

6

Calibração e testes de estabilidade

A calibração dos sensores foi feita empregando os resultados obtidos experimentalmente e confrontou-os com as simulações utilizando a rotina elaborada em Matlab alimentada pelos dados característicos das redes (comprimento de onda, largura do sensor, posição dos filtros, tensão máxima de resposta, etc...).

Como descrito no capítulo que aborda os sistemas de medições, além da aquisição dos sinais, diversas operações são necessárias para que se obtenha um resultado final independentemente se o sistema de medição adotado é o que utiliza uma ou duas redes de Bragg. E ainda, estes resultados poderiam ser salvos e arquivados da maneira desejada para análises posteriores.

Nas medições em tempo real foram desenvolvidos programas em ambiente LabVIEW para realizar a conversão dos sinais analógicos para digital, e processar os sinais para posteriormente armazená-los. Foram empregadas duas placas de aquisição de sinais da National Instruments. Uma, especificamente, para computadores portáteis no padrão PCMCIA, e outra do tipo GPIB com conexão via padrão USB.

Empregando ambas as placas, o desempenho das medições foi idêntico. Entretanto, na placa PCMCIA (*DC-Card 500*), foi constatado que em medições em mais de um canal ocorriam algumas interferências no sinal devidas, provavelmente, à falta de aterramento dos computadores portáteis.

A placa GPIB foi acoplada a um osciloscópio com esta interface, e conectada a qualquer computador que possuísse um conector USB. Neste caso, os osciloscópios empregados (HP-Infinium e HP-54603B) também serviram para referendar os valores mensurados pelo software. Em todas as medições notou-se uma excelente concordância dos resultados, e uma robustez satisfatória por parte do software e da rotina empregados.

Medidas instantâneas para as calibrações e medições de longa duração, foram realizadas.

6.1 Calibração

Foram calibrados os dois módulos do protótipo 5. Os dados experimentais foram ajustados linearmente conforme a Figura 5.32. As simulações do protótipo 5 empregaram todos os dados reais extraídos das medições, Tabela 6.1.

Na rotina de simulação da interação rede-filtro são usados os comprimentos de onda, e a largura de $\frac{1}{2}$ banda de ambos. Entretanto, para simular o movimento relativo entre eles é necessário a relação entre a variação no comprimento de onda e a aceleração aplicada ($\Delta\lambda/g$). Esta relação foi obtida de duas maneiras, uma numérica através dos resultados obtidos com o método dos elementos finitos, e outra experimental.

Tabela 6.1: Características dos sensores utilizados.

| Sensor | Comprimento de Onda (nm) | Largura de 1/2 Banda (nm) | DC _{Max} (V) | DC _{Est.} (V) | $\Delta V/g$ (mV/g) | $\Delta\lambda/g$ (nm/g) |
|--------|--------------------------|---------------------------|-----------------------|------------------------|---------------------|--------------------------|
| M1S1 | 1553,25 | 0,98 | 3,70 | 2,66 | 120,20 | 0,04196 |
| M1S2 | 1558,05 | 1,19 | 1,20 | 0,84 | 37,94 | 0,04433 |
| M2S1 | 1542,25 | 1,08 | 2,02 | 1,40 | 106,06 | 0,05082 |
| M2S2 | 1551,09 | 1,08 | 2,09 | 1,45 | 63,64 | 0,03900 |
| Filtro | — | 1,37 | — | — | — | — |

Os resultados gerados pelo ANSYS apontam para uma relação aproximada de $\Delta\lambda/g = 0,0516$ que, após comparações com resultados experimentais, mostrou-se ser uma boa aproximação.

A relação experimental pode ser extraída dos resultados mostrados no capítulo anterior. Dos valores da relação entre a tensão gerada pela aceleração aplicada, pode-se extrair uma relação de tensão gerada em função da variação no comprimento de onda ($\Delta V/\Delta\lambda$) e, conseqüentemente, obtém-se $\Delta\lambda/g$.

Para se obter resultados mais próximos da realidade, os comprimentos de onda dos filtros foram ajustados de acordo com os valores do DC_{estatico}. Conforme previsto no capítulo 4, para redes sensoras e filtros com essas características o ponto de maior sinal de resposta AC, o qual os experimentos foram ajustados, representa uma diferença de aproximadamente 0,7 nm.

Os resultados mostrados na Tabela 6.1 quando comparados com a previsão em elementos finitos, apontam uma deformação na fibra menor do que a prevista. Isto pode ser justificado pelas condições de montagem

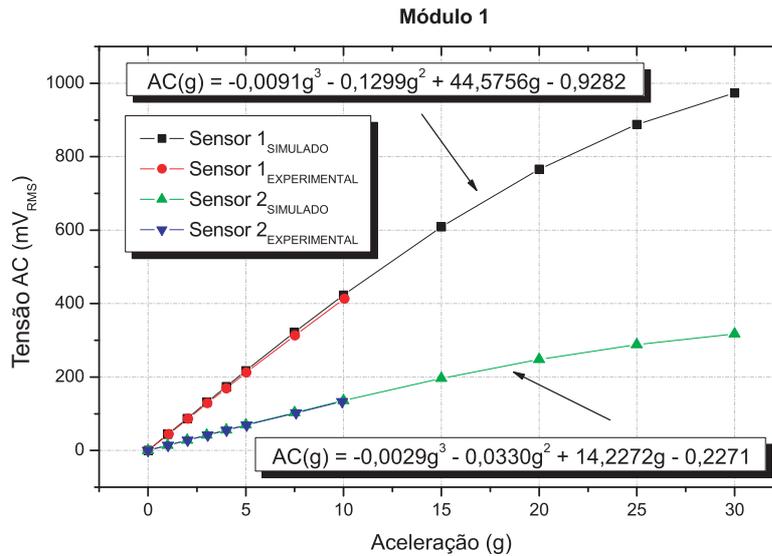


Figura 6.1: Resultados experimentais do protótipo 5 comparados com a curva de calibração determinada (Módulo 1 - Sensores 1 e 2).

que não conseguem ser representadas com absoluta fidelidade durante a modelagem, e pelo fato de que durante a modelagem em elementos finitos são feitas algumas simplificações, como por exemplo, considerar que a fibra está totalmente desprovida de seu revestimento plástico.

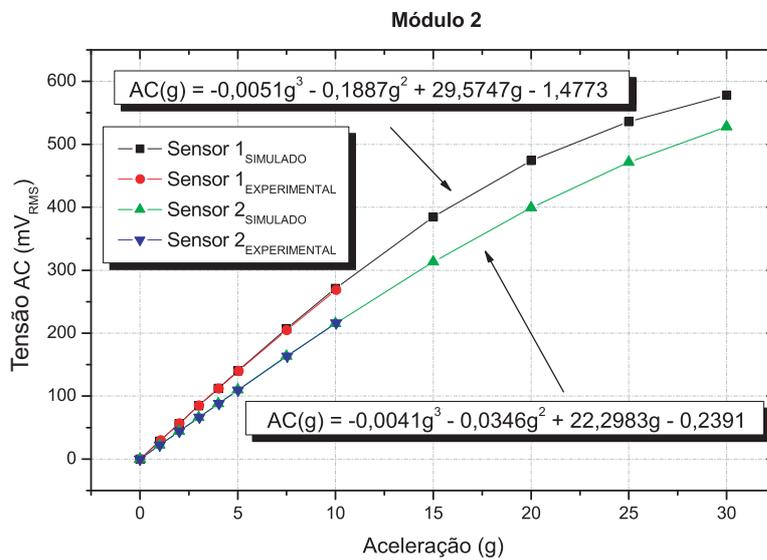


Figura 6.2: Resultados experimentais do protótipo 5 comparados com a curva de calibração determinada (Módulo 2 - Sensores 1 e 2).

As Figuras 6.1 e 6.2 mostram os resultados experimentais comparados com a curva de ajuste gerada para diversos valores de aceleração aplicados, para os dois módulos do protótipo 5 onde em cada um estão contidos dois sensores. As funções do terceiro grau utilizadas para ajustar os valores obtidos das simulação, apresentam uma diferença máxima se comparadas

com os valores experimentais menor do que 2%, e um valor de correlação acima de 0,9999.

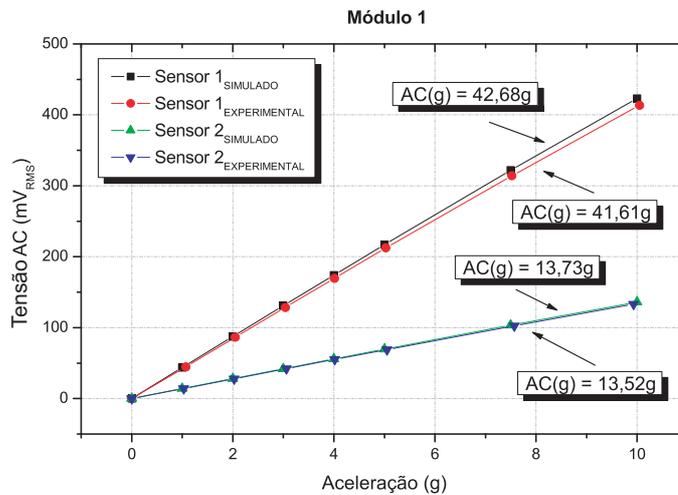


Figura 6.3: Ajuste linear simulado e experimental (Módulo 1).

Se consideramos apenas a faixa de medição de 10g, podemos ajustar os pontos simulados e experimentais de forma linear, Figuras 6.3 e 6.4. Usando este tipo de ajuste para esta faixa de amplitude observou-se que a diferença entre os resultados não ultrapassa 2,5%.

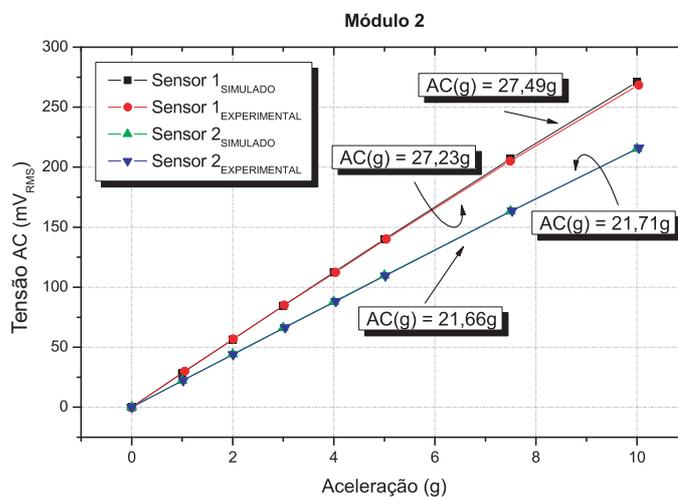


Figura 6.4: Ajuste linear simulado e experimental (Módulo 2).

De posse das curvas de calibração para cada sensor, é possível agora relacionar a tensão AC medida em aceleração (g) ou variação no comprimento de onda ($\Delta\lambda$), e então normalizar as amplitudes dos sensores empregados para cada módulo (ou eixo).

Como os resultados das calibrações apresentaram uma boa concordância com as simulações analíticas, foram feitas estimativas em relação

aos efeitos causados pela variação de temperatura. Os efeitos térmicos, equação 1-2, provocam uma variação no comprimento de onda dos sensores de aproximadamente 10 pm por 1°C de variação térmica. As simulações para este comportamento dos sensores foram feitas utilizando as mesmas relações empregadas para a simulação das deformações mecânicas, pois o efeito causado pela mudança de temperatura atua apenas modificando a posição relativa entre filtro e sensor para o sistema estático, isto é, alterando o valor do $DC_{estatico}$.

Neste caso, o que se busca é saber quais os fatores de correção para um sensor que opera a uma temperatura qualquer dentro de uma determinada faixa de trabalho, e também estimar até que valores de variação térmica em relação à temperatura de calibração os resultados podem ser considerados sem correções.

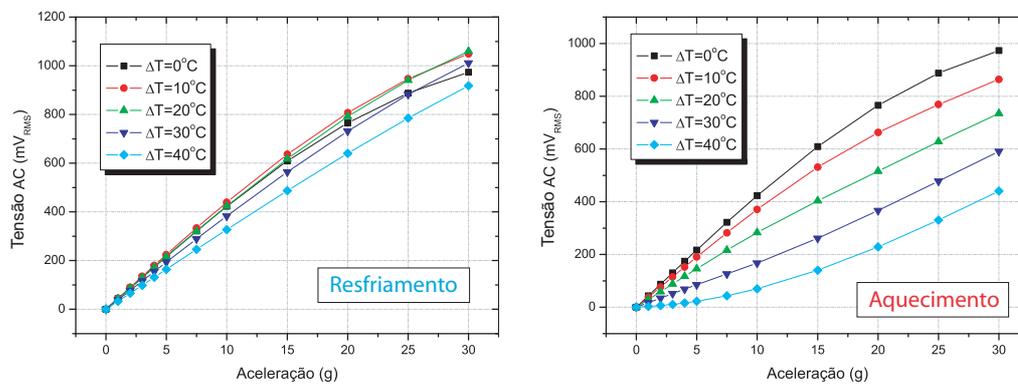


Figura 6.5: Resultados de simulações em amplitude para diferentes valores de temperatura ($\lambda_{filtro} > \lambda_{sensor}$).

Os valores empregados para as simulações foram os da Tabela 6.1. A Figura 6.5 mostra os resultados para estes dados sob diversas variações de temperatura com $\lambda_{filtro} > \lambda_{sensor}$.

Para um $\Delta T < 0$ não houve uma mudança de resultado tão significativa, entretanto, para um $\Delta T > 0$ percebem-se mudanças consideráveis. Isto ocorreu devido ao fato de que o filtro estava posicionado de modo a garantir o maior sinal AC e, conseqüentemente, isto favoreceu às amplitudes de resposta, mas reduziu significativamente a faixa de excursão da rede, tanto devido para esforços mecânicos quanto devido para efeitos térmicos.

As simulações mostram que somados os efeitos mecânicos e os térmicos, esta faixa de trabalho em comprimento de onda torna-se mais restritiva. Principalmente por causa da alta sensibilidade das redes de Bragg a temperatura.

O aumento de temperatura fez com que o comprimento de onda da rede aumentasse, aproximando e até igualando o valor do comprimento de onda do filtro, o que provocou estas distorções na resposta. Já o decréscimo de temperatura fez com que os comprimentos de onda se distanciassem sem que as distorções fossem tão grandes. A Figura 6.6, semelhante a 4.12, mostra separadamente a parte superior e inferior da resposta AC para diferentes variações na temperatura.

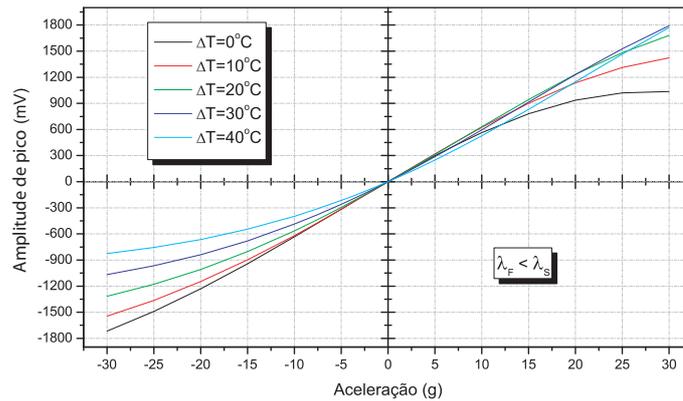


Figura 6.6: Simulações em amplitude de pico para diferentes valores de temperatura.

Pode-se estimar os efeitos de temperatura através da medição do valor da tensão DC em cada instante. Com isso estima-se qual a variação em relação a temperatura de calibração e que curva de ajuste gerada pelos pontos da simulação será utilizada.

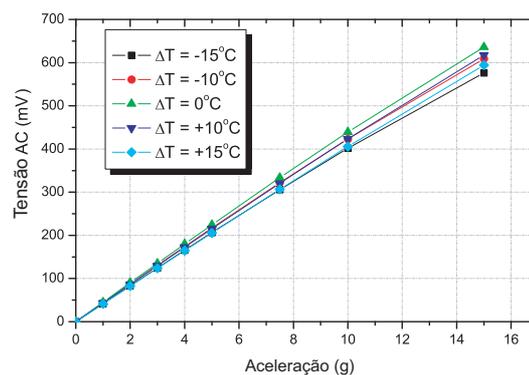


Figura 6.7: Desvio de linearidade para diferentes valores de temperatura.

Alguns resultados também mostram que em uma faixa dinâmica de operação de 15g de aceleração, com uma variação de $\pm 15^\circ\text{C}$, é possível se trabalhar de maneira aproximadamente linear. Desde que a posição espectral relativa filtro-sensor seja adequada, serão observadas oscilações

máximas na amplitude do sinal AC esperado de aproximadamente apenas 7% (Figura 6.7).

6.2

Aquisição de dados em tempo real

O LabVIEW foi o código usado pra criar uma rotina, ou como denominado pelo software, um instrumento virtual, capaz de converter os sinais analógicos em digitais, mensurá-los e realizar as operações necessárias, e armazenar os dados coletados de uma determinada sessão de testes dentro do intervalo de tempo desejado.

A lógica empregada para esta tarefa pode ser dividida em três partes. A primeira, é a que estabelece a comunicação entre os equipamentos e o computador, e conseqüentemente a converte os sinais analógicos em digitais. A segunda, é a que extrai, filtra e processa os sinais obtendo as informações desejadas. E a última parte, é a que exhibe os resultados de forma visual e os grava em arquivos.

A tarefa a ser realizada no processamento consiste em converter os sinais de entrada a cada instante em informação de deformação (em comprimento de onda ou em microstrains). Para isso, as curvas de calibração dos sensores são alimentadas com um valor de tensão retornando um valor de aceleração que é então convertido para deformação mecânica e/ou variação no comprimento de onda. No caso do sistema de medição com duas redes de Bragg, a deformação $\Delta\lambda_{\text{TOTAL}}$ é a subtração dos deformações de cada sensor e, eliminadas as deformações de temperatura, o resultado é a soma das deformações mecânicas apenas em cada sensor, Figura 6.8.

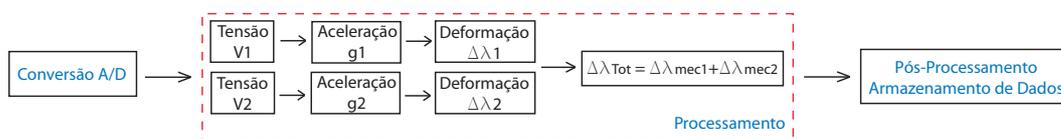


Figura 6.8: Fluxograma de aquisição e processamento de sinais.

A Figura 6.9 mostra a interface gráfica da rotina para sistemas de medição com duas redes de Bragg.

Nesta rotina os sinais das redes de Bragg em função do tempo são exibidos separadamente nos mostradores gráficos da esquerda, enquanto que a direita são mostrados os sinais resultantes da subtração dos sinais dos dois sensores. No mostrador maior, é exibido o sinal no domínio da frequência com estimativas relacionadas a amplitude e frequência do sinal de pico.

Os sinais de entrada dos sensores são filtrados através de subrotinas já existentes no programa. O filtro empregado é do tipo *butterworth* com quatro opções de operação (*lowpass*, *highpass*, *bandpass*, *bandstop*), e além disto são realizadas médias de acordo com o desejo do usuário. O quadro verde concentra os controles que determinam o número de médias a serem feitas, o resultado destas médias bem como o seu desvio padrão, e qual a natureza do sinal analisado (AC ou DC).

Outros controles como o número de amostras, a taxa de amostragem, tipo de janelas, unidade de medição, estão visíveis e disponíveis ao usuário. Os dados registrados são gravados em arquivos no formato *.txt* com a data e o horário indicados.

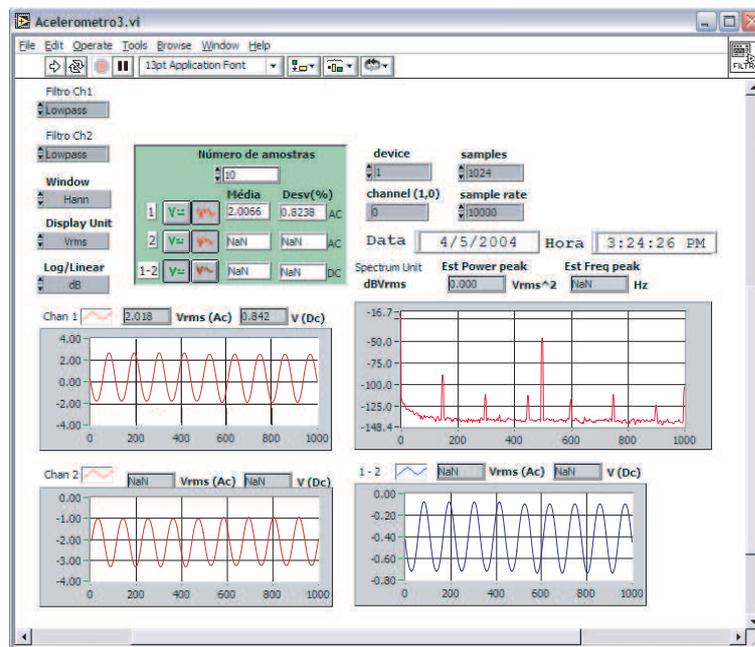


Figura 6.9: Interface gráfica da rotina em LabVIEW.

Para o sistema de medição com apenas uma rede de Bragg, o processamento é bastante semelhante, entretanto o sinal de saída é que é diferente, equação 4.3. A disposição dos comandos e mostradores da interface gráfica é bastante semelhante a da Figura 6.9, com a diferença de que o mostrador no canto direito inferior, neste caso, exibe o resultado de $\text{Log} = \frac{S_1}{S_2}$.

No apêndice B, a Figura B.1 mostra o diagrama principal da rotina de aquisição de dados com duas redes. Nesta rotina ainda não estavam implementadas as equações de calibração, pois um dos testes submetidos ao sistema foi o de justamente adquirir os dados usados na calibração simultaneamente enquanto estes valores eram anotados através dos equipamentos convencionais.

Não houve nenhuma menção ou distinção a respeito de que maneira haviam sido adquiridos os dados usados na calibração, uma vez que as diferenças verificadas foram desprezíveis.

6.3 Medições de longa duração

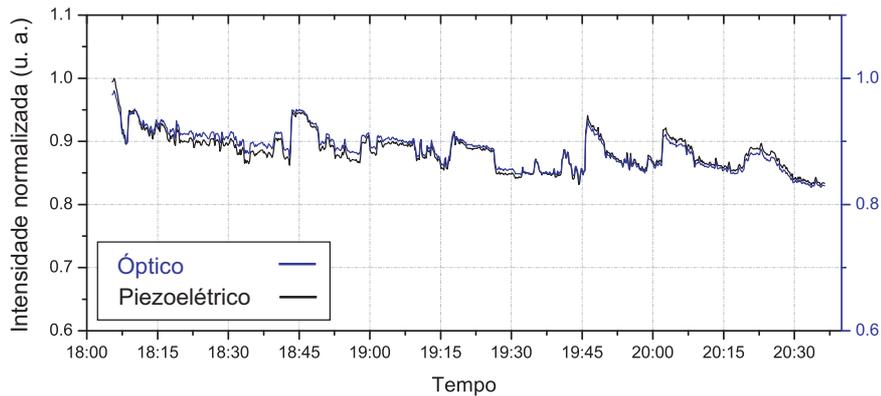


Figura 6.10: Teste de longa duração do acelerômetro óptico.

Comprovada a exatidão do sistema durante a calibração dos sensores, algumas medições de longa duração foram realizadas para aferir a estabilidade de medição do sistema óptico frente ao sistema convencional piezoelétrico. Com isso, pode-se avaliar também os efeitos da variação de temperatura nas medições.

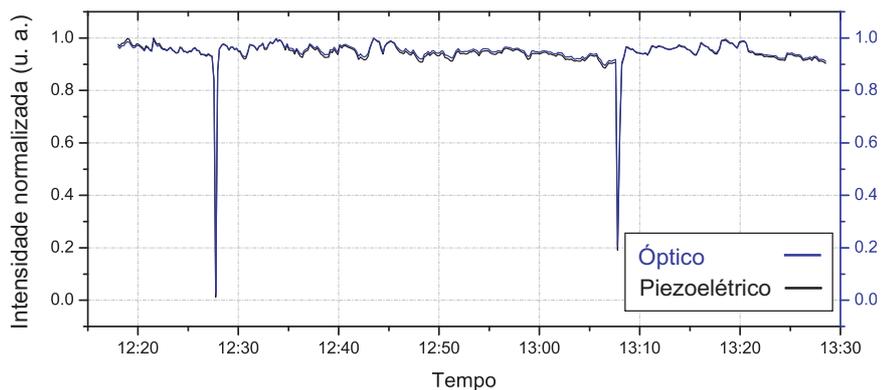


Figura 6.11: Teste de longa duração do acelerômetro óptico com interrupções.

Os acelerômetros ópticos foram colocados em funcionamento com o mini acelerômetro piezoelétrico acoplado, e ambos os sinais eram simultaneamente adquiridos pelo sistema. Foi registrado também um sinal de

referência medido diretamente na fonte luminosa afim de que fossem descontados efeitos de flutuação causados por esta.

Foram aplicadas acelerações constantes em frequências fixas de vibração durante longos períodos de tempo, sob condições externas com algumas flutuações de temperatura. O laboratório é constantemente refrigerado, mas em determinados horários do dia, devido ao fluxo de pessoas, a temperatura costuma oscilar bastante. Em um dos resultados, medido durante a madrugada, as variações térmicas foram bastante reduzidas devido à ausência de circulação de pessoas.

A Figura 6.10 mostra os resultados de uma medição de aproximadamente 150 minutos de duração que compara os sinais medidos, e normalizados, pelo sistema óptico (em azul) com o convencional (em preto). Outro resultado semelhante é o mostrado na Figura 6.11, para uma medição de 90 minutos de duração, que apresenta variações abruptas programadas durante as medições (amplitude zero por 5 segundos). Nos dois resultados, é comprovada a boa concordância em todo o período de medição.

Descontados os efeitos da oscilação na potência da fonte luminosa, alterações no valor de tensão DC dos sensores indicariam efeitos de variações de temperatura. Conforme mencionado anteriormente, os filtros são posicionados de forma a maximizar o sinal de tensão AC e minimizar flutuações deste sinal em relação a alterações no sinal DC dentro de certos limites.

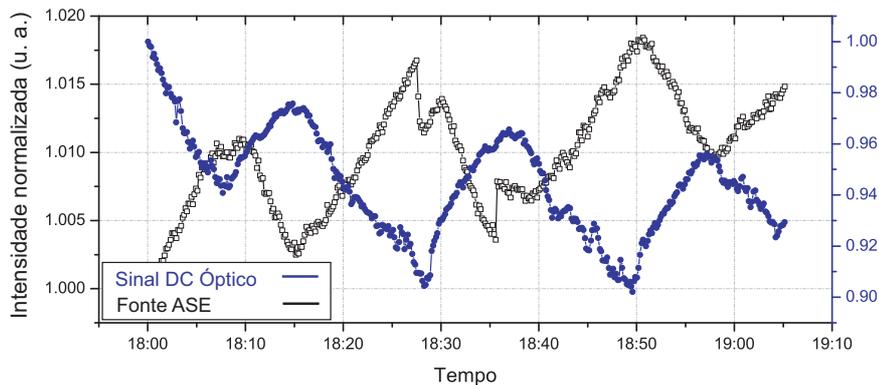


Figura 6.12: Efeito da variação de temperatura nos sensores (fora de fase).

As Figuras 6.12 e 6.13 mostram os resultados obtidos comparando-se os sinais provenientes da fonte luminosa e do sinal DC medido pelo software. O comportamento apresentado é típico de uma variação térmica do ambiente de medição. Através de um acoplador 99/1 foi possível medir a potência da fonte luminosa (Fonte ASE) na derivação de menor potência (1% da potência total).

Em um dos resultados exibidos tem-se o comportamento da fonte luminosa fora de fase com o da medição do sinal DC no acelerômetro, e no outro, em fase com este. Isto se deve ao fato de que para o primeiro resultado o filtro estava posicionado de um lado da rede de Bragg, enquanto que no segundo, o filtro foi colocado do outro lado resultando em comportamentos contrários para uma mesma forma de variação térmica.

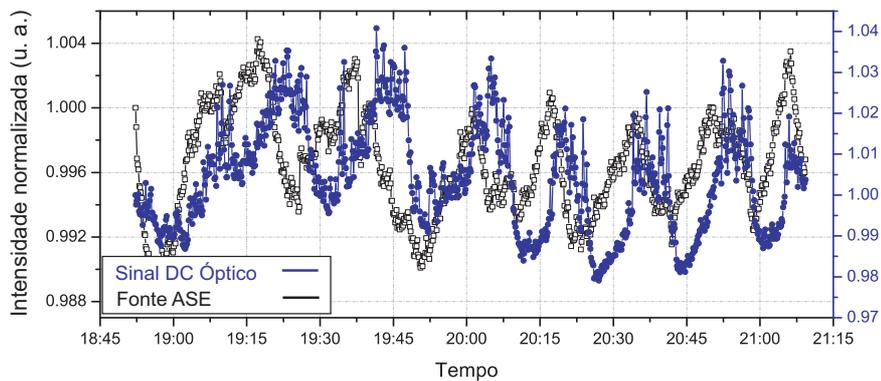


Figura 6.13: Efeito da variação de temperatura nos sensores (em fase).

As flutuações nestes sinais indicam que a fonte ASE utilizada possui uma excelente estabilidade térmica com flutuações de potência não superiores a $\pm 1\%$, enquanto que no acelerômetro foram notadas flutuações bem maiores em torno de $\pm 4\%$.

As variações anotadas nos gráficos das Figuras 6.12 e 6.13 apresentam uma pequena diferença em seus valores percentuais se comparados com o da fonte luminosa. Esta diferença é devida ao posicionamento relativo entre o sensor e o filtro óptico que, para as duas medições feitas em lados opostos do sensor, não possuíam exatamente a mesma distância espectral.

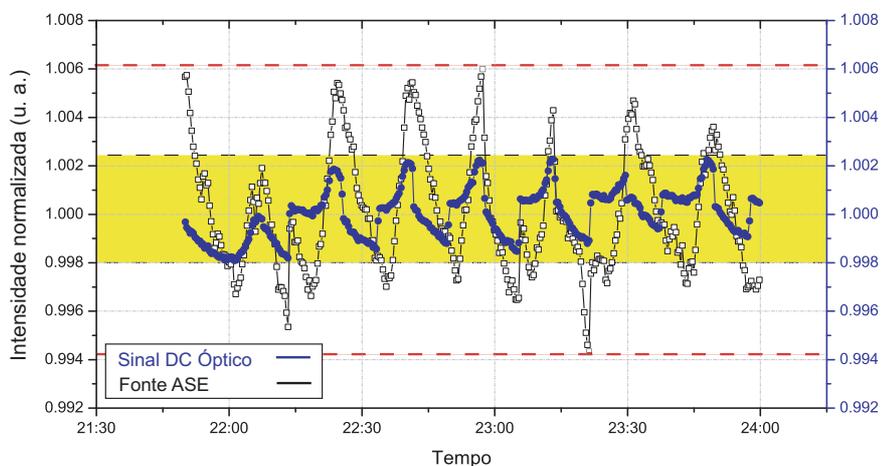


Figura 6.14: Efeito da variação de temperatura com $\lambda_{\text{filtro}} = \lambda_{\text{sensor}}$ (durante a noite).

Para se comprovar este fato, foi realizado o mesmo teste de medição dos efeitos térmicos, mas com os filtros ajustados na mesma posição espectral do sensor para que obtivesse um maior valor de tensão DC, ou seja, o filtro foi “casado” com o sensor. Nessas condições, medidas de sinal AC são reduzidas, e da mesma forma, as variações no sinal DC devidos à temperatura são bastante reduzidos.

As Figuras 6.15 e 6.14 mostram estes resultados. A faixa amarela corresponde à variação dos pontos medidos no sensor, enquanto que os pontos limitados pelas linhas tracejadas em vermelho correspondem a faixa de variação da fonte luminosa para o mesmo efeito. As variações apresentadas pela fonte foram de aproximadamente $\pm 0,6\%$, enquanto que as variações apresentadas pelas redes foram de $\pm 0,2\%$ apenas.

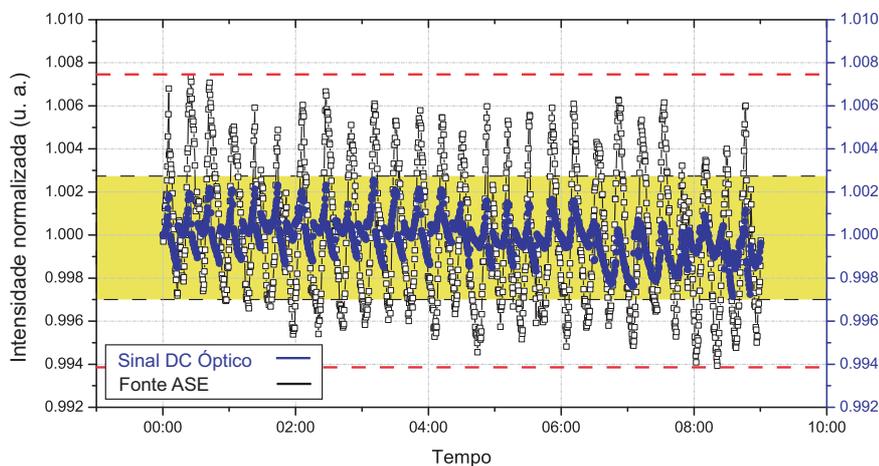


Figura 6.15: Efeito da variação de temperatura com $\lambda_{\text{filtro}} = \lambda_{\text{sensor}}$ (durante a madrugada).

Os resultados apresentados para a variação térmica nas redes, como esperado, foram bastante reduzidos e inclusive inferiores ao da fonte ASE, e mesmo as variações assinaladas pela fonte, foram menores nestes dois últimos resultados devido aos motivos já comentados anteriormente.