

3

Análise do sistema baseado em demodulação óptica usando dois filtros fixos para interrogar sensores a rede de Bragg em fibras ópticas

3.1. Introdução

Rede de Bragg em fibras ópticas (FBG) tem mostrado ser uma tecnologia confiável na aplicação como sensor de temperatura e deformação [6,9]. Ela também tem sido incorporada em vários transdutores onde a avaliação da quantidade de interesse é baseada na medida desses dois parâmetros físicos [7,23,24]. Para obter as informações sobre o comprimento de onda, várias técnicas têm sido propostas e demonstradas [9], e algumas são comercialmente disponíveis. Diferentes técnicas de demodulação são comparadas baseadas na capacidade de multiplexação, tempo de resposta, estabilidade ao longo do tempo, exatidão, e custo por canal. Existem duas possibilidades básicas, a primeira é medir o espectro inteiro refletido da rede e encontrar a posição de pico e a outra alternativa é medir a potência óptica refletida em uma ou mais regiões de comprimento de onda.

Com o primeiro método é fácil multiplexar um conjunto de redes sensoras com baixa incerteza. As desvantagens desse método são o alto custo, independente do número de sensores a ser interrogado e o tempo de resposta limitado. O segundo método, baseado em demodulação óptica usando filtros fixos, requer um circuito optoeletrônico para cada sensor. O custo individual de um canal de leitura é relativamente baixo, e o tempo de resposta pode ser muito curto, limitado pelo fotodetector.

Os parâmetros importantes para o sistema de demodulação baseado em filtros fixos são a posição de pico e a largura de banda a meia altura, do sensor e dos filtros. Esses parâmetros, em conjunto com a densidade de potência espectral total, ditarão a faixa dinâmica e a incerteza na medida. Entretanto, não é óbvio

quais são as limitações desta técnica, e qual deveria ser a construção para otimizar o sistema para uma aplicação específica.

Neste capítulo é apresentado um modelo numérico para um sistema baseado em dois filtros fixos que será comparado com resultados experimentais. O método baseado em dois filtros fixos será confrontado com o método usando um único filtro. Com a validade do modelo teórico é possível estender o problema para várias aplicações.

3.2. Modelo teórico

A questão é, uma vez conhecida a forma espectral do sensor e dos dois filtros, quão exato pode ser determinada a posição espectral do pico do espectro do sensor medindo a potência óptica transmitida pelos dois filtros. Neste modelo, o primeiro passo é aproximar a forma espectral do sensor e dos dois filtros por uma gaussiana, que é uma expressão matemática simples de ser manipulada e apresenta ser uma boa aproximação. Uma constante, *offset*, é adicionada à gaussiana para representar o ruído nos fotodetectores associado à eletrônica. As expressões para a refletividade do sensor S e dos filtros F_i são dadas por:

$$S(\lambda, \lambda_s) = y_0 + S_0 \exp[-\alpha_s (\lambda - \lambda_s)^2] \quad (3.1)$$

$$F_i(\lambda) = y_{0i} + F_{0i} \exp[-\alpha_{Fi} (\lambda - \lambda_{Fi})^2] \quad \text{onde } \alpha = \frac{4 \ln 2}{b^2}; i = 1, 2. \quad (3.2)$$

onde λ é o comprimento de onda, $\lambda_{S,Fi}$ representam os comprimentos de onda centrais do sensor e dos filtros, y_0 é o *offset* e b é a largura de banda à meia altura (FWHM-*Full Width at Half Maximum*). Os três espectros, com seus respectivos ajustes gaussianos são mostrados na figura 3.1, onde pode-se observar que ambos os filtros são bem representados pelos ajustes, enquanto que para o sensor, embora apresente algumas subestruturas no espectro medido, a expressão ajusta-se razoavelmente bem.

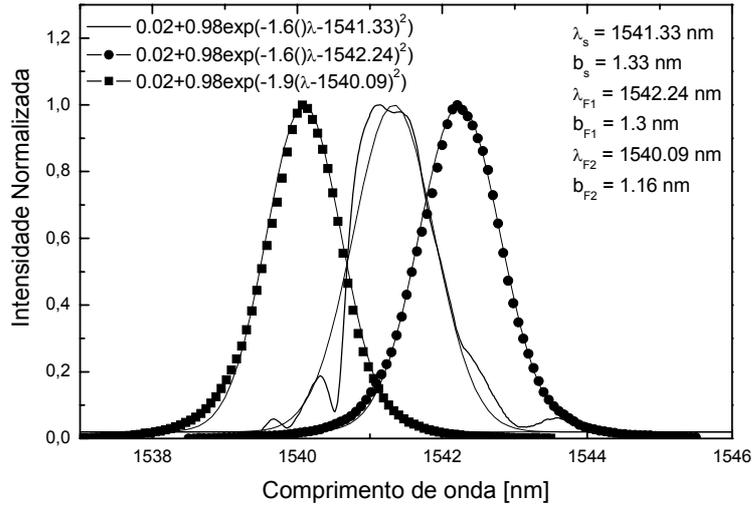


Figura 3.1 - Espectro de transmissão dos filtros (pico em 1540.1 nm e 1542.2 nm) e espectro refletido do sensor (pico em 1541.3)

O segundo passo é calcular a convolução do espectro da rede sensora com cada filtro. A voltagem lida associada à potência óptica medida pelo fotodetector pode ser considerada como a convolução entre o sensor e o filtro. Matematicamente, usando a definição de convolução, equação (A.1) e as equações (3.1) e (3.2), a voltagem pode ser expressa como:

$$V_i(\lambda_s) = \int_{-\infty}^{\infty} \beta [S(\lambda, \lambda_s) \cdot F_i(\lambda)] d\lambda \quad (3.3)$$

$$\frac{V_i(\lambda_s)}{\beta} = 2ay_0y_{0i} + y_0F_{0i}\sqrt{\frac{\pi}{\alpha_{Fi}}} + y_0S_0\sqrt{\frac{\pi}{\alpha_s}} + F_{0i}S_0\sqrt{\frac{\pi}{\alpha_{Fi} + \alpha_s}} \exp\left[-\frac{\alpha_{Fi}\alpha_s}{\alpha_{Fi} + \alpha_s}(\lambda_s - \lambda_{Fi})^2\right] \quad (3.4)$$

onde a é um constante de limite de integração e β é uma constante que leva em conta a potência emitida pela fonte, perdas no circuito óptico e nos fotodetectores. O resultado deste cálculo, para uma separação espectral específica entre filtros de 5nm, é mostrada na figura 3.2. É importante ressaltar que os resultados obtidos na figura 3.2 são oriundos dos resultados da figura 3.1, mas neste caso, as posições dos espectros dos filtros são diferentes.

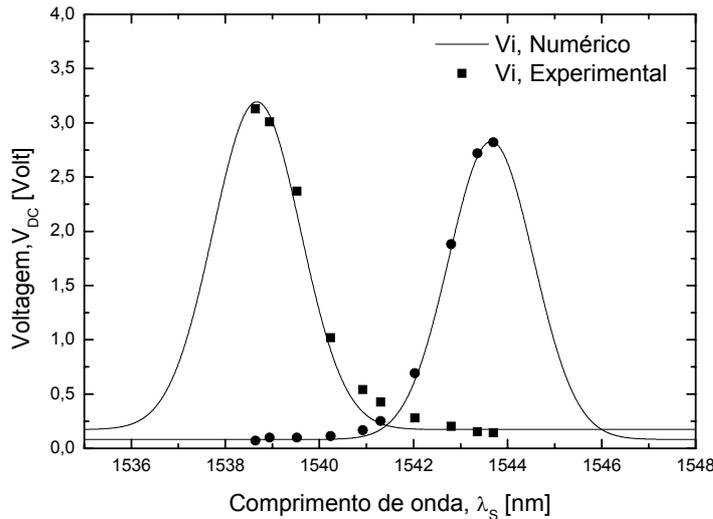


Figura 3.2 - Resultados numéricos e experimentais relativos aos dois fotodetectores, V_1 e V_2 , em função do comprimento de onda do pico espectral do sensor para uma separação entre os filtros de 5nm

Pode-se observar, figura 3.2, que os resultados teóricos divergem dos experimentais no primeiro pico de convolução na região fora do centro, isto se deve ao fato do sensor apresentar subestruturas no seu espectro.

Para compensar qualquer possível variação na potência, foi considerada a razão entre as grandezas lidas nos fotodetectores.

$$f = \frac{V_1}{V_2} \quad (3.5)$$

Um exemplo de f , calculado e medido como uma função da posição de pico do sensor, pode ser obtido dos dados mostrados na figura 3.2. O resultado pode ser visto na figura 3.3.

Novamente, os resultados teóricos e experimentais apresentam certas divergências devido ao perfil do espectro do sensor, mas de forma geral, os resultados mostram que a teoria apresentada é válida. Posteriormente, será apresentado um resultado considerando esta teoria, mas ao invés de fazer um ajuste nos espectros dos sensores será usado o espectro verdadeiro. Assim, ficará mais evidente a concordância dos resultados experimentais e teóricos.

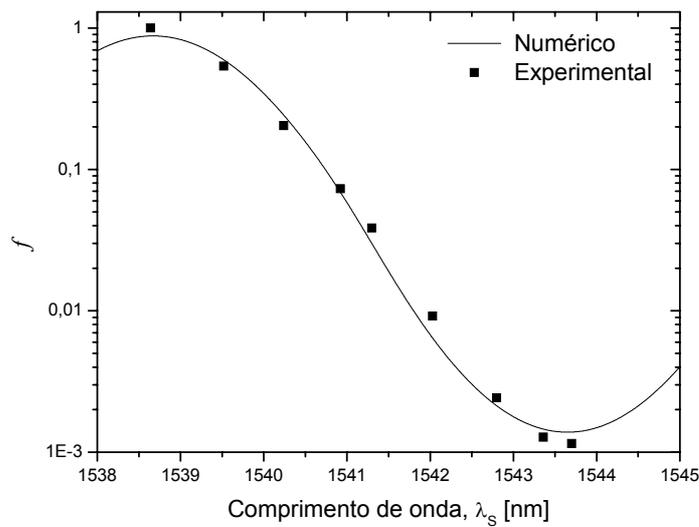


Figura 3.3 - Resultados numéricos e experimentais para a função f em função do comprimento de onda do pico espectral do sensor obtido a partir dos dados da figura 3.2

Para estimar a incerteza de medida de um sensor com uma função de saída igual à mostrada na figura 3.3, foi assumido que cada fotodetector deveria apresentar flutuações nas partes óptica e eletrônica do sistema. As flutuações na parte óptica devem-se principalmente a variações de acoplamento nos acopladores a fibra, as quais têm uma certa dependência com relação à polarização da luz e à temperatura. Estas flutuações ocorrem em baixa frequência e, com o sistema na temperatura normal de laboratório ($23 \pm 2^\circ\text{C}$), foi encontrado seu valor em torno de 0.1% do sinal medido independente da potência óptica absoluta. Considerando as flutuações na eletrônica, em baixo nível de potência, a relação sinal-ruído é prevista ser proporcional à raiz quadrada do tempo de resposta e proporcional à potência óptica nos fotodetectores. Isso significa que 0.1% do sinal medido é a incerteza limite para medidas de longo período e que o tempo de resposta mínimo compatível com ele depende do circuito eletrônico e da potência óptica disponível nos fotodetectores.

Considerando essas duas fontes de erro, foram definidas as incertezas DC e AC sobre os resultados medidos da voltagem como

$$\delta V_{DCi} = 10^{-3} V_{DCi} \text{ (longo período)}$$

$$\delta V_{ACi} = \text{Ruído medido experimentalmente, onde } i = 1, 2.$$

Estes dois componentes de incerteza para a razão resultante são dados por

$$\delta f_{AC} = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial V_{DC1}} \delta V_{AC1}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial V_{DC2}} \delta V_{AC2}\right)^2} \quad (3.6)$$

$$\delta f_{DC} = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial V_{DC1}} \delta V_{DC1}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial V_{DC2}} \delta V_{DC2}\right)^2}$$

onde $f = \frac{V_{DC1}}{V_{DC2}}$.

Depois de obtida $f(\lambda_s)$ numericamente ou experimentalmente, a incerteza associada ao comprimento de onda, $\delta\lambda_s$, é calculada pela expressão:

$$\delta\lambda_s = \left| \frac{df}{d\lambda_s} \right|^{-1} \delta f \quad (3.7)$$

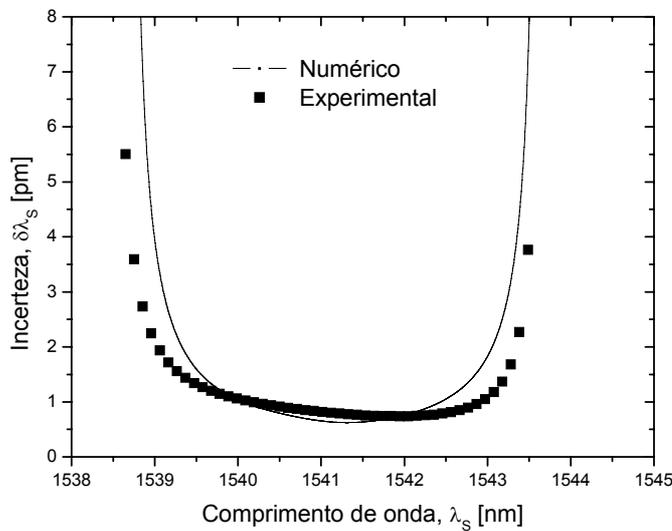


Figura 3.4 - Incerteza teórica e experimental no limite de baixa frequência para uma separação entre filtros de 5nm

As incertezas teórica e experimental no limite de baixa frequência baseadas na curva f , para uma separação entre filtros de 5 nm são mostradas na figura 3.4. Além da boa concordância entre os dados experimentais e a teoria, as curvas têm uma faixa de operação bem definida entre dois comprimentos de onda (1539 a

1543 nm) onde fora deste limite a incerteza tende a valores altos. Estes pontos onde a incerteza diverge são devidos a pontos críticos na função f , cujo um pequeno erro na sua leitura provoca um elevado desvio na posição do comprimento de onda. Neste caso específico as incertezas abaixo de 1 pm são possíveis e a faixa de operação de mais de 4 nm, com boa qualidade de medida, é também prevista para os parâmetros usados.

Como serão apresentados em algumas situações, os resultados experimentais mostram incertezas relacionadas com os ruídos eletrônicos menores que as previstas no limite de baixa frequência. Neste caso a pior situação deve ser considerada, pelo menos, para aplicações de longo período.

3.3. Montagem experimental e resultados

A montagem experimental é esquematicamente apresentada na figura 3.5. Ela é usada para validar os resultados teóricos e para medir a dependência da incerteza com a frequência de resposta do sistema de detecção. Além dos componentes fundamentais do sistema (LED - fonte de luz de largura espectral ampla, filtros de transmissão Fabry-Perot, sensor a rede de Bragg, acopladores, e fotodetectores) um analisador de espectro óptico (OSA) foi usado para monitorar a posição de pico do espectro do sensor. Os filtros podiam ser ajustados na faixa de 1530 – 1560 nm e o sensor foi fixado a uma lâmina de aço fixada a um suporte (deslocando a lamina é possível obter deformações de tração e de compressão), de tal forma que o seu comprimento de onda podia ser ajustado em uma faixa de \pm 4 nm ao redor de 1541.3 nm. Os espectros são mostrados na figura 3.1 e todos os três têm uma largura de banda à meia altura, FWHM, muito parecidas, de 1.3 nm para os filtros e de 1.2 nm para o sensor.

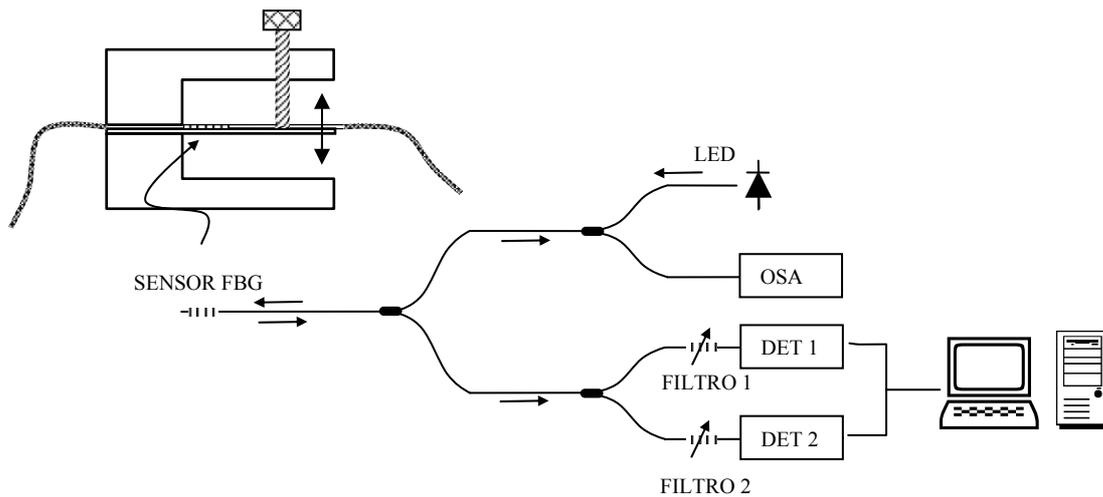


Figura 3.5 - Montagem experimental

O sistema optoeletrônico foi montado para operar com baixa potência. O LED usado era alimentado com 60 mA e tinha uma potência óptica de saída de 30 μW , modulado em 2 kHz. Conectores, acopladores e filtros geraram perdas tais que as potências máximas lidas nos fotodetectores eram na faixa de 0.2 a 1.2 nW.

O sinal elétrico proveniente dos fotodetectores foi conectado a um conversor AD controlado por um software desenvolvido em *Labview*. O sinal foi adquirido com uma taxa de 1000 amostras/s por canal e era possível, através do número de amostragem, mudar o tempo de resposta do sistema. Por exemplo, amostragens de 1000, 100 e 10 equivaliam a um tempo de resposta de 1, 0.1 e 0.01 segundos. O valor médio obtido pelo fotodetector 1 foi dividido pelo valor médio obtido pelo fotodetector 2 para gerar a função f do sensor. O nível do ruído foi obtido usando uma função do próprio *Labview*, a qual separa uma seqüência de números em níveis DC que é a media e o valor RMS do nível AC. O valor DC foi usado como o valor de saída de interesse, enquanto que o valor AC foi considerado como ruído do sistema. A flutuação do sistema durante um dia operando continuamente foi de aproximadamente 10^{-3} do sinal DC. Como mencionado anteriormente, esse valor foi usado como incerteza para longo período nos cálculos teóricos, o que demonstra a adequação da escolha para os cálculos realizados.

O experimento consistiu em medir a voltagem de saída de cada fotodetector como uma função do comprimento de onda do pico espectral do sensor, que era medido com o auxílio do analisador de espectro óptico (OSA). Para cada comprimento de onda do sensor eram medidos o valor médio da voltagem e o

ruído para três tempos de integração (0.01, 0.1 e 1 s). Todo o processo foi repetido para separações espectrais entre filtros (SF) de 4, 5, e 6 nm e, adicionalmente, para a separação de filtros de 5 nm foi repetido o processo considerando um nível de potência óptica distinto.

Na figura 3.6, são apresentados os resultados de voltagem obtidos com um tempo de integração de 1s, enquanto na figura 3.7, é mostrada a função $f = V_1/V_2$ correspondente. Os dados da curva caracterizada pela separação entre filtros de 5 nm com alta potência, figura 3.6, foram considerados para representar a função f em um sistema com um único filtro, já conhecido, com o objetivo de confrontar com um sistema com dois filtros, proposto. A escolha destes dados foram aleatórios, pois poderia ser qualquer um.

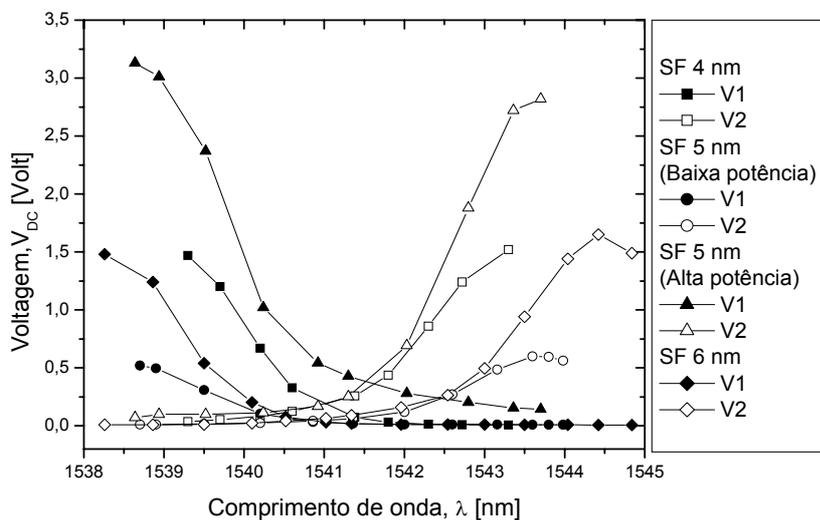


Figura 3.6 - Voltagem obtida em função da posição de pico do sensor para separações espectrais entre filtros (SF) de 4, 5 e 6 nm. Para separação entre filtros de 5 nm, foram usados dois níveis de potência

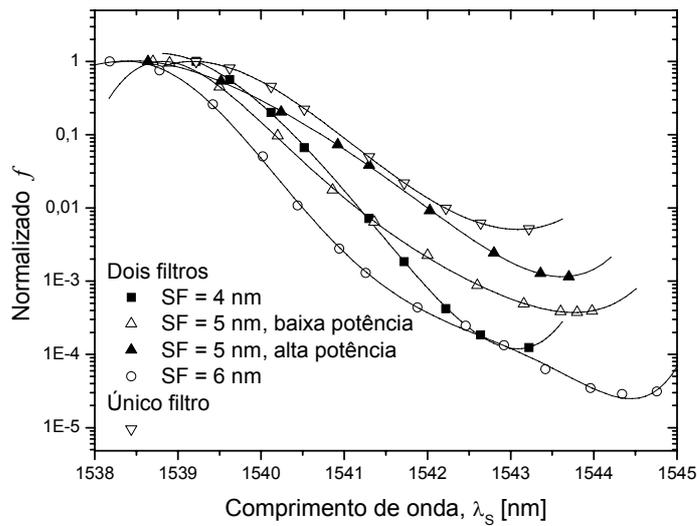


Figura 3.7 - Função $f = V_1/V_2$ normalizada correspondente às mesmas situações apresentadas na figura 3.6. Para o sistema com um “único filtro” foram considerados os dados de máxima potência, figura 3.6

Os dados experimentais foram ajustados por meio de polinômios, e também são incluídos na figura 3.7. A derivada da curva foi calculada para cada ponto e foi usada, com o ruído medido, para obter a incerteza esperada em termos do comprimento d onda do pico espectral do sensor, equação (3.7). As figuras 3.8 (a), (b) e (c) respectivamente, mostram as incertezas para as separações entre filtros de 4, 5 e 6 nm, enquanto a figura 3.8 (d) ilustra o caso de único filtro. Todos eles comparam o tempo de integração de 1 segundo, $\delta f = V_{AC}$, com 0.1% no limite de baixa frequência, $\delta f = 10^{-3} V_{DC}$.

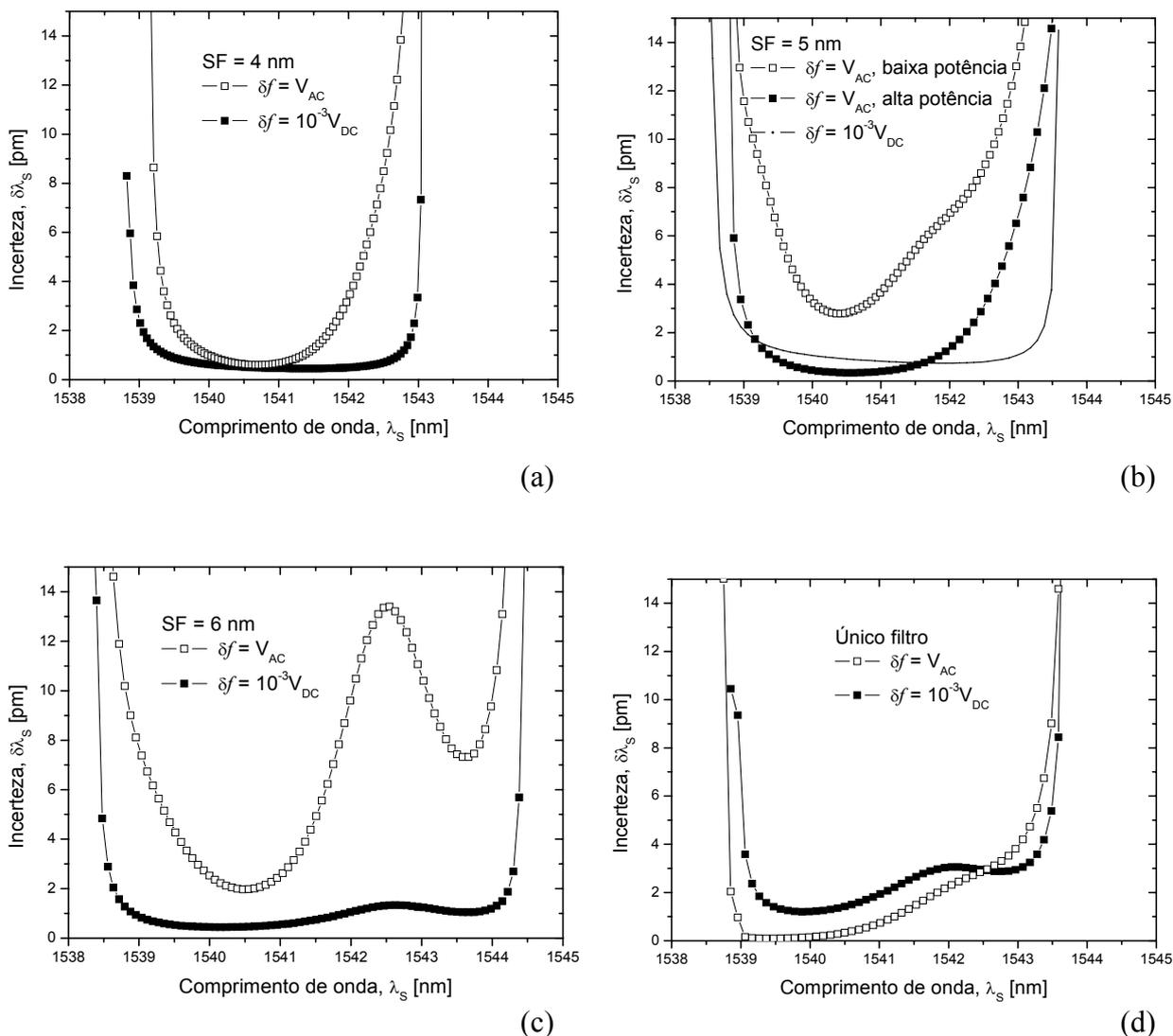


Figura 3.8 - Incertezas para o tempo de integração de 1 segundo e para 0.1% no limite de baixa frequência para diferentes separações entre filtros: 4 nm (a), 5 nm (b), 6 nm (c) e único filtro (d)

Deve-se notar que através das figuras 3.8 fica claro que o ruído optoeletrônico pode ser reduzido a valores inferiores a 0.1% do sinal DC em longo período e que o tempo de integração necessário depende da potência óptica que chega nos fotodetectores. Para ambas as separações de filtros de 4 e 5 nm nenhum dos fotodetectores opera em baixa potência ao longo da faixa de operação. Isso permite que, com 1 segundo de tempo de integração, o limite mínimo de incerteza seja encontrado em uma parte considerável da faixa de operação, figuras 3.8 (a) e (b) e, em alguns casos, até mesmo níveis mais baixos sejam obtidos, como é mostrado na figura 3.8 (b).

Para uma separação de filtros de 6 nm, figura 3.8 (c), com um tempo de integração de 1 segundo, a incerteza é ainda uma ordem de grandeza maior que o limite de baixa frequência. Além disto, um pequeno aumento na região central pode ser observado. Ambos efeitos são devidos aos baixos níveis de potência obtidos nos fotodetectores. Se a separação entre os filtros for aumentada esse efeito será mais acentuado e, para estes filtros e sensor específicos, 6 nm é a máxima separação espectral aceitável, mantendo a incerteza máxima de 12 pm. Em todos os casos, incluindo o sistema com um único filtro, uma incerteza próxima ou até mesmo menor que 1 pm é prevista na faixa de operação. Estes resultados são ilustrados na tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Valores experimentais da faixa de operação em nm onde a incerteza na determinação do comprimento de onda do pico espectral do sensor está abaixo de 1 e 10 pm

Separação entre filtros	Tempo de integração: 1 segundo		Limite de baixa frequência	
	$\delta\lambda_s < 1\text{pm}$	$\delta\lambda_s < 10\text{pm}$	$\delta\lambda_s < 1\text{pm}$	$\delta\lambda_s < 10\text{pm}$
4nm	1.4	3.4	3.4	4.2
5nm	2.4	4.7	2.9	5.0
6nm	0	5.5	5.0	6.0
1 filtro	2.2	4.8	0	4.8

Estes resultados indicam que, para os parâmetros dos filtros e sensor usados, as configurações dos filtros com separação de 4 e 5 nm sempre têm uma faixa de operação onde a incerteza na medida, para o limite de baixa frequência, está abaixo de 1 pm, enquanto que a configuração para um sistema com um único filtro mostra um mínimo de 1.5 pm em uma pequena região da faixa de operação. Se uma incerteza de 10 pm é aceitável, a faixa de operação não muda muito de um sistema com um único filtro para dois filtros. É importante observar que com um sistema com um único filtro é mais fácil obter valores de incerteza próximos ou até mesmo menores que o limite de baixa frequência do que com um sistema com dois filtros. Isso pode ser entendido porque quando dois filtros são usados sempre existe um fotodetector operando com baixa potência óptica.

As influências da potência óptica e do tempo de integração na incerteza foram experimentalmente estudadas. Na figura 3.9 são apresentadas as curvas de incerteza para uma separação entre filtros de 5 nm medidas com dois níveis de potência que diferem por um fator 6. Os dados para a maior potência foram multiplicados por 6, figura 3.6, para enfatizar que a relação sinal-ruído é

linearmente proporcional ao nível de potência. Isso indica que o ruído é basicamente um ruído de fundo, independente do nível de potência absoluto.

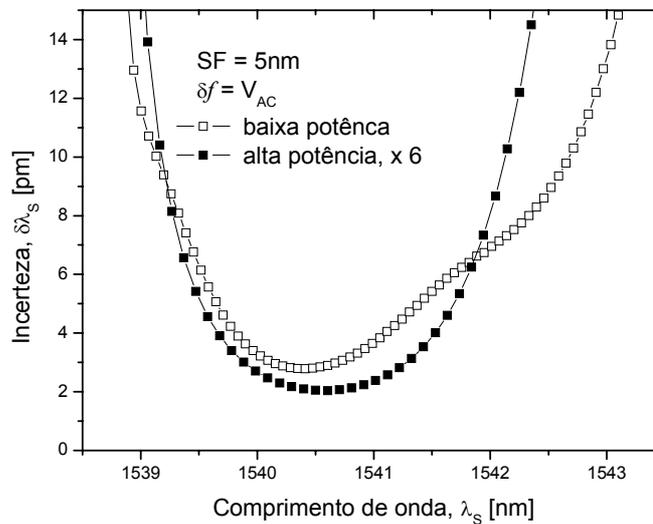
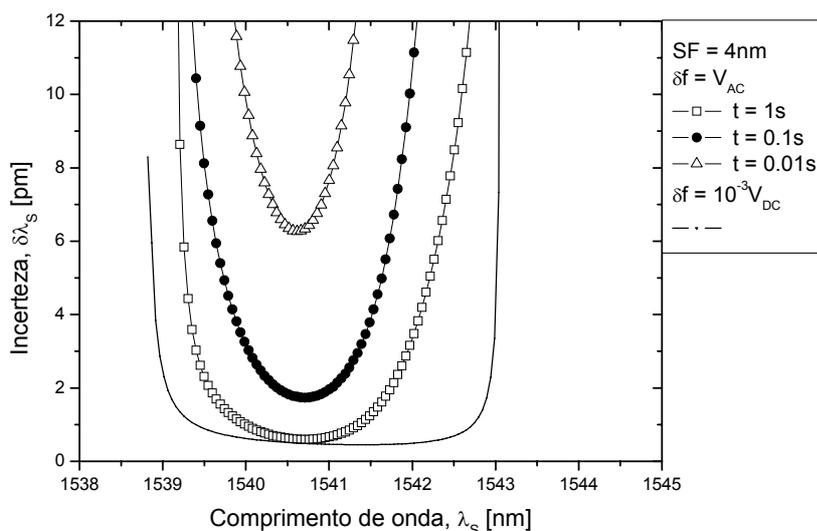


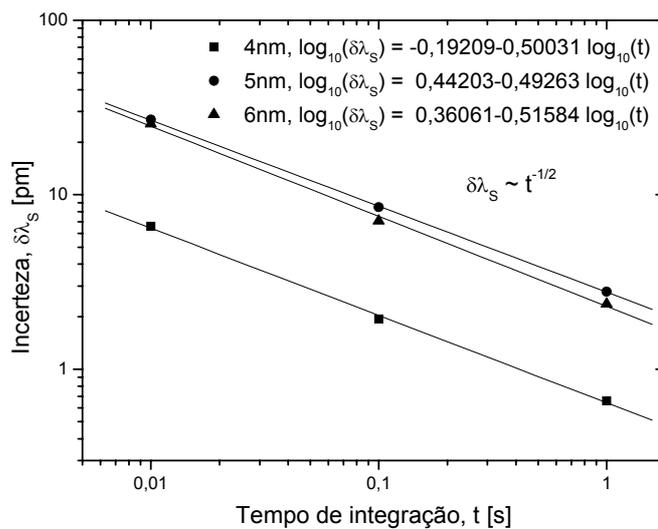
Figura 3.9 - Incerteza para tempo de integração de 1 segundo, para uma separação de filtros de 5 nm com dois níveis de potência que diferem por um fator 6. Os dados obtidos com maior potência foram multiplicados por 6

A figura 3.10 (a) mostra um exemplo da incerteza para diferentes tempos de integração com o mesmo nível de potência e separação entre filtros. A mínima incerteza para as três separações entre filtros é ilustrada na figura 3.10 (b) e confirma a dependência linear da raiz quadrada da relação sinal-ruído com respeito à largura de banda do sistema de fotodetecção.

Se for desejada resposta mais rápida, com o mesmo valor de incerteza, é necessária uma fonte de luz com maior potência. Isto não seria difícil uma vez que, SLEDs disponíveis hoje no mercado facilmente chegam a 200 vezes o valor da potência que foi usada neste experimento e que foi introduzida uma perda extra de 3 dB para incluir o OSA no sistema. Isto significa que, uma fonte de luz pode ser usada para multiplexar dez sensores, com resultado igual ou melhor que os apresentados aqui, ou que uma operação em uma faixa de frequência de vários kHz com resolução de pm seja possível para um sistema de sensores.



(a)



(b)

Figura 3.10 - (a) Incerteza no comprimento de onda para tempos de integração de 0.01, 0.1 e 1s com separação entre filtros de 4 nm, e (b) dependência da raiz quadrada da relação sinal ruído com respeito à largura de banda do fotodetector

3.4. Sistema com a largura de banda à meia altura aumentada

Com os bons resultados da teoria em relação aos dados obtidos experimentalmente, e pela possibilidade de usar fonte de banda larga com maior potência óptica, foram feitas simulações usando filtros com maior largura de

banda à meia altura (FWHM) com o objetivo de alcançar maior faixa de operação em comprimento de onda. Os resultados obtidos com os parâmetros que podem ser implementados na prática para típicas aplicações de deformação são ilustrados na figura 3.11. A FWHM usada foi de 4 nm para os filtros e 1.5 nm para o sensor e a separação entre os filtros foi de 11 nm. Estes resultados mostram que é possível ter uma faixa de operação de 7 nm com a incerteza no comprimento de onda menor que 2 pm e uma faixa de operação de 9 nm com uma incerteza menor que 10 pm.

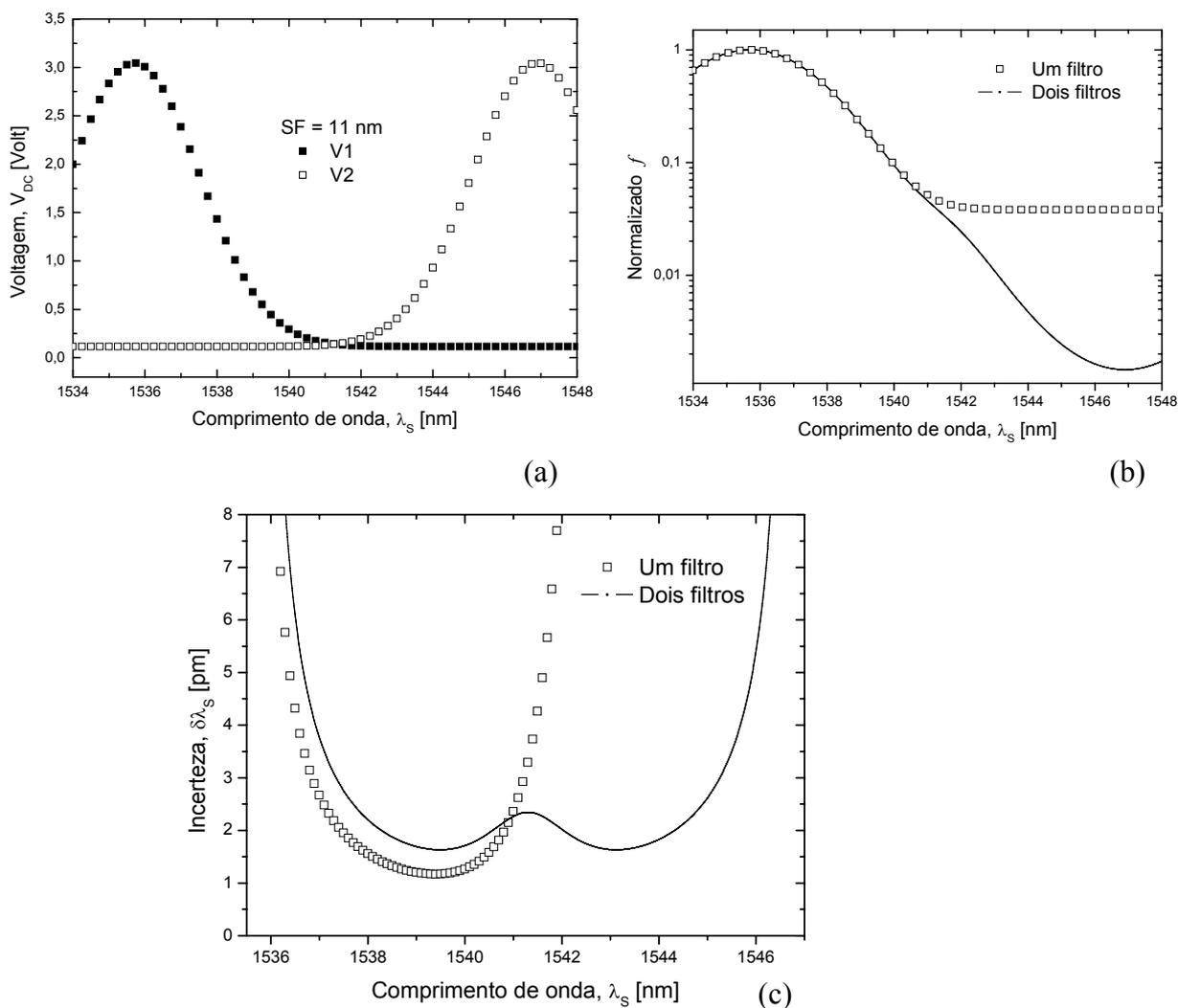


Figura 3.11 - Simulação para um sistema com largura de banda a meia altura de 4 nm para os filtros e 1.5 nm para o sensor e com uma separação entre filtros de 11 nm, e também o resultado para um único filtro: (a) Saída nos dois fotodetectores V_1 e V_2 ; (b) Função $f = (V_1/V_2)$ e $f = V_1$, (c) Incerteza no limite de baixa frequência

Novamente pode-se observar, figura 3.11 (c), um pequeno aumento na incerteza na região central devido aos baixos níveis de potência obtidos nos fotodetectores.

3.5. Validação teórico-experimental

Até então as simulações numéricas foram baseadas nos ajustes gaussianos dos espectros do sensor e dos filtros, figura 3.1. A partir destes ajustes foram simuladas as voltagens lidas e a razão entre elas, figuras 3.2 e 3.3, respectivamente. Embora, haja uma pequena dispersão dos resultados experimentais, as simulações feitas representam bem tais valores, levando em consideração que os ajustes feitos nos espectros primários não reproduzem todos os detalhes do espectro do sensor. De forma complementar, foi feita uma análise considerando os espectros do sensor e dos filtros reais obtidos experimentalmente, sem ajustes. A teoria usada foi a mesma, e novamente, são confrontados a simulação baseada na teoria com os resultados experimentais obtidos.

Os espectros obtidos experimentalmente do sensor (rede de Bragg) e dos filtros (filtro Fabry-Perot de transmissão) são mostrados nas figuras 3.12 (a) e (b). Nelas são ilustradas também as curvas de interseção entre os espectros do sensor e dos filtros (FS), definidas como o produto das intensidades do sensor e do filtro em cada ponto do espectro. A figura 3.12 (a) representa o caso em que a superposição entre filtros e sensor é pequena, enquanto que a figura 3.12 (b) ilustra a situação de quase total superposição dos espectros do sensor como filtro 2. A área hachurada da curva de interseção é definida como a convolução entre as curvas e este valor está relacionado com a potência óptica lida no fotodetector. Desta forma, é associada a posição do comprimento de onda de Bragg do sensor com a potência.

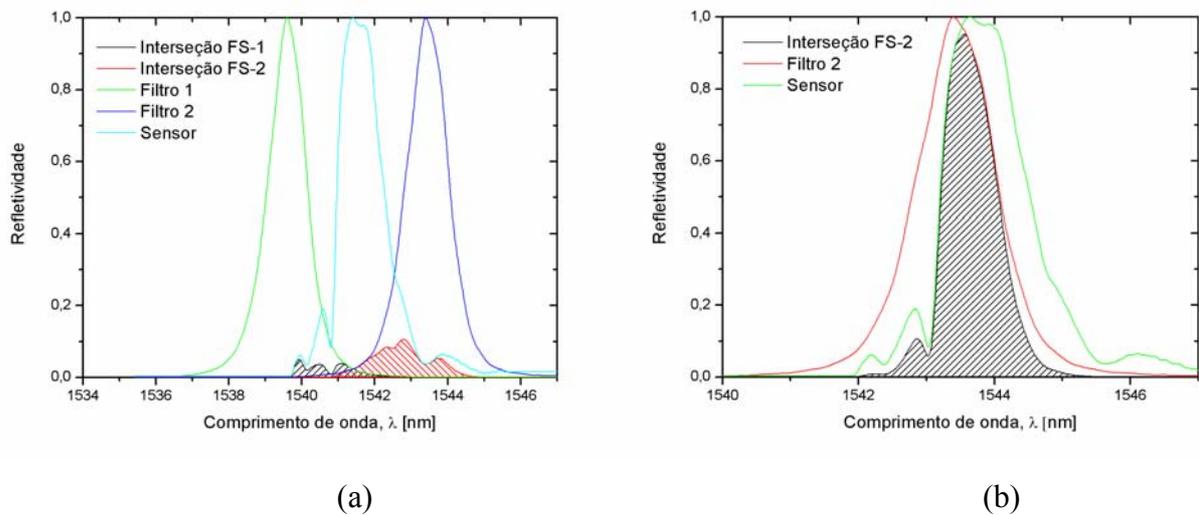
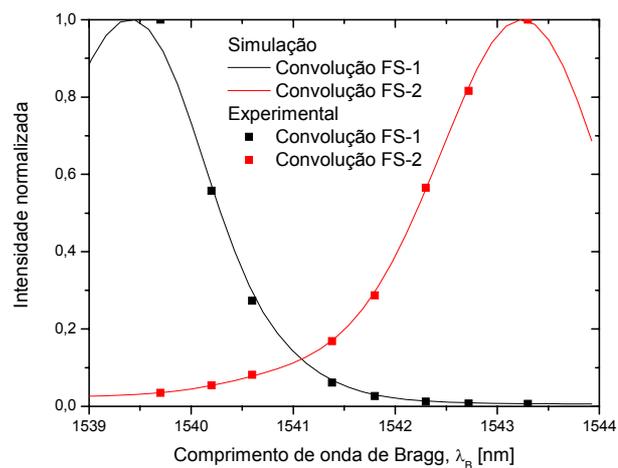
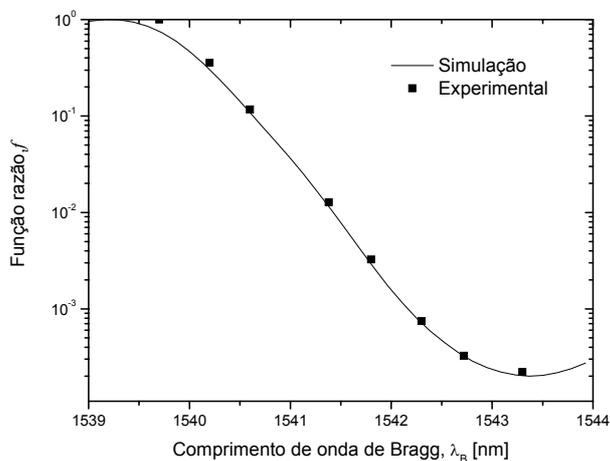


Figura 3.12 - (a) Espectros do sensor, dos filtros e da interseção entre eles, (b) área de interseção entre os espectros FS

Variando a posição do sensor, de 1539 a 1544 nm, mantendo os filtros fixos em 1539.6 e 1543.4 nm e calculando as convoluções entre os espectros em cada ponto do sensor, através da equação 3.3, são obtidos os resultados apresentados na figura 3.13(a). De posse dos valores das convoluções obtidos, tomando a razão entre eles, obtém-se os resultados ilustrados na figura 3.13(b). Os resultados experimentais são adicionados aos gráficos e, sem perda da generalidade, tanto os valores experimentais quando os simulados são normalizados.



(a)



(b)

Figura 3.13 - (a) Curva de convolução associada às potências lidas nos fotodetectores; (b) razão entre as convoluções, f . Curva sólida: simulação; pontos: dados experimentais

Fica claro, pelos resultados, que as simulações baseadas na teoria proposta representam muito bem os resultados experimentais obtidos. Sendo assim, fica validado o método de análise para ser usado em casos futuros.