



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

INSTITUTO DE TECNOLOGIA

FACULDADE DE ENGENHARIA DA  
COMPUTAÇÃO E TELECOMUNICAÇÕES

# Desenvolvimento de sistema de persistência de dados para redes de sensores ópticos

**Autor:** Adam Dreyton Ferreira dos Santos

**Orientador:** Prof. Dr. Marco José de Sousa

Belém/PA, 9 de fevereiro de 2017.



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

INSTITUTO DE TECNOLOGIA

FACULDADE DE ENGENHARIA DA  
COMPUTAÇÃO E TELECOMUNICAÇÕES

## Desenvolvimento de sistema de persistência de dados para redes de sensores ópticos

**Autor:** Adam Dreyton Ferreira dos Santos

**Orientador:** Prof. Dr. Marco José de Sousa

**Disciplina:** Trabalho de Conclusão de Curso II

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia da Computação pela Universidade Federal do Pará.

Belém/PA, 9 de fevereiro de 2017.

## **DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE PERSISTÊNCIA DE DADOS PARA REDES DE SENSORES ÓPTICOS**

**Autor:** Adam Dreyton Ferreira dos Santos

Este Trabalho foi julgado adequado para a obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia da Computação, aprovado em sua forma pela banca examinadora.

**Banca examinadora:**

---

**Prof. Dr. Marco José de Sousa**  
(Orientador – Engenharia da Computação)

---

**Prof. Dr. Claudomiro de Souza de Sales Junior**  
(Membro – Ciência da Computação)

---

**Prof. Dr. Diego Lisboa Cardoso**  
(Membro – Engenharia da Computação)

---

**Prof. Dr. João Crisóstomo Weyl Albuquerque Costa**  
(Membro – Engenharia da Computação)

**Julgado em: 23/01/2013**

**Conceito: EXCELENTE**

# Agradecimentos

Agradeço a Deus.

Agradeço à minha família pelo carinho e o apoio dispensado durante todo o curso de Engenharia da Computação.

Agradeço aos meus amigos que considero parte da família e que por diversas vezes me apoiaram: José Tadeu, Bruce Alberto, Wildne John e Anne Alencar.

Agradeço especialmente ao professor Dr. Marco José de Sousa, pela imensa paciência, inspiração e pelo conhecimento repassado.

Agradeço aos professores Dr. Claudomiro de Souza de Sales Junior, Dr. João Crisóstomo Weyl Albuquerque Costa e Dr. Aldebaro Barreto da Rocha Klautau Junior, pela amizade e pela enriquecedora experiência oferecida no Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado (LEA).

Agradeço pela amizade e pelo companheirismo dos meus amigos de curso: Fabrício Gomes, Diogo Ishimori, João Soares, Nyanne Moritsuka, Carlos Rogério, Diego da Costa, Nagib Coelho, Amália Honda, Alex Santos e Allan Braga.

Agradeço pela amizade e por todas as contribuições dos meus amigos do LEA: Renan Santos, Renan Almeida, Nyanne Moritsuka, Hibernon Junior, Daniel Levy, Waldeir Monteiro, Luise Cardozo e Gustavo Ikeda.

Agradeço aos meus bons professores do curso de Engenharia da Computação da Universidade Federal do Pará, especialmente aos professores Agostinho Castro, Aldebaro Klautau, Marco de Sousa, João Crisóstomo, Rodrigo Melo, Eurípedes Santos, Ronaldo Zampolo, Renato Francês, Jasmine Araújo, Diego Cardoso, Ádamo Santana e Gervásio Cavalcante.

# Resumo

O monitoramento realizado por intermédio de redes de sensores ópticos tem apresentado grande expansão em aplicações de Engenharia Civil, petróleo e gás, compósitos, estruturas inteligentes, redes de transmissão de energia e muitas outras. Neste contexto, são de extrema importância sistemas computacionais flexíveis e extensíveis capazes de realizar as tarefas de processamento e armazenamento dos dados advindos das redes de sensores ópticos. Entretanto, os softwares comerciais desenvolvidos têm revelado grande inflexibilidade entre os fabricantes. Este Trabalho modelou e desenvolveu o sistema computacional InterAB que caracteriza-se por ser aberto e flexível, agregando as funcionalidades de identificação e construção de versões automáticas de redes de sensores ópticos na forma de estruturas persistentes em banco de dados; conforme o estabelecimento dessa estrutura em banco de dados, o sistema é capaz de mantê-la atualizada, aplicando a filtragem de dados e inserindo de forma confiável na base de dados as novas leituras geradas pelos sensores ópticos. Com o objetivo de validar as funcionalidades do sistema desenvolvido, foram realizados experimentos com redes de sensores ópticos reais que apontaram a robustez e a flexibilidade do InterAB em termos de compromisso com os requisitos propostos para o software.

**PALAVRAS-CHAVE:** Redes de sensores ópticos, InterAB, Estruturas persistentes, Banco de dados, Identificação, Filtragem de dados.

# Abstract

The monitoring realized through optical sensors networks has shown great expansion in civil engineering applications, oil and gas, composites, smart structures, power transmission networks and many others. In this context, the flexible and extensible computational systems are extremely important to carry out the processing and storage tasks of data obtained from the optical sensor networks. However, commercial software developed has shown elevated inflexibility between manufacturers. This work modeled and developed the InterAB computer system which is characterized by being open and flexible, adding the features for identification and building automatic versions of optical sensors networks in the form of persistent structures in the database. Once establishment this structure in database, the system is able to keep it updated, applying the data filtering and inserting into the database the new readings generated by optical sensors. To validate the developed system functionality, experiments were realized with real optical sensor networks that demonstrated the robustness and flexibility of InterAB in terms of commitment to the proposed requirements for the software.

**KEYWORDS:** Optical sensors networks, InterAB, Persistent structures, Database, Identification, Data filtering.

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Avanços na área de sensores em fibra óptica	1
1.2	Motivação e objetivo	4
1.3	Organização do Trabalho	5
<b>2</b>	<b>Redes de sensores ópticos baseados em FBG</b>	<b>7</b>
2.1	Sensores ópticos baseados em grades em fibra	7
2.1.1	Teoria de FBG	8
2.1.2	Princípios de sensoriamento de deformação e temperatura com FBG	10
2.2	Interrogador óptico para sistemas baseados em FBG	14
2.2.1	Estrutura geral	15
2.2.2	Interrogador óptico FS2200	17
2.3	Breve descrição de softwares comerciais	20
2.3.1	BraggMonitor FS9000	21
2.3.2	Sensing Analysis Software	21
2.3.3	LabVIEW	22
<b>3</b>	<b>Modelagem do sistema InterAB</b>	<b>23</b>
3.1	Análise e Projeto	23
3.1.1	Requisitos funcionais e não-funcionais	23
3.1.2	Adaptação de sistema pré-existente de aquisição de dados	25
3.1.3	Modelagem estática	27
3.1.4	Modelagem dinâmica	30
3.2	Projeto físico de banco de dados	33
3.2.1	Mapeamento Objeto-Relacional (ORM)	36
<b>4</b>	<b>Resultados</b>	<b>38</b>
4.1	Interface gráfica do usuário	38
4.2	Experimentos	39

---

4.2.1	Experimento 1: Monitoramento de temperatura . . . . .	40
4.2.2	Experimento 2: Identificação de topologia . . . . .	44
4.2.3	Experimento 3: Filtragem de dados . . . . .	46
<b>5</b>	<b>Considerações finais e Trabalhos futuros . . . . .</b>	<b>52</b>
<b>6</b>	<b>Trabalhos publicados . . . . .</b>	<b>54</b>
	<b>Referências Bibliográficas . . . . .</b>	<b>55</b>

# Lista de Figuras

1.1	Sistema InterAB integrado com uma aplicação Web. . . . .	5
2.1	Princípio de operação de um sistema sensor FBG. . . . .	9
2.2	Capacidade de multiplexação de sensores FBG. . . . .	9
2.3	Deformação mecânica sofrida por uma FBG. . . . .	11
2.4	Variação de temperatura sofrida por uma FBG. . . . .	11
2.5	Resposta típica de deslocamento do comprimento de onda de uma FBG para (a) deformação mecânica e (b) temperatura. . . . .	13
2.6	Interrogação óptica utilizando (a) varredura com laser sintonizável e (b) filtro sintonizável. . . . .	15
2.7	Interrogador óptico de quatro canais utilizando laser sintonizável. . . . .	16
2.8	Exemplo de uma rede de sensores ópticos em torno de um interrogador óptico de quatro canais. . . . .	17
2.9	Interrogador óptico FS2200. . . . .	17
2.10	Estados de operação da unidade de medição. . . . .	18
3.1	Sistema InterABCommunicator realizando a aquisição de dados de uma rede de sensores ópticos. . . . .	25
3.2	Sistema InterAB realizando a aquisição de dados de várias redes de sensores ópticos. . . . .	26
3.3	Diagrama de classes do sistema InterAB. . . . .	27
3.4	Diagrama de atividades geral do sistema InterAB. . . . .	31
3.5	Diagrama de atividades específico do sistema InterAB. . . . .	32
3.6	Modelo físico do banco de dados do sistema InterAB. . . . .	34
4.1	Interface gráfica do usuário para o sistema InterAB. . . . .	39
4.2	Sensor FBG de temperatura FS6300. . . . .	40
4.3	Esquema para o Experimento 1. . . . .	41
4.4	Sensores de temperatura FS6300 L e LM35. . . . .	41

---

4.5	Varição de temperatura nos 10 <i>frames</i> coletados do interrogador para a temperatura de 23 °C. . . . .	43
4.6	Varição de temperatura nos 10 <i>frames</i> coletados do interrogador para a temperatura de 27,5 °C. . . . .	43
4.7	Monitoramento de temperatura com os sensores FS6300 L via InterAB e LM35 no intervalo de 23 °C a 27,5 °C, considerando a variação de 0,5 °C. . . . .	44
4.8	Esquema para o Experimento 2. . . . .	44
4.9	Sensores de temperatura FS6300 utilizados no Experimento 2. . .	45
4.10	Identificação de topologia de rede de sensores ópticos. . . . .	45
4.11	Definição de modelo e número serial dos sensores identificados. . .	46
4.12	Filtragem de dados para a variação de temperatura de 0,5 °C. . .	47
4.13	Filtragem de dados para a variação de temperatura de 1 °C. . . .	48
4.14	Filtragem de dados para a variação de temperatura de 2 °C. . . .	48
4.15	Persistência das leituras do sensor FS6300 K sem e com filtragem de dados para a variação de temperatura de 0,5 °C. . . . .	49
4.16	Persistência das leituras do sensor FS6300 J sem e com filtragem de dados para a variação de temperatura de 1 °C. . . . .	49
4.17	Persistência das leituras do sensor FS6300 L sem e com filtragem de dados para a variação de temperatura de 2 °C. . . . .	50
4.18	Persistência das leituras do sensor FS6300 J sem e com filtragem de dados para a variação de temperatura de 1 °C usando cinco amostras. . . . .	51

# Lista de Tabelas

2.1	Exemplos do Protocolo de Comunicação . . . . .	20
4.1	Comparativo de monitoramento de temperatura entre os sensores LM35 e FS6300 L . . . . .	42

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Avanços na área de sensores em fibra óptica

A partir dos anos noventa do século passado, duas grandes revoluções ocorreram devido ao expressivo crescimento das indústrias de optoeletrônica e de comunicações baseadas em fibra óptica. A indústria de optoeletrônica trouxe produtos como leitores de discos compactos, impressoras a laser, *scanners* de código de barra, ponteiros laser etc., modificando de maneira significativa a tecnologia à disposição da sociedade. Por outro lado, a indústria de comunicações baseadas em fibra óptica revolucionou a indústria de telecomunicações ao fornecer alto desempenho e links de comunicação mais confiáveis e com custo de largura de banda cada vez menor [1]. Esses avanços tecnológicos vem trazendo benefícios de produção em massa e aumentando o potencial de comercialização de componentes ópticos e eletrônicos de alta qualidade a preços cada vez mais competitivos.

Em paralelo com esses desenvolvimentos, a tecnologia de sensores em fibra óptica tem sido a maior beneficiada com a tecnologia associada às indústrias de optoeletrônica e de comunicações baseadas em fibra óptica. Muitos dos componentes relacionados a essas indústrias foram por diversas vezes desenvolvidos para aplicações de sensores em fibra óptica. Por sua vez, a tecnologia de sensores em fibra óptica tem sido muitas vezes impulsionada pelo desenvolvimento e a subsequente produção em massa de componentes para apoiar essas indústrias [1, 2, 3].

Conforme os preços dos componentes caíram e melhorias de qualidade foram realizadas, foi reforçada a capacidade dos sensores em fibra óptica de substituir sensores tradicionais para a rotação, aceleração, medição de campo elétrico e magnético, temperatura, pressão, acústica, vibração, posição linear e angular, deformação, umidade, viscosidade, medições químicas etc. [1, 4].

Inicialmente, os sensores em fibra óptica mais bem sucedidos comercialmente foram diretamente voltados para os mercados onde a tecnologia tradicional de sensores existente foi marginal ou, em muitos casos, inexistente [4]. As vantagens inerentes aos sensores em fibra óptica, que incluem a sua capacidade de ser relativamente leve, geralmente de tamanho pequeno, passivo e resistente a interferências eletromagnéticas (*Electromagnetic Interference* – EMI); grande largura de banda; e robustez ambiental (longevidade), foram muito utilizadas para compensar suas principais desvantagens de alto custo e do usuário final não familiarizado com a tecnologia [2, 5, 6].

Atualmente, a situação de alto custo está mudando. A fibra óptica monomodo que custou US\$ 20,0/*m* em 1979 no ano de 2012 custa menos de US\$ 0,10/*m*, com diversas melhorias nas propriedades ópticas e mecânicas [1]. Dispositivos ópticos integrados que não estavam disponíveis em forma utilizável no passado agora são comumente utilizados para apoiar a produção de modelos de giroscópios baseados em fibra óptica [7]. Além disso, esses dispositivos podem cair de preço drasticamente no futuro, oferecendo cada vez mais circuitos ópticos sofisticados. Conforme essa tendência continue, as oportunidades para os desenvolvedores de sensores em fibra óptica de produzir produtos competitivos irá aumentar e a tecnologia poderá assumir uma posição cada vez mais importante no mercado.

Com as fibras ópticas garantindo sua posição na indústria de telecomunicações e sua tecnologia e mercados amadurecidos, esforços paralelos foram realizados por diferentes grupos de pesquisa em todo o mundo para explorar as principais características da fibra óptica e utilizá-las em aplicações de sensoriamento [2]. Todavia, as fibras ópticas estão causando impacto e sérias incursões comerciais em outros campos além da comunicação, como no sensoriamento industrial, sensoriamento de corrosão na indústria aeronáutica e sensoriamento de controle e iluminação automotivo. Essa transição alcançou o ponto no qual os sensores em fibra óptica podem desfrutar de maior aceitação, bem como um amplo uso nas áreas de sensoriamento estrutural e monitoramento de aplicações em Engenharia Civil, petróleo e gás, compósitos, estruturas inteligentes, redes de transmissão de energia elétrica e muitas outras [8, 9, 10].

Os sensores ópticos possuem aplicabilidade promissora principalmente onde os objetos de interesse estão expostos à radiação e a fortes campos elétricos e magnéticos. Por exemplo, na geração e distribuição de energia elétrica, o monitoramento em tempo real das condições dos condutores das linhas de transmissão ou da temperatura dos isoladores é muito mais natural para os sensores ópticos, pois os mesmos são geralmente dielétricos e passivos [11, 12, 13, 14]. Sensores eletrônicos nessas mesmas condições estão sujeitos a EMI e também dependem de uma fonte de alimentação, cuja construção e isolamento constituiriam obstáculos consideráveis [15, 16, 17]. Outros fatores como alta temperatura, umidade, alta tensão, corrente ou ruído intenso, podem fazer com que os sensores tradicionais não funcionem corretamente [18].

As redes de transmissão de energia elétrica também são cenários que revelam outra característica atrativa dos sensores ópticos, particularmente dos sensores em fibra óptica. Eles podem ser incorporados em redes ópticas de comprimento da ordem de quilômetros. Portanto, a rede de sensores pode ser instalada ao longo das linhas de transmissão, possivelmente aproveitando a infraestrutura dos cabos OPGW (*Optical fiber composite overhead Ground Wire*). Além disso, com os sensores inseridos na fibra óptica é possível construir uma rede de sensores distribuída para monitorar a linha de transmissão ao longo de toda a sua extensão [19, 20, 21].

As grandezas de interesse monitoradas nas linhas de transmissão podem ser a temperatura dos condutores e dos isoladores, ângulo de catenária, vibrações, corrente elétrica, entre outras. Certamente cada uma dessas grandezas depende de sensores ópticos apropriados baseados, por exemplo, em grades de Bragg em fibra (*Fiber Bragg Gratings* – FBG), grades de período longo (*Long Period Gratings* – LPG), rotacionadores de Faraday ou filtros Fabri Perot [7, 22]. Todos estes componentes podem ser de alguma forma integrados na mesma fibra óptica ou em fibras separadas de acordo com a compatibilidade de cada tecnologia. Devido a complexidade e diversidade de sistemas deste molde, torna-se importante o desenvolvimento de softwares computacionais que possibilitem o tratamento e o armazenamento correto e seguro dos dados obtidos a partir do monitoramento realizado por intermédio das redes de sensores ópticos.

## 1.2 Motivação e objetivo

No contexto de redes de sensores ópticos baseados em FBG aplicadas no monitoramento de aplicações das mais variadas áreas, o tratamento adequado dos dados obtidos dos sensores oferece a possibilidade de uso ilimitado por soluções e sistemas voltados a uma grande diversidade de aplicações. Conseqüentemente, o processamento e o armazenamento desses dados requer o desenvolvimento e a utilização de tecnologias adaptáveis para a coleta, identificação e validação, bem como a análise e a disponibilização para tratamento por algoritmos embutidos nas aplicações.

Entretanto, os softwares disponíveis comercialmente são inflexíveis, restritivos e sem qualquer compatibilidade entre os fabricantes. Cada empresa planeja e projeta sistemas de software para uso específico de seus dispositivos de monitoramento e que não podem ser adaptados ou explorados. Por exemplo, os fabricantes FiberSensing, Micron Optics e National Instruments oferecem os softwares BraggMonitor FS9000, Sensing Analysis Software e LabVIEW, respectivamente [23, 24, 25].

Além dos fatores já citados, o Projeto intitulado “Tecnologia de sensores em fibras ópticas para supervisão, controle e proteção de sistemas de energia elétrica” (TECCON) foi de grande motivação para a produção deste Trabalho. Este Projeto tem 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 deste objetivo está 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 e o estado da rede elétrica, permitindo a otimização da mesma.

No contexto do Projeto TECCON, é de extrema importância a integração do sistema InterAB com uma aplicação Web, conforme é mostrado na Figura 1.1. O sistema InterAB é responsável pelas tarefas de processamento e armazenamento ou persistência de dados advindos de várias redes de sensores ópticos que estão acopladas a diferentes interrogadores ópticos. Por outro lado, a aplicação Web realiza a apresentação destes dados persistidos por intermédio de gráficos e tabelas para o usuário final. Esse sistema computacional formado pelas duas ferramentas é de grande utilidade, na supervisão, controle e proteção de sistemas de energia elétrica a medida que alarmes são disparados pelo sistema com o objetivo de alertar acerca de falhas na rede elétrica.

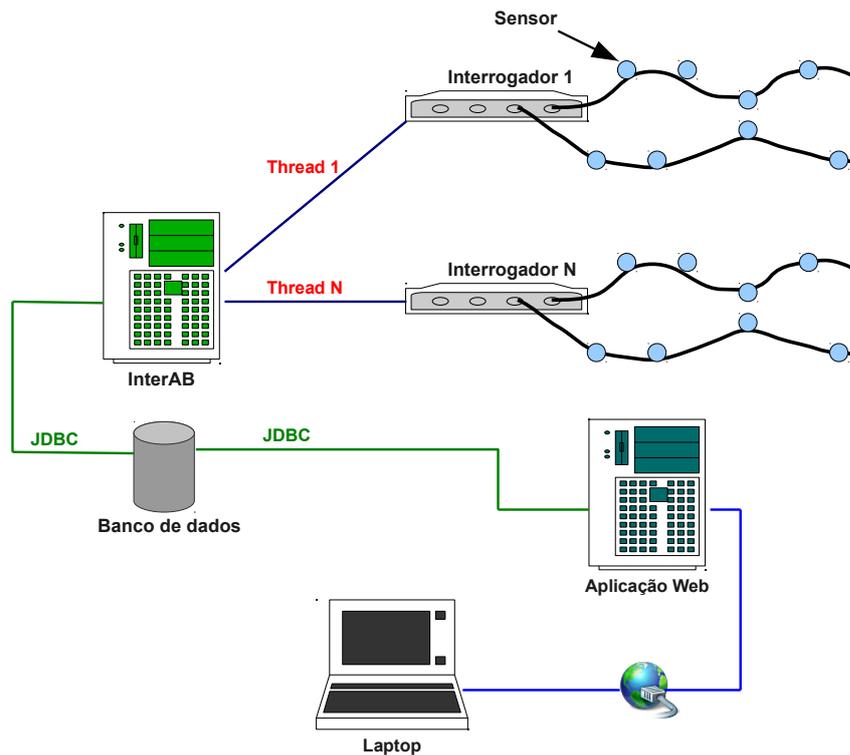


FIGURA 1.1: Sistema InterAB integrado com uma aplicação Web.

Este Trabalho tem como objetivo desenvolver um sistema computacional aberto e adaptável, denominado InterAB, capaz de construir uma versão automática de uma rede de sensores ópticos real na forma de uma estrutura persistente em banco de dados. Uma vez estabelecida essa estrutura de dados, o sistema deverá mantê-la atualizada, filtrando e inserindo de maneira confiável e íntegra novas leituras geradas pelos sensores. Para tanto, foram utilizados o interrogador óptico FS2200 [26] e os sensores FBG de temperatura FS6300 [27] como estudo de caso, ambos fabricados pela FiberSensing.

### 1.3 Organização do Trabalho

Deixando à parte o capítulo introdutório, este Trabalho organiza-se basicamente em quatro capítulos:

- O capítulo 2 explora as redes de sensores ópticos baseados em FBG, ressaltando os princípios e as principais características dessa tecnologia. Este capítulo também trata do interrogador óptico para os sensores FBG e realiza uma breve descrição de três softwares comerciais mais difundidos atualmente;

- 
- O capítulo 3 trata sobre a modelagem do sistema de persistência de dados para redes de sensores ópticos (InterAB), discorrendo acerca das etapas de análise e projeto do sistema, como levantamento de requisitos, modelagens estática e dinâmica, projeto físico de banco de dados etc.;
  - O capítulo 4 apresenta e discute os resultados obtidos neste Trabalho, incluindo a interface gráfica do usuário construída para o sistema InterAB e três experimentos realizados com o objetivo de validar as principais funcionalidades do InterAB;
  - O capítulo 5 apresenta as considerações finais e Trabalhos futuros que poderão ser diretamente influenciados com as contribuições deste Trabalho.

## Capítulo 2

# Redes de sensores ópticos baseados em FBG

### 2.1 Sensores ópticos baseados em grades em fibra

Os últimos vinte e cinco anos do século passado testemunharam intensa pesquisa e esforços de desenvolvimento para projetar uma nova classe de componentes à fibra óptica – as grades em fibra. Enquanto a principal força motivadora vinha da necessidade de novos dispositivos de alto desempenho baseados em grades em fibra para o aumento da largura de banda de sistemas de rede de telecomunicações de alta velocidade, tais como filtros de multiplexação por divisão de tempo (*Wavelength Division Multiplexing* – WDM) e amplificadores à fibra dopada com érbio (*Erbium Doped Fiber Amplifier* – EDFA), a utilização da tecnologia de grades em fibra no campo de sensoriamento óptico aumentou o ritmo [2].

Sem dúvida, a demanda altíssima por dispositivos de grades em fibra em telecomunicações irá garantir uma redução contínua no custo da tecnologia base, que por sua vez irá estimular o crescimento de aplicações de sensoriamento utilizando dispositivos sensores e sistemas baseados em grades.

Sensores baseados em grades em fibra possuem várias vantagens sobre os sensores eletrônicos convencionais. Mais significativamente, a sua capacidade de multiplexação por codificação de comprimento de onda permite dezenas de grades em uma única fibra óptica de modo a formar uma rede de dados óptica [1]. A combinação da sua capacidade de multiplexação e de sua compatibilidade inerente com materiais compósitos de fibra reforçada permite a incorporação de grades em fibra em uma série de materiais estruturais importantes para aplicações de estruturas inteligentes.

Com efeito, o desenvolvimento de sensores à fibra óptica integrados estruturalmente, utilizando FBGs, representa uma importante contribuição para a evolução de estruturas inteligentes, levando a melhorias na segurança e economia em muitos campos da engenharia, incluindo grandes obras de construção civil, estradas e pontes ferroviárias, túneis, barragens, estruturas marítimas, seções de fuselagem, sistemas de distribuição de projétil e inúmeros aparelhos médicos.

### 2.1.1 Teoria de FBG

Uma grade em fibra é um trecho de fibra óptica que exhibe, em seu núcleo, uma perturbação periódica do índice de refração [28, 19, 29]. Esta perturbação confere à grade a capacidade de refletir ou transmitir a luz em função do comprimento de onda, característica largamente aproveitada em diversos dispositivos empregados em redes de comunicações e de sensores ópticos [28, 30].

As grades em fibra podem ser classificadas em grades de reflexão e em grades de transmissão [31]. As grades de reflexão, grades de Bragg em fibra ou de período curto, são aquelas cujo acoplamento ocorre entre os modos do núcleo que se propagam em direções opostas; por outro lado, as grades de transmissão, também chamadas de grades de período longo, são aquelas cujo acoplamento se dá entre modos do núcleo e da casca que propagam-se na mesma direção [30]. Este Trabalho se deterá no estudo das FBGs.

Uma FBG é um tipo de refletor Bragg construído no interior de uma fibra óptica, capaz de refletir uma faixa de comprimentos de onda, conservando-se relativamente transparente para o restante do espectro [30]. Seu princípio baseia-se na variação periódica do índice de refração do núcleo da fibra óptica, cujas propriedades podem conferir à FBG um coeficiente de reflexão em função do comprimento de onda incidente [28, 29].

O princípio de operação de um sistema sensor FBG é mostrado na Figura 2.1 [1]. Uma fonte de luz banda larga injeta um sinal sobre o sensor FBG. O sinal incidente é parcialmente refletido a partir de cada franja de modulação do índice de refração do núcleo da fibra. As diversas reflexões interferem construtivamente entre si resultando em um comprimento de onda ressonante, chamado comprimento de onda de Bragg. Portanto, para um sinal incidente banda larga, o sinal refletido é um espectro estreito centrado no comprimento de onda de Bragg, enquanto outras componentes da onda incidente são transmitidas através da grade.

Partindo do princípio de operação de um sistema sensor FBG, a Figura 2.2 ressalta a capacidade de multiplexação de sensores FBG. São construídos cinco sensores FBG na mesma fibra óptica, cada sensor possibilitando o monitoramento de uma grandeza diferente: pressão, temperatura, aceleração, deformação e vibração.

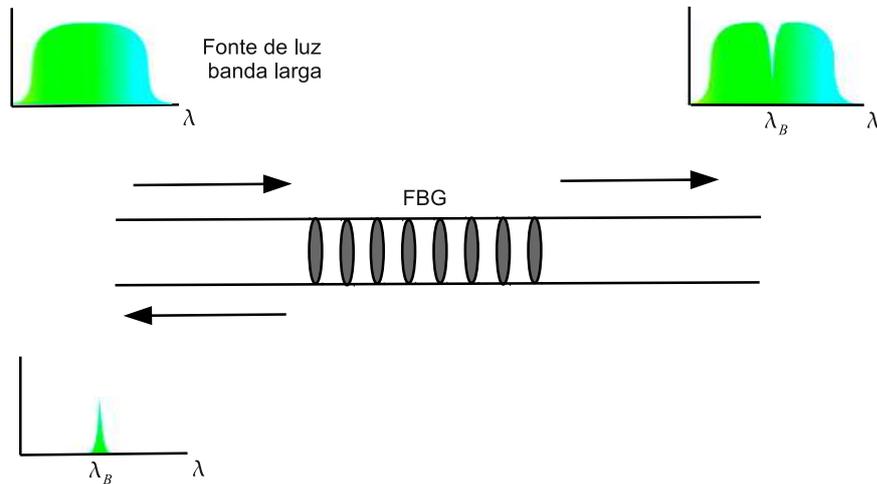


FIGURA 2.1: Princípio de operação de um sistema sensor FBG.

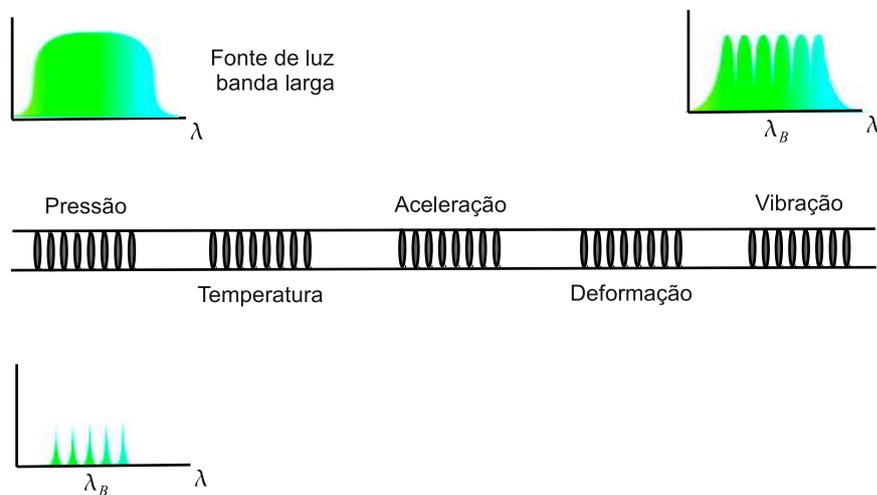


FIGURA 2.2: Capacidade de multiplexação de sensores FBG.

O princípio básico de operação utilizado em um sistema sensor baseado em FBG está relacionado ao monitoramento de deslocamentos do comprimento de onda de Bragg com as mudanças no mensurando (e.g., deformação, temperatura) devido à variação periódica do índice de refração do núcleo da fibra óptica. Esta perturbação periódica do índice de refração gravada no núcleo de uma FBG pode ser modelada da seguinte forma [28]

$$n(z) = n_{eff} + \delta_n \left[ 1 + \nu \cos \left( \frac{2\pi z}{\Lambda} + \phi \right) \right], \quad (2.1)$$

onde  $n(z)$  é o índice de refração efetivo em função da dimensão axial  $z$ ;  $n_{eff}$  representa o índice efetivo do núcleo da fibra;  $\delta_n$  é a variação média do índice efetivo em função de  $z$ ;  $\nu$  é o índice de modulação ou visibilidade de franjas;  $\Lambda$  é o período de perturbação do índice de refração; e  $\phi$  é a fase da perturbação periódica.

O comprimento de onda de Bragg ou condição de ressonância de uma grade,  $\lambda_B$ , é dado pela expressão [31]

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda. \quad (2.2)$$

### 2.1.2 Princípios de sensoriamento de deformação e temperatura com FBG

A função de sensoriamento de uma FBG deriva da sensibilidade do índice de refração e do período da grade a partir da aplicação de perturbações externas mecânicas ou térmicas [1, 14].

A deformação mecânica afeta a resposta de uma FBG diretamente através da expansão e compressão do tamanho do período da grade e através do efeito fotoelástico da fibra, isto é, da modificação no índice de refração induzida pela deformação [14, 32]. A Figura 2.3 retrata a expansão (1) e compressão (2) do tamanho do período da grade, assim como o deslocamento produzido no comprimento de onda de Bragg com o efeito da deformação.

A sensibilidade de uma FBG à temperatura ocorre principalmente por intermédio da mudança no índice de refração induzida pelo efeito termo-óptico e, em menor grau, através do coeficiente de expansão térmica da fibra que altera o tamanho do período da grade [14, 33]. A Figura 2.4 mostra uma grade sendo excitada por um aumento de temperatura. O índice de refração é alterado e o comprimento de onda de Bragg é deslocado.

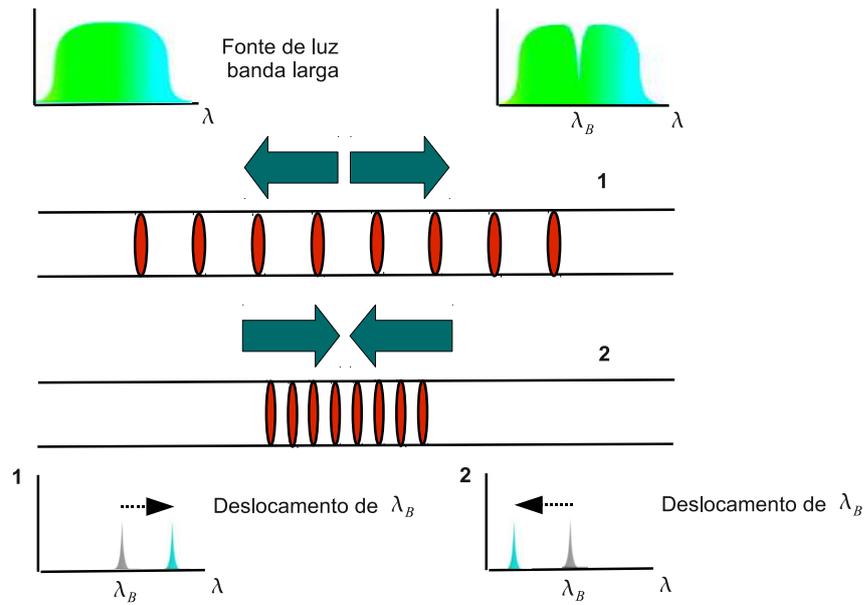


FIGURA 2.3: Deformação mecânica sofrida por uma FBG.

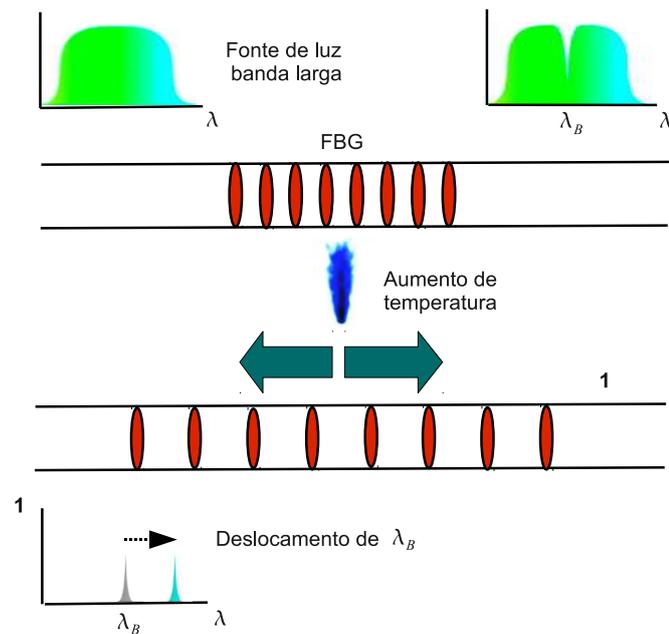


FIGURA 2.4: Variação de temperatura sofrida por uma FBG.

Assim, o deslocamento do comprimento de onda de pico refletido dado por  $\Delta\lambda_B$  em resposta à deformação mecânica  $\varepsilon$  e à variação de temperatura  $\Delta T$  é modelado através da seguinte relação [32]

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = P_e\varepsilon + [P_e(\alpha_s - \alpha_f) + \zeta]\Delta T, \quad (2.3)$$

onde  $P_e$  é o coeficiente fotoelástico da fibra;  $\alpha_s$  e  $\alpha_f$  são os coeficientes de expansão térmica de qualquer material de ligação da fibra e da própria fibra, respectivamente; e  $\zeta$  é o coeficiente termo-óptico. A resposta à deformação mecânica normalizada, considerando a temperatura constante, é dada por [33]

$$\frac{1}{\lambda_B} \frac{\Delta\lambda_B}{\Delta\varepsilon} = 0,78 \times 10^{-6} \mu\epsilon^{-1} \quad (2.4)$$

e a resposta à temperatura normalizada, considerando a deformação mecânica constante, é [33]

$$\frac{1}{\lambda_B} \frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T} = 6,678 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}. \quad (2.5)$$

Para uma grade produzida em fibra de sílica, os valores representativos de deslocamentos de comprimento de onda induzidos por deformação mecânica e por temperatura são  $\approx 1,2 \text{ pm}/\mu\epsilon$  e  $\approx 13 \text{ pm}/^\circ\text{C}$  em 1500 nm, respectivamente. A Figura 2.5 exemplifica respostas típicas de deslocamento do comprimento de onda de Bragg para a aplicação de deformação mecânica e temperatura, demonstrando boas características lineares acima de faixas dinâmicas práticas.

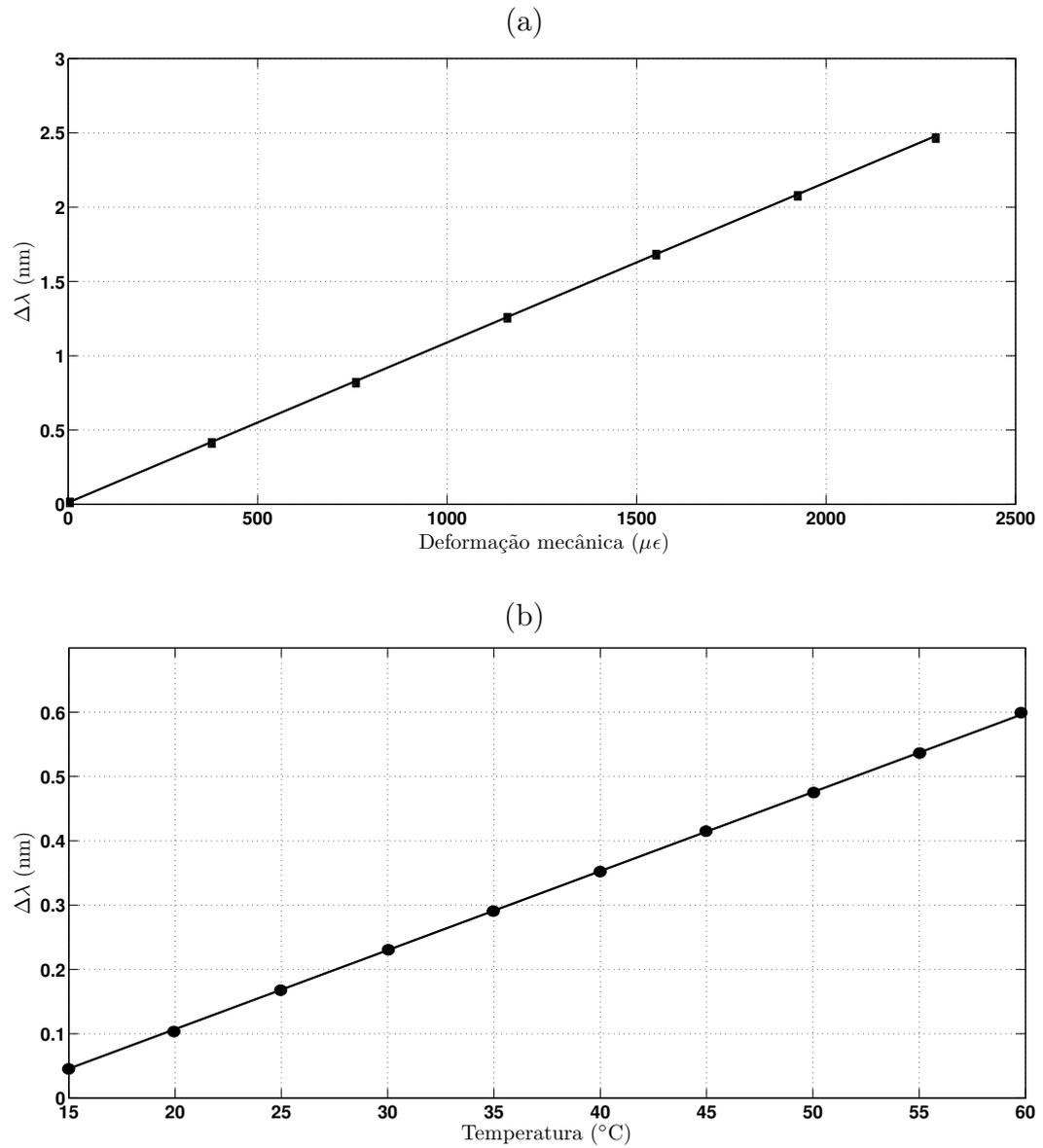


FIGURA 2.5: Resposta típica de deslocamento do comprimento de onda de uma FBG para (a) deformação mecânica e (b) temperatura.

## 2.2 Interrogador óptico para sistemas baseados em FBG

O sensoriamento óptico com FBG é baseado no princípio de que a informação medida é codificada no comprimento de onda de Bragg refletido pela grade. A informação de deslocamento do comprimento de onda pode ser relacionada com o mensurando naquela posição do sensor. Portanto, o trabalho preliminar para o sensor FBG reside na interrogação do comprimento de onda de Bragg refletido. Um método simples de realizar isso é utilizar um espectrômetro ou monocromador, porém nenhuma dessas duas possibilidades é atrativa em aplicações práticas, devido ao tamanho, capacidade de resolução limitada, falta de robustez e custo relativamente alto [1, 3].

As grades de Bragg em fibra, as grades de período longo, as grades em fibra com *chirp* e outras são utilizadas em cabeças sensoras ou sistemas de extração de dados (interrogadores). A maioria das cabeças sensoras que adotam grades em fibra utilizam FBGs [3, 19].

Interrogadores ou demoduladores em sistemas sensores de grade em fibra são as unidades leitoras de medidas que extraem informação medida a partir dos sinais de luz provenientes das cabeças sensoras [1]. Como mencionado, o mensurando é normalmente codificado espectralmente e, conseqüentemente, os interrogadores são geralmente destinados a medir os deslocamentos de comprimento de onda de Bragg e converter os resultados para dados medidos.

Em laboratório, quando se desenvolvem cabeças sensoras de grade em fibra, analisadores de espectro óptico são indispensáveis no monitoramento da reflexão da grade ou espectro de transmissão. No entanto, analisadores de espectro óptico não são apropriadas para sistemas reais de sensoriamento óptico por conta de seus altos preços e de sua capacidade de resolução limitada.

Inúmeras técnicas foram propostas para a interrogação de sensores FBG, como o esquema de detecção passiva (filtros) [34], esquema de detecção passiva (*Charge-Coupled Device* – CDD) [34, 35] e esquema de detecção baseado em varredura espectral. Este Trabalho aborda a estratégia de interrogação baseada em varredura espectral, a qual é utilizada no interrogador óptico FS2200 do estudo caso.

### 2.2.1 Estrutura geral

A natureza e topologia das redes de sensores varia muito de acordo com as tecnologias dos sensores ópticos. O tipo mais comum de rede de sensores é aquele que usa sensores baseados em FBG. Neste caso geralmente é empregado um laser sintonizável ou um filtro sintonizável que essencialmente estabelece o comprimento de onda para a leitura da potência óptica refletida pelas FBGs. A Figura 2.6 ilustra de forma simplificada esse tipo de estratégia de interrogação.

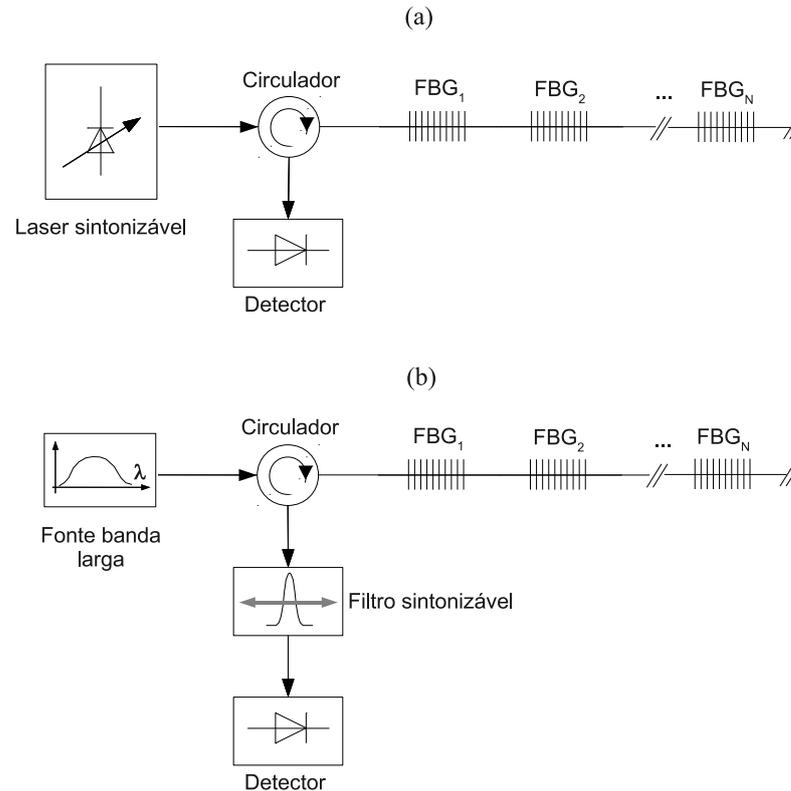


FIGURA 2.6: Interrogação óptica utilizando (a) varredura com laser sintonizável e (b) filtro sintonizável.

Como os sensores ópticos baseados em FBG traduzem a variação da temperatura ou deformação mecânica (ou uma combinação de ambas) em um deslocamento do comprimento de onda de máxima reflexão, torna-se desnecessário a utilização de esquemas de controle ou de compensação de potência [22, 36]. Além disso, novos sensores podem ser emendados à fibra sem quaisquer modificações do esquema de excitação e detecção, desde que os espectros de reflexão das novas FBGs não violem o intervalo de varredura do laser ou do filtro sintonizável.

O tipo mais difundido de interrogador óptico é aquele que utiliza um laser sintonizável como fonte de excitação (e.g., FS2200). Esse tipo de instrumento pode incorporar divisores ópticos (*splitters*) em sua arquitetura permitindo uma topologia de rede em estrela, cuja estrutura básica é mostrada na Figura 2.7. Trata-se de um instrumento que utiliza fotodetectores dedicados para cada um dos seus quatro canais e disponibiliza para softwares clientes os dados medidos por intermédio de uma conexão TCP/IP.

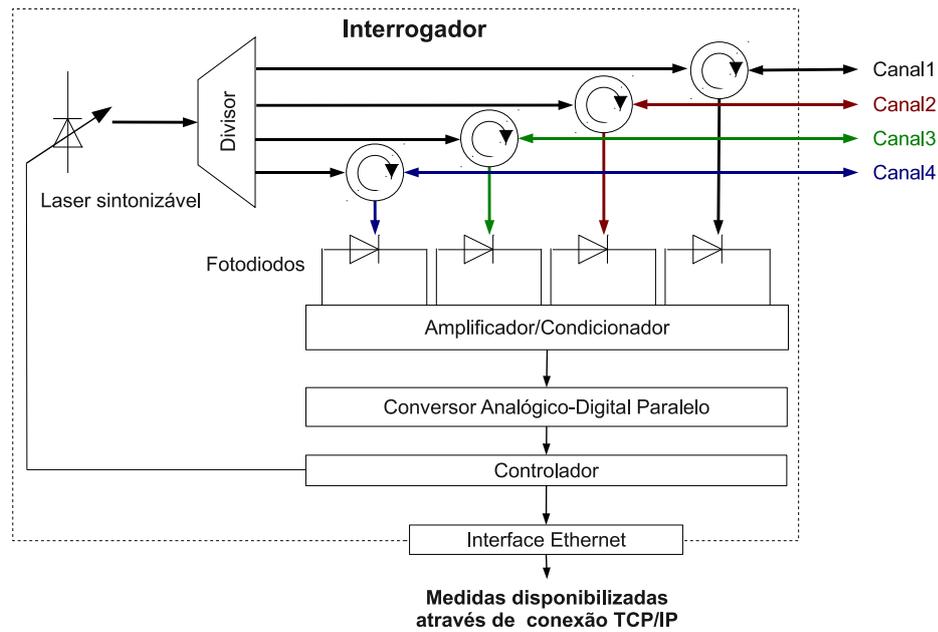


FIGURA 2.7: Interrogador óptico de quatro canais utilizando laser sintonizável.

Vários fabricantes oferecem produtos com o tipo de arquitetura apresentada na Figura 2.7, como a FiberSensing [26], a HBM [37], a Micron Optics [38] e a National Instruments [39]. A Figura 2.8 exemplifica uma rede de sensores ópticos acoplada em um interrogador óptico de quatro canais, onde  $\lambda_1 \neq \lambda_2$ ,  $\lambda_4 \neq \lambda_5$  e  $\lambda_6 \neq \lambda_7$ .

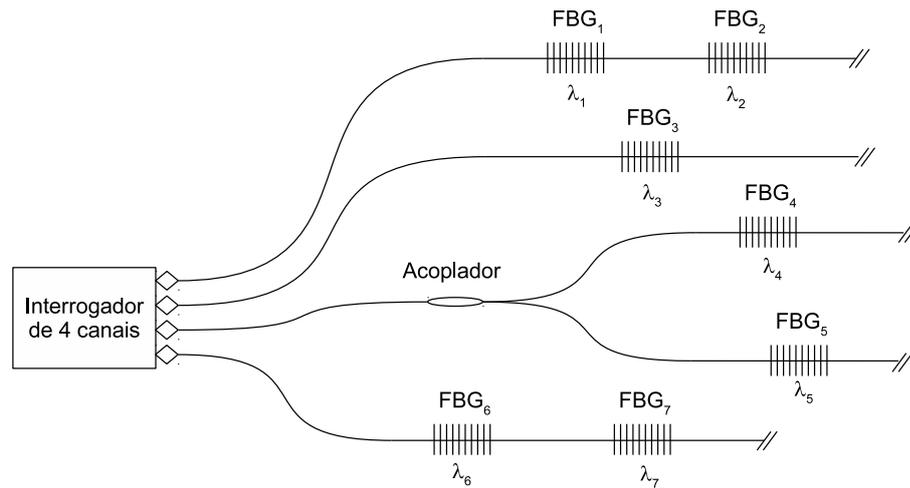


FIGURA 2.8: Exemplo de uma rede de sensores ópticos em torno de um interrogador óptico de quatro canais.

### 2.2.2 Interrogador óptico FS2200

Conforme mencionado anteriormente, o interrogador óptico FS2200 utiliza um laser sintonizável como fonte de excitação, estabelecendo o comprimento de onda para a leitura da potência óptica refletida pelas FBGs. Na Figura 2.9 é apresentado esse equipamento optoeletrônico, ressaltando seus quatro canais que permitem o acoplamento de sensores FBG com objetivo de monitoramento de determinada grandeza.



FIGURA 2.9: Interrogador óptico FS2200.

Ademais, em termos de protocolo de comunicação, esse interrogador óptico opera de acordo com certos estados lógicos e a mudança entre estes estados é definida por um autômato finito, como mostrado na Figura 2.10. Mudanças de estado na unidade de medição podem ocorrer em função de comandos específicos enviados pelo software cliente e confirmados pelo interrogador.

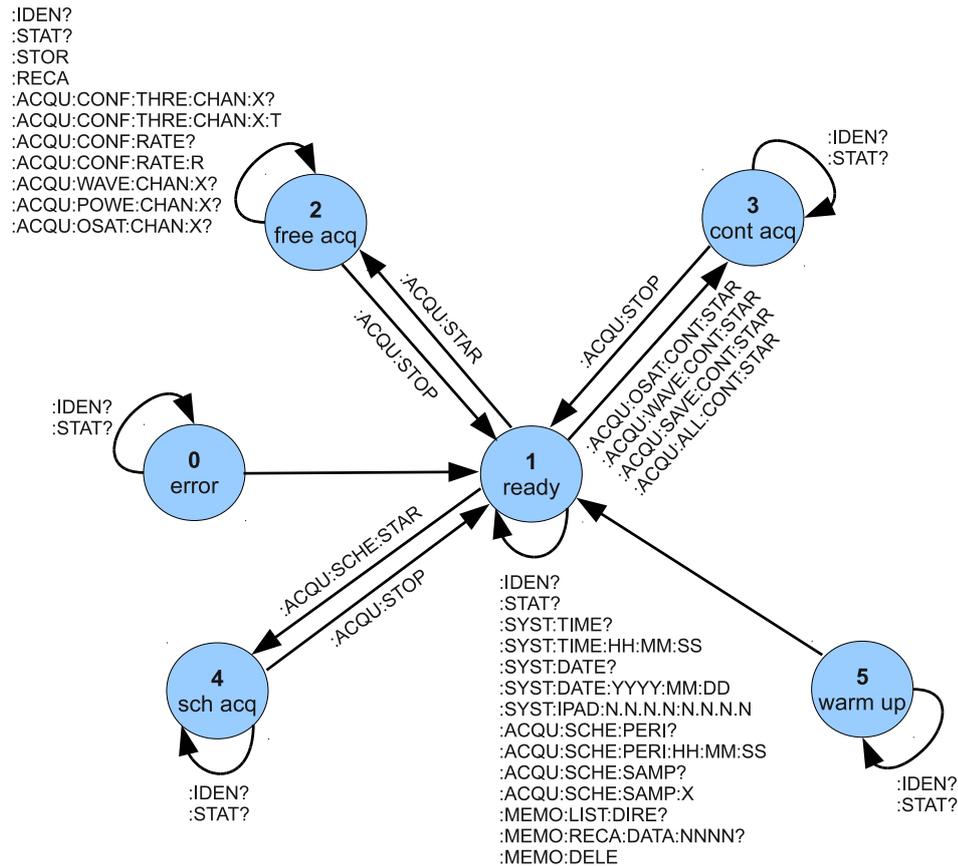


FIGURA 2.10: Estados de operação da unidade de medição.

A partir do estado *Ready*, a unidade de medição poderá acessar três outros estados nos quais ocorrem as aquisições dos sinais ópticos [26]:

- *Free Acquisition*: habilita medições individuais em um canal óptico específico;
- *Continuous Acquisition*: aquisição contínua do traço OSA (*Optical Spectrum Analyser*) com taxa de 1 S/s em todos os canais ópticos do interrogador; e
- *Scheduled Acquisition*: aquisição de dados com um período pré-definido e um determinado número de amostras.

O comando “:ACQU:STOP” encerra o processo de aquisição fazendo com que o interrogador retorne para o estado *Ready* [26].

As mudanças de estado *Error* para *Ready* e *Warming-up* para *Ready* não necessitam de entradas porque representam estados específicos em que o hardware de aquisição está indisponível por conta de um defeito ou simplesmente porque ainda não atingiu o estado de operação de regime, respectivamente.

O controle da unidade de medição do interrogador óptico é realizado por intermédio de um protocolo de comunicação que segue o padrão de sintaxe de comandos *Standard Commands for Programmable Instruments* (SCPI), comumente utilizado para a padronização de comandos de dispositivos de medição. Cada comando é uma palavra em ASCII com argumentos separados por “:” [26]. Os comandos podem ser classificados como: comandos comuns (“:IDEN?”, “:STOR” e “:RECA”), comandos de sistema (“:SYST: ...”), comando de status (“:STAT?”), comandos de aquisição (“:ACQU: ...”) e comandos de memória (“:MEMO: ...”). A Tabela 2.1 exemplifica alguns desses comandos e as respectivas respostas obedecendo o protocolo de comunicação. O software que faz uso do interrogador deve iniciar o diálogo com estes comandos SCPI enviando-os através de uma conexão TCP/IP. A seguir cada um desses comandos é detalhado:

- O comando “:IDEN?” solicita a identificação do interrogador, retornando uma lista com fabricante, número do modelo, número serial e revisão do *firmware*;
- O comando “:STAT?” visa identificar em qual estado a unidade de medição encontra-se, de acordo com a Figura 2.10;
- Os comandos “:SYST:DATE?” e “:SYST:TIME?” requisitam data e hora, respectivamente;
- Os comando “:ACQU:STAR” e “:ACQU:STOP” realizam, respectivamente, o início e o término de uma aquisição de dados de sensores FBG em todos os canais do equipamento;
- O comando “:ACQU:OSAT:CHAN:1?” realiza uma aquisição de dados do traço do espectro óptico dos sensores FBG em um canal específico do interrogador (neste caso o canal 1), tendo como resposta todo traço do espectro dentro dos limites de comprimento de onda em que o equipamento opera;
- O comando “:ACQU:OSAT:CONT:STAR” objetiva a aquisição contínua de traços do espectro óptico dos sensores FBG em todos os canais do interrogador. Esse comando é enviado através da porta 3500 e os dados correspondentes devem ser recebidos através da porta 3365. A resposta é um vetor de 20001 pontos (um *frame*) vezes o número de canais com o traço OSA. Esses pontos correspondem a valores de potência para todos os canais ópticos com pontos de 1500 nm a 1600 nm; e

- O comando “:ACQU:WAVE:CONT:STAR” possibilita a aquisição contínua de comprimentos de onda de pico dos sensores FBG em todos os canais do interrogador. Esse comando é enviado através da porta 3500 e os dados correspondentes devem ser recebidos através da porta 3365. A resposta é uma palavra que inicia indicando o momento da aquisição no formato «YYYY.MM.DD:hh:mm:ss» seguido pelos comprimentos de onda em ordem crescente (separados por “;”) de todos os canais (separados por “:”).

TABELA 2.1: Exemplos do Protocolo de Comunicação

Comando	Resposta
:IDEN?	ACK:FIBERSENSING, FS2X00 V3.0 ...
:STAT?	:ACK:3
:SYST:DATE?	:ACK:2012:12:04
:SYST:TIME?	:ACK:11:45:23
:ACQU:STAR	:ACK
:ACQU:STOP	:ACK
:ACQU:OSAT:CHAN:1?	:ACK:-43.045,-42.020,-41.944,...
:ACQU:OSAT:CONT:STAR	Porta 3500 ⇒ :ACK Porta 3365 ⇒ -43.045,-42.020,...
:ACQU:WAVE:CONT:STAR	Porta 3500 ⇒ :ACK Porta 3365 ⇒ 2012.09.05:16.16.58:1516.1498::1522.5543:

## 2.3 Breve descrição de softwares comerciais

As tarefas de aquisição, processamento e persistência dos dados obtidos das redes de sensores ópticos baseado em FBG são de extrema importância para garantir a possibilidade de análises mais detalhadas e confiáveis das condições de monitoramento em tempo real e para permitir a disponibilidade dessa massa de dados para múltiplas aplicações que a utilizem para fins diversificados. Muitos softwares comerciais foram desenvolvidos para realizar a maioria destas tarefas, porém questões como compatibilidade e flexibilidade entre os fabricantes não têm sido consideradas em nenhum momento durante o processo de desenvolvimento dos softwares.

Os softwares disponíveis comercialmente são fechados e restritos a tecnologia de cada fabricante. Cada empresa planeja e projeta sistemas de software para uso específico de seus dispositivos de monitoramento e que não podem ser adaptados ou explorados para fins mais robustos. A seguir é realizada uma breve descrição dos softwares comerciais desenvolvidos pelos fabricantes FiberSensing [40], Micron Optics [41] e National Instruments [42], ressaltando as suas principais funcionalidades e identificando as restrições realizadas por cada fabricante em seu respectivo software.

### **2.3.1 BraggMonitor FS9000**

O software BraggMonitor FS9000 é desenvolvido pela FiberSensing, possui compatibilidade apenas com os interrogadores da série FS2X00 e é disponibilizado exclusivamente para o sistema operacional Windows. Ele possui funcionalidades básicas, como: iniciar e parar a aquisição contínua de traços do espectro óptico e de comprimentos de onda de pico dos sensores FBG em todos os canais do interrogador; mudar o endereço IP do interrogador; e realizar o registro das aquisições exclusivamente em arquivos texto [23].

O BraggMonitor é um exemplo de ferramenta computacional comercial restritiva e não adaptável. A FiberSensing restringe o uso deste software aos seus interrogadores (uma licença por equipamento), proporcionando total falta de compatibilidade com outros fabricantes, além de não disponibilizar uma maneira de adaptar ou flexibilizar o BraggMonitor para interagir com outras aplicações ou um banco de dados.

### **2.3.2 Sensing Analysis Software**

O Sensing Analysis Software é desenvolvido pela Micron Optics, possui compatibilidade apenas com os interrogadores da série Micron Optics X25 e X30 e é disponibilizado exclusivamente para o sistema operacional Windows. Este software possui funcionalidades básicas e avançadas, dentre as quais se destacam: iniciar e parar a aquisição contínua de traços do espectro óptico e de comprimentos de onda de pico dos sensores FBG em todos os canais do interrogador; configuração de alarmes de monitoramento e notificação por e-mail; agendamento e definição de templates de aquisição; e realizar o registro das aquisições exclusivamente em arquivos texto [24].

O software comercializado pela Micron Optics, apesar de possuir uma grande variedade de funcionalidades, também apresenta caráter fechado e inflexível. O uso do Sensing Analysis Software é restrito aos interrogadores (uma licença por equipamento) fabricados pela Micron Optics, não sendo possível adaptá-lo para trabalhar com protocolos de comunicação de outros fabricantes, com outros aplicativos que necessitem das informações de aquisição ou com uma base de dados centralizada ou distribuída.

### 2.3.3 LabVIEW

A National Instruments comercializa uma solução de software de projeto gráfico de sistemas que oferece as ferramentas básicas para criação e implementação de sistemas de medição e controle – o LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench*). Esta aplicação oferece integração com os dispositivos de hardware de aquisição de dados da National Instruments e de outros fornecedores, bibliotecas de processamento de sinais e controles de interface de usuário configurados para a visualização dos dados das medições [25].

O LabVIEW possui maior flexibilidade e customização se comparado as soluções da FiberSensing e da Micron Optics. Ele possui um ambiente de desenvolvimento e ferramentas de software *add-on* que ampliam sua capacidade para atender interrogadores de outros fabricantes, além de permitir a interação com outras aplicações ou com uma base de dados. Entretanto, este software possui a desvantagem de não oferecer todas funcionalidades de forma igualitária para sistemas operacionais diferentes, o que prejudica a portabilidade de programas escritos com o LabVIEW. A grande maioria de extensões e *toolkits* estão disponíveis apenas para o sistema operacional Windows, enquanto que para sistemas como Linux e Mac OS são desenvolvidas versões básicas do LabVIEW [43].

## Capítulo 3

# Modelagem do sistema InterAB

### 3.1 Análise e Projeto

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 [44]. 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 [45].

Nas próximas seções serão apresentados os requisitos para o sistema InterAB, a adaptação de uma ferramenta de aquisição de dados para atender aos requisitos levantados, as modelagens estática e dinâmica do InterAB e o projeto físico do banco de dados para a aplicação.

#### 3.1.1 Requisitos funcionais e não-funcionais

A atividade de levantamento de requisitos (também conhecida como elicitación de requisitos) corresponde à etapa de compreensão do problema aplicada ao desenvolvimento de software. Formalmente, um requisito é uma condição ou capacidade que deve ser alcançada ou possuída por um sistema ou componente deste para satisfazer um contrato, padrão, especificação ou outros

documentos formalmente impostos [44].

O produto do levantamento de requisitos é o documento de requisitos, que declara os diversos tipos de requisitos do sistema [44]. As principais seções de um documento de requisitos são: requisitos funcionais (definição das funcionalidades do sistema) e requisitos não-funcionais (declaração das características de qualidade que o sistema deve possuir e que estão relacionadas as suas funcionalidades).

A seguir é apresentado o documento de requisitos para o sistema InterAB:

- Requisitos funcionais
  1. O sistema deve possibilitar testes de conexão com os interrogadores antes da adição dos mesmos;
  2. O sistema deve permitir que o usuário realize a adição de interrogadores de vários fabricantes;
  3. O sistema deve identificar automaticamente a topologia da rede de sensores ópticos em torno de um interrogador;
  4. O sistema deve persistir os interrogadores, a topologia das redes de sensores ópticos e as leituras geradas pelos sensores em uma base de dados;
  5. O sistema deve manter a base de dados atualizada, inserindo novas leituras geradas pelos sensores ópticos;
  6. O sistema deve permitir que o usuário inicie e finalize aquisições de dados;
  7. O sistema deve realizar a varredura de múltiplos interrogadores paralelamente.
  
- Requisitos não-funcionais
  1. O sistema deve possuir portabilidade de Sistema Operacional;
  2. O sistema deve realizar aquisições com tempo de resposta semelhante a taxa de varredura dos interrogadores;
  3. O sistema deve ser uma ferramenta computacional aberta e extensiva (suscetível à modificações e capaz de agregar novas funcionalidades).

### 3.1.2 Adaptação de sistema pré-existente de aquisição de dados

Em [46] foi modelado e desenvolvido um sistema de aquisição de dados, denominado InterABCommunicator, com o objetivo de realizar a aquisição contínua de traços do espectro óptico de sensores FBG interrogados pelo FS2200. Esse Trabalho desenvolveu um software em linguagem Java capaz de seguir o protocolo de comunicação do interrogador óptico da FiberSensing, registrando em arquivos texto e apresentando de forma gráfica as potências ópticas coletadas de redes de sensores ópticos baseados em FBG.

O funcionamento do sistema InterABCommunicator é exemplificado na Figura 3.1. O sistema estabelece a comunicação via *socket* TCP/IP com um interrogador FS2200. As potências ópticas dos sensores FBG, que estão sendo registradas pelo interrogador, são enviadas para o sistema através do comando de aquisição “:ACQU:OSAT:CONT:STAR” recebido e confirmado pelo interrogador. O sistema então armazena essas potências em um arquivo texto e realiza a apresentação gráfica para o usuário.

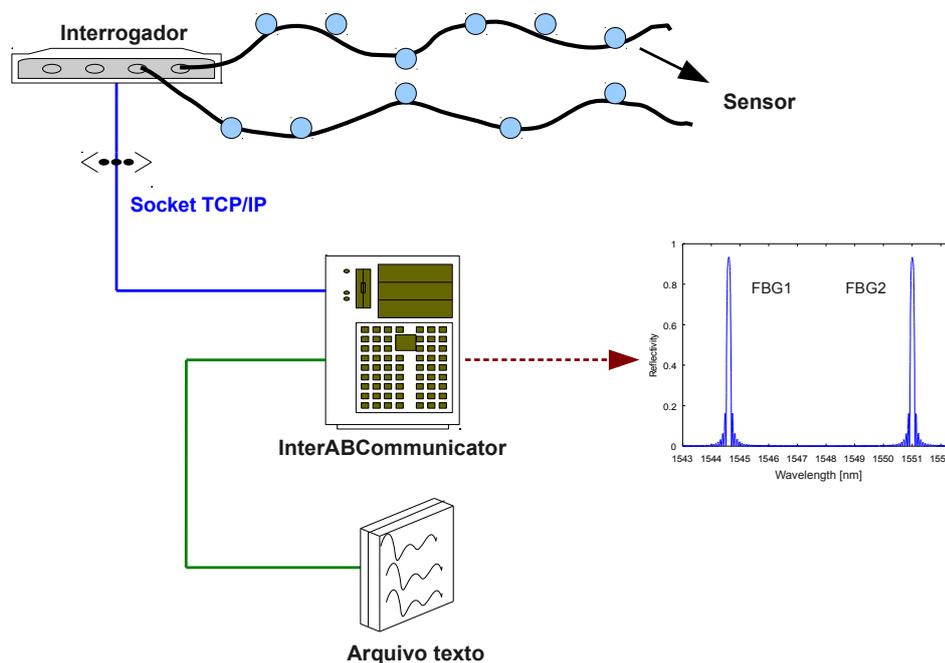


FIGURA 3.1: Sistema InterABCommunicator realizando a aquisição de dados de uma rede de sensores ópticos.

O aplicativo desenvolvido em [46] sofreu adaptações para possibilitar a conformidade com os requisitos funcionais e não-funcionais citados na seção anterior. Essencialmente, a linguagem de programação Java e os módulos de comunicação com o interrogador foram mantidos, foi automatizada a aquisição de comprimentos de onda de pico de sensores FBG (comando “ACQU:WAVE:CONT:STAR”), o armazenamento ou persistência de dados passou a ser realizado em um banco de dados relacional, além da persistência das leituras geradas pelos sensores ópticos, a topologia da rede de sensores ópticos e os interrogadores também são armazenados na base de dados, e foi criada a possibilidade de interação do software com vários interrogadores paralelamente.

O funcionamento simplificado do sistema InterAB é exemplificado na Figura 3.2. Considerando que os interrogadores já tenham sido adicionados e a aquisição tenha sido iniciada, verifica-se o tratamento de vários interrogadores ópticos paralelamente por intermédio de fluxos de execução (*threads* trabalhadoras) exclusivamente dedicados. São realizadas inúmeras aquisições de comprimentos de onda de pico de sensores FBG para todos os interrogadores, e através destas aquisições é possível identificar, persistir e manter atualizada a topologia das redes de sensores ópticos e as leituras geradas pelos sensores ópticos.

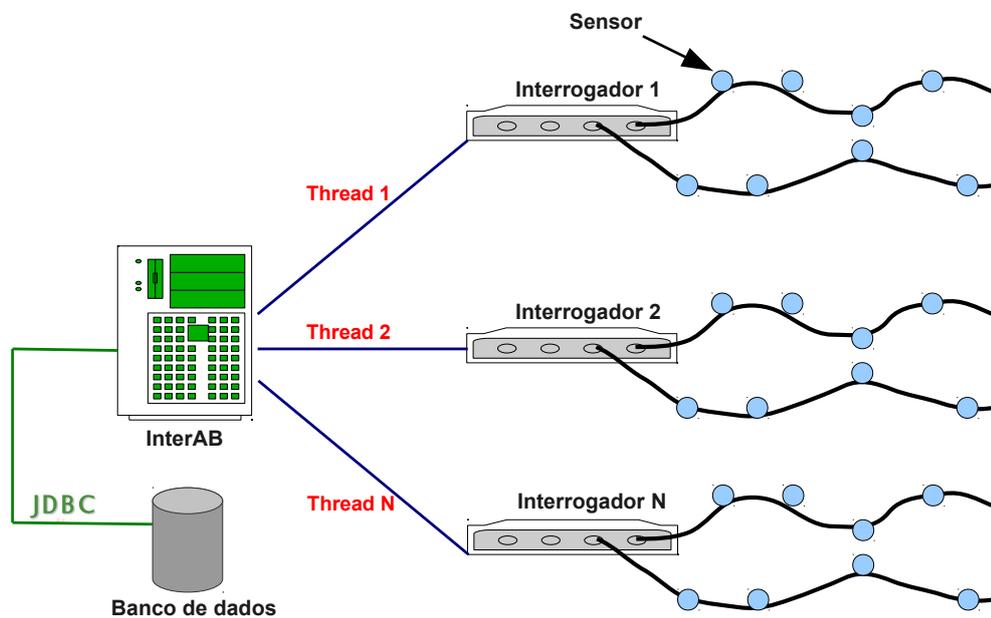


FIGURA 3.2: Sistema InterAB realizando a aquisição de dados de várias redes de sensores ópticos.

### 3.1.3 Modelagem estática

Um sistema pode ser modelado considerando os aspectos estruturais estático e dinâmico. O aspecto estrutural estático 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 reação dos objetos a eventos que ocorrem no sistema [44].

Para o sistema InterAB o aspecto estrutural estático é representado pelo modelo ou diagrama de classes e o aspecto estrutural dinâmico é representado pelo diagrama de atividades, que será apresentado posteriormente.

O modelo de classes do sistema InterAB é apresentado Figura 3.3. Este modelo apresenta com notação resumida (atributos e métodos foram suprimidos) todas as classes que compõem o sistema, 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 sistema.

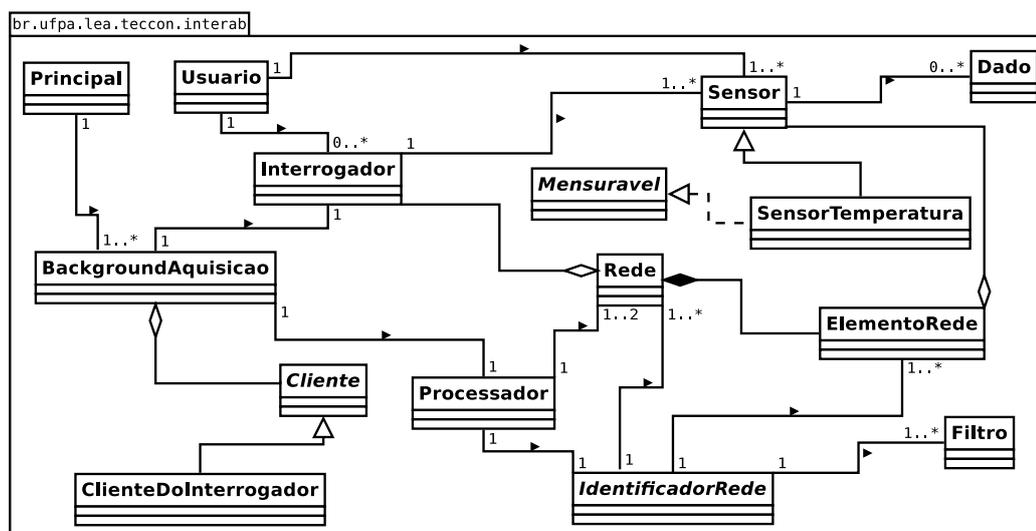


FIGURA 3.3: Diagrama de classes do sistema InterAB.

- Classes Usuario, Interrogador, Sensor e Dado: são as classes básicas de persistência de dados do sistema. O usuário, previamente cadastrado no sistema, poderá realizar a adição de vários interrogadores. Por sua vez, os interrogadores apresentarão sensores ópticos em seus canais. Estes 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 destas leituras.

- Classes `Cliente` e `ClienteDoInterrogador`: 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. A classe `ClienteDoInterrogador` é a implementação concreta de `Cliente` para a comunicação entre o InterAB e o interrogador do estudo de caso, FS2200. Portanto, o InterAB pode interagir com qualquer outro interrogador mediante implementação dos métodos genéricos definidos em `Cliente`.
- Classes `SensorTemperatura` e interface `Mensuravel`: é a classe e a interface relacionadas ao cálculo de temperatura a partir de deslocamentos do comprimento de onda de pico de sensores FBG. A classe `SensorTemperatura` possui um relacionamento de herança com a classe `Sensor`, ou seja, qualquer sensor de temperatura 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, etc.).
- Classes `Identificador`, `Rede`, `ElementoRede` e `Filtro`: são as classes responsáveis pela identificação automática da topologia e pela filtragem de dados de uma rede de sensores ópticos em torno de 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. Esta 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. Estes filtros objetivam verificar variações abruptas de determinada grandeza, como a temperatura.

- Classe **Processador**: é a classe responsável por disparar o processamento de identificação da topologia de redes de sensores, o comparativo entre a topologia de redes de sensores, a atualização de leituras geradas pelos sensores e a persistência 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**.
- Classes **Principal** e **BackgroundAquisicao**: são as classes que gerenciam as principais ações do sistema. 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** [47], 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. Contudo, todo o processamento é realizado em *background*, fornecendo atualizações acerca das aquisições realizadas para a classe **Principal**.

### 3.1.4 Modelagem dinâmica

Como já descrito na seção anterior, o diagrama de atividades representa o sistema InterAB sob a perspectiva estrutural dinâmica. Portanto, por intermédio desse diagrama é possível modelar as reações do sistema a eventos que possam ocorrer durante o processamento.

O diagrama de atividades geral do sistema InterAB é apresentado na Figura 3.4. Este diagrama apresenta na primeira raia as atividades realizadas pelo usuário do sistema e na segunda raia as atividades realizadas sem a intervenção do usuário. Considerando que o usuário já tenha sido cadastrado, o sistema começa a responder a partir do momento que o usuário adicionou pelo menos um interrogador e iniciou a aquisição de dados. De uma maneira geral, o sistema então coleta os comprimentos de onda de pico de sensores FBG, identificando a rede atual de sensores em torno do 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. No caso em que os dados coletados apresentam variações abruptas (definidas pelo usuário) em comparação com os dados que estão na base de dados, estas leituras coletadas são então persistidas; em caso contrário, as leituras coletadas são descartadas. O término da aquisição é realizado a qualquer momento pelo usuário, se este fato não ocorrer, o sistema inicia um novo ciclo de aquisição de dados.

Para efeitos de desempenho, a modelagem dinâmica do sistema 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 este novo equipamento como elegível para aquisição.

Uma modelagem mais específica das atividades do sistema InterAB pode ser observada na Figura 3.5. Este diagrama considera apenas a segunda raia do diagrama da Figura 3.4. 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 existe rede atual para um determinado interrogador óptico, os sensores identificados são criados como sensores genéricos, a topologia da rede de sensores atual e as leituras geradas pelos sensores são 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 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 e comparadas com os dados já persistidos. Todos esses eventos ocorrem inúmeras vezes até que o usuário decida terminar a aquisição de dados.

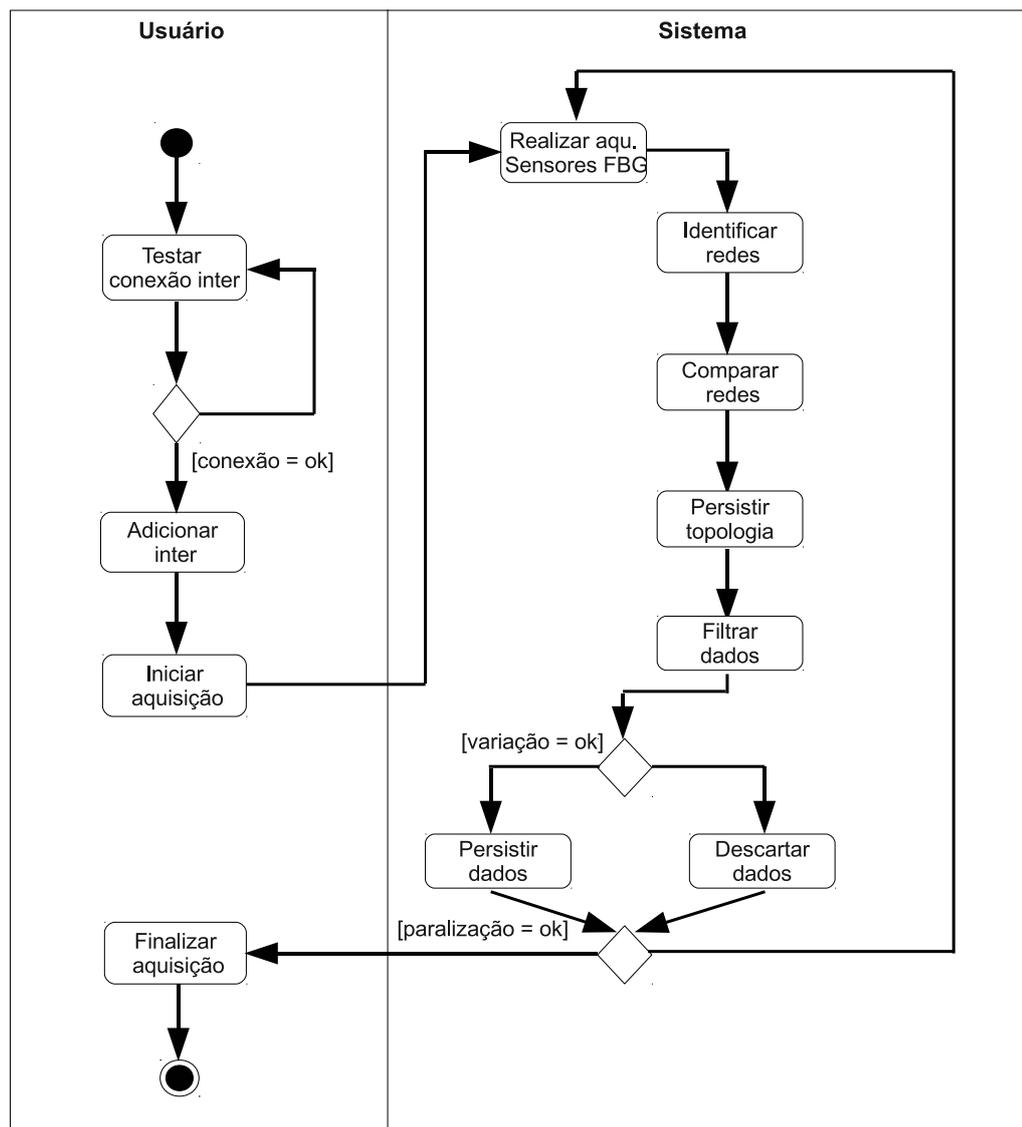


FIGURA 3.4: Diagrama de atividades geral do sistema InterAB.

No diagrama da Figura 3.5 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 sistema apenas notifica, através de uma mensagem de alerta, o usuário que nenhuma rede foi identificada. No caso em que apenas a rede persistida existe, o sistema também apenas notifica o usuário que nenhuma rede atual foi identificada.

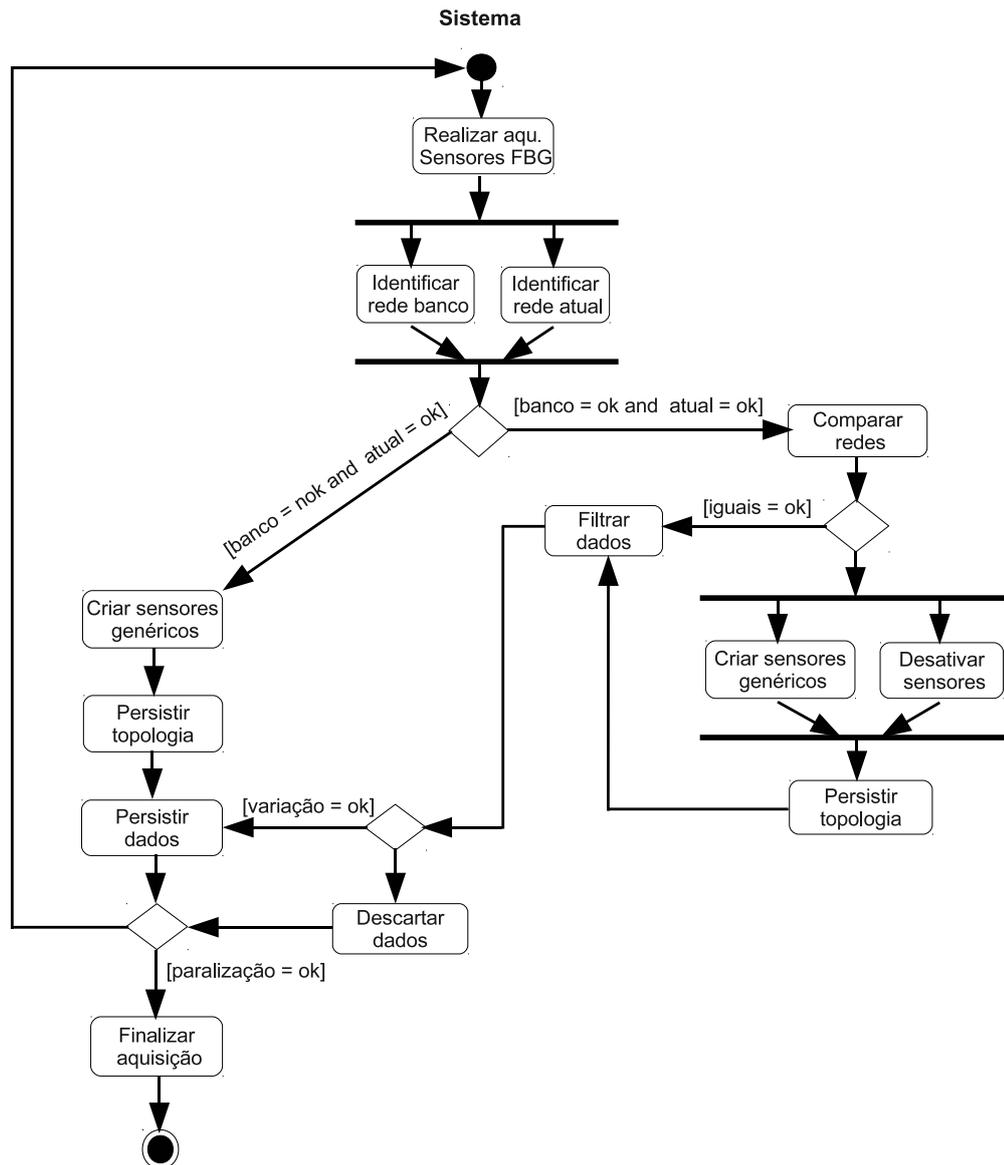


FIGURA 3.5: Diagrama de atividades específico do sistema InterAB.

## 3.2 Projeto físico de banco de dados

A grande maioria das aplicações, independente de porte, precisam de dados persistentes. 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 persistência de dados para um sistema Java, como o InterAB, geralmente ele se refere a guardar dados em um banco de dados relacional e recuperá-los por meio dos recursos da linguagem. No projeto de banco de dados do InterAB foi utilizado o Sistema Gerenciador de Banco de Dados (SGBD) MySQL [48] e o *framework* de Mapeamento Objeto-Relacional Hibernate (*Object Relational Mapping* – ORM) [49].

O modelo físico do banco de dados do sistema InterAB é apresentado na Figura 3.6. Neste modelo são especificadas as tabelas do banco de dados do sistema InterAB, os atributos das tabelas e seus domínios, os relacionamentos entre as tabelas e as chaves primárias e estrangeiras. A seguir é realizada uma descrição acerca das principais tabelas que fazem parte do modelo físico, assim como de seus principais atributos e relacionamentos.

- Tabela `tecon_inter`

Tem por objetivo armazenar os interrogadores ópticos adicionados pelo usuário. Apresenta relacionamentos com as tabelas `tecon_usuario` e `tecon_sensor` de forma que um usuário pode adicionar vários interrogadores e um interrogador pode possuir vários sensores em seus canais.

1. `nm_inter` e `modelo_inter`: nome e modelo do interrogador, respectivamente;
2. `no_pontos_amostra_inter`: número de pontos de uma amostra ou *frame* coletado pelo interrogador (20001 pontos por amostra, por exemplo);
3. `fx_ini_inter` e `fx_fim_inter`: faixa inicial e faixa final de varredura de um *frame* do interrogador (1500 nm até 1600 nm, por exemplo), respectivamente;
4. `tx_varredura_inter` e `no canais_inter`: taxa de varredura de um *frame* e número de canais do interrogador, respectivamente;

5. `ip_inter`, `portap_inter` e `portad_inter`: endereço IP, porta padrão de comandos e porta de recepção de dados do interrogador, respectivamente.

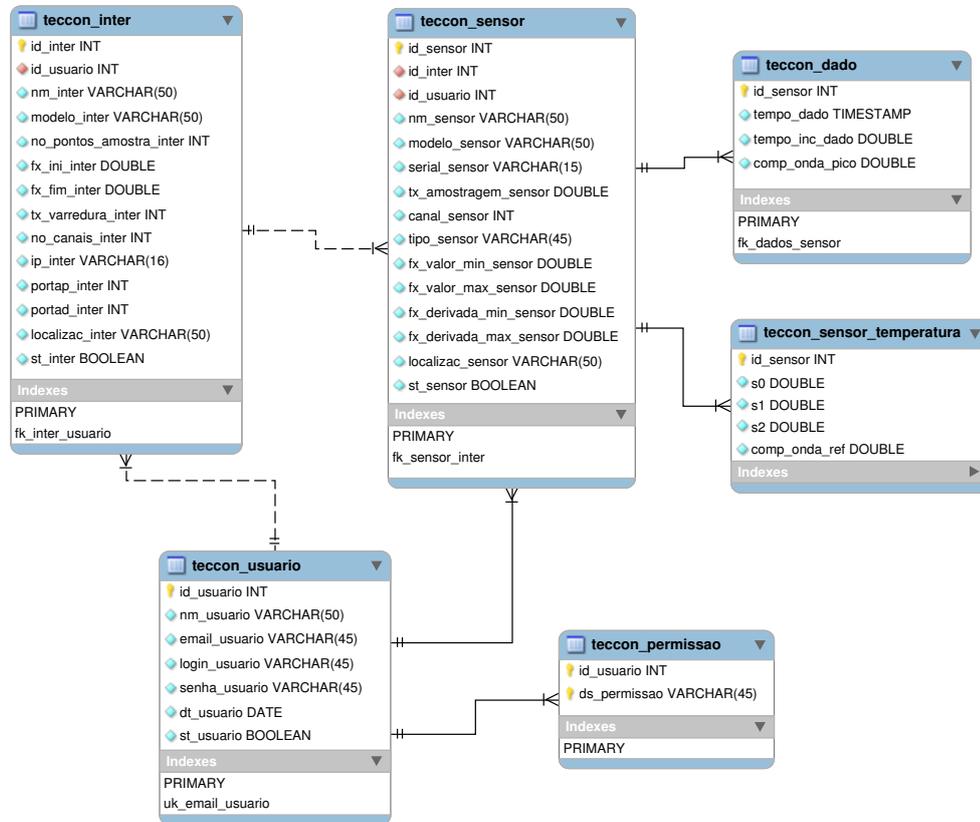


FIGURA 3.6: Modelo físico do banco de dados do sistema InterAB.

- Tabela `tecccon_sensor`

Tem por objetivo armazenar os sensores genéricos identificados automaticamente pelo InterAB. Apresenta relacionamentos com as tabelas `tecccon_usuario`, `tecccon_inter`, `tecccon_sensor_temperatura` e `tecccon_dado` de maneira que um sensor pode possuir vários dados e os sensores de temperatura obrigatoriamente são sensores genéricos (herança).

1. `nm_sensor` e `modelo_sensor`: nome e modelo do sensor, respectivamente;
2. `serial_sensor` e `tx_amostragem_sensor`: número serial e taxa de amostragem do sensor, respectivamente;
3. `canal_sensor` e `tipo_sensor`: canal do interrogador óptico no qual o sensor está alocado e tipo de sensor (genérico, temperatura, deformação, etc.), respectivamente;

4. `fx_valor_min_sensor` e `fx_valor_max_sensor`: faixa de valor mínimo e máxima do sensor em comprimento de onda (1585,99 nm e 1586,988 nm para o sensor de temperatura FS6300 J, resultando na faixa de  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  até  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ , por exemplo), respectivamente;
5. `fx_derivada_min_sensor` e `fx_derivada_max_sensor`: faixa de variação mínima e máxima do sensor em comprimento de onda ( $-0,049\text{ nm}$  e  $0,05\text{ nm}$  para o sensor de temperatura FS6300 J, resultando em variações de  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , por exemplo), respectivamente.

- Tabela `teccon_sensor_temperatura`

Tem por objetivo armazenar os sensores genéricos que são definidos pelo usuário como sensores de temperatura. Apresenta relacionamento com a tabela `teccon_sensor` (herança). Os atributos definidos para essa tabela possuem grande importância para a determinação da temperatura monitorada pelo sensor.

Considerando o sensor de temperatura FS6300, a temperatura,  $T$ , pode ser calculada da seguinte forma [27]

$$T = s_2x^2 + s_1x + s_0, \quad (3.1)$$

onde  $s_2$  ( $^{\circ}\text{C}/\text{nm}^2$ ) é a sensibilidade de segunda ordem;  $s_1$  ( $^{\circ}\text{C}/\text{nm}$ ) é a sensibilidade de primeira ordem;  $s_0$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) é a sensibilidade de ordem zero ou temperatura de referência;  $x$  é o deslocamento do comprimento de onda de pico da FBG que é dado por [27]

$$x = \lambda_{atual} - \lambda_{ref}, \quad (3.2)$$

onde  $\lambda_{atual}$  é o comprimento de onda de pico atualmente coletado e  $\lambda_{ref}$  é o comprimento de onda de pico de referência do sensor de temperatura para  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  (atributo `comp_onda_ref`).

- Tabela `teccon_dado`

Tem por objetivo armazenar os comprimentos de onda de pico de sensores FBG, que são necessários para a determinação de grandezas, como a temperatura (ver descrição da tabela `teccon_sensor_temperatura`). Apresenta relacionamento com a tabela `teccon_sensor`.

Para efeitos de sincronização dos sensores é necessário relacionar o comprimento de onda de pico de um sensor FBG com o tempo em que este comprimento foi coletado pelo interrogador na varredura do *frame*.

Logo, o tempo em que o comprimento de onda de pico de um sensor FBG na posição  $n$  do *frame*,  $t_{\lambda_n}$ , foi coletado pelo interrogador é dado por

$$t_{\lambda_n} = t_0 + \frac{\lambda_n - w_0}{100}, \quad (3.3)$$

onde  $t_0$  (atributo tempo\_dado) é o tempo em que o interrogador iniciou a coleta do *frame*,  $\lambda_n$  (atributo comp\_onda\_pico) é o comprimento de onda de pico do sensor FBG e  $w_0$  é a faixa inicial de varredura do *frame* do interrogador. O atributo tempo\_inc\_dado representa a segunda parcela do lado direito da igualdade da Equação 3.3.

### 3.2.1 Mapeamento Objeto–Relacional (ORM)

Um banco de dados relacional usa 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 concentraria 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 relacionamento complexos envolvendo grandes estruturas de dados.

Apesar dessa técnica 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.

O JDBC (*Java Database Connectivity*) [50] é uma das maneiras mais diretas para desenvolver um sistema Java que interaja com um banco de dados. Essa tecnologia atende a um percentual 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 [49].

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 [49]:

- 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; e
- 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*).

# Capítulo 4

## Resultados

### 4.1 Interface gráfica do usuário

De acordo com os requisitos levantados e analisados no Capítulo 3, foi definida uma interface gráfica do usuário para o sistema InterAB com o propósito de facilitar a interação entre o usuário e o sistema e atender às necessidades requisitadas para o sistema.

A interface gráfica do usuário para o sistema InterAB é apresentada na Figura 4.1. Essa interface divide-se em duas principais áreas: “Interrogador” e “Log”. A área denominada “Interrogador” apresenta informações de identificação e comunicação que devem ser explicitadas pelo usuário do sistema, como taxa de varredura, endereço IP, portas e modelo do interrogador óptico. Ainda através da área “Interrogador” é possível realizar o teste de conexão entre o software InterAB e o interrogador que se deseja adicionar na base de dados. A área denominada “Log” apresenta informações de ações realizadas pelo sistema, como interrogadores adicionados, sensores identificados e número de coletas de dados realizadas. A inicialização e a finalização de aquisições de dados são realizadas por intermédio de dois botões que podem ser acionados pelo usuário a qualquer momento.

A interface gráfica definida para o InterAB foi exclusivamente projetada para este Trabalho, podendo ser facilmente substituída por uma interface em linha de comando. Foi realizado o desenvolvimento de uma interface gráfica com o objetivo de facilitar a realização de teste do sistema InterAB. Entretanto, funcionalidades, como iniciar aquisição, parar aquisição e testar conexão, podem ser automatizadas de forma que esses eventos não necessitem de disparo obrigatório pelo usuário.

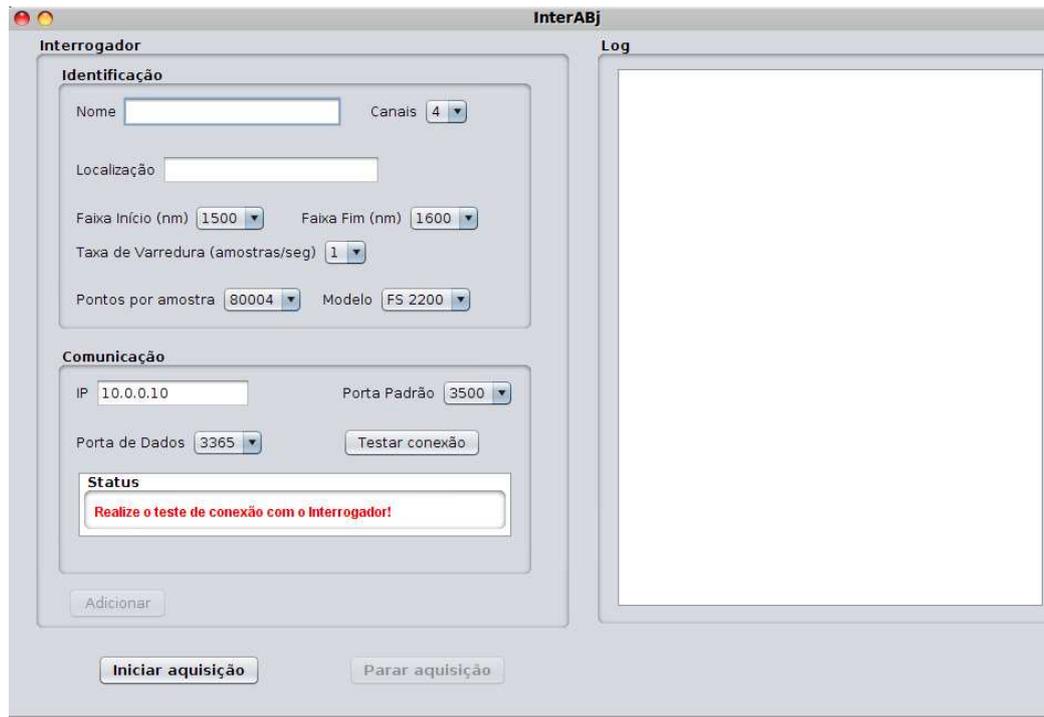


FIGURA 4.1: Interface gráfica do usuário para o sistema InterAB.

## 4.2 Experimentos

Com o objetivo de validar as principais funcionalidades do sistema InterAB foram realizados três experimentos: o monitoramento de temperatura de um ambiente, a identificação e persistência da topologia de uma rede de sensores ópticos e a filtragem de dados de uma rede de sensores ópticos antes da persistência dessas leituras no banco de dados. Esses experimentos foram realizados no Laboratório de Inovação Tecnológica em Telecomunicações (LABIT) da Universidade Federal do Pará.

Os três experimentos relatados a seguir fizeram uso comum do interrogador óptico FS2200 (discutido na subseção 2.2.2) e de sensores ópticos FBG de temperatura FS6300. Esse sensor FBG de temperatura é apresentado na Figura 4.2.



FIGURA 4.2: Sensor FBG de temperatura FS6300.

#### 4.2.1 Experimento 1: Monitoramento de temperatura

O primeiro experimento realizou o monitoramento de temperatura no LABIT por intermédio de dois sensores: o sensor FBG de temperatura FS6300 e o sensor eletrônico LM35 [51]. Tal monitoramento foi avaliado para a faixa de 23 °C a 27,5 °C, considerando variações de 0,5 °C. Esse experimento tem por objetivo realizar um comparativo entre as leituras anotadas do sensor eletrônico e as leituras geradas pelo sensor FBG que foram coletadas do interrogador óptico FS2200 por intermédio do sistema InterAB. Assim, possibilitando a validação do monitoramento de uma determinada grandeza por intermédio do InterAB.

O esquema montado para o primeiro experimento é apresentado na Figura 4.3. Um sensor FBG FS6300 L é alocado no primeiro canal do interrogador óptico FS2200 e um sensor eletrônico LM35 é alimentado com 10 V por intermédio de uma fonte. O multímetro, por sua vez, avalia a voltagem de saída do sensor eletrônico. Essa voltagem é linearmente proporcional a temperatura medida pelo LM35 [51]. Ao mesmo tempo em que o multímetro apresenta a saída do sensor LM35, o sistema InterAB coleta *frames* do interrogador óptico FS2200 de maneira a possibilitar um comparativo entre as temperaturas medidas pelos sensores eletrônico e FBG.



Para cada temperatura medida pelo sensor LM35 dentro do intervalo 23 °C a 27,5 °C, o sistema InterAB coletou 10 *frames* do interrogador óptico para registrar as leituras geradas pelo sensor FS6300 L neste exato momento. A Tabela 4.1 apresenta o comparativo de monitoramento de temperatura entre os sensores FBG e eletrônico para o intervalo de 23 °C a 27,5 °C, considerando a variação de 0,5 °C. Por intermédio desse comparativo constatou-se que os erros foram consideravelmente pequenos e esperados ao levar em consideração a precisão dos dois sensores e a faixa de temperatura considerada no experimento, o que implica em um erro relativo máximo de aproximadamente 4,35%. Contudo, foi demonstrado o alto grau de confiabilidade no monitoramento de temperatura realizado pelo sistema InterAB a partir do processamento das leituras geradas pelo sensor FBG FS6300 L e coletadas do interrogador óptico FS2200.

TABELA 4.1: Comparativo de monitoramento de temperatura entre os sensores LM35 e FS6300 L

T LM35 (°C)	T média FS6300 L (°C)	Comp. de onda médio (nm)	Erro (% °C)
23	22,98796	1522,53296	0,0523
23,5	23,39034	1522,53672	0,4666
24	24,02198	1522,54263	0,0916
24,5	24,47778	1522,5469	0,0907
25	24,98316	1522,55164	0,0674
25,5	25,48689	1522,55637	0,0514
26	25,91028	1522,56035	0,3451
26,5	26,47133	1522,56563	0,1082
27	26,94252	1522,57007	0,2129
27,5	27,48949	1522,57523	0,0382

As respostas de variação de temperatura do sensor FBG FS6300 L para os deslocamentos do comprimento de onda produzidos nos grupos de 10 *frames* coletados do interrogador óptico FS2200 para as temperaturas de 23 °C e 27,5 °C são apresentadas nas Figuras 4.5 e 4.6, respectivamente. Através dessas duas respostas de variação de temperatura observam-se pequenos deslocamentos no comprimento de onda nos grupos de 10 *frames* e conseqüentemente pequenas variações de temperatura nestes grupos, resultando em valores de temperatura aproximados daqueles medidos pelo sensor eletrônico LM35.

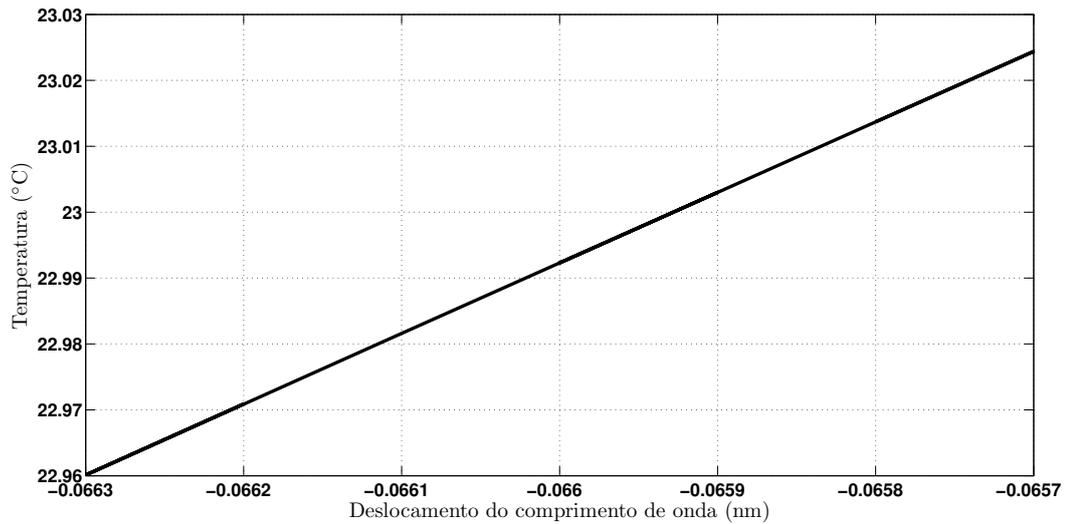


FIGURA 4.5: Variação de temperatura nos 10 *frames* coletados do interrogador para a temperatura de 23 °C.

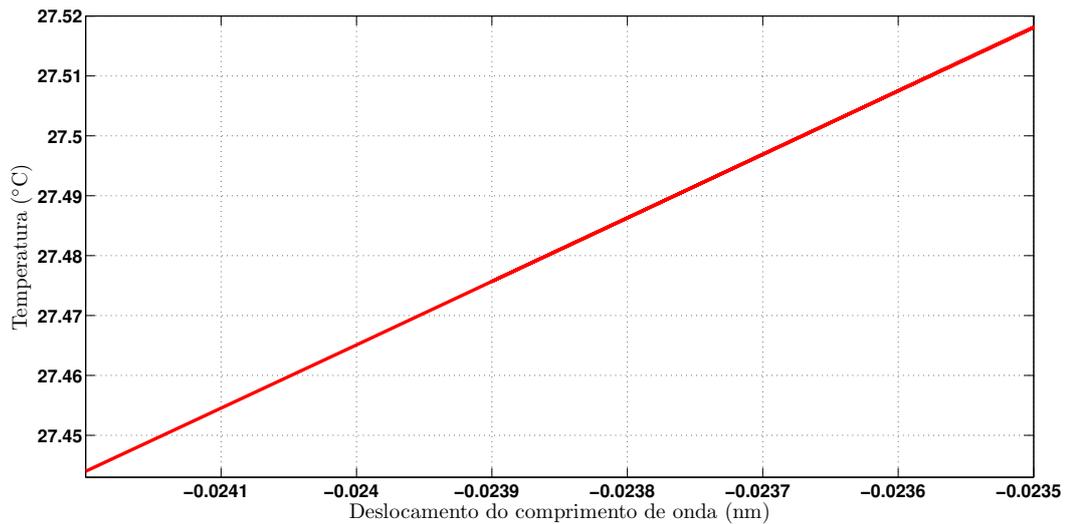


FIGURA 4.6: Variação de temperatura nos 10 *frames* coletados do interrogador para a temperatura de 27,5 °C.

O monitoramento de temperatura completo realizado com o sensor FBG FS6300 L via InterAB e o sensor eletrônico LM35 é apresentado na Figura 4.7 em função do tempo de coleta de *frames* do interrogador óptico FS2200. Foi realizado um comparativo entre a média das temperaturas processadas pelo InterAB em cada grupo de 10 *frames* coletados e as temperaturas anotadas do sensor eletrônico LM35. O comparativo apresenta graficamente uma ótima aproximação entre as temperaturas medidas por ambos os sensores, com erros relativos maiores nas temperaturas de 23,5 °C e 26 °C.

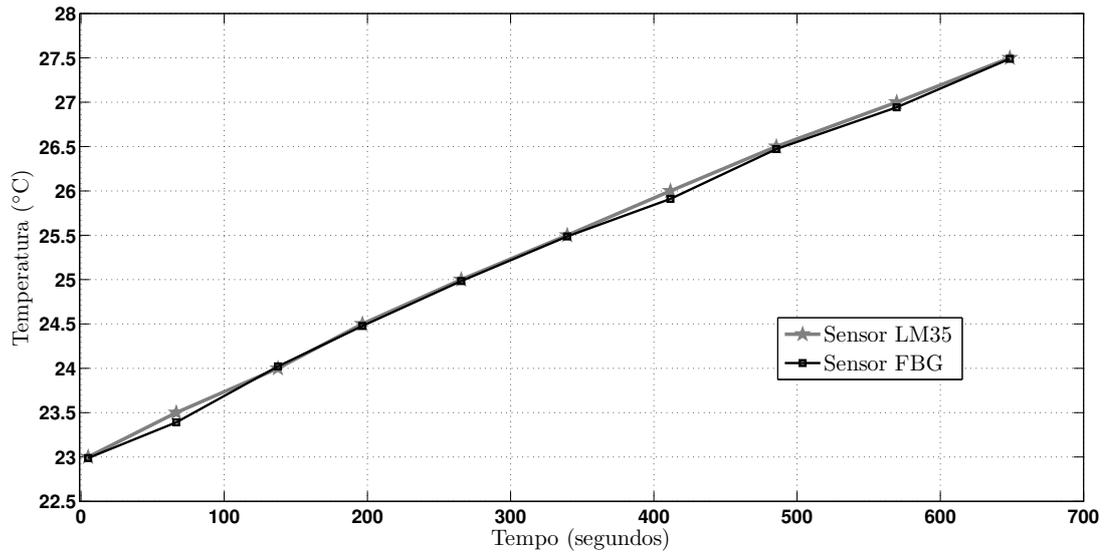


FIGURA 4.7: Monitoramento de temperatura com os sensores FS6300 L via InterAB e LM35 no intervalo de 23 °C a 27,5 °C, considerando a variação de 0,5 °C.

#### 4.2.2 Experimento 2: Identificação de topologia

O segundo experimento tem como objetivo identificar a topologia da rede de sensores ópticos mostrada na Figura 4.8 através do sistema InterAB. Esse esquema apresenta um sensor FBG de temperatura FS6300 em três canais do interrogador óptico FS2200: o sensor FS6300 J no primeiro canal, o sensor FS6300 K no segundo canal e o sensor FS6300 L no terceiro canal. A Figura 4.9 apresenta os três sensores de temperatura em maiores detalhes.



FIGURA 4.8: Esquema para o Experimento 2.



FIGURA 4.9: Sensores de temperatura FS6300 utilizados no Experimento 2.

A consulta que carregou os registros de sensores genéricos identificados e persistidos pelo sistema InterAB é apresentada na Figura 4.10. São destacadas as informações de nome, tipo, número serial e modelo do sensor, e o canal do interrogador óptico no qual o sensor está alocado. As informações de número serial e modelo do sensor devem ser definidas pelo usuário do sistema em etapa posterior a identificação da rede de sensores ópticos, considerando o fabricante dos sensores que foram alocados nos canais do interrogador.

The screenshot shows a MySQL query execution interface. The query executed is:

```
1 select
2   canal_sensor, modelo_sensor, serial_sensor, tipo_sensor, nm_sensor
3   from teccon_sensor;
```

The results are displayed in a table with the following columns: #, canal\_sensor, modelo\_sensor, serial\_sensor, tipo\_sensor, and nm\_sensor. The table contains three rows of data:

#	canal_sensor	modelo_sensor	serial_sensor	tipo_sensor	nm_sensor
1	1			Genérico	Sensor JalE
2	2			Genérico	Sensor BSHT
3	3			Genérico	Sensor sNnO

The interface also shows the execution status: "Executed successfully in 0 s. Line 1, column 1. Execution finished after 0 s, 0 error(s) occurred."

FIGURA 4.10: Identificação de topologia de rede de sensores ópticos.

Neste experimento, como já mencionado, foram utilizados sensores FBG de temperatura dos modelos FS6300 J, K e L. A Figura 4.11 apresenta a consulta anterior com as informações de número serial e modelo do sensor definidas pelo usuário do sistema.

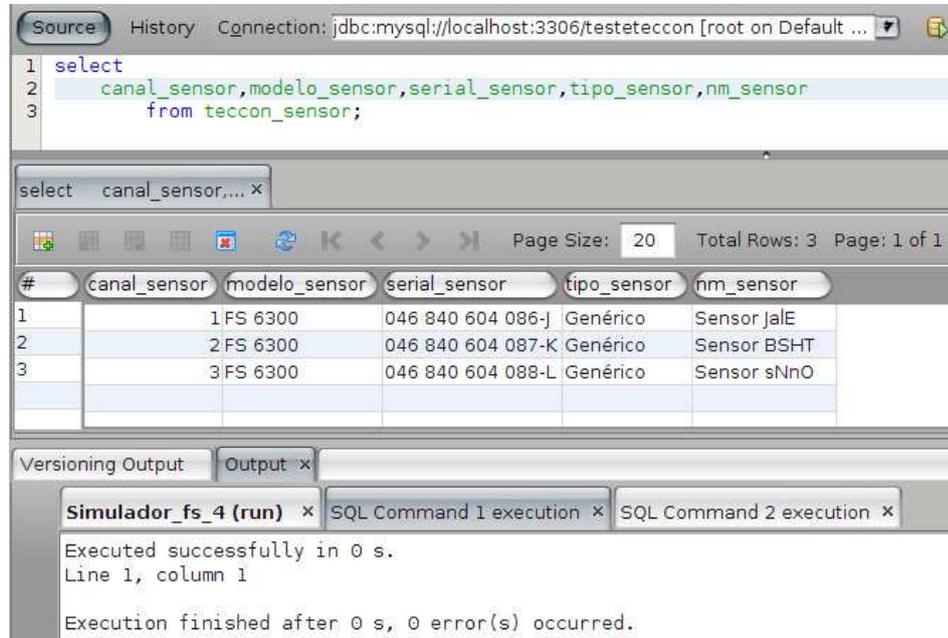


FIGURA 4.11: Definição de modelo e número serial dos sensores identificados.

### 4.2.3 Experimento 3: Filtragem de dados

O terceiro experimento tem como objetivo apresentar de que forma o InterAB realiza a filtragem de leituras geradas pelos sensores ópticos identificados e persistidos por esse sistema no segundo experimento. Consideraram-se três variações no comprimento de onda de pico dos sensores FBG FS6300 (J, K e L), implicando em três variações de temperatura partindo sempre de 24 °C (temperatura ambiente do LABIT). Logo, foi realizada a filtragem e a persistência apenas dos dados que estavam de acordo com a variação considerada. As variações no comprimento de onda de pico dos sensores 0,00473 nm, 0,0095 nm e 0,019 nm, que implicam nas variações de temperatura 0,5 °C, 1 °C e 2 °C, respectivamente, foram escolhidas devido ao fato de permitirem a visualização a curto prazo de mudanças de temperatura com um número razoável de *frames* coletados do interrogador óptico FS2200.

Essas variações foram calculadas com base na Equação 3.1. Para os sensores FBG FS6300 J, FS6300 K e FS6300 L a temperatura T pode ser dada, respectivamente, por [27]

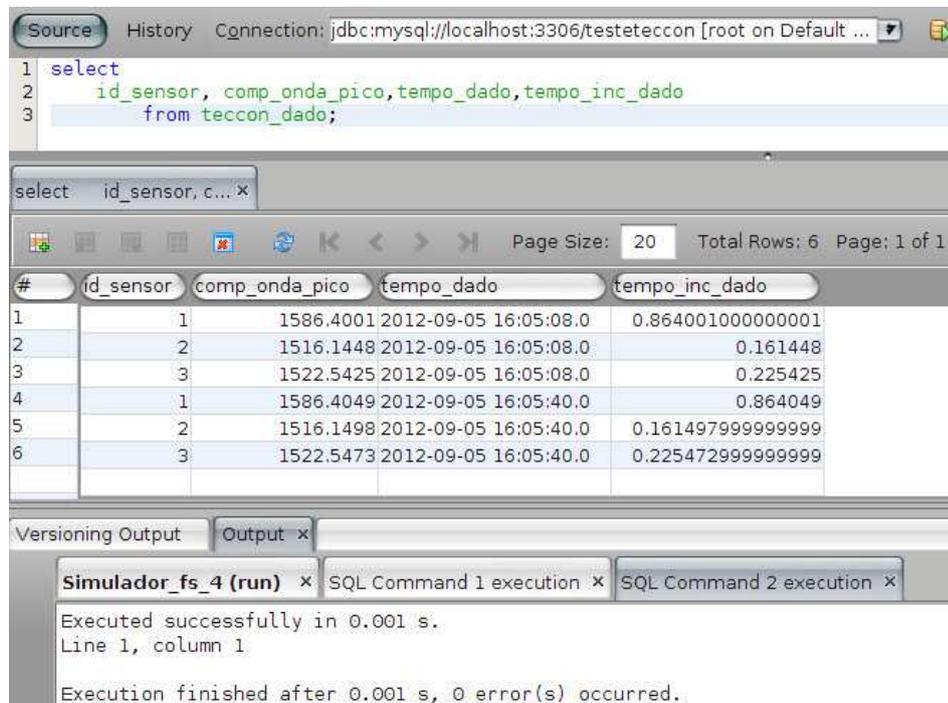
$$T = -12x^2 + 101x + 30, \quad (4.1)$$

$$T = -13,4x^2 + 106x + 30, \quad (4.2)$$

$$T = -13,3x^2 + 105,3x + 30. \quad (4.3)$$

Para as variações de 0,5 °C, 1 °C e 2 °C foram coletados via InterAB 40, 70 e 140 *frames* do interrogador óptico FS2200, respectivamente. Portanto, sem a realização de filtragem dos dados seriam persistidas 120, 210 e 420 leituras geradas pelos três sensores FBG FS6300, respectivamente, o que futuramente sobrecarregaria a base de dados com novas leituras sendo persistidas pelo InterAB sem qualquer limitação no decorrer do tempo, ou seja, o banco de dados do sistema InterAB armazenaria uma grande quantidade de dados que não traduziriam variações importantes de temperatura.

Entretanto, com as filtragens de variações de 0,5 °C, 1 °C e 2 °C aplicadas antes da persistência dos dados foram obtidos os resultados mostrados nas Figuras 4.12, 4.13 e 4.14, respectivamente. As consultas carregaram apenas 6 registros filtrados e persistidos pelo InterAB para cada variação, sendo 2 registros de cada sensor FBG de temperatura. Dessa forma, foram persistidos apenas os dados que traduzem as temperaturas de 24 °C e 24,5 °C (variação de 0,5 °C), 24 °C e 25 °C (variação de 1 °C), 24 °C e 26 °C (variação de 2 °C) para os três sensores FS6300.



```

1 select
2   id_sensor, comp_onda_pico, tempo_dado, tempo_inc_dado
3   from tecccon_dado;

```

#	id_sensor	comp_onda_pico	tempo_dado	tempo_inc_dado
1	1	1586.4001	2012-09-05 16:05:08.0	0.8640010000000001
2	2	1516.1448	2012-09-05 16:05:08.0	0.161448
3	3	1522.5425	2012-09-05 16:05:08.0	0.225425
4	1	1586.4049	2012-09-05 16:05:40.0	0.864049
5	2	1516.1498	2012-09-05 16:05:40.0	0.1614979999999999
6	3	1522.5473	2012-09-05 16:05:40.0	0.2254729999999999

Executed successfully in 0.001 s.  
Line 1, column 1  
Execution finished after 0.001 s, 0 error(s) occurred.

FIGURA 4.12: Filtragem de dados para a variação de temperatura de 0,5 °C.

The screenshot shows a MySQL query execution window. The query is:

```
1 select
2     id_sensor, comp_onda_pico, tempo_dado, tempo_inc_dado
3     from teccon_dado;
```

The result set contains 6 rows of data:

#	id_sensor	comp_onda_pico	tempo_dado	tempo_inc_dado
1	1	1586.4001	2012-09-05 16:16:58.0	0.864001000000001
2	2	1516.1448	2012-09-05 16:16:58.0	0.161448
3	3	1522.5425	2012-09-05 16:16:58.0	0.225425
4	2	1516.1544	2012-09-05 16:18:02.0	0.161543999999999
5	1	1586.4097	2012-09-05 16:18:03.0	0.864096999999999
6	3	1522.5521	2012-09-05 16:18:03.0	0.225521000000001

The output pane shows the execution was successful in 0.001 s.

FIGURA 4.13: Filtragem de dados para a variação de temperatura de 1 °C.

The screenshot shows a MySQL query execution window. The query is:

```
1 select
2     id_sensor, comp_onda_pico, tempo_dado, tempo_inc_dado
3     from teccon_dado;
```

The result set contains 6 rows of data:

#	id_sensor	comp_onda_pico	tempo_dado	tempo_inc_dado
1	1	1586.4001	2012-09-05 16:20:02.0	0.864001000000001
2	2	1516.1448	2012-09-05 16:20:02.0	0.161448
3	3	1522.5425	2012-09-05 16:20:02.0	0.225425
4	1	1586.4191	2012-09-05 16:22:18.0	0.864191000000001
5	2	1516.1638	2012-09-05 16:22:19.0	0.161638
6	3	1522.5615	2012-09-05 16:22:20.0	0.225615

The output pane shows the execution was successful in 0 s.

FIGURA 4.14: Filtragem de dados para a variação de temperatura de 2 °C.

Três comparativos entre a persistência dos dados sem e com filtragem de dados podem ser observados nas Figuras 4.15, 4.16 e 4.17. Sem a filtragem dos dados, inúmeras leituras geradas pelo sensor FBG FS6300 são armazenadas sem grande significado em termos de mudanças abruptas na grandeza monitorada. Por outro lado, com a aplicação da filtragem via InterAB, observa-se a persistência apenas das leituras que estão de acordo com as variações de temperatura de  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  definidas. Neste caso foram utilizadas apenas duas amostras para denotar a filtragem de dados.

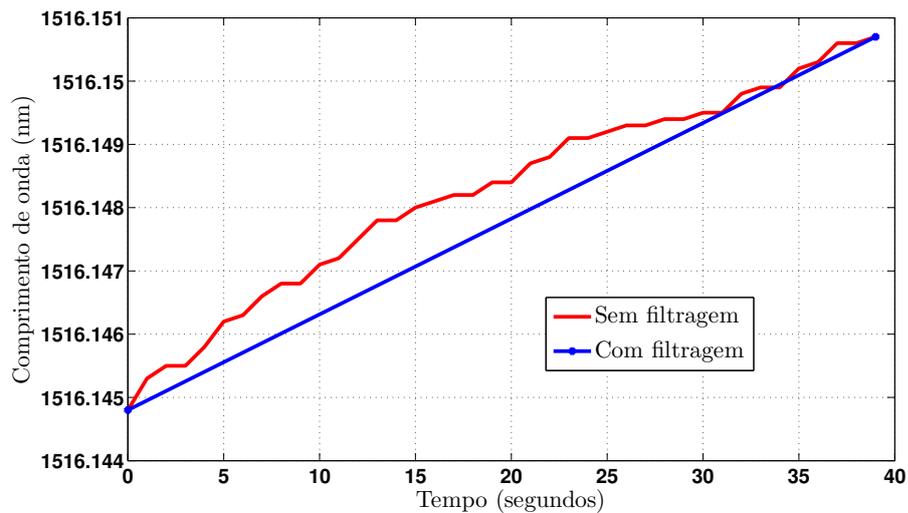


FIGURA 4.15: Persistência das leituras do sensor FS6300 K sem e com filtragem de dados para a variação de temperatura de  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

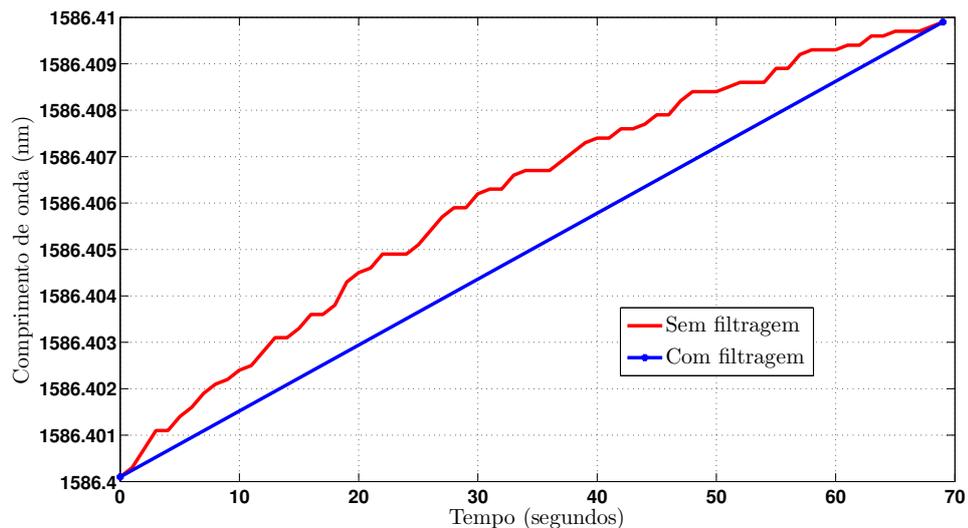


FIGURA 4.16: Persistência das leituras do sensor FS6300 J sem e com filtragem de dados para a variação de temperatura de  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

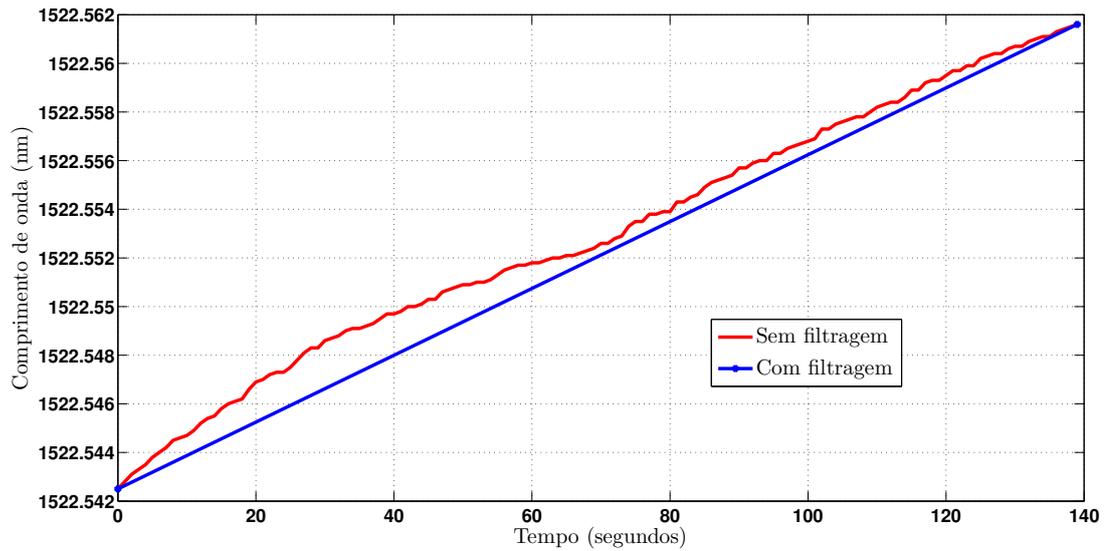


FIGURA 4.17: Persistência das leituras do sensor FS6300 L sem e com filtragem de dados para a variação de temperatura de 2 °C.

Um novo comparativo entre a persistência dos dados sem e com filtragem de dados é apresentado na Figura 4.18. Para esse caso foi considerada a variação de temperatura de 1 °C e cinco amostras foram obtidas a partir da filtragem via InterAB. Por intermédio desse comparativo com um número maior de amostras é possível aproximar e indicar o comportamento da variação de temperatura no ambiente monitorado (LABIT). Dessa forma, houve uma variação rápida da temperatura no LABIT no início da coleta de dados do sensor FBG até aproximadamente 150 segundos. Decorrido esse tempo, a temperatura então começou a variar de forma gradativa até aproximadamente 435 segundos, onde a temperatura no LABIT começou a estabilizar.

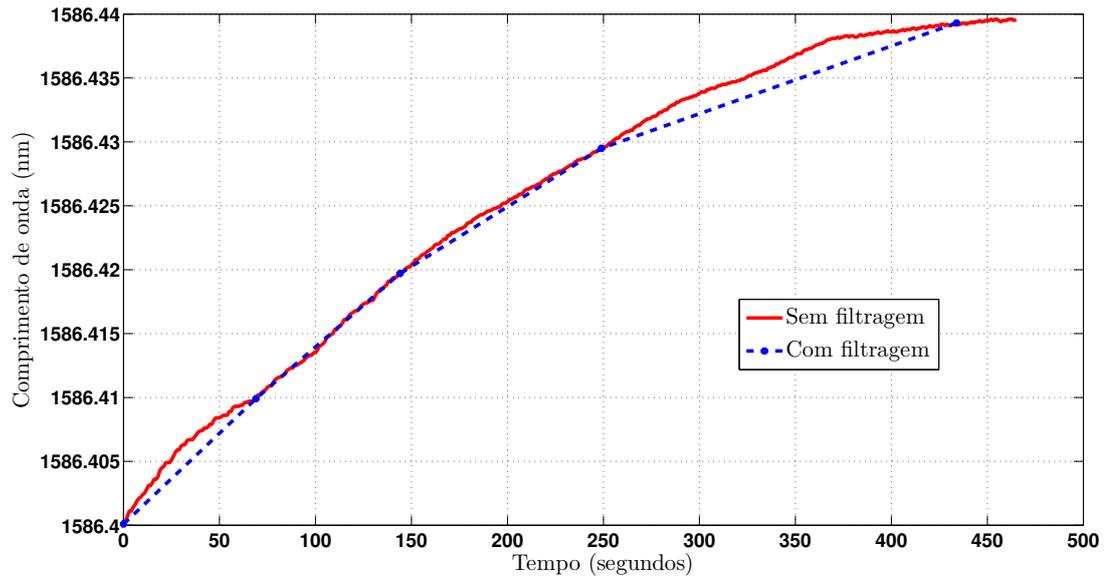


FIGURA 4.18: Persistência das leituras do sensor FS6300 J sem e com filtragem de dados para a variação de temperatura de 1 °C usando cinco amostras.

Contudo, todas as filtrações realizadas objetivaram reduzir a quantidade de leituras geradas pelos sensores FBG que serão persistidas pelo sistema InterAB. As filtrações foram baseadas em variações do comprimento de onda de pico dos sensores FBG, que implicam em variações de uma determinada grandeza, como a temperatura ou a deformação. O usuário do sistema InterAB possui papel fundamental quando do momento de definição da variação desejada do comprimento de onda de pico dos sensores FBG. Portanto, o usuário deve informar obrigatoriamente essa variação para que o sistema possa realizar a filtração de modo adequado. Para este Trabalho o sistema InterAB opera com a variação do comprimento de onda de pico dos sensores FBG padrão igual a 0,00473 nm, podendo ser alterada a critério do usuário.

## Capítulo 5

# Considerações finais e Trabalhos futuros

Com a grande popularização e utilização de redes de sensores ópticos, aplicadas em áreas que vão da construção civil até a indústria aeronáutica, surgiram oportunidades sem precedentes para a instrumentação, o monitoramento e o controle de residências, do meio ambiente, de cidades e das infraestruturas de prestação dos mais variados serviços à sociedade. Contudo, paralelamente a estes avanços revelou-se uma grande demanda por sistemas computacionais que fossem capazes realizar o tratamento adequado dos dados obtidos a partir destas redes de sensores ópticos.

Este Trabalho apresentou a modelagem e o desenvolvimento do sistema InterAB com o objetivo de implementar e garantir a persistência de dados de redes de sensores ópticos. O sistema foi idealizado para ser aberto, flexível e extensível a partir do prévio conhecimento de softwares comerciais que possuem caráter fechado e inflexível, na grande maioria das vezes sem qualquer compatibilidade entre os fabricantes.

Foram realizados três experimentos com o objetivo de validar as funcionalidades do software desenvolvido: o monitoramento de temperatura do LABIT, a identificação de topologia de uma rede de sensores ópticos e a filtragem de dados de uma rede de sensores ópticos antes da persistência no banco de dados. Esses experimentos demonstraram a importância do sistema InterAB para o processamento e armazenamento de dados advindos de redes de sensores ópticos, explorando funcionalidades como a criação de versões automáticas de redes de sensores ópticos na forma de estruturas de dados persistentes, a coleta e o processamento de dados de redes de sensores ópticos de maneira a realizar o monitoramento de determinada grandeza em um determinado ambiente e a

filtragem de leituras de sensores ópticos de maneira a evitar sobrecarga na base de dados a partir do momento em que é definida a variação desejada no comprimento de onda de pico dos sensores.

Como Trabalho futuro é possível realizar as devidas extensões do sistema InterAB para incorporar novos tipos de sensores, como sensores de deformação, aceleração e outros. Há também a possibilidade de extensibilidade no tratamento de múltiplos interrogadores ópticos de fabricantes diversos, requerendo para tanto apenas o conhecimento do protocolo de comunicação do interrogador óptico ao qual deseja-se embutir o suporte.

Outro eventual Trabalho futuro que pode ser considerado é a integração do sistema InterAB com uma aplicação Web. O sistema InterAB é o responsável pelas tarefas de processamento e armazenamento de dados advindos de várias redes de sensores ópticos, enquanto a aplicação Web realiza a apresentação destes dados persistidos por intermédio de gráficos e tabelas para o usuário final. Esse sistema computacional formado pelas duas ferramentas poderá ser de grande utilidade, por exemplo, para a supervisão, controle e proteção de sistemas de energia elétrica a medida que alarmes podem ser disparados pelo sistema com o objetivo de alertar acerca de falhas na rede elétrica. Ainda neste contexto, podem ser aplicadas técnicas de inteligência computacional que permitam correlacionar os dados advindos das redes de sensores ópticos com o estado da rede elétrica, permitindo otimizá-la.

## Capítulo 6

### Trabalhos publicados

- M. J. Sousa, A. D. F. Santos, C. S. Sales, R. C. Santos, H. P. C. Oliveira, A. Klautau e J. C. W. A. Costa. “Desenvolvimento de Software Simulador para um Sistema de Interrogação Óptico”. XV SBMO & X CBMag, MOMAG 2012, João Pessoa/PB no período de 05 a 08 de agosto de 2012.
- A. D. F. Santos, A. B. Santos e H. P. C. Oliveira. “Estudo e desenvolvimento de um software para a automatização do interrogador óptico FS2200”. XXX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, Iniciação Científica, Brasília/DF no período de 13 a 16 de setembro de 2012.

## Referências Bibliográficas

- [1] S. Yin, P. B. Ruffin, and F. T. S. Yu. *Fiber optic sensors*. CRC Press, segunda edição, 2008.
- [2] A. Méndez. “Fiber Bragg grating sensors: a market overview”. *Invited Paper of Third European Workshop on Optical Fibre Sensors*, 6619:661905–661905–6, 2007.
- [3] G. P. Agrawal. *Fiber–Optic Communication Systems*. John Wiley & Sons, New York, terceira edição, Jun 2002.
- [4] B. Culshaw and A. Kersey. “Fiber–Optic Sensing: A Historical Perspective”. *Journal of Lightwave Technology*, 26(9):1064–1078, Maio 2008.
- [5] B. Culshaw. “Fibre optic sensor technology: An engineering reality or a scientific opportunity?”. *Invited Paper of Fourth European Workshop on Optical Fibre Sensors*, 7653:765304–765304–11, Set 2010.
- [6] P. L. Kelley, I. P. Kaminow, and G. P. Agrawal. *Applications of Nonlinear Fiber Optics*. Academic Press, terceira edição, 2001.
- [7] B. Lee. “Review of the present status of optical fiber sensors”. *Invited Paper of Optical Fiber Technology*, 9(2):57–79, Abr 2003.
- [8] P. F. C. Antunes. “*Sensores ópticos para monitorização dinâmica de estruturas*”. Tese de Doutorado, Universidade de Aveiro, Jul 2011.
- [9] K. Bohnert, P. Gabus, J. Kostovic, and H. Brandle. “Optical fiber sensors for the electric power industry”. *Optics and Lasers in Engineering (Special Issue Optics in Switzerland)*, 43:511–526, Maio 2005.
- [10] H. Lee, Z. Jin, and M. Song. “Investigation of fiber Bragg grating temperature sensors for applications in electric power systems”. *Proceedings of the SPIE*, 5634:579–584, 2005.
- [11] T. Ichino, T. Suzuki, T. Wada, and T. Sadahiro. “Measurement of conductor temperature of power cable by optical fiber sensor”. In *The 7th International Conferende on Dielectric Materials, Measurements and Applications*, páginas 303–306, Set 1996.
- [12] G. Yilmaz and S. E. Karlik. “A distributed optical fiber sensor for temperature detection in power cables”. *Sensors and Actuators*, 125(2):148–155, 2006.

- [13] T. K. Gangopadhyay and M. C. Paul. “Fiber–optic sensor for real–time monitoring of temperature on high voltage (400KV) power transmission lines”. In *The 20th International Conference on Optical Fibre Sensors*, Out 2009.
- [14] W. Guo and Y. Li. “Temperature and Strain Online Monitoring System of Power Cable Based on Fiber Bragg Grating”. In *The 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, páginas 1–4, Out 2008.
- [15] F. M. Araujo, L. A. Ferreira, and I. M. Dias. “Surveillance of fiber optic cables and electric power cables using fiber Bragg grating sensors”. *Fiber Optic Sensor Technology and Applications*, 3541:279–289, Nov 1999.
- [16] F. V. B. Nazaré. “*Sistema de Monitoramento de Temperatura e Corrente para Linhas de Transmissão usando Tecnologia de Fibras Ópticas*”. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Maio 2010.
- [17] H. J. Kalinowski and R. C. Chaves. “Quasi distributed optical fiber sensor for strain measurement along power conductors”. In *The 3rd Iberoamerican Optics Meeting and 6th Latin American Meeting on Optics, Lasers and Their Applications*, páginas 134–140, Jul 1999.
- [18] Q. Jiang, Q. Sui, and J. Wang. “Technical and Experimental Study of Fiber Bragg Grating Vibration Detection Based on Matching Demodulation Method”. *IEEE International Conference on Automation and Logistics*, páginas 1299–1303, Out 2007.
- [19] A. Othonos and K. Kalli. *Fiber Bragg gratings, Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing*. Artec House, 1999.
- [20] W. W. Morey. “Distributed Fiber Grating Sensors”. In *The 7th International Conference on Optical Fiber Sensors*, páginas 285–288, Maio 1990.
- [21] A. D. Kersey and A. Dandridge. “Applications of Fiber–Optic Sensors”. *IEEE Transactions on Components, Hybrids and Manufacturing Technology*, 13(1):137–143, Mar 1990.
- [22] B. Culshaw. “Fiber Optics in Sensing and Measurement”. *Invited Paper of IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 6(6):1014–1021, Nov 2000.
- [23] FiberSensing. “BraggMonitor FS9000 – User Manual v1.1”. <http://www.fibersensing.com/PageGen.aspx>, Nov 2011.
- [24] Micron Optics. “Sensing Analysis Software – User Manual v1.5”. [http://www.micronoptics.com/sensing\\_software.php](http://www.micronoptics.com/sensing_software.php), Out 2012.
- [25] National Instruments. “LabVIEW 2012 Help – User Manual v2012”. <http://www.ni.com/pdf/manuals/371361j.zip>, Out 2012.

- [26] FiberSensing. “FS2100–2200 Standard Rack–Mountable Braggmeter User Manual”. [http://www.fibersensing.com/PageGen.aspx?WMCM\\_PaginaId=33208](http://www.fibersensing.com/PageGen.aspx?WMCM_PaginaId=33208), Out 2012.
- [27] FiberSensing. “FS6300 – Temperature Sensors – General Informations”. [http://www.fibersensing.com/PageGen.aspx?WMCM\\_PaginaId=27933](http://www.fibersensing.com/PageGen.aspx?WMCM_PaginaId=27933), Nov 2012.
- [28] T. Erdogan. “Fiber Grating Spectra”. *Journal of Lightwave Technology*, 15(8):1277–1294, Aug 1997.
- [29] K. O. Hill and G. Meltz. “Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview”. *Journal of Lightwave Technology*, 15(8):1263–1276, Ago 1997.
- [30] M. J. Sousa. “Síntese de grades de Bragg em fibra: técnicas de aceleração e codificação para algoritmos evolucionários”. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Pará, Fev 2008.
- [31] A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick, M. LeBlanc, K. P. Koo, C. G. Askins, M. A. Putnam, and E. J. Friebele. “Fiber Grating Sensors”. *Journal of Lightwave Technology*, 15(8):1442–1463, Ago 1997.
- [32] T.H.T. Chan, L. Yu, H.Y. Tam, Y.Q. Ni, S.Y. Liu, W.H. Chung, and L.K. Cheng. “Fiber Bragg grating sensors for structural health monitoring of Tsing Ma bridge: Background and experimental observation”. *Engineering Structures*, 28(5):648–659, 2006.
- [33] A. Cusano, A. Cutolo, J. Nasser, M. Giordano, and A. Calabro. “Dynamic strain measurements by fibre Bragg grating sensor”. *Sensors and Actuators A: Physical*, 110(1–3):276–281, 2004.
- [34] S. M. Melle, K. Liu, and R. M. Measures. “A passive wavelength demodulation system for guided–wave Bragg grating sensors”. *IEEE Photonics Technology Letters*, 4(5):516–518, Maio 1992.
- [35] M. A. Davis and A. D. Kersey. “All–fibre Bragg grating strain–sensor demodulation technique using a wavelength division coupler”. *Electronics Letters*, 30(1):75–77, Jan 1994.
- [36] N. Haramoni. “Sistema para interrogação de redes de Bragg utilizando laser EDF sintonizado”. Tese de Doutorado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Fev 2007.
- [37] HBM. “The Optical Measurement Chain from HBM Test and Measurement”. <http://www.hbm.com/en/menu/applications/experimental-stress-analysis/optical-sensing/>, Out 2012.
- [38] Micron Optics. “Micron Optics, Inc. – Instruments”. [http://www.micronoptics.com/sensing\\_instruments.php](http://www.micronoptics.com/sensing_instruments.php), Out 2012.
- [39] National Instruments. “NI PXIe–4844 Optical Sensor Interrogator for Fiber Bragg Gratings – National Instruments”. <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/209012>, Out 2012.

- [40] FiberSensing. “FiberSensing – Bringing light to measurement”. <http://w3.fibersensing.com/>, Jan 2013.
- [41] Micron Optics. “Micron Optics, Inc. – Tunable Optics for Sensing, Imaging, and Telecommunications”. <http://www.micronoptics.com/>, Jan 2013.
- [42] National Instruments. “National Instruments: Test, Measurement and Embedded Systems”. <http://www.ni.com/>, Jan 2013.
- [43] National Instruments. “National Instruments: Discussion Forums : Most Active Software Boards : LabVIEW : The pros and cons of LabVIEW”. <http://forums.ni.com/t5/LabVIEW/The-pros-and-cons-of-LabVIEW/td-p/759730>, Jan 2013.
- [44] E. Bezerra. *Princípios de análise e projeto de sistemas com UML*. Elsevier, Rio de Janeiro, 2007.
- [45] R. S. Pressman. *Engenharia de Software*. McGraw–Hill, sexta edição, 2006.
- [46] A. B. Santos. “Estudo e Desenvolvimento de um software para automatização do interrogador óptico FS2200”. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Pará, Dez 2011.
- [47] Oracle Corporation. “Worker Threads and SwingWorker”. <http://docs.oracle.com/javase/6/docs/api/javax/swing/SwingWorker.html>, Nov 2012.
- [48] Oracle Corporation. “MySQL Database”. <http://www.mysql.com/>, Nov 2012.
- [49] JBossCommunity. “Hibernate – Relational Persistence for Java and .NET”. <http://www.hibernate.org/>, Nov 2012.
- [50] Oracle Corporation. “Java SE Technologies – Database”. <http://www.oracle.com/technetwork/java/javase/jdbc/index.html>, Nov 2012.
- [51] Texas Instruments. “LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors”. <http://www.ti.com/product/lm35>, Dez 2012.