# 4 Sistema de medição

O sistema de medição, para testar e aferir o funcionamento de todos os protótipos, foi montado em bancada no laboratório de sensores a fibra óptica.

Neste sistema duas distinções são feitas com relação aos equipamentos utilizados e suas características. Há o sistema óptico do qual fazem parte o acelerômetro e todos os componentes optoeletrônicos envolvidos como as fontes luminosas, fotodetectores, acopladores, atenuadores e etc... E também existe o sistema convencional de medição de vibrações que deve funcionar de maneira confiável e com exatidão, composto por acelerômetros convencionais, excitadores eletromagnéticos, analisadores de espectro, entre outros equipamentos.

De maneira simplificada, o que se precisa além de garantir o funcionamento adequado do sistema óptico, é que o sinal a ser medido por este sistema seja conhecido e exato, para que a comparação e caracterização seja válida.

Durante o desenvolvimento da pesquisa, devido às características do sinal a ser medido, optou-se pela técnica de filtros fixos para interrogação dos sensores a redes de Bragg. Entretanto, para o acelerômetro óptico viu-se que era possível optar por duas variações no emprego dos filtros, dependendo da quantidade de sensores que forem empregados.

Pode-se utilizar dois sensores a rede de Bragg com dois filtros fixos, ou apenas um sensor com dois filtros fixos. Em ambos existem vantagens e desvantagens de acordo com o que se pretende alcançar como resultado.

#### 4.1 Medição em bancada

O sistema de medição de bancada empregado, conforme mencionado, possui duas "partes". A convencional é composta por aqueles equipamentos normalmente empregados em medições convencionais de vibrações. Uma fonte geradora de sinal, um amplificador de potência, um excitador eletromagnético (*shaker*), um analisador digital de sinais, acelerômetros convencionais (piezoelétricos), um calibrador de acelerômetros, e um osciloscópio.

Do lado óptico são necessários uma fonte luminosa, filtros ópticos, um circuito conversor opto-eletrônico, uma fonte alimentação para o circuito de conversão, e acopladores ópticos. A Figura 4.1, mostra como todos estes equipamentos foram conjugados.



Figura 4.1: Esquema empregado para as medições em laboratório.

O analisador de digital de sinais utilizado (HP-35670A) possui internamente uma fonte geradora de sinais que foi utilizada em todos os testes, dispensando o uso de mais um equipamento específico. O sinal desta fonte que é de baixa potência, foi dividido em duas partes, uma para servir de referência e outra enviada ao amplificador de potência (LDS-25PA). Amplificado, o sinal é então enviado ao excitador eletromagnético. Dois modelos de excitadores eletromagnéticos foram empregados, um de pequeno/médio porte (LDS V406) e um mini-*shaker* (LDS V201). Os acelerômetros convencionais piezoelétricos (ENDEVCO ISOTRON 750-100, 750-10, 25B), foram fixados no excitador ou no próprio acelerômetro óptico, e conectados ao analisador ou medidos em um osciloscópio comum.

Em relação ao circuito óptico, o sinal de luz sai da fonte luminosa (LED ou ASE) passa por um acoplador 50/50. A luz atinge o acelerômetro, e o sinal de luz ao interagir com as redes de Bragg retorna parte desta luz através do outro ramo livre do acoplador. Novamente, um outro acoplador

50/50 divide o sinal luminoso em duas partes que vão para os filtros ópticos, que no caso dos testes em bancada foram usados filtros sintonizáveis (JDS FITEL - TB1500B). Cada filtro é então ajustado para interagir com uma rede de Bragg conforme a Figura 1.4. Após os filtros, o sinal luminoso é então convertido em sinal elétrico através do circuito de conversão opto-eletrônica montado no próprio laboratório.

Este esquema experimental permite medir a função resposta em freqüência do próprio sistema de medição e dos acelerômetros ópticos. Podem também ser feitos testes de sensibilidade através de incrementos controlados na aceleração aplicada no excitador em freqüências fixas com sinais senoidais, o que permite obter a relação sinal/ruído do sensor.

Alguns comentários a respeito dos equipamentos empregados e do esquema de medição são necessários.

Em todos os testes, os acelerômetros convencionais piezoelétricos foram calibrados usando um calibrador (PCB-Piezotronics) aferido e certificado pelo Inmetro.



Figura 4.2: Detalhe da montagem do protótipo 4 no excitador eletromagnético.

Os excitadores eletromagnéticos empregados, Figura 4.2, têm faixa dinâmica de trabalho nominal de 5 Hz a 9 kHz (V406), e 5 Hz a 13 kHz (V201) com cargas máximas de 196 N e 17,8 N respectivamente. Estas características invalidam as medições em freqüências muito baixas, próximas de 0 Hz. Além disso, em ambos foram notadas vibrações transversais consideráveis durante todos os testes.

Os acelerômetros piezoelétricos 750-100 e 750-10, são considerados acelerômetros de uso geral e suas dimensões externas são consideradas o padrão deste e de outros fabricantes. Já o 25B é um micro acelerômetro piezoelétrico de baixo peso e dimensões extremamente reduzidas. Em ambos a relação sinal/ruído é praticamente a mesma (10<sup>4</sup>), mas com diferentes valores de amplificação no sinal de saída em voltagem por aceleração aplicada (mV/g).

Por motivos óbvios de tamanho, ao se empregar o excitador V406 foi possível adaptar os acelerômetros 750-10/100 na sua base ao lado do acelerômetro óptico, enquanto que, ao se empregar o excitador V201 foi possível apenas utilizar o micro acelerômetro.



Figura 4.3: Espectro da fonte ASE e do LED.

Para este esquema de medição dois tipos de fonte luminosa foram empregados, uma de baixa potência (LED) e outra de alta potência (ASE). No LED, montado na PUC-Rio, tem-se uma menor potência com um espectro em comprimento de onda mais largo, enquanto que na fonte ASE, um amplificador de fibra dopada de érbio (EDFA), a potência além de ser maior, possui um espectro mais estreito com regiões bastante distintas (pico de alta potência e regiões planas). A Figura 4.3 mostra os espectros da fonte ASE e do LED utilizados.

Os filtros ópticos empregados foram do tipo Fabry-Perrot sintonizáveis, por serem extremamente, estáveis, versáteis e possuírem um espectro bastante estreito e uniforme. Possuem uma faixa de operação de 1530 a 1561 nm, com uma largura de banda menor do que 2 nm.

### 4.2 Sistema de leitura com duas redes de Bragg

O primeiro sistema de medição implementado foi o que emprega duas redes de Bragg na mesma fibra óptica. Neste caso, a massa sísmica está posicionada entre as duas redes, de forma que quando esta se desloca ao longo do eixo de medição, nos dois ramos de fibra óptica, acima e abaixo da massa, são produzidos esforços axiais de sinais contrários, tração e compressão. Nesta implementação, é necessário efetuar simultaneamente a medição dos comprimentos de onda refletidos pelas duas redes. A Figura 1.5 apresenta de forma esquemática o posicionamento espectral dos filtros ópticos em relação ao dos sensores a redes de Bragg do acelerômetro.



Figura 4.4: Espectro óptico do sistema de medição com duas redes de Bragg no acelerômetro.

Como descrito na equação 1-2 as variações de comprimento de onda podem ser associadas a dois fatores, um mecânico, e outro térmico. Os esforços induzidos pelo movimento da massa têm sinais opostos, enquanto a temperatura age nas duas redes de maneira idêntica. Então, ao se subtraírem os sinais eliminam-se os efeitos de temperatura e somam-se os valores das deformações medidas. Este procedimento além eliminar os efeitos devidos a variação de temperatura também compensa os feitos indesejados de vibrações transversais, pois qualquer deformação que ocorra por esse motivo ocorre nas redes de maneira idêntica (mesmo sinal), e portanto, é eliminado.

Para isso é necessário que os filtros das duas redes estejam posicionados de maneira adequada como mostra a Figura 4.4. Os sinais gerados serão idênticos, mas com uma defasagem na fase do sinal de 180°.

$$\Delta \lambda_{total} = \Delta \lambda_{mec} + \Delta \lambda_{temp} \tag{4-1}$$

$$\Delta \lambda_1 = \Delta \lambda_{mec} + \Delta \lambda_{temp} \qquad \Delta \lambda_2 = -\Delta \lambda_{mec} + \Delta \lambda_{temp} \tag{4-2}$$

$$\Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2 = 2\Delta\lambda_{mec} \tag{4-3}$$

Para simular a resposta do sistema de leitura, pode-se representar os espectros dos filtros (F) e sensores (S) mostrados na Figura 4.4 através de perfis gaussianos [24, 23]:

$$S(\lambda, \lambda_S) = y_0 + S_0 \exp[-\alpha_S (\lambda - \lambda_S)^2]$$
(4-4)

$$F_i(\lambda) = y_{0i} + F_{0i} \exp[-\alpha_{Fi}(\lambda - \lambda_{Fi})^2]$$
(4-5)

onde 
$$\alpha = \frac{4\ln 2}{b^2}; \ i = 1, 2.$$
 (4-6)

Como a quantidade de luz que chega aos fotodetectores é representada pela área de intersecção entre sensor e filtro, conseqüentemente, podemos estimar essa quantidade para uma determinada posição como sendo uma função de  $\lambda_S$ , o valor de posição do pico do sensor, que pode ser obtido através de:

$$V_i(\lambda_S) = \int_{-\infty}^{\infty} \beta S(\lambda, \lambda_S) F_i(\lambda) d\lambda, \qquad (4-7)$$

combinando as equações 4-4 e 4-5

$$\frac{V_i(\lambda_S)}{\beta} = 2ay_0y_{0i} + y_0F_{0i}\sqrt{\frac{\pi}{\alpha_{Fi}}} + y_{0i}S_0\sqrt{\frac{\pi}{\alpha_S}} + F_{0i}S_0\sqrt{\frac{\pi}{\alpha_{Fi} + \alpha_S}}\exp\left[-\frac{\alpha_{Fi}\alpha_S}{\alpha_{Fi} + \alpha_S}(\lambda_S - \lambda_{Fi})^2\right],$$
(4-8)

onde a é o limite de integração e  $\beta$  é uma constante que considera a potência emitida pela fonte, perdas no circuito óptico, e o fator de conversão optoeletrônico dos detectores. Entre as vantagens desta implementação com duas redes de Bragg, tendo em vista que o acelerômetro óptico responde também a deslocamentos estáticos da massa sísmica, está a capacidade de separar-se os sinais de natureza DC (baixa freqüência) associados a efeitos de temperatura daqueles provenientes da mudança de posicionamento do acelerômetro em relação à aceleração da gravidade da terra. Supondo que os filtros estejam a uma determinada temperatura constante, controlada pelo sistema de leitura, um aumento na temperatura do acelerômetro provoca um deslocamento na posição espectral das redes com a mesma direção (aumentando seu comprimento de onda). Por outro lado, uma variação estática na inclinação do eixo do acelerômetro em relação ao campo gravitacional provocará deslocamentos espectrais dos comprimentos de onda de Bragg dos sensores em direções opostas.

Um fato importante é que como serão subtraídos os sinais gerados pelas duas redes sensoras, isso possibilita um ganho na relação sinal/ruído. Considerando a hipótese de que os sinais gerados pelas duas redes de Bragg sejam idênticos, ao serem somados algebricamente a relação sinal/ruído resultante é maior por um fator  $\sqrt{2}$ .

Melhorar a relação sinal/ruído é fundamental para se garantir uma boa sensibilidade. Algumas medidas podem ser tomadas para melhorar ainda mais esta relação. Todas as redes de Bragg utilizadas possuem uma refletividade maior do que 50%, significando que alterações nesta característica não representariam um ganho tão grande em termos de potência luminosa. Entretanto, outros componentes do sistema podem ser modificados para melhorar sensivelmente a relação sinal/ruído. A substituição dos acopladores por circuladores ópticos representaria um ganho de 6dB. No sistema de medição em bancada foram também necessários adaptadores para conectar os filtros, acopladores, adaptadores do padrão APC para PC, resultando em uma quantidade de conexões ópticas que em um sistema final podem ser eliminadas resultando em um ganho adicional aproximado de 1dB. Empregar uma fonte luminosa do tipo ASE ao invés de um LED convencional representa usar uma potência luminosa em média 10<sup>3</sup> vezes maior sob o espectro total da luz, porém teria um impacto significativo no custo do sistema de leitura, justificando-se apenas em aplicações especiais ou quando desejase interrogar, simultaneamente, uma grande quantidade de acelerômetros a redes de Bragg.

### 4.3 Sistema de leitura com uma rede de Bragg

Uma outra opção de implementação é utilizar apenas uma rede de Bragg atuando como sensor, e conservando a leitura com dois filtros fixos [24]. Esquematicamente a disposição dos filtros é simétrica em relação à rede, Figura 4.5, e o esquema de medição permanece idêntico ao da Figura 4.1.

As relações desenvolvidas para o caso anterior do valor de saída em função da posição de  $\lambda_S$ , equação 4-8, continuam válidas, mas neste sistema de medição a informação final não é a subtração das informações dos filtros individuais, mas sim a razão entre elas, ou ainda, o logaritmo desta razão.



Figura 4.5: Sistema de medição com uma rede de Bragg.

$$f(\lambda_S) = \left(\frac{V_1}{V_2}\right) \tag{4-9}$$

A Figura 4.6 apresenta resultados numéricos e experimentais obtidos com a implementação de dois filtros fixos interrogando uma única rede de Bragg. Nestes testes, conduzidos por Nunes [24], os espectros dos filtros foram fixados enquanto variava-se o comprimento de onda da rede de Bragg. Pode-se mostrar que variação do logaritmo da função  $f(\lambda_S)$ , definida na Equação 4.3, é linear dentro de uma faixa de espectro centrada no comprimento de onda da rede [24]. Como durante as medições podem ser sempre separados os sinais AC e DC, e antecipando que as variações no sinal DC seriam exclusivamente causadas por efeitos de temperatura, as oscilações do acelerômetro estariam então associadas apenas à parcela AC da relação 4.3.



Figura 4.6: Resultados da relação  $V_1/V_2$  e a incerteza destes resultados [24].

A maior vantagem desta implementação, é a necessidade de apenas uma rede de Bragg para medição em uma direção, permitindo reduções nas dimensões do instrumento. As curvas feitas nas fibras no interior dos protótipos podem dispor de um maior espaço e, conseqüentemente, estarão sujeitas a menores perdas ópticas. Apesar de estar sendo empregado um módulo de desenho simétrico, inicialmente projetado para trabalhar com duas redes, nenhuma mudança construtiva precisa ser realizada para se trabalhar com uma única rede. Desenhos assimétricos para o módulo podem ser também desenvolvidos. Esta solução obviamente traz algumas desvantagens. Ao contrário do que pode ser conseguido através da implementação com duas redes, neste caso não há o desacoplamento da informação do sinal DC, isto é, não se pode determinar se mudanças nesta parcela do sinal seriam causadas por variações de temperatura ou mudanças na orientação do eixo do acelerômetro em relação ao campo gravitacional.

## 4.4 Simulação da resposta dos sensores a rede de Bragg

Para ambos os sistemas de medição é necessário se conhecer a resposta da interação dos sensores com o filtro, para que se possa maximizar o desempenho do sensor. É definida uma posição espectral inicial do filtro em relação ao sensor. O sistema é posto a oscilar em uma determinada freqüência e com uma amplitude constante. Lentamente, é variada a posição do filtro em relação ao sensor e observa-se que tanto o comportamento AC quanto DC do sinal sofrem alterações. Os pontos limites desta variação são quando o filtro está no mesmo valor de comprimento de onda do sensor (ponto de DC máximo), e quando o filtro está distante o suficiente para que não haja intersecção com o sensor (ponto de DC mínimo). Entre estes pontos, a componente AC do sinal se comporta de forma não linear.

Na Figura 4.7 mostra-se resultados experimentais para a relação entre o nível de tensão DC, dependente da posição do filtro, e a tensão AC para duas redes sensoras . Estes resultados foram obtidos fixando-se a posição espectral dos filtros e impondo-se uma aceleração de 1g na freqüência de 100 Hz à massa sísmica de um dos protótipos de acelerômetro (protótipo 5). As amplitudes das parcelas DC e AC do sinal obtido pelo sistema de leitura eram então gravadas. Este procedimento foi repetido para diferentes posições espectrais relativas entre filtro e sensor. Na figura, três pontos estão destacados. O ponto  $\mathbf{A}$ , posicionado a aproximadamente 40% do valor de DC máximo, apresenta um determinado valor de sinal AC que cresce juntamente com o sinal DC até um máximo, o ponto  $\mathbf{B}$ , que é a posição que mais amplifica o sinal de tensão AC. A partir deste ponto o comportamento é decrescente, ponto  $\mathbf{C}$ , até que se atinja um AC próximo de zero e um valor de DC máximo, Figura 4.8.



Figura 4.7: Caracterização dos sensores (experimental).

Praticamente todas as medições reportadas nos capítulos que se seguem, foram obtidas com o sistema de leitura configurado de tal forma a favorecer o desempenho do sinal AC, ponto **B** da Figura 4.8. Esta configuração é caracterizada pela escolha da posição espectral do filtro em relação à do sensor quando o instrumento está na condição de aceleração estática (por exemplo, sujeito somente a aceleração da gravidade). Neste ponto é possível amplificar ao máximo o sinal de voltagem AC, o que conseqüentemente implica em uma melhor relação sinal/ruído, além de promover menores variações nesta medição devido a possíveis oscilações no sinal de tensão DC ocasionados, por exemplo, por lentas variações de temperatura.



Figura 4.8: Variação da resposta AC em função da posição do filtro.

Este mesmo resultado pode ser também observado com auxílio das equações 4-4, 4-5 e 4-8. Simulações realizadas a partir destas relações analíticas, alimentadas pelas características típicas dos filtros e redes empregadas, forneceram resultados semelhantes, Figura 4.9. Para uma rede típica e o filtro empregado (1,08 nm e 1,26 nm), observa-se que a configuração que resulta em um maior sinal AC é obtida posicionando-se filtro e sensor a uma distância espectral de 0,7 nm, equivalente a 70% da posição em comprimento de onda que resulta em um maior valor DC. Entretanto, o favorecimento de um maior sinal AC implica em uma menor faixa dinâmica de operação para os sensores. Ao se posicionar o filtro mais próximo da rede, significa que a faixa de comprimentos de onda que o sensor pode excursionar sem superpor-se ao espectro do filtro diminui. E mesmo antes disto acontecer, já podem ser notados efeitos de não-linearidades no sinal gerado.



Figura 4.9: Simulação da relação entre a tensão AC gerada e a variação no comprimento de onda.

A Figura 4.10 mostra o comportamento simulado de uma rede e filtro utilizados. Estes resultados são para um deslocamento em comprimento de onda equivalente a 20g de aceleração. A legenda  $DC_{estatico}$  significa o nível de tensão medida com o sistema em repouso na posição relativa entre rede e filtro que garante o maior sinal AC, enquanto que a legenda  $DC_{medio}$  é o valor médio entre o valor máximo e mínimo do sinal senoidal. Nota-se que neste nível de aceleração, estes dois valores, que deveriam ser idênticos, estão bastante distintos e esta diferença tende a aumentar proporcionalmente ao nível de aceleração aplicado. A Figura 4.11, mostra este efeito para diversos valores de aceleração, inclusive para valores além do que se denominou de "saturação" (> 25g) onde os comprimentos de onda da rede e do filtro atingem os mesmos valores.



Figura 4.10: Simulação do comportamento do sensor.

Com dados reais de medição tais como os comprimentos de onda, as larguras dos filtros e sensores, o valor de tensão DC para o sistema em repouso e as relações de aceleração e deformação na fibra (ou tensão), as simulações analíticas podem fornecer uma previsão dos comportamento do sistema.



Figura 4.11: Comportamento simulado do sensor para diversos níveis de aceleração aplicados.

Resultados de simulações para diversas redes são mostrados na Figura 4.12. A amplitude AC refere-se ao valor do sinal de resposta esperado, e o desvio é a diferença percentual entre o valor  $DC_{estatico}$  e o  $DC_{medio}$ . Constata-se que a resposta em amplitude perde a linearidade aproximadamente a partir de 15g, onde o desvio correspondente ultrapassa 2%.



Figura 4.12: Resultados de simulações em amplitude e desvio de linearidade para diversas redes de Bragg utilizadas.

Uma maneira mais cuidadosa de se fazer esta análise, é estimar separadamente os valores de tensão máximos e mínimos. Conforme as Figuras 4.10 e 4.11 mostram, o comportamento ao atingir a saturação não é homogêneo na onda senoidal. A parte superior da curva sofre os efeitos de atenuação causados pela posição relativa rede-filtro de maneira mais intensa do que a parte inferior. A Figura 4.13 mostra as respostas de diversos sensores com distinções entre as partes superior e inferior das curvas destes.



Figura 4.13: Resultados de simulações para determinação da faixa dinâmica de operação.

Portanto, com resultados destas simulações é possível estimar a faixa dinâmica de operação linear para qualquer sensor através de suas características. A técnica e os resultados obtidos destas simulações foram utilizados em comparações com a calibração experimental dos acelerômetros que será mostrado adiante.