

# CAPÍTULO 1

## Introdução

### 1.1 Contextualização

A tecnologia de sensoriamento por fibras óticas é muito recente. Os primeiros exemplos de produtos comerciais datam do final do século XX. De uma maneira geral, tecnologias óticas de medição, tais como a interferometria, espectrometria, polarimetria, etc., para quantificar e avaliar fenômenos físicos, químicos e outros que possam vir a caracterizar um resultado de medição, estão cada vez mais presentes no dia a dia da indústria. Conseqüentemente, surge a necessidade de avaliação destas tecnologias. Além disso, novas possibilidades de sensoriamento estão sendo estudadas, a fim de serem aplicadas para determinar e caracterizar melhor uma determinada grandeza específica.

Com a invenção do laser na década de 60, novas possibilidades surgiram, inicialmente voltadas para utilização em sistemas óticos relacionados à comunicação de dados para a área de telecomunicação.

As particularidades e características do laser motivaram vários pesquisadores a ampliarem seus campos de investigação, não restringindo a aplicação às suas áreas de formação inicial. Uma das vantagens do laseres nas comunicações é a possibilidade de transmissão de dados com um maior volume de informações, comparado com os sistemas mais tradicionais, tais como: micro-ondas, elétricos, piezelétricos, etc. (EFENDIOGHI, 2009).

A partir dos conceitos teóricos bem sedimentados referentes à tecnologia de fabricação e utilização dos laseres, bem como o constante aprimoramento dos processos de fabricação de fibras óticas para telecomunicação, ampliou-se a perspectiva de se utilizar esta promissora tecnologia em outras áreas do conhecimento. Foi possível estender sua utilização para um novo nicho tecnológico de sensoriamento ótico com sistemas de medição a laser, com uma demanda comercial crescente, inclusive superando a proposta inicial de pesquisa acadêmica em laboratórios na comunidade científica internacional (CANNING, 2008).

Esta mudança de rumo se deu graças ao aperfeiçoamento da homogeneidade e qualidade de fabricação das fibras óticas, com redução das perdas e atenuações dos sinais óticos transmitidos. Convém ressaltar que a sílica (principal material empregado na fabricação de fibras óticas) é um material com grande eficiência de transmissão nos sistemas de transporte ótico, atuando como meio de transmissão de dados. Além disso, possui propriedades que a permitem atuar como elemento de percepção (sensor) de perturbações externas com excelente sensibilidade. Com isso, estabeleceu-se as bases conceituais necessárias para se produzir um sistema de transdução de um dado sinal ótico, referente a uma determinada grandeza em medição (mensurando) (VIM-2008, 2009), com a variação de uma das propriedades da luz guiada, tais como: fase, intensidade, espectro (comprimento de onda), polarização, etc.. A partir deste momento, consolidou-se uma nova situação em que se tornou possível empregar elementos óticos para mensurar as diversas grandezas, dando início à era do sensoriamento ótico em processos científicos e industriais (CANNING *et al*, 2010).

A tecnologia de sensoriamento por fibras óticas possui aplicações bem distintas e específicas. As diversas vantagens do sensoriamento ótico em relação às tecnologias tradicionais de sensoriamento são bem conhecidas e amplamente exploradas nas literaturas disponíveis, com vantagens consideráveis como as listadas a seguir:

- capacidade de sensoriamento remoto;
- capacidade de multi-sensoriamento (medição de temperatura, pressão, pH, deformação, etc.);
- alta possibilidade de multiplexação;
- alta sensibilidade;
- imunidade a interferência eletromagnética;
- grande possibilidade de adaptabilidade aos locais de medição.

As vantagens mencionadas anteriormente podem ser estendidas a aplicações em ambientes de medição com condições severas de operação, sem a deterioração das suas características originais, destacando-se como um ponto bastante positivo.

A tecnologia de fabricação de redes de Bragg para altas temperaturas é bem recente. Ainda não se pode afirmar que este tipo de rede de Bragg esteja totalmente dominado e consolidado como elemento de transdução e avançar para a realização de um projeto de fabricação de sensores de alta temperatura em larga escala. Muito vem-se estudando a respeito do tema, entretanto, até o momento, não se tem a certeza que a passagem da visão acadêmica para a fase de fabricação industrial poderá se dar de forma consistente e confiável.

## 1.2 Motivação

As medições de temperatura são essenciais para muitas aplicações científicas e industriais. Isto se deve ao fato de que após a Segunda Guerra Mundial houve uma rápida recuperação da economia mundial que ocasionou um maior desenvolvimento econômico e conseqüentemente ampliou as necessidades básicas da sociedade. Esta nova sociedade passou a demandar uma maior disponibilização de energia e utilização de novos materiais que operavam em temperaturas muito elevadas.

Desde a criação do primeiro motor a vapor por James Watt em 1769 até os dias atuais foi possível observar a elevação das necessidades energéticas de pressões e temperaturas demandadas nos processos industriais, conforme a Figura 1 abaixo (SHANTUNG, 2007).

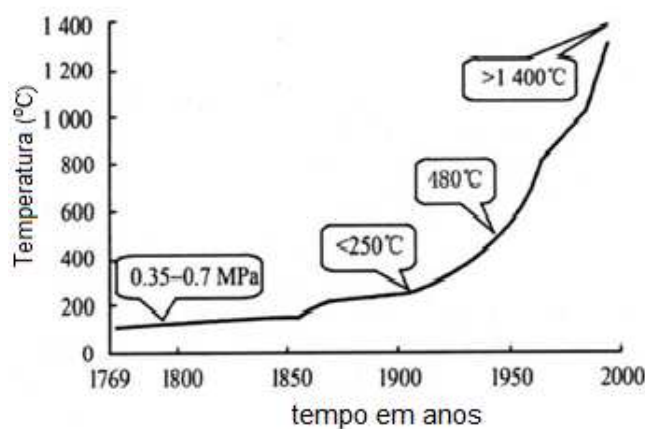


Figura 1: Histórico da evolução das temperaturas de operação na indústria, adaptado de (SHANTUNG, 2007).

Pelas necessidades inerentes do progresso tecnológico, a grandeza temperatura teve um grande destaque em larga escala por todo o mundo através do dimensionamento e adequação de características técnicas de projeto nos mais diversos segmentos industriais que utilizem-na.

Normalmente, utilizam-se medições de temperatura empregando tecnologias tradicionais, tais como termometria em vidro, termômetro de resistência, termopar, etc.. Entretanto, para certas aplicações tecnológicas na indústria estas tecnologias tradicionais apresentam certas desvantagens e limitações, fato que pode ser minimizado quando aplica-se o sensoriamento ótico (BRAMBILLA, 2002).

Tecnologias tradicionais de medição de temperatura, quando submetidas a ambientes agressivos e severos, podem apresentar limitações em sua instrumentação, ocasionando perdas na transmissão e processamento dos dados principalmente com respeito ao desempenho e reprodutibilidade dos sensores envolvidos nestas situações específicas. Sistemas eletrônicos e equipamentos convencionais de medição podem vir a apresentar uma potencial redução da confiabilidade metrológica em ambientes de elevada temperatura, podendo surgir incoerências nos resultados de medição (FUSIEK *et al*, 2009).

No caso da realização de medições onde exatidão, resolução, ou faixa dinâmica de medição são as principais características a serem consideradas, o uso de sensores a fibra ótica tem significada relevância, visto que a codificação do comportamento de um determinado mensurando a partir de propriedades óticas pode vir a melhorar os resultados de medição. Estes tipos de sensores possuem uma capacidade de multiplexação elevada, possibilitando os mais diferentes tipos de arranjos. Permitem também o desenvolvimento de sistemas de medição e monitoramento de diferentes grandezas simultaneamente com a utilização de apenas uma simples fonte de luz, um detector ótico e um sistema de processamento de sinais.

Recentemente, com a redução dos custos de fabricação dos elementos necessários para o estabelecimento de um sistema ótico de telecomunicações, foi que os sensores de fibras óticas vêm ampliando a sua fatia no mercado da instrumentação voltados para medições convencionais ou não-convencionais.

A operação e instrumentação voltadas para estes tipos de sensores estão dominadas, compreendidas e consolidadas, como por exemplo no caso de medições de temperatura, deformação, pressão, propriedades químicas, etc., citadas nos mais diversos artigos. Particularmente, no caso da grandeza temperatura, é possível medi-la com diferentes configurações de sensores, tais como, distribuída, quase-distribuída, como sensoriamento por ponto (LUO, CORDERO, MORSE, 2001; WNUK, MENDEZ, FERGUSON, 2005).

Com as crescentes necessidades de se realizar medições de temperatura por fibras óticas, foi possível estender esta tecnologia de sensoriamento para uma área cada vez mais demandante, que são as medições em altas temperaturas. Como exemplos destas novas necessidades, é possível citar as elevadas temperaturas de 1150 °C em fornos de plantas petroquímicas; vapor superaquecido da ordem de 650 °C em plantas de geração de energia; temperatura na saída de reatores nucleares de aproximadamente 1000 °C. A medição de altas temperaturas, como as citadas anteriormente, é um grande desafio a ser superado no mundo atual e as potencialidades de aplicação e exatidão da tecnologia de sensoriamento por fibras óticas pode vir a auxiliar consideravelmente estas novas demandas tecnológicas.

Indo ao encontro destas novas necessidades da civilização desenvolvida foi que a tecnologia de redes de Bragg em fibras óticas vem ganhando destaque nos últimos anos. Redes de Bragg são elementos intrínsecos e compactos que têm como característica marcante ser um elemento que é inscrito na fibra ótica, com largo espectro de medição e custo de produção decrescente nos últimos anos (ZHANG, 2005).

Com a evolução da pesquisa nesta área do conhecimento foi possível estabelecer as bases do desenvolvimento da gravação de redes de Bragg em fibras óticas, com a finalidade das mesmas atuarem como elementos sensores. Deste modo, surgiu um novo conceito de transdutores óticos com ampla faixa de aplicação.

A principal motivação para esta tese foi o fato de que a tecnologia de sensoriamento por redes de Bragg se adapta de modo adequado aos novos desafios e às demandas no segmento de medições em altas temperaturas, com ênfase especial para as áreas de petróleo e gás, siderurgia de alto fornos, monitoramento das condições estruturais em edificações em caso de incêndios,

monitoramento de turbinas e motores, reatores de usinas nucleares e demais setores que demandam tal tecnologia de monitoramento e prevenção.

### **1.3 Escopo da Pesquisa Proposta**

O objetivo da pesquisa desenvolvida para a redação desta tese é caracterizar, calibrar, avaliar e validar diferentes tipos de redes de Bragg para altas temperaturas, representando de forma detalhada as principais características metrológicas destas redes em questão.

A estratégia de abordagem da tese tem o intuito de fazer com que a comunidade científica, que vem estudando as redes de Bragg para altas temperaturas nos últimos anos amplie o seu campo de investigação considerando, novos horizontes do ponto de vista metrológico. O motivo é que os resultados produzidos em suas pesquisas não negligenciem as questões de cunho metrológico, tais como rastreabilidade, confiabilidade metrológica, incerteza de medição, erros sistemáticos, dentre outras características que possam vir a impactar as hipóteses formuladas e desenvolvidas em seus experimentos referentes aos distintos fenômenos físicos de suas investigações científicas.

Outra contribuição importante da pesquisa é a padronização e harmonização das metodologias de avaliação do comportamento das redes de Bragg de alta temperatura, através do estabelecimento de um procedimento de calibração, onde será possível determinar as melhores faixas de medição de temperatura para os diferentes tipos de redes de Bragg de alta temperatura. Além disso, será possível estabelecer as bases conceituais para se estimar as incertezas de medição nesta área do conhecimento, pois até o momento foi um tema pouco explorado pelos especialistas da área além de outras avaliações metrológicas adicionais, situação observada e confirmada por ocasião da pesquisa bibliográfica sobre o assunto.

## 1.4 Estrutura da Tese

Esta tese foi dividida em 7 capítulos que se encontram organizados da seguinte forma:

### Capítulo 1 – Introdução

Neste capítulo apresenta-se um breve histórico dos alicerces iniciais que motivaram o surgimento do sensoriamento por fibras óticas, que teve impulso com a descoberta do laser voltado para aplicações em telecomunicações. Posteriormente, foram discutidas as limitações de se medir determinadas grandezas em condições adversas, utilizando tecnologias tradicionais. Desta forma, foi possível estabelecer e consolidar uma nova modalidade de medição através da tecnologia de sensoriamento ótico. A característica principal desta fase da nova tecnologia foi o avanço da pesquisa básica, com posterior transformação da investigação científica em pesquisa aplicada. Questões ligadas à inovação tecnológica através de medições com redes de Bragg para alta temperatura serão o foco principal deste trabalho buscando consolidar todos os estudos referentes ao assunto fundamentadas numa base metrológica.

### Capítulo 2 – Princípios Fundamentais das Medições de Temperatura

Neste capítulo foram abordados os principais princípios físicos relacionados com as medições em temperatura, mostrando-se qual foi o papel da metrologia como ferramenta de avaliação de desempenho das medições experimentais realizadas na pesquisa. Aborda-se também a definição da grandeza temperatura do ponto de vista metrológico e como ela é disseminada às medições nas fibras óticas de alta temperatura. Discute-se ainda, as diferentes tecnologias e instrumentos de medição de temperatura, do ponto de vista de medições realizadas a partir de princípios óticos e não-óticos e suas principais características tecnológicas.

### **Capítulo 3 – Estado da Arte em Redes de Bragg**

Neste capítulo foram consideradas as premissas iniciais para o estabelecimento do Estado da Arte em relação à utilização de fibras óticas como elemento de sensoriamento. Foram abordados de forma cronológica os aspectos relacionados à descoberta da fotossensibilidade e aos mecanismos necessários para a sua obtenção. Discutiu-se também os mais tradicionais métodos de fabricação de redes de Bragg e seus desdobramento com relação ao tipo de rede de Bragg que poderia ser obtida a partir deles. Detalhou-se uma relação dos diferentes tipos de redes de Bragg em função de diferentes métodos de fabricação, sendo que o enfoque principal foram as redes de Bragg para altas temperaturas.

### **Capítulo 4 – Montagem Experimental**

Neste capítulo foi retratada a maneira como a investigação científica foi planejada e conduzida, através de um projeto de experimento otimizado. Também foram discutidas e estabelecidas as condições necessárias para que as medições das redes de Bragg de alta temperatura pudessem ser realizadas com confiabilidade metrológica. Estudaram-se os aspectos mais relevantes do princípio de medição escolhido nas diversas medições realizadas, procurando escolher um padrão de referência que tivesse um nível de exatidão compatível com as necessidades da área de sensoriamento, com custos não muito elevado e eficiente.

### **Capítulo 5 – Resultados de Medição**

Neste capítulo foram apresentados todos os resultados de medições com seus respectivos gráficos para as redes do tipo I, tipo II e tipo regenerada do Brasil e exterior. Estes resultados foram levantados num período de 8 meses ininterruptos de medição com as redes de Bragg numa faixa de temperatura de 20 °C até 900 °C.

A metodologia de avaliação adotada para fazer as medições dos espectros das redes de Bragg contemplaram a realização de medições em modo de reflexão e transmissão.



As caracterizações espectrais tiveram o objetivo de avaliar os limites de funcionamento das diferentes redes, da mesma forma que procurou levantar a repetitividade e reprodutibilidade das redes disponíveis.

## **Capítulo 6 – Incerteza de Medição**

Neste capítulo foi estudada a melhor modelagem matemática para estimar a incerteza de medição das caracterizações metrológicas das redes de Bragg, utilizando inicialmente como bibliografia de referência o Guia de Incerteza de Medição - ISO GUM 2008. Posteriormente, para validar os cálculos de incertezas de medição baseados no GUM, foi empregada a Simulação de Monte Carlo, que apresentou resultados bem satisfatórios e convergentes com os obtidos com o primeiro método de cálculo de incerteza baseado no ISO GUM (GUM, 2008; JCGM 101, 2009).

## **Capítulo 7 – Conclusões e Discussões**

Neste capítulo foram apresentadas todas as considerações pertinentes acerca dos resultados promissores obtidos nas caracterizações metrológicas dos diferentes tipos de redes de Bragg. Com os resultados alcançados, será possível dar sequência às pesquisas formulando novas hipóteses de sistemas de calibração de temperatura com diferentes princípios e faixas de medição, ampliando o foco da investigação científica para outros tipos de redes e fibras óticas. Isto é devido ao fato que a metodologia de avaliação metrológica para medição de temperatura para estes tipos de elementos óticos foi estabelecida e consolidada através desta tese.