

1

Introdução

O crescente interesse pelo desenvolvimento de novas tecnologias, bem como o aprimoramento das já existentes, voltadas para a medição das mais diversas grandezas físicas na indústria, estão impulsionando diferentes áreas do conhecimento em universidades e centros de pesquisa para atender tal necessidade.

No Brasil, especificamente, os últimos cinco anos foram marcados por mudanças singulares em ramos da indústria local, como a do petróleo, telefonia, distribuição de energia elétrica e etc... Nestes ramos isso se refletiu principalmente no investimento em tecnologias capazes de oferecer como retorno melhorias em seus processos produtivos, produtos e serviços.

Neste contexto, a indústria de fibras ópticas foi uma das que mais se desenvolveu desde o final da década de 80. Além da fibra óptica em si empregada como meio de transmissão de sinais, toda uma tecnologia de equipamentos e sistemas por trás disso evoluiu em qualidade e custo. Inicialmente restrita às empresas ligadas ao setor de telecomunicações, agora esta tecnologia interessa a um número significativo de empresas, e isto devido principalmente ao fato de que não somente sinais poderiam ser transmitidos através da luz. Agora, através de técnicas controladas, a luz poderia gerar sinais associados a uma vasta gama de grandezas físicas, funcionando como um sensor. Deformação, deslocamento, aceleração, pressão, temperatura e propriedades químicas são algumas possibilidades destes sensores a fibra óptica, comumente denominados pela indústria de **SFO's**.

Existem várias técnicas empregadas para realizar esta tarefa. Técnicas envolvendo propriedades de reflectometria e birefringência da fibra são um exemplo. Entretanto, nos últimos anos, uma outra técnica de SFO é a que mais tem se destacado no campo de medição de grandezas físicas, denominada de Redes de Bragg (*Bragg Gratings*)[15].

Um número cada vez maior de SFO's empregando a técnica de redes de Bragg tem sido reportados anualmente na indústria e nos meios

acadêmicos [3, 9]. Esse interesse, obviamente, tenta suprir as necessidades já mencionadas disputando mercado com tecnologias já estabelecidas através de vantagens tecnológicas e de custo.

Dentre as vantagens tecnológicas do emprego dos SFO's, as mais destacadas são a possibilidade de sensoriamento de diversos pontos através de uma única fibra (multiplexação), facilidade de leitura dos sinais obtidos (boa relação sinal/ruído), medições a longas distâncias (sensoriamento remoto), imunidade a campos eletromagnéticos, ausência de faísca, baixo peso e baixa reatividade do material.

Quanto ao custo do emprego desta tecnologia, é notório que os avanços técnicos e de economia de escala no ramo das telecomunicações têm servido para impulsionar e viabilizar projetos antes limitados aos meios acadêmicos. Frequentemente, para qualquer novo sensor ou técnica na área, o uso de componentes e equipamentos já disponíveis na indústria de fibras ópticas e largamente empregados em empresas, como as de telecomunicações, é imperativo.

Neste cenário, o Laboratório de Sensores a Fibra Óptica do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio criado em 2001, vem desenvolvendo aplicações de sensores a fibra com ênfase no emprego de redes de Bragg. São alguns exemplos deste trabalho, os transdutores de pressão e temperatura para fundo de poços de petróleo, desenvolvidos em parceria com CENPES/PETROBRAS, além de um sensor de vazão em fase final de desenvolvimento. Encontram-se também em fase de pré-comercialização sensores para detecção de vazamentos em tanques de derivados de petróleo, que além de indicar a ocorrência do vazamento também discriminam o tipo de líquido vazado. Outra linha de pesquisa visa desenvolver sistemas de monitoração permanente de deformações em estruturas civis, como, por exemplo, dutos, barragens e pontes, entre outras.

Além destas aplicações, este grupo de pesquisa também desenvolveu sistemas de leitura e processamento dos dados para sensores a fibra óptica. Os resultados apontam para um desempenho elevado, ampliando o escopo de aplicação de transdutores baseados em sensores a fibra óptica, podendo atingir diversos setores da indústria.

1.1

Objetivos do trabalho

Este trabalho buscou desenvolver um transdutor baseado em SFO's para medição de vibrações mecânicas. Pesquisas nesta área apontam bons

resultados e são objeto de interesse de centros de pesquisa e empresas no Brasil e exterior [2, 4, 13, 14, 16, 18, 20, 21, 29, 30, 33, 34].

Na PUC-Rio, em particular, o desenvolvimento de um acelerômetro óptico teve início em 2000, quando foram obtidos resultados encorajadores na caracterização metrológica de um primeiro protótipo de acelerômetro óptico a redes de Bragg [22, 28].



Figura 1.1: Exemplos de possíveis aplicações.

A opção por redes de Bragg tornou-se cada vez mais óbvia pela capacidade destes componentes de relacionar deformação mecânica com variação de comprimento de onda, e dentre as suas principais vantagens de se conceber um transdutor de vibrações mecânicas com este tipo de sensor, ressaltam-se aquelas já normalmente associadas aos SFO's.

O sistema de medição e o transdutor propostos foram inicialmente desenvolvidos para medição de vibrações em situações nas quais os métodos tradicionais não se aplicam por alguma limitação técnica. Entre as possibilidades vislumbradas destacam-se a medição de vibrações eólicas em cabos elétricos de alta tensão empregados em linhas de transmissão [7, 8, 10, 25, 31], onde para esta aplicação, a imunidade ao campo eletromagnético induzido pela passagem de corrente elétrica e a possibilidade de medições a longas distância (> 10 km) são os maiores atrativos desta técnica. Uma outra possibilidade de emprego é em aplicações de medição de vibrações em bombas centrífugas submersas em sistemas de elevação artificial em poços de petróleo, que também têm necessidade de medições a longas distâncias e em faixas de temperatura onde componentes eletrônicos possuem baixa confiabilidade.

1.2

Os acelerômetros convencionais

Atualmente existem acelerômetros convencionais fabricados segundo os mais diversos princípios físicos e técnicas construtivas, cada um fazendo uso de vantagens que lhe direcionam para este ou aquele determinado uso, podendo ser configurados para operar como sensores ativos ou passivos [36, 35].

Os acelerômetros podem ser classificados como sendo do tipo de deflexão ou balanço zero, mecânicos ou elétricos, dinâmicos ou cinemáticos, e etc... A grande maioria dos acelerômetros industriais pode ser classificada como sendo do tipo de deflexão ou balanço zero. Aqueles usados em medições de vibrações e choques são normalmente do tipo de deflexão enquanto que para medições de deslocamentos é preferível o do tipo balanço zero.

Algumas características de desempenho definem um acelerômetro. A faixa dinâmica de operação em frequência onde seu comportamento permanece constante em relação a variações de frequência (resposta em frequência), a razão entre o nível do sinal medido e o nível de ruído intrínseco da medição que define qual o menor valor de aceleração é possível se medir (sensibilidade), o amortecimento existente entre a massa sísmica e o elemento sensor, e a linearidade da resposta do dispositivo para diferentes valores de aceleração aplicados.

Entre os diversos tipos de acelerômetros comercialmente disponíveis destacam-se:

- **Eleto-mecânicos:** Também denominados de servo acelerômetros. São baseados na lei de Ampère e são geralmente empregados para medidas de baixas amplitudes (tipicamente $< 1 g$), e baixas frequências. Possuem alta exatidão e alto nível de saída, mas a um custo considerado elevado.
- **Piezoelétricos:** Os acelerômetros piezoelétricos são amplamente utilizados para medição de aceleração, choque e vibrações. Sua sensibilidade pode ser considerada baixa em relação a outros tipos, mas possuem a maior faixa dinâmica de operação tanto em amplitude quanto em frequência.
- **Resistivos:** Empregam extensômetros resistivos de diferentes tipos e arranjos de ponte de Wheatstone. Sua sensibilidade pode ser sensivelmente aumentada com extensômetros semicondutores com um elevado *gage factor*, sendo neste caso normalmente denominados de piezo-resistivos. São muito úteis na medição de vibrações a frequências muito baixas ($< 1 \text{ Hz}$).
- **Capacitivos:** São baseados no princípio da mudança de capacitância

proporcional a uma aceleração aplicada. Recomendados para medições de baixo nível em baixas frequências (engenharia civil).

□ **Sísmicos:** Podem ser construídos de diversas maneiras. Em alguns desses transdutores utiliza-se o modelo de uma massa suspensa e um sistema de transdução baseado em um potenciômetro. Operam em baixas faixas de frequências (< 100 Hz) e são indicados para vibrações com lentas variações no seu valor de aceleração.

De todos os tipo mencionados os que mais se destacam são os que empregam os extensômetros de resistência elétrica e os materiais piezoelétricos. O primeiro tipo fez uso de uma tecnologia dominada e bastante conhecida de extensometria em medições de natureza dinâmica. Já os acelerômetros piezoelétricos, que se tornaram o tipo mais difundido e utilizado em medidas de vibrações, evoluíram rapidamente por possuírem características de desempenho consideravelmente superiores às outras técnicas concorrentes.

Desde a década de 90 alguns autores e pesquisadores já apontavam que dispositivos baseados em métodos ópticos estavam se tornando mais populares a medida que seus custos diminuía, e ressaltando que certos problemas técnicos só poderiam ser superados através do uso da tecnologia óptica [19].

Nesta direção, nada mais encorajador do que utilizar o comportamento dos sensores a rede de Bragg como se fossem extensômetros ópticos para traduzir as deformações sofridas em aceleração, aliando todas as vantagens do emprego de uma técnica óptica.

1.3

As redes de Bragg

As redes de Bragg em fibras ópticas ou *Fiber Bragg Gratings* são componentes ópticos passivos obtidos a partir de de uma modulação local, longitudinal e periódica, do índice de refração do núcleo da fibra óptica. Devido à variação local do índice de refração, qualquer luz que se propague ao longo do núcleo da fibra sofre reflexão parcial em cada uma das camadas da rede (Figura 1.2). Como consequência da periodicidade da modulação de índice, ocorre uma interferência construtiva da luz refletida para os comprimentos de onda que satisfazem a condição de Bragg dada pela relação

$$\lambda_b = 2 n \Lambda, \quad (1-1)$$

onde λ_b é o comprimento de onda de pico da luz refletida, ou comprimento de onda de Bragg, n é o índice de refração efetivo do núcleo da fibra e Λ a distância espacial da rede. Isso resulta que parte do espectro da luz incidente não é transmitido através da rede de Bragg, mas refletido, por esta.

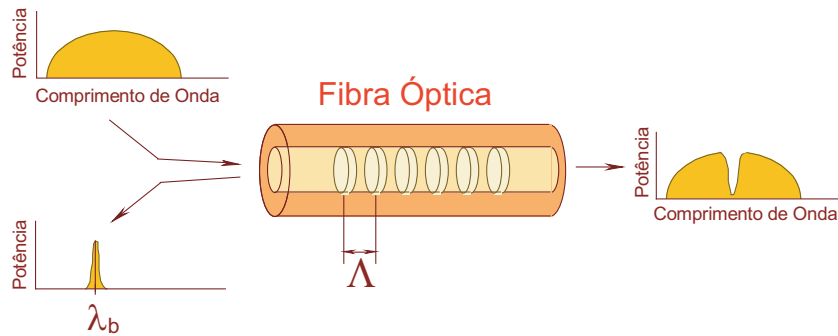


Figura 1.2: Princípio das redes de Bragg.

Como o comprimento de onda refletido pela rede de Bragg é função de n e Λ , tanto variações de temperatura, quanto deformações mecânicas aplicadas na rede, resultam em deslocamentos espectrais deste comprimento de onda. A partir deste efeito, podem ser realizadas medidas de deformação e temperatura, bem como de quaisquer outras grandezas que possam ser, de forma direta ou indireta, associadas com estas variáveis [32, 37, 38]. Deslocamentos espectrais no comprimento de onda refletido por uma rede de Bragg podem ser relacionados com deformações e variação de temperatura através da expressão

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 0,78\epsilon + 9.10^{-6}\Delta T. \quad (1-2)$$

A modulação no índice de refração da fibra óptica, que dá origem à rede de Bragg, é introduzida, ou *escrita* (foto-impressa), num pequeno pedaço da fibra, cujo comprimento pode variar da ordem de décimos de milímetros até alguns centímetros. Um dos principais métodos de foto-impressão baseia-se na incidência de luz ultravioleta, na região de 248 nm, sobre fibras dopadas com germânio. O núcleo destas fibras ópticas são sensíveis a irradiação ultravioleta que alteram seu índice de refração efetivo. Uma máscara de fase é empregada para produzir a modulação da luz ao

longo da região a ser sensibilizada. Numa mesma fibra óptica, várias redes de Bragg podem ser escritas com diferentes comprimentos de onda. Cada uma destas redes de Bragg está então pronta para ser empregada como um elemento sensor de temperatura e/ou deformação.

Sensores baseados em redes de Bragg têm se mostrado bastante versáteis no projeto e construção de transdutores para medir as mais diferentes grandezas físicas ou químicas, que de alguma forma possam ser relacionadas com suas característica de funcionamento. Tais transdutores são na maioria das vezes baseados na transferência da deformação de uma estrutura elástica para a rede de Bragg. A rede de Bragg é portanto o elemento sensor destes transdutores, cujo princípio de operação consiste então na medição do comprimento de onda de Bragg que se desloca espectralmente em função de variações na grandeza mensurada.

Excelente resoluções e baixas incertezas de medição podem ser obtidas dependendo do sistema empregado na leitura de comprimentos de onda. Empregando-se equipamentos comerciais que oferecem incertezas de ± 1 pm na medida de comprimentos de onda, a técnica de redes de Bragg pode resolver com precisão variações de $\frac{1}{4} \mu\text{m/m}$ de deformação e centésimos de graus Celsius.

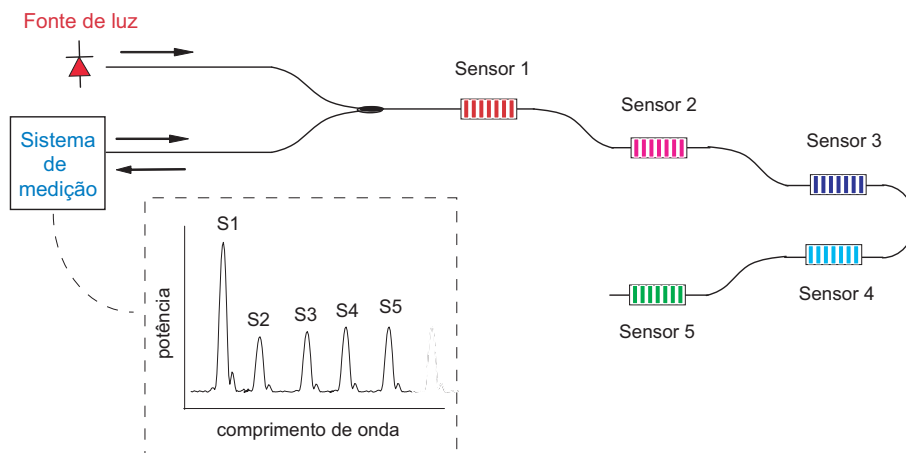


Figura 1.3: Capacidade de multiplexação dos sensores a redes de Bragg.

Uma das principais características dos sensores baseados em redes de Bragg é sua capacidade de multiplexação. Como indicado na Figura 1.3, diversos sensores, escritos em comprimentos de onda diferentes podem ser colocados ao longo de uma mesma fibra óptica, medindo de forma simultânea diferentes grandezas.

Para realizar as medições de variações no comprimento de onda de Bragg, existem diferentes técnicas, cada uma delas favorece uma determi-

nada classe de aplicações. Fatores como o número de sensores medidos, sua distribuição espacial, a largura do espectro medido, a faixa dinâmica de deformações e temperaturas, e o custo do sistema, devem ser considerados para a seleção da técnica mais apropriada.

As técnicas mais conhecidas são aquelas baseadas em filtros de banda ajustável, as baseadas em filtros fixos e as baseadas na multiplexação no tempo e no espectro.

A técnica baseada em filtros de banda ajustável é a mais simples e mais utilizada para leitura de sensores a rede de Bragg. Basicamente, consiste na medição direta através de um analisador de espectro óptico (OSA). É indicada para medições estáticas em decorrência das baixas taxas de varredura do espectro que podem ser tipicamente alcançáveis. O tempo de resposta desta classe de equipamentos em geral não ultrapassa a algumas unidades de Hz. Além disso, tendo em vista o alto custo destes equipamentos, sua utilização torna-se economicamente viável apenas em aplicações onde deseja-se interrogar um número elevado de sensores [6].

A técnica baseada na multiplexação no tempo e espectro é de fácil implementação, consistindo no emprego de um reflectômetro no domínio do tempo (OTDR). Pode medir até centenas de sensores, o que diminuiria o custo por sensor do sistema de medição, mas limita-se a medidas estáticas [12, 23].

A técnica baseada em filtros fixos é a mais indicada para medições de natureza dinâmica com poucos sensores. A faixa de frequência é geralmente limitada pela resposta de fotodetectores e da eletrônica usada na amplificação do sinal, mas pode alcançar algumas dezenas de kHz. Os filtros podem ser do tipo Fabry-Perot, interferômetro de Mach-Zehnder, ou uma rede de Bragg. Seu custo é considerado pequeno para leitura de apenas um sensor, mas cresce linearmente a medida que mais sensores são adicionados [17, 6, 24].

Pelas características do transdutor desenvolvido neste trabalho, a técnica de interrogação dos sensores a rede de Bragg adotada foi a que emprega filtros ópticos fixos. Foram utilizados filtros de banda passante sintonizável, do tipo Fabry-Perot, por sua praticidade. Entretanto, estes poderiam ser perfeitamente substituídos por redes de Bragg atuando como filtros ópticos de banda passante ou mesmo com componentes do tipo WDM, abreviatura para o inglês *wavelength division multiplexing* (multiplexação por divisão de comprimento de onda).

A Figura 1.4 mostra esquematicamente o sistema de interrogação empregado. Em detalhe é mostrada a interação do espectro de uma rede

de Bragg (em vermelho) com um filtro fixo (em azul). A quantidade de luz que chega ao fotodetector, encarregado de transformar o sinal luminoso em sinal elétrico, é representada pela área sombreada. Quando o espectro refletido pela rede de Bragg desloca-se devido a uma deformação ou variação de temperatura, a curva em vermelho se move em relação ao sinal em azul, há então uma modificação nessa área significando uma variação na potência da luz que chega aos fotodetectores, e conseqüentemente, uma variação no sinal elétrico de saída.

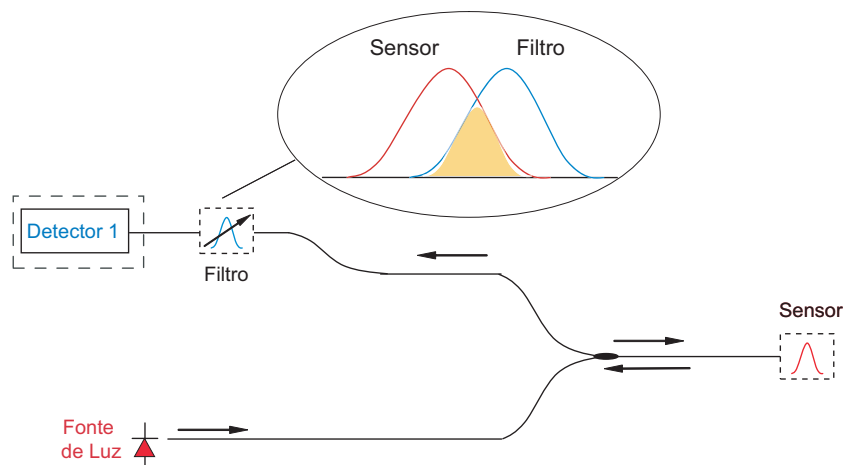


Figura 1.4: Sistema de interrogação das redes de Bragg.

Percebe-se então que a posição espectral do filtro é um fator determinante no sinal elétrico resultante. Como discutido mais a frente, no Capítulo 4 desta dissertação, a posição dos filtros pode ser ajustada de acordo com a necessidade de desempenho. A resposta de sistemas de leitura do tipo filtro fixo pode ser simulada utilizando-se perfis gaussianos para representar matematicamente os espectros das redes e filtros [23]. Resultados de simulações para o sistema de leitura empregado neste trabalho são também encontrados no capítulo 4.

1.4

O acelerômetro óptico

No caso do acelerômetro triaxial óptico proposto neste trabalho, as deformações dinâmicas as quais às redes de Bragg são submetidas, servem de base para a medida de aceleração de uma massa sísmica. Conceitualmente, os protótipos desenvolvidos neste trabalho são sistemas massa-mola onde fibras ópticas contendo a redes de Bragg atuam também como elementos elásticos que sustentam uma massa sísmica, Figura 1.5.

Como mostra a Equação 1-2, efeitos de temperatura devem ser desacoplados quando se deseja medir apenas deformações. Em geral, na medição de deformações com sensores a rede de Bragg, a temperatura pode ser facilmente compensada com o uso de uma segunda rede. Também aqui, nos protótipos de acelerômetro desenvolvidos, para compensação de temperatura, foi inicialmente idealizado um desenho que contém duas redes de Bragg, medindo simultaneamente deformações e a temperatura. Neste desenho, quando uma aceleração é imposta à massa sísmica, as redes de Bragg deformam-se em sentidos opostos. Considerando que as duas redes sensoras estão sempre na mesma temperatura, variações de temperatura induzem deslocamentos espectrais idênticos nos seus comprimentos de onda, possibilitando que os efeitos térmicos sejam eliminados (ou reduzidos).

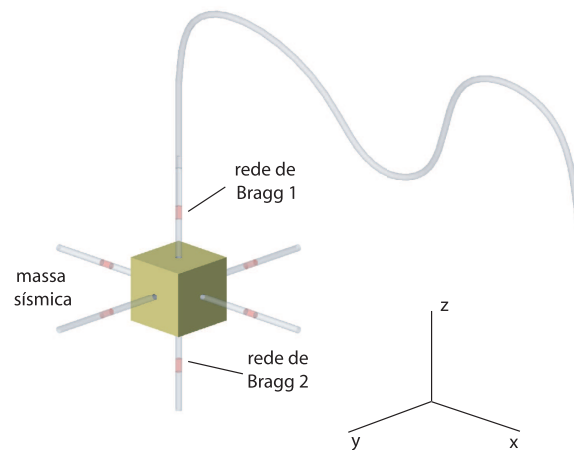


Figura 1.5: Disposição das redes em relação à massa.

A Figura 1.5 mostra a disposição das redes em relação a massa sísmica. Claramente, podem-se visualizar as duas possibilidades de movimento relativo entre estes. Na primeira possibilidade, do movimento da massa no eixo da fibra, podem-se eliminar os efeitos de temperatura através da subtração dos sinais gerados pelas duas redes de Bragg sensoras, uma vez que teoricamente as deformações mecânicas são idênticas apenas com sinais opostos e as deformações térmicas possuem sempre o mesmo sinal. E a segunda possibilidade, do movimento da massa perpendicularmente ao eixo da fibra, que induziria sinais de vibrações transversais, é também eliminado pela subtração dos sinais das redes.

Devido às características do acelerômetro e do sistema de leitura baseado em filtro fixo, os sinais provenientes dos fotodetetores fornecem simultaneamente duas informações. O sinal DC está diretamente ligado à área inicial da intersecção filtro-rede de Bragg, enquanto o sinal AC está

relacionado com a variação desta intersecção em torno de um valor inicial. O fato de possuir a característica DC no seu sinal, faz o transdutor óptico proposto ter um comportamento similar ao dos acelerômetros resistivos, capazes de medir baixas frequências a partir do 0 Hz (orientação segundo a gravidade da terra).

1.5

Organização do trabalho

No capítulo 2 são mostrados os diferentes tipos de acelerômetros projetados e construídos, suas características construtivas e operacionais, vantagens e desvantagens, e os melhoramentos obtidos até a se chegar no protótipo final.

No capítulo 3 são apresentadas as simulação numéricas dos protótipos, feitas empregando o método dos elementos finitos utilizando o código comercial ANSYS. Comparações entre os resultados obtidos entre todos os protótipos são apresentadas.

No capítulo 4 serão mostrados todos os detalhes envolvidos nas medições, tais como o sistema de medição e sua montagem experimental. De que diferentes maneiras podem ser processados os sinais e quais as vantagens e desvantagens de cada uma. São também mostradas simulações analíticas do comportamento e desempenho dos sensores.

Os resultados experimentais são apresentados no capítulo 5. São mostrados os resultados da caracterização dos protótipos em frequência, amortecimento, sensibilidade e linearidade. Aqui serão apresentados, em separado, as curvas obtidas para os diferentes protótipos e discutidas suas diferenças.

O capítulo 6 apresenta uma calibração para os sensores baseada nos resultados, experimentais, analíticos e numéricos. São mostrados os resultados dos testes de medição em tempo real e de longa duração. A técnica adotada e a rotina empregada na aquisição e tratamento dos dados são apresentadas e discutidas.

Finalmente, no capítulo 7, são apresentadas algumas discussões finais a respeito de todos os resultados obtidos, e as conclusões extraídas destes. Propostas e recomendações para construção e instalação destes equipamentos de medição em campo são apresentadas.