

CAPÍTULO 4

Montagem Experimental

4.1 Considerações Iniciais

A investigação científica constante desta tese foi concebida de modo a coexistirem dois sistemas de medição operando concomitantemente, porém, com características distintas.

Um dos sistemas de medição tem a finalidade de prover a rastreabilidade e confiabilidade metrológica necessárias às medições de temperatura, através de padrões de referência calibrados. O padrão de referência escolhido para esta pesquisa foi um termopar ouro-platina Au/Pt rastreado ao BIPM, através do Laboratório de Termometria - LATER do INMETRO. Toda a parte experimental foi desenvolvida nas dependências do LATER, utilizando sua infra-estrutura laboratorial, assim como um dos seus padrões de referência.

O outro sistema de medição está relacionado com a interrogação ótica a fim de determinar os deslocamentos dos comprimentos de onda na faixa do espectro do infravermelho (IV) para redes de Bragg de alta temperatura. O princípio de medição do mensurando (temperatura) busca associar os deslocamentos e o espectro de um específico comprimento de onda correlacionando-os com as variações deste mensurando.

Todos os dois sistemas foram estabelecidos para operarem integrados, de forma a gerar em curvas de calibração compatíveis com a teoria e também com a confiabilidade metrológica requerida, buscando realizar as medições com a mais alta exatidão a partir da infra-estrutura utilizada nesta tese.

4.2 Planejamento do Experimento

O planejamento do experimento se deu de modo a mapear e encontrar a melhor solução futura pretendida, verificando a viabilidade de se construir um sensor de alta temperatura empregando redes de Bragg. O que motivou inicialmente o pesquisador foi a possibilidade de caracterizar metrologicamente

diferentes tipos de redes de Bragg, verificando seus comportamentos e desempenhos quando analisados do ponto de vista metrológico.

O planejamento do experimento, de acordo com Montgomery e Runger, é uma ferramenta importante para os engenheiros e pesquisadores que estejam empenhados em melhorar e ampliar o foco de suas investigações científicas (MONTGOMERY, 2003).

Dentro de um projeto de experimento algumas variáveis podem ser controladas e outras não. Logo, uma das maiores preocupações do pesquisador é dimensionar esses fatores, estimando, quando possível a magnitude e direção dos seus efeitos no experimento como um todo. Desta forma, através de um experimento de caracterização como o desta tese, busca-se qualificar e quantificar os fatores que venham a afetar a resposta das redes de Bragg para altas temperaturas.

Esta pesquisa foi idealizada de forma a mesclar várias características distintas do planejamento de experimento. Num primeiro momento, o foco estava voltado para a caracterização metrológica dos elementos principais da tese (redes de Bragg). Desta forma, todas as variáveis envolvidas foram levadas em conta nas conclusões finais, mesmo que algumas fossem menos relevantes.

O melhor equacionamento com relação às expectativas da pesquisa foi obtido através de uma combinação da experiência vivenciada e transmitida pelos orientadores, com as informações acerca do problema-alvo, que foram estudadas e aprofundadas pelo postulante ao título de doutor.

Numa etapa mais à frente, de continuidade natural da investigação, o foco esteve voltado para o aprimoramento das características intrínsecas das fibras óticas e das redes com relação às propriedades químicas, físicas e mecânicas, de tal forma que no futuro se possa fabricar um sensor de alta temperatura competitivo. Características metrológicas importantes como sensibilidade, resolução, faixa de medição, devem ter um destaque especial, porém, não podem ser negligenciados outros aspectos, tais como qualidade, robustez, preço. Superada a etapa inicial de concepção do projeto como um todo, foram criadas as bases iniciais para a concretização do produto final (sensor de temperatura).

Fica evidente que apenas através da investigação científica como a desta tese será possível superar determinadas pendências tecnológicas, que muitas vezes inviabilizam a materialização de uma idéia inovadora no segmento da medição com redes de Bragg.

Consolidado todo o conhecimento adquirido com a pesquisa em questão, não faltarão protótipos experimentais que serão ensaiados e calibrados inúmeras vezes, para se alcançar um produto final que possa ser produzido em larga escala, procurando atender todas as necessidades específicas do segmento de sensoriamento ótico.

4.3 Estabelecimento do Sistema de Referência em Temperatura e Princípio de Medição

Dentre algumas possibilidades de tecnologias de medição de temperatura disponíveis na Divisão de Metrologia Térmica - DITER, foi escolhida a tecnologia de termometria termoelétrica, visto que era a melhor opção se forem considerados o nível de exatidão assegurado, os reduzidos custos operacionais e a menor complexidade em comparação aos termômetros-padrão de resistência de platina para alta temperatura - TPRPATs.

O padrão escolhido para servir de referência nas medições de temperatura foi um termopar ouro-platina Au/Pt, mesmo não sendo selecionado internacionalmente como o termômetro padrão da norma EIT - 90. Entretanto, diversos pesquisadores na área de temperatura comprovaram que o termopar Au/Pt apresenta excelente estabilidade na faixa de 0 °C a 1000 °C. Desta forma, este tipo de termopar se tornou uma excelente alternativa de padrão de referência em função do seu menor custo operacional, embora para algumas aplicações de elevada exatidão os TPRPATs possuam uma melhor reprodutibilidade (EIT-90, 1990; PETKOVIC *et al*, 2003).

4.4 Configuração do Sistema de Medição de Temperatura

A configuração do sistema de medição de temperatura nesta tese levou em consideração a faixa de temperatura pretendida, que foi de 20 °C até 1000 °C. Também foi considerado o padrão de referência com a menor incerteza de medição viável de acordo com a disponibilidade, complexidade e custos operacionais. A partir destas premissas iniciais, conforme mencionado anteriormente, foi selecionado como padrão de referência às medições de temperatura um termopar ouro-platina Au/Pt. De acordo com McLaren e Murdock, estes tipos de termopares podem alcançar incertezas de medição da ordem de $\pm 0,01$ °C (MACLAREN, 1989). Este termopar Au/Pt, pela sua grande estabilidade e homogeneidade térmica, foi consagrado internacionalmente como um padrão alternativo aos termômetros de resistência de platina.

Além de adotar a termometria termoeétrica como tecnologia de medição de temperatura para caracterizar as redes de Bragg, foi selecionado como meio térmico um forno elétrico horizontal que operou na faixa de medição até 1100 °C, sendo compatível com as incertezas requeridas nas calibrações.

4.4.1 Seleção do Padrão de Referência

O termopar Au/Pt utilizado como padrão de referência nas medições de temperatura foi fabricado no Inmetro com número de série INM-2003-01, de acordo com a Figura 36. O que também pesou para a escolha deste termopar foi a sua simplicidade de construção, facilidade de operação e ampla faixa de medição. Este tipo de termopar é construído com fios de dois termo-elementos de metais puros, que são o ouro e a platina com pureza superior a 99,999% (HART SCIENTIFIC, 1997). Estes são metais nobres com maior estabilidade em atmosferas inertes até 1000 °C, sendo possível a partir deles fabricar um medidor de temperatura (termopar) de elevada exatidão, até a faixa de 1000 °C. Esta exatidão não fica muito distante da obtida com um termômetro de resistência em platina para alta temperatura - TRPAT, adotado como o termômetro de referência pela norma EIT-90 até o ponto da prata (EIT-90, 1990; PETKOVIC *et al*, 2003).

Para efeito de comparação, a obtenção de elevadíssimas exatidões através de um TRPAT necessita empregar equipamentos auxiliares sofisticados e pessoal altamente qualificado, o que onera bastante este tipo de medição. Entretanto, no caso de um termopar Au/Pt, é necessário apenas um instrumento de indicação (voltímetro), uma vez que um termopar é apenas um transdutor que transforma a energia térmica em energia elétrica. As exigências para utilização deste tipo de instrumento são menores que as do TRPAT, necessitando apenas que o voltímetro tenha 6 ½ dígitos de estabilidade e pessoal com conhecimento em eletrônica. Outra vantagem é que este tipo de instrumento é menos suscetível às variações ou avarias causadas por choques mecânicos ou contaminação por íons metálicos, além de não necessitar de pré-aquecimento para altas temperaturas (HART SCIENTIFIC, 1997; MONTEIRO, 2002).



Figura 36: Fotografia de detalhes do termopar Au/Pt construído no Inmetro, onde se observa as junções quente e fria e os fios de ligação ao multímetro.

O termopar Au/Pt usado como padrão de referência para as medições foi calibrado pelo Laboratório de Termometria - LATER do INMETRO com o certificado de calibração DIMCI 0478/2010 emitido em 19/03/2010 de acordo

com o apêndice A. Foi utilizado o Método dos Pontos Fixos de definição da EIT-90, dentro da faixa de operação do termopar que é de 0 °C a 1000 °C para realizar a calibração do termopar de referência. Estes pontos correspondem às temperaturas nas quais as fases sólida e líquida dos metais estanho (231,928 °C), zinco (419,527 °C), alumínio (660,323 °C) e prata (961,78 °C) permanecem em equilíbrio a uma pressão de 101325 Pa.

4.4.2 Descrição dos Equipamentos e Acessórios

Um sistema de calibração de temperatura como pode ser visto na Figura 37 é composto por vários dispositivos sendo que utiliza como base um termopar Au/Pt como padrão de referência. Além do termopar outros instrumentos são necessários para realizar as medições de temperatura e que serão apresentados a seguir.

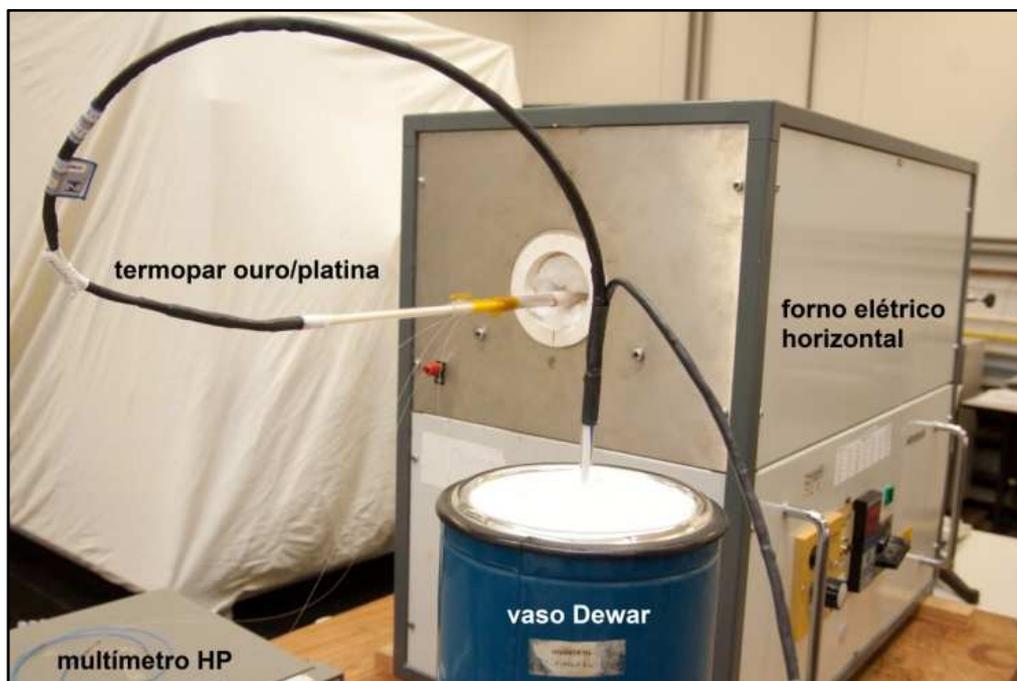


Figura 37: Fotografia do aparato experimental de medição de temperatura das redes de Bragg do tipo I, Tipo II e Tipo regenerada do Brasil e exterior.

4.4.2.1 Meio Térmico de Medição

O foco desta pesquisa visou realizar medições de temperatura inicialmente até 1000 °C. O meio térmico mais adequado e disponível nas instalações do INMETRO para a realização das calibrações foi um forno elétrico horizontal de zona única da marca Heraeus que opera na faixa até 1100 °C. Este forno foi escolhido em função de sua disposição horizontal, o que facilitou a realização das calibrações. Entretanto, o que mais pesou na escolha deste equipamento foi o fato dele possuir duas extremidades de acesso, permitindo com isso caracterizar as redes de Bragg em modo de transmissão e minimizar a convecção que teria ocorrido se o forno operasse na posição vertical de acordo com a Figura 38.

Para a seleção dos pontos de calibração o forno utilizou um controlador da marca Novus, modelo N 2000 que ajusta as temperaturas desejadas através de pulsos elétricos por meio de um sistema PID - “*proportional integrator derivative*”. Neste tipo de forno se deve ter cuidado ao escolher os ajustes do controlador, procurando selecionar adequadamente as taxas de aquecimento e níveis de estabilização, com o intuito de não ultrapassar o ponto de calibração desejado “*over shoot*”.

O forno teve sua homogeneidade determinada previamente para os gradientes axiais e radiais. Entretanto, em função do termopar de referência e das redes de Bragg posicionadas paralelamente aos orifícios do bloco de equalização na mesma imersão, foi considerado apenas o gradiente radial para representar a estabilidade do forno que foi medido previamente, tomando como referência a maior variação de temperatura do forno que foi de 0,6 °C, na faixa de 300 °C até 1000 °C.

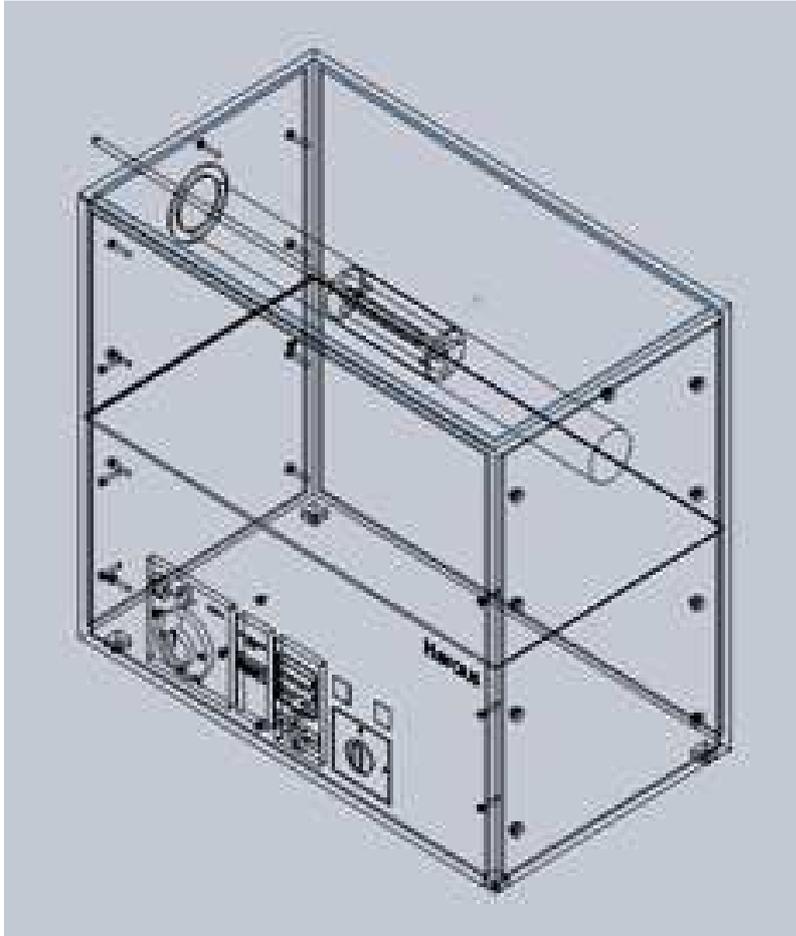


Figura 38: Desenho esquemático do forno Heraus onde as calibrações das diferentes redes de Bragg foram realizadas.

4.4.2.2 Bloco de Equalização

Quando se utilizam fornos na ordem de grandeza de temperatura utilizada nesta tese, é necessário e prudente fazer uso de um bloco de equalização (SANTOS, 2008; ORLANDO, 2003). A finalidade do bloco de equalização é produzir uma inércia térmica e homogeneizar a temperatura na região onde ocorrerá a medição propriamente dita. Geralmente um bloco de equalização tem o formato de um cilindro, e é construído em metal que pode ser alumínio ou cobre para uma faixa até 300 °C ou de aço para temperaturas até 1100 °C, como no caso das medições realizadas. Um bloco de equalização pode possuir um ou mais orifícios (poços) para a inserção do padrão de referência e dos instrumentos a serem calibrados. Para a calibração das redes de Bragg em elevada temperatura, foi usinado um bloco de equalização com diâmetro de aproximadamente 60 mm e

comprimento de 160 mm. Além disso, foram realizados no bloco um furo central não passante de 14 mm de diâmetro por 120 mm de profundidade, onde foi inserido o termopar de referência Au/Pt e dois furos passantes equidistantes do furo central, local em que as fibras óticas com as redes de Bragg foram inseridas de acordo com a Figura 39. O bloco de equalização foi projetado de tal forma que foi possível realizar medições com as redes de Bragg, tanto no modo de transmissão, onde se utiliza as duas extremidades do forno, quanto no modo de reflexão, quando é necessária apenas uma das extremidades do forno.

O aço utilizado na fabricação do bloco de equalização foi um SAE 4340, cuja composição química nominal está indicada na tabela 3.

Tabela 3: Composição química do aço SAE 4340 do bloco de equalização, adaptado de (NETO, 2005), tendo o elemento químico ferro Fe como elemento de balanço.

C (carbono)	Mn (manganês)	Si (silício)	Ni (níquel)	Cr (cromo)	Mo (molibdênio)
0,4 %	0,7 %	0,3 %	1,8 %	0,8 %	0,25 %



Figura 39: Fotografia do bloco de equalização e tubo cerâmico de proteção das fibras óticas.

4.4.2.3 Instrumento de Leitura da Tensão no Termopar

Relembrando a idéia de que um termopar nada mais é do que um transdutor, que transforma energia térmica em energia elétrica, o mesmo necessita de um dispositivo de indicação para realizar a medição da força eletromotriz térmica - fem.

No passado, para determinar as fems eram usados potenciômetros. Entretanto, com a evolução da eletrônica foi possível aprimorar as medições através de voltímetros digitais e de chaves comutadoras (“*scanners*”), que permitem realizar praticamente de modo simultâneo várias medições com diferentes termopares em intervalos de tempo reduzidos. A utilização de voltímetros digitais, como foi o caso nesta pesquisa, permitiu minimizar erros de leitura relacionados com tensões residuais, também denominadas de tensões de “*offset*”. Outra característica relevante que foi decisiva para a escolha do voltímetro digital é a sua capacidade de interfaceamento, permitindo que as medições das fems fossem automatizadas através de uma interface GPIB conectada ao multímetro HP e a um microcomputador.

O instrumento escolhido para realizar as medições das tensões fems referentes ao termopar Au/Pt foi um multímetro digital de 7 ½ dígitos da marca Hewlett Packard modelo 3457 A, apresentado na Figura 40 e que possui o certificado de calibração DIMCI 0907/2010, emitido em 20/05/2010 de acordo com o apêndice B.



Figura 40: Fotografia do multímetro HP modelo 3457 A.

4.4.2.4 Vaso Dewar

Um vaso Dewar (também conhecido como frasco de Dewar, ou ainda garrafa de Dewar) é um recipiente projetado para fornecer um grande isolamento térmico. O vaso Dewar geralmente é feito de vidro ou metal e utiliza o princípio da dupla camada, ou seja, seria igual a uma garrafa menor dentro de outra maior, e estas duas seladas no mesmo gargalo. No espaço estreito entre elas existe algo próximo do vácuo, já que o ar é praticamente todo retirado, pois o vácuo impede a condução e a convecção do calor, conforme pode ser visto na Figura 41.

A superfície interna do frasco externo e a superfície externa do frasco interno têm um revestimento reflexivo, geralmente metálico ou similar, para impedir que o calor seja transmitido através de radiação. James Dewar usou originalmente a prata para esta finalidade. Isto é eficaz, já que a pouca transferência de calor ocorre quase que inteiramente através do gargalo e do fundo do frasco, sendo este geralmente revestido de cortiça, que é um material isolante.

A calibração de um termopar necessita que uma das suas junções seja escolhida como junção de referência. Verificou-se que uma boa alternativa seria utilizar a temperatura do gelo fundente como opção para esta condição de referência, visto que é uma condição térmica fácil de realizar. Por uma questão lógica adotou-se que o ponto do circuito elétrico aberto para a medição da fem seria exatamente a junção de referência. Esta junção seria imersa em um vaso Dewar preenchido com uma mistura de gelo moído de água destilada e água destilada a fim de obter a temperatura de fusão do gelo, também conhecida como ponto do gelo. Este é um ponto fixo de temperatura de fácil realização e elevada exatidão em medições para termometria termoeletrica. O vaso Dewar serve para manter a conservação da mistura (meio isotérmico), atuando como um bom isolante térmico e dificultando a troca térmica desta mistura com o meio exterior (SANTOS, 2008).

Nas duas extremidades livres da junção de referência imersas no vaso Dewar são conectados dois fios de cobre, por sua vez, são ligados ao voltímetro. Pela Lei dos Metais Intermediários, mencionada anteriormente, estes fios de cobre não irão influenciar os valores da fem no circuito termoeletrico. E, pela Lei das

Temperaturas Sucessivas ou Intermediárias, a fem gerada será função apenas da diferença de temperatura entre o ponto de medição (junção quente) e junção de referência (junção fria), não importando qual seja a temperatura do ambiente.



Figura 41: Fotografia do vaso Dewar preparado com gelo para a inserção do termopar Au/Pt de referência.

4.4.3 Montagem e Disposição do Sistema de Calibração

A montagem e disposição do sistema de medição de temperatura foi projetado de forma a operar concomitantemente com o sistema de interrogação ótico para realizar as medições dos comprimentos de onda dos diferentes tipos de redes, como pode ser observado na Figura 42.

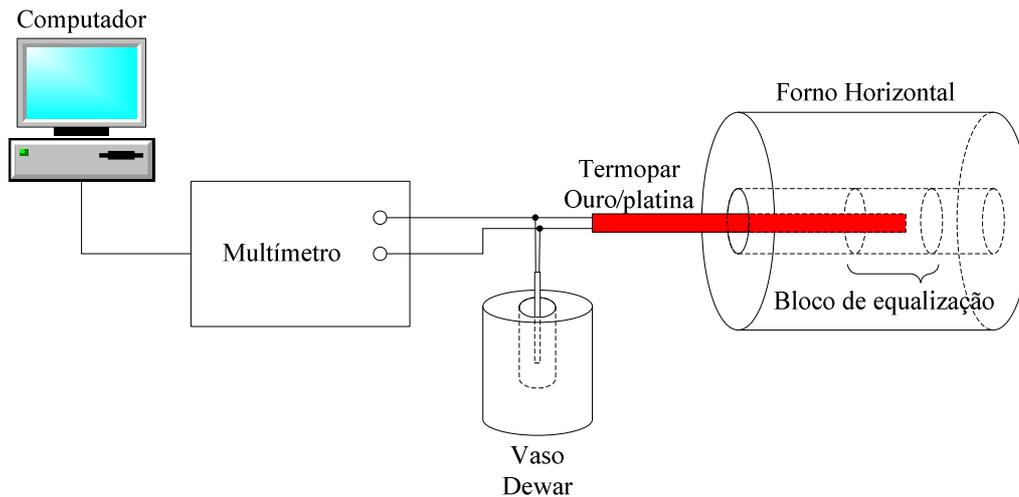


Figura 42: Esquema de disposição do sistema de medição de temperatura, composto por termopar Au/Pt, bloco de equalização, vaso Dewar, multímetro e computador.

Uma das atividades da montagem experimental que teve maior atenção foi o posicionamento das fibras óticas no forno. Como o foco da pesquisa foi avaliar o comportamento das redes de Bragg em altas temperaturas, e sabe-se que as redes de Bragg estão sujeitas a deformações, foi implementado um "encapsulamento flutuante", que consistiu em transpassar as fibras óticas com as redes de Bragg no interior de um tubo cerâmico de alumina com 99,7 % de pureza adquirido no mercado, a fim de proteger as fibras e que pode suportar temperaturas superiores a 1000 °C. As fibras eram apoiadas no interior destes tubos sem nenhum adesivo para evitar a ocorrência de estados de tensão mecânicas durante o aquecimento. A hipótese adotada para esta opção foi que os possíveis estados de tensões seriam minimizados e a deformação poderia ser causada apenas pela componente térmica da rede de Bragg (SILVA *et al*, 2004). Após as fibras óticas serem inseridas nos tubos cerâmicos, estes eram posicionados nos dois furos passantes do bloco de equalização, que posteriormente, por sua vez, foi colocado no centro do forno elétrico horizontal, conforme a Figura 43. Para isolar o bloco de equalização e os tubos cerâmicos do meio externo, todo o restante do forno foi preenchido com lã cerâmica, que atua como um excelente isolante térmico. Este isolamento teve o intuito de minimizar

as trocas térmicas com o meio exterior, aumentando conseqüentemente a estabilidade do meio térmico (forno).

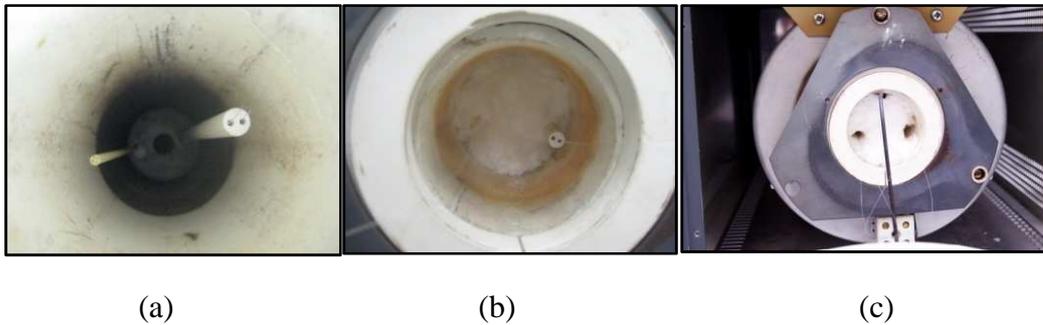


Figura 43: Sequência de isolamento do bloco de equalização com o meio exterior, onde em (a) aparece o bloco de equalização sem isolamento térmico, em (b) início do isolamento do forno e em (c) completo isolamento do forno.

4.4.4 Procedimento de Calibração Térmica

A rotina de calibração das redes de Bragg para alta temperatura foi realizada com diferentes tipos de redes de Bragg, porém, usando a mesma configuração do sistema de medição de temperatura. Antes de iniciar a calibração propriamente dita, houve uma rotina de preparação do ponto do gelo para o vaso Dewar, onde foi inserida a junção de referência e que foi abordada no item 4.4.2.4. Após a preparação do ponto do gelo no vaso Dewar, a junção fria do termopar de referência Au/Pt foi inserida no vaso Dewar, tendo-se o cuidado de escolher um vaso com dimensões adequadas ao diâmetro da junção de referência do termopar e também atentar para possíveis trocas térmicas desta com o meio exterior, o que poderia ocorrer se não estivesse corretamente instalada.

Estabelecida esta condição inicial importante para a medição, ligaram-se dois fios de cobre que saíam da junção de referência ao multímetro digital HP 3457 de acordo com os itens 4.4.2.3 e 4.4.2.4. A outra junção (junção quente), que é a parte sensora do termopar e onde os dois fios de metais nobres estão unidos, foram encapsulados em um tubo de alumina, que posteriormente foi inserido em um outro tubo feito de quartzo para proteção. Após a montagem do

termopar no tubo cerâmico, este foi inserido no furo central (poço) do bloco de equalização.

Um momento bastante delicado e preocupante durante os experimentos foi a preparação das fibras óticas com as redes de Bragg de alta temperatura e sua inserção no forno. As redes de Bragg, e principalmente as redes regeneradas, pela forma como são produzidas e submetidas à exposição de raios ultra violeta (UV), têm suas propriedades mecânicas alteradas, gerando uma fragilização permanente da sua estrutura como um todo, tornando-as muito quebradiças. Desta forma, houve a necessidade de que as fibras com as redes fossem emendadas e instrumentadas no próprio local da calibração Laboratório de Termometria do INMETRO, com a ajuda de um técnico qualificado do Laboratório de Sensores e Fibras Óticas da PUC/RJ.

As fibras foram montadas e emendadas fora do forno nas suas duas extremidades através dos tubos cerâmicos e depois estes tubos cerâmicos foram inseridos no bloco de equalização. Com extremo cuidado, o bloco de equalização foi posicionado no interior do forno, procurando-se minimizar nas duas saídas possíveis quaisquer curvaturas nas fibras que poderiam atenuar o sinal ótico ou até mesmo romper as fibras.

Acomodado o bloco de equalização com as fibras, foi possível inserir a junção quente do termopar no poço central do bloco de equalização e todo o restante do forno foi, em seguida, isolado do meio exterior através do preenchimento com lã cerâmica. Finalizada esta etapa de preparação das fibras óticas no forno, finalmente o forno estava pronto para ser ligado.

Após ligar o forno, foi selecionada a primeira temperatura no controlador do forno, iniciando-se o primeiro ponto de calibração. Esta fase de ajuste do controlador se mostrou necessária, pois foi através dela que se selecionou a taxa de aquecimento das resistências internas do forno. O mecanismo de aquecimento do forno utilizava um sistema de controle denominado de PID, que emprega pulsos de corrente para aproximar o valor de temperatura desejado. A maneira adotada para evitar que fosse ultrapassado o ponto de calibração “*over shoot*”, foi selecionar uma temperatura 5 °C abaixo do que o ponto desejado e depois de

estabilizado este valor de temperatura, a temperatura final desejada foi inserida no controlador.

A estabilização da temperatura no forno foi verificada através do sistema automatizado de leituras das fems através de um multímetro digital, que será detalhado na seção 4.4.5 a seguir.

O número de pontos de calibração foi escolhido de acordo com o tipo de rede de Bragg. Na medida do possível, procurou-se calibrar dez pontos ao longo da faixa de medição; entretanto, muitas das vezes estes dez pontos não podiam ser completados, pois algumas redes de Bragg tinham as suas refletividades reduzidas significativamente ou totalmente, dependendo da temperatura em questão.

Para se alcançar um patamar de estabilização dentro do intervalo estipulado como adequado, houve a necessidade no mínimo 3 horas para um único ponto de calibração. Nas vezes em que não houve imprevistos, o tempo para calibrar 10 pontos de medição era de aproximadamente uma semana.

Pela forma como o sistema de calibração de temperatura foi idealizado, assim como pela faixa de temperatura de medição de 20 °C até 1000 °C, apenas foi possível realizar ciclos crescente de temperatura, uma vez que após iniciada a calibração o forno não era mais desligado até completar todos os pontos de calibração dentro de um mesmo ciclo de medição. Para alguns tipos de redes de Bragg (regeneradas e tipo II) repetiu-se mais de um ciclo, porém, em datas diferentes.

4.4.5 Sistema de Aquisição de Dados

A aquisição dos dados de calibração para a leituras das fems do termopar Au/Pt foi realizada através de um multímetro HP 3457 A, utilizando-se um protocolo de comunicação IEEE-488 GPIB. O programa de aquisição de dados foi desenvolvido em linguagem de programação “*Visual Basic*”. Através deste programa foi possível monitorar em tempo real as variações das fems em μV versus o tempo decorrido em segundos (s), apresentando na tela do computador um gráfico “*on line*” do comportamento das variações de temperatura dentro do

forno. Todos os dados referentes às leituras das fems foram armazenados em um arquivo que pode ser aberto através de um editor gráfico, como o programa Excel.

Na Figura 44 observa-se uma das telas do programa de aquisição de dados do sistema de medição de temperatura relativa a temperatura de 100 °C quando a temperatura do forno alcançou o patamar de estabilização para um intervalo de aproximadamente 10 μV .

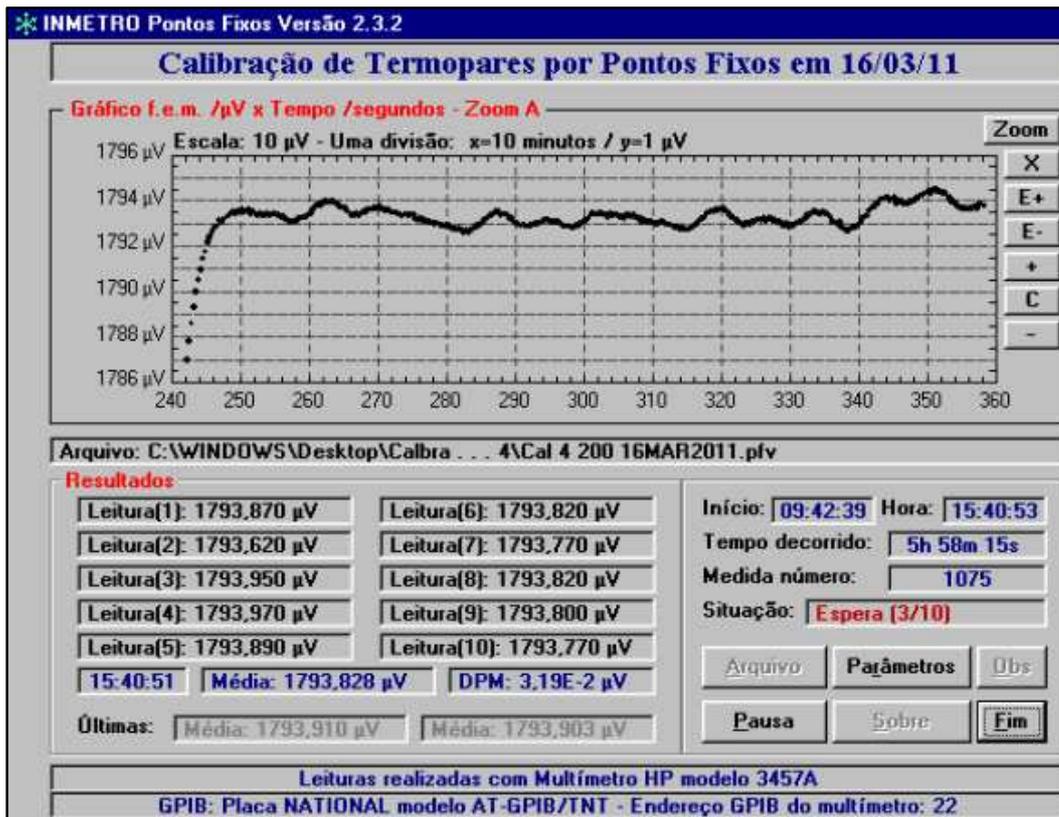


Figura 44: Tela de estabilização do programa de aquisição de dados para a temperatura do forno de 100 °C.

4.5 Configuração do Sistema de Interrogação Ótico

A tecnologia de interrogação por variação de comprimento de onda é muito importante em sistemas de medição óticos. Estes tipos de sistemas podem utilizar como elementos sensores fibras óticas com redes de Bragg - FBG, redes de período longo - LPG, fibras de safira, fibras de cristais fotônicos.

De acordo com Zhou *et al*, existem duas categorias principais de sistemas de interrogação comerciais. Um deles utiliza a multiplexagem por comprimento

de onda - WDM e a outra emprega a multiplexagem no tempo - TDM (ZHOU *et al*, 2003; ZHAO, 2004).

No sistema de interrogação TDM, todos os sensores multiplexados situados numa mesma fibra ótica podem possuir nominalmente o mesmo comprimento de onda, visto que este princípio de medição está baseado no atraso decorrido no tempo para que um determinado pulso de luz, associado a um sensor específico, retorne ao sistema de detecção. Isto só é possível devido aos sensores estarem posicionados em diferentes pontos da fibra ótica e possuírem baixa refletividade. Desta forma, o sinal de luz pode se propagar ao longo de todo o comprimento da fibra ótica, alcançando os sensores mais afastados. O sinal dos sensores podem apresentar diferentes resultados em função de que os mesmos podem ser instalados em pontos distintos e com isso sofrer perturbações externas diferentes. Isto também reforça a distinção do tempo de retorno de cada sensor especificamente (DYER *et al*, 2005).

Os sensores que utilizam o método TDM são separados no domínio do tempo através de um atraso no sinal proveniente de cada sensor em relação ao detector. Um instrumento que utiliza este método de medição não faz mais do que associar estes deslocamentos (atrasos) no domínio do tempo em relação a um dado mensurando de interesse, como por exemplo, a temperatura.

A outra técnica de interrogação, conhecida por multiplexagem por comprimento de onda WDM, foi a tecnologia de interrogação adotada para realizar as medições das redes de Bragg nesta pesquisa através de um laser sintonizável.

No passado, de acordo com Grattan e Sun, esta técnica não foi muito utilizada e difundida em função dos altos custos dos instrumentos de medição que inviabilizavam a sua aplicação. Entretanto, este cenário vem mudando consideravelmente na última década com a ampliação da utilização dos sistemas opto-eletrônicos e fotônicos para realizar os mais diferentes tipos de medição. Com isto, a cada dia os instrumentos estão tendo os seus custos barateados com o aumento da produção, de tal forma que atualmente a técnica WDM se tornou uma das mais populares entre os diversos segmentos que realizam o sensoriamento ótico (GRATTAN, 2000).

Este tipo de sistema de interrogação se baseou no fato de que a informação relativa a um dado mensurando seria codificada e individualizada em um específico comprimento de onda. Desta forma, cada sensor foi identificado univocamente por uma diferente porção do espectro disponível do sistema de interrogação, sendo que o ponto chave é que o instrumento tivesse exatidão suficiente para ter sensibilidade aos mínimos deslocamentos relativos aos comprimentos de onda, que no caso desta pesquisa foram os comprimentos de onda de Bragg.

Com isto, foi possível medir vários sensores com diferentes comprimentos de ondas separados de poucos nanômetros onde cada sensor pode ser interrogado individualmente, correlacionando seus deslocamentos no espectro a uma respectiva variação do mensurando em questão (ZHOU *et al*, 2003; DYER *et al*, 2005).

Existem algumas maneiras de se configurar um sistema WDM, contudo, seja qual for a configuração existem três elementos imprescindíveis. Inicialmente um emissor de luz que pode ser um diodo emissor de luz - Led, um laser ou uma fonte de banda larga, etc.. Depois um circuito de detecção ou demodulação e, por último, um circuito com componentes óticos de ligação como fibras, acopladores, isoladores, etc. (MARTELLI *et al*, 2004).

Dentre algumas configurações para a montagem de um sistema de interrogação WDM, a que emprega fonte de banda larga e detector por varredura - BSSD e a que emprega fonte laser e detector de banda larga - LSBD são bastante utilizadas.

No sistema de interrogação fonte de banda larga e detector de varredura - BSSD o emissor geralmente é uma fonte de luz de emissão espontânea amplificada - ASE, um Led ou até um diodo emissor de luz super luminescente - Sled, que podem vir a ser acoplados a um filtro sintonizável em um sistema de detecção de banda larga.

Já no caso do sistema LSBD utiliza-se uma fonte laser como emissor e, com isso, é possível trabalhar com maiores potências óticas e amplo espectro no sistema de detecção.

4.5.1 Seleção do Sistema de Interrogação

O sistema de multiplexagem escolhido para as atividades de interrogação desta tese, foi um sistema comercial de interrogação baseado no princípio de utilização de uma fonte de luz laser sintonizável e um detector de banda larga todos compactados em um só módulo da marca Micron Optics. Esta opção se deu pelo fato deste tipo de equipamento ser consagrado como um dos melhores do mercado para o tipo de sistema de interrogação, além de possibilitar ser utilizado em ambientes severos com desempenho satisfatório e por ser o equipamento disponibilizado pelo Laboratório de Sensores de Fibras Óticas - LSFO da PUC/RJ para a pesquisa.

4.5.2 Descrição dos Equipamentos e Acessórios

O equipamento principal do sistema de interrogação implementado para as medições dos espectros das redes de Bragg foi o interrogador fabricado pela empresa Micron Optics, modelo OSI (Optical Sensing Interrogator) sm 125-500 de acordo com a Figura 45 e o apêndice H. Este modelo de interrogador varre uma faixa no espectro de 1510 nm a 1590 nm ou 80 nm em milissegundos, através de um laser sintonizável patenteado Fibra Fabry-Perot (FFP), podendo operar tanto em modo de reflexão, quanto em modo de transmissão. Este tipo de equipamento tem como diferencial em seu projeto de fabricação a junção num mesmo chassis do laser sintonizável e do foto detector, com uma aparência bem otimizada e compacta. Como utiliza um laser como emissor de luz e possui uma potência ótica aumentada, permitindo, então, interrogar um maior número de sensores por canal. Existem outras características que o fabricante assegura que são um diferencial de seu produto e que expostas no apêndice C e listadas a seguir.

- a) Os equipamentos da série sm 125 possuem uma rotina automática interna de ajuste em relação a um comprimento de onda de referência que é acionada toda vez que o equipamento realiza uma varredura num determinado espectro.
- b) Equipamento compacto e robusto, podendo ser usado em ambientes severos, como no caso de indústria petrolífera, metalúrgica, dentre outras.

- c) Possui elevada capacidade de multiplexação de sensores, permitindo fazer um escaneamento completo do espectro numa faixa de 1510 nm a 1590 nm ou 80 nm por canal, num total de quatro canais, podendo ser expandido através de outro módulo até mais dezesseis canais.
- d) Acompanha um programa que realiza as principais funções de interrogação tais como detecção de picos, detecção contínua de picos, análise espectral, controle das funções do módulo sm, dentre outras.
- e) Varre uma faixa dinâmica de até 50 dB com uma frequência de escaneamento de 2 Hz para uma resolução de 0,001 nm ou 1 pm.
- f) Possui interface Ethernet (LAN) além de outras mais conhecidas como VGA, RS-232, RS-485, USB, possibilitando a automação das medições através de um código fonte amigável como “*LabView*”.



Figura 45: Fotografia do interrogador ótico Micron Optics modelo sm 125.

O sistema de interrogação é bastante otimizado, pois, além do interrogador como instrumento principal, é necessário apenas o uso de um isolador ótico na montagem para interrogação das redes de Bragg de alta temperatura, permitindo realizar medições no modo de transmissão.

Foram também usados isoladores óticos que são componentes que permitem a transmissão do sinal ótico em apenas uma direção e que bloqueiam a

propagação no sentido contrário. Os parâmetros mais importantes que descrevem o desempenho dos isoladores óticos são a perda de inscrição, que consiste na perda do sinal transmitido no direção sentido da transmissão ótica e a isolação, que é o quanto de atenuação do sinal ótico transmitido na direção reversa. Um isolador tem seu conceito de funcionamento baseado nas Leis de Faraday em conjunto com polarizadores para uma polarização ou separadores especiais de polarização para duas polarizações (FREITAS, 2007).

4.5.3 Montagem e Disposição do Sistema de Interrogação

A montagem do sistema de interrogação foi realizada de acordo com as Figuras 46 e 47, de modo a ficar integrada na mesma bancada do sistema de medição de temperatura. Com a escolha do instrumento de interrogação principal foi possível realizar medições no modo de reflexão com as fibras óticas quando se utilizava apenas uma das extremidades do forno, ou no modo de transmissão quando as fibras atravessavam todo o forno utilizando as suas duas extremidades.

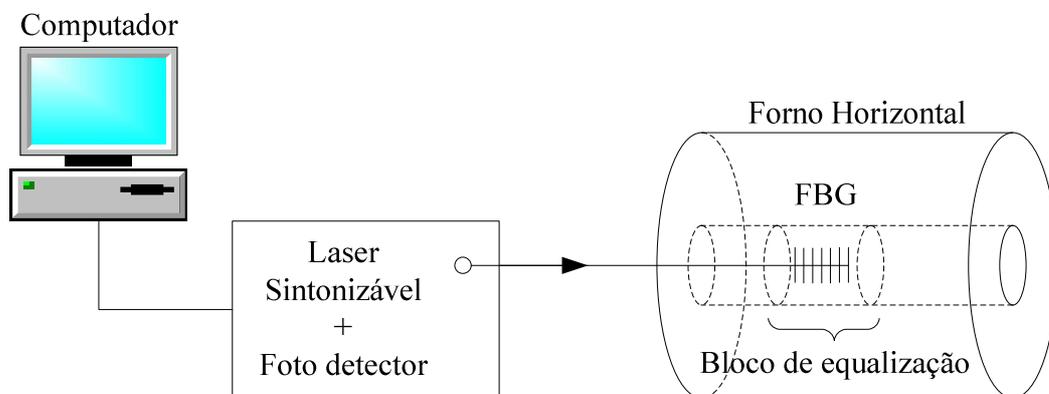


Figura 46: Esquema do sistema de interrogação composto por interrogador ótico, fibras óticas com rede de Bragg e computador no modo de reflexão.

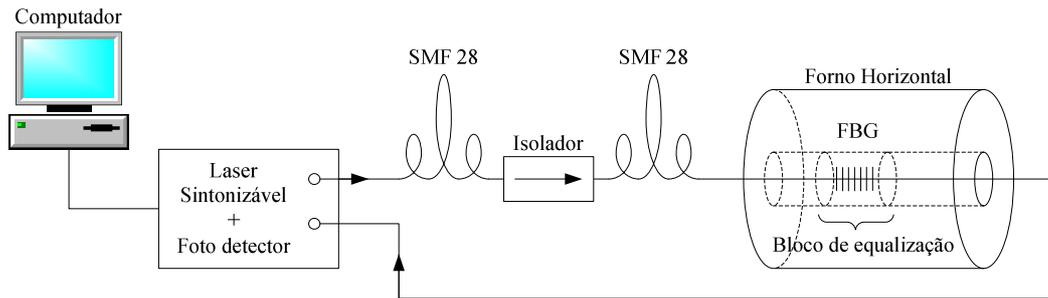


Figura 47: Esquema do sistema de interrogação composto por interrogador ótico, fibras óticas com rede de Bragg e computador no modo de transmissão.

4.5.4 Características das Redes de Bragg da Pesquisa

O objetivo principal desta pesquisa foi a caracterização metrológica de uma variedade de tipos de redes de Bragg, principalmente para as redes que seriam utilizadas na construção de instrumentos que possam medir temperaturas acima de 300 °C.

Desta forma, foram realizadas caracterizações com redes de Bragg do tipo I, tipo II e redes regeneradas, que foram gentilmente cedidas respectivamente pelo Laboratório de Sensores e Fibras Óticas - LSFO da PUC/RJ, pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR e pela Universidade de Sidney (Austrália).

As redes cedidas pelo LSFO da PUC/RJ eram do tipo I, redes estas que geralmente apresentaram um bom desempenho, compatível com temperaturas de até 80 °C.

As redes cedidas pela UTFPR foram redes do tipo II e redes regeneradas. As redes do tipo II foram fabricadas para suportar até 500 °C e as redes regeneradas foram projetadas para suportar até 800 °C.

As redes cedidas pela Universidade de Sidney eram do tipo regeneradas e foram fabricadas para suportarem a temperatura de trabalho de até 1000 °C.

As redes do tipo I fabricadas no LSFO da PUC/RJ foram produzidas a partir de um laser N:YAG pulsado (até 50 Hz) operando a 266 nm com tempo de

gravação de aproximadamente 5 minutos de exposição. O método de gravação usado foi o holográfico com máscara de fase, apenas para a separação do feixe. As redes possuíam um comprimento aproximado de 1 mm. A gravação foi realizada em fibras monomodo fotossensíveis hidrogenadas (OS - 1550 - Y3 Stocker Yale), pressão normal do cilindro de hidrogênio de aproximadamente 200 bar durante uma semana à temperatura ambiente.

As redes do tipo II e regeneradas foram fabricadas na UTFPR a partir de um laser Excímero (Newport, Xantos) operando a 248 nm e com energia de 6 mJ e tempo de gravação de aproximadamente 25 minutos de exposição. O método escolhido foi o com máscara de fase (IBSEN), “*pitch*” na faixa de 1066,5 nm e 1068,5 nm, através da exposição direta de um feixe ultravioleta (UV). A gravação foi realizada em fibras monomodo padrão (SMF 28) sem hidrogenização.

As redes regeneradas da Universidade de Sidney foram gravadas em fibras (PF 1) e hidrogenadas por 24 horas na pressão de 200 bar e 80 °C.

4.5.5 Sistema de Aquisição de Dados

O sistema de aquisição de dados utilizou um programa desenvolvido em linguagem “*Lab View*” marca registrada da empresa National Instruments que permite selecionar sub-rotinas através de ícones com funções específicas.

Estas sub-rotinas permitiram a implementação de algumas funções específicas que serão listadas a seguir.

- a) Selecionar os canais para interrogação das redes num total de até quatro canais.
- b) Definição do arranjo do esquema dos sensores.
- c) Selecionar o modo de interrogação como reflexão, transmissão ou ambos.
- d) A configuração do intervalo de amostragem das leituras em comprimento de onda. Para todas as medições realizadas na pesquisa foi adotado um intervalo de 500 amostras e uma média de leituras de pico de 30 medições a fim de melhorar a repetitividade das calibrações.

e) Selecionar a modalidade de varredura do espectro, seja através da detecção unitária dos picos ou gravação contínua do espectro da rede de Bragg. Foram realizadas em alguns casos as duas modalidades de varredura.

f) Estabelecer os parâmetros para viabilizar a detecção dos picos, tais como limiar de detecção, largura do pico, nível da largura, seleção das leituras em picos ou vales.

Após concluídas todas as ações mencionadas anteriormente, o sistema de aquisição de dados do interrogador sm 125-500 ficou pronto para iniciar as caracterizações metrológicas das redes de Bragg de diferentes tipos para altas temperaturas de acordo com as Figuras 48, 49 e 50.

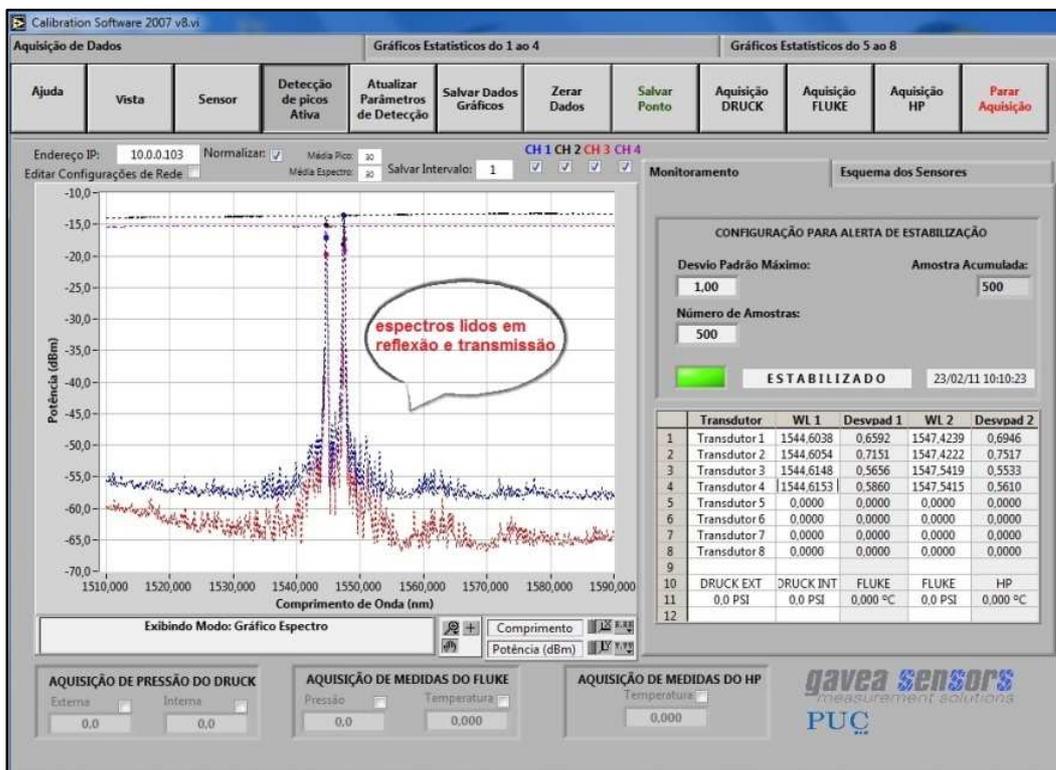


Figura 48: Tela inicial do programa de aquisição de dados do interrogador sm 125-500, com espectros lidos em modo de reflexão e transmissão.

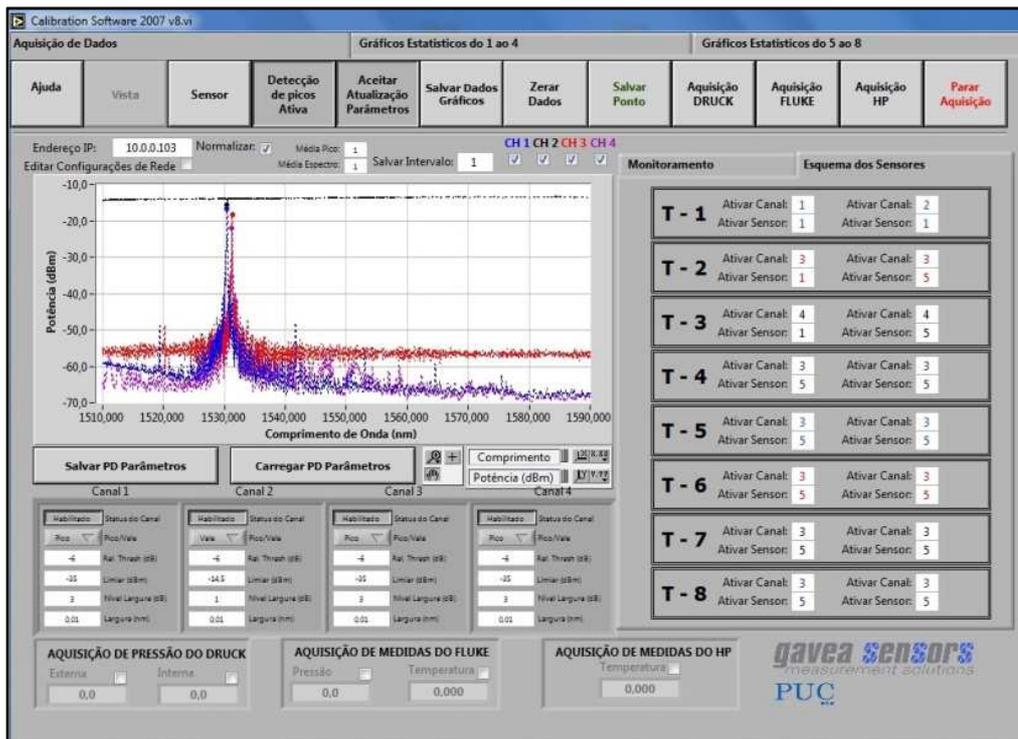


Figura 49: Tela para habilitar os parâmetros de detecção e esquema de seleção dos sensores do interrogador sm 125.

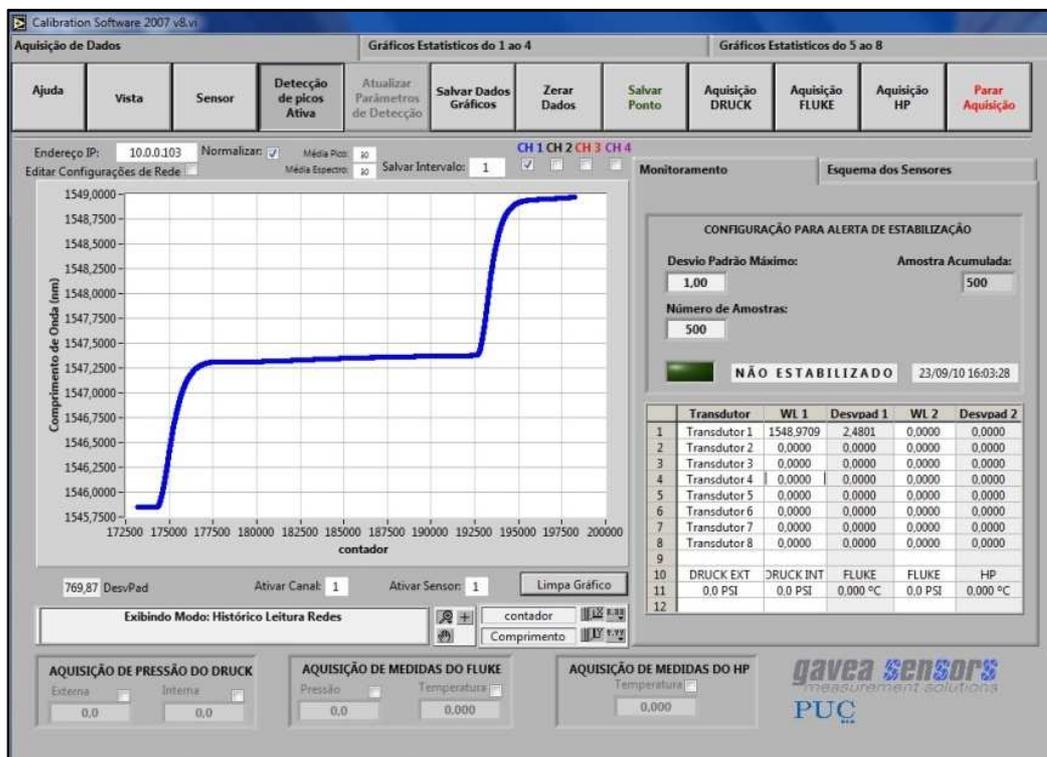


Figura 50: Tela de estabilização das leituras de uma calibração de rede de Bragg no interrogador sm 125.

4.5.6 Rotina de Calibração com o Sistema de Interrogação

A partir do momento que os sistemas de medição térmico e ótico estavam totalmente preparados e ligados, estabeleceu-se uma sequência de operações conforme listado a seguir.

a) Selecionou-se o ponto de medição de temperatura desejado no controlador do forno elétrico horizontal, e aguardou-se até que este alcançasse a sua estabilização. A estabilização do ponto foi confirmada por um patamar estável, que foi monitorado através do sistema automatizado de leituras das fems geradas pelo termopar Au/Pt.

b) Quando o ponto de temperatura estava estabilizado, era confirmado no interrogador sm 125-500 se havia a detecção do pico da respectiva rede; isto feito verificava-se no interrogador quando ocorria o patamar de estabilização das leituras do espectro e aceita-se o ponto medido acionando um ícone específico. Deste modo, há uma correlação da condição bem estabilizada de temperatura no forno com um respectivo comprimento de onda da rede de Bragg. Outra opção de leitura, também disponibilizada pelo programa do interrogador, é a gravação contínua do espectro, que para algumas situações é interessante de realizar.

Concluídos todos os passos anteriores, seleciona-se a segunda temperatura desejada para medir, e toda a sequência descrita anteriormente é repetida até o último ponto de calibração.

4.6 Esquema Completo do Sistema de Medição Idealizado

Durante as medições realizadas com os sistemas de medição térmico e de interrogação foi possível implementar várias adaptações nos sistemas com o intuito de aperfeiçoar e otimizar todas as medições feitas, possibilitando, assim, a configuração final apresentada na Figura 51.

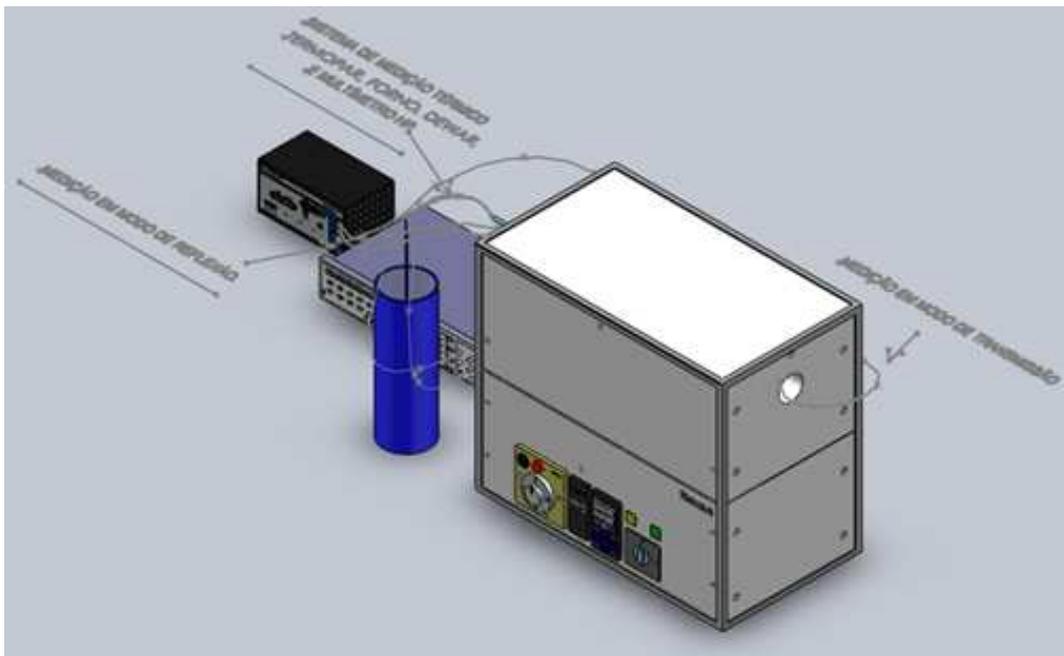


Figura 51: Esquema completo dos sistemas térmico e de interrogação óptica de medição das redes de Bragg do tipo I, tipo II e regeneradas do Brasil e do exterior para alta temperatura.