjunto de experimentos A, simulações e testes em hardware real de RSSF foram realizados com o intuito de verificar o impacto do Sensor-SHM em termos do consumo de energia da rede, e também em termos das trocas de mensagens entre nós sensores e CHs. Os resultados desse conjunto de experimentos A foram publicados parcialmente em Santos et al. (2010) e o restante em Santos et al. (2014).

Com relação ao conjunto de experimentos B, experimentos em hardware real de RSSF foram realizados com o objetivo de analisar a eficácia do Sensor-SHM proposto, em termos de acertos na detecção, localização e determinação da extensão dos danos, e sua aplicabilidade em uma situação real, em termos de acertos na detecção de danos e acertos na localização e determinação da extensão de danos. Os resultados desse conjunto de experimentos B foram publicados integralmente em Santos et al. (2014).

Este capítulo foi subdividido em 5 seções, a saber: Seção 7.1, que descreve os ambientes dos conjuntos de experimentos A e B; Seção 7.2, que descreve as métricas usadas nos conjuntos de experimentos A e B; Seção 7.3, que descreve as especificidades dos cenários e resultados do conjunto de experimentos A; Seção 7.4, que descreve as especificidades dos cenários e resultados do conjunto de experimentos B; e Seção 7.5, que apresenta uma comparação entre os resultados obtidos através dos experimentos realizados com o Sensor-SHM e os resultados apresentados por outras soluções encontradas na literatura.

### 7.1 Ambientes dos experimentos

A descrição desse item foi subdividida em ambiente de simulação e ambiente com hardware de nós sensores reais. O primeiro trata de características intrínsecas do ambiente do simulador Avroa e o segundo trata das características do ambiente dos nós sensores reais. Em todos os experimentos realizados com o Sensor-SHM, tanto em ambiente simulado quanto em ambiente de hardware real, a RSSF foi composta por nós da plataforma de hardware

denominada MICAz, da empresa MEMSIC (2013). O nó sensor do tipo MICAz foi escolhido devido a duas razões principais: a grande quantidade desses sensores adquirida em projetos de pesquisa e pela existência de diversos simuladores desenvolvidos por terceiros para esse tipo de sensor. A escolha da plataforma MICAz permitiu, portanto, a utilização da mesma plataforma de hardware tanto em ambiente real quanto em ambiente simulado. A plataforma de hardware de nós sensores MICAz, modelo MPR2400CA, possui um processador de 8 bits e velocidade de 4 MHz, memória programável de 128 kB, 512 kB de memória *flash*, e um rádio de 2.400 MHz, com uma taxa de dados até 250 kbps e alcance de 20 a 30 metros em ambiente *indoor*. Consideraram-se os dois ambientes (de simulação e real) como sendo ambientes *indoor*. Também nos dois ambientes, cada nó MICAz incluiu apenas, em termos de hardware, a placa contendo o processador, rádio, memória e baterias. Estes itens são descritos em MEMSIC (2013). Não foram utilizadas placas de sensoriamento, uma vez que os dados amostrados foram simulados. A fonte de energia comum dos nós MICAz consiste de duas pilhas AA, que são consideradas capazes de fornecer em conjunto até 16 mil Joules de energia, estimados a partir dos resultados fornecidos por Krämer e Geraldly (2006).

### 7.1.1 Ambiente de simulação

A Figura 3 apresenta uma ilustração esquemática do ambiente de simulação. Uma estação (computador desktop equipado com um processador Intel Core 2 Duo 2.80 GHz e 4 GB de RAM) foi usada para rodar as simulações. As simulações foram executadas com o simulador Avrora na versão 2.6 (TITZER 2005) que é um simulador de código aberto para RSSF. Especificamente, a extensão AvroraZ (ALBEROLA e PESCH 2008) foi empregada para analisar o consumo de energia e a comunicação para a plataforma MICAz. O modelo de energia usado pelo simulador Avrora é denominado “*Accurate Prediction of Power Consumption*” (AEON) (LANDSIEDEL *et al.*, 2005) e é o modelo de energia que representa com maior precisão os ciclos de processamento dos sensores MICAz.

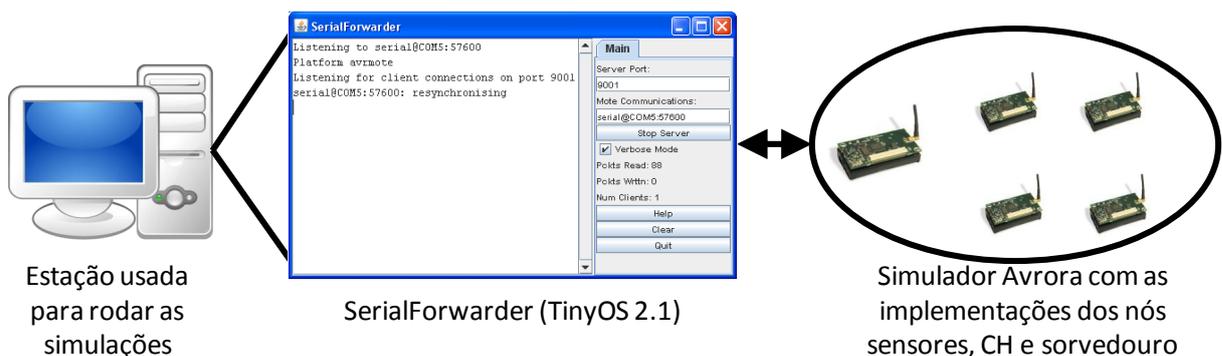
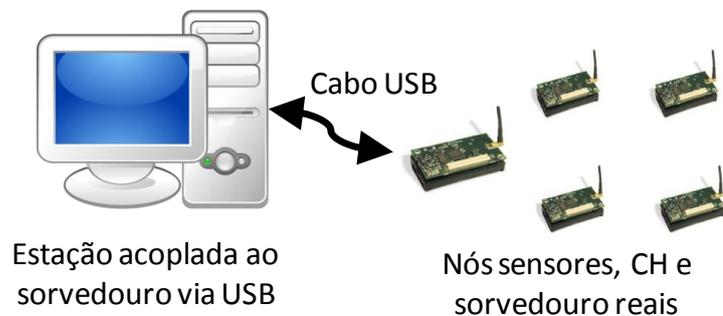


Figura 3. Ambiente da simulação

O Avrora possui uma funcionalidade que permite a interconexão do ambiente simulado da RSSF com softwares externos ao simulador que utilizam o protocolo TCP/IP. Em razão desta funcionalidade, um software foi criado para receber as leituras para fins de depuração do Sensor-SHM. O programa *SerialForward*, incluso nos exemplos do TinyOS, serviu como interface para rotear as mensagens entre o ambiente do simulador e o software executado em um computador.

### 7.1.2 Ambiente com nós sensores reais

A plataforma de hardware utilizada no ambiente com nós sensores reais foi também a plataforma MICAz, cuja descrição e razão de sua escolha já foram apresentadas no início da Seção 7.1. O mesmo software concebido para o Sensor-SHM, proposto nesse trabalho, foi usado tanto nos experimentos simulados quanto nos experimentos que fazem uso de nós sensores reais. Ou seja, o software que incorpora a lógica do algoritmo proposto foi instalado também nos nós sensores reais. As mensagens que foram enviadas na rede foram lidas pelo nó sorvedouro, onde um software escrito em Java (ORACLE 2010) e desenvolvido com *NetBeans* (ORACLE 2010), conectado à interface serial do computador, gravou em arquivo todo o conteúdo das mensagens e o horário para posterior análise (Figura 4).



**Figura 4. Ambiente com nós sensores reais.**

O ambiente com nós sensores reais foi montado em um ambiente controlado, dentro do Laboratório de Redes sem Fio (Labnet) do Programa de Pós-Graduação em Informática da UFRJ. O nó sorvedouro era composto de um nó MICAz acoplado via cabo USB a um computador desktop equipado com um processador Intel Core 2 Duo 2.80GHz e 4 GB de RAM.

Apesar do modelo de energia do ambiente de simulação considerar todos os aspectos dos componentes do sensor, não é possível obter com facilidade os mesmos dados acerca do consumo de energia da rede de sensores reais, pois exigiria uma grande quantidade de trabalho aferir manualmente as medidas de cada um dos componentes de cada um dos nós

sensores e em cada um dos cenários dos experimentos. Por esse motivo, e considerando que o modelo de energia das simulações foi suficientemente validado, as medições de consumo de energia pelos nós MICAz foram realizadas apenas através de simulações.

### **7.1.3 Modelo de energia do simulador Avrora: AEON**

O AEON (LANDSIEDEL *et al.*, 2005) consiste em um conjunto genérico e sistemático de procedimentos que pode ser repetido para construir um modelo de energia específico para uma plataforma de RSSF desejada. Dessa forma, o modelo de energia AEON pode ser usado para estimar precisamente o consumo de energia para qualquer plataforma de nós sensores, incluindo a plataforma MICAz, utilizada no presente trabalho.

O AEON considera que os nós sensores em geral consistem de vários componentes, tais como microcontroladores, rádios, sensores e memória, e, portanto, é necessário um modelo detalhado de baixo nível de todos estes dispositivos para permitir uma previsão exata do consumo de energia.

As aplicações que rodam sobre a RSSF, assim como os eventos externos, influenciam a execução do programa que roda nos nós sensores e, dessa forma, também influencia os estados de cada nó sensor. Os estados podem ser, por exemplo, “ativo”, “inativo” e “baixo consumo de energia” (*sleep mode*). Assim sendo, exemplos de influências podem ser uma aplicação que liga e desliga componentes tais como o rádio, ou ainda eventos de interrupções de *timers* que mudam a CPU do modo *sleep* para o modo ativo.

Como as mudanças de estado ocorrem com frequência, e cada estado consome uma quantidade diferente de energia, os estados e as transições de estado precisam ser modelados com precisão. Os estados individuais de cada componente formam o estado do nó como um todo. O consumo total de corrente elétrica de um nó é, portanto, a soma das correntes de cada componente nos seus respectivos estados.

Assim sendo, os três procedimentos do AEON são: (i) medir a corrente elétrica consumida por cada estado de todos os componentes do nó sensor, gerando um modelo de energia, (ii) implementar em um simulador do nó sensor o modelo construído a partir das medições obtidas no procedimento anterior, ou seja, o consumo de energia de todos os estados que compõem o nó sensor é implementado em um simulador do nó sensor, e (iii) validar o modelo de energia por meio de medições de osciloscópio e testes de vida útil da bateria dos nós sensores que rodam aplicações TinyOS.

## 7.2 Métricas

As métricas utilizadas nos experimentos A e B foram divididas em dois grupos: (i) métricas para avaliar o impacto do Sensor-SHM na RSSF, em termos do consumo de recursos dos sensores, e (ii) métricas para avaliar a eficácia do Sensor-SHM proposto e sua aplicabilidade em uma situação real, ambos em termos da quantidade de acertos na detecção, localização e determinação da extensão dos danos.

### 7.2.1 Métricas para avaliar o impacto do Sensor-SHM na RSSF

O impacto do Sensor-SHM na RSSF foi avaliado de acordo com as seguintes métricas: (i) **tempo de vida da RSSF**, (ii) **número de mensagens recebidas**, (iii) **número de mensagens enviadas**, (iv) **quantidade de bytes de mensagens de controle transmitidas**, (v) **quantidade de bytes de mensagens de dados transmitidas**, e (vi) **taxa de perda de mensagens**.

O **tempo de vida da RSSF** é definido como o tempo decorrido desde o início de execução do sistema (momento em que a rede é ligada) até o momento em que a rede não é mais capaz de efetuar satisfatoriamente sua função principal. Neste trabalho, a RSSF tem a função principal de realizar a detecção, localização e determinação da extensão do dano em uma área de sensoriamento de uma estrutura civil, sobre a qual foi instalada. Assim sendo, a RSSF se torna incapaz de realizar sua função principal em duas situações: (i) quando pelo menos um nó CH tem sua bateria esgotada em toda a RSSF, pois nessa situação toda a área coberta pelo respectivo *cluster* deixa de ser considerada nas fases de coletas de dados, ou (ii) quando todos os nós sensores de um mesmo *cluster* têm suas baterias esgotadas, pois o CH sendo o único nó compondo um *cluster* é incapaz de sensoriar dados, necessitando dessa forma de pelo menos um nó sensor subordinado durante as fases de coleta de dados. Ainda quanto à situação (ii), ressalta-se que o esgotamento da bateria de apenas um nó sensor dentro de um *cluster* (quando há mais de um nó sensor nesse *cluster*) não impede a RSSF de realizar sua função principal satisfatoriamente, pois se considera que o *cluster* deve ser instalado sobre um mesmo elemento estrutural homogêneo e, portanto, dados gerados por mais de um nó sensor instalado nesse mesmo elemento estrutural são considerados redundantes. Sendo assim, o consumo de energia possui uma consequência direta e determinante sobre o tempo de vida da RSSF e, dessa forma, sobre impacto do Sensor-SHM na RSSF. Ressalta-se ainda que o tempo de vida da RSSF também é uma questão crucial para vários domínios de aplicação, além do domínio de SHM, que enxergam a vida útil da rede como principal requisito (como, por exemplo, aplicações de monitoramento ambiental).

O **número de mensagens recebidas** por um nó da rede é a quantidade de mensagens percebidas pelo rádio desse nó, e endereçadas a esse nó. O **número de mensagens enviadas** por um nó da rede é a quantidade de mensagens transmitidas pelo rádio desse nó, endereçadas a qualquer outro nó da RSSF. Essas duas métricas relativas aos números de mensagens trocadas na RSSF são aferidas em cada nó, através de um contador incrementado assim que ocorre uma recepção de mensagem pelo nó, ou imediatamente antes da transmissão de uma mensagem. Dessa forma, todas as mensagens que trafegaram entre dois nós da RSSF podem ser contadas duas vezes, isto é, uma vez pelo número de mensagens enviadas do nó origem, e mais uma vez pelo número de mensagens recebidas do nó destino. Caso a mensagem seja perdida, ela será apenas contada pelo número de mensagens enviadas do nó origem.

A **quantidade de bytes de mensagens de controle transmitidas** e a **quantidade de bytes de mensagens de dados transmitidas** são, respectivamente, as quantidades de bytes trafegados na RSSF devido às transmissões de mensagens de controle e dados, como definidas na Seção 5.3. Essas duas métricas relativas às quantidades de bytes trafegados na RSSF são aferidas durante um período de tempo (duração definida em cada cenário de experimento), e para a RSSF como um todo, através de contadores individuais de número de mensagens transmitidas de cada tipo (dados e controle), em cada nó sensor da RSSF, que são incrementados imediatamente antes da respectiva transmissão. A partir das quantidades de mensagens de cada tipo fornecidas por esses contadores, e sabendo de antemão a quantidade de bytes que possui a estrutura de cada tipo de mensagem, com a multiplicação desses valores é possível calcular os valores de ambas as métricas. Essas métricas são importantes para avaliar o *overhead* de comunicação devido exclusivamente ao Sensor-SHM, para que esse realize sua função de detectar, localizar e determinar a extensão de danos, sendo, portanto, métricas importantes para analisar outro aspecto do impacto do Sensor-SHM na RSSF.

A **taxa de perda de mensagens** é definida como sendo a fração de mensagens efetivamente recebidas pelo respectivo nó destino. A taxa de perda de mensagens é aferida para a RSSF como um todo, com base na diferença entre a quantidade total de mensagens enviadas subtraída da quantidade total de mensagens efetivamente recebidas. Esse resultado é normalizado (dividido) pela quantidade total de mensagens enviadas.

### 7.2.2 Métricas para avaliar a eficácia do Sensor-SHM

A eficácia do Sensor-SHM foi avaliada de acordo com as seguintes métricas: (i) **acertos na detecção, localização e determinação da extensão dos danos**, (ii) **imprecisão na extração de frequências modais**, e (iii) **imprecisão na extração de frequências modais por**

**modo de vibração.** A aplicabilidade do Sensor-SHM em uma situação real foi avaliada de acordo com as seguintes métricas: (iv) **acertos na detecção de danos**, (v) **acertos na localização e determinação da extensão de danos.**

A quantidade de **acertos na detecção, localização e determinação da extensão dos danos** é definida como sendo a quantidade de tentativas de detecção, localização e determinação da extensão de danos nas quais o coeficiente  $C_{j,t}$  foi calculado corretamente. Considera-se que o coeficiente  $C_{j,t}$  foi calculado corretamente quando o seu valor, obtido durante a realização do experimento por cada CH, é igual ao valor esperado, que é calculado previamente à realização do experimento e com base no modelo utilizado para simular dados de aceleração coletados pelos nós sensores. Associou-se o coeficiente  $C_{j,t}$  a todo o processo de detecção (caso não haja dano, ele não será calculado), localização e determinação da extensão do dano (seu valor indica o quão próximo cada posição de *cluster*  $j$  está do dano) pois ele é resultado de todo esse processo.

Essa quantidade de acertos na detecção, localização e determinação da extensão dos danos é aferida por cada nó CH, ou seja, por cada *cluster* da RSSF. Essa métrica está relacionada com os erros que podem ocorrer no Sensor-SHM desde a aquisição de dados (fase de coleta de dados) até o cálculo do coeficiente  $C_{j,t}$  (localização e determinação da extensão de danos), e podem, portanto, influenciar negativamente no cálculo desse coeficiente. Um dos fatores que influencia essa métrica é a quantidade de erros na extração de frequências modais, que também foi avaliada.

A **imprecisão na extração de frequências modais** é definida como sendo a fração entre a quantidade de vezes em que alguma das cinco frequências modais não foi extraída corretamente pela técnica de extração de frequências modais, e a quantidade total de tentativas de extração de todas as frequências modais. Essa métrica é aferida em todos os nós sensores da RSSF. Ressalta-se que nesse trabalho a quantidade total de tentativas de extração é igual a cinco tentativas de extração (uma por frequência modal) por nó sensor a cada fase de coleta de dados.

A **imprecisão na extração de frequências modais por modo de vibração** é definida de forma similar. É a fração entre a quantidade de vezes em que uma das cinco frequências modais não foi extraída corretamente pela técnica de extração de frequências modais e a quantidade de tentativas de extração apenas dessa frequência modal. Essa métrica é aferida em relação a toda a RSSF. Ressalta-se que a quantidade de tentativas de extração apenas

dessa frequência modal é calculada com base em uma tentativa de extração (da frequência modal em questão) por nó sensor a cada fase de coleta de dados.

A quantidade de **acertos na detecção de danos** é definida como sendo o percentual de vezes em que o Sensor-SHM, em todos os nós da RSSF, conseguiu identificar claramente a presença de dano em uma estrutura, independente de sua localização ou extensão, em relação ao total de tentativas de detecção. Em outras palavras, essa métrica é relativa à soma de casos (i) em que houve o cálculo de no mínimo um coeficiente  $C_{j,t}$  por um dos CH em toda a RSSF, denotando a presença de dano quando este realmente está presente, pois se sabe que foi inserido artificialmente no ambiente de experimento; e (ii) quando não houve cálculo de nenhum coeficiente  $C_{j,t}$ , por nenhum dos CH em toda a RSSF, sendo que realmente não havia dano na estrutura. Essa soma é dividida pela quantidade total de casos, ou seja, a quantidade total de tentativas de detecção. Essa métrica é aferida pelo Sensor-SHM localizado em todos os nós da RSSF.

A quantidade de **acertos na localização e determinação da extensão de danos** é definida como sendo o percentual de vezes em o Sensor-SHM, localizado em todos os nós da RSSF, conseguiu localizar e determinar a extensão de dano claramente em uma estrutura, em relação ao total de tentativas de localização e determinação da extensão. Para aferir essa métrica, considera-se que cada *cluster* é responsável por identificar uma posição da estrutura unicamente. Portanto, dado que um *cluster* detectou dano em sua posição, e há apenas um dano na estrutura (inserido artificialmente e em uma posição previamente conhecida da estrutura), nenhum outro *cluster* deve detectar dano simultaneamente, de forma que fique claro que o dano está presente somente na posição do primeiro *cluster*. Casos em que um *cluster* apenas detecta dano, porém o dano não está localizado perto desse *cluster* não são considerados casos de sucesso. Por fim, a quantidade total de casos de sucesso é dividida pela quantidade total de casos, ou seja, a quantidade total de tentativas de localização e determinação da extensão de danos. Essa métrica é aferida para a RSSF como um todo.

### 7.3 Conjunto de experimentos A: impacto do Sensor-SHM na RSSF

O conjunto de experimentos A foi realizado para analisar o impacto do Sensor-SHM na RSSF em termos de consumo de recursos dos nós sensores, causado principalmente pela quantidade de dados brutos coletados durante as amostragens. Portanto, é importante ressaltar que para esse conjunto de experimentos é irrelevante a qualidade dos dados, isto é, o significado/semântica dos valores de aceleração que estão sendo coletados. Portanto, os dados

coletados foram simulados como descrito na Seção 6.3.1. O conjunto de experimentos A foi subdividido nos conjuntos de experimentos A.1 e A.2.

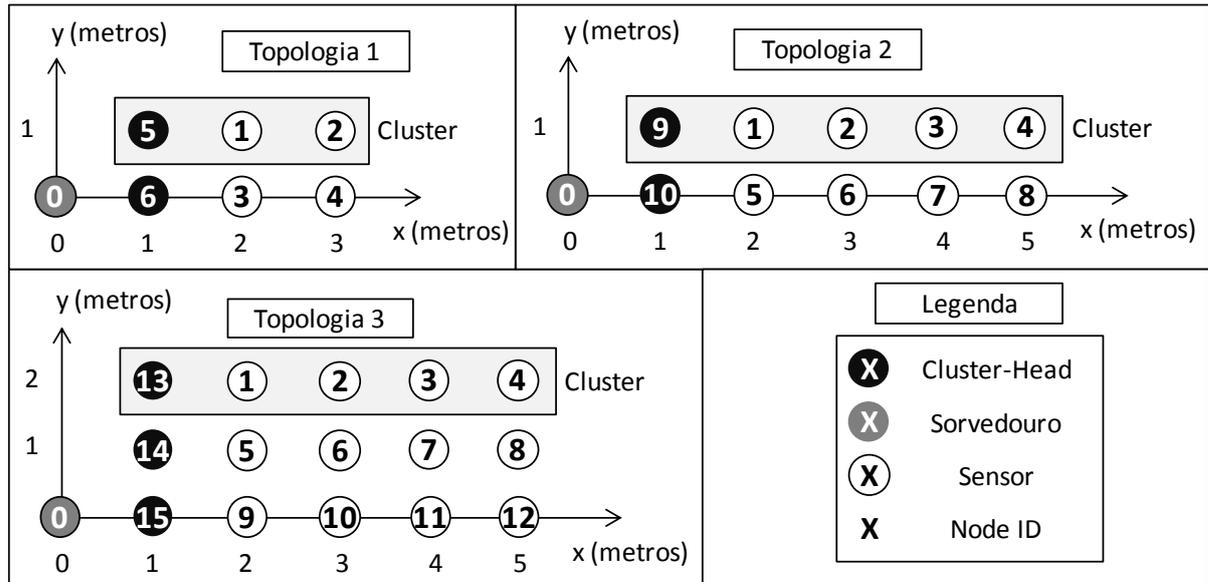
O conjunto de experimentos A.1 apresenta uma análise sobre o impacto do Sensor-SHM na RSSF em termos do **tempo de vida da RSSF**, e uma análise sobre o impacto do Sensor-SHM na RSSF em termos do **número de mensagens recebidas** e do **número de mensagens enviadas**.

O conjunto de experimentos A.2 apresenta uma análise sobre o impacto do Sensor-SHM na RSSF em termos da **quantidade de bytes de mensagens de controle transmitidas**, da **quantidade de bytes de mensagens de dados transmitidas** e da **taxa de perda de mensagens**.

### 7.3.1 Descrição dos cenários do conjunto de experimentos A.1

O conjunto de experimentos A.1 é composto pelos experimentos A.1.1 e A.1.2. O experimento A.1.1 apresenta uma análise sobre o impacto do Sensor-SHM na RSSF em termos do **tempo de vida da RSSF**, e o experimento A.1.2 apresenta uma análise sobre o impacto do Sensor-SHM na RSSF em termos do **número de mensagens recebidas** e do **número de mensagens enviadas**.

Nesse experimento, com o intuito avaliar a escalabilidade do Sensor-SHM foi realizada uma variação do número de nós na rede. A variação do número de nós foi necessária para identificar a aplicabilidade do algoritmo em estruturas maiores, que necessitam de uma maior área de cobertura de monitoramento. Como o Sensor-SHM assume uma organização hierárquica, os seguintes parâmetros foram variados, um por vez: (i) número de nós sensores por *cluster* e (ii) número de *clusters*. Cada variação deu origem a um cenário diferente, representado por uma topologia. As três diferentes topologias utilizadas estão todas descritas na Figura 5. Os nós de Node ID = 5 e 6 na topologia 1, Node ID = 9 e 10 na topologia 2 e Node ID = 13, 14 e 15 na topologia 3 representam CHs.



**Figura 5. Topologias utilizadas no conjunto de experimentos A.1**

Em todos os cenários utilizados no conjunto de experimentos A.1, os nós foram instalados seguindo uma topologia de rede normalmente utilizada em aplicações de SHM, uma vez que o posicionamento dos nós nas aplicações desse domínio é, em geral, escolhido a partir de um esquema fixo, isto é, determinístico. Nas topologias adotadas, os nós estão espaçados em 1m uns dos outros, a partir da posição (0,0) do nó sorvedouro, como em um plano cartesiano, o que permite uma melhor compreensão dos cenários experimentais. A altura de cada nó sensor a partir do solo é considerada como sendo zero em todas as topologias. Na primeira topologia são utilizados dois *clusters*, com dois nós sensores em cada um. Na segunda topologia, o número de nós sensores por *cluster* é aumentado em dois, mantendo o mesmo número de CHs. Na terceira topologia, o número de *clusters* é aumentado em um, mantendo o mesmo número de nós sensores por *cluster*. Em cada uma das três topologias, todos os CHs são considerados vizinhos (imediatos, *single-hop*) entre si.

Em todos os experimentos realizados, o procedimento experimental consistiu, para cada topologia, em iniciar uma fase de coleta de dados, enviando uma mensagem para cada um dos CHs e aguardar a conclusão da fase de coleta de dados. Depois de concluída, outra fase de coleta de dados era iniciada imediatamente, e assim por diante. Durante as simulações, verificou-se que cada fase de coleta de dados levava cerca de 10 segundos para ser concluída, e o número de nós na RSSF (diferente em cada topologia) não influenciava esse tempo significativamente. Então, por tentativa e erro, o tempo escolhido entre os inícios de cada fase de coleta de dados foi de 15 segundos (o tempo entre cada mensagem enviada pelo nó sorvedouro para iniciar uma fase de coleta de dados), para assegurar que todas as fases de

coleta de dados fossem finalizadas antes do início da próxima e, ao mesmo tempo, minimizar o tempo ocioso entre cada fase de coleta de dados, em todas as topologias. Assim, o nó sorvedouro foi programado para enviar, a cada 15 segundos, uma mensagem para cada CH iniciar uma fase de coleta de dados.

O procedimento experimental indicado foi realizado tanto em ambiente simulado quanto em ambiente com hardware real, com diferenças apenas na fonte de alimentação dos nós da RSSF. Durante as simulações assumiu-se a utilização de uma bateria de 40 Joules para cada nó da rede, para manter as simulações curtas, que foram executadas até o esgotamento da bateria do primeiro nó. Essa quantidade de energia nas simulações foi o suficiente para realizar em cada topologia no mínimo 15 fases de coleta de dados. No ambiente real utilizou-se a fonte de energia comum dos nós MICAz, que consiste de duas pilhas AA. Essas duas pilhas AA são consideradas capazes de fornecer, em conjunto, 16 mil Joules, estimados a partir dos resultados fornecidos por Krämer e Gerald (2006). Como a fonte de energia dos nós reais era muito maior que a fonte de energia das simulações, escolheu-se realizar o menor número de fases de coleta de dados que uma das topologias dos experimentos simulados sobreviveu. Isto é, foi escolhida a menor quantidade de fases de coleta de dados possível de ser realizada, baseada nos resultados das simulações, ou seja, 15 fases de coleta de dados. Por isso, foi assegurado que a energia nas duas pilhas AA de cada nó era o suficiente para realizar os testes reais. Por fim, tanto nas simulações, quanto na execução em ambiente real, nenhum *sleep mode* foi utilizado, de modo que o *duty cycle* foi de 100%, uma vez que os experimentos foram curtos, e a quantidade de tempo ocioso foi desprezível.

### 7.3.2 Resultados do conjunto de experimentos A.1

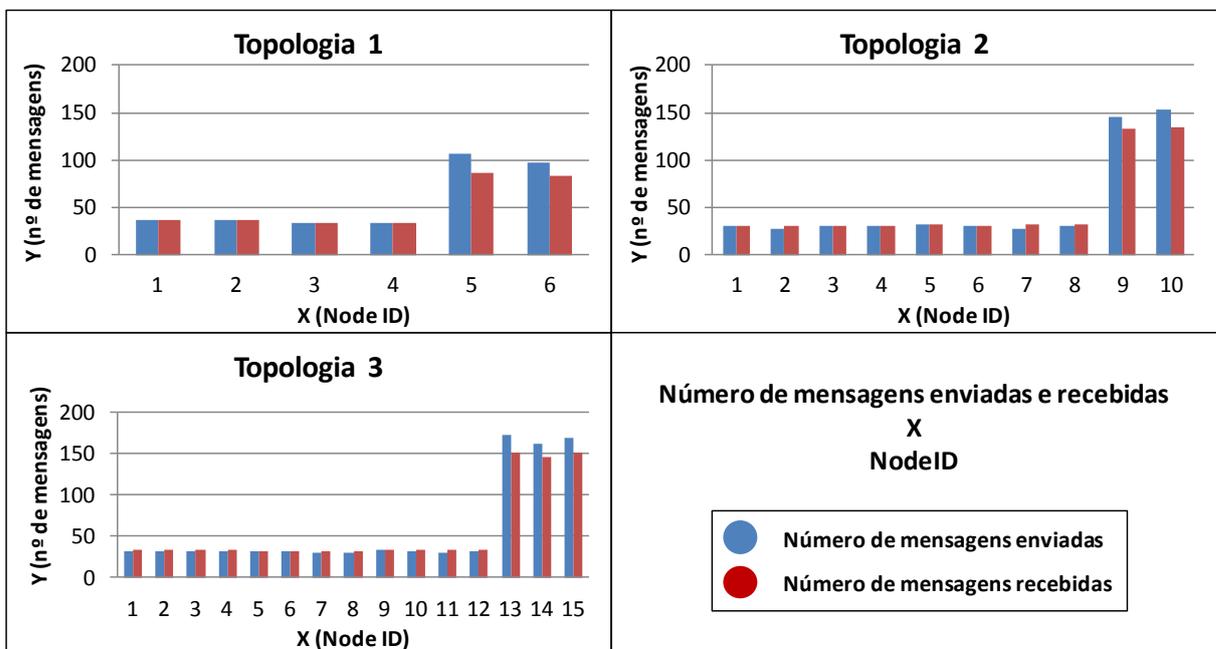
Conforme já mencionado, o experimento A.1.1 apresenta uma análise sobre o impacto do Sensor-SHM na RSSF em termos do **tempo de vida da RSSF**, e o experimento A.1.2 apresenta uma análise sobre o impacto do Sensor-SHM na RSSF em termos do **número de mensagens recebidas** e do **número de mensagens enviadas**.

No experimento A.1.1, cujos resultados foram publicados em Santos et al. (2010), considerou-se apenas os resultados obtidos em ambiente simulado. A duração das simulações obtida para uma bateria de 40J (desde o momento em que a RSSF era ligada até o esgotamento da bateria do primeiro nó) foi de 12,2 minutos na primeira topologia, 7,6 minutos na segunda topologia, e 5,2 minutos na terceira topologia. Esses resultados obtidos podem ser multiplicados para obter uma estimativa proporcional para uma bateria real, de 16.000 Joules, e, em seguida, divididos pela duração de cada fase de coleta de dados (15

segundos, como afirmado na Seção 7.3.1), resultando em uma estimativa de quantidade de fases de coletas de dados realizáveis em uma bateria de 16 mil Joules. Assim sendo, o número de fases de coleta de dados realizáveis para uma bateria de 16.000 Joules foi estimado como sendo, respectivamente, 19.520, 12.160 e 8.320 para as topologias 1, 2 e 3 da Figura 5. Esses resultados mostraram que, se cada uma das fases de coleta de dados realizáveis fosse espaçada das outras em 1 hora no tempo, e houvesse a implementação nos sensores de um modo de espera (*sleep mode*) durante esse tempo de espaçamento, o **tempo de vida da RSSF** poderia ser estimado como sendo de cerca de 800 dias na topologia 1, 500 dias na topologia 2 e 350 dias na topologia 3. Além disso, observou-se que o principal determinante do tempo de vida da RSSF foi o consumo de bateria dos CHs, pois estes nós foram sempre os primeiros a terem suas fontes de energia esgotadas em todas as três topologias. Esse comportamento era esperado, uma vez que este é o tipo de nó da RSSF que faz uma utilização mais intensiva do seu rádio. Isto significa que o tempo de vida do CH, determinante do tempo de vida da RSSF, foi de 800 dias, 500 dias e 350 dias para, respectivamente, as topologias 1, 2 e 3. Estas conclusões são baseadas exclusivamente nos resultados da simulação, que por sua vez foi baseada no modelo de energia do AvrozaZ.

No experimento A.1.2, cujos resultados também foram publicados em Santos et al. (2010), as métricas **número de mensagens recebidas** e **número de mensagens enviadas** foram ambas avaliadas através de experimentos usando sensores reais. Porém cabe ressaltar que os resultados obtidos no experimento de simulação em relação às métricas **número de mensagens recebidas** e **número de mensagens enviadas**, realizado antes dos experimentos usando sensores reais, também podem ser usados para prever os resultados que seriam esperados em relação às mesmas métricas nos experimentos realizados usando sensores reais. Os resultados obtidos para essas métricas pelos testes reais são apresentados na Figura 6. Esses resultados são interpretados nessa seção sob a ótica do consumo de energia, uma vez que a quantidade de mensagens transmitidas é determinante no consumo de energia na RSSF. Assim sendo, após determinado o tempo de vida da RSSF e também após determinado que o nó CH é o que tem sua bateria esgotada mais rapidamente, os resultados em termos dos números de mensagens recebidas e enviadas por todos os nós da rede auxiliam a explicar a causa desse fato. Isso porque se percebe nitidamente a partir da Figura 6 que os nós CH são os que possuem maior número de mensagens transmitidas e enviadas. Uma vez que a implementação do protótipo foi realizada de forma a permitir a análise do impacto do Sensor-SHM na RSSF por si só, isto é, sem a interferência do *overhead* de outros protocolos na

RSSFs, é possível concluir que as quantidades de mensagens apresentadas na Figura 6 são as quantidades mínimas necessárias para utilizar o algoritmo Sensor-SHM em uma rede real. Esperava-se que todos os nós sensores possuíssem o mesmo número de mensagens trocadas entre si, como também todos os nós CH entre si, em cada topologia. As pequenas diferenças são explicadas por algumas eventuais mensagens que não foram percebidas pelo nó sorvedouro, que foi colocado em modo de escuta de todo o tráfego da rede, com sua área de cobertura abrangendo todos os nós em todas as topologias. Por fim, espera-se que os nós sensores durem mais tempo que os nós CH, pois é possível estimar (graficamente pela Figura 6) que os nós CH transmitem até três vezes mais mensagens do que os nós sensores comuns. Essa conclusão é plausível ao considerar que o rádio é o recurso que consome a maior parte da energia na RSSF (ALBEROLA e PESCH, 2008).



**Figura 6. Resultados obtidos no experimento A.1**

Concluindo, o conjunto de experimentos A.1, realizado com o intuito de avaliar o impacto do algoritmo Sensor-SHM em termos do consumo de energia, alcançou bons resultados, conseguindo provar que uma aplicação descentralizada de SHM pode ser executada de forma satisfatória em um ambiente de recursos limitados como as RSSFs. A limitação de recursos em geral das RSSFs permanece como um dos maiores desafios para a ampla aceitação do uso dessas redes na área de engenharia estrutural. A plataforma de nó sensor utilizada nesse trabalho (a plataforma MICAz) é considerada uma das plataformas mais básicas disponíveis no mercado, em termos de fonte de recursos de energia, processamento e comunicação. Algumas outras plataformas são consideradas mais adequadas

para esse domínio de aplicação (SHM), como, por exemplo, a plataforma Imote2 (MEMSIC, 2013), que apresenta mais recursos de processamento e energia.

### 7.3.3 Descrição dos cenários do conjunto de experimentos A.2

Conforme já mencionado, o conjunto de experimentos A.2 apresenta uma análise sobre o impacto do Sensor-SHM na RSSF em termos da **quantidade de bytes de mensagens de controle transmitidas**, da **quantidade de bytes de mensagens de dados transmitidas** e da **taxa de perda de mensagens**. Nesse experimento, com o intuito avaliar a escalabilidade do Sensor-SHM foi efetuado uma variação sobre o número de nós na rede, assim como no experimento A.1. O conjunto de experimentos A.2 é composto por dois experimentos, que foram realizados em plataforma de hardware real de nós sensores, denominados A.2.1 e A.2.2. Ambos os experimentos possuíam quatro cenários, os quais são descritos com base em um plano cartesiano bidimensional (x, y), em que o nó sorvedouro se localiza sempre sobre a origem.

No experimento A.2.1, cada cenário é caracterizado pela variação no número de nós no mesmo *cluster*, para avaliar a comunicação dentro de um mesmo *cluster* (*intracluster*). No experimento A.2.1 todos os cenários possuíam apenas um CH. Este CH sempre foi colocado a 1 m do nó sorvedouro no eixo x. O primeiro cenário possuía um sensor associado a este cluster, a 1 m do CH no eixo x. Para cada um dos próximos três cenários o número de nós sensores associados ao mesmo *cluster* foi incrementado em uma unidade, seguindo uma topologia linear ao longo do eixo x, e espaçando cada nó sensor a um metro do último nó sensor adicionado.

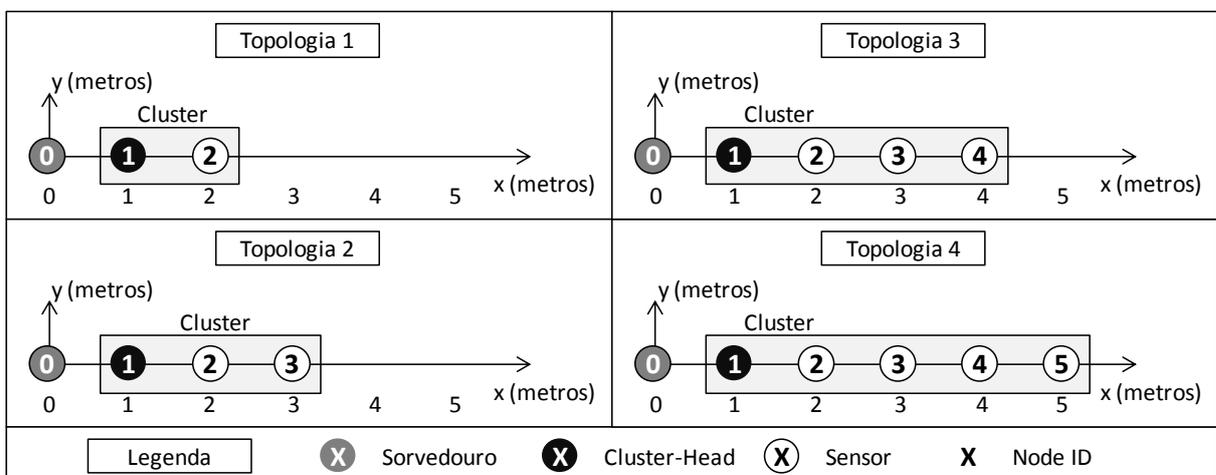
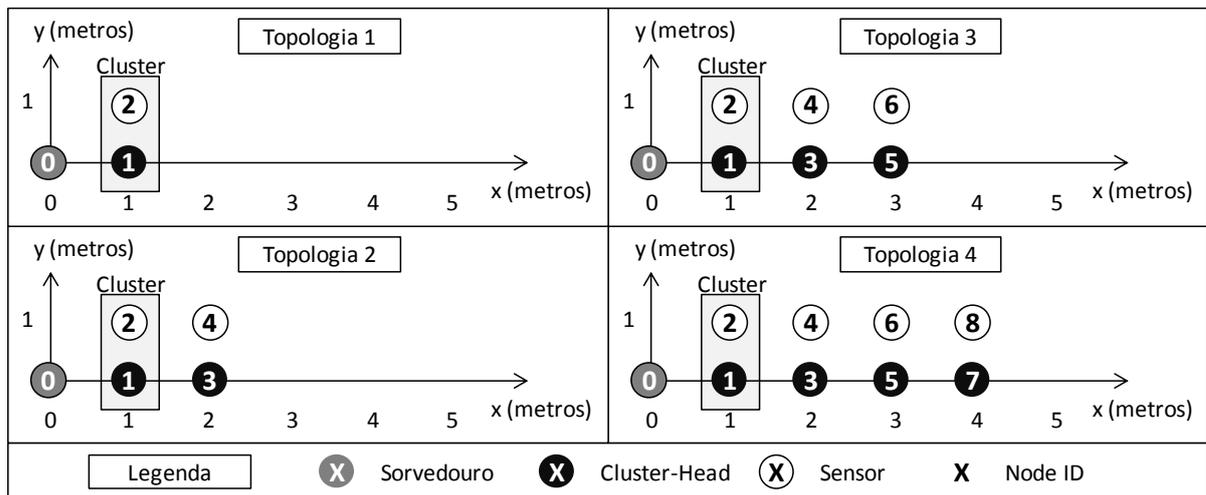


Figura 7. Topologias dos cenários do experimento A.2.1

No experimento A.2.2, cada cenário é caracterizado pela variação no número de *clusters*, mantendo um número fixo de sensores por *cluster*, para avaliar a comunicação entre CHs (*intercluster*). No experimento A.2.2, o primeiro cenário é baseado no primeiro cenário do experimento A.2.1, isto é, um *cluster* contendo um nó CH e um nó sensor. O número de *clusters* é incrementado de uma unidade para cada um dos seguintes três cenários, mantendo igualmente o espaçamento de 1m entre o novo CHs adicionado e o último CH adicionado, em uma topologia linear alinhada ao eixo x. O único nó sensor de cada *cluster* é colocado na mesma posição x do respectivo CH, e a 1m do respectivo CH no eixo y. Em todos os cenários de experimento A.2.2, todos os CHs foram considerados vizinhos imediatos entre si, seguindo o critério estabelecido (dois CHs devem estar à distância de um salto uns dos outros para serem considerados vizinhos imediatos).



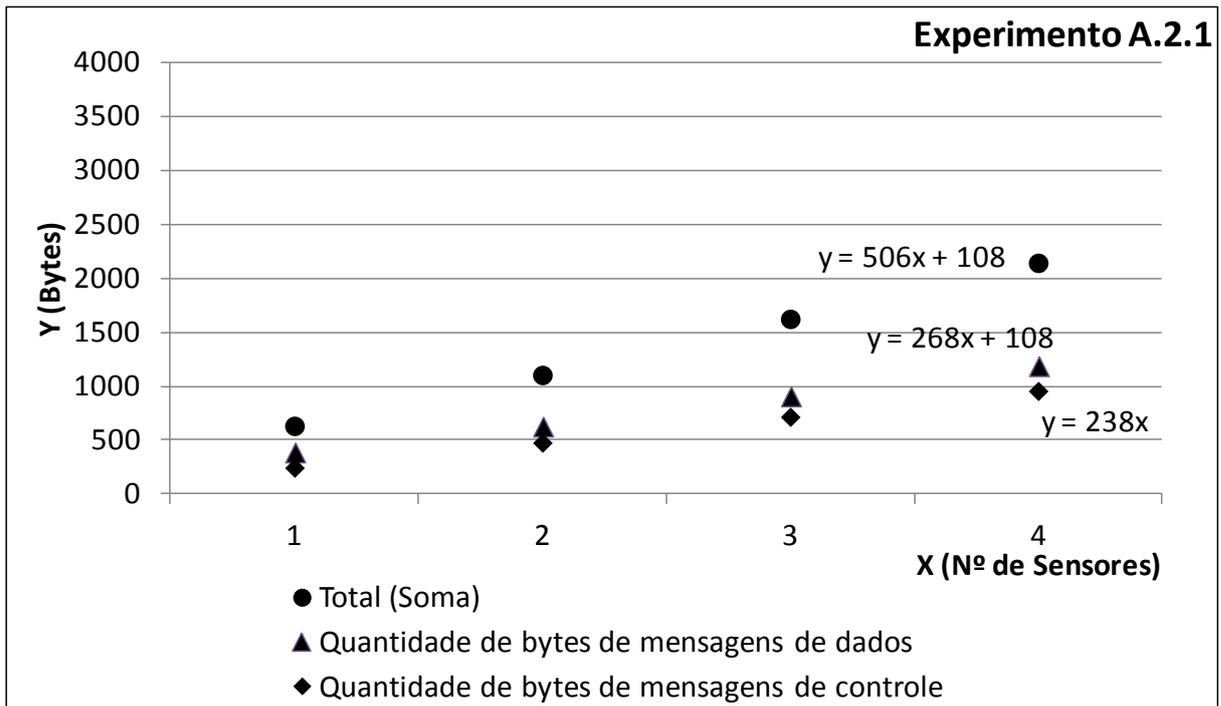
**Figura 8. Topologias dos cenários do experimento A.2.2**

Em todos os cenários de ambos os experimentos A.2.1 e A.2.2, todos os sensores estavam dentro do alcance de rádio do nó sorvedouro, considerando-se o alcance do rádio em torno de 20m e 30m (em ambiente *indoor*) da plataforma MICAz, como visto em MEMSIC (2013). As demais configurações relevantes utilizadas durante esses experimentos foram similares às configurações utilizadas no conjunto de experimentos A.1. Por exemplo, o tempo escolhido entre cada fase de coleta de dados foi de 15s, buscando minimizar o tempo de repouso entre cada fase de coleta de dados, e nenhum *sleep mode* foi implementado, de modo que o *duty cycle* do rádio foi de 100%.

### 7.3.4 Resultados do conjunto de experimentos A.2

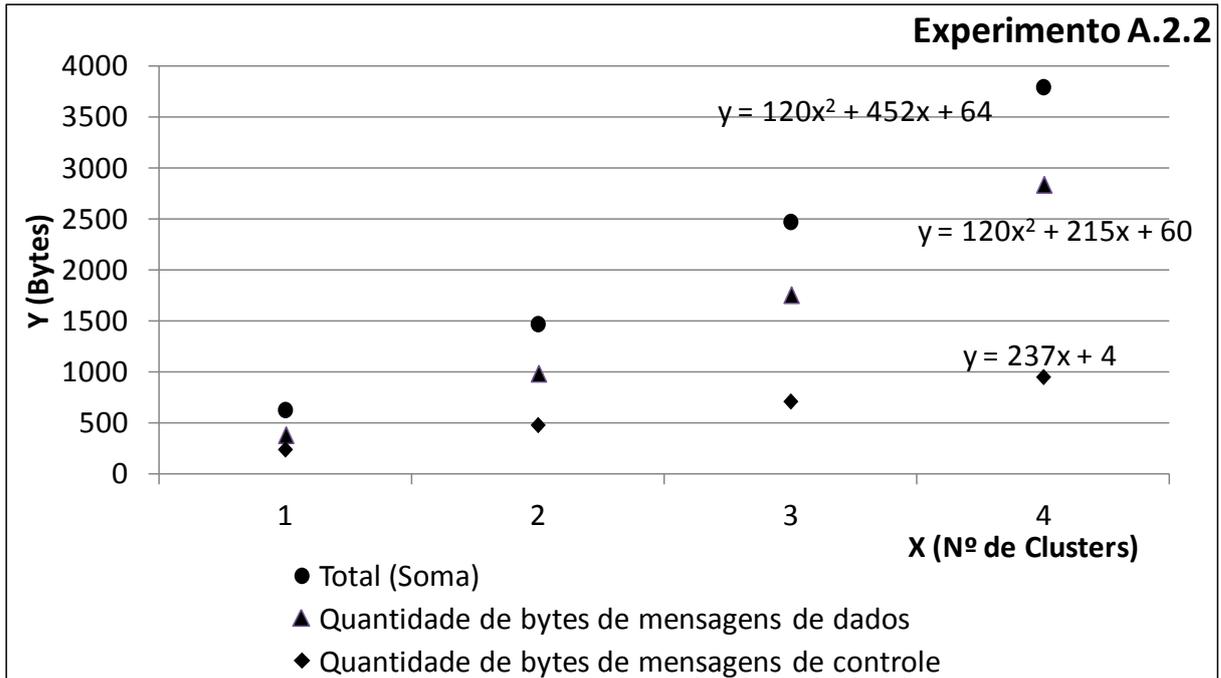
No experimento A.2.1, para cada adição de um novo nó sensor ao *cluster*, a **quantidade de bytes de mensagens de controle transmitidas** e a **quantidade de bytes de mensagens de**

**dados transmitidas** (ambas as quantidades calculadas para a RSSF como um todo) aumentaram linearmente. O número de mensagens de controle e de dados transmitidas por cada nó sensor e o número de mensagens de dados transmitidas por cada CH não foram afetados pela mudança no número de nós sensores no mesmo *cluster*. Porém o número de mensagens de controle transmitidas pelo CH aumentou também linearmente, devido ao aumento do número de nós sensores subordinados ao mesmo *cluster*.



**Figura 9. Resultados do experimento A.2.1**

No experimento A.2.2, para cada novo *cluster* adicionado, a **quantidade de bytes de mensagens de controle transmitidas** e a **quantidade de bytes de mensagens de dados transmitidas** aumentaram seguindo uma curva polinomial. A forma polinomial dessa curva é explicada, principalmente, pelo crescimento mais acelerado do número de mensagens de controle e de dados transmitidas quando um novo CH é adicionado. Esse crescimento mais acelerado, por sua vez, resulta da necessidade de cada novo CH adicionado se comunicar com todos os outros CH adicionados anteriormente (pois todos os CH são considerados vizinhos imediatos uns dos outros). Sendo assim, o número de mensagens de dados transmitidas (usadas nesse caso para transmitir os valores de  $C_{j,t}$  entre CHs) aumentou a uma taxa mais rápida do que no experimento A.2.1. Os números de mensagens de dados e de controle transmitidas por cada um dos nós sensores, e o número de mensagens de controle transmitidas por cada um dos nós CH não foram afetados pela alteração no número de *clusters*.



**Figura 10. Resultados do experimento A.2.2**

Quanto aos resultados em geral do experimento A.2, ressalta-se que a **quantidade de bytes de mensagens de dados transmitidas** foi maior que a **quantidade de bytes de mensagens de controle transmitidas**, em ambos os experimentos A.2.1 (Figura 9) e A.2.2 (Figura 10). Este resultado aponta para uma elaboração bem sucedida do protótipo utilizado nos experimentos, em termos de simplicidade, devido ao baixo *overhead* de comunicação alcançado causado por mecanismos de controle ou protocolos auxiliares, como era a intenção (para concentrar a análise apenas em termos do que é consumido pelo Sensor-SHM).

Considera-se ainda bem sucedida a implementação do protótipo utilizado nos experimentos, devido à baixa **taxa de perda de mensagens** alcançada entre o nó sorvedouro e os nós da RSSF, o que contribui para a qualidade da análise da integridade estrutural. Em ambos os experimentos não houve perda de mensagens nos *links* entre quaisquer dois nós da RSSF, exceto quando um dos nós envolvidos na troca de mensagens foi o nó sorvedouro. Esse fato é explicado pela proximidade entre os nós sensores e CH considerados em cada topologia, garantindo uma boa qualidade dos seus *links* durante as transmissões. Ainda assim, esta proximidade reflete um cenário rigoroso uma vez que nas aplicações SHM a distância normal entre os nós pode ser ainda menor do que 1m, como visto em Hackmann et al. (2008). Porém foi identificada uma **taxa de perda de mensagens** de 3,6% entre o nó sorvedouro (que foi programado para ouvir promiscuamente todo o tráfego da RSSF) e o resto da RSSF. Atribui-se esse resultado a uma falta de capacidade de processamento do nó MICAz (que foi

acoplado a um computador através de uma porta serial, formando o conjunto do nó sorvedouro) para lidar com o encaminhamento de mensagens através da porta serial na mesma taxa com a qual essas mensagens foram recebidas pelo rádio. As perdas de mensagens ocorreram quando muitas mensagens foram transmitidas simultaneamente, e o tamanho dedicado para armazenamento de mensagens na memória do nó não foi suficiente para lidar com todas as mensagens. Entretanto, essa taxa de perda de mensagens não representa uma interferência significativa nos resultados, uma vez que após o experimento foram ajustadas curvas aos dados obtidos, permitindo detectar e inferir o conteúdo de uma mensagem perdida. Mas esta limitação computacional pode ser resolvida através da adoção de uma topologia heterogênea, em que o nó sorvedouro, ou até mesmo os nós CH, poderiam possuir um maior poder computacional que os demais nós da RSSF.

As equações encontradas na Figura 9 e na Figura 10 representam ajustes dos dados experimentais através de regressões. As métricas **quantidade de bytes de mensagens de controle transmitidas** e **quantidade de bytes de mensagens de dados transmitidas**, assim como a soma das duas métricas, podem ter seus valores previstos por essas equações em uma situação compreendendo mais nós, para cada experimento, permitindo modelar a necessidade de tráfego de rede gerado pelo Sensor-SHM em situações mais complexas. As Equações 7, 8 e 9 permitem estimar valores, respectivamente, da quantidade de bytes de mensagens de controle transmitidas, da quantidade de bytes de mensagens de dados transmitidas e da soma das duas métricas, quando o número de sensores por cluster é variado (experimento A.2.1), enquanto as Equações 10, 11 e 12, de forma similar, permitem gerar estimativas quando o número de *clusters* é variado (experimento A.2.2).

$$y = 238x \quad (7)$$

$$y = 268x + 108 \quad (8)$$

$$y = 506x + 108 \quad (9)$$

$$y = 237x + 4 \quad (10)$$

$$y = 120x^2 + 215x + 60 \quad (11)$$

$$y = 120x^2 + 452x + 64 \quad (12)$$

Além disso, as métricas avaliadas mudam (aumentam) com a adição de mais nós sensores por *cluster* ou mais *clusters* vizinhos. Uma explicação para esse fato consiste (i) no aumento na quantidade de mensagens trocadas entre cada CH e seus nós sensores subordinados, dentro dos *clusters*, e (ii) no aumento na quantidade de mensagens trocadas

entre CHs durante o procedimento de colaboração. Logo, conclui-se que o CH pode ser sobrecarregado, respectivamente, em algum número de nós sensores em seu *cluster*, ou número de *clusters* vizinhos. Não foi possível atingir esse limite experimentalmente, pois não havia um número suficiente de nós sensores reais disponíveis para tal.

Pelos resultados obtidos o protótipo apresentou boa escalabilidade, considerando o número de nós sensores utilizados na maioria das aplicações relacionadas em uma situação real. O número máximo de nós sensores reais utilizados em aplicações de SHM encontrado na literatura foi de 64 (KIM et al., 2007). O tempo de execução das fases de coleta de dados começa a aumentar quando o número de bytes a serem transmitidos pelo CH atinge a taxa de dados do rádio (máximo de 250 kbps para o rádio da plataforma MICAz). E aumentar o número de nós sensores por *cluster* é uma forma mais rápida de atingir este limite do que aumentar o número de *clusters* vizinhos.

É também importante mencionar que a soma da **quantidade de bytes de mensagens de controle transmitidas** com a **quantidade de bytes de mensagens de dados transmitidas** é uma boa estimativa para a energia despendida pela RSSF. Uma vez que é de conhecimento geral que as transmissões de rádio são as tarefas que mais consomem energia em RSSFs (HACKMANN et al., 2008), torna-se possível estimar um tempo de vida mais curto para o CH, de acordo com o aumento do número de nós sensores subordinados em seu *cluster*. Assim, pelo resultado experimental obtido e em termos de consumo de energia em comunicação, é sempre uma escolha melhor alocar o número de nós sensores necessários para monitorar a estrutura em tantos *clusters* quanto possível. Este resultado é também uma forte justificativa para a utilização de CHs para auxiliar o processamento descentralizado do algoritmo Sensor-SHM, entre os nós da RSSF. Porém, a opção de aumentar o número de *clusters* para a mesma quantidade de nós sensores certamente aumenta o número total de nós necessários para a mesma tarefa, o que aumenta o custo global do sistema. Dessa forma, existe um *trade-off* a ser gerido e experimentos e simulações realizadas anteriormente à implantação RSSF são muito úteis para orientar esse tipo de decisão.

#### **7.4 Conjunto de experimentos B: avaliação da eficácia do Sensor-SHM**

O conjunto de experimentos B foi realizado para analisar a eficácia do Sensor-SHM proposto, em termos da quantidade de acertos na detecção, localização e determinação da extensão dos danos, e sua aplicabilidade em uma situação real, em termos de acertos na detecção de danos e acertos na localização e determinação da extensão de danos. O conjunto de experimentos B foi subdividido nos conjuntos de experimentos B.1 e B.2.

O conjunto de experimentos B.1 apresenta uma análise sobre a eficácia do Sensor-SHM proposto, em termos da quantidade de acertos na detecção, localização e determinação da extensão dos danos.

O conjunto de experimentos B.2 apresenta uma análise sobre a aplicabilidade do Sensor-SHM em uma situação real, em termos de acertos na detecção de danos e acertos na localização e determinação da extensão de danos.

#### 7.4.1 Descrição do cenário do experimento B.1

Conforme já mencionado, o experimento B.1 apresenta uma análise sobre a eficácia do Sensor-SHM proposto, em termos da quantidade de **acertos na detecção, localização e determinação da extensão dos danos**. Nesse experimento, com o intuito de avaliar essa métrica, foi observado o seu comportamento ao longo do tempo, isto é, das sucessivas fases de coleta de dados.

A metodologia proposta para gerar dano artificialmente em uma estrutura, apresentada na Seção 6.3, foi aplicada no conjunto de dados de aceleração brutos simulados, de forma a torná-los dados coletados de uma estrutura com dano. Embora esse experimento tenha sido realizado sobre dados de aceleração brutos simulados, ele é plenamente capaz de modelar como o Sensor-SHM se comportaria em uma situação do mundo real, e é também um primeiro teste para avaliar a precisão do modelo matemático, para ser usado em trabalhos futuros.

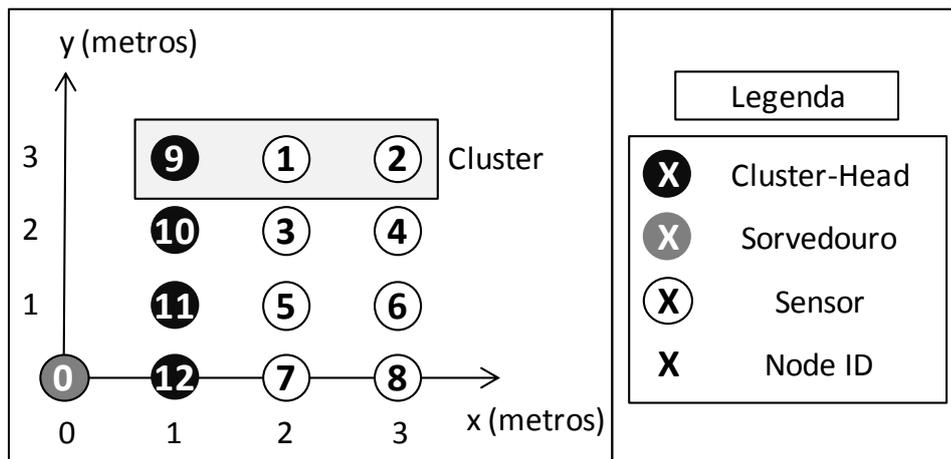


Figura 11. Topologia utilizada no experimento B.1

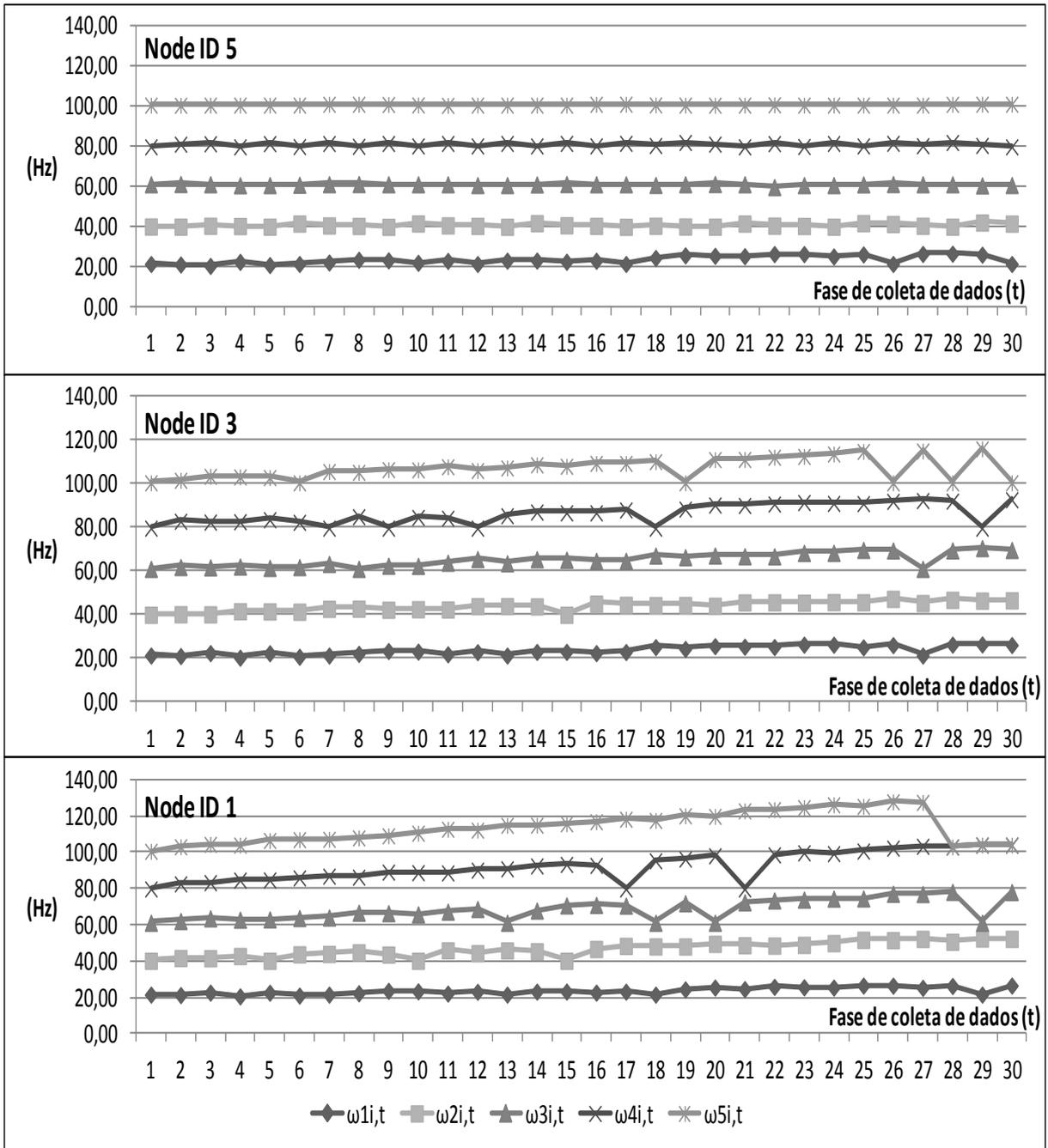
A topologia da RSSF é mostrada na Figura 11. A RSSF é composta por quatro *clusters* sendo dois nós sensores por *cluster*. Além disso, considera-se que cada *cluster* deve ser instalado ao longo de um único elemento estrutural homogêneo, separado dos demais. Por

exemplo, cada um destes elementos poderia ser representado por uma viga fixa, e todas as quatro vigas estariam ligadas entre si por elementos estruturais capazes de retransmitir vibrações. Considera-se que os nós sensores precisam estar diretamente fixados sobre a estrutura, porém os CHs não precisam estar diretamente fixados em alguma posição da estrutura. Cada CH necessita apenas estar dentro do alcance de rádio de todos os seus vizinhos CH imediatos (*single-hop*). Espera-se que os nós sensores que estão sobre o mesmo elemento estrutural homogêneo produzam mais dados redundantes entre si.

Nesse experimento foi considerado o ambiente com nós sensores reais, ou seja, alimentado com baterias reais, e com quantidade de energia suficiente para atingir longos tempos de vida, como demonstrado pelo experimento A.1. Entretanto, para tornar o experimento B.1 breve, a rede realizou o procedimento de setup e em seguida apenas 29 fases de coleta de dados, parando após o tempo suficiente para que os danos fossem claramente caracterizados no cenário. O programa executado no nó sorvedouro foi criado para sortear aleatoriamente um dos quatro casos da Tabela 3, que apresenta os possíveis casos de atribuições de padrões de dano entre os nós sensores. As demais configurações dos nós sensores foram similares às demais utilizadas ao longo do conjunto de experimentos A.

#### **7.4.2 Resultados do experimento B.1**

O programa executado no nó sorvedouro sorteou aleatoriamente a linha referente ao caso 1 da Tabela 3. Portanto o caso 1 (Node ID 1 e 2 com padrão de dano A, Node ID 3 e 4 com padrão de dano B, e Node ID 5,6,7 e 8 com padrão de dano C) foi realizado neste experimento. A mesma taxa de perda de mensagens de 0,4%, vista na Seção 7.3.4, para as mensagens de dados contendo valores de frequências dos nós sensores foi detectada. Para o presente experimento, os valores de frequências perdidos devido a este motivo foram interpolados após o final do experimento. Para mostrar como todos os padrões de dano da Tabela 2 foram realizados durante o experimento, foi escolhido um nó que recebeu o padrão de dano A (Node ID = 1), um nó que recebeu o padrão de dano B (Node ID = 3), e um nó que recebeu o padrão de dano C (Node ID = 5) para mostrar a evolução dos deslocamentos causados em cada frequência modal para cada padrão de dano (Figura 12).



**Figura 12. Variações de  $\omega_{i,t}$  para nós 1, 3 e 5**

Observa-se que as frequências seguem tendências lineares na Figura 12. O coeficiente angular apresentado por essas tendências é exatamente o valor de  $B_m$ . Essa relação matemática auxilia na compreensão da proposta de simulação de dano na estrutura, apresentada na Seção 6.3.2. Ao alterar o termo  $\omega^m$ , da Equação 5, para  $(\omega^m + (B_m t))$ , da Equação 6, as frequências passam a ter uma dependência linear ao longo das fases de coleta de dados  $t$ . No nó sensor de Node ID = 5, uma vez que seus valores para  $B_m$  são nulos para os

últimos quatro modos de vibração, as últimas quatro frequências desses modos seguiram uma tendência constante, e permaneceram sempre oscilando em torno dos seus limites  $T_1 = 2$  Hz.

Também é possível observar que os três nós na Figura 12, e todos os outros nós que receberam qualquer padrão de dano, perceberam danos na frequência do modo de vibração mais baixo, ao mesmo passo. Como esperado, os nós que receberam o padrão de dano A tiveram maiores variações nas suas frequências de modos de vibração mais altos do que os demais nós durante o experimento. Também é importante compreender o significado dos picos que apontam para baixo, que são mostrados em quase todas as curvas de todos os gráficos. Eles representam momentos em que um valor de frequência de algum modo de vibração não é extraído corretamente pela técnica de extração de frequências.

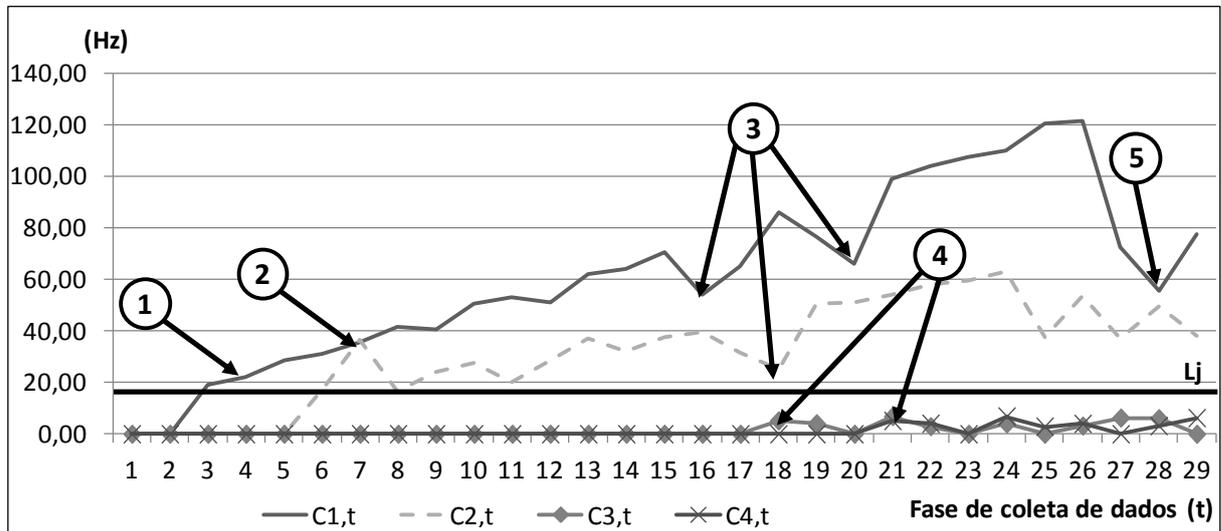
A técnica de extração de frequências modais possuiu fraco desempenho em termos de **imprecisão na extração de frequências modais**. Durante todo o experimento, aproximadamente 15,2% dos valores de frequência não puderam ser extraídos corretamente. Quando a técnica de extração de frequências modais não encontrou o valor da frequência modal corretamente, ela assumiu que seu valor era igual ao respectivo valor inicial armazenado no vetor  $\omega_{i,0}$ . Nas fases de coleta de dados seguintes, a frequência passa a ser extraída do espectro novamente, e a frequência volta para a tendência linear esperada.

Quanto à métrica **imprecisão na extração de frequências modais por modo de vibração**, considerando todos os valores de frequências modais extraídos durante o experimento, o primeiro modo não foi encontrado em 12,5% dos casos, o segundo 5,0%, o terceiro 20,8%, o quarto 7,5% e o quinto 30,0%. Isso significa que a quinta frequência foi a mais difícil de encontrar, e o melhor desempenho foi alcançado em relação ao segundo modo.

Tais resultados apontaram que a técnica de extração de frequências modais ainda precisa de melhorias para obter um bom desempenho em termos de precisão. Assim, concluiu-se que não é uma boa escolha generalizar o uso do algoritmo Sensor-SHM para qualquer estrutura através da adoção dessa mesma técnica de extração de frequências modais apresentada. Em vez disso, pode ser uma melhor escolha para fazer estudos prévios sobre os modos de vibração específicos da estrutura a monitorar, de forma que se torne possível indicar outros parâmetros para a técnica de extração de frequências modais, o que irá levar a uma melhoria na sua precisão. Outra solução para contornar esse problema seria aumentar o número de nós sensores em cada *cluster*, de forma a obter mais dados redundantes. Esta **imprecisão na extração de frequências modais** não invalida o algoritmo Sensor-SHM, apenas impõe uma restrição mais forte à metodologia de aquisição de dados, mas que ainda

permite que a técnica de extração de frequências modais ocorra plenamente dentro dos nós sensores.

Nos casos em que os valores de frequência não foram extraídos, houve implicações nos cálculos de  $C_{j,t}$ , como ilustrado na Figura 13.



**Figura 13. Variação de  $C_{j,t}$  por cluster durante as fases de coleta de dados**

A Figura 13 apresenta um gráfico com as evoluções dos valores de  $C_{j,t}$  para os quatro *clusters* previstos no cenário do experimento, ao longo das fases de coleta de dados  $t$  e com as tolerâncias  $L_j$  evidenciadas no valor escolhido (20,0 Hz). Segundo esses dados, a quantidade de **acertos na detecção, localização e determinação da extensão de danos** foi calculada (não presente na Figura 13), por *cluster*, em 21 para o *cluster*  $j = 1$ , em 25 para o *cluster*  $j = 2$ , em 25 para o *cluster*  $j = 3$ , e em 24 para o *cluster*  $j = 4$ . Ressalta-se que cada *cluster* realizou 29 tentativas de detecção, localização e determinação da extensão de danos (uma por fase de coleta de dados). Dessa forma, as porcentagens de acertos na detecção, localização e determinação da extensão de danos são, respectivamente, 72%, 86%, 86% e 83%. Cinco situações importantes, relativas a esses resultados, são sinalizadas na Figura 13, que devem ser discutidas.

A **Situação 1** aponta que o primeiro *cluster* a detectar dano foi o *cluster* 1, na fase de coleta de dados  $t = 4$ . Neste momento, este *cluster* pode estar sinalizando um erro na detecção, localização e determinação da extensão de dano, mas na fase de coleta de dados  $t = 5$ , o mesmo *cluster* detecta dano novamente. Assim, é possível assegurar que o dano realmente ocorreu próximo ao *cluster* 1.

A **Situação 2** aponta que o dano progrediu a um ponto que o *cluster 2* começou a detectá-lo também, em proporções menores que o *cluster 1*. Trata-se do conceito de determinação da extensão de danos. Dois *clusters* estão nesse momento detectando danos, com o *cluster* mais próximo do dano possuindo maior valor de  $C_{j,t}$ .

A **Situação 3** diz respeito ao problema apresentado na Figura 12. Quando as frequências não foram extraídas corretamente, os valores de  $C_{j,t}$  foram influenciados, porém, uma vez que  $C_{j,t}$  depende simultaneamente de variações de frequências de cinco modos de vibração diferentes, a perda de apenas um único valor de frequência modal não é suficiente para trazer  $C_{j,t}$  abaixo da tolerância  $L_j$ . Por isso, conclui-se que para aumentar a confiabilidade do algoritmo Sensor-SHM, é melhor considerar na análise muitas frequências modais, quantas forem possíveis e relevantes para caracterizar danos, de modo que se uma dessas frequências for perdida, ou mal estimada, a perturbação causada sobre  $C_{j,t}$  não seja suficiente para prejudicar a precisão do algoritmo.

A **Situação 4** mostra a primeira vez em que um dos nós dos *clusters* com comportamentos semelhantes (Node ID = 3 e Node ID = 4) apresentou um valor para uma das suas frequências modais que ultrapassou a tolerância  $T_i$ . Esta frequência modal é a frequência do primeiro modo, cujo valor inicial era 20Hz. Esta perturbação da primeira frequência modal foi suficiente para causar o cálculo de  $C_{3,t}$  pela primeira vez no momento  $t = 18$ , e  $C_{4,t}$  no momento  $t = 21$ . Numa futura fase de coleta de dados, se os parâmetros de entrada permanecessem fixos, os *clusters 3* e *4* começariam a sinalizar danos, apenas devido a deslocamentos na frequência modal do primeiro modo de vibração da estrutura, outro caso que influencia a determinação da extensão de danos. A RSSF não operou por um tempo longo o suficiente para observar esse fato, pois seria necessário muito tempo de duração do experimento para realizar tal observação.

Por fim, a **Situação 5** mostra o efeito de três fases de coleta de dados consecutivas, nas quais a quinta frequência modal foi extraída erroneamente, sobre  $C_{1,t}$ . As quintas frequências modais dos nós de Node ID = 1 e Node ID = 2 são aquelas que são mais sensíveis a danos, por isso, não extraí-las corretamente dos espectros de frequência fez com que os valores de  $C_{1,t}$  caíssem abaixo de 50% do seu valor esperado. Se fosse escolhido para  $L_1$  um valor acima de 80,0, o *cluster 1* não sinalizaria a detecção de dano, quando, na verdade, o dano ainda estaria progredindo. Se este estado permanecer por mais fases de coleta de dados, este seria o caso de um erro na detecção, localização e determinação da extensão de dano. A chave para

evitar esse problema é contar com as opiniões dos *clusters* vizinhos. Neste caso, o *cluster* 2 iria continuar sinalizando dano, com o limite  $L_2$  ajustado em 20,0.

Portanto, evitar erros na detecção, localização e determinação da extensão de danos é uma das principais razões para estimular a adoção de mecanismos de colaboração entre os nós no algoritmo Sensor-SHM. O impacto da perda de mensagens transmitidas entre um nó sensor e um CH é semelhante ao impacto de uma extração de frequência errônea, tal como assinalado na Situação 5. Porém, quando um pacote é perdido, todas as cinco frequências modais são perdidas simultaneamente (vetor  $\omega_{i,t}$  por inteiro é perdido), e o respectivo coeficiente  $C_{j,t}$  tende a cair mais abaixo do que no caso em que apenas o valor de frequência de um modo de vibração é erroneamente extraído do espectro de frequência. No caso de um pacote perdido na comunicação entre CHs, toda a região controlada pelo respectivo *cluster* é imediatamente excluída da análise, o que pode comprometer profundamente toda a análise. Por esta razão, a adoção de protocolos para proporcionar tanta confiabilidade quanto possível na comunicação entre CHs é desejada (por exemplo, utilizando confirmações de mensagens).

#### 7.4.3 Descrição do cenário do experimento B.2

Conforme já mencionado, o experimento B.2 apresenta uma análise sobre a aplicabilidade do Sensor-SHM em uma situação real, em termos de **acertos na detecção de danos e acertos na localização e determinação da extensão de danos**.

Com a finalidade de ilustrar a aplicabilidade do algoritmo Sensor-SHM em uma situação real, um exemplo de uma aplicação real descrita em Clayton et al. (2006) foi escolhido. Os parâmetros utilizados nessa aplicação foram configurados no Sensor-SHM, de modo que o comportamento do algoritmo Sensor-SHM pudesse ser analiticamente simulado e analisado. Assim sendo, foram extraídos dados sobre os deslocamentos de frequências modais, devidos à ocorrência de dano, de um teste realizado em Clayton et al. (2006), e realizou-se uma simulação numérica para avaliar o comportamento do algoritmo Sensor-SHM nesse caso. Esta aplicação é realizada sobre uma estrutura experimental, em ambiente controlado de laboratório, o que corresponde à maioria dos cenários de aplicação adotados na literatura.

Em Clayton et al. (2006) foi realizado um experimento para validar o desempenho de nós da plataforma MICAz na detecção e localização de danos. A estrutura experimental usada por Clayton et al. consistiu de cinco compartimentos metálicos (em formato de prateleiras retangulares) sobrepostos e vazados, isto é, cinco andares sem paredes e sustentados por

quatro colunas nos vértices dos retângulos. Os nós MICAz foram instalados nos centros dos andares 1, 2, 4 e 5, com o eixo z alinhado à gravidade, e registraram a aceleração na direção do eixo x. O dano foi simulado através da redução da rigidez das colunas entre os andares, trocando as colunas originais por colunas com um menor momento de inércia. A estrutura foi agitada por uma carga de impulso gerada pelo impacto realizado sobre o quarto andar com um martelo de impacto. Os resultados foram também registrados por nós sensores cabeados de referência, instalados próximos aos nós sensores MICAz, possibilitando mostrar que a plataforma de RSSF MICAz obteve bom desempenho em comparação com os sensores cabeados. Na situação experimental, os nós MICAz se encontravam a menos de 1m de distância uns dos outros, em média.

Considerando esse cenário adotado por Clayton et al., descrito anteriormente, a implantação da RSSF rodando o Sensor-SHM foi organizada de forma semelhante. Um nó sensor foi considerado instalado em cada um dos mesmos locais onde foram implantados os nós sensores sem fio do trabalho relacionado e, além disso, dois *clusters* foram criados: *cluster*  $j = 1$ , compreendendo os andares 1 e 2 (os sensores  $i = 1$  e  $i = 2$ , respectivamente), e *cluster*  $j = 2$ , compreendendo os andares 4 e 5 (sensores  $i = 3$  e  $i = 4$ , respectivamente). Considerou-se a instalação dos CHs  $j = 1$  e 2 fora da estrutura, mas ainda assim no alcance de rádio de todos os demais nós. A presença física dos CHs sobre a estrutura poderia afetar as suas propriedades físicas, adicionando mais massa à estrutura em uma situação real. Uma vez que os nós CH não sensoriam, a RSSF rodando o Sensor-SHM pode se adaptar facilmente ao cenário experimental descrito, de forma muito similar ao sistema de Clayton et al. (2006).

Uma vez que houve informação disponível em Clayton et al. (2006) sobre os estados saudáveis e danificados da estrutura em questão, foi possível calcular  $\Delta\omega_{i,t}$  para  $t = 1$  a  $t = 5$ , e assumiu-se que todos os sensores detectaram os mesmos valores de frequências modais. Uma vez que a estrutura é pequena e os sensores estavam posicionados relativamente próximos, a detecção das mesmas frequências modais globais da estrutura por todos os nós sensores instalados sobre ela é uma hipótese razoável, não sendo verdadeira para qualquer estrutura. Havia informação disponível para executar, pelo menos, uma primeira fase de coleta de dados saudáveis e cinco fases de coleta de dados sucessivas, com a presença de diferentes danos causados em cada um dos cinco andares em cada fase de coleta de dados. Um estudo anterior à implantação real da RSSF sobre a estrutura foi realizado para encontrar bons valores para as constantes  $T_i$ ,  $A_i$  e  $L_j$ .

No experimento descrito em Clayton et al., foram utilizados três métodos diferentes para extrair as frequências modais: um método manual, um método denominado *Eigensystem Realization Algorithm* (ERA) e outro método denominado *Fractional Polynomial Curve-fitting* (FPCF). A determinação das frequências modais, por conseguinte, apresentou uma média e desvio padrão para as extrações por cada um desses três métodos, e para cada situação de dano. Foram assumidos valores de  $T_i$ , para cada sensor  $i$ , iguais a três vezes o valor do desvio padrão dos respectivos modos de vibração. Supondo-se que as frequências modais apresentam uma distribuição normal, e sabendo que o algoritmo Sensor-SHM usa o módulo da diferença das frequências modais, o algoritmo vai considerar a estrutura saudável mais de 99% das vezes que forem obtidas amostras de frequências modais, quando a estrutura de fato estiver saudável. Apenas quando um valor de  $\Delta\omega_{i,t}$  ultrapassa os valores de  $T_i$  o algoritmo prossegue com os cálculos, o que corresponde a (i) 1 % das vezes, mesmo quando a estrutura é ainda saudável (devido a erros) e (ii) situações em que tenha ocorrido um dano de fato na estrutura. Uma vez que as alterações das frequências modais devido à inserção de um dano em um andar na estrutura foram muito maiores que 3 desvios-padrão da extração de frequências modais, foi possível aplicar com êxito o algoritmo. O valor de  $L_j$  foi definido seguindo os mesmos princípios, mas de acordo com os valores dos coeficientes  $C_{j,t}$ .

Uma vez que foi possível calcular previamente os valores de  $\Delta\omega_{i,t}$  para cada possibilidade de dano, e cada nó sensor, a determinação de cada constante  $A_i$  foi realizada utilizando um procedimento simples. Os vetores  $A_i$  devem ser aqueles que maximizam os valores dos coeficientes de  $D_{i,t}$  esperados para os sensores localizados perto de cada local danificado. Pelo cenário de Clayton et al., prevê-se que na fase de coleta de dados  $t = 1$ , o andar onde se localiza o dano seja o andar onde se localiza o nó sensor  $i = 1$ . Para  $t = 2$ , o dano esteja localizado próximo ao sensor  $i = 2$ . Para  $t = 4$ ,  $i = 3$  e para  $t = 5$ ,  $i = 4$ . Então, resolve-se um problema de programação linear simples, cujo objetivo era maximizar  $(D_{1,1} + D_{2,2} + D_{3,4} + D_{4,5})$ , variando os valores de  $A_i$  e restringindo-os entre 0% e 100% para cada modo de vibração, para cada sensor. Considerando-se que em  $t = 1$  ponto de dano estava presente no andar 1, em  $t = 2$  no andar 2,  $t = 4$  no andar 4 e  $t = 5$  no andar 5. Assim, maximiza-se o valor de  $D_{i,t}$  para o sensor  $i = 1$  quando o dano está presente no andar 1, e assim por diante. Uma vez que os valores de  $\Delta\omega_{i,t}$  foram os mesmos coletados por todos os sensores, eles foram constantes na formulação desse problema de programação linear. Obviamente, os modos de vibração mais sensíveis ao dano em um andar receberam valores mais próximos de 100% para o respectivo valor de  $A_i$  no nó sensor daquele andar. Em outras

palavras, quando o dano é no andar 1, e sabe-se que a maior variação na frequência de modo 2 ocorre quando o dano é no andar 1, é possível escolher o valor de 100% para este modo 2, e 0% para todos os demais modos no vetor constante  $A_i$  do nó sensor do andar 1 ( $i = 1$ ). Quando o dano não está no andar 1, este nó sensor pode ainda detectar uma variação na frequência modal 2, e, conseqüentemente, multiplicar esta variação pelos mesmos 100% gerando algum valor de  $D_{i,t}$ , mas este valor não será ainda o maior valor possível para  $D_{i,t}$ , pois a variação na frequência modal não possuirá valor absoluto tão alto quanto se o dano estivesse presente no andar 1.

#### 7.4.4 Resultados do experimento B.2

Usando as regras para definir os valores das constantes do algoritmo Sensor-SHM definidas na Seção 7.4.3, e considerando a existência dos dois *clusters*, o algoritmo obteve uma aplicabilidade razoável em uma situação real, em termos de **acertos na detecção de danos e acertos na localização e determinação da extensão de danos**.

Quando o dano foi inserido no andar 1 e no andar 2, o *cluster* 1 sinalizou dano próximo a ele, e o *cluster* 2 não. Quando o dano foi inserido no andar 3, como não havia nenhum nó sensor instalado neste andar, esta situação não foi prevista na estratégia dessa simulação, portanto ambos os *clusters* agiram de forma imprevisível, ambos sinalizando dano. Quando o dano foi inserido nos andares 4 e 5, o comportamento esperado era que o *cluster* 2 sinalizasse dano sozinho, mas uma vez que a localização de danos nestes andares contava principalmente com as frequências modais que mais variavam devido a danos em qualquer andar, ambos os *clusters* sinalizaram dano quando este estava presente somente nos andares 4 ou 5, o que é considerado o caso de um erro na localização e determinação da extensão de dano.

Considera-se, portanto, que o Sensor-SHM apresentou 100% de **acertos na detecção de danos** e dois casos de erros dentre os oito resultados obtidos para localização e determinação da extensão de dano (cada um dos dois *clusters* sinalizando dano ou não em sua localização, em quatro cenários de dano previstos), resultando em 75% de **acertos na localização e determinação da extensão de danos**.

Embora a aplicabilidade do algoritmo possa ser melhorada através da escolha de diferentes regras para definir os valores das constantes, essa aplicabilidade é extremamente dependente da qualidade das propriedades estruturais. Nos casos em que a estrutura monitorada não exibir um claro (único) padrão de variação de frequências modais para dano em cada posição de interesse, pode ser impossível localizar danos nessas posições. No cenário

de Clayton et al., por exemplo, não foi possível localizar danos claramente nos andares 4 e 5 usando as regras propostas.

Dessa forma, conclui-se que o algoritmo Sensor-SHM, proposto no presente trabalho, é aplicável a este cenário apresentado por Clayton et al. (2006), um cenário típico de aplicações de SHM.

## **7.5 Análise comparativa entre o Sensor-SHM e outros trabalhos**

Foram escolhidos dois trabalhos importantes, encontrados na literatura, para realizar uma comparação entre os seus resultados e os obtidos pelo Sensor-SHM, e assim evidenciar os avanços atingidos no presente trabalho, em relação ao estado da arte. O primeiro deles é o de Xu et al. (2004), em que o sistema denominado Wisden é apresentado. O segundo é o descrito em Hackmann et al. (2008).

### **7.5.1 Descrição dos trabalhos escolhidos**

O sistema Wisden, apresentado no trabalho de Xu et al. (2004), é considerado uma abordagem centralizada, onde nenhum processamento destinado a avaliar a integridade estrutural é realizado dentro da rede, sendo todo esse processamento realizado apenas no nó sorvedouro. A concepção do Wisden é baseada em uma RSSF, porém essa RSSF é utilizada apenas como infraestrutura de aquisição de dados e comunicação. O Wisden se baseia na detecção de eventos relevantes para a análise da saúde da estrutura. Esses eventos ocorrem no momento em que os dados sensorizados ultrapassam um limiar, definido por um especialista. Apenas os dados acima desse limiar (os dados que caracterizam o evento) são transmitidos, para evitar transmitir dados irrelevantes para a análise da saúde da estrutura e economizar recursos de comunicação da RSSF. Além disso, o Wisden se baseia também em técnicas de compressão de dados, com objetivo de reduzir ainda mais a quantidade de transmissões e fornecer um transporte de dados confiável até o nó sorvedouro, onde uma análise completa com base nos dados coletados com objetivo de avaliar a saúde da estrutura é realizada.

O trabalho descrito em Hackmann et al. (2008), no qual os autores apresentam um sistema parcialmente descentralizado para a detecção e localização de danos que faz uso de uma RSSF. Esse sistema baseia-se no algoritmo DLAC para a detecção e localização de danos em estruturas. Uma parte do processamento (que visa fornecer *inputs* para o algoritmo DLAC) é realizada dentro da RSSF, mas o algoritmo DLAC em si é executado no nó sorvedouro.

Ambos os trabalhos apresentam níveis crescentes de descentralização, sendo representativos, respectivamente, das segunda e terceira gerações de soluções de SHM que usam redes de sensores. A proposta do Sensor-SHM apresenta uma abordagem totalmente descentralizada.

### 7.5.2 Critérios de comparação

Foram realizadas comparações dos resultados obtidos no presente trabalho com os resultados dos dois trabalhos encontrados na literatura: Xu et al. (2004) e Hackmann et al. (2008), que são representativos da segunda e terceira geração de soluções de SHM que usam redes de sensores. Essas comparações foram realizadas em termos de (i) **consumo de memória** (RAM) para executar as funcionalidades básicas a que cada sistema se propõe, como solução para a redução de dados, a fim de permitir transmissões mais eficientes; (ii) **latência**, o que corresponde ao atraso de tempo necessário para atingir os resultados da análise da estrutura a partir de uma amostragem de aceleração realizada; (iii) **tráfego de rede**, gerado por todos os nós da RSSF; e (iv) **tempo de vida da RSSF**, já definido na Seção 7.2.1. Para proporcionar uma base de comparação justa, os dados foram normalizados.

A Tabela 4 compara os resultados dos trabalhos escolhidos com o Sensor-SHM em termos dos critérios (i), (ii) e (iii).

Como o trabalho de Xu et al. (2004) não apresentou resultados de medições sobre o consumo de energia e tempo de vida da RSSF de sua solução, apenas os resultados do presente trabalho (Sensor-SHM) e do trabalho de Hackmann et al. (2008) foram comparados em relação ao critério (iv). Para não prejudicar a visualização dos dados na Tabela 4, os resultados obtidos em relação ao critério (iv) não foram incluídos nessa tabela.

Os resultados obtidos pelos três trabalhos, em relação aos critérios (i), (ii), (iii) e (iv), são discutidos, respectivamente, na Seção 7.5.3, Seção 7.5.4, Seção 7.5.5, Seção 7.5.6.

**Tabela 4. Comparação do Sensor-SHM com trabalhos relacionados**

<b>Critério</b>	Caso totalmente centralizado: Xu et al. (2004)	Caso parcialmente descentralizado: Hackmann et al. (2008)	Caso totalmente descentralizado: (Sensor-SHM)
<b>Hardware usado</b>	Plataforma MICA2 (4 kB RAM; 128 kB ROM)	Plataforma Imote2 (256 kB RAM; 32 MB ROM)	Plataforma MICAz (4 kB RAM; 128 kB ROM)
<b>Consumo de Memória</b>	Usa 288 bytes de RAM para realizar apenas compressão sobre um vetor de 128 amostras (2,25 bytes/amostra)	Usa 73000 bytes de RAM para realizar processamento descentralizado (parcialmente) sobre um vetor de 2048 amostras (35,64 bytes/amostra)	Usa 2761 bytes de RAM para realizar todo o processamento descentralizado sobre um vetor de 512 amostras (5,39 bytes/amostra)
<b>Latência</b>	7 minutos para coletar 1 minuto de vibração composto de 6000 amostras a uma taxa de aquisição de 100Hz (0,07s/amostra)	5 segundos para coletar 3,7 segundos de vibração compostos de 2048 amostras a uma taxa de aquisição de 560Hz (0.002 s/amostra)	10 segundos para decidir sobre 0,5 segundos de vibração compostos de 512 amostras a uma taxa de aquisição de 1000Hz (0.02s/amostra)
<b>Tráfego de rede gerado</b>	Transmite o vetor de amostras por inteiro. Gera 667 bytes de tráfego por segundo de operação da rede	Transmite apenas coeficientes para concluir o ajuste de curva no sorvedouro. Gera 300 bytes de tráfego por segundo de operação da rede	Transmite apenas vetor de frequências entre o nó sensor e o nó CH. Gera 28 bytes de tráfego por segundo de operação da rede

### 7.5.3 Consumo de memória

O Wisden usa 288 bytes de RAM para executar sua compressão de dados sobre um vetor de 128 amostras. O Sensor-SHM consome quase o dobro de bytes de RAM (considerando o programa apenas do nó sensor), uma vez que realiza mais atividades de processamento dentro dos nós sensores. O Wisden usa uma compressão baseada em wavelets, enquanto o Sensor-SHM se baseia em uma FFT e em um algoritmo de extração de picos.

O Sensor-SHM pode ser comparado mais facilmente ao Wisden, uma vez que a proposta de Hackmann et al. baseia-se na plataforma Imote2, que fornece e consome mais recursos computacionais. No entanto, o Wisden apresenta uma otimização de uso de memória, realizando alocação dinâmica de memória, enquanto que o Sensor-SHM consome a mesma quantidade de memória RAM durante toda a sua execução, assim como fazem Hackmann et al. em sua proposta.

Com relação ao critério de consumo de memória, é possível concluir que o Sensor-SHM executa uma quantidade maior de processamento descentralizado do que o caso totalmente centralizado (Wisden). O trabalho de Hackmann et al. apresenta uma quantidade ainda maior de consumo de RAM para cada amostra coletada, mas este valor não pode ser perfeitamente comparado ao valor consumido pelo Sensor-SHM por causa de dois fatos: (i) o conjunto de funções básicas de suporte às aplicações da plataforma Imote2 (*.NET Microframework*) inflaciona drasticamente o consumo de memória de um programa desenvolvido para essa plataforma, adicionando mais recursos de software à compilação do que o necessário, e (ii) a aplicação de Hackmann et al. mantém as matrizes utilizadas nas operações intermediárias no programa, por razões de depuração, ou seja, o vetor de amostras é preenchido uma vez e a FFT sobre esse vetor origina outro vetor com o resultado, enquanto na implementação do Sensor-SHM os resultados da FFT são armazenados no mesmo espaço de memória das amostras (sobrescrevendo os dados originais no mesmo vetor). Tendo em vista estes fatos, o Sensor-SHM pode consumir uma quantidade de memória semelhante ao caso parcialmente descentralizado, se as mesmas plataformas e a reutilização de matrizes forem consideradas igualmente em ambos os trabalhos.

Hackmann et al. também afirmaram que a execução de todos os procedimentos necessários para a extração das frequências dentro do nó sensor pode nem sempre ser vantajosa. Em outras palavras, este esforço pode provocar uma quantidade de consumo de memória que não justifica a redução da quantidade de dados transmitidos. O Sensor-SHM avançou sobre essa barreira, realizando todo o processamento para a extração de apenas um coeficiente de todo o conjunto de amostras. Embora essa escolha possa ter gerado um sistema de subótimo do ponto de vista do uso da memória na fase do algoritmo que ocorre entre os nós sensores e CHs, é importante mencionar que o Sensor-SHM apresenta uma fase de tomada de decisão baseada na cooperação entre os CHs, que se torna eficiente se for realizada com base na troca de apenas uma mensagem contendo um simples número ( $C_{j,t}$ ) entre os CHs vizinhos, e essa fase de decisão cooperativa não é prevista em quaisquer outras soluções.

#### **7.5.4 Latência**

Em termos de latência observou-se um melhor desempenho do Sensor-SHM, quando comparado a uma abordagem totalmente centralizada como o Wisden. Enquanto o Wisden necessita de 0,07 segundos por amostra coletada para transmitir todas as amostras e permitir que uma análise completa comece no nó sorvedouro, o Sensor-SHM necessita apenas de 0,02

segundos por amostra coletada para realizar todos os cálculos necessários e para comunicar os coeficientes entre CHs, incluindo a decisão colaborativa.

A comparação foi normalizada de acordo com o número de amostras coletadas, uma vez que 1 minuto de amostragem contém mais amostras de vibração quando uma taxa de amostragem mais alta é usada. No entanto, comparando os resultados do Sensor-SHM com os resultados da implementação de Hackmann et al. revela-se, à primeira vista, um desempenho melhor para a abordagem parcialmente descentralizada. Mas o valor menor, de 0,002 segundo por amostra no trabalho de Hackmann et al., é mascarado pela capacidade computacional superior da plataforma Imote2. Esta plataforma executa todo o processamento necessário a uma velocidade maior que a plataforma MICAz, o que resultou em um valor de latência menor do que o valor de latência do Sensor-SHM.

No entanto, mesmo considerando-se as mesmas plataformas, estima-se que a latência observada no Sensor-SHM seja ligeiramente maior que a latência do sistema parcialmente descentralizado, uma vez que o Sensor-SHM prevê também uma fase de decisão colaborativa entre os CHs, que Hackmann et al. não preveem. Entretanto, uma implementação do Sensor-SHM na plataforma Imote2 deve ser realizada em trabalhos futuros para obter uma conclusão definitiva.

### **7.5.5 Tráfego de rede**

Ao efetuar a comparação dos resultados obtidos pelos três trabalhos (Sensor-SHM, Hackmann et al. e Wisden) em termos de tráfego de rede gerado, para uma rede composta de 15 nós sensores, observa-se que o Sensor-SHM oferece melhores resultados. O Sensor-SHM gera apenas 28 bytes de tráfego por segundo de operação da rede, enquanto o Wisden e Hackmann et al. geram, respectivamente, 667 e 300 bytes de tráfego por segundo de operação da rede. Essa é uma medida relevante para determinar o sucesso de implementação de uma comunicação simples e de baixo *overhead* entre os CHs, que trocam mensagens para decidir de forma colaborativa sobre a integridade estrutural.

No caso do Wisden foi considerada como configuração de tráfego uma estimativa da quantidade de tráfego apenas respectivo à transmissão do conjunto completo de dados coletados por 15 nós, considerando-se um *duty cycle* de 100% (uma estrutura que vibra 100 % do tempo).

Para o caso de Hackmann et al. foi considerada como configuração de tráfego uma estimativa da quantidade de tráfego gerado por 15 nós transmitindo os coeficientes para o nó

sorvedouro de forma que esse possa executar o restante da fase de ajuste de curva durante 10 fases de coleta de dados imediatamente sequenciais (aproximadamente 100% de *duty cycle*).

Para o caso do Sensor-SHM, considerou-se como configuração de tráfego uma estimativa da quantidade de tráfego gerado por um único cluster de 16 nós (1 CH e 15 nós sensores) durante 10 fases de coleta de dados, com *duty cycle* = 100%. Essa configuração do Sensor-SHM é a que reproduz mais fielmente as configurações dos outros trabalhos.

No caso do Wisden e do Sensor-SHM, os bytes do cabeçalho da mensagem são contabilizados, enquanto que para o caso de Hackmann et al. apenas uma estimativa do tamanho da área de *payload* é contabilizado, uma vez que não houve informação sobre o tamanho das estruturas de mensagem no respectivo trabalho.

#### **7.5.6 Tempo de vida da RSSF**

Em Hackmann et al. (2008), onde foi apresentada uma abordagem parcialmente descentralizada com base no método DLAC, a projeção alcançada para o tempo de vida da RSSF foi de 213 dias na plataforma Imote2, alimentada com 3 pilhas AAA (2400mAh) e considerando 7 nós sensores na rede, que executavam tarefas de sensoriamento e agendavam amostragens uma vez por hora (assumindo um tempo em *sleep mode* entre cada amostragem).

Nos experimentos realizados com o Sensor-SHM, o cenário mais semelhante ao descrito em Hackmann et al. (2008) seria o da topologia 2 do conjunto de experimentos A.1, apresentada na Figura 5, na Seção 7.3.1. Nessa topologia um tempo de vida da RSSF de 500 dias foi projetado, realizando as fases de coleta de dados uma vez por hora, e utilizando a plataforma MICAz com 2 pilhas AA (1202mAh) (uma plataforma mais limitada em termos de recursos do que a plataforma Imote2 usada em Hackmann et al.) com um total de oito nós sensores e 2 nós CH na rede.

Assim sendo, usar a abordagem do Sensor-SHM em vez da abordagem proposta em Hackmann et al. (2008), pode ser mais vantajoso em termos de consumo de recursos, uma vez que o número de nós sensores por *cluster* é escolhido como na topologia 2 do conjunto de experimentos A.1, como visto na Figura 5.

#### **7.5.7 Considerações finais sobre as comparações com outros trabalhos**

Em suma, o Sensor-SHM apresentou um resultado pior do que a abordagem parcialmente descentralizada e a centralizada, em termos de consumo de memória e latência.

No entanto, a escolha de consumir mais memória e tempo de processamento é compensatória, pois habilita as principais características do Sensor-SHM.

A comunicação entre os CHs através de mensagens que transportam pequenas cargas (pequenas quantidades de dados da aplicação), gerando uma pequena quantidade de bytes de tráfego, permite: (i) a tomada de decisão dentro da RSSF, através de mecanismos de colaboração, permitindo a atuação local e mais rápida frente a condições indesejáveis, e (ii) uma baixa utilização de recursos de comunicação, aumentando a vida útil do sistema devido à economia de energia utilizada nas transmissões, além da liberação da largura de banda restante do rádio, possibilitando a adoção de outros protocolos auxiliares para melhorar o desempenho nas comunicações, especialmente na camada de comunicação entre os CHs.

## 8 Conclusões

O presente trabalho propôs um algoritmo denominado Sensor-SHM, considerado eficaz, descentralizado, localizado, e baseado em técnicas de fusão de informação em múltiplos níveis, com o objetivo de detectar, localizar e determinar a extensão de danos em estruturas que pertencem ao domínio da engenharia civil, fazendo uso de uma RSSF organizada de forma hierárquica.

Entre as contribuições da presente proposta destaca-se, em **primeiro** lugar, a concepção do Sensor-SHM como uma ferramenta de suporte às técnicas tradicionais de manutenção preditiva. Executar as fases de coleta de dados uma vez por dia, durante um ano, resulta em uma melhoria na utilização dos recursos monitorados, que podem ser, por exemplo, turbinas eólicas em parques eólicos. O Sensor-SHM pode ser usado como uma ferramenta de suporte às técnicas tradicionais de manutenção preditiva, e suas contribuições em parques eólicos, por exemplo, podem ser (i) uma melhor oferta de energia, aumentando o ciclo de trabalho das turbinas eólicas monitoradas, evitando períodos de quebra, (ii) a redução dos custos de manutenção, uma vez que outras soluções de monitoramento disponíveis, tais como as baseadas em redes cabeadas e intervenção humana, tendem a ser mais caras, (iii) redução dos custos de indenizações para reparar os danos a outras propriedades ao redor do parque eólico, causados por uma grave propagação de danos iniciados em um dos aerogeradores, e (iv) maior segurança também para os trabalhadores dos parques eólicos.

A **segunda** contribuição desse trabalho é que o Sensor-SHM é a única proposta completamente descentralizada que realiza a detecção, localização e determinação da extensão de danos, através da utilização de uma RSSF com topologia hierárquica onde os nós CH colaboram para realizar caracterização de dano. A segunda contribuição reside no fato de que a abordagem proposta de detecção, localização e determinação da extensão de danos é um primeiro passo na direção de soluções de SHM totalmente descentralizadas e autônomas, uma vez que não há muito conhecimento desse tipo de proposta na literatura recente. Os resultados experimentais demonstram que é possível isolar uma única posição de danos e localizá-la usando o algoritmo Sensor-SHM, no caso em que os danos que afetam uma estrutura fazem com que suas frequências se alterem conforme descrito no presente trabalho. Evitar erros na detecção, localização e determinação da extensão de danos é uma das principais razões para estimular tais mecanismos de colaboração entre os nós no algoritmo Sensor-SHM.

Como uma **terceira** contribuição, avaliou-se o desempenho de uma técnica de fusão de informação em múltiplos níveis, quando executada dentro de uma RSSFs. O Sensor-SHM

pode ser classificado como um algoritmo de fusão de informação em múltiplos níveis, uma vez que emprega conjuntamente técnicas de fusão de informação em vários níveis de abstração de dados com o intuito de reduzir a quantidade de dados a serem transmitidos dentro da rede e, conseqüentemente, reduzir o *overhead* de dados e permitir uma utilização racional da energia na RSSF, buscando atingir um tempo de vida da RSSF satisfatório. Em geral, a utilização das técnicas de fusão de informação apresentadas no presente trabalho reduziram as transmissões de mensagens de dados, como demonstrado nos experimentos realizados para avaliar o impacto do Sensor-SHM na RSSF. A FFT, junto à técnica de extração de frequências modais, foram as duas técnicas de fusão de informação mais importantes utilizadas no presente trabalho, em termos de redução do *overhead* de comunicação. Essas técnicas permitiram a redução da necessidade de transmissões de 512 valores para apenas cinco valores. Mas também, as demais técnicas de fusão de informação ajudaram a reduzir esses cinco valores para apenas um valor. Como consequência dessa redução, habilitou-se a troca de informações mais rápida e consumindo menos energia entre os CHs.

Uma **quarta** contribuição, que é apresentada no Capítulo 2 e foi efetuada durante o presente trabalho, consiste no levantamento dos principais requisitos de soluções de SHM com foco na detecção, localização e determinação da extensão de danos que fazem uso de RSSFs. Em suma, os requisitos das técnicas modais em soluções de SHM levantados nesse trabalho são: (i) definição do uso da estratégia global e/ou local de monitoramento, e, conseqüentemente, a definição dos locais, ou pontos de monitoramento sobre a estrutura (ao menos um ponto para estratégias globais ou vários pontos para estratégias locais) (ii) definição da necessidade (ou se há necessidade) de agitação da estrutura para excitar os seus modos de vibração de interesse, utilizando *shakers*, (iii) a forma de obtenção de assinaturas da estrutura, (iv) definição de qual unidade de sensoriamento será utilizada para aquisição de dados, (v) consideração sobre os fatores ambientais e isolamento das suas influências sobre as assinaturas da estrutura, (vi) definição da taxa de aquisição e do número de amostras adquiridas pelas unidades de sensoriamento.

A **quinta** contribuição apresentada nesse trabalho é a proposta de uma nova classificação das soluções de SHM que usam redes de sensores em quatro gerações. Cada uma das gerações difere segundo (i) o uso de redes de sensores cabeadas ou RSSF e (ii) o grau de redução dos dados obtido e (iii) o nível de descentralização de cada uma das soluções de SHM que usam redes de sensores encontradas na literatura. No Capítulo 3 empregou-se essa

nova classificação para identificar cada uma das soluções de SHM que usam redes de sensores encontradas na literatura. Não era o objetivo esgotar o tema sobre o domínio de SHM por inteiro, uma vez que a gama de soluções de SHM é extensa e abrange distintas possibilidades, envolvendo conhecimentos de diferentes áreas de especialização. Novas soluções de SHM usando RSSFs estão surgindo e as existentes estão sendo aperfeiçoadas a cada momento. O hardware de RSSF também está em constante evolução, permitindo mais altas taxas de amostragem e maiores capacidades de processamento/armazenamento, no caminho de superar muitas questões em aberto no uso de RSSF para SHM. Portanto, alcançou-se o objetivo mínimo de organizar os vários trabalhos relacionados de uma forma didática e, assim, fornecer um roteiro inicial para estudos aprofundados e compreensão do contexto de desenvolvimento do Sensor-SHM.

Por fim, algumas lições foram aprendidas com este trabalho. O ambiente restritivo de recursos das RSSFs é um dos fatores que mais impedem a adoção ampla dessas redes em aplicações de SHM. A quantidade de RAM da plataforma MICAz ainda não é suficiente para executar, totalmente dentro dos nós sensores e com uma resolução satisfatória do eixo da frequência, a implementação da técnica de processamento de sinais mais importante, a FFT. Isso resultou em uma grande imprecisão (de  $\pm 2$  Hz) na determinação das frequências modais, também principalmente devido a truncamentos. A solução para este problema é ou reduzir a taxa de amostragem para abaixo de 1,0 kHz, reduzindo o potencial de amostragem do sistema, ou aumentar a quantidade de memória disponível no nó sensor. O desenvolvimento de plataformas de nós sensores com maior poder computacional disponível, assim como o desenvolvimento de novas técnicas de fusão de informação e abordagens para o problema abordado no presente trabalho são alguns dos desafios em aberto nessa área.

### 8.1 Trabalhos futuros

Como propostas de trabalhos futuros ressaltam-se os seguintes sete desdobramentos. **Primeiramente**, sugere-se realizar a implementação do algoritmo Sensor-SHM em outras plataformas de RSSF, como a plataforma Imote2. Novos experimentos podem ser realizados com essa nova implementação para comparar os resultados obtidos por ela com os resultados obtidos no presente trabalho, com a plataforma MICAz.

Em **segundo** lugar, sugere-se também testar o algoritmo Sensor-SHM em um cenário de aplicação com uma estrutura real, com o objetivo de avaliar a eficácia do Sensor-SHM, em termos de acertos na detecção, localização e determinação da extensão de danos, a partir da coleta de dados de aceleração por acelerômetros reais.

Em **terceiro** lugar, sugere-se também uma investigação sobre o uso de nós atuadores na RSSF, permitindo à RSSF, que executa o Sensor-SHM, atuar também dentro da rede frente à caracterização de dano na estrutura monitorada. Dessa forma, torna-se interessante também a realização de novos experimentos para avaliar o desempenho do Sensor-SHM em termos da velocidade com que a RSSF responde, quando há uma detecção, localização e determinação da extensão de um dano.

Em **quarto** lugar, no conjunto de experimentos para avaliar o impacto do Sensor-SHM na RSSF, sugere-se a variação de um maior número de *clusters* e nós sensores por *cluster* na RSSF, pois no âmbito do presente trabalho, não houve nós sensores reais disponíveis para observar o comportamento das métricas avaliadas para redes de maior escala.

Em **quinto** lugar, sugere-se uma investigação profunda sobre diferentes protocolos auxiliares para a RSSF, úteis como suporte ao Sensor-SHM e mais adequados aos seus requisitos. Destaca-se a investigação sobre protocolos de clusterização, como foi realizado por Rocha et al. (2010), Rocha et al. (2012), e Rocha (2012), onde foi proposta uma metodologia de clusterização semântica. Outros tipos de protocolos que podem ser alvo de investigação são os protocolos de sincronização e roteamento, buscando encontrar protocolos que sejam mais adequados aos requisitos de SHM.

Em **sexto** lugar, sugere-se a investigação sobre o uso de outras técnicas de fusão de informação no Sensor-SHM como, por exemplo, técnicas baseadas no conceito de fusão cooperativa (NAKAMURA et al., 2007). Na fusão de informação cooperativa, a informação provida por duas fontes é fundida em uma nova informação (normalmente mais complexa do que a original), que, do ponto de vista da aplicação, representa melhor a realidade. Dessa forma, é possível explorar dados oriundos de diferentes tipos de unidades de sensoriamento como, por exemplo, acelerômetros, *strain gauges*, e demais sensores de variáveis ambientais (como temperatura e umidade) para gerar índices de danos ainda mais eficazes no auxílio à caracterização de danos em estruturas.

Por último, em **sétimo** lugar, outra linha de pesquisa em aberto é o desenvolvimento de soluções que buscam aumentar a eficiência energética nos domínios de geração e transmissão de energia de *smart grids*, que pode ser abordado a partir de diversas frentes. Uma dessas frentes é o desenvolvimento de soluções baseadas em metodologias de manutenção preditiva, suportadas por aplicações descentralizadas que visam à detecção de danos, como o Sensor-SHM.

Nessa frente, uma solução para aumentar a eficiência energética pode ser obtida ao reduzir as horas durante as quais os equipamentos envolvidos permaneceriam parados por quebra ou manutenção (*downtime*). Nesse contexto, o desafio existente se traduz no desenvolvimento de soluções para monitorar variáveis mecânicas e estruturais dos equipamentos que permitam avaliar seus estados de saúde. Sistemas desenvolvidos para apoiar essa função, denominados Sistemas de Monitoramento da Condição (SMCs) (HAMEED et al. 2009), contribuem para o desenvolvimento de estratégias de manutenção preditiva que reduzem o *downtime*, elevando a eficiência energética.

O trabalho nessa nova frente de pesquisa já foi iniciado com a publicação em Santos et al. (2013), que propõe um framework de suporte à **eficiência energética**, denominado FraSEE.

## 9 Referências

ADAMS, D. **Health monitoring of structural materials and components: methods with applications**. West Sussex: Wiley, 2007. 476 p.

AKYILDIZ, I. ; KASIMOGLU, I. Wireless sensor and actor networks: research challenges. **Ad Hoc Networks**, Amsterdam, v. 2, n. 4, p. 351–367, Oct. 2004.

AKYILDIZ, I., et al. A survey on sensor networks. **IEEE Communications Magazine**, Los Alamitos, v. 40, n. 8, p. 102-114, Aug. 2002.

AL-KARAKI, J. ; KAMAL, A. Routing techniques in wireless sensor networks: a survey. **IEEE Wireless Communications**, Los Alamitos, v. 11, n. 6, p. 6-28, Dec. 2004.

ALBEROLA, R., PESCH, D. Avroraz: extending avrora with an iee 802.15.4 compliant radio chip model. In: ACM WORKSHOP ON PERFORMANCE MONITORING AND MEASUREMENT OF HETEROGENEOUS WIRELESS AND WIRED NETWORKS, 3., 2008, Vancouver. **Proceedings...** New York: ACM 2008.

ARORA, A. et al. A line in the sand: a wireless sensor network for target detection, classification, and tracking. **Computer Networks**, Amsterdam, v. 46, n. 5, p. 605-634, Dec. 2004.

ASSUNÇÃO, R., et al. Efficient regionalisation techniques for socio-economic geographical units using minimum spanning trees. **International Journal of Geographical Information Science**, Oxford, v. 20, n. 7, p. 797–811, 2006.

BAYES, T. An essay towards solving a problem in the doctrine of chances. **Philosophical Transactions of the Royal Society**, London, v. 53, n. 1, p. 370–418, Jan. 1763.

BOYD, D. ; CRAWFORD, K. Six provocations for big data. In: A DECADE IN TIME: SYMPOSIUM ON THE DYNAMICS OF THE INTERNET AND SOCIETY, 1., 2011, Oxford. **Proceedings...** Oxford: University of Oxford 2011.

BUONADONNA, P., et al. Active message communication for tiny networked sensors. In: ANNUAL JOINT CONFERENCE OF THE IEEE COMPUTER AND COMMUNICATIONS SOCIETIES, 20., 2001, Anchorage, AK. **Proceedings...** Los Alamitos: IEEE, 2001.

CAFFREY, J., et al. Networked sensing for structural health monitoring. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON STRUCTURAL CONTROL, 4., 2004, New York, NY. **Proceedings...** New York: Columbia University, 2004.

CAWLEY, P. ; ADAMS, R. The localization of defects in structures from measurements of natural frequencies. **Journal of Strain Analysis for Engineering Design**, London, v. 14, n. 2, p. 49–57, Apr. 1979.

CHANG, P., et al. Health monitoring of civil infrastructure. **Structural Health Monitoring**, London, v. 2, n. 3, p. 257-267, Sep. 2003.

CHEN, B. ; XU, Y. A new damage index for detecting sudden stiffness reduction. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON STRUCTURAL CONDITION ASSESSMENT, MONITORING AND IMPROVEMENT, 1., 2005, Perth, WA. **Proceedings...** Perth: University of Western Australia, 2005.

CHEN, M., et al. Dynamic object tracking tree in wireless sensor network. **EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking**, [s. l.], v. 2010, n., p. 1-8, Jun. 2010.

CHINTALAPUDI, K., et al. Monitoring civil structures with a wireless sensor network, **IEEE Internet Computing**, Los Alamitos, v. 10, n. 2, p. 26-34, Mar. 2006a.

CHINTALAPUDI, K., et al. Structural damage detection and localization using NetSHM. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION PROCESSING IN SENSOR NETWORKS, 5., 2006b, Nashville, TN. **Proceedings...** Los Alamitos: IEEE, Apr. 2006b.

CHO, S., et. al. Smart wireless sensor technology for structural health monitoring of civil structures. **International Journal of Steel Structures**, New York, v. 8, n. 4, p. 267-275, Nov. 2008.

CLAYTON, E., et al. Off-the-shelf modal analysis: structural health monitoring with motes. In: INTERNATIONAL MODAL ANALYSIS CONFERENCE, 24., 2006, St. Louis, MO. **Proceedings...** New York: Society for Experimental Mechanics, 2006.

CONTURSI, T., et al. A multiple-damage location assurance criterion based on natural frequency changes. **Journal of Vibration and Control**, London, v. 4, n. 5, p. 619-633, Sep. 1998.

CORRÊA, H., CORRÊA, C. **Administração de produção e operações**. São Paulo: Atlas, 2009. 692 p..

DASARATHY, B. Sensor fusion potential exploitation-innovative architectures and illustrative applications. **Proceedings of the IEEE**, Los Alamitos, v. 85, n. 1, p. 24-38, Jan. 1997.

DELICATO, F., et al. Challenges in the use of wireless sensor networks for monitoring the health of civil structures, In: SARBAZI-AZAD, H. ; ZOMAYA, A. **Large scale network-centric distributed systems**, London: Wiley-Blackwell, 2013, 760 p..

DEMIRKOL, I., et al. Mac protocols for wireless sensor networks: a survey. **IEEE Communications Magazine**, Los Alamitos, v. 44, n. 4, p. 115-121, Apr. 2006.

DOEBLING, S., et al. **Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: a literature review**. Los Alamos, NM, Los Alamos National Laboratory, 1996, 127 p. (LA-13070-MS).

DURRANT-WHYTE, H. **Integration, coordination and control of multi-sensor robot systems**. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1988. 236 p..

ELSON, J., et al. Fine-grained network time synchronization using reference broadcasts. In: SYMPOSIUM ON OPERATING SYSTEMS DESIGN AND IMPLEMENTATION, 5., 2002, Boston. **Proceedings...** New York: ACM, 2002.

FARRAR, C. ; DOEBLING, S. An overview of modal-based damage identification methods. In: STRUCTURAL DAMAGE ASSESSMENT USING ADVANCED SIGNAL PROCESSING PROCEDURES, 1., 1997, Sheffield. **Proceedings...** Sheffield: University of Sheffield, 1997.

FARRAR, C., et al. Vibration-based structural damage identification. **Philosophical Transactions of the Royal Society**, London, v. 359, n. 1778, p. 131-149, Jan. 2001.

FAYYAD, U., et al. **Advances in knowledge discovery and data mining**. Cambridge: The MIT Press, 1996. 625 p..

GANERIWAL, S., et al. Timing-sync protocol for sensor networks. In: CONFERENCE ON EMBEDDED NETWORKED SENSOR SYSTEMS, 1., 2003, Los Angeles. **Proceedings...** New York: ACM, 2003.

GAO, R. ; FAN, Z. Architectural design of a sensory-node-controller for optimized energy utilization in sensor networks. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, Los Alamitos, v. 55, n. 2, p. 415-428, Apr. 2006.

GAO, Y., et al. Distributed computing strategy for structural health monitoring. **Journal of Structural Control and Health Monitoring**, London, v. 13, n. 1, p. 488-507, Jan. 2006.

GETACHEW, M. ; MITIKU, D. Data processing algorithms in wireless sensor networks for structural health monitoring. 2011. 335 f. Thesis (Master of Science) -- Swedish Institute of Computer Science, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2011.

GNAWALI, O., et al. The tenet architecture for tiered sensor networks. In: CONFERENCE ON EMBEDDED NETWORKED SENSOR SYSTEMS, 4., 2006, Boulder. **Proceedings...** New York: ACM, 2006.

HATLER, M., et al. Industrial wireless sensor networks - a market dynamics report. San Diego: On World, 2010, 152 p..

HACKMANN, G., et al. A holistic approach to decentralized structural damage localization using wireless sensor networks. In: IEEE REAL-TIME SYSTEMS SYMPOSIUM, 29., 2008, Barcelona. **Proceedings...** Los Alamitos: IEEE, 2008.

HAMEED, Z., et al. Condition monitoring and fault detection of wind turbines and related algorithms. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 13, n. 1, p. 1-39, Jan. 2009.

HEINZELMAN, W., et al. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. In: HAWAII INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEM SCIENCES, 1., 2000, Island of Maui. **Proceedings...** Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2000.

HEINZELMAN, W., et al. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, Los Alamitos, v. 1, n. 4, p. 660-670, Oct. 2002.

HILL, J. A software architecture supporting networked sensors. 2000. 68 f. Thesis (Master of Science in Electrical Engineering and Computer Science) -- Department of Electrical Engineering and Computer Sciences, University of California, Berkeley, 2000.

HILL, J., et al. System architecture directions for networked sensors. In: CONFERENCE ON ARCHITECTURAL SUPPORT FOR PROGRAMMING LANGUAGES AND OPERATING SYSTEMS, 9., 2000, Cambridge. **Proceedings...** New York: ACM, 2000.

HUEBNER, K. **The finite element method for engineers**. London: John Wiley & Sons, 1975, 744 p..

JIN, Z. ; GUPTA, R. Improved distributed simulation of sensor networks based on sensor node sleep time. In: NIKOLETSEAS, S. E., et al. (eds.). **Distributed Computing in Sensor Systems**, 4th IEEE International Conference, Heidelberg: Springer, 2008, p. 204-218. (LNCS, v. 5067).

KIM, S., et al. Health monitoring of civil infrastructures using wireless sensor networks. In: INFORMATION PROCESSING IN SENSOR NETWORKS, 6., 2007, Cambridge. **Proceedings...** New York: ACM Press, 2007.

KRÄMER, M. ; GERALDY, A. Energy measurements for micaz node. In: GI/ITG KUVS FACHGESPRCH DRAHTLOSE SENSORNETZE, 5., 2006, Stuttgart. **Proceedings...** Stuttgart: Universitat Stuttgart 2006.

LANDSIEDEL, O., et al. Accurate prediction of power consumption in sensor networks. In: WORKSHOP ON EMBEDDED NETWORKED SENSORS, 2., 2005, Sydney. **Proceedings...** Los Alamitos: IEEE, 2005.

LEMOS, E., et al. Algoritmo distribuído para detecção de dano em aerogeradores utilizando redes de atuadores e sensores sem fio. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE REDES DE COMPUTADORES E SISTEMAS DISTRIBUÍDOS, 29., 2011, Campo Grande. **Anais...** Porto Alegre: SBC, 2011.

LEVIS, P. ; GAY, D. **Tinyos programming**. Cambridge: Cambridge University Press, 2009, 282 p..

LIU, T., et al. Implementing software on resource-constrained mobile sensors: experiences with impala and zebranet. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MOBILE SYSTEMS, APPLICATIONS, AND SERVICES, 2., 2004, Boston. **Proceedings...** New York: ACM, 2004.

MAINWARING, A., et al. Wireless sensor networks for habitat monitoring. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON WIRELESS SENSOR NETWORKS AND APPLICATIONS, 1., 2002, Atlanta. **Proceedings...** New York: ACM, 2002.

MAROTI, M., et al. The flooding time synchronization protocol. In: CONFERENCE ON EMBEDDED NETWORKED SENSOR SYSTEMS, 2., 2004, Baltimore. **Proceedings...** New York: ACM, 2004.

MEGUERDICHIAN, S., et al. Localized algorithms in wireless ad-hoc networks: location discovery and sensor exposure. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MOBILE AD HOC NETWORKING AND COMPUTING, 2., 2001, New York. **Proceedings...** New York: ACM Press, 2001.

MEMSIC Micaz datasheet, Milpitas, CA, 2013. Disponível em: [www.memsic.com](http://www.memsic.com). Acesso em: 20 out. 2013.

MESSINA, A., et al. Damage detection and localization using natural frequency changes. In: CONFERENCE ON IDENTIFICATION IN ENGINEERING SYSTEMS, 1., 1996, Swansea. **Proceedings...** Swansea: University of Wales Swansea, 1996.

NAKAMURA, E., et al. Information fusion for wireless sensor networks: methods, models, and classifications. **ACM Computing Surveys**, New York, v. 39, n. 3, p. 9/1-9/55, Sep. 2007.

NEŠIĆ, S. Key issues related to modelling of internal corrosion of oil and gas pipelines – a review. **Corrosion Science**, New York, v. 49, n. 12, p. 4308-4338, Dec. 2007.

NIST **Nist framework and roadmap for smart grid interoperability standards v 2.0**. Gaithersburg, MD, National Institute of Standards and Technology, 2012, 145 p. (NIST Special Publication 1108R2).

ORACLE, 2010. Disponível em: <http://www.oracle.com>. Acesso em: 22 out. 2013.

PAEK, J., et al. A wireless sensor network for structural health monitoring: performance and experience. In: WORKSHOP ON EMBEDDED NETWORKED SENSORS, 2., 2005, Sydney. **Proceedings...** Los Alamitos: IEEE, 2005.

PARK, C., et al. Aggressive data reduction for damage detection in structural health monitoring. **Structural Health Monitoring**, London, v. 9, n. 1, p. 59-74, Jan. 2010.

RAJAGOPALAN, R. ; VARSHNEY, P. Data aggregation techniques in sensor networks: a survey. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, Los Alamitos, v. 8, n. 4, p. 48-63, Out. 2006.

ROCHA, A. Um middleware semântico para redes de sensores sem fio autônômicas. 2012. 103 f. Tese (Doutorado em Informática) -- Departamento de Engenharia de Teleinformática, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

ROCHA, A., et al. Wsns clustering based on semantic neighborhood relationships. **Computer Networks**, Amsterdam, v. 56, n. 5, p. 1627-1645, Mar. 2012.

ROCHA, A., et al. Semantic clustering in wireless sensor networks In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIRELESS COMMUNICATIONS AND INFORMATION

TECHNOLOGY IN DEVELOPING COUNTRIES, 3., 2010, Brisbane. **Proceedings...** Boston: Springer, 2010.

ROUNDY, S. ; FRECHETTE, L. Energy scavenging and nontraditional power sources for wireless sensor networks. In: STOJMENOVIC, I. **Handbook of Sensor Networks, Algorithms and Architectures**, London: Wiley Interscience, 2005, 552 p..

SANTOS, I., et al. A localized algorithm for structural health monitoring using wireless sensor networks. **Information Fusion**, New York, v. 15, n., p. 114-129, Jan. 2014.

SANTOS, I., et al. Garantindo a eficiência energética em aplicações de qualidade da energia elétrica em smart grids através de um framework baseado em redes de atuadores e sensores sem fio. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE COMPUTAÇÃO, 33., 2013, Maceió. **Anais...** Porto Alegre: SBC, 2013.

SANTOS, I., et al. Resource consumption analysis for a structural health monitoring algorithm using wireless sensor networks. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE REDES DE COMPUTADORES E SISTEMAS DISTRIBUÍDOS, 28., 2010, Gramado. **Anais...** Porto Alegre: SBC, 2010.

SHNAYDER, V., et al. **Sensor networks for medical care**. Cambridge, MA, Division of Engineering and Applied Sciences, Harvard University, 2005, 14 p. (Technical Report TR-08-05).

SOHN, H., et al. **A review of structural health monitoring literature: 1996–2001**. Los Alamos, NM, Los Alamos National Laboratory, 2004, 301 p. (LA-13976-MS).

TITZER, B., et al. Avrora: scalable sensor network simulation with precise timing. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INFORMATION PROCESSING IN SENSOR NETWORKS, 4., 2005, Piscataway. **Proceedings...** New York: ACM, 2005.

WALFORD, C. ; ROBERTS, D. **Condition monitoring of wind turbines: technology overview, seeded-fault testing, and cost-benefit analysis**. Palo Alto, CA, Electric Power Research Institute, 2006, 110 p. (Technical Report 1010419).

WANG, M., et al. Distributed processing in wireless sensor networks for structural health monitoring. In: INDULSKA, J., et al. (eds.). *Ubiquitous Intelligence and Computing*, 4th International Conference, Heidelberg: Springer, 2007, p. 103-112. (LNCS, v. 4611).

WENTZLOFF, D., et al. Design considerations for next generation wireless power-aware microsensor nodes. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON VLSI DESIGN, 17., 2004, Mumbai. **Proceedings...** Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2004.

WERNER-ALLEN, G., et al. Fidelity and yield in a volcano monitoring sensor network. In: SYMPOSIUM ON OPERATING SYSTEMS DESIGN AND IMPLEMENTATION, 7., 2006, Seattle. **Proceedings...** New York: ACM, 2006.

WHITE, F. **Data fusion lexicon**. San Diego, CA, U.S. Department of Defense, 1991, 15 p. (Report ADA529661)

XU, N., et al. A wireless sensor network for structural monitoring. In: CONFERENCE ON EMBEDDED NETWORKED SENSOR SYSTEMS, 2., 2004, Baltimore. **Proceedings...** New York: ACM, 2004.

YE, M., et al. Eecs: an energy efficient clustering scheme in wireless sensor networks. In: PERFORMANCE, COMPUTING, AND COMMUNICATIONS CONFERENCE, 24., 2005, Sorrento. **Proceedings...** Los Alamitos: IEEE, 2005.

YEH, C. Dynamic reconfiguration techniques for wireless sensor networks. 2008. 84 f. Thesis (Master of Science in Mechanical Engineering) -- Mechanical and Industrial Engineering Department, University of Massachusetts, Amherst, 2008.

2012. 103 f. Tese (Doutorado em Informática) -- Departamento de Engenharia de Teleinformática, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

YICK, J., et al. Wireless sensor network survey. **Computer Networks**, Amsterdam, v. 52, n. 12, p. 2292-2330, Aug. 2008.

YOUNIS, O. ; FAHMY, S. Heed: a hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks. **IEEE Transactions on Mobile Computing**, Los Alamitos, v. 3, n. 4, p. 366-379, Oct. 2004.

YUAN, F., et al. Recent progress on distributed structural health monitoring research at nuaa. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, London, v. 19, n. 3, p. 373-386, Mar. 2008.

