

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**PROPOSTA DE GERENCIAMENTO DE  
DADOS PARA MONITORAMENTO DE  
SAÚDE ESTRUTURAL UTILIZANDO REDES  
DE SENSORES ÓPTICOS FBG**

ADAM DREYTON FERREIRA DOS SANTOS

DM 10/2014

UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil

2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ADAM DREYTON FERREIRA DOS SANTOS

**PROPOSTA DE GERENCIAMENTO DE  
DADOS PARA MONITORAMENTO DE  
SAÚDE ESTRUTURAL UTILIZANDO REDES  
DE SENSORES ÓPTICOS FBG**

DM 10/2014

UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil

2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ADAM DREYTON FERREIRA DOS SANTOS

**PROPOSTA DE GERENCIAMENTO DE DADOS PARA  
MONITORAMENTO DE SAÚDE ESTRUTURAL  
UTILIZANDO REDES DE SENSORES ÓPTICOS FBG**

Dissertação submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPA para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica na área de Telecomunicações.

Orientador: João Crisóstomo Weyl Albuquerque Costa

Coorientador: Claudomiro de Souza de Sales Junior

UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil

2014

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

---

Santos, Adam Dreyton Ferreira dos, 1989-  
Proposta de gerenciamento de dados para  
monitoramento de saúde estrutural utilizando  
redes de sensores ópticos fbg / Adam Dreyton  
Ferreira dos Santos. - 2014.

Orientador: João Crisóstomo Weyl  
Albuquerque Costa;

Coorientador: Claudomiro de Souza de Sales  
Junior.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal  
do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belém,  
2014.

1. Processamento eletrônico de dados em tempo  
real - testes. 2. Redes de sensores. 3.  
Detectores. I. Título.

CDD 22. ed. 004.33

---

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

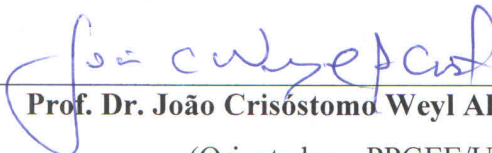
**“PROPOSTA DE GERENCIAMENTO DE DADOS PARA MONITORAMENTO DE SAÚDE  
ESTRUTURAL UTILIZANDO REDES DE SENSORES ÓPTICOS FBG”**

**AUTOR: ADAM DREYTON FERREIRA DOS SANTOS >**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO  
COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, SENDO  
JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA  
ELÉTRICA NA ÁREA DE TELECOMUNICAÇÕES.

APROVADA EM: 09/06/2014

**BANCA EXAMINADORA:**

  
\_\_\_\_\_

**Prof. Dr. João Crisóstomo Weyl Albuquerque Costa**

(Orientador – PPGEE/UFPA)

  
\_\_\_\_\_

**Prof. Dr. Claudomiro de Souza de Sales Junior**

(Co-Orientador – PPGCC/UFPA)

  
\_\_\_\_\_

**Prof. Dr. Eduardo Coelho Cerqueira**

(Avaliador Interno – PPGEE/UFPA)

  
\_\_\_\_\_

**Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Regina Augusta Campos Sampaio**

(Avaliadora Externa ao Programa – PPGEC/UFPA)

**VISTO:**

\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Evaldo Gonçalves Pelaes**

(Coordenador do PPGEE/ITEC/UFPA)

# Agradecimentos

Agradeço a Deus.

Agradeço à minha família pelo carinho e apoio dispensados durante todo o curso de Mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará.

Agradeço à minha namorada Cindy Stella Fernandes por todo o amor e companheirismo dedicados para comigo durante todos os momentos desta caminhada que se torna menos difícil por conta da sua presença na minha vida.

Agradeço especialmente ao professor Dr. João Crisóstomo Weyl Albuquerque Costa, pela imensa paciência, orientação, inspiração e pelo conhecimento repassado.

Agradeço aos professores Dr. Claudomiro de Souza de Sales Junior, Dr. Marco José de Sousa e Dr. Aldebaro Barreto da Rocha Klautau Junior, pela amizade e pela enriquecedora experiência oferecida no Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado (LEA)<sup>1</sup> em mais de dois anos de pesquisas e crescimento profissional.

Agradeço aos professores Dr. Eduardo Coelho Cerqueira e Dr<sup>a</sup>. Regina Augusta Campos Sampaio pelas inúmeras contribuições neste trabalho no dia da defesa.

Agradeço pela amizade e por todas as contribuições dos meus amigos do LEA: Moisés Silva, Renan Almeida, Renan Santos, Nayanne Moritsuka, Janane Nunes, Ramon Pantoja, Dércio Mathe, Vinicius Lima, Roberto Menezes, Gilvan Borges, Alexandre Freitas, Walisson Gomes, Wederson Silva, Fabrício Lobato, Adriana Rosa, Lilian Freitas, Lamartine Souza, Clenilson Silveira, Angela Brigida e Anderson Silva.

Agradeço ao financiamento deste trabalho por parte da Vale<sup>2</sup>, Fapespa<sup>3</sup>, CNPq<sup>4</sup> e CAPES<sup>5</sup>.

---

<sup>1</sup><http://www.lea.ufpa.br>

<sup>2</sup><http://www.vale.com/>

<sup>3</sup><http://www.fapespa.pa.gov.br/>

<sup>4</sup><http://www.cnpq.br/>

<sup>5</sup><http://capes.gov.br/>

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Trabalhos relacionados . . . . .	2
1.2	Motivações . . . . .	4
1.3	Objetivos e contribuições . . . . .	7
1.4	Organização da Dissertação . . . . .	8
<b>2</b>	<b>Introdução ao monitoramento de saúde estrutural</b>	<b>9</b>
2.1	Noções básicas . . . . .	9
2.1.1	Necessidades de monitoramento e benefícios . . . . .	11
2.1.2	Monitoramento durante a vida útil da estrutura . . . . .	11
2.2	O processo de monitoramento de saúde estrutural . . . . .	13
2.2.1	Principais atividades . . . . .	13
2.2.2	Atores . . . . .	20
2.3	Introdução à tecnologia de sensores ópticos . . . . .	21
2.3.1	Sensores ópticos FBG . . . . .	26
<b>3</b>	<b>Metodologia proposta</b>	<b>29</b>
3.1	Divisão de responsabilidades entre os <i>softwares</i> . . . . .	29
3.2	Análise e projeto de <i>software</i> . . . . .	29
3.3	Modelagem do <i>software</i> InterAB . . . . .	30
3.3.1	Objetivo de desenvolvimento . . . . .	30
3.3.2	Levantamento de requisitos . . . . .	31
3.3.3	Modelagem estática . . . . .	32
3.3.4	Modelagem dinâmica . . . . .	34
3.4	Modelagem do <i>software</i> WbS . . . . .	37
3.4.1	Objetivo de desenvolvimento . . . . .	37
3.4.2	Levantamento de requisitos . . . . .	38
3.4.3	Modelagem estática . . . . .	39
3.4.4	Modelagem dinâmica . . . . .	40
3.5	Projeto físico de banco de dados . . . . .	44
3.5.1	Mapeamento Objeto-Relacional . . . . .	44
3.5.2	Modelo físico . . . . .	46
3.5.3	Integração dos <i>softwares</i> através do banco de dados . . . . .	47
3.6	Técnicas de filtragem e compressão de dados . . . . .	49
3.6.1	Variação no comprimento de onda . . . . .	49
3.6.2	Atividade . . . . .	50

3.6.3	<i>Piecewise Constant Approximation</i> . . . . .	51
3.6.4	<i>Adaptive Piecewise Constant Approximation</i> . . . . .	52
3.6.5	<i>PieceWise Linear Histogram</i> . . . . .	53
3.7	Detecção de anomalias . . . . .	54
3.7.1	Motor de inferências Fuzzy . . . . .	54
3.7.2	Algoritmo baseado em distribuição gaussiana multivariada . . . . .	57
<b>4</b>	<b>Resultados</b>	<b>60</b>
4.1	Primeiro cenário . . . . .	60
4.1.1	Filtragem de dados por variação no comprimento de onda . . . . .	62
4.1.2	Compressão de dados usando PCA, APCA e PWLH . . . . .	63
4.1.3	Filtragem de dados por atividade . . . . .	66
4.1.4	Exportação e visualização de dados . . . . .	68
4.2	Segundo cenário . . . . .	70
4.2.1	Detecção de anomalias através do MIF . . . . .	75
4.2.2	Detecção de anomalias através do algoritmo baseado em MGD . . . . .	79
<b>5</b>	<b>Considerações finais e trabalhos futuros</b>	<b>81</b>
	<b>Referências</b>	<b>84</b>



# Lista de ilustrações

Figura 1	Receita no mercado e previsões de sensores pontuais vs. sensores distribuídos, 2002-2020. . . . .	5
Figura 2	Principais mercados de sensores ópticos distribuídos (escala logarítmica), 2002-2020. . . . .	5
Figura 3	Analogia entre o corpo humano e uma estrutura. . . . .	10
Figura 4	Métodos de coleta de dados. . . . .	18
Figura 5	Possíveis métodos de armazenamento e acesso aos dados. . . . .	19
Figura 6	Interação entre as principais atividades e os atores do monitoramento. . . . .	21
Figura 7	Classificação da tecnologia de sensores ópticos. . . . .	25
Figura 8	Princípio funcional de sensores ópticos FBG. . . . .	27
Figura 9	Multiplexação de sensores ópticos FBG. . . . .	28
Figura 10	Funcionamento geral do <i>software</i> InterAB. . . . .	31
Figura 11	Diagrama de classes do <i>software</i> InterAB. . . . .	32
Figura 12	Diagrama de atividades geral do <i>software</i> InterAB. . . . .	35
Figura 13	Diagrama de atividades específico do <i>software</i> InterAB. . . . .	36
Figura 14	Funcionamento geral do <i>software</i> WbS. . . . .	37
Figura 15	Diagrama de classes do <i>software</i> WbS. . . . .	39
Figura 16	Diagrama de sequência MVC para o WbS: criar, salvar, alterar ou excluir interrogador. . . . .	41
Figura 17	Diagrama de atividades para a funcionalidade de exportação. . . . .	42
Figura 18	Diagrama de atividades para a funcionalidade de visualização. . . . .	43
Figura 19	Diagrama de atividades para a funcionalidade de avisos e alarmes. . . . .	43
Figura 20	Diagrama de classes para exemplificar o padrão DAO. . . . .	46
Figura 21	Modelo físico do banco de dados. . . . .	47
Figura 22	Integração dos <i>softwares</i> . . . . .	48
Figura 23	Método de compressão de dados PCA. . . . .	51
Figura 24	Método de compressão de dados APCA. . . . .	52
Figura 25	Método de compressão de dados PWLH. . . . .	53
Figura 26	Estrutura genérica de um MIF. . . . .	55
Figura 27	Exemplo de fuzzyficação e defuzzyficação. . . . .	57
Figura 28	Exemplo de sinais de sensores de deformação e temperatura aproximados por UGDs . . . . .	58

Figura 29	Configuração do primeiro cenário. . . . .	60
Figura 30	Topologia da rede de sensores reconhecida e persistida pelo InterAB. . .	61
Figura 31	Filtragem de sinal de temperatura por variação no comprimento de onda. . .	62
Figura 32	Compressão de sinal de temperatura por PCA, APCA e PWLH. . . . .	63
Figura 33	Avaliação da taxa de compressão para o sinal do sensor GPTSO_1. . . . .	65
Figura 34	Avaliação do erro de aproximação para o sinal do sensor GPTSO_1. . . . .	65
Figura 35	Filtragem de sinal de aceleração por atividade. . . . .	66
Figura 36	Filtragem de sinal de deformação por atividade. . . . .	67
Figura 37	Exportação de dados dos sensores pelo WbS. . . . .	68
Figura 38	Visualização de dados dos sensores pelo WbS. . . . .	69
Figura 39	Configuração do segundo cenário. . . . .	70
Figura 40	Esquema de localização dos sensores na estrutura. . . . .	71
Figura 41	Ponte de pedestres e exemplos de sensores instalados. . . . .	72
Figura 42	Sinais de dois acelerômetros durante os testes de carga na ponte. . . . .	73
Figura 43	Sinais de dois extensômetros durante os testes de carga na ponte. . . . .	74
Figura 44	Sinais de dois sensores de temperatura durante os testes de carga na ponte. . . . .	74
Figura 45	Configuração do MIF no WbS. . . . .	75
Figura 46	Fuzzyficação, defuzzyficação e modelo Fuzzy do segundo cenário. . . . .	77
Figura 47	Modelo Fuzzy obtido a partir da configuração. . . . .	77
Figura 48	Avaliação dos sinais de acelerômetros e extensômetros pelo MIF. . . . .	78
Figura 49	Contorno da MGD no conjunto de dados de treinamento/teste. . . . .	79
Figura 50	Anomalias detectadas pelo algoritmo baseado em MGD. . . . .	80

## Lista de tabelas

Tabela 1	Os parâmetros mais frequentemente monitorados. . . . .	9
Tabela 2	Estrutura de divisão das principais atividades de monitoramento. . . .	14
Tabela 3	Síntese dos tipos de sensores ópticos e seus desempenhos típicos. . . . .	25
Tabela 4	Crescimento linear da quantidade de registros no banco de dados. . . .	49
Tabela 5	Especificações do interrogador óptico utilizado no primeiro cenário. . .	61
Tabela 6	Especificações dos sensores ópticos utilizados no primeiro cenário. . . .	61
Tabela 7	Especificações do interrogador óptico utilizado no segundo cenário. . .	71
Tabela 8	Especificações dos sensores ópticos utilizados no segundo cenário. . . .	71
Tabela 9	Banda e comprimento de onda dos sensores utilizados no segundo cenário.	72

# Lista de abreviaturas e siglas

ACC	Acceleration Sensor
APCA	Adaptive Piecewise Constant Approximation
API	Application Programming Interface
AANN	Auto-Associative Neural Network
CHEB	Chebyshev Approximation
CSS	Composite Strain Sensor
CAGR	Compound Annual Growth Rate
CRUD	Create, Read, Update and Delete
DAO	Data Access Object
DAQ	Data acquisition
FBG	Fiber Bragg gratings
FCL	Fuzzy Control Language
GPTSO	General Purpose Temperature Sensor Outdoor
IEC	International Electrotechnical Commission
InterAB	Interrogator Abstraction
JDBC	Java Database Connectivity
MSD	Mahalanobis Squared Distance
MVC	Model-View-Controller
MIF	Motor de inferências Fuzzy
MGD	Multivariate Gaussian Distribution
NPCA	Nonlinear Principal Component Analysis
UGD	Univariate Gaussian Distribution

ORM	Object Relational Mapping
OIDA	Optoelectronics Industry Development Association
PCA	Piecewise Constant Approximation
PCA*	Principal Component Analysis
PWLH	PieceWise Linear Histogram
RMSE	Root Mean Square Error
SM	Single Mode
SF	Slide Filters
SVD	Singular Value Decomposition
SGBD	Sistema Gerenciador de Banco de Dados
SRF	Sistemas baseados em regras Fuzzy
SHM	Structural Health Monitoring
SQL	Structured Query Language
UML	Unified Modeling Language
WbS	Web-based System
WSS	Weldable Strain Sensor
WTS	Weldable Temperature Sensor
WSN	Wireless Sensor Networks
XHTML	EXtensible HyperText Markup Language
XML	EXtensible Markup Language

# Resumo

Devido às suas características únicas, redes de sensores ópticos têm encontrado aplicação em muitos campos, como em Engenharia Civil, Engenharia Geotécnica, Aeronáutica, Energia e Indústrias de Petróleo & Gás. Soluções de monitoramento baseadas nessa tecnologia têm se mostrado particularmente rentáveis e podem ser aplicadas às estruturas de grande porte, onde centenas de sensores devem ser implantados para medições a longo prazo de diferentes parâmetros mecânicos e físicos. Sensores baseados em Grades de Bragg em fibra (FBGs) são a solução mais comumente utilizada no Monitoramento de Saúde Estrutural (SHM) e as medições são realizadas por instrumentos especiais conhecidos como interrogadores ópticos. Taxas de aquisição cada vez mais elevadas têm sido possíveis utilizando interrogadores ópticos mais recentes, o que dá origem a um grande volume de dados cuja manipulação, armazenamento, gerenciamento e visualização podem demandar aplicações de *software* especiais. Este trabalho apresenta duas aplicações de *software* de tempo real desenvolvidas para esses fins: Interrogator Abstraction (InterAB) e Web-based System (WbS). As inovações neste trabalho incluem a integração, sincronização, independência, segurança, processamento e visualização em tempo real, e persistência de dados ou armazenamento proporcionados pelo trabalho conjunto das aplicações desenvolvidas. Os resultados obtidos durante testes em laboratório e ambiente real demonstraram a eficiência, robustez e flexibilidade desses *softwares* para diferentes tipos de sensores e interrogadores ópticos, garantindo atomicidade, consistência, isolamento e durabilidade dos dados persistidos pelo InterAB e apresentados pelo WbS.

**Palavras-chave:** Monitoramento de saúde estrutural, Redes de sensores ópticos, Gerenciamento de dados.

# Abstract

Due to their unique characteristics, optical sensor networks have found application in many fields, such as in Civil and Geotechnical Engineering, Aeronautics, Energy and Oil & Gas Industries. Monitoring solutions based on this technology have proven particularly cost effective and can be applied to large scale structures where hundreds of sensors must be deployed for long term measurement of different mechanical and physical parameters. Sensors based on Fiber Bragg gratings (FBGs) are the most common solution used in Structural Health Monitoring (SHM) and the measurements are performed by special instruments known as optical interrogators. Acquisition rates increasingly higher have been possible using the latest optical interrogators, which gives rise to a large volume of data whose manipulation, storage, management and visualization can demand special software applications. This work presents two real-time software applications developed for these purposes: Interrogator Abstraction (InterAB) and Web-based System (WbS). The innovations in this work include the integration, synchronization, independence, security, processing and real-time visualization, and data persistence or storage provided by joint work of developed applications. The results obtained during tests in laboratory and real environment demonstrate the efficiency, robustness and flexibility of these softwares for different types of sensors and optical interrogators, ensuring atomicity, consistency, isolation and durability of data persisted by InterAB and displayed by WbS.

**Keywords:** Structural Health Monitoring, Optical Sensor Networks, Data Management.

# 1 Introdução

Estruturas civis e industriais são onipresentes em todas as sociedades, independentemente da cultura, localização geográfica e desenvolvimento econômico. É difícil imaginar uma sociedade sem edifícios, estradas, ferrovias, pontes, túneis, barragens e usinas de energia. As estruturas afetam aspectos humanos, sociais, ecológicos, econômicos, culturais e estéticos das sociedades. As atividades associadas às estruturas contribuem consideravelmente para o produto interno bruto. Portanto, um bom projeto, qualidade e durabilidade na construção, e a exploração segura de estruturas são metas da Engenharia Estrutural.

O mau funcionamento de estruturas civis muitas vezes tem consequências graves. O mais grave é um acidente envolvendo vítimas humanas. Mesmo quando não há nenhuma perda de vida, as populações sofrem se a infraestrutura é comprometida parcialmente ou completamente. O colapso de certas estruturas, tais como usinas de energia nuclear ou oleodutos, pode provocar severa poluição ecológica. O impacto econômico da deficiência estrutural é duplo: direto e indireto. O impacto direto é refletido por custos de reconstrução, ao passo que o impacto indireto envolve perdas nos outros ramos da economia. O colapso total de monumentos históricos, como pontes antigas e catedrais, representa uma perda cultural irreparável para a sociedade.

As estruturas mais seguras e duráveis são aquelas que são bem gerenciadas. Medição e monitoramento muitas vezes têm papéis essenciais nas atividades de gerenciamento. Os dados resultantes de um processo de monitoramento estrutural são utilizados para otimizar a operação, manutenção, reparação e substituição da estrutura com base em dados confiáveis e objetivos.

O monitoramento de saúde estrutural (*Structural Health Monitoring* - SHM) é um processo que visa proporcionar informações precisas e em tempo real sobre a condição e desempenho estrutural. Trata-se de uma gravação contínua permanente, periódica ou periodicamente contínua de parâmetros representativos em curto ou longo prazo (GLISIC; INAUDI, 2007). As informações obtidas a partir do monitoramento são geralmente usadas para planejar e projetar atividades de manutenção, aumentar a segurança, verificar hipóteses, reduzir a incerteza e para ampliar o conhecimento sobre a estrutura que está sendo monitorada (STEPINSKI; UHL; STASZEWSKI, 2013). Apesar de sua importância, o processo de SHM ainda não é muito difundido. Frequentemente as etapas do SHM são consideradas como atividades periféricas que não requerem um planejamento detalhado (FARRAR; WORDEN, 2013). Os fatos discutidos anteriormente demonstram o contrário. O processo de monitoramento é um processo muito complexo, cheio de fases delicadas, e



apenas um adequado e detalhado planejamento de cada um dos seus passos pode levar ao seu sucesso e máximo desempenho.

As principais atividades do processo de monitoramento estrutural são (GLISIC; INAUDI, 2007): seleção da estratégia de monitoramento, instalação do sistema de monitoramento, manutenção do sistema de monitoramento, gerenciamento de dados e atividades de encerramento no caso de interrupção do monitoramento. Cada uma dessas atividades pode ser dividida em subatividades. Em particular, a atividade de gerenciamento de dados é dividida em execução de medições (leituras dos sensores), armazenamento de dados (local ou remoto), fornecer acesso aos dados, visualização e exportação dos dados, interpretação e análise dos dados, e uso dos dados (avisos e alarmes).

Nesse contexto, este trabalho tem como foco uma proposta de desenvolvimento de aplicações capazes de realizar todas as subatividades da atividade de gerenciamento de dados do processo de monitoramento de saúde estrutural utilizando as redes de sensores ópticos baseados em grades de Bragg em fibra (*Fiber Bragg gratings* - FBG).

## 1.1 Trabalhos relacionados

Em um passado recente, a pesquisa na área de monitoramento através de redes de sensores tinha como foco principal as restrições de projeto do sistema sensor e da rede de comunicação em geral. Entretanto, atualmente, as novas aplicações estão cada vez mais requerendo aquisição, processamento, gerenciamento, visualização e análise de dados com restrições temporais em suas tarefas. Um dos novos desafios enfrentados no monitoramento é lidar com o armazenamento e a consulta ou recuperação de dados em tempo real.

O *hardware*, a rede e o sistema operacional de redes de sensores amadureceram a tal ponto que os principais desafios enfrentados por essa área de pesquisa agora estão relacionados com o armazenamento, limpeza (ou pré-processamento), consulta, visualização e análise dos dados que essas redes produzem (MADDEN, 2010).

Na revisão realizada por (DIALLO; RODRIGUES; SENE, 2012) são destacadas duas principais abordagens de armazenamento, gerenciamento e recuperação de dados em redes de sensores sem fio (*Wireless Sensor Networks* - WSN): *datawarehousing* e distribuída. A abordagem *datawarehouse* armazena os dados em um banco de dados centralizado e então consultas podem ser realizadas nessa base de dados. Na abordagem distribuída, os dispositivos sensores são considerados como bancos de dados locais e os dados são gerenciados localmente.

A abordagem *datawarehouse* foi utilizada em (COSTA; CUGNASCA, 2010) e (DONG et al., 2012) como uma alternativa para o gerenciamento de dados coletados

por uma WSN que realiza o monitoramento em determinado ambiente real. Essa abordagem, que é caracterizada como desnormalizada, favorece os relatórios, a análise de grandes volumes de dados e a obtenção de informações estratégicas que podem facilitar a tomada de decisão. Tal metodologia emprega o conceito de séries históricas, as quais possibilitam uma melhor análise de eventos passados, oferecendo suporte às tomadas de decisões presentes e a previsão de eventos futuros. Por definição, os dados em um *datawarehouse* não são voláteis, ou seja, eles não mudam, salvo quando se faz necessário realizar correções de dados previamente carregados. Os dados estão disponíveis somente para leitura e não podem ser alterados.

O paradigma distribuído foi utilizado em (THURASINGHAM, 2004), (MORREALE; SULESKI, 2009), (VAIDEHI; DEVI, 2011), (GONCALVES; SANTOS; HARA, 2012) e (LI; CHEN, 2013) com o objetivo de reduzir o consumo de energia de nós sensores em WSN, avaliando diferentes aspectos e limiares para determinar a frequência na qual um sensor atualiza suas leituras no seu repositório ou banco de dados local.

Além dos modelos *datawarehousing* e distribuído aplicados no armazenamento e gerenciamento de dados em WSN, existe uma diversidade de aplicações de *software* na literatura que englobam algumas atividades do gerenciamento de dados. Em (KAWASHIMA, 2008), (MORREALE; SULESKI, 2009), (SON et al., 2010) e (LI; CHEN, 2013) são propostas ferramentas de *software* para WSN que integram a coleta de dados, processamento, visualização e gerenciamento da rede em um único sistema.

Nota-se, portanto, que não existem aplicações de *software* na literatura que realizem a atividade de gerenciamento de dados completa (incluindo todas as subatividades destacadas anteriormente) em redes de sensores ópticos em qualquer área, como estruturas, redes de energia, aeronáutica e outras. Os *softwares* disponíveis comercialmente são proprietários, sem qualquer compatibilidade com outros sistemas ou fabricantes e geralmente são baseados em formatos de dados privados. Cada empresa planeja e projeta sistemas de *software* para uso específico de seus dispositivos de monitoramento e que não podem ser adaptados, explorados, padronizados ou estendidos de forma a trabalharem com dispositivos de fabricantes diferentes. Por exemplo, os fabricantes FiberSensing (FIBERSENSING, 2014) e MicronOptics (MICRONOPTICS, 2014) oferecem os *softwares* BraggMonitor FS9000 e Sensing Analysis Software, respectivamente.

Os *softwares* BraggMonitor FS9000 e Sensing Analysis Software, apesar de implementarem algumas subatividades do gerenciamento de dados, não possuem uma abordagem padronizada que trabalhe com banco de dados (*datawarehousing* ou distribuído) para o armazenamento das leituras dos sensores ópticos e das configurações da rede. Até o momento, não há uma solução de *software* comercial ou aberta para SHM capaz de gerenciar dados de diferentes tecnologias e interrogadores ópticos.

## 1.2 Motivações

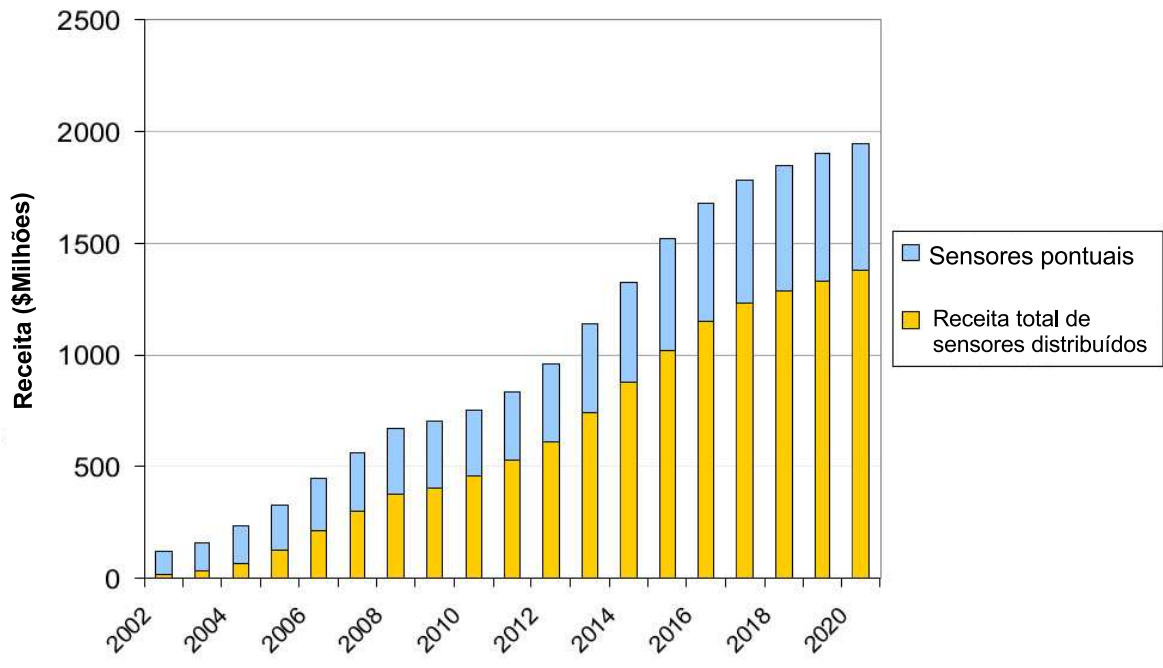
Como discutido anteriormente, não existem aplicações de *software* na literatura que realizem a atividade de gerenciamento de dados em redes de sensores ópticos de maneira padronizada no âmbito do SHM. Esse fato passou a ser, então, a primeira motivação de caráter científico para o desenvolvimento do presente trabalho.

O SHM é uma técnica que emprega a supervisão contínua, em tempo real, para estabelecer a condição de regiões críticas das estruturas. É uma ferramenta empregada para detectar alterações na integridade de componentes técnicos em uma ampla gama de aplicações, como dutos de petróleo, pontes e fuselagens de aviões (LOPEZ-HIGUERA et al., 2011). Por exemplo, temos sistemas que monitoram continuamente as rodas de trens para indicar o surgimento de defeitos que poderiam causar graves acidentes. Deve-se considerar que o processo de SHM envolve a observação a longo prazo utilizando: medições de respostas estáticas e dinâmicas periodicamente amostradas a partir de uma rede de sensores, a extração de características sensíveis a danos a partir dessas medições e a análise estatística dessas características para determinar o estado atual de saúde da estrutura. As redes de sensores ópticos são muito bem adaptadas para corresponder às exigências técnicas de sistemas SHM.

Como as redes de sensores ópticos são elementos fundamentais para o SHM, algumas motivações para este trabalho advêm do seu mercado futuro. De acordo com os estudos da OIDA (*Optoelectronics Industry Development Association*) (OIDA, 2009), o mercado de sensores ópticos deve crescer fortemente ao longo da década 2009-2020, com uma taxa de crescimento anual composta (*Compound Annual Growth Rate - CAGR*) de 9,8% e atingindo um faturamento de US\$ 1,95 bilhões em 2020. Como mostrado na Figura 1, a fatia desse mercado de sensores global pode ser considerada composta por sensores ópticos pontuais e distribuídos (inclusive os quasi-distribuídos). O mercado de sensores distribuídos cresceu 40% e teve US\$ 302 milhões de receita em 2007, e crescimento de 26% com a receita de US\$ 382 milhões em 2008. A previsão para sensores ópticos distribuídos ao longo da próxima década é forte e consegue uma CAGR de 11,8% durante 2009-2020 com faturamento próximo de US\$ 1,4 bilhões. A taxa de crescimento do mercado declina no final da década e reduz-se a uma CAGR de 6,2% em 2015-2020, mas ainda com um crescimento significativo.

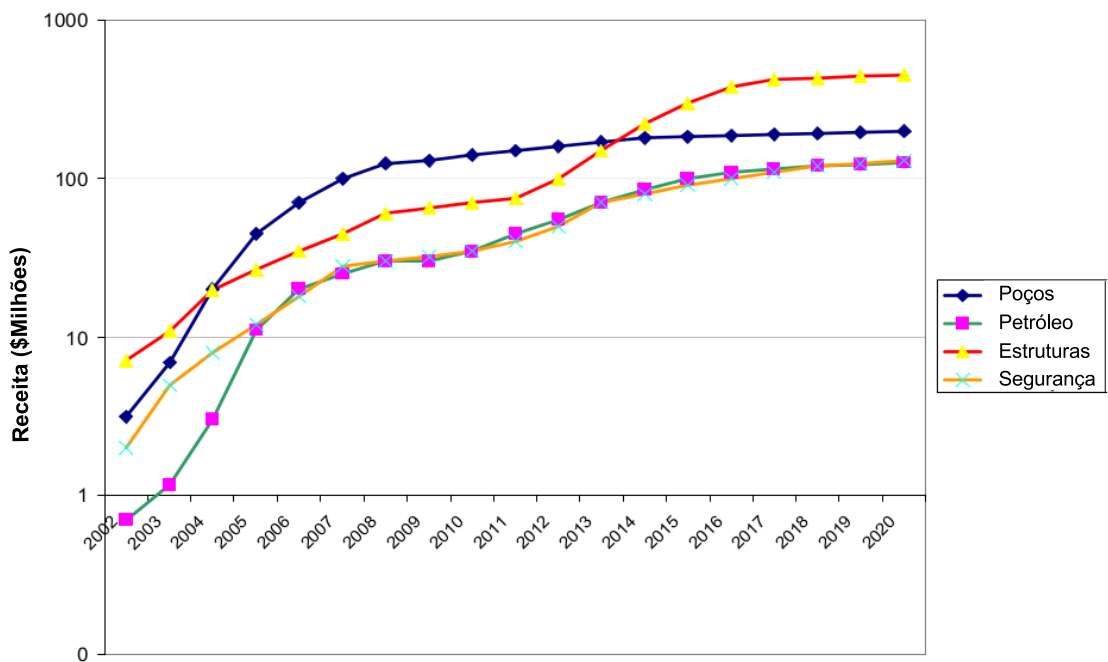
Considerando as aplicações do setor de sensores ópticos com ações e crescimentos maiores, observa-se que no final da década, em 2020, as ações do segmento de mercado irão mudar consideravelmente daquelas em 2008. Como mostrado na Figura 2, a receita aumentou de US\$ 380 milhões para US\$ 1,38 bilhões, enquanto que a participação dominante em 2008 também deu lugar a sensores para estruturas inteligentes. Os sensores para estruturas inteligentes devem obter 33% de participação no segmento em 2020 com receita de US\$ 450 milhões.

Figura 1 – Receita no mercado e previsões de sensores pontuais vs. sensores distribuídos, 2002-2020.



Fonte: Lopez-Higuera et al. (2010)

Figura 2 – Principais mercados de sensores ópticos distribuídos (escala logarítmica), 2002-2020.



Fonte: Lopez-Higuera et al. (2010)

Os principais mercados de aplicação emergentes para sensores ópticos distribuídos são poços de petróleo & gás, segurança, estruturas inteligentes e detecção sísmica (indústria petrolífera). Essas quatro áreas de aplicação em conjunto contribuíram com uma média de 64% para o total da receita anual em 2008, e espera-se manter de forma consistente essa participação até 2020 com média prevista de 67%.

As premissas de previsão favorecem fortes investimentos do mercado comercial e do governo em edifícios e infraestrutura de pontes. No entanto, devido à crise global, os pressupostos mencionados, possivelmente, não poderão ser totalmente realizados e, provavelmente, as taxas e as ações, anteriormente apresentadas, devem sofrer alguns desvios.

Além dos fatores econômicos citados anteriormente, os projetos intitulados “Tecnologia de sensores em fibras ópticas para supervisão, controle e proteção de sistemas de energia elétrica (TECCON)” e “Implantação do Laboratório de Infraestrutura de Transporte Ferroviário da Amazônia (AmazonFerr), FASE 1 - Ênfase em Ensaios Experimentais de Elementos Estruturais e Desenvolvimento de Sistema de Monitoração on-Line de Pontes e Viadutos” foram de grande motivação científica para a produção deste trabalho.

O projeto TECCON<sup>1</sup> (2010-2013) teve como objetivo o desenvolvimento de novas ferramentas baseadas em tecnologia de fibras ópticas para supervisão, controle e proteção de sistemas de energia elétrica. A concretização desse objetivo estava ligada a execução das seguintes particularidades, entre outras: desenvolvimento de ferramentas computacionais com interface amigável, utilizando preferencialmente ferramentas de *software* livre e a linguagem Java; e desenvolvimento de modelos baseados em inteligência computacional que permitam correlacionar os dados advindos das redes de sensores com o estado da rede elétrica, permitindo a otimização da mesma.

No âmbito do projeto AmazonFerr<sup>2</sup> (2012-2014), os principais problemas a serem abordados são: a indisponibilidade de programas computacionais para análise estrutural avançada de estruturas de pontes e viadutos acoplados com rotinas de verificação atendendo às normas brasileiras; a dificuldade com monitoração de pontes e viadutos com sensores convencionais (elétricos) e interligados por cabos, devida a imensa quantidade de cabos necessários; a inexistência na região de um laboratório específico para auxílio na solução de problemas do setor de infraestrutura de transporte ferroviário; a carência no Brasil de capacidade instalada necessária ao desenvolvimento de sensores de fibra óptica baseado na tecnologia de grades de Bragg para monitoração de estruturas civis; e a inoperância no Brasil de um sistema eficiente para realização de testes dinâmicos para análise de fadiga em dormentes.

Dessa forma, verifica-se que ambos os projetos apresentam necessidades de desenvolvimento de aplicações de *software* que possam realizar de forma eficaz o gerenciamento

<sup>1</sup>Site do projeto TECCON: <http://www.tecconweb.ufpa.br>

<sup>2</sup>Site do projeto AmazonFerr: <http://www.lea.ufpa.br/amazonferr>

de dados obtidos a partir do monitoramento de redes de energia elétrica ou estruturas realizado por intermédio de sensores ópticos.

### 1.3 Objetivos e contribuições

Vislumbrando a problemática de desenvolvimento de aplicações de *software* para o gerenciamento de dados no monitoramento estrutural utilizando sensores ópticos, este trabalho possui como objetivos gerais:

- Revisão da literatura sobre problemáticas similares e soluções adotadas;
- Investigar as principais tecnologias de *software* utilizadas nas aplicações;
- Investigar a atividade de gerenciamento de dados no âmbito do SHM.

O cumprimento dos objetivos gerais culminou na compreensão da problemática apresentada, o que resultou na delimitação do escopo da pesquisa e definição dos seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver uma aplicação cliente-servidor, denominada Interrogator Abstraction (InterAB), capaz de realizar a comunicação com as unidades leitoras (interrogadores), aquisição, filtragem/compressão e armazenamento/persistência dos dados de monitoramento em um banco de dados relacional;
- Desenvolver uma aplicação Web, denominada Web-based System (WbS), responsável pela recuperação, exportação, visualização e geração de avisos/alarmes a partir dos dados de monitoramento armazenados no banco de dados;
- Integrar os *softwares* desenvolvidos na forma de um sistema de monitoramento que realize a atividade de gerenciamento de dados do processo de SHM.

Definidas as principais metas do presente trabalho, suas principais contribuições são as seguintes:

- A partir da investigação de trabalhos relacionados foi possível constatar que não existem aplicações de *software* ou metodologias para o gerenciamento de dados advindos do monitoramento realizado através de redes de sensores ópticos;
- Integração, sincronização, independência, segurança, processamento e visualização em tempo real, persistência de dados e flexibilidade proporcionados pelo trabalho conjunto dos *softwares* desenvolvidos;

- Criação e implementação de duas técnicas de filtragem de dados dos sensores ópticos, as quais estão incorporadas no *software* InterAB.
- Aviso/alarmes apresentados por intermédio de um sistema de detecção de anomalias integrado no *software* Web WbS.

## 1.4 Organização da Dissertação

O trabalho está organizado em cinco Capítulos da seguinte maneira:

- O Capítulo 1 delimita o contexto no qual este trabalho está inserido através de uma breve introdução, trabalhos relacionados, motivações, objetivos e contribuições;
- O Capítulo 2 introduz os principais conceitos e aspectos do processo de SHM;
- O Capítulo 3 aborda a proposta de gerenciamento de dados através da modelagem dos *softwares* InterAB e WbS, discorrendo acerca das etapas de análise e projeto dos *softwares*, como levantamento de requisitos, modelagens estática e dinâmica, e projeto físico de banco de dados;
- O Capítulo 4 apresenta e discute os resultados obtidos com o uso dos *softwares* desenvolvidos durante testes em laboratório e ambiente real;
- O Capítulo 5 discute as considerações finais e os trabalhos futuros que podem ter origem a partir deste trabalho.

## 2 Introdução ao monitoramento de saúde estrutural

### 2.1 Noções básicas

O processo de SHM consiste na gravação permanente, contínua, periódica, ou periodicamente contínua de parâmetros tais que, da melhor forma, possam refletir o desempenho da estrutura. Dependendo do tipo de estrutura, sua condição e requisitos específicos relacionados com um projeto de monitoramento, o SHM pode ser realizado a curto prazo (geralmente até alguns dias), a médio prazo (alguns dias até algumas semanas), a longo prazo (alguns meses até alguns anos), ou durante a vida útil da estrutura.

Os parâmetros representativos selecionados para serem monitorados dependem de vários fatores, tais como o tipo e propósito de uma estrutura, cargas esperadas, materiais de construção, condições ambientais e fenômenos de degradação esperados (MEASURES, 2001). Em geral, eles podem ser mecânicos, físicos ou químicos. Os parâmetros mais frequentemente monitorados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Os parâmetros mais frequentemente monitorados.

<b>Classe</b>	<b>Parâmetros</b>
Mecânico	tensão, deformação, deslocamento, aceleração, carga
Físico	temperatura, humidade, pressão, corrente elétrica
Químico	penetração de cloreto, penetração de sulfato, pH, penetração de carbonatação, oxidação de vergalhões, oxidação do aço, enfraquecimento da madeira

Fonte: Glisic e Inaudi (2007)

O monitoramento pode ser realizado ao nível do material local ou ao nível estrutural (ANTUNES et al., 2010). O monitoramento no nível do material fornece informações relativas ao comportamento do material local, porém apresentando informação reduzida sobre o comportamento da estrutura como um todo. Por sua vez, o monitoramento no nível estrutural proporciona melhores informações relacionadas ao comportamento estrutural global e indiretamente, por meio das mudanças no comportamento estrutural, também fornece informações relacionadas ao desempenho do material.

Realizando uma analogia entre o corpo humano e uma estrutura, podemos considerar que uma condição não saudável é detectada pelo sistema nervoso. Com base na informação que o cérebro recebe (por exemplo, dor em algumas partes do corpo), um



paciente percebe que está doente e resolve ir ao médico com o objetivo de evitar o desenvolvimento da doença. O médico realiza alguns exames, estabelece um diagnóstico e propõe um tratamento. Esse processo é apresentado na Figura 3.

Figura 3 – Analogia entre o corpo humano e uma estrutura.



Fonte: Produzido pelo autor

O conceito apresentado acima também pode ser aplicado às estruturas. O principal objetivo do monitoramento é detectar comportamentos estruturais incomuns que indicam um mau funcionamento da estrutura, que é uma condição estrutural não saudável (FIGUEIREDO, 2010). A detecção de uma condição não saudável exige uma inspeção detalhada, diagnóstico e trabalho de reparação da estrutura. Considerando essas etapas, o monitoramento deve permitir as seguintes ações:

1. Detectar o mau funcionamento na estrutura (e.g., ocorrência de quebra);
2. Registrar o tempo de surgimento do problema (e.g., 14 de janeiro 2014 às 15:40);
3. Indicar a posição física do problema (e.g., na viga exterior, 3 m do pilar);
4. Quantificar o problema (e.g., abertura de 2 mm);
5. Executar ações (e.g., suspender o tráfego e restaurar a viga).

Através apenas do monitoramento não é possível fazer um diagnóstico. Para fazer um diagnóstico e propor o reparo é necessária a realização de uma inspeção detalhada e análises relacionadas. A detecção de comportamentos estruturais incomuns com base em resultados do monitoramento é realizada de acordo com algoritmos pré-definidos (STEPINSKI; UHL; STASZEWSKI, 2013). Esses algoritmos podem ser simples (por exemplo,

a comparação dos parâmetros medidos com os valores finais), avançados (por exemplo, a comparação dos parâmetros medidos com os valores projetados) ou muito sofisticados (por exemplo, por meio de análise estatística). A eficiência do processo de diagnóstico depende do desempenho do sistema de monitoramento aplicado e dos algoritmos utilizados.

### 2.1.1 Necessidades de monitoramento e benefícios

Primeiramente, o monitoramento é naturalmente relacionado com a segurança. Comportamentos estruturais incomuns podem ser detectados em estruturas monitoradas em um estágio inicial e, portanto, o risco de colapso repentino é minimizado e vidas humanas, bens e o meio ambiente são preservados.

A detecção precoce de uma avaria estrutural permite uma intervenção imediata para a manutenção ou renovação da estrutura, envolvendo assim custos limitados de manutenção e mão de obra.

As estruturas bem conservadas são mais duráveis, e um aumento na durabilidade diminui as perdas econômicas diretas (reparação, manutenção e reconstrução) e também ajuda a evitar perdas para os usuários que podem sofrer com os danos provocados por uma avaria estrutural.

Novos materiais, novas tecnologias de construção e novos sistemas estruturais estão cada vez mais sendo usados, e é necessário aumentar o conhecimento sobre o seu comportamento no local de aplicação para controlar o projeto, para verificar o desempenho e para criar e calibrar modelos numéricos (ANTUNES, 2011). Todavia, o monitoramento certamente fornece respostas para essas solicitações.

O monitoramento pode descobrir reservas estruturais escondidas (desconhecidas) e, conseqüentemente, permitir um melhor aproveitamento de materiais tradicionais e um melhor aproveitamento das estruturas existentes (TOSI et al., 2009). Neste caso, a mesma estrutura pode aceitar uma carga mais elevada, ou seja, mais desempenho é obtido sem custos adicionais de construção.

Contudo, o monitoramento ajuda a prevenir o impacto social, econômico, ecológico e estético que pode ocorrer no caso de deficiência estrutural.

### 2.1.2 Monitoramento durante a vida útil da estrutura

O monitoramento não deve ser limitado às estruturas com deficiências reconhecidas (GIANGARRA et al., 2011). Primeiro, porque quando a deficiência estrutural é reconhecida, a estrutura funciona com desempenho limitado e as perdas econômicas já foram geradas. Em segundo lugar, o histórico de eventos que levam à deficiência estrutural não foi registrado e pode ser difícil fazer um diagnóstico. Em terceiro lugar, a informação relativa ao estado de saúde é importante como referência, notavelmente para estruturas

complexas em que a comparação direta do comportamento estrutural com o projeto e os modelos numéricos não permite ao certo detectar uma avaria. Devido a esses fatos o monitoramento durante a vida útil, que inclui todas as fases importantes da vida da estrutura, é altamente recomendável.

A construção é uma fase muito delicada na vida de uma estrutura. Em particular, para estruturas de concreto, as propriedades do material mudam com o passar dos anos. Os defeitos (por exemplo, quebras prematuras) que surgem durante a construção podem ter consequências graves para o desempenho estrutural. Os dados de monitoramento ajudam os engenheiros a compreender o comportamento real de uma estrutura, e isso leva a melhores estimativas de desempenho real e, se necessário, medidas corretivas mais apropriadas. A instalação de sistemas de monitoramento durante a fase de construção permite o monitoramento durante toda a vida da estrutura. Como a maioria das estruturas devem ser inspecionadas várias vezes durante o serviço, a melhor maneira de diminuir os custos de monitoramento e inspeção é instalar o sistema de monitoramento desde o início.

A fase de serviço também é um período importante na vida de uma estrutura. Durante essa fase, os materiais de construção estão sujeitos à degradação por envelhecimento. As rachaduras no concreto e a oxidação do aço podem ocorrer devido ao efeito de fadiga. A degradação dos materiais é causada por fatores mecânicos (cargas mais elevadas do que teoricamente assumido) e físico-químicos (corrosão do aço, penetração de sais e cloretos no concreto, congelamento do concreto, etc.). Como consequência da degradação do material, a capacidade, durabilidade e segurança de uma estrutura diminuem.

O monitoramento durante o serviço fornece informações sobre o comportamento estrutural sob cargas previstas e também registra os efeitos imprevisíveis de sobrecarga. Os dados obtidos através do monitoramento são úteis para a detecção de danos, avaliação da segurança e determinação da capacidade residual das estruturas (HARMS; SEDIGH; BASTIANINI, 2010). A detecção precoce de danos é particularmente importante, pois leva a intervenções apropriadas e oportunas. Se o dano não é detectado, em seguida, continua a propagar-se e a estrutura já não consegue garantir os níveis de desempenho requeridos. A detecção tardia de danos resulta em custos muito elevados de restauração e, em alguns casos, no fechamento e demolição da estrutura.

Algumas estruturas devem ser testadas depois do serviço por razões de segurança. Nessa fase, os níveis de desempenho requeridos devem ser alcançados (WENZEL, 2009). Exemplos típicos são pontes e estádios: a carga é posicionada em locais críticos (seguindo as linhas de influência) e os parâmetros de interesse (tais como deformação, tensão, deslocamento, rotação de seção e abertura de rachadura) são medidos. Os testes são realizados de forma a compreender o comportamento real da estrutura e compará-lo com as estimativas teóricas. O monitoramento durante essa fase pode ser usado para calibrar modelos numéricos que descrevem o comportamento da estrutura monitorada.

Degradação e/ou danos materiais são muitas vezes as razões para a reforma de estruturas existentes. Além disso, novos requisitos funcionais para uma estrutura (por exemplo, ampliação de pontes) levam à exigências de fortalecimento. Por exemplo, se os elementos de reforço são feitos de concreto novo, então uma boa interação do concreto novo com a estrutura existente deve ser assegurada: deformação precoce no concreto novo cria tensões internas e má coesão, provocando a delaminação do concreto novo, assim anulando os efeitos benéficos dos esforços de reparação. Desde que os elementos estruturais recém-criados, que são observados separadamente, representem estruturas novas, as razões para o seu monitoramento são as mesmas que para estruturas novas. A determinação do sucesso de reparação ou de reforço é uma justificativa adicional.

Quando a estrutura já não atende o nível de desempenho exigido e quando os custos de reparação ou de reforço são excessivamente elevados, então o tempo de vida útil da estrutura é atingido e a estrutura deve ser demolida. O monitoramento ajuda a demolir as estruturas de forma segura e com êxito.

## 2.2 O processo de monitoramento de saúde estrutural

### 2.2.1 Principais atividades

As principais atividades do processo de SHM são (GLISIC; INAUDI, 2007): seleção da estratégia de monitoramento, instalação do sistema de monitoramento, manutenção do sistema de monitoramento, gerenciamento de dados e atividades de encerramento no caso de interrupção do monitoramento. As subdivisões dessas atividades são apresentadas na Tabela 2 e discutidas a seguir. Cada atividade principal é muito importante, porém o mais importante é criar uma estratégia de monitoramento que seja eficiente. A estratégia de monitoramento é influenciada por cada uma das atividades principais e subatividades, consistindo em (LOPEZ-HIGUERA et al., 2011):

1. Estabelecer o objetivo do monitoramento;
2. Identificar e selecionar os parâmetros representativos a serem monitorados;
3. Selecionar os sistemas de monitoramento apropriados;
4. Projetar o arranjo da rede de sensores;
5. Estabelecer o cronograma de monitoramento;
6. Planejar a exploração de dados;
7. Estimar os custos do monitoramento.

Tabela 2 – Estrutura de divisão das principais atividades de monitoramento.

<b>Estratégia de monitoramento</b>	<b>Instalação do sistema de monitoramento</b>	<b>Manutenção do sistema de monitoramento</b>	<b>Gerenciamento de dados</b>	<b>Atividades de encerramento</b>
Objetivo do monitoramento	Instalação dos sensores	Fornecer alimentação elétrica	Execução de medições (leituras dos sensores)	Interrupção do monitoramento
Seleção dos parâmetros monitorados	Instalação dos acessórios (conectores, extensões, cabos, etc.)	Fornecer linhas de comunicação ( <i>wired</i> ou <i>wireless</i> )	Armazenamento de dados (local ou remoto)	Desmontagem do sistema de monitoramento
Seleção do sistema de monitoramento	Instalação das unidades leitoras	Implementação de planos de manutenção para diferentes dispositivos	Fornecer acesso aos dados	Armazenamento de componentes de monitoramento
Projeto da rede de sensores	Instalação de softwares	Reparos e substituições	Visualização	
Agendamento de monitoramento	Interfaceamento com usuários		Exportação dos dados	
Plano de exploração de dados			Interpretação	
Custos			Análise dos dados	
			Uso dos dados (avisos e alarmes)	

Fonte: Glisic e Inaudi (2007)

Para iniciar um projeto de monitoramento é importante definir o objetivo do monitoramento e identificar os parâmetros a serem monitorados (FIGUEIREDO, 2010). Esses parâmetros devem ser adequadamente selecionados de forma que reflitam o comportamento estrutural. Cada estrutura possui suas próprias particularidades e, conseqüentemente, a sua própria seleção de parâmetros para o monitoramento.

Existem diversas abordagens para avaliar a estrutura que influenciam a seleção de parâmetros. Podemos classificá-las em três categorias básicas, chamadas de monitoramento estático, monitoramento dinâmico, e sistema de identificação e análise modal, podendo essas categorias serem combinadas (WENZEL, 2009). Cada abordagem é caracterizada por suas vantagens e desafios, e qual (ou quais) delas será utilizada depende,

principalmente, do comportamento estrutural e das metas do monitoramento.

Cada abordagem pode ser realizada durante períodos curtos e longos, de forma permanente (contínua) ou periodicamente. O agendamento e o ritmo de monitoramento dependem de quão rápido os parâmetros monitorados mudam com o tempo (SCOTT et al., 2013). Para algumas aplicações, o monitoramento periódico apresenta resultados satisfatórios, mas a informação que não foi registrada entre duas inspeções é perdida para sempre. Somente um acompanhamento contínuo durante toda a vida útil da estrutura pode registrar seu histórico, ajudando a compreender o seu comportamento real e explorar plenamente os benefícios do monitoramento.

O monitoramento consiste em dois aspectos: medição da magnitude do parâmetro monitorado e registro do tempo e do valor da medição (ADHAMI, 2012). Com o objetivo de efetuar uma medição e registrá-la, pode-se utilizar diferentes tipos de aparelhos. O conjunto de todos os dispositivos destinados a efetuar uma medição e registrá-la é chamado de um sistema de monitoramento. Atualmente, existe um grande número de sistemas de monitoramento com base em princípios de funcionamento diferentes. Em geral, no entanto, todos eles possuem componentes similares: sensores, portadoras de informação, unidades de leitura, interfaces e subsistemas de gerenciamento de dados (*software*).

A seleção de um sistema de monitoramento depende das especificações de monitoramento (HARMS; SEDIGH; BASTIANINI, 2010), como o objetivo do monitoramento, parâmetros selecionados, precisão, frequência de leitura, compatibilidade com o ambiente (sensibilidade à interferências eletromagnéticas, variações de temperatura e humidade), procedimentos de instalação para os diferentes componentes do sistema de monitoramento, possibilidade de funcionamento automático, conectividade remota, método de gerenciamento de dados e nível no qual a estrutura está sendo monitorada (estrutural global ou material local). Por exemplo, o monitoramento de estruturas novas de concreto sujeitas à cargas dinâmicas no nível estrutural somente pode ser realizado por meio de sensores que não são influenciados por defeitos no material local ou descontinuidades (rachaduras e inclusões). Uma vez que os sensores *short-gauge* estão sujeitos à influências locais, uma boa escolha é usar um sistema de monitoramento baseado em sensores *long-gauge* ou distribuídos. Além disso, os sensores devem ser incorporados no concreto, insensíveis às condições ambientais e a unidade de leitura deve ser capaz de executar medições estáticas e dinâmicas com uma determinada frequência e uma certa precisão.

O monitoramento de vários parâmetros é muitas vezes obrigatório, como tensão média e curvaturas em vigas, lajes e cascas, tensão média de cisalhamento, deformação e deslocamento, ocorrência de rachadura e quantificação, bem como detecção de danos indiretos. A utilização de sistemas de monitoramento e sensores separados para cada um dos parâmetros mencionados é dispendiosa e complexa do ponto de vista de instalação e de avaliação dos dados. Por isso, é preferível usar apenas um número limitado de sistemas

de monitoramento e tipos de sensor.

A fim de extrair o máximo de dados a partir do sistema, se faz necessário colocar os sensores em posições representativas sobre a estrutura (RAO, 2008). A rede de sensores a ser utilizada para o monitoramento depende da geometria e do tipo de estrutura a ser monitorada, parâmetros e objetivos do monitoramento.

A atividade de instalação do sistema de monitoramento é uma fase particularmente delicada (SCOTT et al., 2013). Portanto, ela deve ser planejada em detalhes, considerando seriamente as condições no local e notavelmente as atividades de montagem de componentes estruturais, sequências e agendamentos.

Os componentes do sistema de monitoramento podem ser incorporados (por exemplo, em concreto fresco ou entre os materiais compósitos laminados), ou instalados sobre a superfície da estrutura utilizando fechos, grampos ou cola. Se for realizada durante a construção da estrutura, a instalação pode ser demorada e pode atrasar o trabalho de construção (GIANGARRA et al., 2011). Por exemplo, os componentes de um sistema de monitoramento que devem ser instalados através da incorporação no concreto fresco somente podem ser instalados de forma segura durante um curto período entre a conclusão de vergalhões e o vazamento de concreto. Por isso, o cronograma de instalação do sistema de monitoramento deve ser cuidadosamente planejado, levando em consideração o cronograma das obras e o tempo necessário para a instalação do sistema.

Quando instalado, o sistema de monitoramento deve ser protegido, principalmente se o monitoramento é realizado durante a construção da estrutura. Qualquer proteção tem que evitar danos acidentais durante a construção e assegurar a longevidade do sistema. Assim, todas as influências externas, periódicas ou permanentes, devem ser consideradas no momento da concepção de proteção para o sistema de monitoramento.

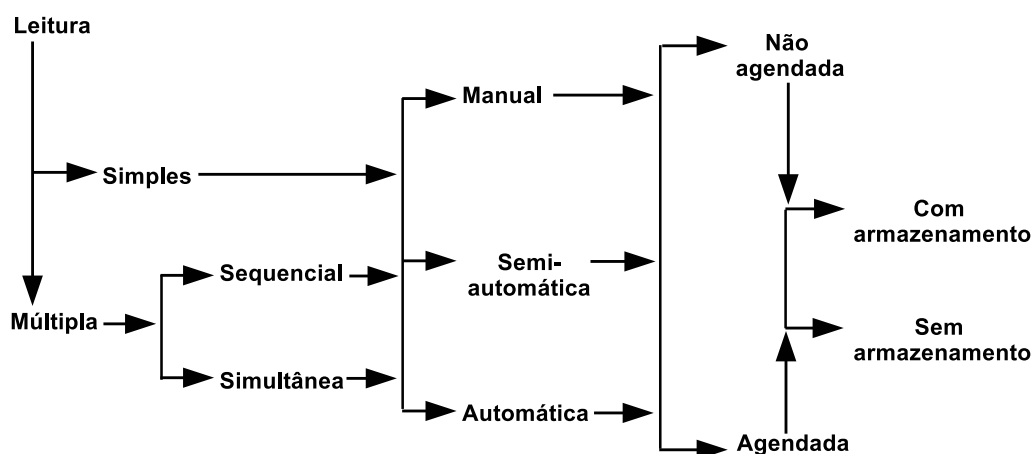
As estruturas possuem diferentes períodos de vida: construção, testes, serviço, reparação e remodelação, e outros. Durante cada um desses períodos, o monitoramento pode ser realizado com um cronograma apropriado de medições. O cronograma de medições depende da taxa esperada de mudança dos parâmetros de monitoramento, mas também depende de questões de segurança (LOPEZ-HIGUERA et al., 2011). As estruturas que podem entrar em colapso pouco depois de sofrer uma avaria devem ser continuamente monitoradas com frequência máxima de medições. No entanto, as estruturas comuns são projetadas de tal maneira que o colapso ocorre apenas depois de uma avaria significativa que se desenvolve durante um longo período de tempo. Portanto, a fim de diminuir o custo de monitoramento, as medições podem ser definidas com menos frequência, dependendo do comportamento estrutural esperado. Abaixo é apresentado um exemplo de monitoramento estático de estruturas de concreto (GLISIC; INAUDI, 2007):

- **Concreto de idade precoce.** Possível somente se os sensores de menor rigidez estão incorporados no concreto. O cronograma de monitoramento de deformação em idade precoce é uma até quatro sessões de medições por hora durante as primeiras 24-36 horas e quatro medições por dia até uma medição por semana depois, dependendo da evolução do concreto (“sessão” significa uma medição para cada sensor);
- **Monitoramento contínuo por 24-48 horas.** Recomendado para registrar o comportamento da estrutura devido à temperatura diária e variações de carga. Essa sessão de medições deve ser realizada em um ritmo de uma sessão de medições por hora durante 24-48 horas, pelo menos uma vez por temporada de cada ano;
- **Período de construção.** O cronograma deve ser adaptado para trabalhos de construção. Recomenda-se realizar pelo menos uma sessão de medições depois de cada etapa da construção, haja vista que podem ocorrer mudanças nas cargas em elementos previamente construídos (novos andares de um edifício e montagem de elementos de proteção e transporte);
- **Teste de carga.** Recomenda-se geralmente no mínimo uma sessão de medições após cada etapa de carga;
- **Período antes da remodelação, reparação ou expansão.** Essas medições servirão para compreender o comportamento estrutural antes da reconstrução. Elas devem ser realizadas várias vezes por dia (uma sessão de manhã, ao meio-dia, de tarde e de noite) durante um período (representativo) estabelecido. Além disso, vários períodos de monitoramento contínuo de 24 ou 48 horas (sessão de hora em hora) são recomendados para determinar a influência diária da temperatura e de cargas;
- **Durante a remodelação, reparação ou expansão.** Em geral, o mesmo cronograma utilizado para a construção combinado com quatro vezes por dia e sessões de 24 ou 48 horas;
- **Monitoramento de longo prazo durante o serviço.** Pelo menos uma a quatro sessões por dia são recomendadas para o monitoramento estático permanente e pelo menos uma por semana até uma por mês para o monitoramento estático periódico. Sessões contínuas periódicas anuais de 24-48 horas (pelo menos uma sessão a cada hora durante 24 horas) também são recomendadas;
- **Eventos especiais.** Sessões de medições realizadas durante e após ventos fortes, chuva pesada, terremotos ou ataques terroristas.



O gerenciamento de dados pode ser básico ou avançado (FARRAR; WORDEN, 2013). O gerenciamento de dados básico consiste na execução de medições (leitura dos sensores), armazenamento de dados (local ou remoto) e modo de acesso aos dados. Os possíveis métodos de coleta de dados (leitura dos sensores) são apresentados esquematicamente na Figura 4. Os dados de monitoramento podem ser coletados manualmente, de forma semi-automática ou automaticamente, local ou remotamente, periódica ou continuamente, estática e dinamicamente. Essas opções podem ser combinadas de maneiras diferentes; por exemplo, durante os testes de uma ponte é necessário realizar as medições de forma semi-automática, local e periodicamente (depois de cada etapa de carga). Para monitoramento de longo prazo em curso, o desempenho máximo é automático, remoto, com coleta contínua de dados, sem intervenção humana.

Figura 4 – Métodos de coleta de dados.



Fonte: Produzido pelo autor

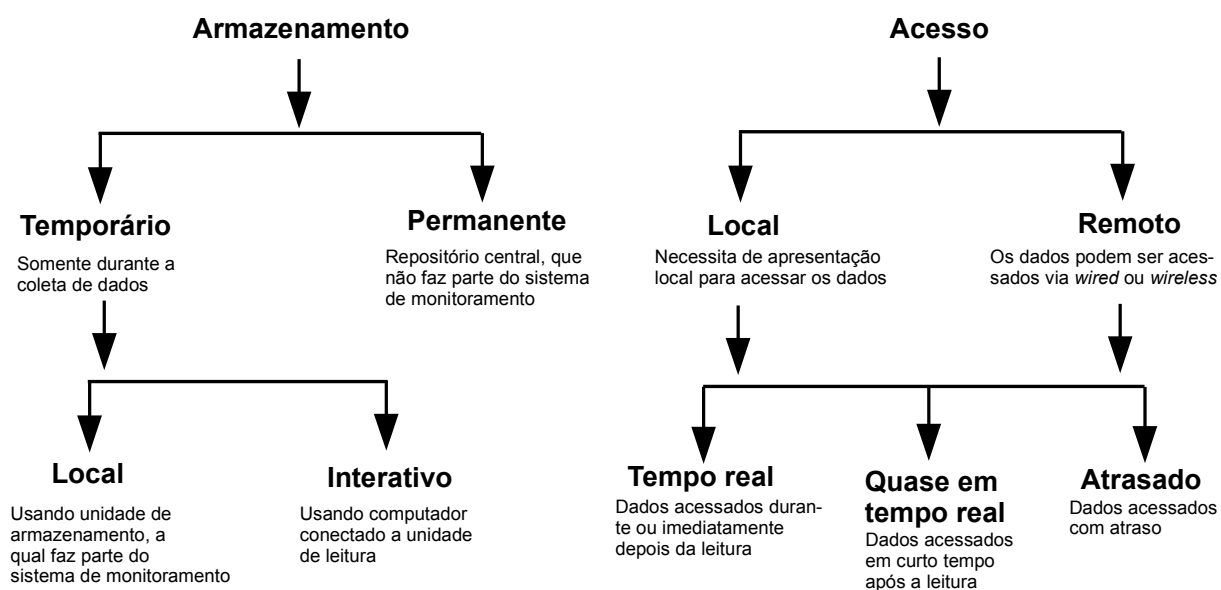
Os dados podem ser armazenados, por exemplo, na forma de relatórios, tabelas e diagramas com diferentes tipos de suporte, como arquivos eletrônicos (no disco rígido e CD) ou versões impressas em papel. A forma de armazenamento de dados deve garantir que os dados não serão perdidos (por exemplo, dados armazenados em um banco de dados com *backups*) e que o acesso imediato a todos os dados selecionados é possível (por exemplo, interesse em acessar apenas os dados de um grupo de sensores durante um período de monitoramento). As possíveis formas de armazenamento e acesso aos dados são apresentadas na Figura 5.

O *software* que gerencia a coleta e armazenamento de dados deve ser uma parte do sistema de monitoramento. Caso contrário, o gerenciamento de dados pode ser difícil, exigente e dispendioso.

O gerenciamento de dados avançado consiste na interpretação, visualização, exportação, análise e uso dos dados (geração de avisos e alarmes). Os dados coletados são,

de fato, uma enorme quantidade de números (datas e magnitudes dos parâmetros de monitoramento) e devem ser transformados em informação útil acerca do comportamento estrutural. Essa transformação depende da estratégia de monitoramento e dos algoritmos que são usados para interpretar e analisar os dados. Isso pode ser realizado manualmente, de forma semi-automática ou automaticamente.

Figura 5 – Possíveis métodos de armazenamento e acesso aos dados.



Fonte: Produzido pelo autor

O gerenciamento de dados manual é composto de interpretação, visualização, exportação e análise de dados manual. Isso é prático nos casos em que a quantidade de dados é limitada. Por sua vez, o gerenciamento de dados semi-automático consiste na combinação de ações manuais e automáticas. Normalmente, a exportação de dados é manual e a análise é automática, utilizando um *software* apropriado. Isso é aplicável nos casos em que a análise dos dados deve ser realizada apenas periodicamente. O gerenciamento de dados automático é o mais conveniente, uma vez que pode ser realizado rapidamente e independente da quantidade de dados ou da frequência de análise. Finalmente, com base em informações obtidas a partir da análise de dados, ações planejadas podem ser realizadas (por exemplo, os avisos podem ser gerados e a exploração da estrutura será parada, a fim de garantir a segurança).

O gerenciamento de dados deve ser planejado junto com a seleção da estratégia de monitoramento (LOPEZ-HIGUERA et al., 2011). Os algoritmos apropriados e as ferramentas compatíveis com o sistema de monitoramento escolhido devem ser selecionados.

A estratégia de monitoramento muitas vezes é limitada pelo orçamento disponível. Do ponto de vista do desempenho de monitoramento, o melhor é usar sistemas de monitoramento sofisticados, redes de sensores densas (muitos sensores instalados em cada

parte da estrutura) e *softwares* que permitam a operação remota e automática. Por outro lado, o custo desse monitoramento pode ser muito elevado e inacessível. Por isso é importante desenvolver uma estratégia de monitoramento ideal, proporcionando boa avaliação do comportamento estrutural, mas também acessível em termos de custos. Não existem duas estruturas idênticas, conseqüentemente, a estratégia de monitoramento é diferente para cada estrutura.

### 2.2.2 Atores

Os principais atores (entidades) envolvidos no monitoramento são a autoridade de monitoramento, o consultor, as empresas de monitoramento e as empreiteiras (SCOTT et al., 2013). Essas entidades devem colaborar estreitamente entre si com o objetivo de criar e implementar uma estratégia de monitoramento eficiente e representativa. As entidades não precisam necessariamente ser diferentes, por exemplo, uma empresa de monitoramento também pode ter o papel de consultora ou empreiteira.

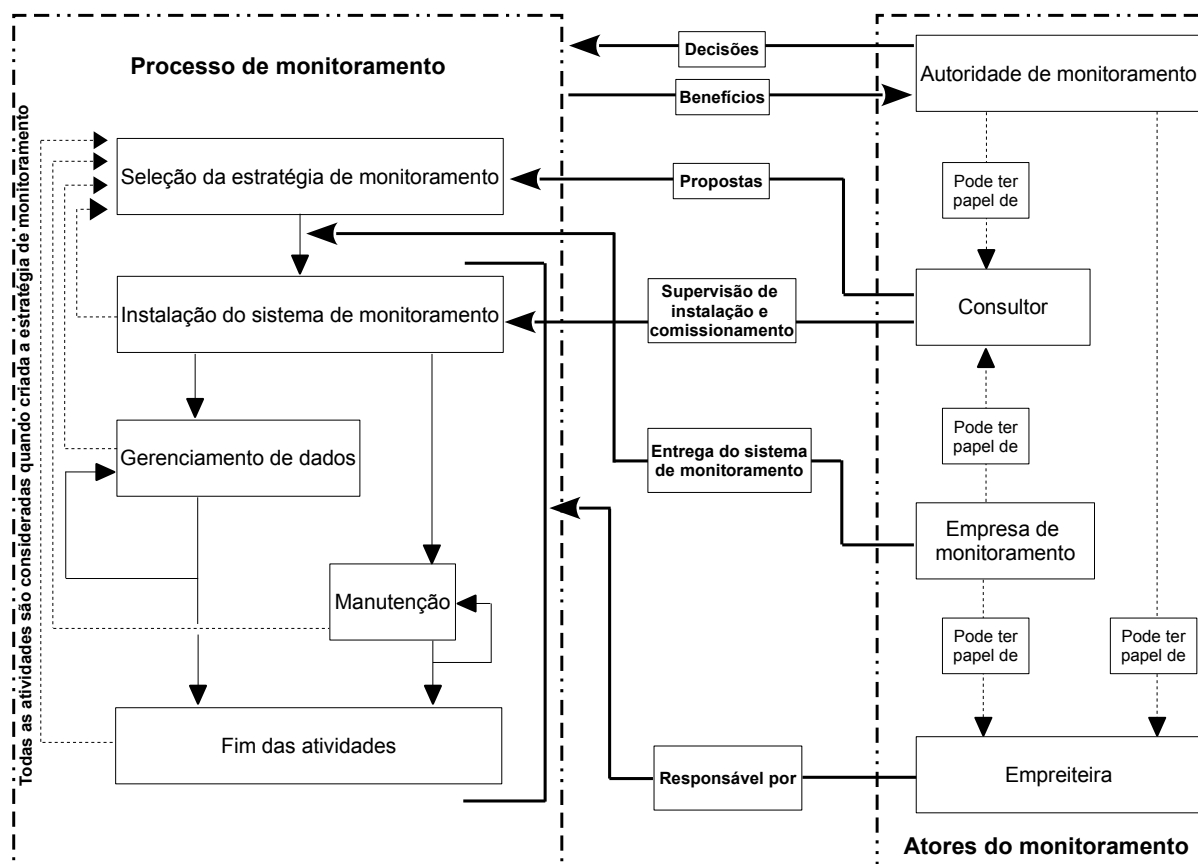
A autoridade de monitoramento é a entidade que está interessada e decide implementar o monitoramento. Normalmente, é o proprietário da estrutura ou a entidade que está, por alguma razão, interessada na segurança (por exemplo, autoridade legal). Essa autoridade financia o monitoramento e recebe os benefícios advindos dessa ação. É responsabilidade da autoridade definir os objetivos de monitoramento e a aprovação da estratégia de monitoramento proposta. A mesma autoridade é depois responsável pela manutenção e gerenciamento de dados (diretamente ou através de subcontratação de empresa de monitoramento ou empreiteira).

O consultor propõe uma estratégia de monitoramento para a autoridade de monitoramento. Essa estratégia consiste em realizar a análise necessária do sistema estrutural, estimando cargas, realizando modelagem numérica, avaliação de risco e criação de uma outra estratégia de monitoramento, se a inicial for rejeitada pela autoridade. Após a entrega do sistema de monitoramento, o consultor pode realizar a supervisão da instalação e comissionamento do sistema de monitoramento.

A empresa dedicada ao monitoramento (empresa de monitoramento) é responsável basicamente pela entrega do sistema de monitoramento. No entanto, a mesma empresa muitas vezes pode ter o papel de consultora (desenvolvimento da estratégia de monitoramento em colaboração com a autoridade responsável) ou empreiteira (implementação do sistema de monitoramento).

A instalação do sistema de monitoramento é realizada por uma empreiteira com o apoio da empresa de monitoramento e da autoridade responsável. A interação entre as atividades principais do processo de monitoramento e os principais atores é apresentada na Figura 6.

Figura 6 – Interação entre as principais atividades e os atores do monitoramento.



Fonte: Produzido pelo autor

## 2.3 Introdução à tecnologia de sensores ópticos

Um sistema típico de monitoramento é composto por uma rede de sensores que mede os parâmetros relevantes para o estado da estrutura e do seu ambiente. Para as estruturas civis, como pontes, túneis, barragens, geoestruturas, usinas, arranha-céus e monumentos históricos, os parâmetros mais relevantes são (ANTUNES et al., 2010):

- Posição, deformação, inclinação, tensão, força, pressão, aceleração e vibração;
- Humidade, pH e concentração de cloro;
- Parâmetros ambientais, tais como temperatura, velocidade e direção do vento, radiação solar, precipitação, acúmulo de neve, nível da água e do fluxo e concentração de poluentes.

Os sensores convencionais baseados em transdutores mecânicos e/ou elétricos são capazes de medir a maioria desses parâmetros. Atualmente, os sensores ópticos apresentam-se como uma tecnologia atraente nos casos em que oferecem desempenho superior em

comparação com os sensores convencionais (YANG, 2010). Os sensores ópticos podem ser superiores quanto à qualidade das medições, maior confiabilidade, possibilidade de substituir as leituras manuais e operação com medições automáticas, fácil instalação e custo de manutenção mais baixo.

Apesar dos sensores ópticos serem aparentemente caros para uso generalizado no SHM, eles são, no entanto, uma melhor abordagem para aplicações onde a confiabilidade em ambientes desafiadores é essencial (ANTUNES, 2011). Às vezes é crucial utilizar uma tecnologia confiável para o monitoramento crítico: o preço muitas vezes deixa de ser um impedimento quando a segurança ou o gerenciamento eficiente de sistemas muito caros, tais como estruturas de Engenharia Civil, pode evitar consequências catastróficas.

Em aplicações comerciais onde os sensores ópticos foram selecionados para o monitoramento, o benefício muitas vezes mais do que justifica o alto custo desse tipo de tecnologia. Os sensores ópticos podem até se tornar rentáveis quando envolve um número significativo de sensores, como em aplicações de Engenharia Civil, usando sensores ópticos quasi-distribuídos ou totalmente distribuídos (UDD, 2008). Em algumas aplicações extremas, como na indústria de petróleo & gás, os sensores ópticos são, por vezes, a única solução disponível para o monitoramento confiável e de longo prazo de parâmetros físicos.

As maiores vantagens dos sensores ópticos estão intrinsecamente ligadas à fibra óptica, que pode ser simplesmente uma ligação entre o sensor e o condicionador de sinal, ou o próprio sensor *long-gauge* e sensores distribuídos (LOPEZ-HIGUERA et al., 2010). Em quase todas as aplicações de sensores ópticos, a fibra óptica é uma fibra de vidro fina, que é normalmente protegida mecanicamente com um revestimento de polímero (ou até mesmo um revestimento de metal em casos extremos) e muitas vezes inserida num cabo projetado para ser adequado para as aplicações (RAO, 2008). O vidro, uma vez que é um material inerte muito resistente a quase todos os produtos químicos, mesmo a temperaturas elevadas, é um material ideal para aplicações em ambientes químicos agressivos, tais como aqueles encontrados em poços de petróleo & gás ou uma estrutura de concreto. Ele também é interessante, haja vista que é resistente aos efeitos atmosféricos e por não estar sujeito a qualquer corrosão. A última propriedade é uma grande vantagem para o monitoramento confiável a longo prazo de estruturas de Engenharia Civil.

Uma vez que a luz confinada no núcleo das fibras ópticas usadas para fins de sensoriamento não interage com qualquer campo eletromagnético (EM) circundante, os sensores ópticos são, portanto, intrinsecamente imunes a qualquer interferência EM (YANG, 2010). Com essa vantagem sobre suas contrapartes elétricas, sensores ópticos são, obviamente, a solução ideal quando o ambiente apresenta campo EM, rádio frequência ou microondas. Por exemplo, os sensores ópticos não serão afetados por qualquer campo EM gerado por um raio que possa atingir uma ponte ou barragem monitorada, a menos que a fibra seja danificada termicamente. Os sensores ópticos também não são afetados por máqui-

nas elétricas nas proximidades, tais como locomotivas elétricas, linhas de transmissão ou transformadores. Além de aumentar a confiabilidade do sensor, a sua imunidade EM pode, por exemplo, ser uma vantagem única para monitorar pontos de acesso em transformadores elétricos de alta potência monitorados com sensores ópticos de temperatura. Pelo projeto, os sensores ópticos são intrinsecamente seguros e, naturalmente, à prova de explosão, tornando-os particularmente adequados para aplicações de monitoramento em estruturas civis de risco, como gasodutos e plantas químicas.

A capacidade dos sensores ópticos de medir à distâncias de várias dezenas de quilômetros sem a necessidade de qualquer componente eletricamente ativo também é uma vantagem herdada da indústria de telecomunicações em fibra óptica (UDD, 2008). Essa é uma característica importante ao monitorar estruturas grandes e remotas, como oleodutos ou várias pontes ao longo de uma única rodovia.

Os sensores ópticos oferecem uma grande variedade de parâmetros que podem ser medidos, de modo que vários parâmetros podem ser multiplexados na mesma rede (GOMES, 2011). Em comparação com sensores elétricos convencionais, os sensores ópticos oferecem novas e únicas topologias de sensoriamento, incluindo multiplexação na mesma fibra e sensoriamento totalmente distribuído, oferecendo novas oportunidades de monitoramento.

O mercado de sensores ópticos está crescendo significativamente e, como previsto por vários estudos de mercado, vai continuar a fazê-lo no futuro (OIDA, 2009). Certamente, aplicações de alto desempenho para os sensores ópticos devem ser abordadas no mercado, objetivando aumentar a competitividade com as soluções geralmente mais baratas e mais familiares usando sensores elétricos. Em particular, exigindo aplicações onde os sensores convencionais são difíceis de aplicar, apresentando melhores oportunidades para sensores ópticos. Entre essas aplicações, as que envolvem monitoramento de saúde de estruturas de Engenharia Civil, provavelmente, oferecem as melhores oportunidades para as diferentes tecnologias baseadas em sensores ópticos.

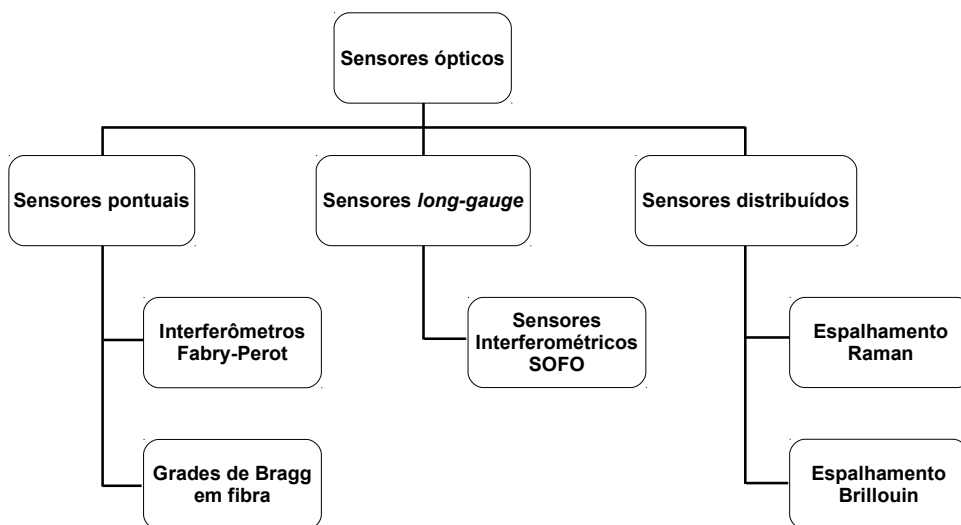
Um sistema típico de SHM baseado em sensores ópticos é composto de vários elementos que são igualmente importantes para alcançar um sistema eficaz (MEASURES, 2001):

1. **Sensores.** Esses transdutores convertem o parâmetro a ser medido numa quantidade diferente e mensurável. No caso dos sensores ópticos, o elemento sensor tipicamente transforma uma mudança no parâmetro de monitoramento numa correspondente mudança nas propriedades da luz guiada pela fibra óptica. Tal modificação pode envolver a sua intensidade, fase, conteúdo espectral, estado de polarização ou uma combinação desses;

2. **Rede cabeada.** Usada para conectar os sensores ao sistema de aquisição de dados (*Data acquisition* - DAQ). Os sensores ópticos oferecem a vantagem de uma rede cabeada puramente passiva que é composta inteiramente de fibras ópticas. Vários sinais provenientes de vários sensores podem, por vezes, ser combinados numa única fibra óptica ou cabo multifibra;
3. **Sistema DAQ.** Para cada tipo de sensor, encontramos uma unidade DAQ (para leitura dos sensores) correspondente, que observa a mudança no sinal óptico e a traduz em informação inteligível acerca da alteração na estrutura. Os dados são tipicamente disponibilizados em formato digital e já incorporam, em alguns casos, informação adicional sobre a curva de calibração do sensor;
4. **Sistema de gerenciamento de dados.** Os dados devem ser armazenados de forma organizada, de modo que possam ser devidamente analisados posteriormente. Atualmente, a melhor maneira de armazenar dados para fins de monitoramento de longo prazo é armazená-los em um banco de dados relacional. No entanto, é importante assegurar que os dados são armazenados adequadamente e duplicados (*backup*) para evitar a perda acidental de dados;
5. **Análise de dados.** Essa camada analisa os dados para transformá-los em informações que possam ser utilizadas para fins de tomada de decisão. Esse elemento também pode incluir ferramentas para apresentação e publicação dos dados.

Existe uma grande variedade de sensores ópticos para o SHM desenvolvidos pelas instituições acadêmicas e industriais. As universidades e centros de pesquisas industriais estão desenvolvendo e produzindo uma grande variedade de sensores para os mais diversos tipos de medições e aplicações. Nesta visão geral, vamos nos concentrar em sensores baseados em FBG para o SHM, isso porque esses são os sensores utilizados nos testes de *software* propostos neste trabalho. A Figura 7 classifica as tecnologias de sensores ópticos, a saber, de acordo com o princípio de medição e a Tabela 3 resume as principais características dessas tecnologias.

Figura 7 – Classificação da tecnologia de sensores ópticos.



Fonte: Produzido pelo autor

Tabela 3 – Síntese dos tipos de sensores ópticos e seus desempenhos típicos.

		<b>SOFO</b>	<b>Fabry-Perot</b>	<b>FBG</b>	<b>Raman</b>	<b>Brillouin</b>
Tipo		Long-gauge	Pontual	Pontual	Distribuído	Distribuído
Principais parâmetros medidos		Deform. Tensão Inclinação Força	Tensão Temper. Pressão	Tensão Temper. Aceleração Nível água	Temper.	Tensão Temper.
Multiplexação		Paralela	Paralela	1 fibra e paralela	Distribuída	Distribuída
Quant. sensores (1 fibra)		1	1	10-50	10000	30000
Precisão	Tensão ( $\mu\varepsilon$ )	1	1	1		20
	Deform. ( $\mu m$ )	1	100	1		
	Temper. ( $^{\circ}C$ )		0,1	0,1	0,1	0,2
	Inclinação ( $\mu rad$ )	30				
	Pressão (%)		0,25			
Alcance		20 m			8 km	30-150 km
Tipo de fibra		monomodo	multimodo	monomodo	multimodo	monomodo

Fonte: Glisic e Inaudi (2007)



O sistema SOFO (acrônimo para “monitoramento estrutural por fibras ópticas”) é um sensor óptico *long-gauge* de deformação com uma resolução na faixa de micrômetros, com excelente estabilidade a longo prazo e insensibilidade à temperatura (ROCTEST-GROUP, 2014). Ele foi desenvolvido no Instituto Federal Suíço de Tecnologia (Lausanne) e agora é comercializado pela SMARTEC e pelo Grupo Roctest.

Interferômetros Fabry-Perot são constituídos por um tubo capilar de sílica contendo duas fibras ópticas clivadas voltadas uma para o outra, deixando uma folga de ar de poucos micrômetros ou dezenas de micrômetros entre elas. Quando a luz é lançada em uma das fibras, um sinal de interferência refletida é obtido (TAYLOR, 2008). Isso ocorre devido à reflexão da luz incidente sobre as interfaces vidro-ar e ar-vidro. Essa interferência pode ser desmodulada utilizando técnicas coerentes ou de baixa coerência para reconstruir as mudanças no espaçamento entre as fibras (WANG et al., 2013). Uma vez que as duas fibras são ligados ao tubo capilar próximo às suas duas extremidades (com um espaçamento típico de 10 mm), a mudança na folga irá corresponder à variação média de tensão entre os dois pontos de fixação.

A técnica de sensoriamento Raman requer filtragem para isolar os componentes de frequência mais relevantes (UKIL; BRAENDLE; KRIPPNER, 2012). Isso consiste em registrar a relação entre a amplitude de anti-Stokes e a amplitude de Stokes, a qual contém a informação da temperatura (GUO et al., 2012). Uma vez que a magnitude da luz retrodispersa é bastante baixa, fibras multimodo de abertura numérica elevada são usadas com o objetivo de maximizar a intensidade guiada da luz retrodispersa. No entanto, as características de atenuação relativamente elevadas das fibras multimodo limitam a distância de sistemas sensores baseados no espalhamento Raman em torno de 8 km.

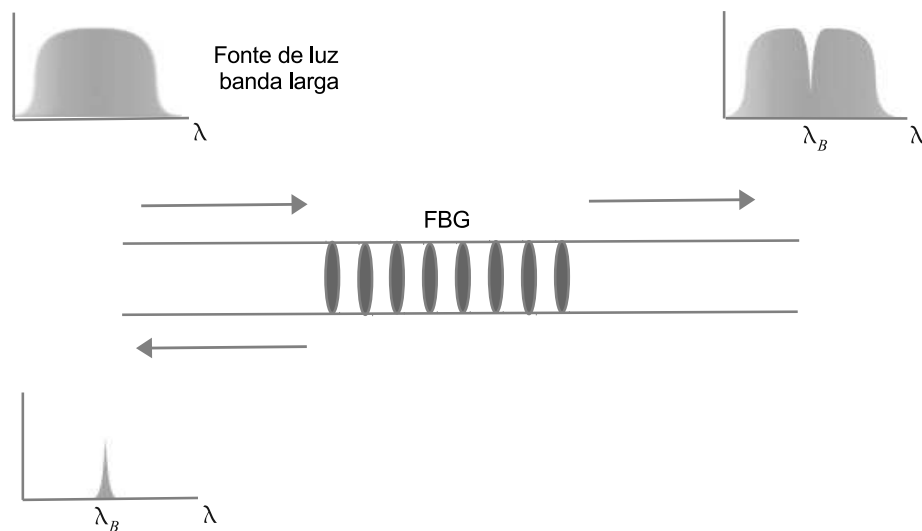
O espalhamento Brillouin ocorre devido a uma interação entre o sinal óptico propagante e ondas acústicas excitadas termicamente (na faixa de gigahertz) presentes na fibra de sílica, dando origem a componentes de frequência deslocados. Esse efeito pode ser visto como a difração da luz sobre uma grade dinâmica gerada por uma onda acústica (uma onda acústica é, na verdade, uma onda de pressão que apresenta uma modulação do índice de refração através do efeito fotoelástico) (UKIL; BRAENDLE; KRIPPNER, 2012). A luz difratada experimenta um desvio Doppler, uma vez que a luz se propaga com a velocidade acústica na fibra. A velocidade acústica está diretamente relacionada com a densidade do meio que é dependente da temperatura e da tensão (LUO et al., 2013). Como resultado, o chamado deslocamento de frequência de Brillouin transporta a informação sobre a temperatura e a tensão local na fibra.

### 2.3.1 Sensores ópticos FBG

Grades de Bragg são alterações periódicas no índice de refração do núcleo da fibra, que podem ser produzidas por exposição adequada da fibra à luz ultravioleta intensa. As

grades produzidas possuem tipicamente comprimentos da ordem de 10 mm (ZHANG, 2008). Se uma fonte de luz sintonizável é injetada na fibra que contém a grade, o comprimento de onda correspondente ao pico da grade será refletido, enquanto todos os outros comprimentos de onda passam através da grade sem perturbações (TOSI et al., 2009), como representado na Figura 8. Uma vez que o período da grade é dependente da tensão e da temperatura, torna-se possível medir esses dois parâmetros por intermédio da análise de intensidade da luz refletida como uma função do comprimento de onda. Isso é tipicamente realizado utilizando um laser sintonizável contendo um filtro de comprimento de onda (tal como uma cavidade de Fabry-Perot) ou um espectrômetro.

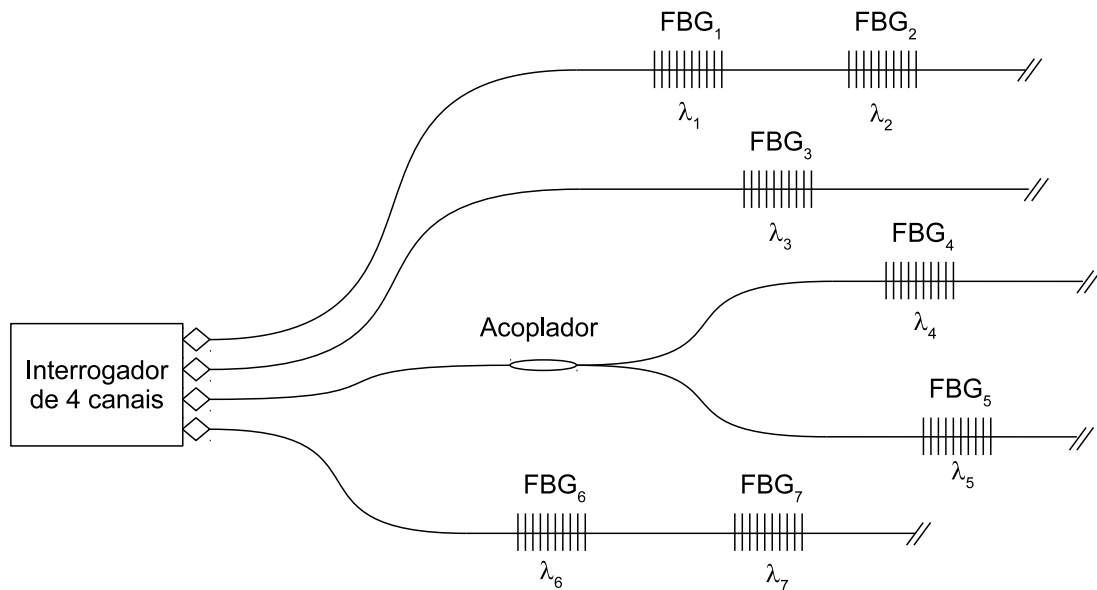
Figura 8 – Princípio funcional de sensores ópticos FBG.



Fonte: Produzido pelo autor

As resoluções da ordem de  $1 \mu\epsilon$  e  $0,1^\circ\text{C}$  podem ser alcançadas com os melhores demoduladores. Se variações de tensão e temperatura são esperadas simultaneamente, então é necessária a utilização de uma grade de referência livre que mede somente a temperatura, fazendo uso de sua leitura para corrigir os valores de tensão (ADHAMI, 2012). Configurações permitindo a medição simultânea de tensão e temperatura têm sido propostas, mas ainda necessitam provar a sua confiabilidade em condições de campo (LEE, 2008). O principal interesse no uso de grades de Bragg reside no seu potencial de multiplexação. Muitas grades podem ser escrita na mesma fibra em diferentes locais e ajustadas para refletir comprimentos de onda diferentes. Isso permite a medição da tensão em locais diferentes ao longo de uma fibra utilizando um único cabo, como mostrado na Figura 9. Normalmente, 4-16 grades podem ser lidas em uma única fibra. Deve ser notado que, uma vez que as grade compartilham o espectro da fonte utilizada para iluminá-las, existe um balanceamento entre o número de grades e o intervalo dinâmico das medições em cada uma delas.

Figura 9 – Multiplexação de sensores ópticos FBG.



Fonte: Produzido pelo autor

Um grande número de técnicas de medição e instrumentos para a demodulação de sensores FBG estão disponíveis, diferindo em termos de precisão do comprimento de onda e alcance, assim como nas propriedades de sensoriamento dinâmicas (LEE, 2008). Os demoduladores ou interrogadores comerciais estão disponíveis a partir da FiberSensing (FIBERSENSING, 2014), MicronOptics (MICRONOPTICS, 2014), SMARTEC (SMARTEC, 2014) e muitas outras empresas em todo o mundo.

## 3 Metodologia proposta

### 3.1 Divisão de responsabilidades entre os *softwares*

Considerando a atividade de gerenciamento de dados no processo de SHM, suas subatividades são: execução de medições (leituras dos sensores), armazenamento de dados (local ou remoto), acesso aos dados, visualização, exportação dos dados, interpretação, análise dos dados e uso dos dados (avisos e alarmes). Essas subatividades foram divididas entre os *softwares* InterAB e WbS.

O InterAB é responsável pela execução de medições, armazenamento de dados e acesso aos dados. Por sua vez, o WbS realiza a visualização, exportação, interpretação, análise e uso dos dados. Dessa forma, existe uma separação de responsabilidades entre as aplicações com o objetivo de torná-las totalmente independentes.

Quando o InterAB e o WbS trabalham de forma integrada e sincronizada, temos um *software* de monitoramento que realiza todas as subatividades da atividade de gerenciamento de dados do processo de SHM.

Nas próximas seções será mostrada de que forma as subatividades foram implementadas nos *softwares* e como foi realizada a integração entre essas aplicações.

### 3.2 Análise e projeto de *software*

Na construção de sistemas de *software* há uma gradação de complexidade. Para a construção de sistemas de *software* mais complexos é necessário um planejamento inicial com levantamento de requisitos. Essa necessidade leva ao conceito de modelo, tão importante no desenvolvimento de sistemas. De uma perspectiva mais ampla, um modelo pode ser visto como uma representação idealizada de um sistema a ser construído. São várias as razões para se utilizar modelos na construção de sistemas, como: melhor gerenciamento da complexidade, comunicação entre as pessoas envolvidas, redução dos custos no desenvolvimento e previsão do comportamento futuro do sistema.

Dessa forma, a modelagem de sistemas de *software* consiste na utilização de notações gráficas e textuais com o objetivo de construir modelos que representam as partes essenciais de um sistema, considerando-se várias perspectivas diferentes e complementares. Em particular, para este trabalho foi utilizada a linguagem de modelagem unificada (*Unified Modeling Language* - UML) (OMG, 2014) para a construção de modelos.

A atividade de levantamento de requisitos (também conhecida como elicitaco de requisitos) corresponde à etapa de compreensão do problema aplicada ao desenvolvimento de *software*. Formalmente, um requisito é uma condio ou capacidade que deve ser alcançada ou possuída por um sistema ou componente deste para satisfazer um contrato, padrão, especificao ou outros documentos formalmente impostos. O produto do levantamento de requisitos é o documento de requisitos, que declara os diversos tipos de requisitos do sistema. As principais seoes de um documento de requisitos são: requisitos funcionais (definio das funcionalidades do sistema) e requisitos não-funcionais (declarao das características de qualidade que o sistema deve possuir e que estão relacionadas às suas funcionalidades).

Um sistema pode ser modelado considerando os aspectos estruturais esttico e dinâmico. O aspecto estrutural esttico permite compreender como o sistema está estruturado internamente para que as funcionalidades externamente visíveis sejam produzidas. Por sua vez, o aspecto estrutural dinâmico descreve a troca de mensagens entre os objetos do sistema e a reao dos objetos a eventos que ocorrem no sistema.

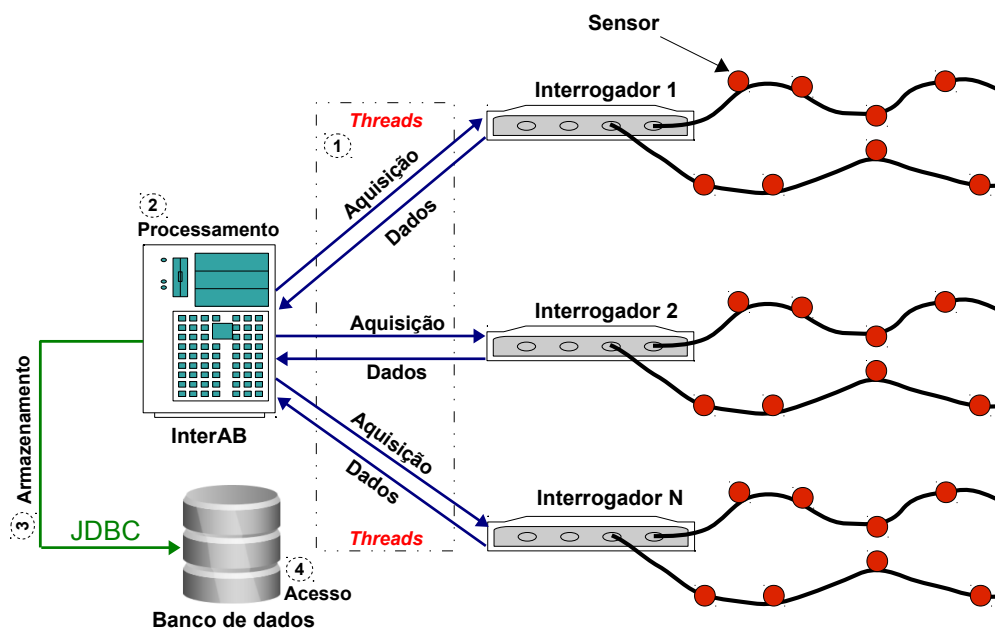
Para os *softwares* InterAB e WbS, o levantamento de requisitos foi representado pelo documento de requisitos, o aspecto estrutural esttico foi representado pelo modelo ou diagrama de classes e o aspecto estrutural dinâmico foi representado pelos diagramas de atividades e de sequência, os quais serão apresentados posteriormente.

## 3.3 Modelagem do *software* InterAB

### 3.3.1 Objetivo de desenvolvimento

O objetivo foi desenvolver um *software* Java cliente-servidor, denominado InterAB, capaz de realizar a comunicao com os interrogadores ópticos, identificar a topologia da rede de sensores, aquisio, filtrao/compressão (processamento) e armazenamento/persistência da topologia reconhecida e dos dados de monitoramento em um banco de dados relacional. É de responsabilidade do InterAB as subatividades de requerer as leituras dos sensores, armazenar essas leituras em uma base de dados e promover o acesso às leituras através do armazenamento consolidado no banco de dados.

O funcionamento geral do InterAB é mostrado na Figura 10. Na primeira etapa são realizadas aquisioes paralelizadas (*threads*) das leituras dos sensores através da comunicao via TCP/IP com o interrogador óptico. Em seguida, é realizado um processamento nessas leituras, que caracteriza-se pela filtrao/compressão dos dados. Posteriormente, os dados processados são armazenados na base de dados relacional através de comunicao *Java Database Connectivity* (JDBC) (ORACLE, 2014d). Finalmente, os dados podem ser acessados por qualquer aplicao que obtenha comunicao com o banco de dados.

Figura 10 – Funcionamento geral do *software* InterAB.

Fonte: Produzido pelo autor

### 3.3.2 Levantamento de requisitos

O documento de requisitos para o *software* InterAB é apresentado a seguir:

- Requisitos funcionais

1. O *software* deve persistir os interrogadores, a topologia das redes de sensores ópticos e as leituras geradas pelos sensores em uma base de dados relacional;
2. O *software* deve possibilitar testes de conexão com os interrogadores antes de inserções no banco de dados;
3. O *software* deve identificar automaticamente a topologia da rede de sensores ópticos em torno de um interrogador;
4. O *software* deve manter a base de dados atualizada, inserindo novas leituras geradas pelos sensores ópticos;
5. O *software* deve permitir a inicialização automática de aquisições de dados;
6. O *software* deve realizar a varredura de múltiplos interrogadores paralelamente;
7. O *software* deve aplicar técnicas de filtragem/compressão de dados sempre que for possível, objetivando reduzir o número de registros no banco de dados;
8. O *software* deve identificar e resolver automaticamente a entrada e/ou a saída de sensores da rede.

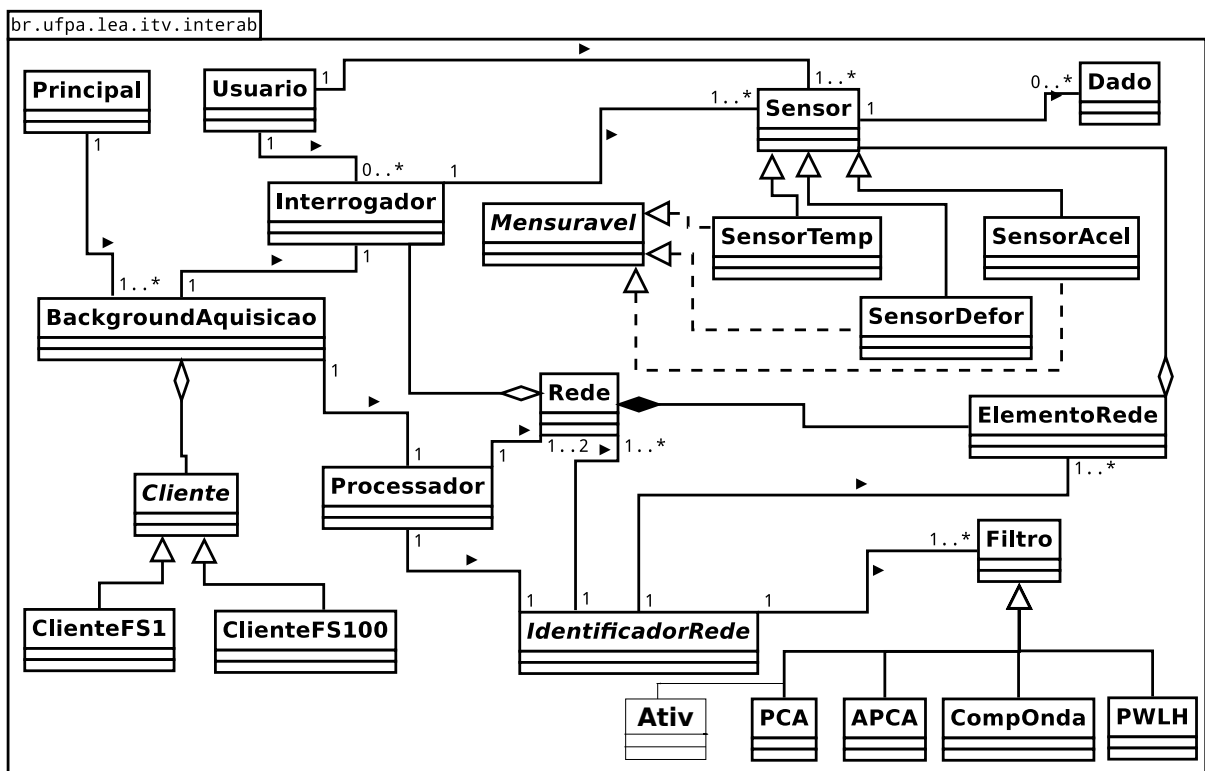
- Requisitos não-funcionais

1. O *software* deve possuir portabilidade de sistema operacional;
2. O *software* deve realizar aquisições com tempo de resposta semelhante a taxa de varredura dos interrogadores;
3. O *software* deve ser uma ferramenta computacional aberta e extensiva (susceptível à modificações e capaz de agregar novas funcionalidades);
4. O *software* deve possuir robustez no sentido de recuperação de falhas na rede de comunicação ou nos dispositivos sensores.

### 3.3.3 Modelagem estática

O diagrama de classes do *software* InterAB é apresentado na Figura 11. Esse modelo apresenta com notação resumida (atributos e métodos foram suprimidos) todas as classes que compõem o *software*, ressaltando seus relacionamentos de associação (agregação e composição) e de herança. A seguir é realizada uma descrição acerca das classes do InterAB, focando nos relacionamentos entre elas de maneira a produzir as funcionalidades requisitadas para o *software*.

Figura 11 – Diagrama de classes do *software* InterAB.



Fonte: Produzido pelo autor

- Classes **Usuario**, **Interrogador**, **Sensor** e **Dado**: são as classes básicas de persistência de dados do *software*, que possuem métodos de inserção, leitura, atualização e exclusão no banco de dados. O usuário, previamente cadastrado no sistema, poderá realizar a adição de vários interrogadores. Por sua vez, os interrogadores apresentam sensores ópticos em seus canais. Esses sensores serão identificados, persistidos e associados ao usuário logado no sistema no momento da identificação. Posteriormente, inicia-se as aquisições de dados gerados pelos sensores e o armazenamento dessas leituras no banco de dados.
- Classes **Cliente**, **ClienteFS1** e **ClienteFS100**: são as classes que implementam o protocolo de comunicação de interrogadores. A classe abstrata **Cliente** define os atributos e os protótipos de métodos genéricos que devem ser implementados por outras classes que objetivam realizar a comunicação entre determinado interrogador e o InterAB. As classes **ClienteFS1** e **ClienteFS100** são as implementações concretas de **Cliente** para a comunicação entre o InterAB e os interrogadores utilizados neste trabalho. Portanto, o InterAB pode interagir com qualquer interrogador mediante a implementação dos métodos genéricos definidos em **Cliente**.
- Classes **SensorTemp**, **SensorDefor**, **SensorAcel** e interface **Mensuravel**: são as classes e a interface relacionadas ao cálculo das grandezas temperatura, deformação e aceleração a partir de deslocamentos do comprimento de onda de pico de sensores FBG. As classes **SensorTemp**, **SensorDefor** e **SensorAcel** possuem relacionamentos de herança com a classe **Sensor**, ou seja, qualquer sensor de temperatura, deformação ou aceleração obrigatoriamente é um sensor genérico, herdando todos os atributos e os métodos da superclasse. A interface **Mensuravel** define os protótipos de métodos de determinação de grandeza que devem ser implementados pelas subclasses que tenham sua grandeza definida (temperatura, deformação ou aceleração).
- Classes **Identificador**, **Rede** e **Filtro**: são as classes responsáveis pela identificação automática da topologia e pela filtragem/compressão de dados de uma rede de sensores ópticos conectada em determinado interrogador. A classe **Identificador** determina a quantidade de sensores FBG e em quais canais do interrogador eles estão alocados, criando objetos do tipo **ElementoRede** e formando uma estrutura de dados localizada em memória. Essa estrutura é representada por um objeto da classe **Rede** que, por sua vez, é composta por objetos da classe **ElementoRede** e por um objeto **Interrogador**. A classe **ElementoRede** representa o sensor genérico identificado e associado à sua última leitura. A estrutura de dados completa será persistida pela classe **Processador** e poderá ser atualizada mediante a aplicação de filtros definidos pelo usuário. Esses filtros objetivam verificar variações abruptas de determinada grandeza, como a temperatura, deformação ou aceleração. As classes



CompOnda, Ativ, PCA, APCA e PWLH são as técnicas de filtragem/compressão de dados disponíveis no InterAB e que serão abordadas posteriormente.

- **Classe Processador:** é a classe responsável por disparar o processamento de identificação da topologia de redes de sensores, o comparativo entre topologias de redes de sensores, a atualização de leituras geradas pelos sensores e o armazenamento da estrutura de dados gerada pelo **Identificador**. Um objeto **Processador** dispara a identificação de duas redes de sensores ópticos para um interrogador; uma rede que já foi persistida no banco e outra rede atual. Terminada a tarefa de identificação das redes, ocorre a comparação entre elas de modo a verificar inclusões (ou retiradas) de sensores nos canais do interrogador, assim como são realizadas comparações entre as leituras geradas pelos sensores que estão persistidas no banco com as leituras atuais, considerando os filtros aplicados pelo **Identificador** e definidos pelo **Usuario**.
- **Classes Principal e BackgroundAquisicao:** são as classes que gerenciam as principais ações do *software*. A classe **Principal** dispara objetos do tipo **BackgroundAquisicao** sob demanda para tratar paralelamente as aquisições de dados em múltiplos interrogadores. A classe **BackgroundAquisicao** é do tipo **SwingWorker** (ORACLE, 2014a), o que possibilita a execução de tarefas em *background* por intermédio de *threads* dedicadas. Dessa forma, cada objeto **BackgroundAquisicao** utiliza um objeto **Processador** para tratar a rede de sensores ópticos em torno de determinado interrogador e todo o processamento é realizado em *background*, fornecendo atualizações acerca das aquisições realizadas para a classe **Principal**.

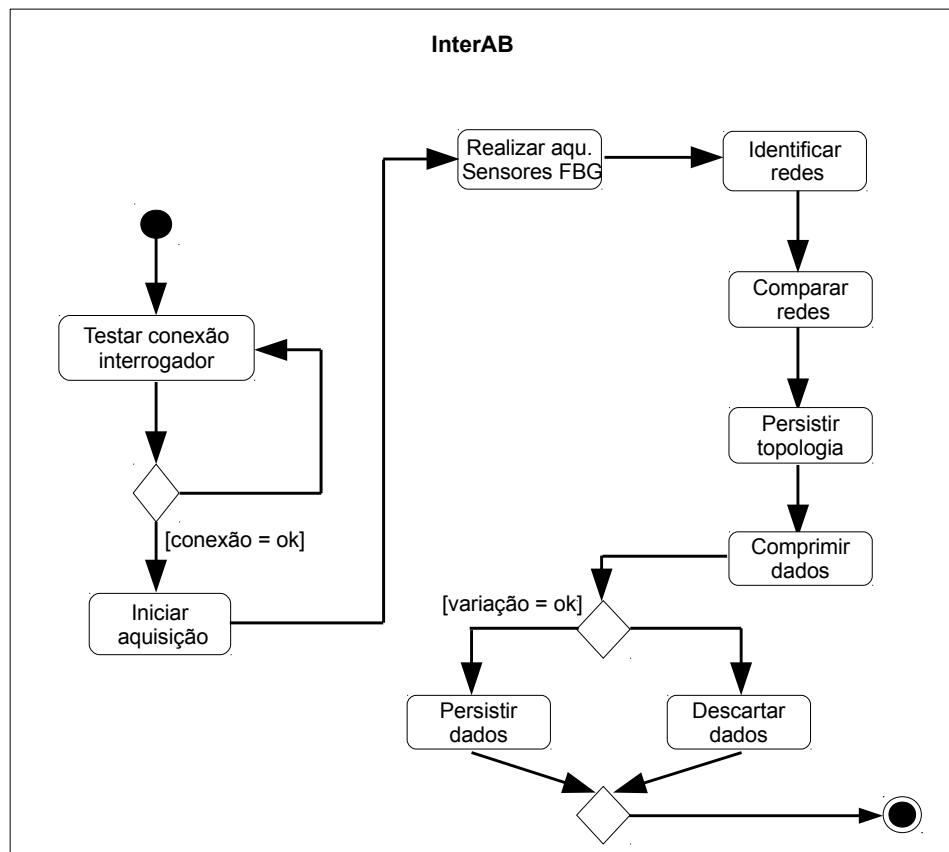
### 3.3.4 Modelagem dinâmica

Como já descrito anteriormente, o diagrama de atividades representa o *software* InterAB sob a perspectiva estrutural dinâmica. Portanto, por intermédio desse modelo é possível modelar as reações do *software* a eventos que possam ocorrer durante a aquisição, processamento e armazenamento.

O diagrama de atividades geral do *software* InterAB é apresentado na Figura 12. Esse diagrama apresenta apenas uma raia com as atividades realizadas sem a intervenção do usuário, haja vista que o InterAB foi desenvolvido para realizar a coleta múltipla, simultânea, automática e com armazenamento de dados. Considerando que um usuário já tenha sido cadastrado no banco de dados, o *software* começa a responder a partir do momento que esse usuário adicionou pelo menos um interrogador na base de dados. De uma maneira geral, o InterAB então coleta os comprimentos de onda de pico de sensores FBG pela primeira vez, identificando a rede atual de sensores conectada ao interrogador e realizando uma comparação dela com outra possível rede já persistida no banco de dados para o mesmo interrogador. Em seguida, a topologia da rede de sensores é persistida e os

dados coletados são filtrados/comprimidos. No caso em que os dados coletados apresentam variações abruptas (definidas pelo usuário) em comparação com os dados que estão na base de dados, essas leituras coletadas são então persistidas; em caso contrário, as leituras coletadas são descartadas. O *software* então inicia um novo ciclo de aquisição de dados.

Figura 12 – Diagrama de atividades geral do *software* InterAB.



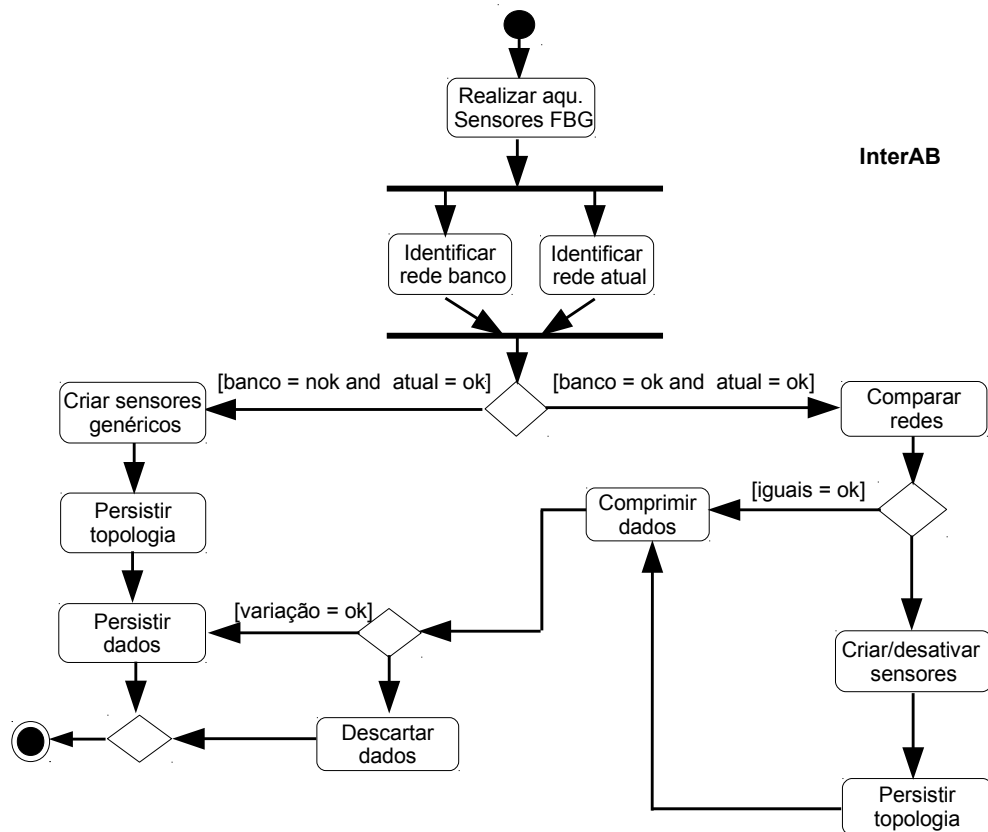
Fonte: Produzido pelo autor

Para efeitos de desempenho, a modelagem dinâmica do *software* InterAB considera que a qualquer momento um novo interrogador pode ser testado ou adicionado pelo usuário sem interromper o processamento de aquisições. Além disso, quando um novo interrogador é adicionado, o próximo ciclo de aquisição de dados já passa a considerar esse novo equipamento como elegível para aquisição.

Uma modelagem mais específica das atividades do sistema InterAB pode ser observada na Figura 13. Esse modelo considera uma expansão da raia mostrada no diagrama da Figura 12. Após a aquisição de comprimentos de onda de pico de sensores FBG ocorre a identificação das redes atual e persistida. Quando ainda não existe rede persistida e uma rede de sensores é detectada para um determinado interrogador óptico, os sensores identificados são criados como sensores genéricos e a topologia da rede de sensores é persistida. Neste momento, as leituras geradas pelos sensores começam a ser coletadas e

persistidas. Por outro lado, quando já existe rede persistida e existe rede atual, é realizado um comparativo entre as redes de maneira a verificar se as topologias são idênticas. Caso as topologias sejam iguais, os dados da rede atual são filtrados/comprimidos e serão persistidos se apresentarem variações abruptas quando comparados aos dados já armazenados no banco de dados. Se as topologias forem diferentes, é realizada uma normalização na topologia persistida em banco, criando sensores genéricos para sensores que tenham sido adicionados aos canais do interrogador e/ou desativando sensores que tenham sido retirados dos canais com base na topologia da rede atual. Em seguida, as alterações na topologia são persistidas e os dados da rede atual são filtrados/comprimidos e comparados com os dados já persistidos. Todos esses eventos ocorrem inúmeras vezes de modo automático até que o *software* seja encerrado.

Figura 13 – Diagrama de atividades específico do *software* InterAB.



Fonte: Produzido pelo autor

No diagrama da Figura 13 foram considerados os dois principais casos: as redes persistida e atual existem e serão comparadas; e somente a rede atual existe, caso em que não há comparações. Para o caso em que não existe nenhuma das duas redes, o *software* apenas notifica, através de uma mensagem de alerta, o usuário que nenhuma rede foi identificada. No caso em que apenas a rede persistida existe, nenhuma ação é tomada para atualização da topologia da rede e os dados são coletados, filtrados e persistidos.

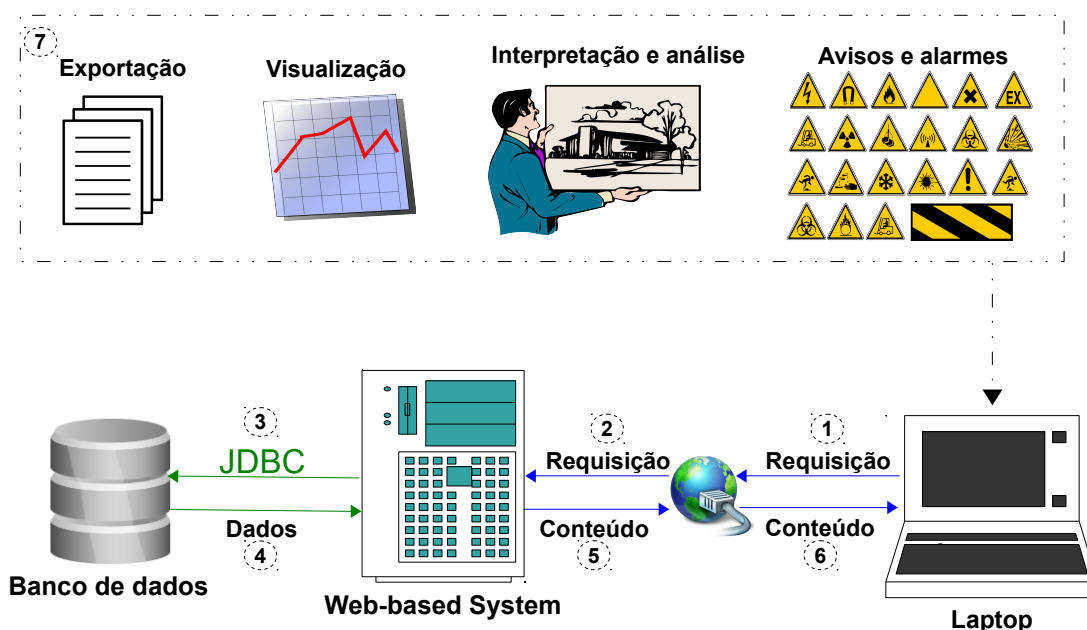
### 3.4 Modelagem do *software* WbS

#### 3.4.1 Objetivo de desenvolvimento

O objetivo foi desenvolver um *software* Java Web, denominado WbS, responsável pela recuperação, exportação, visualização e geração de avisos/alarmes a partir dos dados de monitoramento armazenados no banco de dados pelo InterAB ou qualquer outra aplicação. É de responsabilidade do WbS as subatividades de visualização, exportação, interpretação, análise e uso dos dados.

O funcionamento geral do WbS é mostrado na Figura 14. Primeiramente, um usuário da aplicação realiza uma requisição por conteúdo (por exemplo, dados para exportação, visualização, interpretação e análise, ou avisos e alarmes). Em seguida, a aplicação WbS recebe e processa a requisição de acordo com o que foi solicitado pelo usuário. Posteriormente, com base na requisição do usuário, o WbS recupera os dados correspondentes na base de dados relacional através de comunicação JDBC. Finalmente, os dados recuperados são apresentados ao usuário na forma de gráficos, tabelas, grafos, arquivos, formulários, avisos e alarmes.

Figura 14 – Funcionamento geral do *software* WbS.



Fonte: Produzido pelo autor

### 3.4.2 Levantamento de requisitos

O documento de requisitos para o *software* WbS é apresentado a seguir:

- Requisitos funcionais

1. O *software* deve permitir o cadastro, exclusão e alteração de interrogadores, sensores, curvas de calibração e usuários;
2. O *software* deve realizar a exportação dos dados armazenados no banco de dados em formato de arquivo texto, organizado em colunas e compatível com *softwares*, como MATLAB<sup>®</sup> (MATHWORKS, 2014), Octave<sup>®</sup> (EATON, 2014), RStudio<sup>®</sup> (RSTUDIO, 2014) e OriginLab<sup>®</sup> (ORIGINLAB, 2014);
3. O *software* deve apresentar a topologia da rede de sensores conectada ao interrogador na forma de grafo;
4. O *software* deve apresentar as técnicas de filtragem/compressão de dados disponíveis para a escolha do usuário;
5. O *software* deve apresentar gráficos de visualização das grandezas monitoradas pelos sensores;
6. O *software* deve estar integrado com um sistema de detecção de anomalias a partir dos sinais dos sensores. Esse sistema poder ser um motor de inferências Fuzzy ou um algoritmo de aprendizado de máquina não-supervisionado;
7. O *software* deve apresentar avisos e alarmes ao detectar comportamentos estruturais incomuns por intermédio da detecção de anomalias.

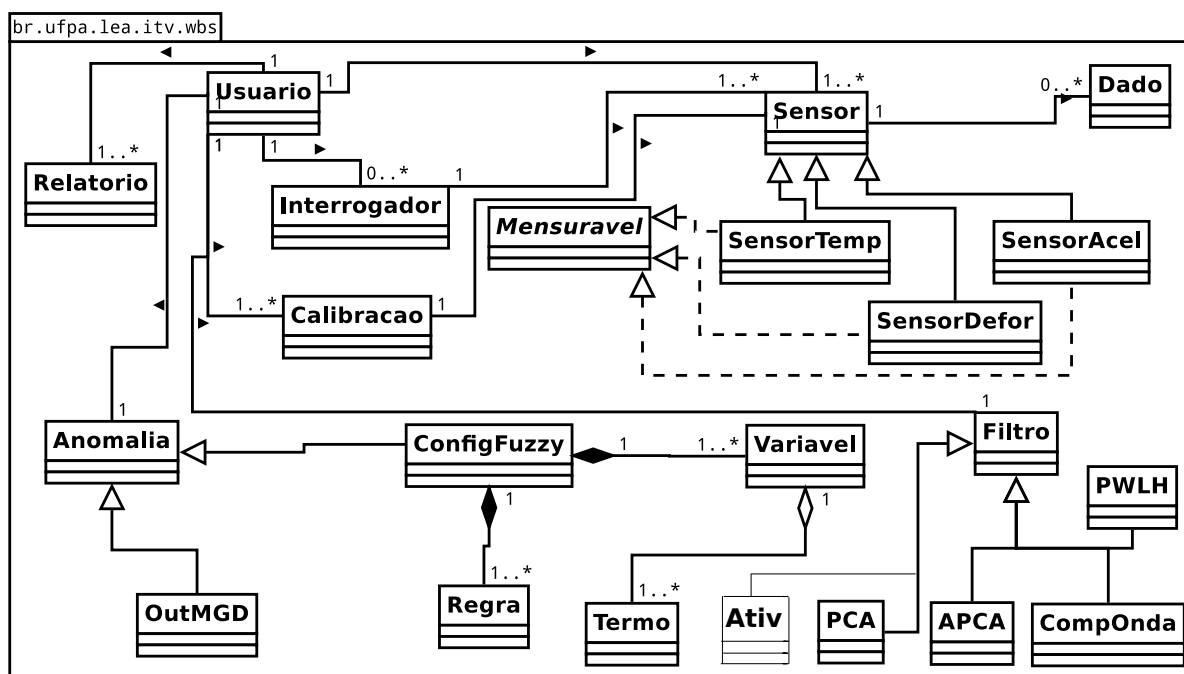
- Requisitos não-funcionais

1. O *software* deve possuir portabilidade de sistema operacional;
2. O *software* deve ser uma ferramenta computacional aberta e extensiva (susceptível à modificações e capaz de agregar novas funcionalidades);
3. O *software* deve possuir robustez no sentido de recuperação de falhas na rede de comunicação ou nos dispositivo sensores;
4. O *software* deve ser compatível com os Web *containers* Tomcat (APACHE, 2014b) e GlassFish (ORACLE, 2014c), com o servidor Web Apache HTTP (APACHE, 2014a) e com o servidor de aplicação JBoss (REDHAT, 2014b).

### 3.4.3 Modelagem estática

O diagrama de classes do *software* WbS é apresentado na Figura 15. Esse modelo apresenta com notação resumida (atributos e métodos foram suprimidos) todas as classes que compõem o *software*, com exceção das classes *JavaBeans* (ORACLE, 2014f) e das classes de configuração e gerenciamento do *framework* Hibernate (REDHAT, 2014a) (que serão destacadas posteriormente), ressaltando seus relacionamentos de associação (agregação e composição) e de herança. A seguir é realizada uma descrição acerca das classes do WbS, com exceção das classes já descritas na modelagem estática do InterAB, focando nos relacionamentos entre elas de maneira a produzir as funcionalidades requisitadas para o *software*.

Figura 15 – Diagrama de classes do *software* WbS.



Fonte: Produzido pelo autor

- Classes *Usuario*, *Interrogador*, *Sensor* e *Calibracao*: são as classes básicas de persistência de dados do *software*, que possuem métodos de inserção, leitura, atualização e exclusão no banco de dados. O usuário, com as devidas permissões, pode realizar o cadastro, alteração, visualização de informações e exclusão de interrogadores, sensores, curvas de calibração e usuários.
- Classes *Usuario*, *Interrogador*, *SensorTemp*, *SensorDefor*, *SensorAcel* e interface *Mensuravel*: são as classes e a interface relacionadas ao cálculo das grandezas temperatura, deformação e aceleração a partir de deslocamentos do comprimento de onda de pico de sensores FBG. O usuário pode visualizar os gráficos das grandezas

monitoradas pelos sensores e a topologia da rede de sensores em torno do interrogador na forma de grafo, e realizar a exportação dos dados dos sensores armazenados no banco de dados em formato de arquivo texto compatível com outros *softwares* de computação numérica, visualização e programação.

- Classes **Usuário** e **Filtro**: são as classes responsáveis pela filtragem/compressão de dados de uma rede de sensores ópticos conectada em determinado interrogador. Esses filtros objetivam verificar variações abruptas de determinada grandeza, como a temperatura, deformação ou aceleração. As classes **CompOnda**, **Ativ**, **PCA**, **APCA** e **PWLH** são as técnicas de filtragem/compressão de dados disponíveis no InterAB. O usuário pode selecionar, através do WbS, uma das técnicas de compressão de dados disponíveis para atuar no *software* InterAB.
- Classes **Usuário**, **Anomalia**, **ConfigFuzzy**, **Regra**, **Variavel** e **Termo**: são as classes responsáveis pela detecção de anomalias a partir de sinais dos sensores utilizando um motor de inferências Fuzzy. O usuário pode realizar várias configurações Fuzzy diferentes, que são compostas por variáveis e regras (que são compostas por termos). Uma das configurações deve ser ativada, caso o motor de inferências seja escolhido como o sistema de detecção de anomalia em uso. Se detectada alguma anomalia são apresentados avisos e alarmes ao usuário.
- Classes **Usuário**, **Anomalia** e **OutMGD**: são as classes responsáveis pela detecção de anomalias a partir de sinais dos sensores utilizando um algoritmo de aprendizado de máquina não-supervisionado. O usuário pode selecionar o algoritmo **OutMGD** (que será detalhado posteriormente) para ficar ativo no *software* WbS. Se detectado algum comportamento incomum são apresentados avisos e alarmes ao usuário.
- Classes **Usuário** e **Relatorio**: o usuário, com as devidas permissões, pode cadastrar relatórios referentes ao processo de desenvolvimento dos *softwares* (documentação), assim como visualizá-los e obtê-los.

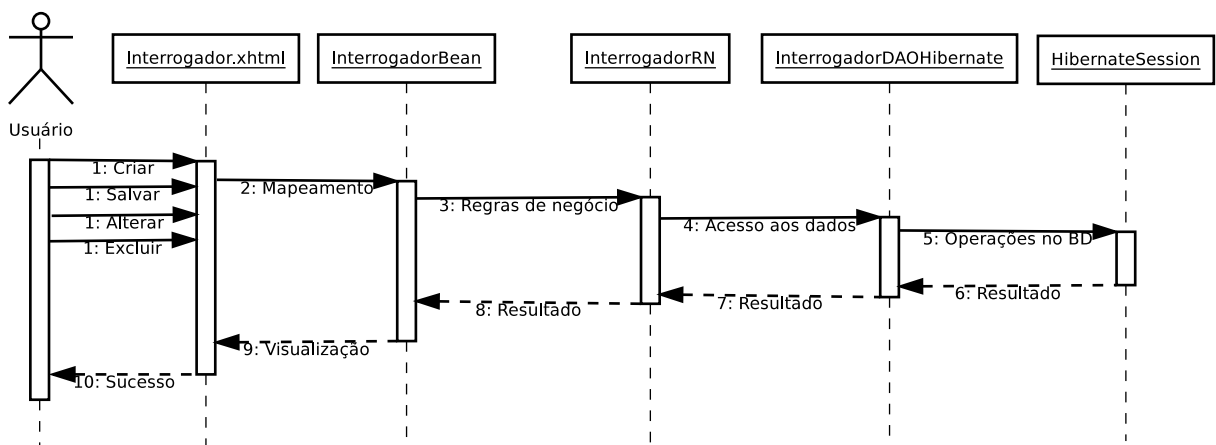
#### 3.4.4 Modelagem dinâmica

O *software* WbS possui uma hierarquia de colaboração entre páginas Web e classes Java para produzir determinada operação realizada pelo usuário. Essa hierarquia é conhecida como Modelo-Visão-Controle (*Model-View-Controller* - MVC), que caracteriza-se como um modelo de arquitetura de *software* que separa a interação do usuário do processamento e manipulação de dados. O modelo consiste nos dados da aplicação, regras de negócios, lógica e funções. Uma visão pode ser qualquer saída de representação dos dados, como uma tabela ou um gráfico. É possível existir várias visões do mesmo dado, como um gráfico de barras, uma visão tabular ou uma série histórica. O controlador realiza

a mediação da entrada, convertendo-a em comandos para o modelo ou visão. As ideias centrais do MVC são a reusabilidade de código e a separação de conceitos.

A arquitetura MVC para o exemplo de operações de criação, persistência, alteração ou exclusão de interrogador é apresentada na Figura 16. Quando o usuário realiza uma das operações, a página Web XHTML (*EXtensible HyperText Markup Language*), responsável pela visão, encaminha a operação para as classes JavaBeans (*InterrogadorBean*) e *InterrogadorRN*, responsáveis pelo controle. Por sua vez, o JavaBeans realiza o mapeamento das operações a partir de páginas Web para classes Java e a classe *InterrogadorRN* adiciona as regras de negócio (restrições) necessárias para a operação. As classes *InterrogadorDAOHibernate* e *HibernateSession*, responsáveis pelo modelo, submetem a operação do usuário aos métodos de acesso aos dados e à concretização da operação no banco de dados. Por fim, as classes do modelo devolvem os resultados da operação para o controlador, que repassa esses resultados para a visualização do usuário através da página Web. Esse exemplo de separação de conceitos e responsabilidades é válido para todas as classes do *software* WbS que realizem operações no banco de dados, como *Usuario*, *Sensor*, *Calibracao* e outras.

Figura 16 – Diagrama de sequência MVC para o WbS: criar, salvar, alterar ou excluir interrogador.

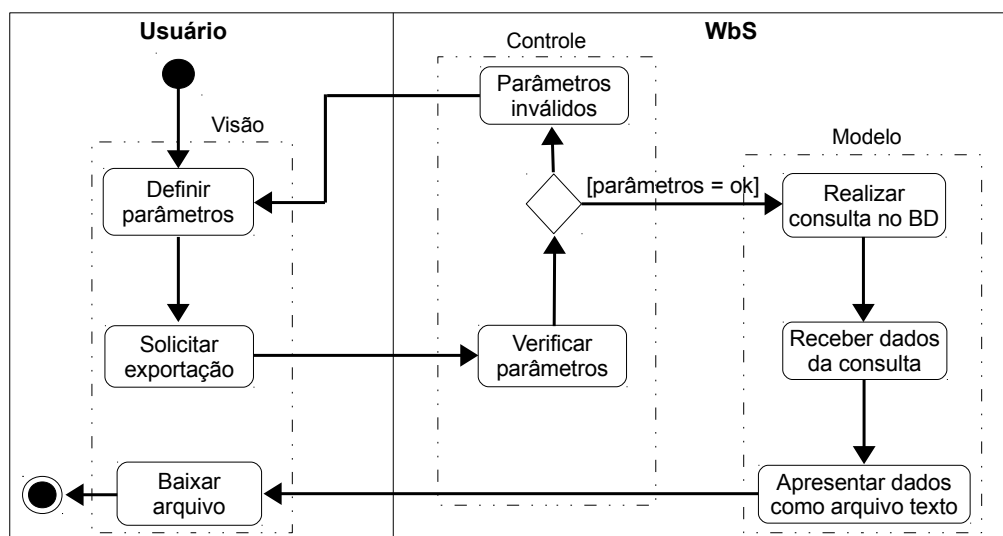


Fonte: Produzido pelo autor

O modelo de arquitetura de *software* MVC também pode ser observado na modelagem dinâmica das funcionalidades do WbS. O diagrama de atividades para a funcionalidade de exportação é apresentado na Figura 17. Esse modelo especifica as tarefas do usuário e do WbS para exportar os dados dos sensores na forma de um arquivo texto. As tarefas do usuário estão necessariamente ligadas com a visão (as páginas Web do WbS). Por outro lado, as tarefas do WbS estão associadas ao controle (verificações de parâmetros) e ao modelo (persistência e acesso aos dados no banco de dados).



Figura 17 – Diagrama de atividades para a funcionalidade de exportação.

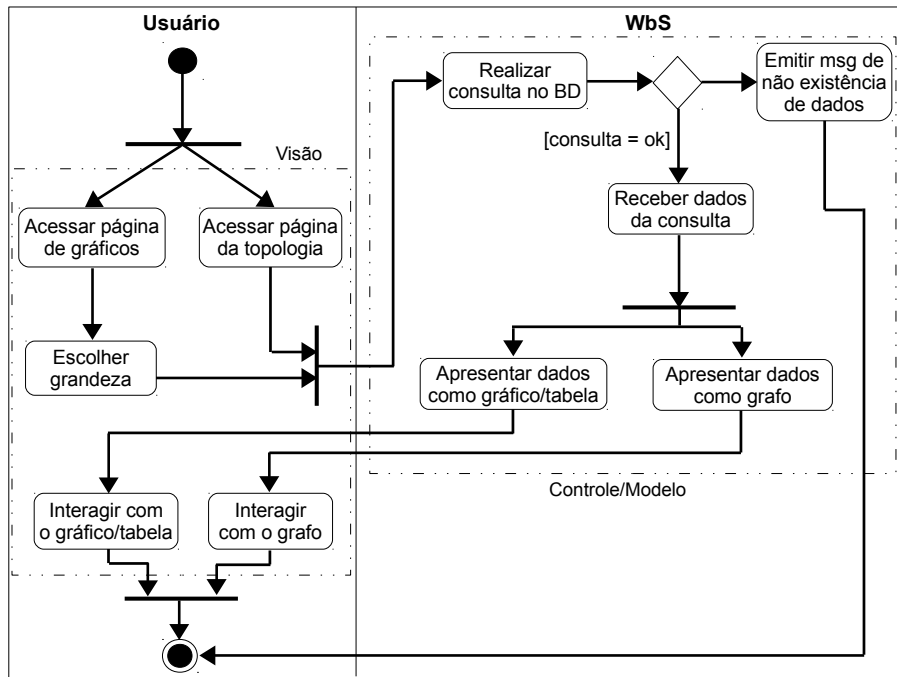


Fonte: Produzido pelo autor

O diagrama de atividades para a funcionalidade de visualização gráfica é apresentado na Figura 18. A visualização compreende os gráficos/tabelas das grandezas medidas pelos sensores e a topologia da rede de sensores em forma de grafo. Neste caso, a visão está associada com o acesso as páginas e com a interação do usuário com os gráficos, tabelas e grafo. Por outro lado, o controle e o modelo estão associados com as consultas e seus resultados, trabalhando sem separação de conceitos, haja vista que não se faz necessária a adição de regras de negócio, pois os dados serão apenas carregados para visualização.

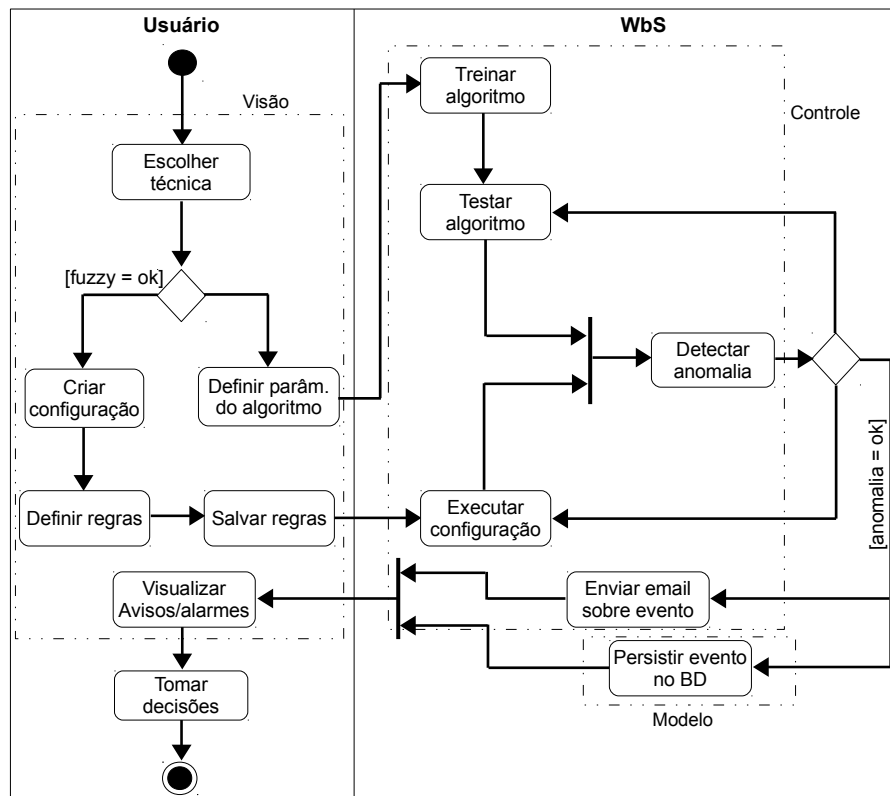
A funcionalidade de apresentar avisos e alarmes ao usuário é modelada no diagrama de atividades mostrado na Figura 19. Existem duas formas gerais de detecção de anomalias para a geração de avisos e alarmes: o motor de inferências Fuzzy e o algoritmo de aprendizado de máquina. Na visão, o usuário escolhe qual método de detecção será utilizado no *software*, definindo configurações e parâmetros necessários para o método selecionado. No controle e modelo são realizadas as tarefas do método escolhido para detectar e persistir a anomalia ou evento. Por fim, o usuário é notificado, através da camada de visão, de que possíveis comportamentos incomuns estão ocorrendo na estrutura monitorada, podendo tomar a decisão que julgar necessária.

Figura 18 – Diagrama de atividades para a funcionalidade de visualização.



Fonte: Produzido pelo autor

Figura 19 – Diagrama de atividades para a funcionalidade de avisos e alarmes.



Fonte: Produzido pelo autor

## 3.5 Projeto físico de banco de dados

A grande maioria das aplicações, independente de porte, precisam de dados persistentes para manter um registro histórico. Partindo desse princípio, pode-se dizer que o gerenciamento desses dados é de fundamental importância para o correto funcionamento de um sistema computacional. Levando esse conceito de gerenciamento de dados para *softwares* Java, como o InterAB e o WbS, geralmente ele se refere a armazenar/persistir dados em um banco de dados relacional e recuperá-los por meio dos recursos da linguagem. No projeto de banco de dados dos *softwares* foi utilizado o Sistema Gerenciador de Banco de Dados (SGBD) MySQL (ORACLE, 2014e), o *framework* de Mapeamento Objeto-Relacional Hibernate (*Object Relational Mapping* - ORM) (REDHAT, 2014a) e o padrão para persistência de dados Objeto de Acesso a Dados (*Data Access Object* - DAO) (ORACLE, 2014b).

Com o objetivo de apresentar o projeto de banco de dados dos *softwares*, a seguir será discutida de que forma o paradigma de orientação a objetos pode ser mapeado para uma base de dados relacional como o MySQL, assim como será mostrado o modelo físico do projeto e de que maneira ele colabora para a integração dos *softwares*.

### 3.5.1 Mapeamento Objeto-Relacional

Um banco de dados relacional utiliza uma abordagem diferente para armazenar informações, que nada se assemelha ao processo empregado em um sistema com base em objetos. Geralmente o processo de persistência envolvendo objetos se dá por meio da serialização destes, de modo que essa persistência de objeto se concentra em guardar o estado (valores) deste em disco e, em dada situação, recuperar o mesmo para fazer uso de suas informações. Essa abordagem tem uma limitação: é geralmente aplicada para persistir objetos simples, nos quais não há relacionamentos complexos envolvendo grandes estruturas de dados.

Apesar da técnica de serialização de objetos poder ser aplicada em projetos maiores, seu emprego geralmente não é recomendado devido às grandes operações de escrita/leitura que podem estar envolvidas em tais processos, além da certeza da perda de desempenho global do sistema (ORACLE, 2014d).

O JDBC (ORACLE, 2014d) é uma das maneiras mais práticas para desenvolver um *software* Java que interaja com um banco de dados relacional. Essa tecnologia atende a uma parte considerável das necessidades para operações das mais diversas naturezas. Contudo, conforme as aplicações evoluem, é sentida a necessidade de padronizar sua arquitetura, o padrão de codificação e as próprias operações SQL (*Structured Query Language*) realizadas por ela. Dessa forma, a adoção do *framework* Hibernate em um sistema tende a ser um caminho natural quando se visa algum tipo de padronização.

A técnica de Mapeamento Objeto-Relacional é uma forma automatizada e transparente de persistir objetos que pertencem a uma aplicação nas respectivas tabelas em um banco relacional, usando para isso tecnologias como o *framework* Hibernate, o qual descreve como realizar esse mapeamento entre objetos e banco de dados (REDHAT, 2014a).

Em essência, o Hibernate trabalha para fazer a transformação de dados de uma forma para outra de maneira completa e reversível. Essa solução ORM contém os seguintes pontos (REDHAT, 2014a):

- Uma API (*Application Programming Interface*) para realizar as operações CRUD (*Create, Read, Update and Delete*) básicas em objetos de classes persistentes;
- Uma linguagem ou API para especificar consultas que se referem às classes ou às propriedades das classes;
- Facilidade de especificar o metadado de mapeamento;
- Uma técnica para que a implementação ORM interaja com objetos transacionais permitindo executar verificações do tipo leitura suja (*dirty checking*) ou carregamento sob demanda (*lazy association fetching*).

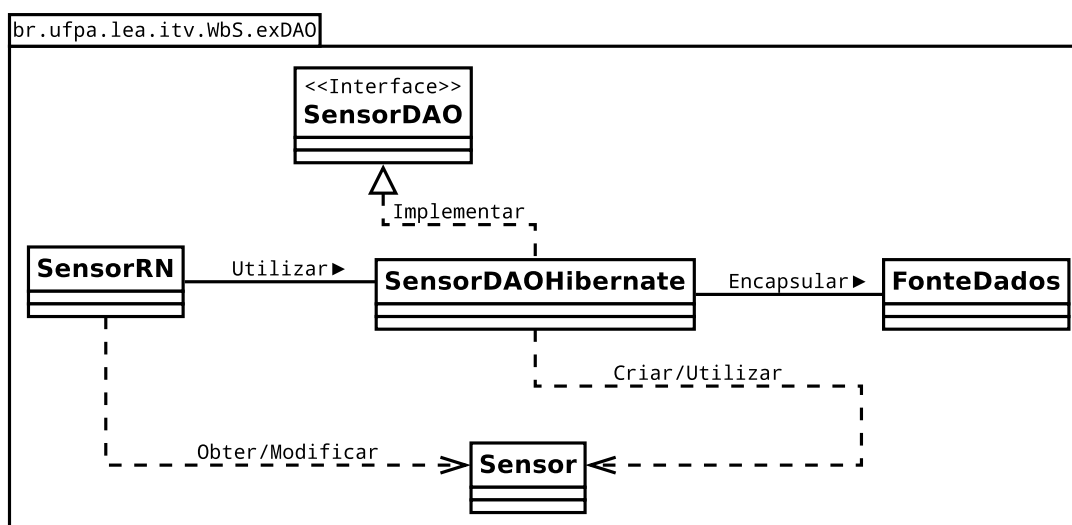
O acesso aos dados varia dependendo da fonte de dados. O acesso ao armazenamento persistente, como um banco de dados, varia muito, dependendo do tipo de armazenamento (bancos de dados relacionais, bancos de dados orientados a objetos, arquivos simples e assim por diante) e da implementação do fabricante. Adicionalmente a padronização proporcionada pela utilização do *framework* Hibernate, o padrão para persistência de dados DAO permite separar regras de negócio das regras de acesso ao banco de dados. No *software* WbS que utiliza a arquitetura MVC, todas as funcionalidades de bancos de dados, tais como obter as conexões, mapear objetos Java para tipos de dados SQL ou executar comandos SQL, são realizadas por classes DAO em conjunto com o Hibernate.

A vantagem de utilizar o padrão DAO é a separação simples e rigorosa entre duas partes importantes de um *software* que não devem e não podem conhecer muitos detalhes uma da outra, e que podem evoluir frequentemente e independentemente (ORACLE, 2014b). Mudanças nas regras de negócio podem contar com a mesma interface DAO, enquanto que modificações na lógica de persistência não alteram a lógica de negócio, desde que a interface entre elas não seja modificada.

O padrão DAO pode ser utilizado em uma diversidade de aplicações, escondendo todos os detalhes relativos ao armazenamento de dados do restante da aplicação. Ademais, esse padrão atua como um intermediário entre a aplicação e o banco de dados, mitigando problemas de comunicação entre a base de dados e a aplicação, evitando estados inconsistentes de dados. O diagrama de classes apresentado na Figura 20 exem-

plifica o padrão DAO, considerando a classe Java `Sensor` do *software* WbS. A classe `FonteDados` é a origem dos dados (relacional, orientado a objetos, arquivos, etc.). A classe `SensorDAOHibernate` é a classe concreta que implementa a interface `SensorDAO`, sendo responsável pelo acesso e persistência dos dados do `Sensor`. A classe `Sensor` é a classe do domínio e representa um sensor da rede, contendo os dados que transitam de/para a fonte de dados. Por fim, a classe `SensorRN` contém a lógica de negócio e usa uma instância da classe `SensorDAOHibernate` (um objeto) como uma interface com a fonte de dados.

Figura 20 – Diagrama de classes para exemplificar o padrão DAO.



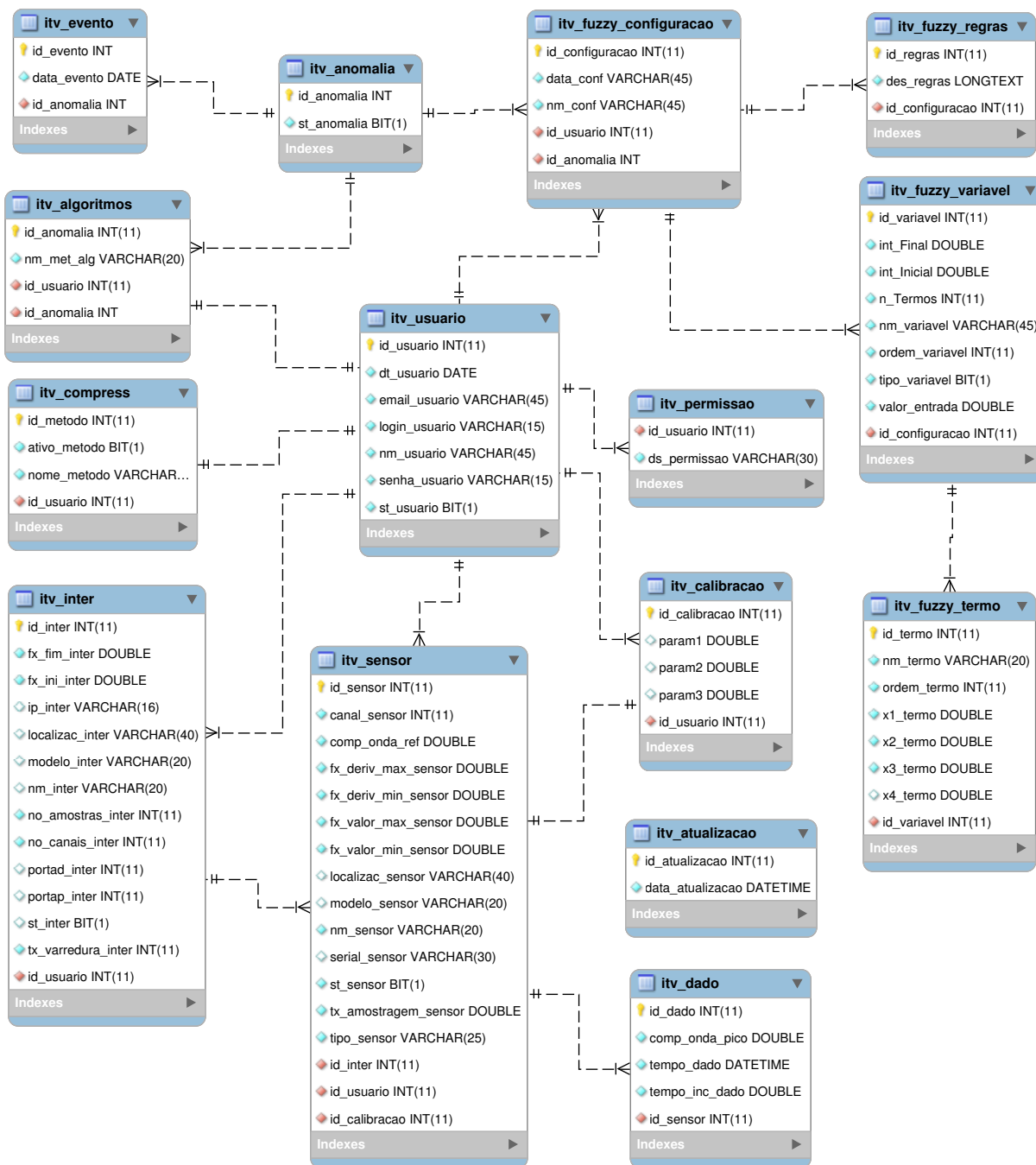
Fonte: Produzido pelo autor

### 3.5.2 Modelo físico

O modelo físico do banco de dados para os *softwares* InterAB e WbS é apresentado na Figura 21. Nesse modelo são especificadas as tabelas do banco de dados, os atributos das tabelas e seus domínios, os relacionamentos entre as tabelas e as chaves primárias e estrangeiras. Essa estrutura de tabelas é criada automaticamente e atualizada no banco de dados através das anotações (BERNARD, 2014) nas classes Java que são interpretadas e mapeadas para as tabelas do modelo relacional através do Hibernate.

Esta modelagem relacional traz como informação adicional de que maneira o banco de dados foi organizado para armazenar dados acerca de leituras de sensores, curvas de calibração, interrogadores, sensores, técnicas de filtragem/compressão de dados, métodos de detecção de anomalia, eventos, atualizações, usuários e permissões de usuário.

Figura 21 – Modelo físico do banco de dados.



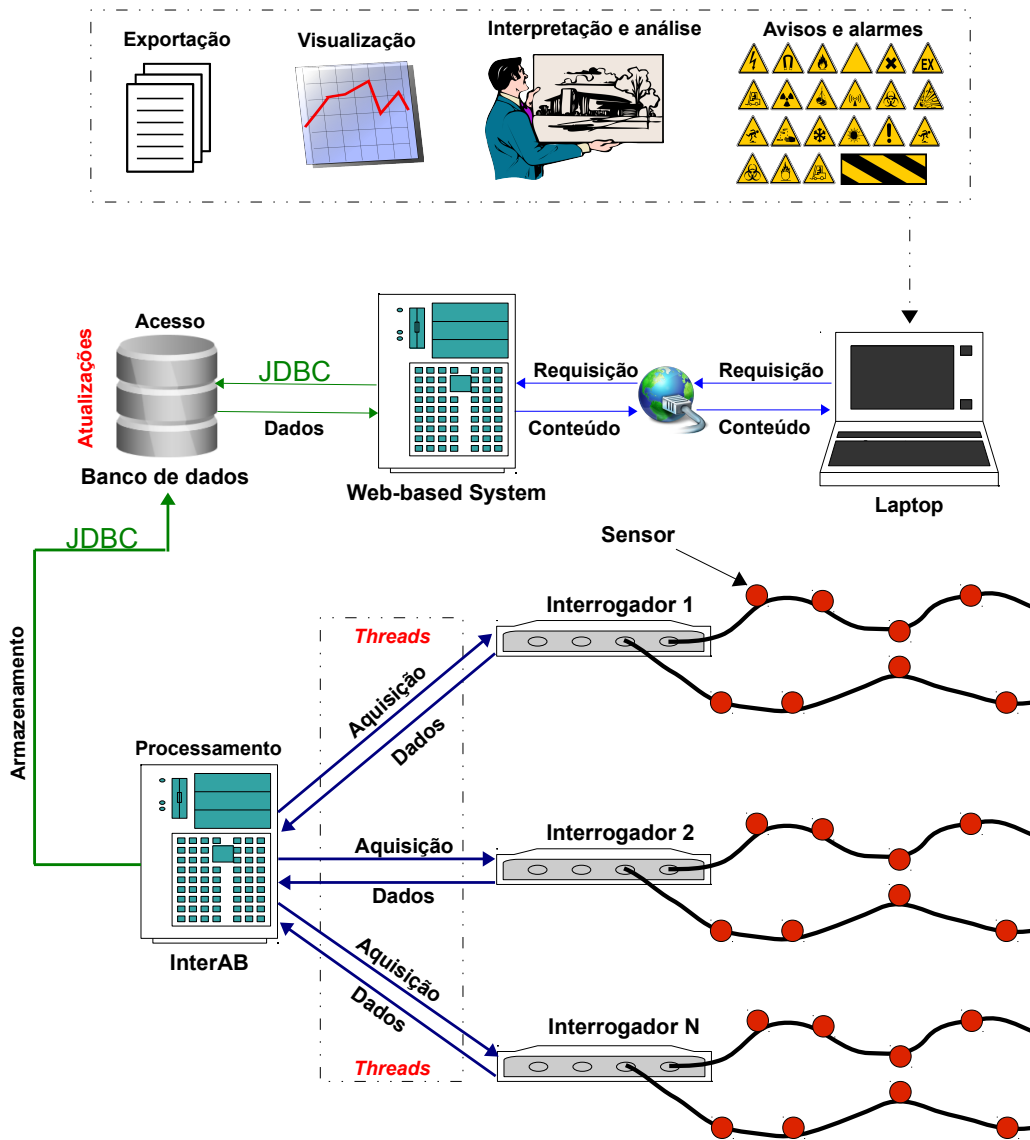
Fonte: Produzido pelo autor

### 3.5.3 Integração dos softwares através do banco de dados

O modelo físico apresentado na Figura 21 foi criado com o propósito de ser acessado pelas duas aplicações: InterAB e WbS. Especificamente, por intermédio da tabela *itv\_atualizacao*, a qual não possui nenhum relacionamento com outra tabela, é possível sincronizar e integrar os dois softwares usando um esquema semelhante ao problema do produtor-consumidor.

As duas aplicações compartilham a mesma base de dados. O produtor, neste caso o InterAB, insere os dados referentes às leituras dos sensores na tabela *itv\_dado*, assim como insere atualizações na tabela *itv\_atualizacao* como forma de notificar a aplicação consumidora de que novos dados de sensores foram persistidos. O WbS, no papel de consumidor, a todo o momento realiza a leitura da tabela de atualizações para saber se existem ou não novas leituras dos sensores armazenadas no banco de dados compartilhado. A Figura 22 apresenta os dois *softwares* trabalhando em conjunto através de notificações de atualizações no banco de dados compartilhado. Dessa maneira, se torna possível integrar as aplicações desenvolvidas na forma de um *software* de monitoramento que realize a atividade de gerenciamento de dados do processo de SHM.

Figura 22 – Integração dos *softwares*.



Fonte: Produzido pelo autor

## 3.6 Técnicas de filtragem e compressão de dados

Considerando um interrogador óptico com taxa de amostragem de 100 S/s<sup>1</sup> com apenas um sensor óptico, a Tabela 4 apresenta o crescimento da quantidade de registros armazenados no banco de dados caso todas as amostras do sensor tivessem que ser persistidas durante o tempo de monitoramento de uma determinada estrutura. É facilmente percebido que essa quantidade de registros pode sobrecarregar o armazenamento na base de dados com o passar do tempo, sem que necessariamente todos os dados apresentem informações significativas para o monitoramento de uma dada estrutura.

Tabela 4 – Crescimento linear da quantidade de registros no banco de dados.

<b>Tempo</b>	1 hora	12 horas	1 dia	1 semana	1 mês	1 ano
<b>Qt. dados</b>	360.000	4.320.000	8.640.000	60.480.000	264.000.000	3.140.000.000

Fonte: Produzido pelo autor

As técnicas de filtragem e compressão de dados implementadas no InterAB objetivam reduzir a quantidade de registros provenientes de uma rede de sensores ópticos que são persistidos no banco de dados, sem perda de informação que possa comprometer o processo de monitoramento. Em outras palavras, essas técnicas baseiam-se em critérios que proporcionam a redução de registros persistidos sem a perda de qualidade da informação, ou seja, com um número menor de amostras armazenadas ainda é possível identificar o comportamento da grandeza que está sendo medida pelo sensor dentro de uma faixa aceitável de erro. Foram implementadas as seguintes técnicas: variação no comprimento de onda, atividade, *Piecewise Constant Approximation* (PCA), *Adaptive Piecewise Constant Approximation* (APCA) e *PieceWise Linear Histogram* (PWLH).

### 3.6.1 Variação no comprimento de onda

A filtragem por variação no comprimento de onda é apropriada para grandezas de variação lenta, como a temperatura. Em se tratando de monitoramento estrutural, a temperatura geralmente não apresenta mudanças significativas em um curto intervalo de tempo, salvo em casos de eventos danosos à estrutura (SANTOS et al., 2013). Portanto, na grande maioria das vezes não se faz necessário armazenar um grande volume de dados de medições que não representa variações interessantes de temperatura.

O processo é realizado comparando-se a última amostra  $s_i$  coletada com a última amostra que de fato foi inserida no banco de dados  $s_j$ . Se  $|s_i - s_j| > \Delta$ , então  $s_i$  é inserida no banco de dados (SANTOS et al., 2013). O parâmetro  $\Delta$  define a precisão do sistema e a intensidade da filtragem. Quando maior  $\Delta$ , menos amostras serão inseridas no banco

<sup>1</sup>S/s: amostras por segundo



de dados. Para sensores ópticos de temperatura baseados em FBG, a precisão em graus Celsius é da ordem de  $0,1^\circ\text{C}$ , portanto esse constitui um valor mínimo para  $\Delta$ .

### 3.6.2 Atividade

Os sensores FBG de aceleração e deformação apresentam rápidas variações em seu comprimentos de onda de Bragg. Logo, é requerida uma taxa de amostragem adequada por parte do interrogador com o objetivo de possibilitar verificações de variações dessas grandezas. Diferentemente da filtragem por variação no comprimento de onda, neste caso não há redundância nas medidas e todas as amostras são importantes.

Considere o caso do monitoramento de uma ponte ferroviária. Normalmente, as medidas de aceleração e deformação são desprezíveis a menos que um trem venha a atravessar a ponte. Fora essa eventualidade, apenas fenômenos naturais pouco comuns tem a capacidade de despertar algum interesse em termos estruturais. O evento da passagem do trem representaria poucos minutos e não seria eficiente registrar sistematicamente cada segundo ao longo de 24 horas e sim monitorar a ponte apenas durante o evento, quando os dados precisarão ser coletados continuamente usando a taxa de amostragem nominal dos acelerômetros ou extensômetros sem perdas de amostras. Portanto, um elemento essencial dessa técnica é a identificação de um evento relevante ou de atividade. Este trabalho propõe o uso da diferença absoluta entre a aceleração (ou deformação) registrada pela última amostra e a média de  $n$  últimas amostras:

$$\Delta s_i = \left| s_i - \frac{1}{n} \sum_{k=i-n}^{i-1} s_k \right|, \quad (3.1)$$

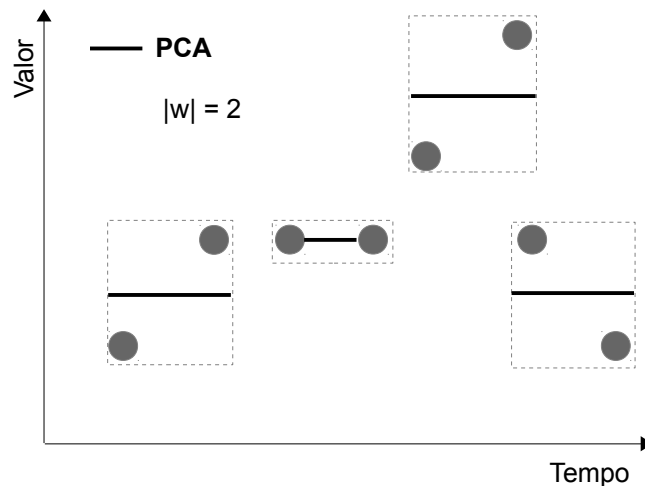
onde  $\Delta s_i$  representa a diferença absoluta e  $s_i$  representa a última amostra coletada pelo interrogador. O subscrito indica a ordem de coleta da amostra, quanto mais recente, maior o subscrito.

Uma vez que pelo menos  $n_d$  dentre  $n_s$  amostras consecutivas satisfaça  $\Delta s_i > s_d$ , onde  $s_d$  representa um valor de disparo, então  $n_0$  amostras anteriores e pelo menos  $n_1$  amostras posteriores serão adicionadas no banco de dados. Caso a condição de disparo seja novamente identificada dentre as  $n_1$  amostras posteriores, então mais  $n_1$  amostras a partir do ponto de identificação serão adicionadas na base de dados. Esse processo garante que enquanto houver suficientes ocorrências da condição  $\Delta s_i > s_d$ , as amostras subsequentes serão apropriadamente adicionadas no banco de dados até que os eventos parem de ocorrer e o sistema monitorado volte para um estado de repouso.

### 3.6.3 Piecewise Constant Approximation

O PCA é um método simples de compressão que divide um sinal de dados do sensor em segmentos de comprimento fixo por partes, e, em seguida, representa os valores de dados em cada segmento utilizando os valores dos parâmetros do modelo (LAZARIDIS; MEHROTRA, 2003). Mais precisamente, dado um sinal do sensor  $S = \langle v_1, v_2, \dots, v_n \rangle$ , uma janela  $w$  com tamanho de  $|w|$  e um *threshold* de erro máximo  $\epsilon$ , o PCA primeiro obtém  $|w|$  pontos de dados consecutivos de  $S$  (ou seja,  $w = \langle v_1, v_2, \dots, v_{|w|} \rangle$ ), e então calcula o valor máximo  $v_{max} \in w$  e o valor mínimo  $v_{min} \in w$ . Se  $v_{max} - v_{min} < 2\epsilon$ , todos os pontos de dados  $v_i \in w$  são representados por uma constante  $\hat{v} = (v_{max} - v_{min})/2$ . Caso contrário, os valores de dados originais não são aproximados e serão preservados na saída da compressão. Esse processo é sequencialmente repetido para os segmentos restantes no sinal. A Figura 23 ilustra esse processo, onde os segmentos de linha constantes representam o sinal aproximado correspondente aos pontos de dados brutos mostrados em cinza.

Figura 23 – Método de compressão de dados PCA.



Fonte: Produzido pelo autor

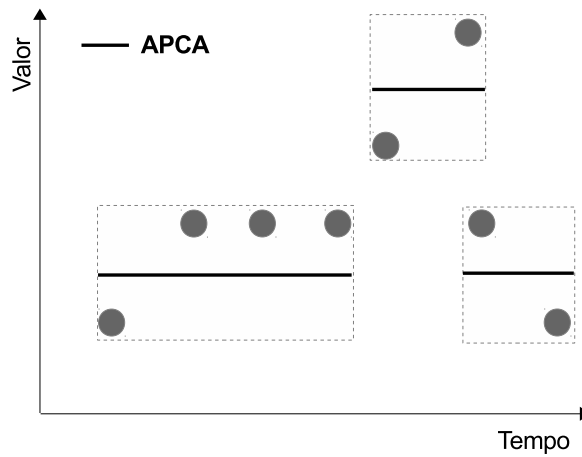
Aplicando o processo de aproximação acima, o sinal original é representado por uma sequência de parâmetros do modelo  $c_i$ . Essa sequência é composta pelo valor constante  $\hat{v}$  (quando  $v_{max} - v_{min} < 2\epsilon$ ) ou pelos valores de dados originais (quando a restrição de erro máxima é violada). Por consequência, adicionalmente aos  $c_i$ , o PCA precisa de um valor lógico  $f_i$  para indicar quando  $c_i$  é uma constante ou os pontos de dados brutos. Como o tamanho da janela é idêntico para todos os segmentos, a informação de tempo de cada ponto de dado comprimido pode ser inferida pelos índices dos segmentos, quando a descompressão dos dados comprimidos é requerida. A definição formal dos parâmetros do modelo PCA é dada por (LAZARIDIS; MEHROTRA, 2003):

$$PCA(S) = \langle (c_1, f_1), (c_2, f_2), \dots, (c_k, f_k) \rangle. \quad (3.2)$$

### 3.6.4 Adaptive Piecewise Constant Approximation

Em princípio, o APCA opera como o PCA, porém o tamanho da janela  $|w|$  varia adequadamente (CHAKRABARTI et al., 2002). Dado um sinal  $S$  e uma tolerância de erro  $\epsilon$ , o APCA varre completamente  $S$  em ordem, inserindo valores de dados em  $w$  até que  $v_{max} - v_{min} > 2\epsilon$  (excluindo o último ponto que causa a invalidação). Os pontos de dados em  $w$  são então representados pelo valor mediano  $\hat{v} = (v_{max} - v_{min})/2$ . O APCA repete o mesmo processo a partir do próximo valor usando uma nova janela vazia (ou seja,  $|w| = 0$ ) até que todos os valores em  $S$  sejam aproximados. A Figura 24 descreve um exemplo desse mecanismo de aproximação.

Figura 24 – Método de compressão de dados APCA.



Fonte: Produzido pelo autor

O processo de aproximação APCA resulta em uma sequência de segmentos de dados disjuntos, cada qual contendo um número diferente de pontos de dados. Cada segmento é então representado por um par  $(\hat{v}_i, t_i)$ , onde  $\hat{v}_i$  é o valor mediano dos pontos de dados, e  $t_i$  é a marca de tempo (*timestamp*) do último ponto de dado em cada segmento. Formalmente, os parâmetros do modelo APCA são definidos como (CHAKRABARTI et al., 2002):

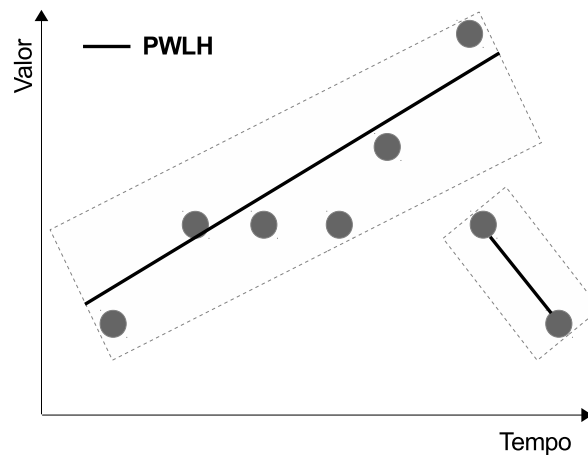
$$APCA(S) = \langle (\hat{v}_1, t_1), (\hat{v}_2, t_2), \dots, (\hat{v}_k, t_k) \rangle. \quad (3.3)$$

### 3.6.5 PieceWise Linear Histogram

Tipicamente, os métodos de compressão construídos sobre modelos lineares estendem as técnicas de compressão baseadas em modelos constantes (PCA e APCA), usando funções lineares para aproximar os sinais de dados do sensor (HUNG; JEUNG; ABERER, 2013).

O PWLH é uma extensão do algoritmo APCA. Nessa técnica, um sinal de dados do sensor é primeiro dividido em uma sequência de segmentos de dados de comprimento variável, semelhante ao processo do APCA (BURAGOHAIN; SHRIVASTAVA; SURI, 2007). Todos os pontos de dados em cada segmento são modelados por uma linha que minimiza a distância máxima desses pontos para essa linha. Uma diferença fundamental entre o APCA e o PWLH é a forma do segmento de dados. No APCA, os segmentos de dados são horizontais, enquanto que no PWLH, os segmentos podem girar enquanto centralizam as linhas de aproximação, como pode ser ilustrado na Figura 25. Verifica-se que a garantia de erro máximo também vale para os dados aproximados em cada segmento.

Figura 25 – Método de compressão de dados PWLH.



Fonte: Produzido pelo autor

Como o valor inicial  $\hat{v}_i^b$  e o valor final  $\hat{v}_i^e$  da linha bissetriz de cada segmento de dados são diferentes, ambos os valores devem ser mantidos quando se comprime um sinal de dados de sensor usando PWLH. Quanto à informação do tempo, o PWLH também armazena a última marca de tempo (*timestamp*)  $t_i$  de cada segmento, semelhante ao APCA. Formalmente, os parâmetros do modelo PWLH são definidos como (BURAGOHAIN; SHRIVASTAVA; SURI, 2007):

$$PWLH(S) = \langle (\hat{v}_1^b, \hat{v}_1^e, t_1), (\hat{v}_2^b, \hat{v}_2^e, t_2), \dots, (\hat{v}_k^b, \hat{v}_k^e, t_k) \rangle. \quad (3.4)$$

## 3.7 Detecção de anomalias

As metodologias motor de inferências Fuzzy e algoritmo baseado em distribuição gaussiana multivariada foram implementadas no WbS com o objetivo de detectar comportamentos estruturais incomuns a partir do banco de dados que armazena as leituras dos sensores, os quais monitoram parâmetros significativos de determinada estrutura. Essas metodologias agregam ao WbS, além da funcionalidade de detecção de anomalias, a importante participação de um especialista do domínio relacionado ao SHM.

### 3.7.1 Motor de inferências Fuzzy

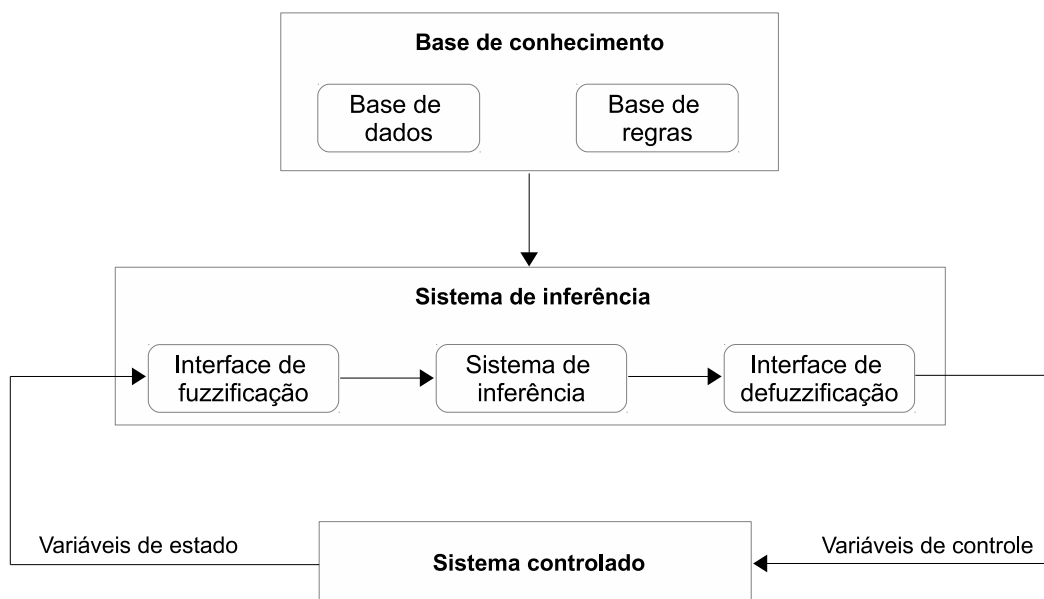
Sistemas baseados em regras Fuzzy (SRFs) são uma das áreas mais importantes para a aplicação da teoria dos conjuntos Fuzzy. Sistemas baseados em regras lidam com regras se-então. Os SFRs constituem uma extensão de sistemas clássicos, com antecedentes e consequentes compostos por declarações de lógica Fuzzy (PAWAR; GANGULI, 2011).

Um motor de inferências Fuzzy (MIF) é um SRF composto por: uma base de conhecimento que compreende as informações utilizadas pelo operador especialista na forma de regras de controle linguísticas; uma interface de fuzzificação, que transforma os valores bem definidos das variáveis de entrada em conjuntos Fuzzy que serão usados no processo de inferência Fuzzy; um sistema de inferência, que utiliza os valores Fuzzy a partir da interface de fuzzificação e as informações da base de conhecimento para executar o processo de raciocínio; e a interface de defuzzificação, que utiliza a ação Fuzzy a partir do processo de inferência e a traduz em valores bem definidos para as variáveis de controle (CINGOLANIA; ALCALA-FDEZ, 2013). A Figura 26 mostra a estrutura genérica de um MIF, considerando seus três principais componentes relatados anteriormente.

Os MIFs são muito utilizados no processo de SHM, particularmente, para o uso de dados do monitoramento na geração de avisos e alarmes (PAWAR; GANGULI, 2011). Regras Fuzzy podem ser criadas por um especialista do domínio de maneira ao MIF utilizar a base de dados disponível para inferir anomalias a partir das regras definidas para esse fim. Após o processo de detecção de anomalia, podem ser gerados avisos e alarmes para o usuário de forma visual e/ou por correio eletrônico.

No WbS, o motor de inferências Fuzzy para geração de avisos e alarmes foi implementado utilizando o *framework* Java jFuzzyLogic (CINGOLANI; ALCALA-FDEZ, 2012). O principal objetivo desse *framework* é facilitar e acelerar o desenvolvimento de sistemas Fuzzy através da implementação de todos os componentes apresentados na estrutura genérica de um MIF, seguindo o padrão de Linguagem de Controle Fuzzy (*Fuzzy Control Language* - FCL) publicado pela Comissão Eletrotécnica Internacional (*International Electrotechnical Commission* - IEC).

Figura 26 – Estrutura genérica de um MIF.



Fonte: (CINGOLANIA; ALCALA-FDEZ, 2013)

O WbS possui uma interface gráfica onde o usuário (geralmente um especialista) cria configurações para o MIF, cada configuração possui os campos: variáveis de entrada e saída, termos Fuzzy, regras Fuzzy e método de defuzzificação. Criada a configuração, ela pode ser executada pelo usuário, e então o MIF interpreta a configuração e faz um mapeamento semelhante ao exemplo mostrado no Algoritmo 1 em FCL. Em seguida, o MIF realiza o processo de inferência a partir da base de dados e da configuração criada. No caso de detecção de anomalia, o usuário será notificado visualmente e por correio eletrônico. Uma vez executada uma configuração, ela continua funcionando no WbS até que o usuário decida por finalizá-la ou substituí-la por outra configuração previamente criada para o MIF.

O exemplo de mapeamento do MIF no WbS apresentado no Algoritmo 1 em FCL gera as fuzzificações *Temperatura*, *Deformação* e *Aceleração* e a defuzzificação *Anomalia* mostradas na Figura 27. Os termos de cada fuzzificação podem assumir várias formas, tais como: triangular, trapezoidal, gaussiana e sigmoideal. Os métodos de defuzzificação podem ser centro de gravidade, máximo, média dos máximos, altura e altura modificada (CINGOLANI; ALCALA-FDEZ, 2012).

**Algoritmo 1** Algoritmo de exemplo do mapeamento do *framework* jFuzzyLogic

---

```

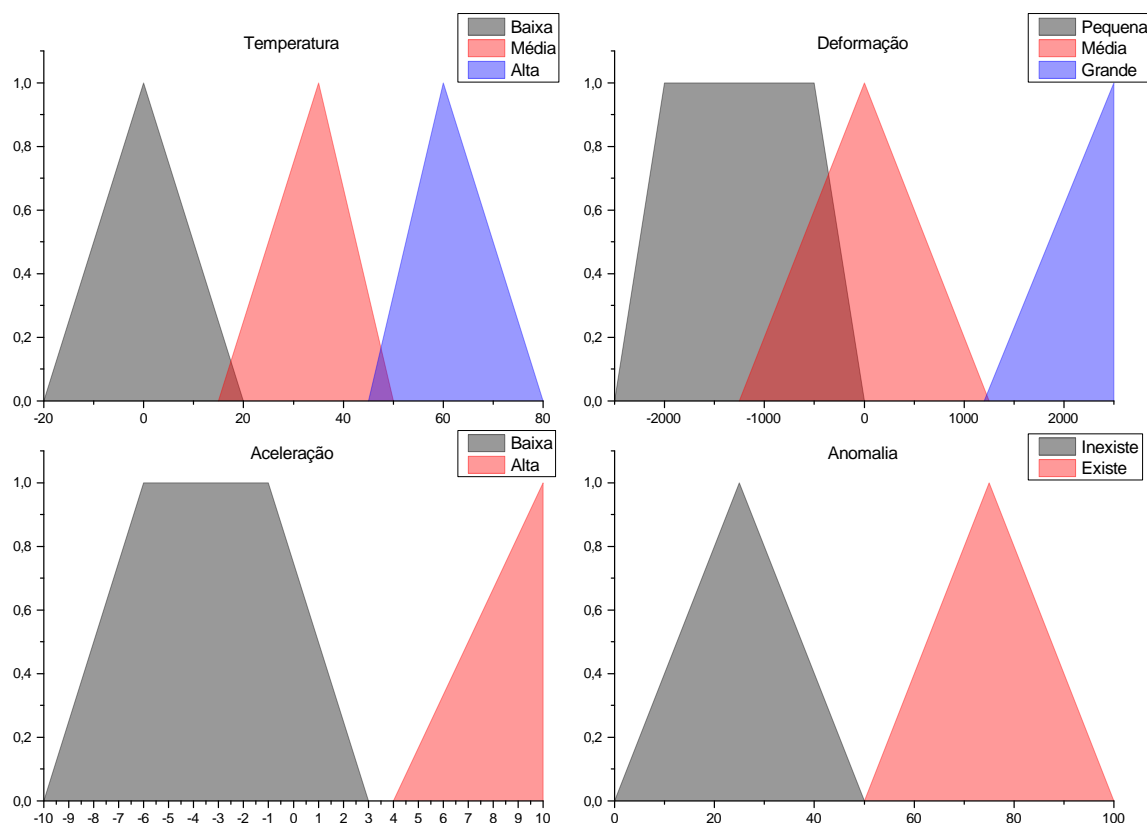
FUNCTION_BLOCK SHM_conf_1
VAR_INPUT
    temperatura, deformacao, aceleracao : REAL;
END_VAR
VAR_OUTPUT
    anomalia : REAL;
END_VAR
FUZZIFY estado_temp // celsius
    TERM baixa := (-20,0) (0,1) (20,0) ;
    TERM media := (15,0) (35,1) (50,0) ;
    TERM alta := (45,0) (60,1) (80,0) ;
END_FUZZIFY
FUZZIFY estado_defor // microstrain
    TERM pequena := (-2500,0) (-2000,1) (-500,1) (0,0) ;
    TERM media := (-1250,0) (0,1) (1250,0) ;
    TERM grande := (1200,0) (2500,1) ;
END_FUZZIFY
FUZZIFY estado_ace1 // g
    TERM baixa := (-10,0) (-6,1) (-1,1) (3,0) ;
    TERM alta := (4,0) (10,1);
END_FUZZIFY
DEFUZZIFY anomalia
    TERM inexiste := (0,0) (25,1) (50,0) ;
    TERM existe := (50,0) (75,1) (100,0) ;
    METHOD : COG; // Centro de Gravidade (Center of Gravity)
END_DEFUZZIFY
RULEBLOCK regrasAnomalia
    Rule1: IF estado_defor IS pequena AND estado_ace1 IS baixa THEN
anomalia IS inexiste ;
    Rule2: IF estado_temp IS alta AND estado_defor IS grande THEN
anomalia IS existe ;
    Rule3: IF estado_defor IS grande AND estado_ace1 IS alta THEN
anomalia IS existe ;
    Rule4: IF estado_temp IS baixa AND estado_ace1 IS baixa THEN anomalia
IS inexiste ;
    Rule5: IF estado_temp IS alta AND estado_ace1 IS alta THEN anomalia
IS existe ;

    RuleN: IF estado_temp IS baixa AND estado_defor IS pequena THEN
anomalia IS existe ;
END_RULEBLOCK
END_FUNCTION_BLOCK

```

---

Figura 27 – Exemplo de fuzzyficação e defuzzyficação.



Fonte: TECCON (2014)

### 3.7.2 Algoritmo baseado em distribuição gaussiana multivariada

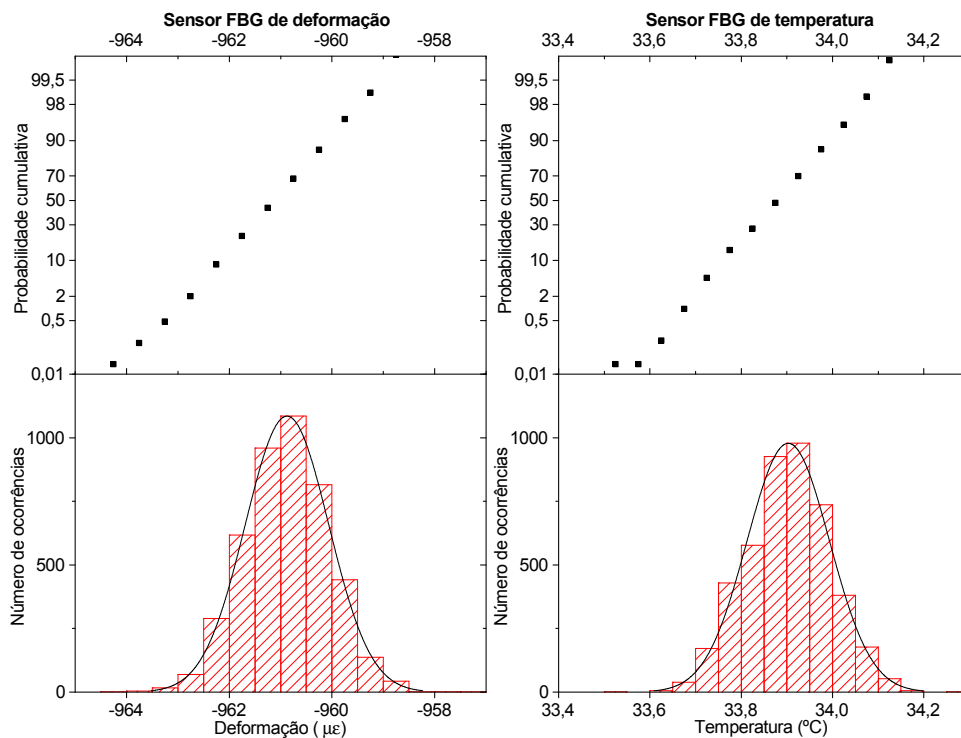
A detecção de anomalia não-supervisionada é uma tarefa que possui como objetivo detectar amostras anômalas de uma base de dados de amostras sem rótulo (previamente não se sabe se a amostra é anômala ou não) (TAVALLAEE; STAKHANOVA; GHORBANI, 2010). Formalmente, dado um conjunto de  $n$  amostras sem rótulo,  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ , deve-se atribuir uma pontuação de anomalia (*anomaly score*) para cada amostra em  $S$  no que diz respeito ao restante de amostras de  $S$  (CHANDOLA; BANERJEE; KUMAR, 2012).

No WbS, a detecção de anomalias através de algoritmo de aprendizado de máquina não-supervisionado foi implementada com base na distribuição gaussiana multivariada (*Multivariate gaussian distribution* - MGD). Em teoria da probabilidade e estatística, a MGD é uma generalização da distribuição gaussiana univariada (*Univariate Gaussian Distribution* - UGD) para dimensões maiores. Uma definição possível é a seguinte (LI; ACHIM; BULL, 2012): um vetor aleatório é dito ser  $k$ -variado normalmente distribuído se cada combinação linear dos seus  $k$  componentes possui uma UGD.



Portanto, as características analisadas pelo algoritmo não-supervisionado implementado no WbS, que podem indicar anomalias, devem possuir um comportamento que possa ser aproximado por uma distribuição normal, ou ainda sofrer transformações (logarítmica, quadrática e outras) que as tornem factíveis de serem aproximadas por esse tipo de distribuição. A Figura 28 exemplifica a aproximação de sinais reais de sensores de deformação e temperatura por intermédio de distribuições gaussianas.

Figura 28 – Exemplo de sinais de sensores de deformação e temperatura aproximados por UGDs



Fonte: Produzido pelo autor

O Algoritmo 2 apresenta o algoritmo não-supervisionado baseado em MGD para detecção de anomalias no WbS. As características especiais que podem indicar anomalias são selecionadas. Os parâmetros, tais como média e variância, são calculados para cada característica. Na fase de treinamento do algoritmo, a pontuação de anomalia é definida para cada amostra em relação as restantes por intermédio da probabilidade atribuída pela aproximação MGD, e então um modelo MGD é definido. O limiar ou *threshold* para indicar anomalia é obtido através da medida de acurácia  $F_1$ -score aplicada no conjunto de dados de validação. Essa medida de acurácia considera a precisão e o *recall* aplicados no conjunto de dados para computar o limiar. A precisão é a relação entre o número de exemplos corretamente classificados e o número total de exemplos classificados para a mesma classe. O *recall* é a relação entre o número de exemplos corretamente classificados e o número total de exemplos que deveriam ter sido corretamente classificados. A métrica  $F_1$ -score pode ser interpretada como uma média ponderada da precisão e *recall*, onde

uma pontuação  $F_1$  atinge o seu melhor valor em 1 e pior resultado em 0. Por fim, usando um conjunto de testes (por exemplo, medições em tempo real) é possível verificar se as amostras coletadas representam anomalias através do comparativo entre a pontuação de anomalia recebida pelas amostras com base no modelo MGD obtido no treinamento e o limiar obtido na fase de validação.

---

**Algoritmo 2** Algoritmo de detecção de anomalias baseado em distribuição gaussiana multivariada.

---

Escolher as características  $x_i$  que podem indicar anomalias

Encontrar os parâmetros  $\mu_1, \dots, \mu_n, \sigma_1^2, \dots, \sigma_n^2$ :

$$\mu_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_j^{(i)}$$

$$\sigma_j^2 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (x_j^{(i)} - \mu_j)^2$$

Dado um novo exemplo  $x$ , computar sua pontuação  $p(x)$ :

$$p(x) = \prod_{j=1}^n p(x_j; \mu_j, \Sigma) = \prod_{j=1}^n \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^{-n} |\Sigma|^{-1}}} \exp\left(-\frac{1}{2}(x_j - \mu_j)^T \Sigma^{-1} (x_j - \mu_j)\right)$$

Encontrar o *threshold*  $\epsilon$  usando a medida de acurácia **F<sub>1</sub>-score** ou **F-measure** na validação cruzada (*crossvalidation*):

$$precisao = \frac{vp}{vp + fp}; recall = \frac{vp}{vp + fn}; F_1 = 2 \times \frac{precisao \times recall}{precisao + recall}$$

Detectar:

$$y = \begin{cases} \mathbf{1}, & \text{se } p(x) < \epsilon \text{ (anomalia)} \\ \mathbf{0}, & \text{se } p(x) > \epsilon \text{ (normal)} \end{cases}$$

---

**Legenda:**

$\Sigma$  - matriz de covariância

vp - verdadeiro positivo

fp - falso positivo

fn - falso negativo

---

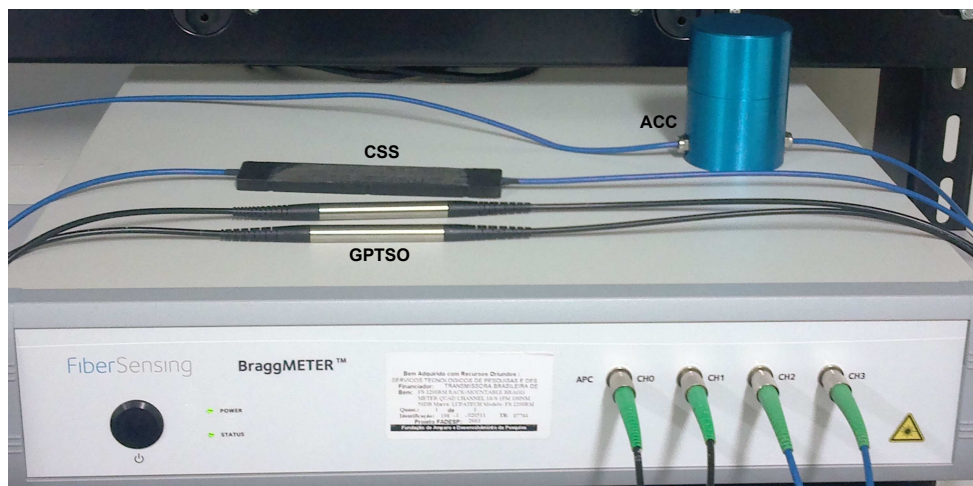
## 4 Resultados

Nos Capítulos anteriores foram abordados o marco teórico e a proposta metodológica deste trabalho no que concerne ao gerenciamento de dados no processo de monitoramento estrutural. Neste Capítulo, a metodologia proposta será demonstrada e validada por intermédio dos resultados obtidos durante testes em laboratório e ambiente real, utilizando diferentes tipos de sensores FBG e interrogadores ópticos no monitoramento de parâmetros físicos e mecânicos.

### 4.1 Primeiro cenário

O primeiro cenário é caracterizado como um laboratório de testes, onde as medidas de temperatura, aceleração e deformação estão sob condições controladas. A temperatura, aceleração e deformação medidas pelos sensores se devem às variações de temperatura produzidas no laboratório e excitações realizadas manualmente, respectivamente. A configuração do primeiro cenário é apresentada na Figura 29. Essa configuração possui um interrogador óptico FiberSensing *FS2200RM Rack-Mountable BraggMeter*, dois sensores de temperatura (*General Purpose Temperature Sensor Outdoor - GPTSO*), um sensor de deformação (*Composite Strain Sensor - CSS*) e um sensor de aceleração (*Acceleration Sensor - ACC*). As principais especificações desses componentes são apresentadas na Tabela 5 e Tabela 6.

Figura 29 – Configuração do primeiro cenário.



Fonte: Produzido pelo autor

Tabela 5 – Especificações do interrogador óptico utilizado no primeiro cenário.

Componente	Especificação	Valor
FS2200RM	Taxa de amostragem	1 S/s
	Faixa	1500 nm até 1600 nm
	Canais ópticos	4
	Sensores por canal	25 (recomendado)

Fonte: Produzido pelo autor

Tabela 6 – Especificações dos sensores ópticos utilizados no primeiro cenário.

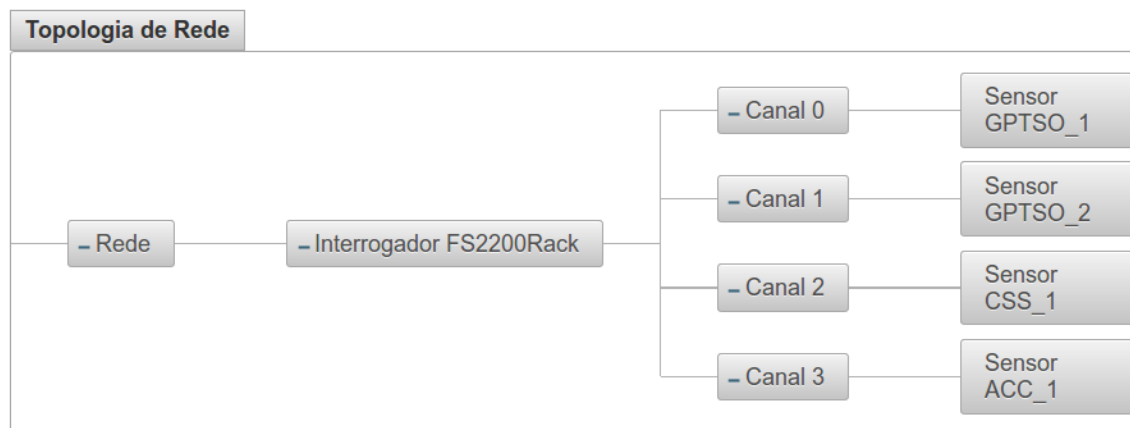
Componente	Sensitividade	Faixa	Resolução
GPTSO	10 pm/°C	-20°C até 80°C	0,1°C
CSS	1,2 pm/μ $\epsilon$	-2500 μ $\epsilon$ até 2500 μ $\epsilon$	1 μ $\epsilon$
ACC	75 pm/g @ 40 Hz	-10 g até 10 g	12,5 μg/√Hz

Fonte: Produzido pelo autor

O uso do primeiro cenário têm como objetivos a demonstração e validação das tarefas de aquisição, processamento (técnicas de filtragem/compressão), armazenamento e acesso aos dados proporcionadas pelo InterAB, e de visualização e exportação realizadas através do WbS.

Inicialmente, a topologia da rede de sensores ópticos conectada ao interrogador foi reconhecida e persistida pelo InterAB através da primeira aquisição de dados (leitura dos sensores), como mostrada na Figura 30. A visualização proporcionada pelo WbS demonstra que a topologia da rede possui um interrogador óptico de quatro canais com dois sensores de temperatura nos dois primeiros canais, um sensor de deformação no terceiro canal e um sensor de aceleração no último canal.

Figura 30 – Topologia da rede de sensores reconhecida e persistida pelo InterAB.



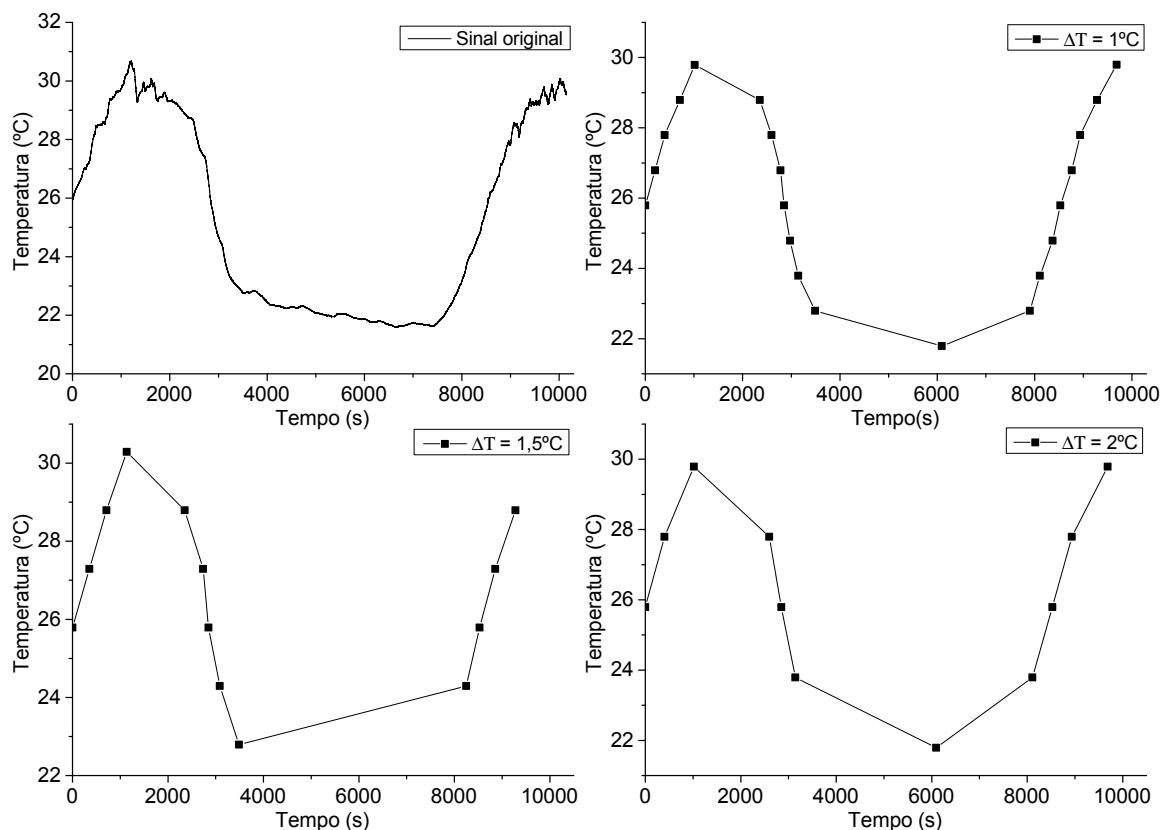
Fonte: TECCON (2014)

Após a conclusão do reconhecimento e da persistência da topologia da rede de sensores, o InterAB pode realizar ou não a filtragem ou compressão de dados dos sensores ópticos antes de armazená-los no banco de dados, dependendo do método escolhido pelo usuário do *software*. Para efeitos demonstrativos, serão apresentados todos os métodos de filtragem e compressão disponíveis no InterAB através da aplicação dessas técnicas em sinais dos sensores coletados pelo InterAB no primeiro cenário.

#### 4.1.1 Filtragem de dados por variação no comprimento de onda

O primeiro sinal a ser filtrado é um sinal de um sensor óptico de temperatura (GPTSO\_1). Um comparativo entre o sinal original e os sinais filtrados para variações de  $1^{\circ}\text{C}$ ,  $1,5^{\circ}\text{C}$  e  $2^{\circ}\text{C}$  é mostrado na Figura 31. O sinal original possui 10148765 amostras, os sinais filtrados para variações de  $1^{\circ}\text{C}$ ,  $1,5^{\circ}\text{C}$  e  $2^{\circ}\text{C}$  possuem 21, 13 e 11 amostras, o que implica em uma redução de registros no banco de dados de aproximadamente 99,99979%, 99,99987% e 99,99989%, respectivamente.

Figura 31 – Filtragem de sinal de temperatura por variação no comprimento de onda.



Fonte: Produzido pelo autor

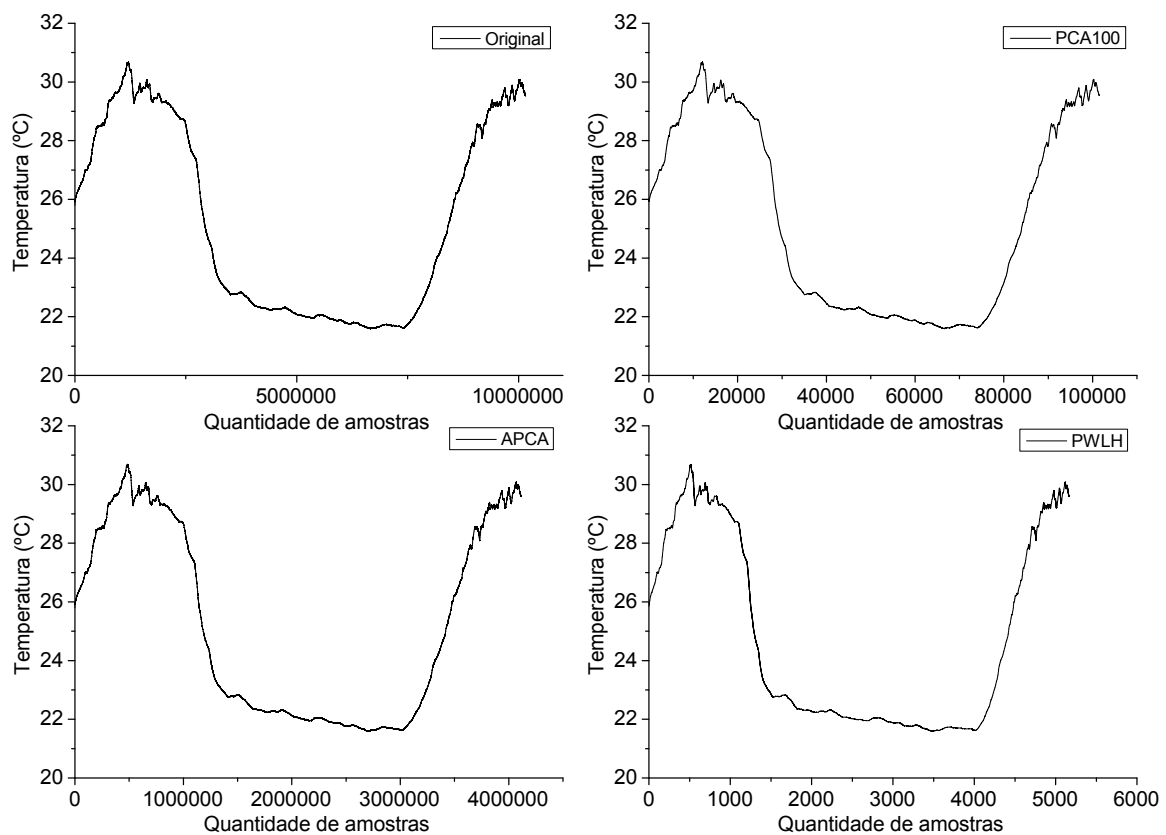
É possível verificar uma grande redução no número de registros que foram persistidos no banco de dados após a filtragem por variação no comprimento de onda, sem ao mesmo tempo perder a qualidade da informação, pois através das amostras armazena-

das é possível observar o comportamento da temperatura no primeiro cenário e estimar de forma aproximada o sinal original. Entretanto, é importante destacar que a redução na quantidade de registros é aceitável até certo ponto, em outras palavras, quanto menor o número de registros no banco de dados, menor é a possibilidade de precisão na identificação do comportamento do parâmetro medido pelo sensor.

#### 4.1.2 Compressão de dados usando PCA, APCA e PWLH

Trabalhando ainda com o sinal do sensor GPTSO\_1 coletado pelo InterAB, um comparativo entre o sinal original e os sinais comprimidos pelos métodos PCA com janela de tamanho 100, APCA e PWLH é mostrado na Figura 32. Diferentemente da filtragem por variação no comprimento de onda, os métodos de compressão reduziram a quantidade de registros armazenados no banco de dados mantendo um número maior de amostras, o que implica em uma melhor aproximação em relação ao sinal original. Para uma melhor caracterização dos métodos de compressão comparados foram utilizadas duas métricas: taxa de compressão e erro de aproximação.

Figura 32 – Compressão de sinal de temperatura por PCA, APCA e PWLH.



Fonte: Produzido pelo autor

Obviamente, o aspecto mais importante de um método de compressão é o seu poder de compressão. Esse poder pode ser medido através da taxa de compressão, que é definida como a fração do custo de armazenamento entre o sinal comprimido e o sinal original (quanto maior a taxa de compressão, maior será o poder de compressão):

$$taxa\_compressao = \left( 1 - \frac{tamanho\_sinal\_comprimido}{tamanho\_sinal\_original} \right) \times 100. \quad (4.1)$$

Outra informação importante sobre a compressão é a sua qualidade, ou seja, a diferença entre os valores originais e os valores descomprimidos (aproximados). Em particular, quando vários métodos de compressão apresentam desempenho semelhante, o erro de aproximação pode se tornar uma métrica a ser considerada. Para refletir esse aspecto, o erro de aproximação da compressão de dados utiliza o erro quadrático médio (*Root Mean Square Error* - RMSE), que é amplamente utilizado para avaliar a qualidade da aproximação. Formalmente, é definido como:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (v_i - \hat{v}_i)^2}, \quad (4.2)$$

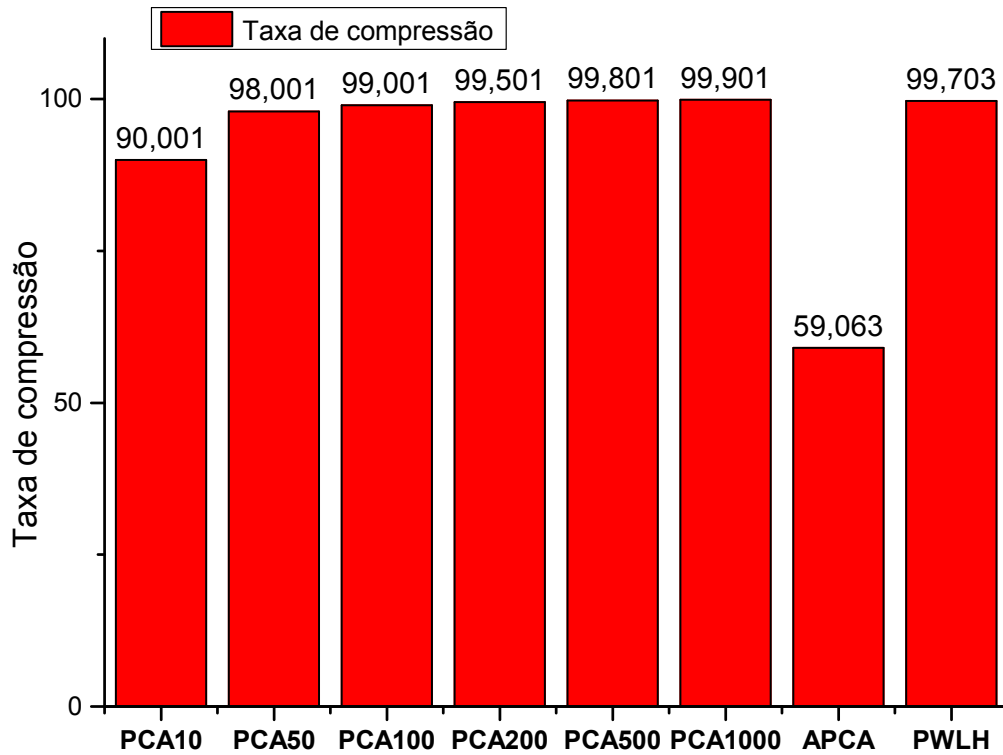
onde  $v_i$  é o valor original em um sinal de dados do sensor e  $\hat{v}_i$  é o correspondente valor aproximado a partir do sinal comprimido. Quanto menor o RMSE, melhor será a aproximação (qualidade).

A avaliação do poder de compressão dos métodos PCA, APCA e PWLH para o sinal do sensor GPTSO\_1 é mostrada na Figura 33. Em particular, para esse sinal, o PCA (em suas seis configurações de janela) e o PWLH obtiveram taxas de compressão menores, se comparadas a taxa obtida pelo APCA, o que implica em maior poder de compressão dessas duas técnicas.

Por sua vez, a avaliação da qualidade de compressão dos métodos PCA, APCA e PWLH para o sinal do sensor GPTSO\_1 é mostrada na Figura 34. Neste caso, o PCA (em cinco configurações de janela) e o APCA obtiveram RMSE menores, se comparados ao RMSE obtido pelo PWLH, o que implica em maior qualidade na aproximação em relação ao sinal original. Esse resultado já era previsto para o método APCA, isso porque ele comprimiu menos o sinal original, logo os erros de aproximação devem ser menores. A contrapartida pode ser observada através do RMSE das técnicas PCA com janela de tamanho 500 e 1000 e PWLH, as quais tiveram maior poder de compressão.

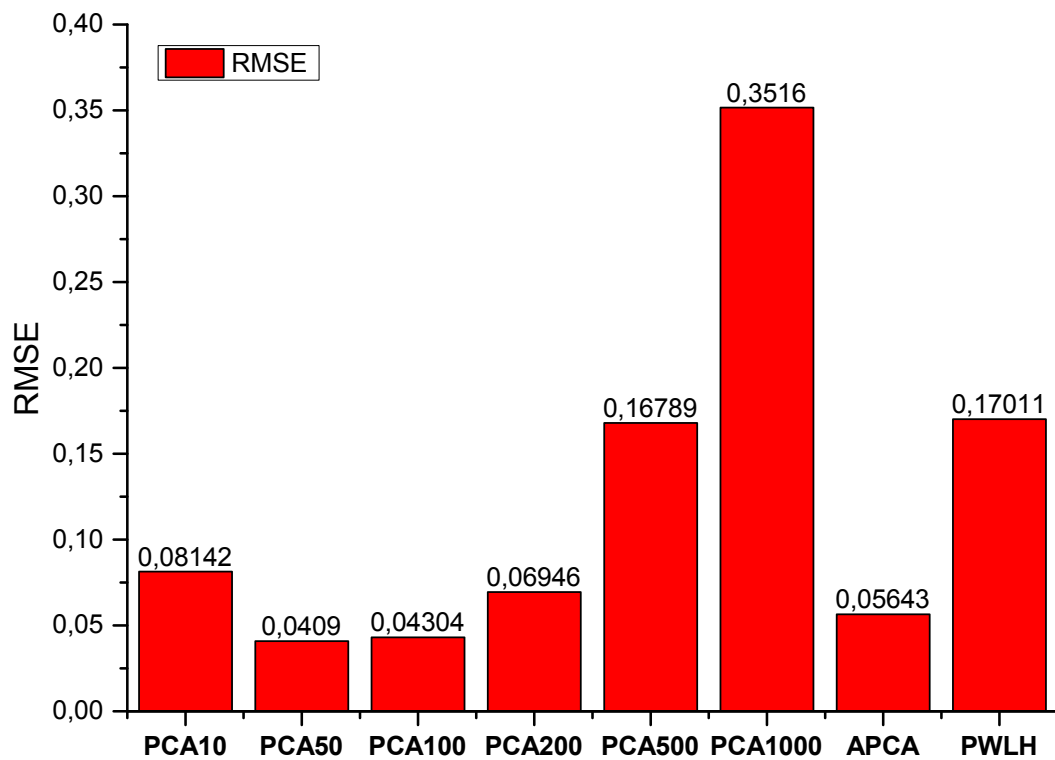
Se considerado um balanceamento entre as duas métricas, o PCA com janela de tamanho 100 foi o método que alcançou o melhor resultado, exclusivamente para o sinal de temperatura utilizado, com uma taxa de compressão de 99,001% e RMSE de 0,04304.

Figura 33 – Avaliação da taxa de compressão para o sinal do sensor GPTSO\_1.



Fonte: Produzido pelo autor

Figura 34 – Avaliação do erro de aproximação para o sinal do sensor GPTSO\_1.



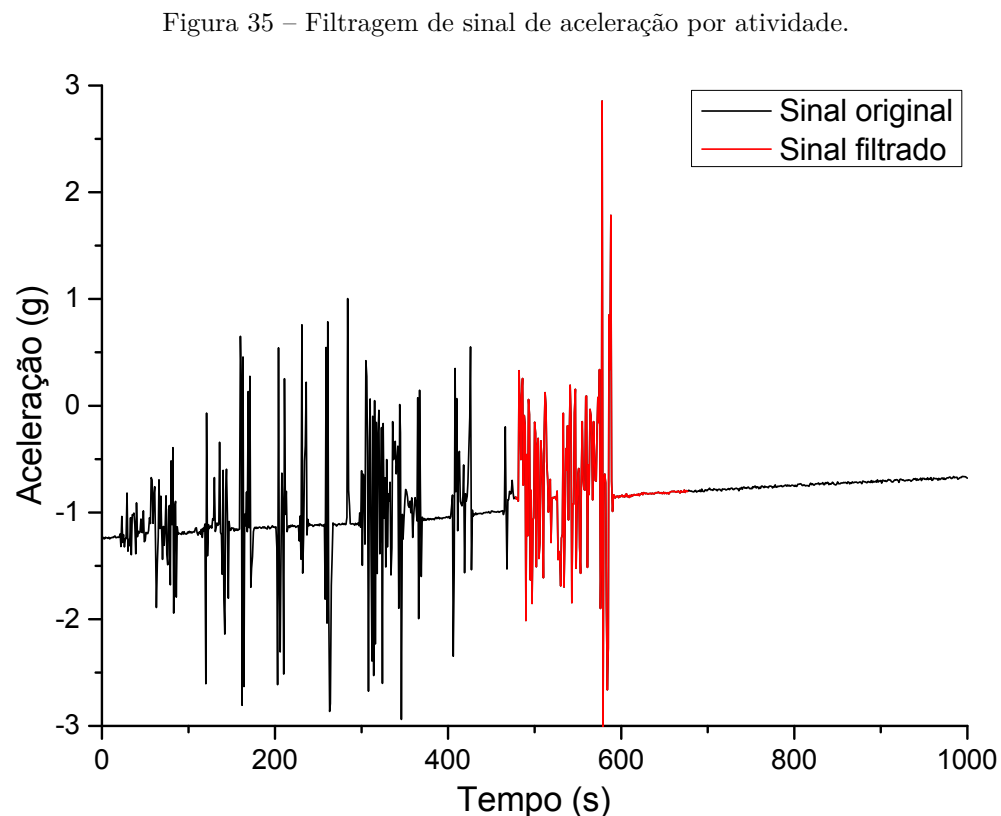
Fonte: Produzido pelo autor



### 4.1.3 Filtragem de dados por atividade

A filtragem por identificação de eventos relevantes ou de atividade foi aplicada nos sinais dos sensores de aceleração ACC\_1 e deformação CSS\_1 coletados pelo InterAB. Essa técnica considera os seguintes parâmetros: número de amostras para suavização do sinal original usando média móvel e também número de amostras para avaliação do limiar entre o sinal original e a média móvel desse sinal ( $n$ ); limiar entre o sinal original e a média móvel desse sinal para o disparo do armazenamento de amostras ( $s_d$ ); número de eventos nas próximas  $n$  amostras para que o armazenamento seja disparado ( $n_d$ ); número de amostras armazenadas antes do evento ( $n_0$ ); e número mínimo de amostras armazenadas depois do evento ( $n_1$ ).

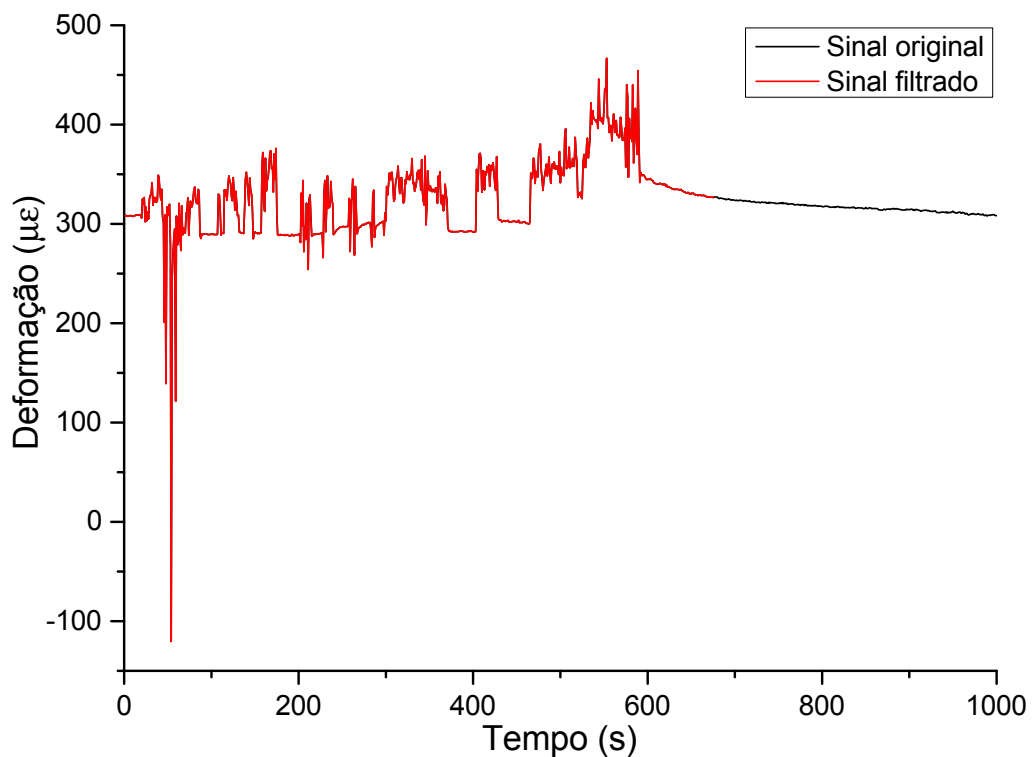
O sinal de aceleração filtrado pelo InterAB para o sensor ACC\_1 é mostrado na Figura 35 sobrepondo o sinal original. Os parâmetros utilizados para essa filtragem foram:  $n = 200$ ,  $s_d = 2$  g,  $n_d = 1$ ,  $n_0 = 100$  e  $n_1 = 100$ . Os valores de  $s_d$  e  $n_d$  foram escolhidos de forma a possibilitar o armazenamento apenas das amostras em torno de picos de atividade diferenciados do restante do sinal. As amostras registradas no banco de dados são aquelas que formam a curva vermelha e as amostras em preto não foram registradas. Observa-se que as amostras registradas estão agrupadas em torno de pontos de atividade com picos que se aproximam e superam 2 g.



Fonte: Produzido pelo autor

O sinal de deformação filtrado pelo InterAB para o sensor CSS\_1 é mostrado na Figura 36 sobrepondo o sinal original. Os parâmetros utilizados para essa filtragem foram:  $n = 100$ ,  $s_d = 35 \mu\epsilon$ ,  $n_d = 3$ ,  $n_0 = 100$  e  $n_1 = 100$ . Diferentemente do sinal de aceleração anterior, os valores de  $s_d$  e  $n_d$  foram escolhidos de forma a possibilitar o armazenamento das amostras em torno de vários picos de atividade diferenciados do restante do sinal que apresenta um comportamento mais próximo do repouso. As amostras armazenadas na base de dados são aquelas que formam a curva vermelha e as amostras em preto não foram armazenadas. Verifica-se que as amostras armazenadas estão agrupadas em torno de vários pontos de atividade, sendo grande parte do sinal armazenado pelo InterAB, principalmente devido ao parâmetro  $n_d$ , que exige do InterAB o armazenamento de mais  $n_1$  amostras a cada sequência de  $n_d$  eventos identificados em  $n$  amostras analisadas.

Figura 36 – Filtragem de sinal de deformação por atividade.



Fonte: Produzido pelo autor

O mérito da técnica de filtragem por atividade aplicada a acelerômetros ou extensômetros é que ela permite ignorar eventuais pontos fora da curva originados por erros de sincronismo da unidade óptica de interrogação devido ao ruído. O valor do limiar entre o sinal original e a média móvel desse sinal para o disparo do armazenamento de amostras exige que pelo menos  $n_d$  eventos ocorram dentro de um certo intervalo de tempo e dessa forma um evento autêntico pode ser distinguido de um breve ruído.

Todas as técnicas de filtragem e compressão apresentadas possuem suas vantagens e desvantagens, que foram destacadas anteriormente. Apesar da avaliação de desempenho realizada através de métricas para os métodos de compressão, este trabalho não tem como objetivo mostrar que uma técnica é melhor que a outra. Esses métodos encontram-se disponíveis para a escolha do usuário através dos *softwares* desenvolvidos. O usuário, geralmente um especialista do domínio, decide através do InterAB ou WbS qual técnica aplicar nos dados dos sensores coletados pelo InterAB.

#### 4.1.4 Exportação e visualização de dados

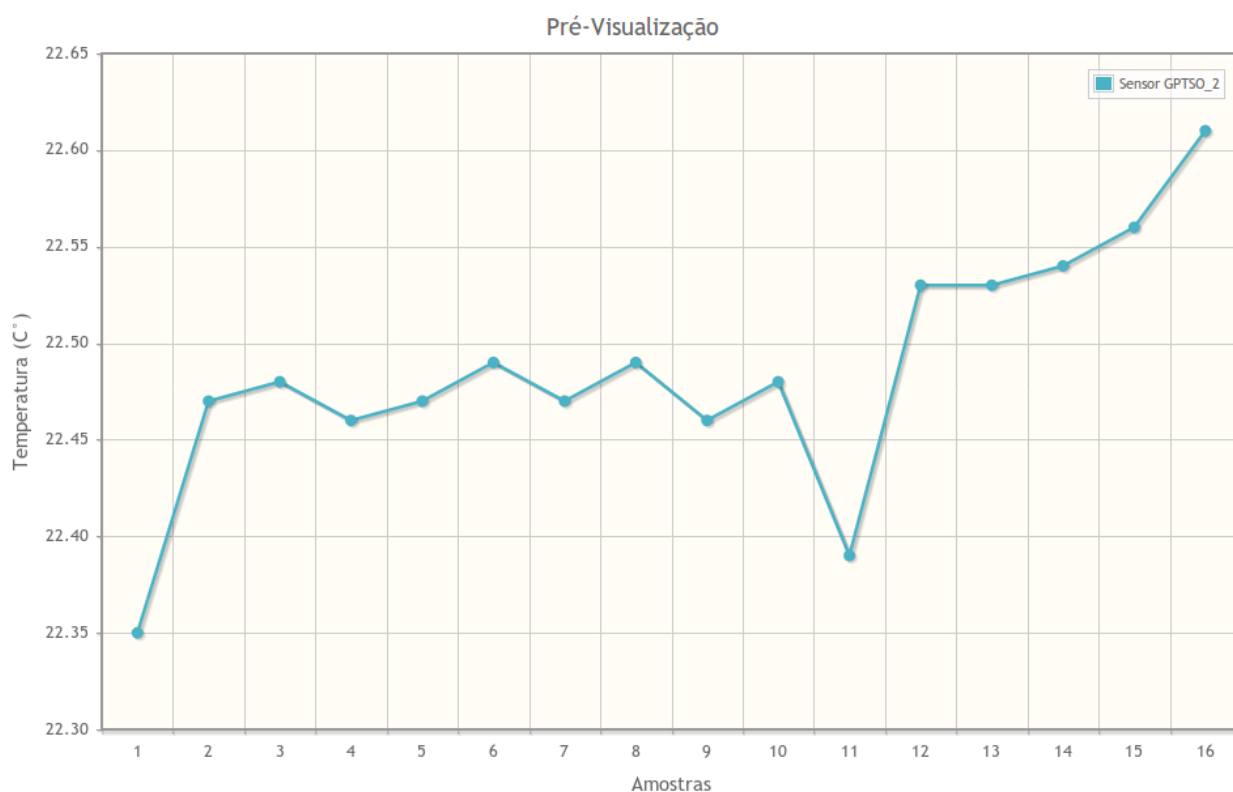
Todos os dados dos sensores coletados, filtrados ou comprimidos, e persistidos pelo InterAB podem ser exportados em formato de arquivo texto através da aplicação Web, como mostra a Figura 37. O usuário deve selecionar o parâmetro monitorado (genérico, temperatura, aceleração ou deformação) e os sensores que monitoram esse parâmetro serão carregados da base de dados. Em seguida, o usuário seleciona o intervalo de monitoramento e então poderá exportar os dados ou realizar uma pré-visualização desses dados antes de exportá-los. No caso do sensor genérico, são exportados os desvios de comprimento de onda de pico do sensor FBG coletados e armazenados. Para os outros parâmetros, são exportados os desvios de comprimento de onda convertidos em mensurandos através das curvas de calibração registradas no banco de dados para cada sensor. Em posse dos dados de monitoramento, o usuário pode realizar as análises que julgar necessárias, através de seus próprios algoritmos, para verificar as condições atuais da estrutura monitorada.

Figura 37 – Exportação de dados dos sensores pelo WbS.

Selecione um intervalo		
Sensores	Início	Fim
Temperatura ▼ <input type="checkbox"/> GPTSO_1 <input checked="" type="checkbox"/> GPTSO_2	<b>Ano</b> <input type="text" value="2012"/> <b>Mes</b> <input type="text" value="1"/> <b>Dia</b> <input type="text" value="1"/> <b>Hora</b> <input type="text" value="12"/>	<b>Ano</b> <input type="text" value="2014"/> <b>Mes</b> <input type="text" value="3"/> <b>Dia</b> <input type="text" value="6"/> <b>Hora</b> <input type="text" value="20"/>
<input type="button" value="Exportar"/>		<input type="button" value="Atualizar"/>

Assim como a funcionalidade de exportação, o WbS também possibilita ao usuário a visualização de dados dos sensores armazenados no banco de dados através de gráficos, como mostra a Figura 38. Os gráficos gerados pela aplicação Web podem ser visualizados em tempo real por parâmetro monitorado escolhido ou através de pré-visualização antes da exportação de dados. Por intermédio desses gráficos, o usuário especialista do domínio pode realizar análises e interpretações para a tomada de decisões em relação ao estado da estrutura que está sendo monitorada pela rede de sensores ópticos FBG, preparando um plano de ações a serem executadas na estrutura.

Figura 38 – Visualização de dados dos sensores pelo WbS.



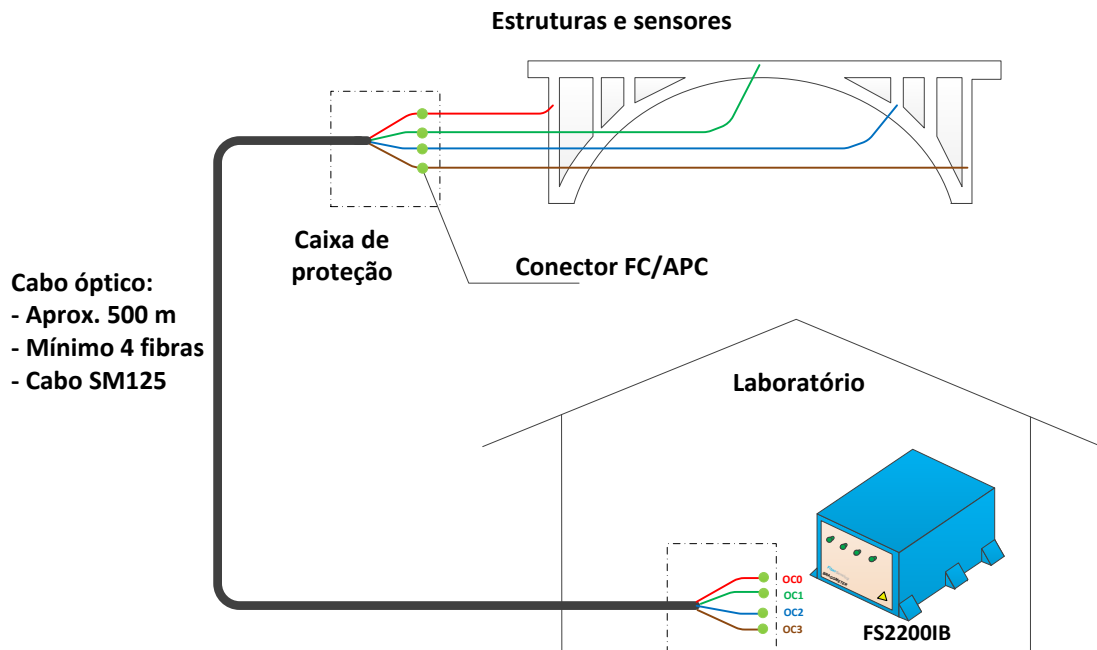
Fonte: TECCON (2014)

Além da análise e interpretação gráfica, o WbS também realiza a detecção ou análise e interpretação automática de anomalias através do motor de inferências Fuzzy e do algoritmo não-supervisionado baseado em Distribuição Gaussiana Multivariada, os quais serão demonstrados e validados no segundo cenário.

## 4.2 Segundo cenário

O segundo cenário é caracterizado como uma ponte de pedestres de metal com aproximadamente 40 m de comprimento, localizada no campus da UFPA (Belém, Pará). A configuração geral do segundo cenário é apresentada na Figura 39. Um cabo óptico monomodo (*Single Mode 125 - SM125*) de aproximadamente 500 m conecta a rede de sensores ópticos instalada na ponte com o interrogador localizado em um laboratório para medições. Essa configuração possui um interrogador óptico *FiberSensing FS2200IB Industrial BraggMeter*, quatro sensores de temperatura (*Weldable Temperature Sensor - WTS*), quatro sensores de deformação (*Weldable Strain Sensor - WSS*) e treze sensores de aceleração (*Acceleration Sensor - ACC*). As principais especificações desses componentes são apresentadas na Tabela 7 e Tabela 8.

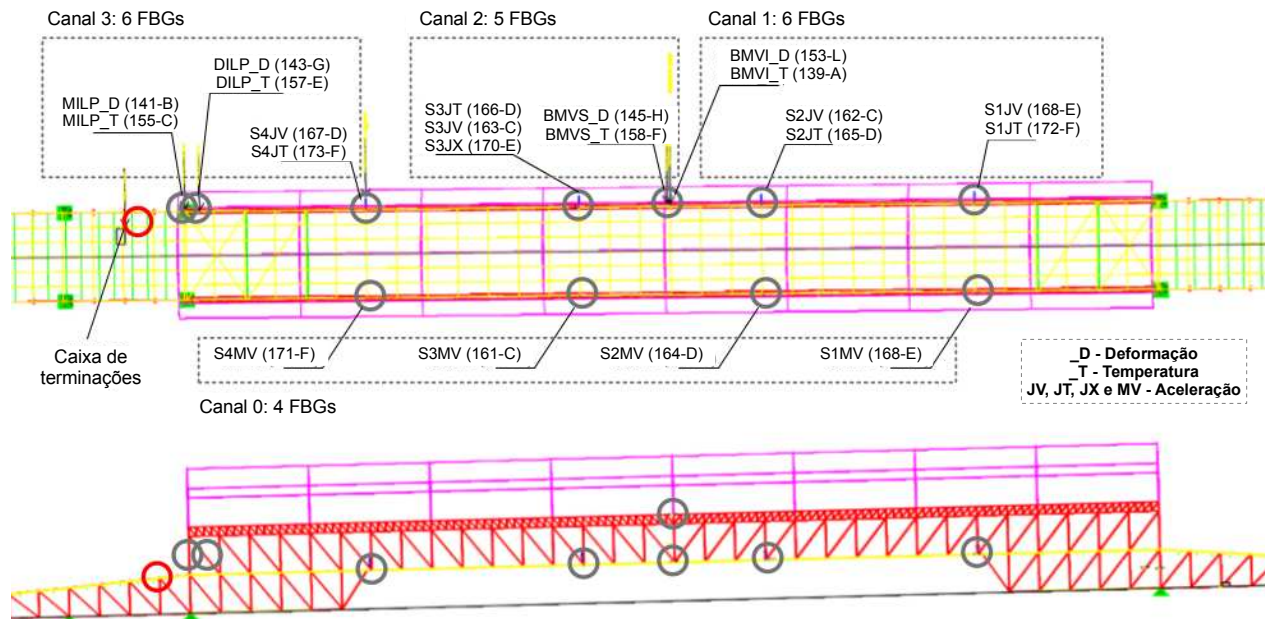
Figura 39 – Configuração do segundo cenário.



Fonte: Sales (2013)

O esquema de localização dos sensores na estrutura para o segundo cenário é mostrado na Figura 40. Cada sensor é identificado por um número de série ao qual corresponde uma curva de calibração. O número de série tem o formato: 046 840 611 136-G. A letra do final identifica a banda onde o comprimento de onda do sensor se insere, como mostra a Tabela 9. Na Figura 40 estão indicados os três últimos algarismos do número de série e a banda de comprimento de onda que identificam cada um dos sensores instalados.

Figura 40 – Esquema de localização dos sensores na estrutura.



Fonte: Sales (2013)

Tabela 7 – Especificações do interrogador óptico utilizado no segundo cenário.

Componente	Especificação	Valor
FS2200IB	Taxa de amostragem	100 S/s
	Faixa	1500 nm até 1600 nm
	Canais ópticos	4
	Sensores por canal	25 (recomendado)

Fonte: Produzido pelo autor

Tabela 8 – Especificações dos sensores ópticos utilizados no segundo cenário.

Componente	Sensitividade	Faixa	Resolução
WTS	10 pm/°C	-20°C até 80°C	0,1°C
WSS	1,2 pm/με	-2500 με até 2500 με	1 με
ACC	75 pm/g @ 40 Hz	-10 g até 10 g	12,5 μg/√Hz

Fonte: Produzido pelo autor

Os sensores de deformação foram instalados nas posições definidas e sempre acompanhados de um sensor de temperatura. Esses sensores de temperatura sempre situados o mais próximo possível dos sensores de deformação para efeitos de compensação. A compensação do efeito de temperatura nas medições de deformação efetua-se utilizando a expressão (SALES, 2013):

$$\varepsilon_{corrigida} = \varepsilon_{medida} - 7,32 \times \Delta T, \quad (4.3)$$

onde  $\varepsilon_{medida}$  é a deformação medida previamente pelo sensor,  $\Delta T$  é a temperatura medida pelo sensor que está compensando o sensor de deformação e  $\varepsilon_{corrigida}$  é a deformação sem influência da temperatura. Os acelerômetros foram montados previamente nas suas bases de forma uni, bi ou tri axial para possibilitar a sua fácil instalação e remoção. A ponte de pedestres e exemplos de sensores instalados são mostrados na Figura 41.

Tabela 9 – Banda e comprimento de onda dos sensores utilizados no segundo cenário.

Banda	Comprimento de onda (nm)
L	1522,47
A	1528,87
B	1535,13
C	1541,49
D	1547,86
E	1554,28
F	1560,75
G	1567,23
H	1573,75

Fonte: Sales (2013)

Figura 41 – Ponte de pedestres e exemplos de sensores instalados.



Fonte: Sales (2013)

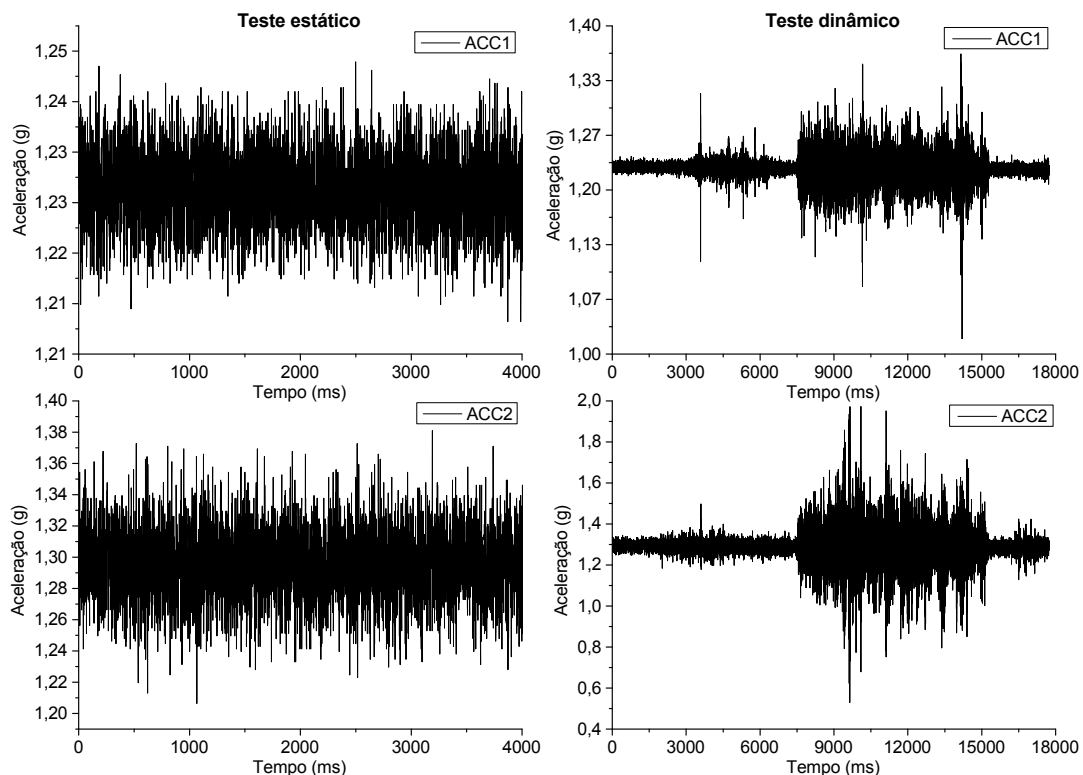
O uso do segundo cenário têm como objetivos a demonstração e validação das tarefas de interpretação e análise realizadas através do WbS para a geração de avisos e alarmes. Portanto, nesse cenário serão unicamente exploradas e exemplificadas as metodologias do motor de inferências Fuzzy e do algoritmo não-supervisionado baseado em MGD. Será realizado o estudo da detecção automática de anomalias artificialmente inseridas nos dados obtidos do monitoramento da ponte de pedestres. Essas anomalias foram

inseridas nesses sinais por conta dos sinais originais não apresentarem comportamento incomum.

Dois testes de carga foram propostos na ponte. Primeiramente, um teste estático antes de qualquer carga para visualizar o comportamento da estrutura durante o repouso. Posteriormente, um teste dinâmico, onde uma carga foi aplicada na ponte com o objetivo de gerar variações nos parâmetros aceleração e deformação. Os sinais de dois sensores de aceleração, dois sensores de deformação e seus respectivos sensores de temperatura foram coletados e armazenados pelo InterAB. Considerando que a ênfase neste cenário é apenas demonstrar a detecção de anomalias, os dados utilizados não passaram por nenhum processo de filtragem. Entretanto, deve-se destacar que na prática, a detecção de anomalia ocorrerá quase sempre com dados filtrados, devendo adaptar-se ao tipo de filtragem utilizada.

A atividade monitorada pelos acelerômetros e extensômetros ópticos durante os testes de carga é apresentada nas Figuras 42 e 43, respectivamente. Observa-se um aumento de atividade no teste dinâmico se comparado ao teste estático. Os sinais dos dois sensores de temperatura, que compensam os extensômetros WSS1 e WSS2 durante os testes de carga, são mostrados na Figura 44.

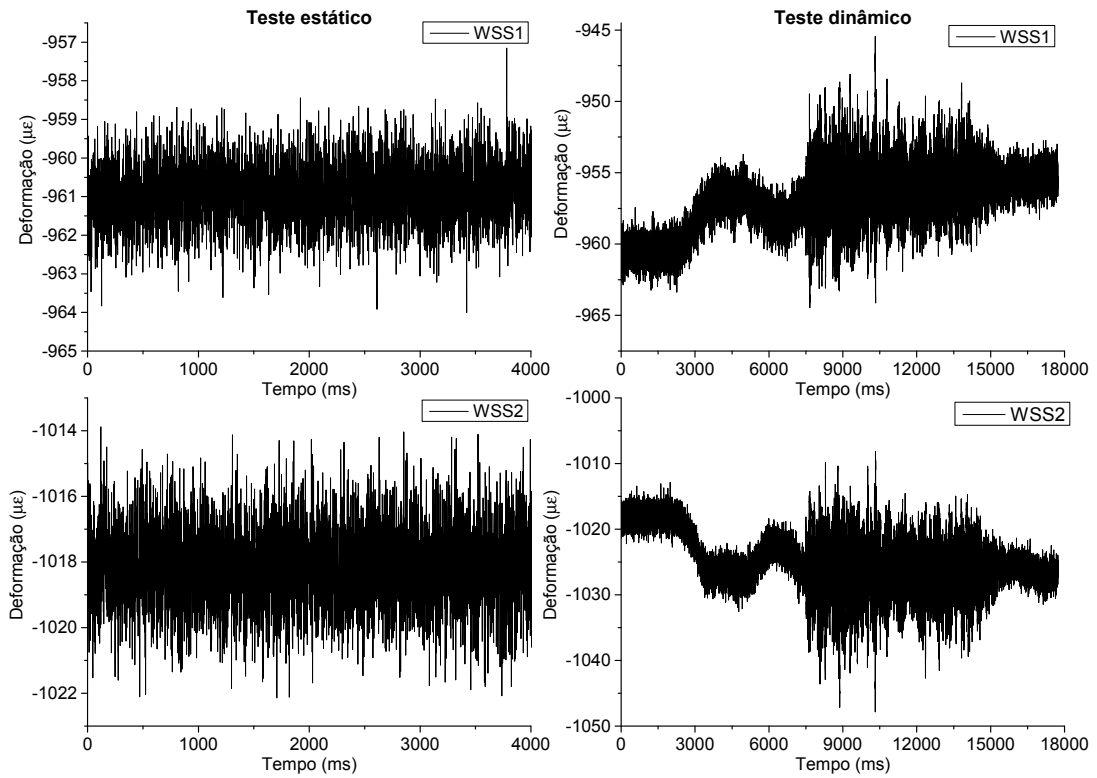
Figura 42 – Sinais de dois acelerômetros durante os testes de carga na ponte.



Fonte: Produzido pelo autor

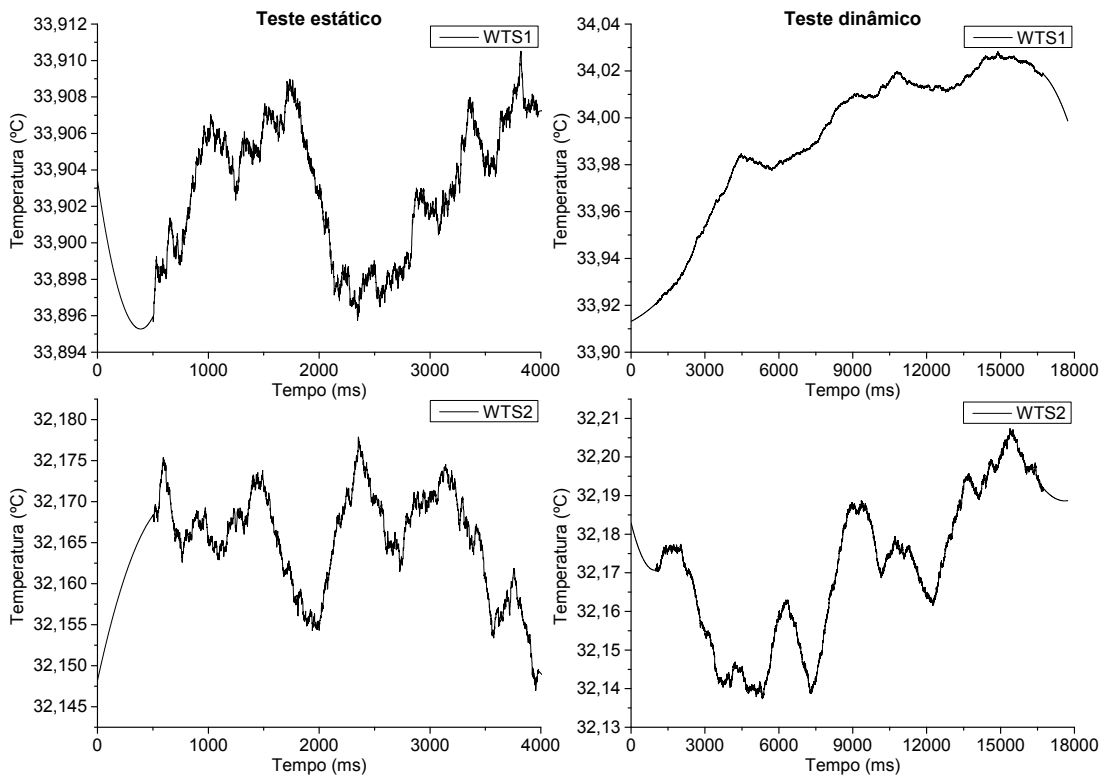


Figura 43 – Sinais de dois extensômetros durante os testes de carga na ponte.



Fonte: Produzido pelo autor

Figura 44 – Sinais de dois sensores de temperatura durante os testes de carga na ponte.



Fonte: Produzido pelo autor

### 4.2.1 Detecção de anomalias através do MIF

O motor de inferências Fuzzy incorporado no WbS recebe como entrada uma configuração definida pelo usuário, o qual deve ser um especialista do domínio relacionado ao SHM. A tela principal de configuração do MIF no WbS é mostrada na Figura 45. Nessa tela de configuração podem ser identificadas as variáveis de entrada e saída, termos Fuzzy, tipos de conexão e regras Fuzzy que devem ser explicitadas pelo usuário. A configuração utilizada para esse cenário é apresentada no Algoritmo 3. Essa configuração considera os parâmetros aceleração e deformação, as inferências realizadas pelo MIF através das nove regras definidas pelo usuário e a saída de anomalia existente ou não, objetivando avaliar e detectar possíveis comportamentos incomuns na estrutura monitorada.

A fuzzyficação, defuzzyficação e o modelo Fuzzy obtido pelo MIF são apresentados na Figura 46. O modelo Fuzzy obtido considera que anomalias podem ser detectadas quando existem combinações de variações de aceleração baixa ou alta (em módulo) com variações de deformação na forma de compressão ou tração. Esse modelo pode também ser compreendido por intermédio da Figura 47, onde a porcentagem de possível anomalia alcança até 75,2% para as combinações de variações mencionadas anteriormente. Ademais, a configuração proposta para esse cenário apenas exemplifica a utilização do MIF acoplado ao WbS, outros parâmetros de entrada e saída poderiam ser considerados, assim como novas regras poderiam ser adicionadas pelo usuário.

Figura 45 – Configuração do MIF no WbS.

The image shows a software interface for configuring fuzzy rules. At the top, a header reads "Regras Fuzzy". Below it, a section titled "Regras" contains a text box with the rule: "RULE 1 : IF Temperatura IS alta AND Deformação IS grande THEN Anomalia IS Existe;". The interface is divided into several functional areas:

- IF Section:** A box labeled "Entrada" contains three items: "Temperatura", "Deformação", and "Aceleração".
- IS Section:** A box labeled "Terminos" contains five items: "baixa", "media", "alta", "pequena", and "grande".
- THEN Section:** A box labeled "Saída" contains one item: "Anomalia".
- IS Section:** A box labeled "Terminos" contains two items: "Inexiste" and "Existe".
- Conexão Section:** Two radio buttons are present, "AND" is selected, and "OR" is unselected.
- Buttons:** "Adicionar Regra", "Remover Regra", "Add Antecedente", and "Salvar Configuração".
- Configuration Name:** A text field labeled "Nome da Configuração:" contains the text "SHM\_config\_1".

**Algoritmo 3** Configuração do MIF para o segundo cenário.

---

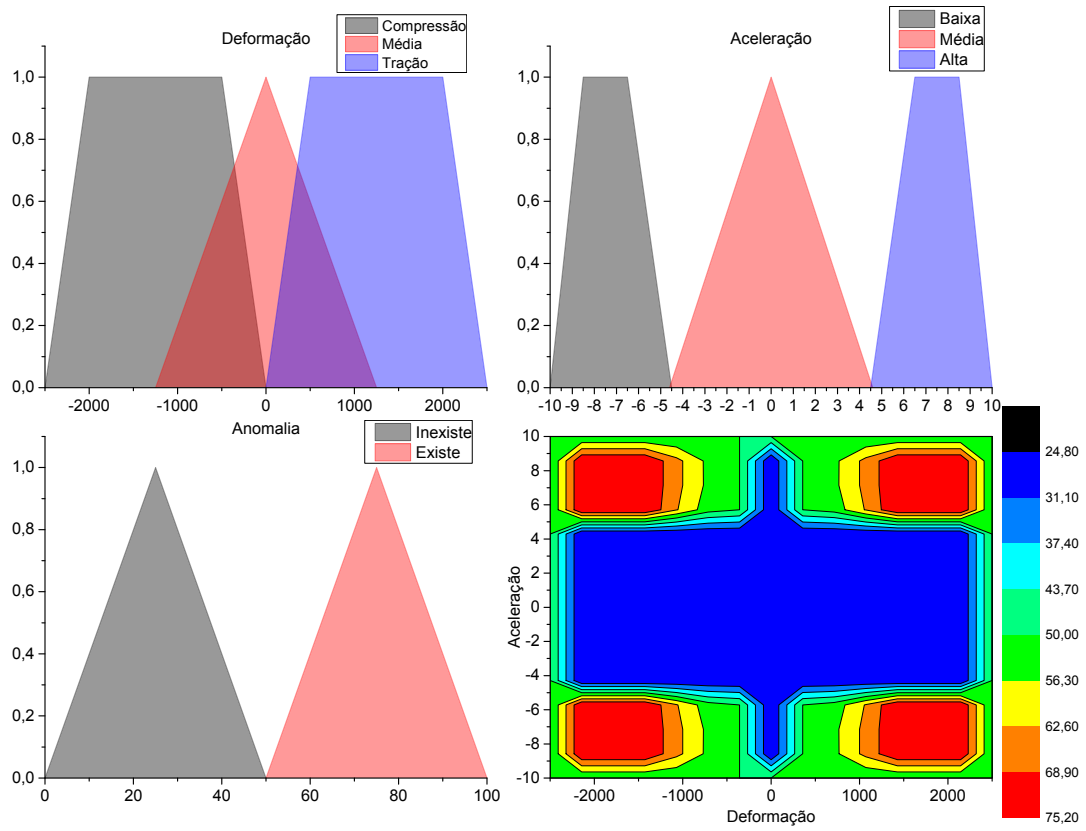
```

FUNCTION_BLOCK SHM_conf
VAR_INPUT
    deformacao, aceleracao : REAL;
END_VAR
VAR_OUTPUT
    anomalia : REAL;
END_VAR
FUZZIFY estado_defor // microstrain
    TERM compressao := (-2500,0) (-2000,1) (-500,1) (-1,0) ;
    TERM media := (-1250,0) (0,1) (1250,0) ;
    TERM tracao := (0,0) (500,1) (2000,1) (2500,0) ;
END_FUZZIFY
FUZZIFY estado_ acel // g
    TERM baixa := (-10,0) (-8.5,1) (-6.5,1) (-4.5,0) ;
    TERM media := (-4.6,0) (0,1) (4.6,0) ;
    TERM alta := (4.5,0) (6.5,1) (8.5,1) (10,0) ;
END_FUZZIFY
DEFUZZIFY anomalia
    TERM inexiste := (0,0) (25,1) (50,0) ;
    TERM existe := (50,0) (75,1) (100,0) ;
    METHOD : COG; // Centro de Gravidade (Center of Gravity)
END_DEFUZZIFY
RULEBLOCK regrasAnomalia
    Rule1: IF estado_defor IS media AND estado_ acel IS media THEN
anomalia IS inexiste ;
    Rule2: IF estado_defor IS media AND estado_ acel IS baixa THEN
anomalia IS inexiste ;
    Rule3: IF estado_defor IS media AND estado_ acel IS alta THEN anomalia
IS inexiste ;
    Rule4: IF estado_defor IS compressao AND estado_ acel IS media THEN
anomalia IS inexiste ;
    Rule5: IF estado_defor IS tracao AND estado_ acel IS media THEN
anomalia IS inexiste ;
    Rule6: IF estado_defor IS compressao AND estado_ acel IS baixa THEN
anomalia IS existe ;
    Rule7: IF estado_defor IS compressao AND estado_ acel IS alta THEN
anomalia IS existe ;
    Rule8: IF estado_defor IS tracao AND estado_ acel IS baixa THEN
anomalia IS existe ;
    Rule9: IF estado_defor IS tracao AND estado_ acel IS alta THEN
anomalia IS existe ;
END_RULEBLOCK
END_FUNCTION_BLOCK

```

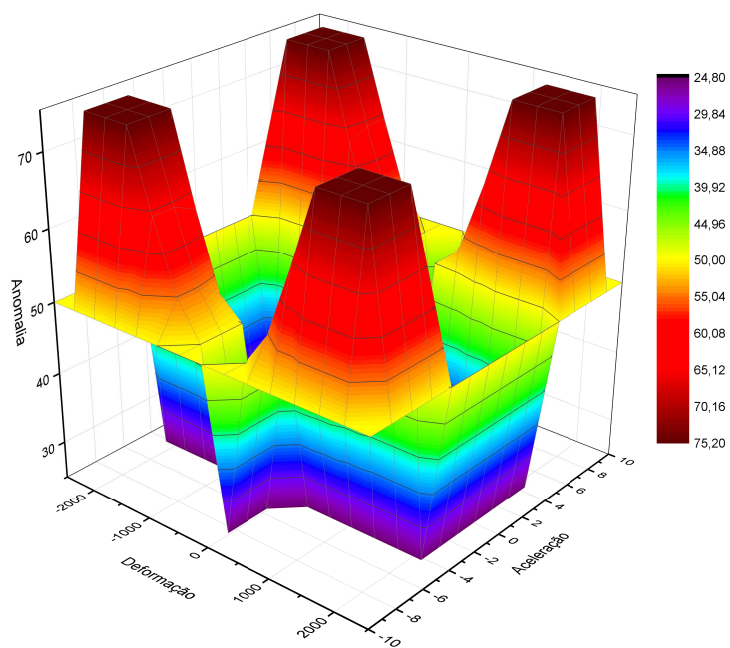
---

Figura 46 – Fuzzyficação, defuzzyficação e modelo Fuzzy do segundo cenário.



Fonte: Produzido pelo autor

Figura 47 – Modelo Fuzzy obtido a partir da configuração.

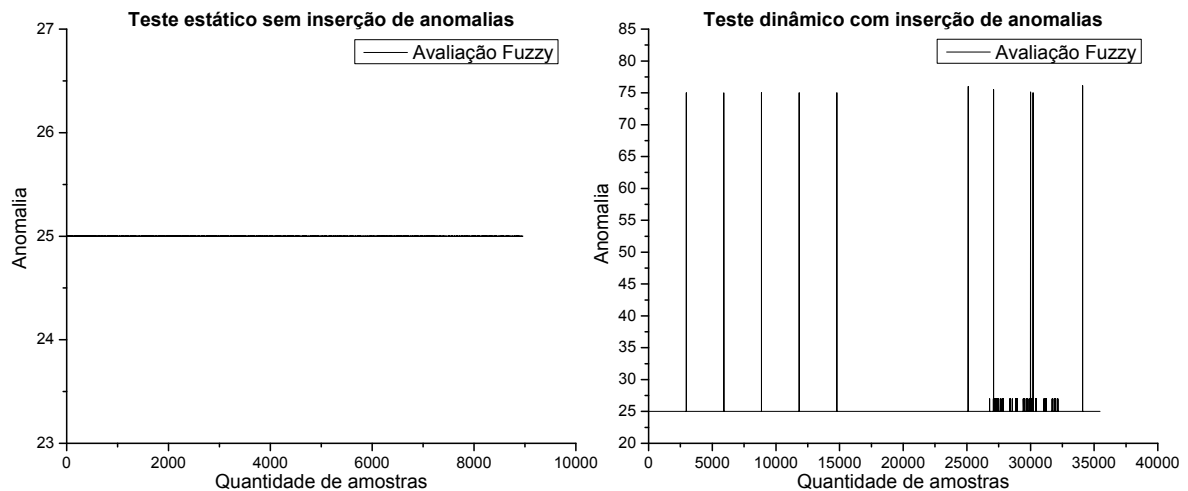


Fonte: Produzido pelo autor

A avaliação do MIF, tendo como entrada os sinais dos dois acelerômetros e dos dois extensômetros para os testes de carga na ponte, é mostrada na Figura 48. Os sinais dos dois acelerômetros foram concatenados para essa avaliação (ACC1 com ACC2), assim como os sinais dos dois extensômetros (WSS1 com WSS2). No teste estático não foram inseridas anomalias artificialmente, enquanto no teste dinâmico foram inseridas dez anomalias, cinco em cada combinação de entradas (WSS1 com ACC1 e WSS2 com ACC2). A avaliação Fuzzy para o teste estático mostra um comportamento constante em torno de 25%, o que implica em anomalia inexistente na estrutura. Na avaliação Fuzzy para o teste dinâmico com inserção artificial de anomalias, identificou-se as dez anomalias inseridas nos sinais com comportamento próximo a 75%, o que indica possível comportamento estrutural incomum, gerando avisos e alarmes para o usuário do WbS.

A configuração proposta para o MIF do WbS poderia ser facilmente estendida para analisar e interpretar automaticamente os sinais de todos os sensores de aceleração e deformação instalados na ponte de pedestres. Isso poderia ser realizado configurando o número de entradas do MIF de acordo com o número de sensores que se deseja analisar.

Figura 48 – Avaliação dos sinais de acelerômetros e extensômetros pelo MIF.



Fonte: TECCON (2014)

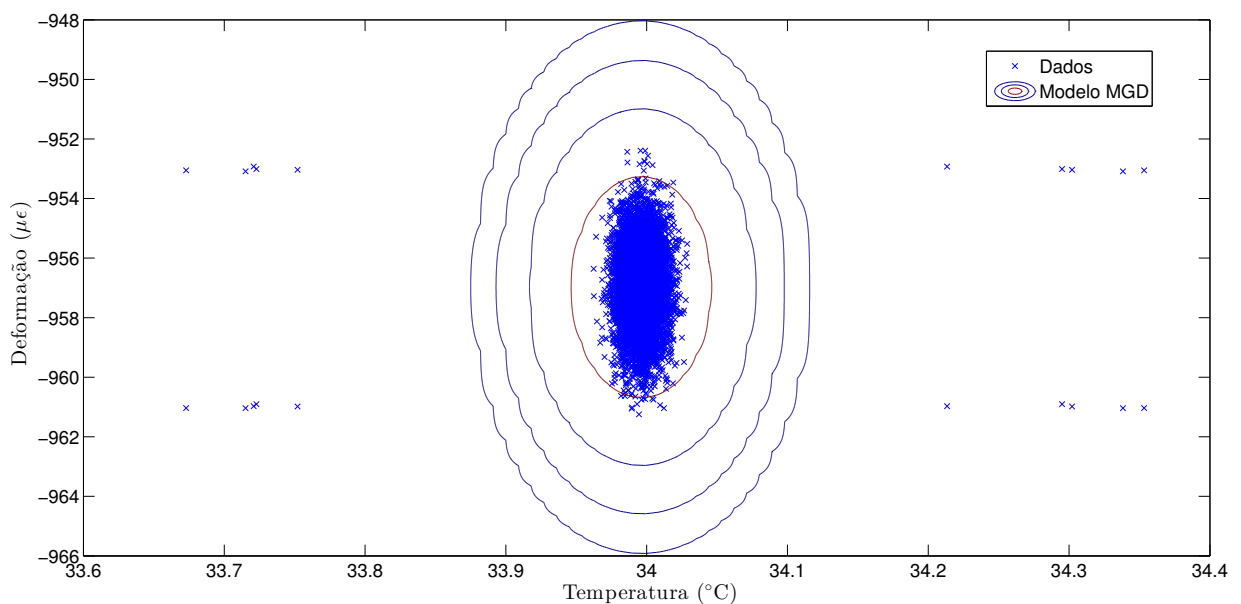
### 4.2.2 Detecção de anomalias através do algoritmo baseado em MGD

Outra forma de detectar possíveis anomalias a partir dos sinais de sensores que monitoram uma estrutura é utilizando o algoritmo não-supervisionado baseado em MGD. Esse algoritmo está acoplado ao WbS. Neste cenário, foram utilizados um sensor de deformação (WSS1) e seu respectivo sensor de temperatura (WTS1), que monitoram a ponte de pedestres durante o teste dinâmico, objetivando exemplificar o funcionamento desse algoritmo considerando outra combinação de parâmetros. As 17770 amostras armazenadas foram divididas em dois conjuntos iguais: treinamento/teste e validação. Foram inseridas vinte amostras artificialmente nos dois conjuntos de dados, as quais representam comportamento incomum em relação aos dados originais dos sensores considerados.

O contorno da distribuição gaussiana multivariada nos dados de treinamento/teste obtido pelo algoritmo baseado em MGD é apresentado na Figura 49. Esse modelo MGD separa claramente os dados com comportamento incomum dos dados com comportamento dentro da normalidade. Esse comportamento incomum pode significar possíveis anomalias na estrutura, assim como apenas dados discrepantes do comportamento geral, por exemplo devido ao ruído gerado por erros de sincronismo da unidade de interrogação.

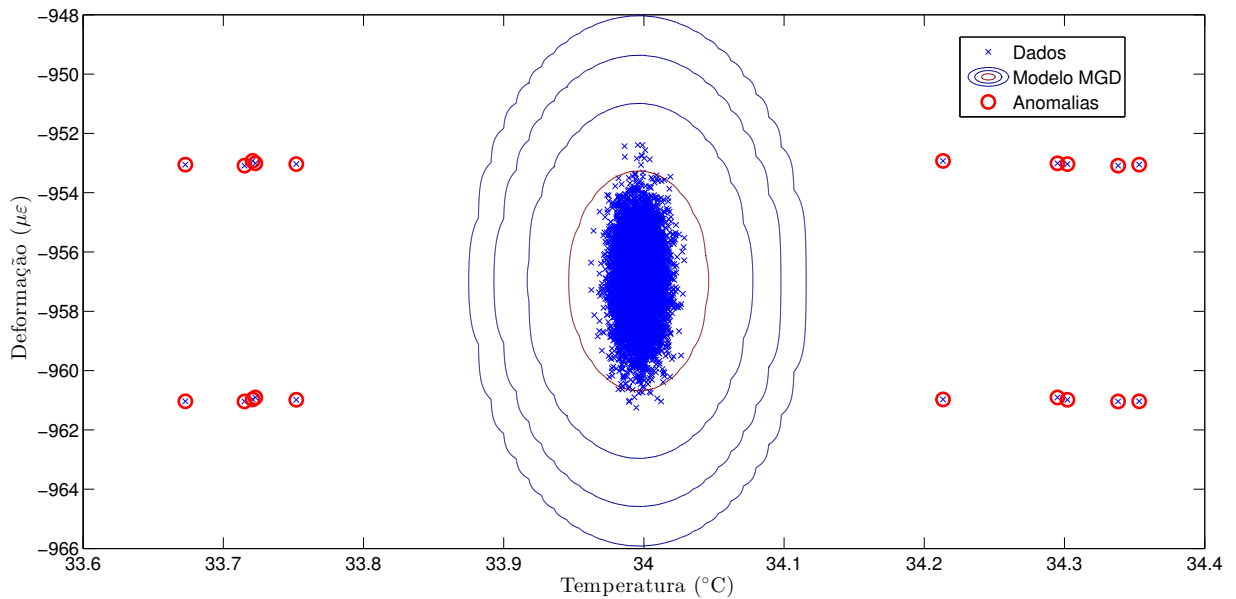
Com o conjunto de dados de validação foram obtidos os parâmetros  $\epsilon = 0,00757$  (melhor limiar) e  $F_1 = 0,930233$  (quanto mais próximo de 1, maior acurácia na classificação) na validação cruzada, o que implica em alta acurácia do modelo MGD na etapa de validação do modelo MGD obtido no treinamento. A classificação das anomalias (circunscritas em vermelho) no conjunto de treinamento/teste através do melhor limiar obtido com o conjunto de validação é mostrada na Figura 50.

Figura 49 – Contorno da MGD no conjunto de dados de treinamento/teste.



Fonte: Produzido pelo autor

Figura 50 – Anomalias detectadas pelo algoritmo baseado em MGD.



Fonte: Produzido pelo autor

Assim como o MIF, o algoritmo baseado em MGD pode ser estendido para trabalhar com todos os sensores que monitoram determinada estrutura. Esse algoritmo pode considerar um número grande de características (aceleração, deformação, temperatura e outras) para analisar e identificar possíveis anomalias na estrutura monitorada a partir dos sinais desses sensores.

Em resumo, por intermédio da análise, interpretação e detecção automática de anomalias através das duas metodologias apresentadas, o usuário especialista do domínio pode realizar a tomada de decisões e planejar a manutenção estrutural com base no estado da estrutura que está sendo monitorada pela rede de sensores ópticos FBG.

## 5 Considerações finais e trabalhos futuros

O presente trabalho apresentou uma proposta de gerenciamento de dados para monitoramento de saúde estrutural com sensores ópticos baseados em grades de Bragg em fibra. Essa proposta teve como base a modelagem de duas aplicações Java de tempo real: InterAB e WbS. Os *softwares* objetivaram o cumprimento das tarefas de execução de medições (leituras dos sensores), armazenamento de dados (local ou remoto), fornecer acesso aos dados, visualização e exportação dos dados, interpretação e análise dos dados, e uso dos dados (geração de avisos e alarmes).

O *software* InterAB foi responsável pela execução de medições, armazenamento de dados e acesso aos dados. Essas tarefas foram satisfeitas por intermédio de aquisições automáticas paralelizadas das leituras dos sensores ópticos através da comunicação TCP/IP com o interrogador óptico, processamento aplicado nas leituras através de filtragem ou compressão dos dados, armazenamento dos dados processados em uma base de dados relacional através de comunicação JDBC e disponibilidade de acesso aos dados consolidados no banco de dados para outras aplicações. As técnicas de filtragem por variação no comprimento de onda e por atividade foram criadas e implementadas no InterAB, objetivando o armazenamento no banco de dados apenas de amostras que representem variações interessantes ou que apresentem eventos significativos no parâmetro medido pelo sensor. Os métodos de compressão PCA, APCA e PWLH geralmente mantêm um número maior de amostras armazenadas na base de dados, se comparados as técnicas de filtragem, realizando uma melhor aproximação em relação ao sinal original.

Por sua vez, o *software* WbS foi responsável pela visualização, exportação, interpretação e análise, e geração de avisos e alarmes. Essas atividades foram cumpridas através da utilização de padrões Web, como o modelo de arquitetura MVC, páginas de apresentação XHTML, *framework* Hibernate e padrão para persistência de dados DAO, e detecção automática de anomalias pelo motor de inferências Fuzzy e algoritmo não-supervisionado baseado em MGD. As metodologias de análise e interpretação automática de anomalias agregaram a essa proposta de gerenciamento de dados a importante e necessária participação de um especialista do domínio relacionado ao SHM, o qual possibilita a configuração de regras Fuzzy, assim como a definição de parâmetros de entrada do algoritmo não-supervisionado e do MIF. Além disso, a participação do especialista também é requerida no momento da avaliação da interpretação realizada pelas metodologias, ratificando ou refutando os resultados obtidos pela aplicação das metodologias nos dados de monitoramento de determinada estrutura.



As duas aplicações possuem a capacidade de operar de forma independente ou integrada no gerenciamento de dados. Na maneira independente, o InterAB realiza as aquisições de dados, filtragem/compressão e persistência na base de dados, utilizando configurações padrões. Por outro lado, o WbS requer apenas, para a sua operação independente, que a base de dados esteja populada por qualquer aplicação de persistência, não necessariamente o InterAB. Na forma integrada, todas as tarefas de gerenciamento de dados são realizadas através de um esquema produtor-consumidor, onde notificações de atualização no banco de dados servem de comunicação entre os *softwares*.

Os resultados obtidos em laboratório e ambiente real demonstraram e validaram a metodologia proposta para realizar as tarefas do gerenciamento de dados no âmbito do SHM. Esses resultados foram alcançados através de exemplificações de aplicação das principais funcionalidades dos *softwares* InterAB e WbS.

No primeiro cenário foram validadas as atividades realizadas pelo InterAB, tais como: aquisição, reconhecimento de topologia, técnicas de filtragem e compressão de dados, armazenamento e acesso aos dados. Um maior destaque foi dado aos métodos de compressão e filtragem com o interesse de permitir a compreensão da contribuição na redução de registros no banco de dados quando essas técnicas são aplicadas nos dados de monitoramento coletados a partir da rede de sensores. Além disso, no primeiro cenário também foram ressaltadas as funcionalidades de visualização e exportação do WbS. Essas duas tarefas são de grande importância devido ao fato de possibilitarem a interação do usuário com os dados de forma gráfica ou por arquivamento do histórico de medições.

O segundo cenário foi utilizado para validar a análise e interpretação automática para a geração de avisos e alarmes através de duas metodologias incorporadas no WbS para a detecção de comportamentos estruturais incomuns. Os dados referentes aos dois testes de carga na ponte de pedestres foram atualizados com a inserção artificial de amostras que representassem possíveis anomalias. Uma configuração Fuzzy foi criada e executada para exemplificar como o MIF pode inferir possíveis anomalias a partir das regras criadas pelo especialista e de dados dos sensores como entrada dessa abordagem. Por sua vez, o algoritmo não-supervisionado baseado em MGD foi exemplificado através de um conjunto de dados bidimensional com o objetivo de facilitar a compreensão e visualização do modelo gaussiano obtido para separar amostras comuns de amostras anômalas. Ambas as metodologias conseguiram identificar completamente e claramente as anomalias inseridas artificialmente nos sinais de dados dos sensores.

Os cenários considerados para testes dos *softwares* apresentaram diferentes tipos de interrogadores e sensores ópticos revelando a eficiência, robustez e flexibilidade das aplicações, garantindo atomicidade, consistência, isolamento e durabilidade dos dados de monitoramento persistidos pelo InterAB e apresentados pelo WbS.

No sentido de dar prosseguimento ao trabalho desenvolvido e refinar as abordagens propostas, a seguir são destacados alguns tópicos de possíveis trabalhos futuros:

- As duas aplicações podem ser utilizadas em diferentes cenários monitorados por redes de sensores ópticos FBG, como em redes de distribuição de energia, aeronáutica, oleodutos, indústria de turbinas eólicas e outras;
- Novas técnicas de compressão podem ser adicionadas ao InterAB com o objetivo de reduzir a quantidade de dados armazenados na base de dados, aumentando a possibilidade de escolha por parte do usuário da aplicação. Os métodos *Slide Filters* (SF) (ELMELEEGY et al., 2009), *Chebyshev Approximation* (CHEB) (CHENG et al., 2007) e *k-means* (KANUNGO et al., 2002) são técnicas já consolidadas na literatura e que podem ser adaptadas e incorporadas no InterAB;
- Novas metodologias de detecção de anomalias podem ser incorporadas ao WbS como formas de diagnosticar comportamentos estruturais incomuns, particularmente aquelas baseadas em algoritmos de aprendizado de máquina são bastante difundidas atualmente (FIGUEIREDO et al., 2011). As metodologias *Principal Component Analysis* (PCA\*), *Nonlinear Principal Component Analysis* (NPCA), *Mahalanobis Squared Distance* (MSD), *Auto-Associative Neural Network* (AANN) e *Singular Value Decomposition* (SVD) são exemplos de abordagens que podem ser empregadas nos dados de monitoramento estrutural;
- Implementação de um *Web Service* para a integração de aplicações diferentes. Os *Web Services* são componentes que permitem às aplicações enviar e receber dados no formato universal XML (*EXtensible Markup Language*) (CHENG; TANG; ZHAO, 2006). Com essa tecnologia é possível que novas aplicações possam interagir com aquelas que já existem e que *softwares* desenvolvidos em plataformas diferentes possuam total compatibilidade;
- Ampliar a quantidade de interrogadores ópticos reconhecidos pelo InterAB por intermédio do estudo e implementação dos métodos básicos do protocolo de comunicação do interrogador que se deseja dar suporte;
- Ampliar a quantidade de sensores ópticos FBG reconhecidos pelo InterAB através do cadastro da curva de calibração e do comprimento de onda de referência do sensor que se deseja dar suporte;
- Desenvolvimento de um *framework* para o estudo do impacto da aplicação dos métodos de compressão como uma forma de pré-processamento dos dados de monitoramento que posteriormente serão utilizados em técnicas de detecção de anomalias ou detecção de danos estruturais.

## Referências

- ADHAMI, R. Autonomous structural monitoring using fiber Bragg grating. In: *International Conference on Computer Systems and Industrial Informatics (ICCSII)*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1–4. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 27.
- ANTUNES, P. et al. Static and dynamic structural monitoring based on optical fiber sensors. In: *12th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–4. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 21.
- ANTUNES, P. F. da C. *Sensores ópticos para monitorização dinâmica de estruturas*. Tese (Doutorado) — Universidade de Aveiro, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 22.
- APACHE. *Apache HTTP Sever Project - Apache httpd 2.4.7*. Janeiro 2014. Disponível em: <<http://httpd.apache.org/>>. Citado na página 38.
- APACHE. *Apache Tomcat 7.0.50*. Janeiro 2014. Disponível em: <<http://tomcat.apache.org/>>. Citado na página 38.
- BERNARD, E. *Hibernate Annotations*. Fevereiro 2014. Disponível em: <[https://docs.jboss.org/hibernate/annotations/3.5/reference/en/html\\_single/](https://docs.jboss.org/hibernate/annotations/3.5/reference/en/html_single/)>. Citado na página 46.
- BURAGOHAİN, C.; SHRIVASTAVA, N.; SURI, S. Space Efficient Streaming Algorithms for the Maximum Error Histogram. In: *IEEE 23rd International Conference on Data Engineering (ICDE)*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 1026–1035. Citado na página 53.
- CHAKRABARTI, K. et al. Locally Adaptive Dimensionality Reduction for Indexing Large Time Series Databases. *ACM Transactions on Database Systems*, 2002. v. 27, n. 2, p. 188–228, 2002. Citado na página 52.
- CHANDOLA, V.; BANERJEE, A.; KUMAR, V. Anomaly Detection for Discrete Sequences: A Survey. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2012. v. 24, n. 5, p. 823–839, 2012. Citado na página 57.
- CHENG, A. F. et al. *Data Compression using Chebyshev Transform, Patente US 7.249.153 B2*. Maio 2007. Citado na página 83.
- CHENG, H.; TANG, Q. C.; ZHAO, J. Web Services and Service-Oriented Application Provisioning: An Analytical Study of Application Service Strategies. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 2006. v. 53, n. 4, p. 520–533, 2006. Citado na página 83.
- CINGOLANI, P.; ALCALA-FDEZ, J. jFuzzyLogic: a robust and flexible Fuzzy-Logic inference system language implementation. In: *IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1–8. Citado 2 vezes nas páginas 54 e 55.
- CINGOLANIA, P.; ALCALA-FDEZ, J. jFuzzyLogic: a Java Library to Design Fuzzy Logic Controllers According to the Standard for Fuzzy Control Programming. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 2013. v. 6, n. 1, p. 61–75, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 54 e 55.

- COSTA, R. da; CUGNASCA, C. Use of Data Warehouse to Manage Data from Wireless Sensors Networks That Monitor Pollinators. In: *Eleventh International Conference on Mobile Data Management (MDM)*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 402–406. Citado na página 2.
- DIALLO, O.; RODRIGUES, J. J.; SENE, M. Real-time data management on wireless sensor networks: A survey. *Journal of Network and Computer Applications*, 2012. v. 35, n. 3, p. 1013–1021, 2012. Citado na página 2.
- DONG, J. et al. Design and Implementation of a Novel Wireless Sensor Network System Terminal Based on Embedded Web Server and Database. In: *International Conference on Automatic Control and Artificial Intelligence (ACAI)*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 772–775. Citado na página 2.
- EATON, J. W. *GNU Octave*. Janeiro 2014. Disponível em: <<http://www.gnu.org/software/octave/>>. Citado na página 38.
- ELMELEEGY, H. et al. Online Piece-wise Linear Approximation of Numerical Streams with Precision Guarantees. *VLDB Endowment*, 2009. v. 2, n. 1, p. 145–156, 2009. Citado na página 83.
- FARRAR, C. R.; WORDEN, K. *Structural health monitoring : a machine learning perspective*. [S.l.]: John Wiley & Sons, Ltd, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 18.
- FIBERSENSING. *FiberSensing, Sistemas Avançados de Monitorização, S.A.* Janeiro 2014. Disponível em: <<http://www.fibersensing.com/>>. Citado 2 vezes nas páginas 3 e 28.
- FIGUEIREDO, E. et al. Machine Learning Algorithms for Damage Detection under Operational and Environmental Variability. *Structural Health Monitoring*, 2011. v. 10, n. 6, p. 559–572, 2011. Citado na página 83.
- FIGUEIREDO, E. J. ao F. *Damage Identification in Civil Engineering Infrastructure under Operational and Environmental Conditions*. Tese (Doutorado) — Universidade do Porto, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 14.
- GIANGARRA, P. et al. Smarter bridges through advanced structural health monitoring. *IBM Journal of Research and Development*, 2011. v. 55, n. 1.2, p. 9:1–9:10, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 16.
- GLISIC, B.; INAUDI, D. *Fibre Optic Methods for Structural Health Monitoring*. [S.l.]: John Wiley & Sons, Ltd, 2007. Citado 7 vezes nas páginas 1, 2, 9, 13, 14, 16 e 25.
- GOMES, G. C. *Sensores Ópticos com base em Grades de Bragg em Fibra para Monitoramento de Temperatura e Índice de Refração*. Dissertação (Mestrado) — Instituto Militar de Engenharia, 2011. Citado na página 23.
- GONCALVES, N. M. F.; SANTOS, A. L. dos; HARA, C. S. Dysto - a dynamic storage model for wireless sensor networks. *Journal of Information and Data Management*, 2012. v. 3, n. 3, p. 147–162, 2012. Citado na página 3.
- GUO, J. et al. A novel multimode fiber for distributed temperature sensing based on anti-stokes Raman scattering. In: *Photonics Global Conference (PGC)*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1–3. Citado na página 26.

- HARMS, T.; SEDIGH, S.; BASTIANINI, F. Structural Health Monitoring of Bridges Using Wireless Sensor Networks. *IEEE Instrumentation Measurement Magazine*, 2010. v. 13, n. 6, p. 14–18, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 15.
- HUNG, N. Q. V.; JEUNG, H.; ABERER, K. An Evaluation of Model-Based Approaches to Sensor Data Compression. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2013. v. 25, n. 11, p. 2434–2447, 2013. Citado na página 53.
- KANUNGO, T. et al. An efficient k-means clustering algorithm: analysis and implementation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002. v. 24, n. 7, p. 881–892, 2002. Citado na página 83.
- KAWASHIMA, H. A Database Infrastructure for Supporting Applications of Ubiquitous Sensor Networks. In: *5th International Conference on Networked Sensing Systems (INSS)*. [S.l.: s.n.], 2008. Citado na página 3.
- LAZARIDIS, I.; MEHROTRA, S. Capturing sensor-generated time series with quality guarantees. In: *19th International Conference on Data Engineering*. [S.l.: s.n.], 2003. p. 429–440. Citado na página 51.
- LEE, B. Fiber optic sensors. In: \_\_\_\_\_. 2. ed. [S.l.]: Taylor & Francis Group, LLC, 2008. (Interrogation Techniques for Fiber Grating Sensors and the Theory of Fiber Gratings), cap. 7, p. 253–332. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.
- LI, H.; ACHIM, A.; BULL, D. Unsupervised video anomaly detection using feature clustering. *IET Signal Processing*, 2012. v. 6, n. 5, p. 521–533, 2012. Citado na página 57.
- LI, X.; CHEN, L. A Distributed Data Management System for Heterogeneous Sensor Networks. In: *4th IEEE International Conference on Software Engineering and Service Science (ICSESS)*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 599–604. Citado na página 3.
- LOPEZ-HIGUERA, J. et al. Fiber Optic Sensors in Structural Health Monitoring. *Journal of Lightwave Technology*, 2011. v. 29, n. 4, p. 587–608, 2011. Citado 4 vezes nas páginas 4, 13, 16 e 19.
- LOPEZ-HIGUERA, J. M. et al. Currents and trends on fiber sensing technologies for structural health monitoring. In: *The 2nd Mediterranean Photonics Conference*. [S.l.: s.n.], 2010. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 22.
- LUO, J. et al. Development of Optical Fiber Sensors Based on Brillouin Scattering and FBG for On-Line Monitoring in Overhead Transmission Lines. *Journal of Lightwave Technology*, 2013. v. 31, n. 10, p. 1559–1565, 2013. Citado na página 26.
- MADDEN, S. Database Abstractions for Managing Sensor Network Data. *Proceedings of the IEEE*, 2010. v. 98, n. 11, p. 1879–1886, 2010. Citado na página 2.
- MATHWORKS. *MATLAB R2013b - Accelerating the pace of engineering and science*. Janeiro 2014. Disponível em: <<http://www.mathworks.com/products/matlab/>>. Citado na página 38.
- MEASURES, R. M. *Structural Monitoring with Fiber Optic Technology*. [S.l.]: Academic Press, 2001. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 23.

- MICRONOPTICS. *MicronOptics - A world leader in optical solutions and services*. Janeiro 2014. Disponível em: <<http://www.micronoptics.com/>>. Citado 2 vezes nas páginas 3 e 28.
- MORREALE, P.; SULESKI, R. System Design and Analysis of a Web-Based Application for Sensor Network Data Integration and Real-time Presentation. In: *3rd Annual IEEE Systems Conference*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 201–204. Citado na página 3.
- OIDA. *Global Optoelectronics Industry Market Report and Forecast*. [S.l.], 2009. Disponível em: <[http://www.osa.org/oida/publications/publication\\_report\\_library/](http://www.osa.org/oida/publications/publication_report_library/)>. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 23.
- OMG. *Unified Modeling Language (UML) by Object Management Group (OMG)*. Janeiro 2014. Disponível em: <<http://www.uml.org/>>. Citado na página 29.
- ORACLE. *Class SwingWorker*. Janeiro 2014. Disponível em: <<http://docs.oracle.com/javase/6/docs/api/javax/swing/SwingWorker.html>>. Citado na página 34.
- ORACLE. *Core J2EE Patterns - Data Access Object*. Fevereiro 2014. Disponível em: <<http://www.oracle.com/technetwork/java/dataaccessobject-138824.html>>. Citado 2 vezes nas páginas 44 e 45.
- ORACLE. *GlassFish 4 - World's first Java EE 7 Application Server*. Janeiro 2014. Disponível em: <<http://glassfish.java.net/>>. Citado na página 38.
- ORACLE. *Java SE Technologies - Database*. Janeiro 2014. Disponível em: <<http://www.oracle.com/technetwork/java/javase/jdbc/index.html>>. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 44.
- ORACLE. *MySQL - The world's most popular open source database*. Fevereiro 2014. Disponível em: <<http://www.mysql.com/>>. Citado na página 44.
- ORACLE. *The NetBeans JavaBeans Tutorial*. Janeiro 2014. Disponível em: <<http://wiki.netbeans.org/NetBeansJavaBeansTutorial>>. Citado na página 39.
- ORIGINLAB. *OriginLab 9.1 - Data Analysis and Graphing Software*. Janeiro 2014. Disponível em: <<http://www.originlab.com/>>. Citado na página 38.
- PAWAR, P. M.; GANGULI, R. *Structural Health Monitoring Using Genetic Fuzzy Systems*. [S.l.]: Springer, 2011. Citado na página 54.
- RAO, Y. J. Fiber optic sensors. In: \_\_\_\_\_. 2. ed. [S.l.]: Taylor & Francis Group, LLC, 2008. (Applications of Fiber Optic Sensors), cap. 10, p. 397–434. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 22.
- REDHAT. *Hibernate ORM 4.3.1 Final Release*. Janeiro 2014. Disponível em: <<http://hibernate.org/>>. Citado 3 vezes nas páginas 39, 44 e 45.
- REDHAT. *JBoss Application Server 6*. Janeiro 2014. Disponível em: <<http://www.jboss.org/overview/>>. Citado na página 38.

- ROCTESTGROUP. *SOFO STANDARD DEFORMATION SENSOR - DATASHEET*. [S.l.], Janeiro 2014. Disponível em: <[http://www.roctest-group.com/sites/default/files/datasheets/products/10.1010ENDS\\_SOFO%20Standard%20Deformation%20Sensor-.pdf](http://www.roctest-group.com/sites/default/files/datasheets/products/10.1010ENDS_SOFO%20Standard%20Deformation%20Sensor-.pdf)>. Citado na página 26.
- RSTUDIO. *RStudio IDE - Software, education, and services for the R community*. Janeiro 2014. Disponível em: <<http://www.rstudio.com/>>. Citado na página 38.
- SALES, C. B. *121035CBB UFPA Installation Report*. [S.l.], Fevereiro 2013. Citado 3 vezes nas páginas 70, 71 e 72.
- SANTOS, A. D. F. et al. Técnicas de filtragem para persistência de dados de redes de sensores Ópticos fbg. In: *28th Brazilian Symposium on Databases*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 31–36. Citado na página 49.
- SCOTT, R. et al. Commissioning and Evaluation of a Fiber-Optic Sensor System for Bridge Monitoring. *IEEE Sensors Journal*, 2013. v. 13, n. 7, p. 2555–2562, 2013. Citado 3 vezes nas páginas 15, 16 e 20.
- SMARTEC. *SMARTEC - Integrated Instrumentation and Structural Health Monitoring Solutions*. Janeiro 2014. Disponível em: <<http://www.roctest-group.com/>>. Citado na página 28.
- SON, V. Q. et al. WiSeCoMaSys: A tool for data collection and management of Wireless Sensor Networks. In: *International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC)*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 33–38. Citado na página 3.
- STEPINSKI, T.; UHL, T.; STASZEWSKI, W. *Advanced structural damage detection : from theory to engineering applications*. [S.l.]: John Wiley & Sons, Ltd, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 10.
- TAVALLAEE, M.; STAKHANOVA, N.; GHORBANI, A. Toward Credible Evaluation of Anomaly-Based Intrusion-Detection Methods. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*, 2010. v. 40, n. 5, p. 516–524, 2010. Citado na página 57.
- TAYLOR, H. F. Fiber optic sensors. In: \_\_\_\_\_. 2. ed. [S.l.]: Taylor & Francis Group, LLC, 2008. (Fiber Optic Sensors Based upon the Fabry–Perot Interferometer), cap. 2, p. 35–64. Citado na página 26.
- TECCON. *Site do Projeto TECCON*. Março 2014. Disponível em: <<http://www.teconweb.ufpa.br/>>. Citado 6 vezes nas páginas 57, 61, 68, 69, 75 e 78.
- THURASINGHAM, B. Secure Sensor Information Management and Mining. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2004. v. 21, n. 3, p. 14–19, 2004. Citado na página 3.
- TOSI, D. et al. Simple fiber Bragg grating sensing systems for structural health monitoring. In: *IEEE Workshop on Environmental, Energy, and Structural Monitoring Systems (EESMS)*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 80–86. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 27.
- UDD, E. Fiber optic sensors. In: \_\_\_\_\_. 2. ed. [S.l.]: Taylor & Francis Group, LLC, 2008. (Overview of Fiber Optic Sensors), cap. 1, p. 1–34. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.

- UKIL, A.; BRAENDLE, H.; KRIPPNER, P. Distributed Temperature Sensing: Review of Technology and Applications. *IEEE Sensors Journal*, 2012. v. 12, n. 5, p. 885–892, 2012. Citado na página 26.
- VAIDEHI, V.; DEVI, D. Distributed Database Management and Join of Multiple Data Streams in Wireless Sensor Network using Querying Techniques. In: *International Conference on Recent Trends in Information Technology (ICRTIT)*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 594–599. Citado na página 3.
- WANG, M. et al. Fabry-Perot Interferometer Sensor Fabricated by Femtosecond Laser for Hydrogen Sensing. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013. v. 25, n. 8, p. 713–716, 2013. Citado na página 26.
- WENZEL, H. *Health monitoring of bridges*. [S.l.]: John Wiley & Sons, Ltd, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 14.
- YANG, N. Technologies for structural test & monitoring: The modern approach. In: *IEEE AUTOTESTCON*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–5. Citado na página 22.
- ZHANG, L. Fiber optic sensors. In: \_\_\_\_\_. 2. ed. [S.l.]: Taylor & Francis Group, LLC, 2008. (In-Fiber Grating Optic Sensors), cap. 4, p. 109–162. Citado na página 27.