

5 Resultados

Este capítulo apresenta uma caracterização do sistema montado para quantificar e, se possível, melhorar a incerteza. Para isso são feitas simulações e comparadas com dados experimentais qualitativamente. Depois, a fim de quantificar e reduzir a incerteza são apresentados testes experimentais. Entre estes testes estão análise de interferência e dependência da razão com a variação da potência óptica e mudança do estado de polarização da luz.

5.1. Simulação

Usar simulações numéricas é uma forma de prever os resultados e ajustar o projeto visando otimizá-los. Para isso é necessário validar a teoria proposta em relação aos dados experimentais. As simulações apresentadas a seguir são fundamentadas no modelo numérico para um sistema de leitura de sensores a rede de Bragg baseados em dois filtros fixos feito por Nunes [34]. Neste modelo, o primeiro passo é obter os espectros das redes de Bragg utilizadas como filtros e sensores, normalizá-los com a potência máxima e obter os comprimentos de onda centrais dos espectros. O segundo é calcular a integral da sobreposição do espectro refletido pelo sensor e posteriormente pelo filtro. Assim, o pico do pulso lido associado à potência óptica medida pelo fotodetector em função da posição espectral do sensor pode ser considerado como a convolução entre o espectro do sensor e o espectro do filtro. Com isso as simulações foram baseadas nas equações 5.1 e 5.2, que expressam a intensidade lida pelo circuito de fotodetecção, $V_i(\lambda_s)$ onde i é o índice de cada filtro.

$$V_i(\lambda_s) = \int_{-\infty}^{\infty} \beta [S(\lambda, \lambda_s) \cdot F_i(\lambda)] d\lambda \quad (5.1)$$

$$\frac{V_i(\lambda_s)}{\beta} = 2ay_0y_{0i} + y_0F_{0i}\sqrt{\frac{\pi}{\alpha_{Fi}}} + y_0S_0\sqrt{\frac{\pi}{\alpha_s}} + F_{0i}S_0\sqrt{\frac{\pi}{\alpha_{Fi} + \alpha_s}} \exp\left[-\frac{\alpha_{Fi}\alpha_s}{\alpha_{Fi} + \alpha_s}(\lambda_s - \lambda_{Fi})^2\right] \quad (5.2)$$

As funções $S(\lambda, \lambda_s)$ e $F_i(\lambda)$ representam as refletividades do sensor e do filtro respectivamente e F_{0i} e S_0 suas intensidades máximas, 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 $\alpha = \frac{4 \ln 2}{b^2}$ onde b é a largura de banda à meia altura do espectro (FWHM-*Full Width at Half Maximum*). O parâmetro a é uma 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.

Os espectros das redes de Bragg, tanto para os filtros quanto para os sensores, foram obtidos separadamente através de um OSA, figura 2.2, antes de serem emendados umas nas outras. Então, o resultado da equação 5.2, tomando como exemplo os espectros do canal 1, é mostrado na figura 5.1.

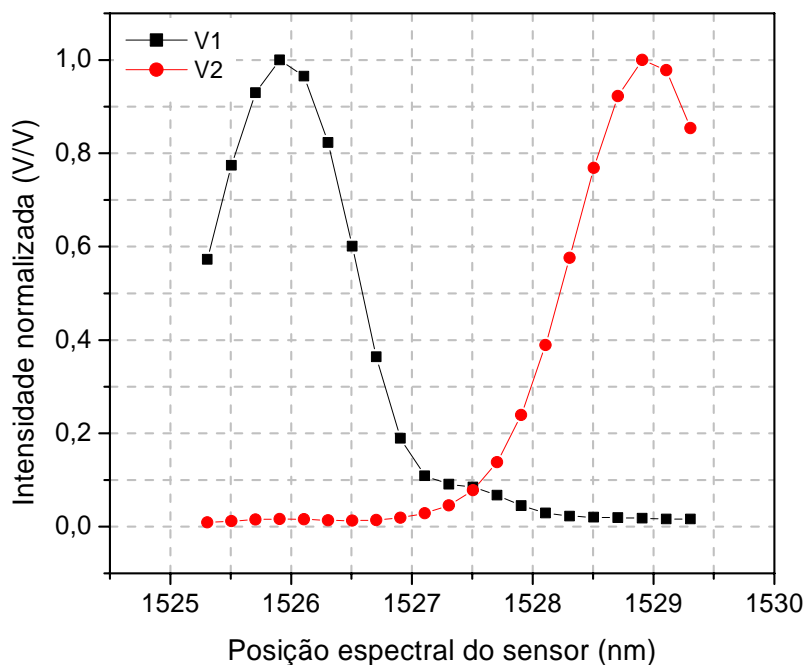


Figura 5.1 Resultados numéricos relativos às intensidades máximas dos pulsos detectados, V1, para o primeiro filtro, e V2, para o segundo filtro, em função da posição de pico do sensor para o canal 1.

Assim como no sistema proposto, foi considerada a razão entre as grandezas lidas nos fotodetectores, equação 5.3, para compensar qualquer possível variação na potência da luz.

$$f = \frac{V_1}{V_2}, \text{ onde } V_1 \text{ é a tensão para o filtro 1 e } V_2 \text{ para o filtro 2} \quad (5.3)$$

Com os dados mostrados na figura 5.1 pode-se obter um exemplo de f , calculado como uma função da posição de pico do sensor. Este resultado pode ser visto na figura 5.2.

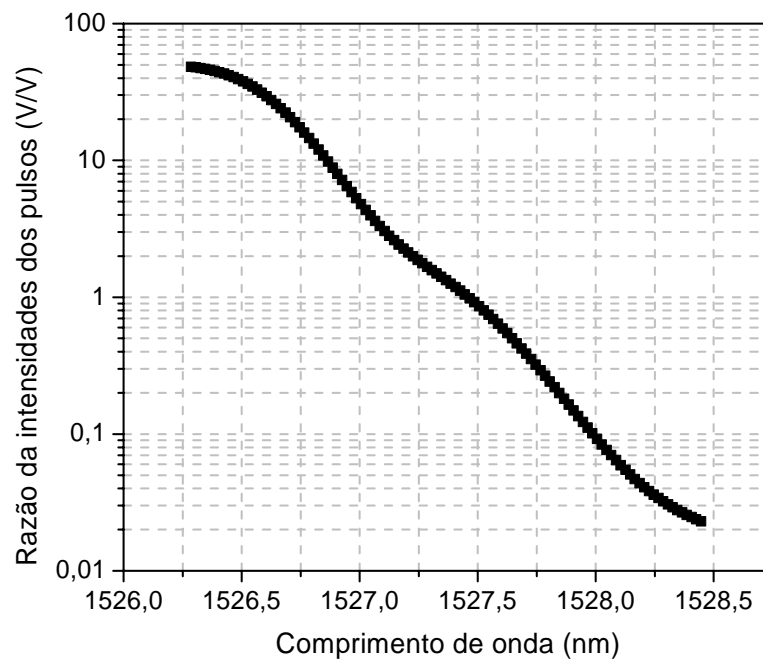


Figura 5.2 Resultado numérico para a função f versus a posição de pico do sensor obtido a partir dos dados da figura 5.1.

Como as redes de Bragg utilizadas não têm perfis espectrais de reflexão perfeitamente gaussianos, esta curva de calibração não teve o mesmo comportamento mostrado na Fig. 3.5.

Segundo este modelo, para estimar a incerteza da medida de um sensor com uma função de saída igual à mostrada na figura 5.2, foi assumido que cada pulso deveria apresentar flutuações nas partes óptica e eletrônica do sistema. As flutuações na parte óptica devem-se principalmente a variações no módulo de

acoplamento, as quais dependem da polarização da luz e da temperatura. A contribuição da eletrônica no cálculo da incerteza depende do ruído da placa e os níveis de quantização do osciloscópio, portanto esta medida depende da relação sinal/ruído e da quantidade de média feita pelo osciloscópio. Para uma primeira análise foi considerado que a incerteza expandida da razão, δf , é de 1%. Com essa informação foi possível estimar a incerteza associada ao comprimento de onda, $\delta \lambda_s$, através da equação 5.4 e obter a curva mostrada na figura 5.3.

$$\delta \lambda_s = \left| \frac{df}{d\lambda_s} \right|^{-1} \delta f \quad (5.4)$$

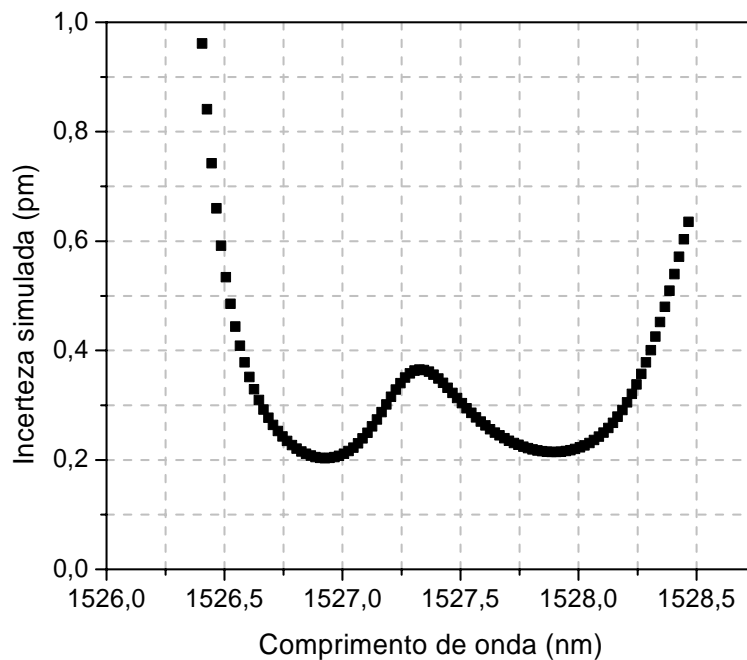


Figura 5.3 Incerteza teórica para o canal 1

As simulações foram feitas para todos os canais, mas para simplificar serão apresentadas análises de incerteza somente para dois canais, canal 1 ($\lambda_b = 1527\text{nm}$) e canal 2 ($\lambda_b = 1532\text{nm}$). Os gráficos das simulações serão mostrados juntos com os gráficos dos resultados.

5.2. Comparação entre resultados simulados e experimentais

Os resultados experimentais são referentes a várias calibrações, mas deve-se considerar que os equipamentos utilizados não foram devidamente calibrados podendo apresentar uma diferença ao utilizar outro equipamento de comparação. Por isso os valores ditos padrão para o cálculo da incerteza, neste caso são valores de referência para comparação.

Os resultados experimentais apresentados nesta seção são para analisar a validação da teoria e fazer uma comparação com as simulações numéricas. Por isso não foram tomados cuidados de nenhuma forma de controle, como temperatura, e, conseqüentemente o sistema ficou sujeito a todas fontes de incerteza. Resultados com análise mais profunda para a melhora do sistema serão apresentados na seção seguinte.

A configuração utilizada para obter os dados experimentais foi a explicada anteriormente na montagem experimental, figura 4.16. No processo de calibração, a configuração do osciloscópio se torna essencial, pois o número de médias feitas por ele pode diminuir o ruído reduzindo a incerteza. Por outro lado o aumento do número de médias acarreta em um tempo de leitura maior, podendo proporcionar um atraso entre os dados do analisador de espectro e da razão. Para minimizar esse efeito o osciloscópio foi configurado de maneira que somente dois pulsos referentes ao mesmo sensor sejam visualizados na tela e processados pelo programa do LABVIEW. O osciloscópio leva aproximadamente 5 segundos para fazer uma média de 256 medidas (de zero, quando a chave óptica está em 0, ao valor máximo, quando a chave está em 1), sendo tempo suficiente para não haver discrepância entre os valores e o comprimento de onda aferido pelo sistema de referência. Esta discrepância pode ser causada por qualquer variação não controlada, por exemplo, temperatura.

Variando a deformação do primeiro sensor, com a peça apresentada na figura 4.15, foi obtida a curva de calibração mostrada na figura 5.4. Procurou-se obter mais de dez amostras para cada comprimento de onda na mesma condição de repetitividade (Anexo), proporcionando um número suficiente para o cálculo da média e do desvio padrão de cada ponto.

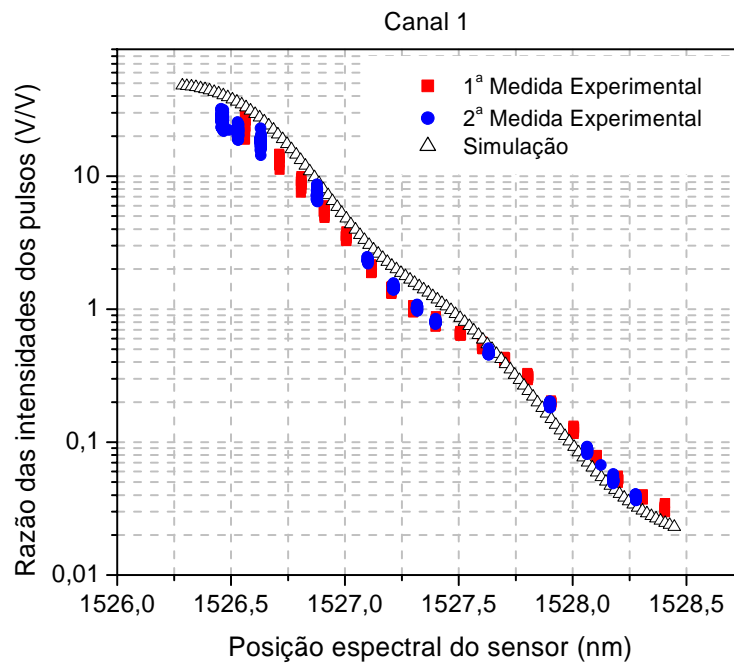


Figura 5.4 Resultados numéricos e experimental para a função f versus a posição espectral do sensor 1.

A incerteza padrão de uma medida (Apêndice B) pode ser considerada como o desvio padrão de uma série de amostras, e o resultado final deve ser expresso por uma faixa de incerteza em torno do valor médio das amostras, equação B.2. Aproximando a distribuição de probabilidade por uma normal, foram utilizados os critérios explicados no Guia [33] para a estimativa da incerteza expandida da razão para um nível de confiabilidade de 95%, tabela B.1. Esta incerteza encontrou-se numa faixa de 10% em torno do valor medido da razão, sendo pior (~20%) nos extremos, onde a relação sinal ruído de um dos pulsos diminui. Por essas serem medidas qualitativas, não se procurou controlar as fontes de incerteza do sistema e por isso uma incerteza tão alta. A figura 5.5 mostra as curvas, simulada e experimental, encontradas para a incerteza associada à posição espectral do sensor para o canal 1.

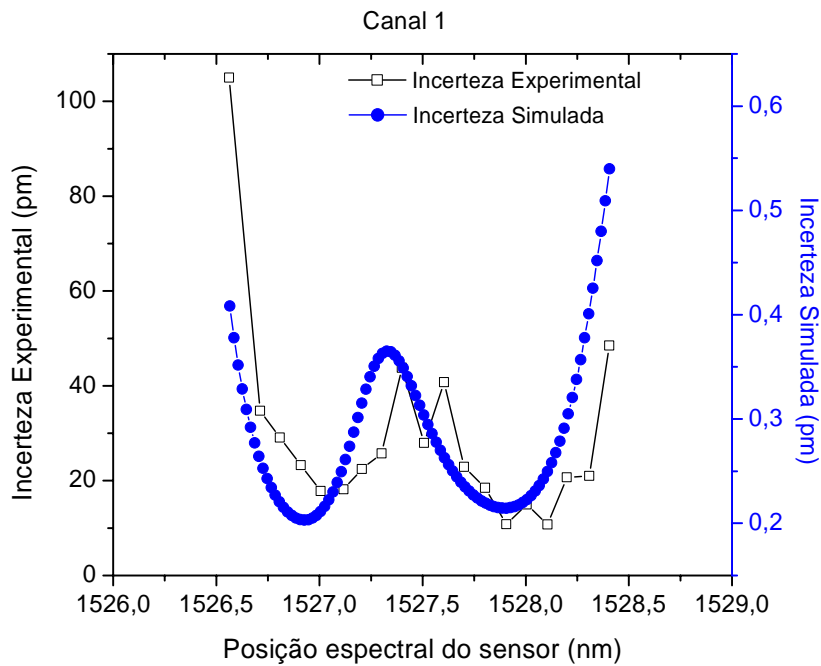


Figura 5.5 Incerteza, teórica e experimental, associada à posição do sensor, para o canal 1

A divergência apresentada entre os resultados experimentais e teóricos, tanto na figura 5.4 como na figura 5.5, é devida: à forma como foram coletados os espectros das redes de Bragg; à normalização da potência dos espectros (as redes apresentam refletividades e perdas ópticas diferentes); e à incerteza da medição da posição real dos picos espectrais dos filtros. Esta incerteza é relevante, pois o programa se baseia nesta informação para fazer os cálculos, enquanto que as outras podem ser minimizadas ao calcular a razão entre as duas intensidades.

Uma segunda série de medidas foi feita para ver o grau de concordância entre os resultados das medições do sistema. Para isso, foram aferidas medidas em outro dia, mas procurando manter as mesmas condições ambientais. A figura 5.6 ilustra estes pontos juntos a três pontos com barras de erros referentes às incertezas encontradas anteriormente. Este gráfico, então, representa a reprodutibilidade e repetitividade das medidas. Onde a reprodutibilidade está na capacidade de reproduzir as medidas em condições diferentes dentro da faixa estipulada de incerteza, média dos pontos triangulares dentro das faixas de incertezas, e a repetitividade está na seqüência de pontos feitos no com as mesmas condições, para um mesmo comprimento de onda a variação dos pontos está dentro da faixa esperada (pontos triangulares).

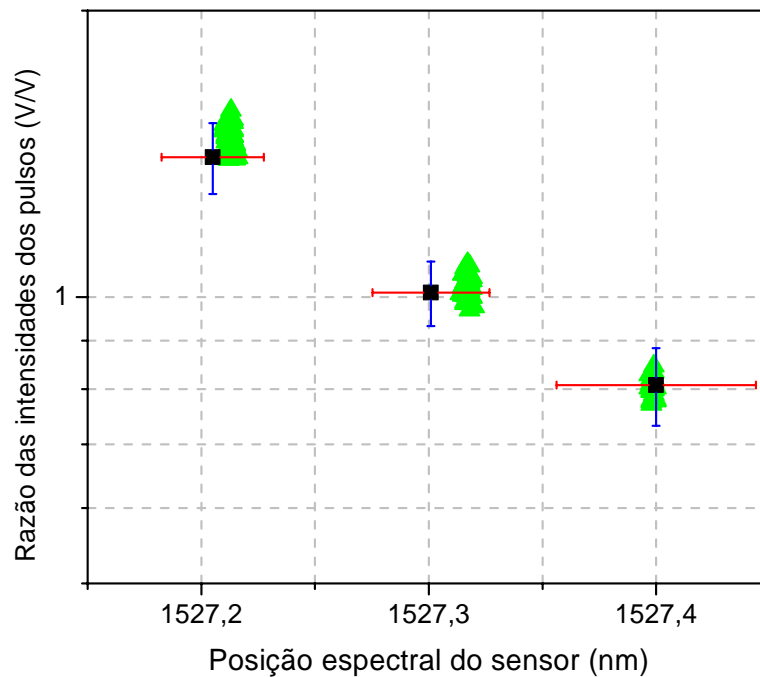


Figura 5.6 Reprodutibilidade (distância entre os pontos quadrados e a média dos pontos triangulares) e repetitividade (pontos triangulares), da medida do canal 1

Utilizando o mesmo procedimento de variação, os gráficos de calibração dos sensores 2, 4, 5 e 6 foram obtidos, como mostra as figuras de 5.7 a 5.10. O sensor 3 apresentou um outro pico espectral, figura 5.11, sendo impossível a sua calibração. Este segundo pico pode ter sido consequência de uma colagem mal sucedida onde uma parte da rede de Bragg foi fixada e a outra solta, então, ao deformar a lâmina somente a que estava colada mudava o espectro. O sensor 6 também apresentou um erro em sua fixação, mas neste caso o único problema foi a dificuldade de manter o comprimento de onda pretendido, pois, ao deformar a barra, a rede de Bragg “escorregava” tendendo a voltar ao comprimento de onda inicial. A figura 5.12 ilustra a incerteza associada ao comprimento de onda para o canal 2 equivalendo à figura 5.5 para o canal 1. Novamente as incertezas encontradas para a razão do canal 2 variaram dentro de uma faixa de 10% da média, sendo maior nas pontas pelo mesmo motivo explicado anteriormente para o canal 1. A tabela associada a estimativa da incerteza expandida do canal 2 também se encontra no apêndice B e tem o mesmo princípio que do canal 1, tabela B.2.

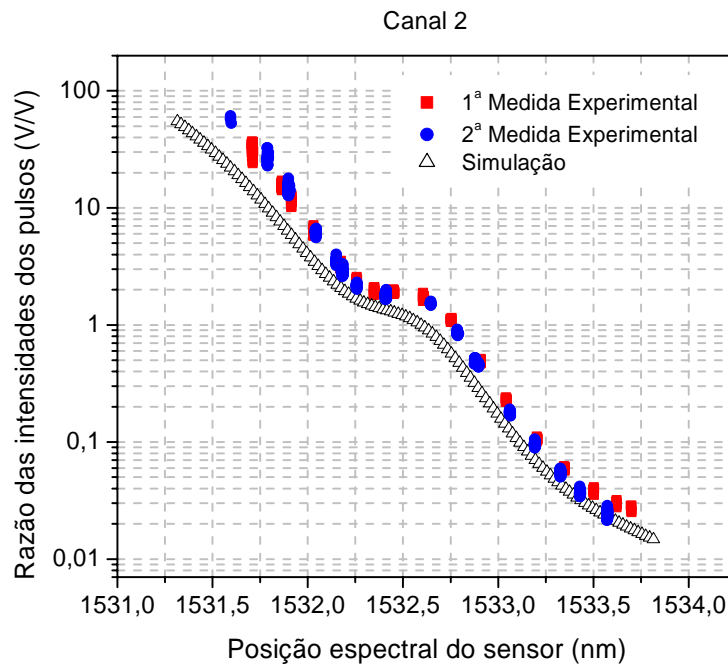


Figura 5.7 Resultados numéricos e experimental para a função f versus a posição espectral do sensor 2.

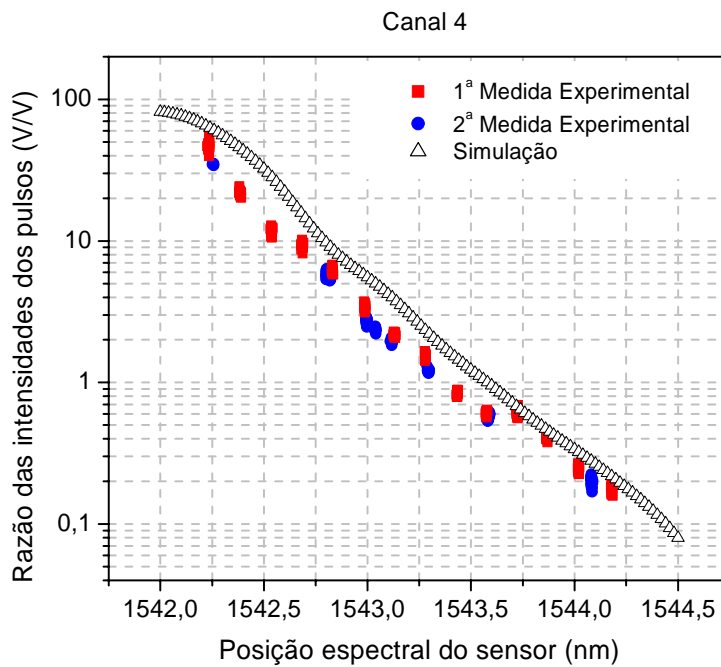


Figura 5.8 Resultados numéricos e experimental para a função f versus a posição espectral do sensor 4.

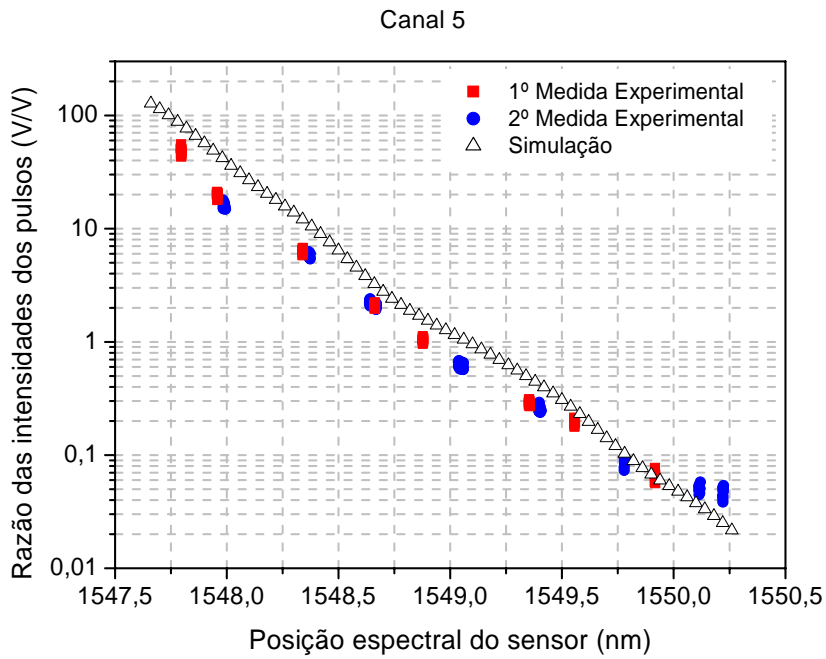


Figura 5.9 Resultados numéricos e experimental para a função f versus a posição espectral do sensor 5.

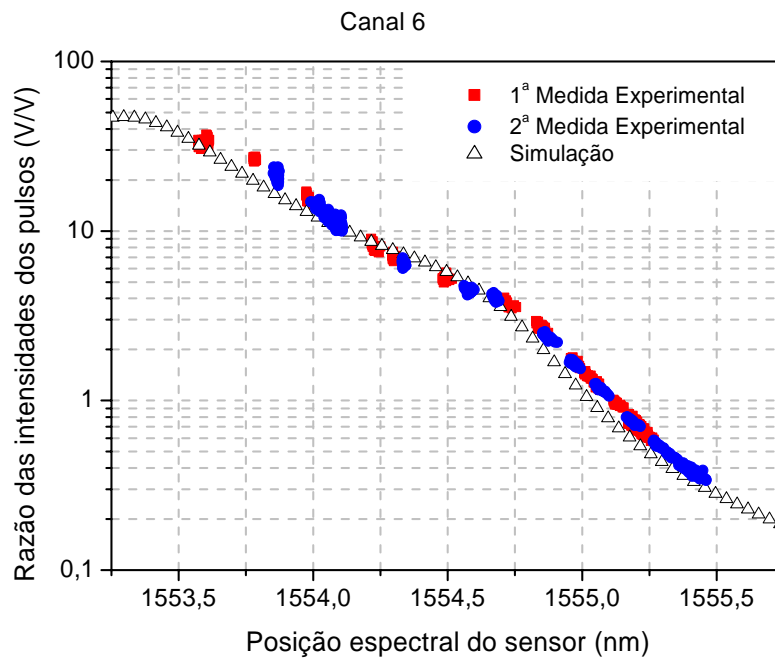


Figura 5.10 Resultados numéricos e experimental para a função f versus a posição espectral do sensor 6.

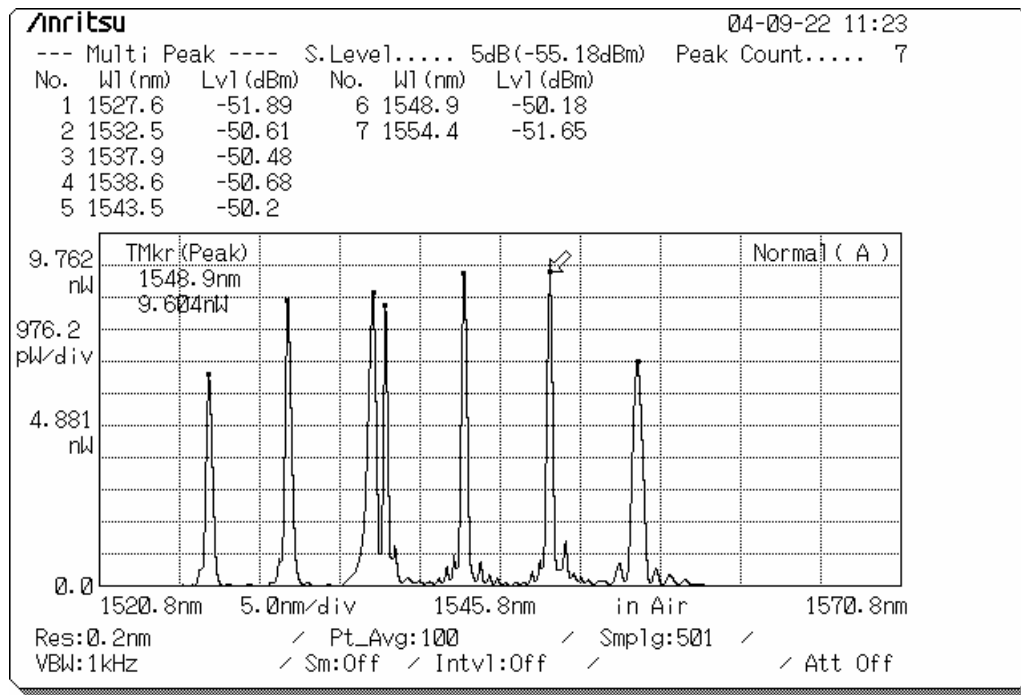


Figura 5.11 Espectro de deformação do sensor 3.

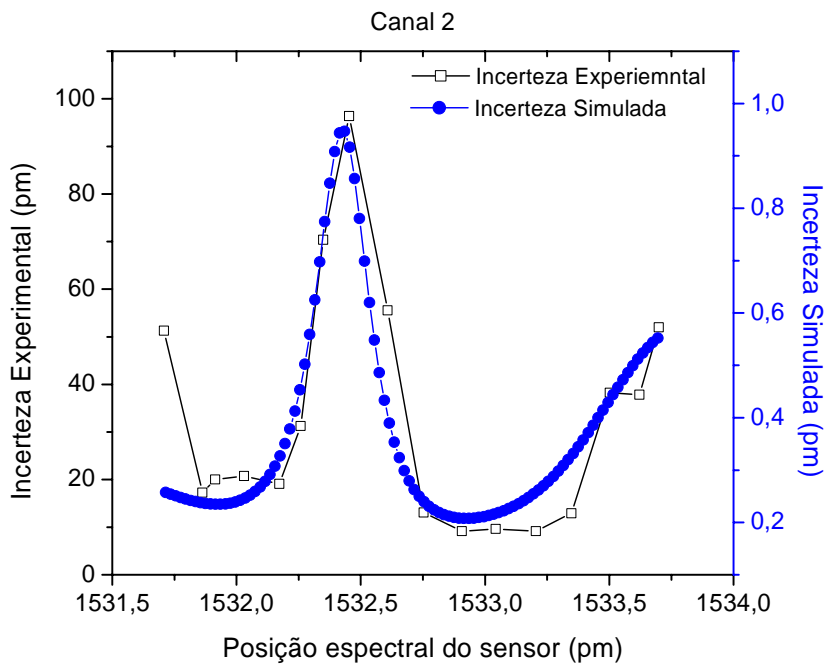


Figura 5.12 Incerteza, teórica e experimental, associada à posição do sensor, para o canal 2.

Como explicado antes, as divergências encontradas entre as curvas experimentais e simuladas são devido à forma duvidosa de aquisição dos

espectros das redes de Bragg. Mostrando que as simulações aqui apresentadas são apenas para ter uma idéia da performance do canal, não podendo ser base de calibração dos sensores.

O perfil espectral das redes de Bragg, tanto para os sensores como para os filtros, se torna muito importante para o projeto de um canal, principalmente se este requer uma incerteza baixa. Na curva de calibração do sensor 2, figura 5.7, fica evidente que na parte central há um intervalo onde a derivada é menor. Isso causam um aumento na incerteza da medida nesta região, como mostra a figura 5.12, e que, em alguns casos, não atendem as especificações do projeto do sensor. Esse tipo de efeito está relacionado com os lóbulos laterais nos espectros das redes, a separação entre os filtros e a largura das redes [43].

5.3. Incertezas Experimentais

Os resultados apresentados até agora tinham a finalidade de verificar a técnica qualitativamente. Uma vez comprovada a técnica, tornou-se necessário fazer uma caracterização mais detalhada das fontes de incerteza para uma possível redução da incerteza de leitura.

A utilização da equação 5.3 para compensar a variação da potência óptica que chega no fotodetector se torna um problema quando são esperadas grandes variações de potência no circuito óptico ou na fonte de luz. A figura 5.13 apresenta uma variação total de 15dB na potência óptica, equivalendo uma variação de 15dB nos picos dos pulsos, enquanto a razão entre estes apresenta uma variação total de 0.75dB. Nota-se que quando os pulsos estão com intensidade baixa o ruído do sistema aumenta dificultando a compensação da variação de potência. O desvio padrão destas medidas pode ser considerado como uma incerteza padrão, $u_f = 3.35\%$, e deve ser considerada na estimativa da incerteza combinada caso seja esperado uma variação de potência deste tipo. Ao fazer isso, tomando com o exemplo os cálculos para incerteza do canal 1, a incerteza da medição pode se tornar até 3.5% maior. Se forem consideradas variações de 3dB na potência, a razão teria variações total de 0.14dB sem aumento significativo na incerteza ($\sim 0.2\%$).

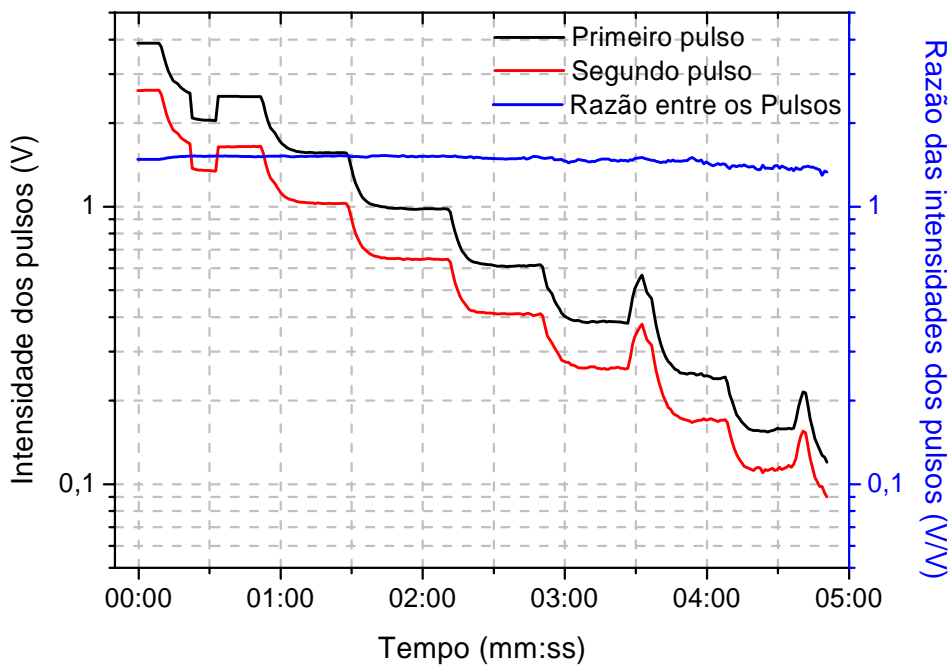


Figura 5.13 Resposta do sistema com variação da potência óptica.

É claro que para obter uma resposta deste tipo é muito significativa a linearidade do circuito de detecção. Em casos onde isso não acontece essa diferença pode ser corrigida através de software e adicionando mais uma componente para o cálculo da incerteza combinada.

Uma das mais importantes questões num sistema com vários canais é o nível de interferência entre canais. A performance do sistema cai, incerteza aumenta, quando a potência de um canal passa para outro. Essa transferência pode ocorrer por causa de efeitos não lineares nas fibras, imperfeição no dimensionamento do módulo de atraso espectral e problemas no circuito de detecção.

As características construtivas do sistema não propiciam o surgimento de efeitos não-lineares que possam vir a afetar sensivelmente a reprodutibilidade dos resultados obtidos.

Dependendo da separação entre os canais e faixa de excursão dos sensores, os filtros podem deixar passar uma pequena parte da potência de canais adjacentes o qual interfere no processo de detecção e aumenta a incerteza.

Problemas de amplificação no circuito de detecção, como as oscilações mostradas na figura 4.7, também podem influenciar na detecção do canal seguinte ocasionando interferência.

Para verificar esses efeitos, foram considerados os canais 1 e 2. Os resultados da influência do canal 1 no canal 2 e do canal 2 no canal 1 são mostrados nas figuras 5.14 e 5.16 respectivamente. Possíveis deformações mecânicas na peça de deformação dos sensores também podem ter alguma influência nas medidas do sistema. Para que isso não seja uma dúvida nos resultados as posições espectrais dos sensores foram monitoradas, figuras 5.15 e 5.17.

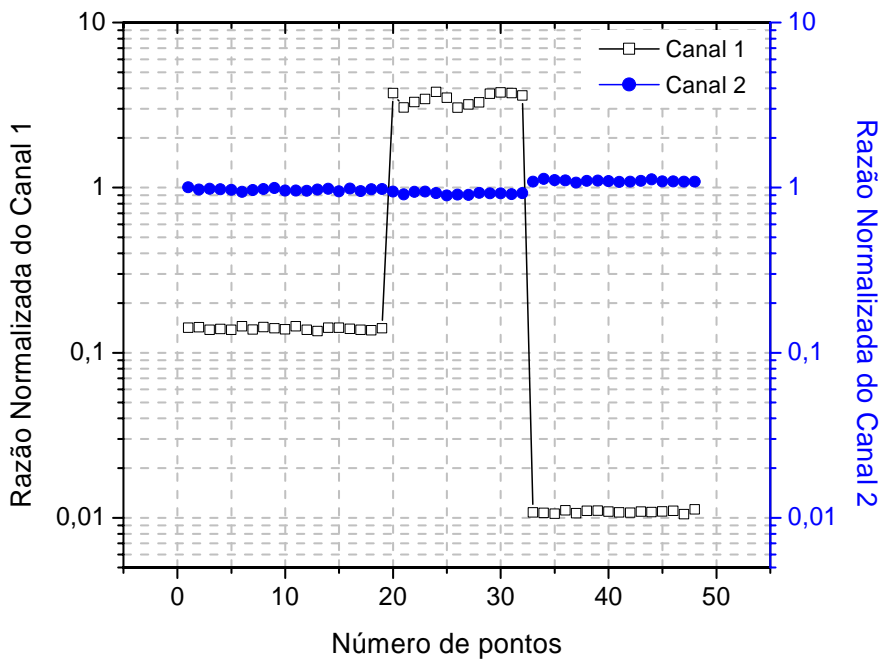
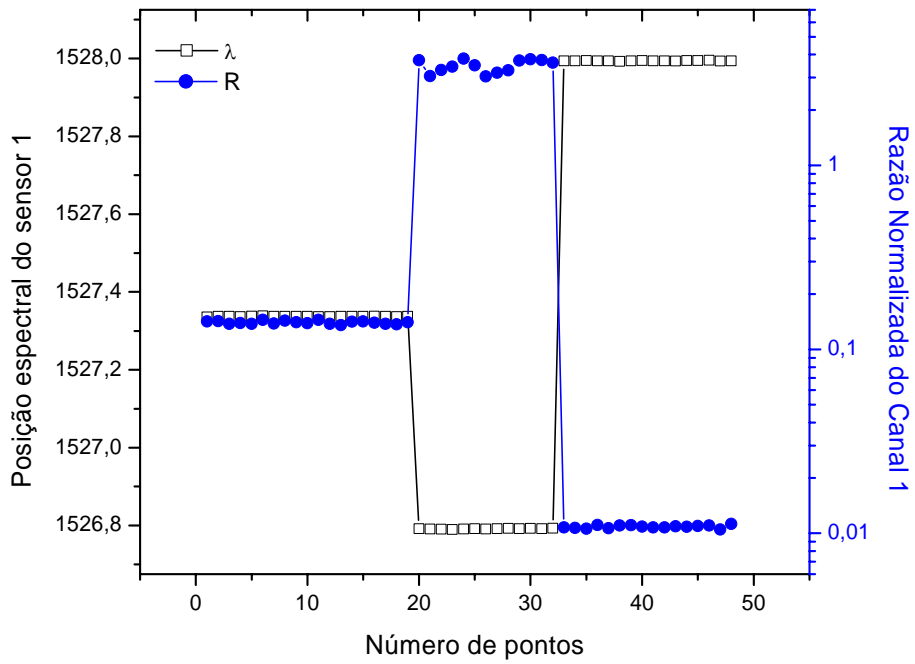
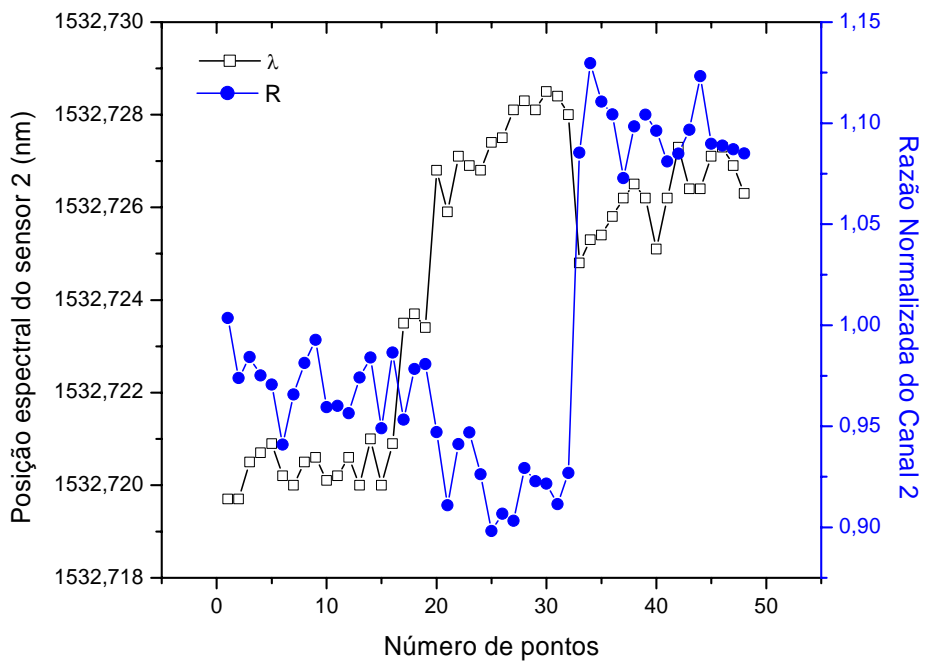


Figura 5.14 Efeito de interferência no sensor 2 pelo sensor 1



(a)



(b)

Figura 5.15 Detalhe da deformação do canal 1, (a), e do canal 2, (b), para a figura 5.14

Como mostra a figura 5.14, a deformação do sensor 1 ocasionou uma variação de aproximadamente de 25dB na razão do canal 1, enquanto a razão do

canal 2 variou um pouco menos que 1dB no total. A figura 5.15b apresenta, com mais detalhe, a posição espectral do sensor 2 e a razão detectada pelo canal 2, conforme o sensor 1 foi deformado. Comparando este gráfico com o gráfico da figura 5.14 pode-se perceber que houve uma dependência da posição espectral do sensor 2 em relação à deformação do sensor 1, indicando um possível problema mecânico. Considerando os dados obtidos para a calibração do canal 2, esta faixa de 1dB equivale a uma variação de aproximadamente 70 pm no total, o que está dentro da incerteza encontrada, figura 5.12. Vale a pena ressaltar que o número de medidas que o osciloscópio utilizou para fazer média foi a mesma, tanto para fazer as curvas de calibração quanto a análise da interferência, o que justifica a incerteza alta das medidas. Mas, mesmo assim, essa dependência não justifica a variação de quase 1dB na razão. Parte da luz refletida pelo sensor 1 pode estar sendo refletida pelo primeiro filtro do canal 2, assim como a oscilação proporcionada pelo pulso anterior, podem ter causado um aumento deste efeito.

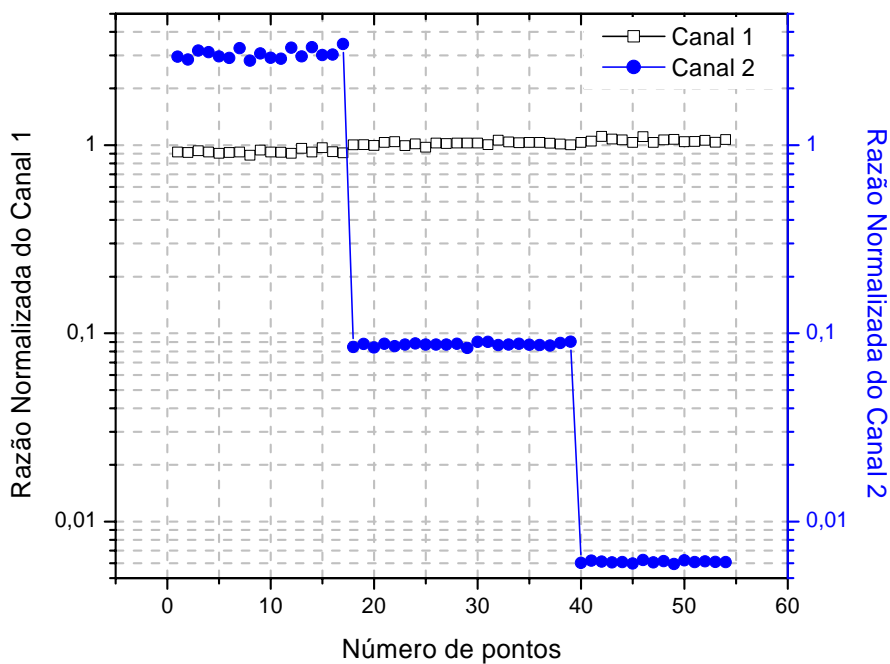
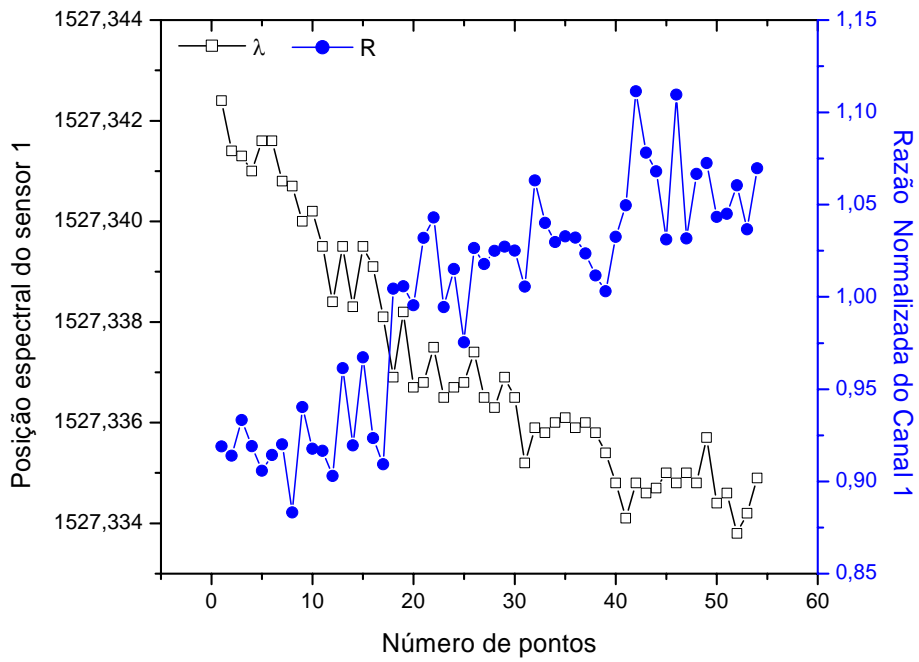
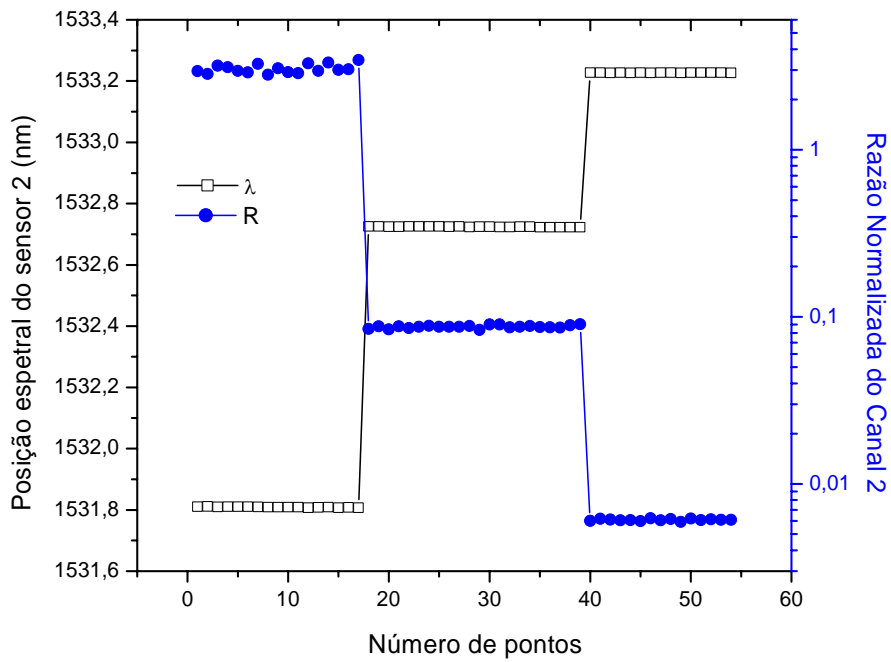


Figura 5.16 Efeito de interferência no sensor 1 pelo sensor 2



(a)



(b)

Figura 5.17 Detalhe da deformação do canal 1, (a), e do canal 2, (b), para a figura 5.16

Para uma variação total de 27dB da razão referente ao canal 2 houve uma variação menor que 1dB para a razão do canal 1, equivalendo a 60 pm neste caso. Nota-se que o valor da razão do canal 1, na figura 5.17a, acompanha a variação do comprimento de onda do sensor, mostrando que, apesar de não serem controladas as incertezas é possível observar resultados melhores que as apresentados anteriormente. A figura 5.18 prova que a variação do sensor 1 foi causada pela variação de temperatura na sala, pois o sensor 2 teve a mesma variação ao longo da medida.

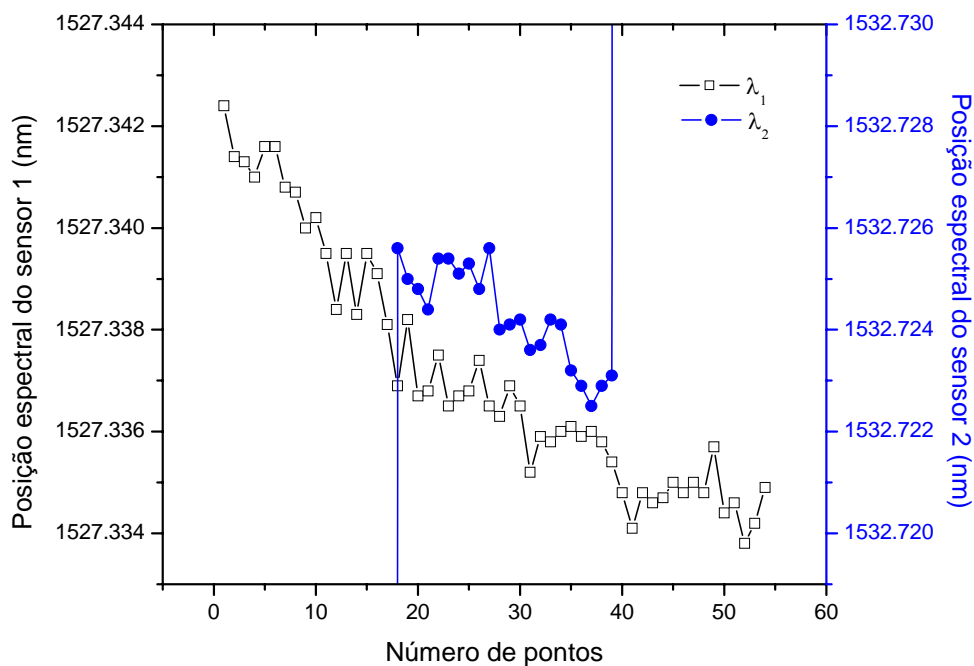


Figura 5.18 Variação da posição espectral dos sensores 1 e 2 devido à temperatura.

Conclui-se que para os níveis de incerteza encontrados nas medidas anteriores para os canais 1 e 2, não há influência significativa de interferência entre estes canais. Para se obter uma análise mais precisa desta interferência é necessária mais confiabilidade nas medidas. Para isso, melhorar a forma de aquisição dos dados, o sistema mecânico, o controle de temperatura e diminuir as fontes de incerteza é indispensável. Fica claro que isso não é um problema intrínseco da técnica, mas sim um problema na montagem experimental.

Um meio de melhorar o ruído aleatório do sistema é diminuir o ganho elétrico do circuito de detecção e aumentar o número de medidas para fazer médias no osciloscópio. Como as intensidades dos pulsos referentes aos canais 5 e

6 eram menores, foi usado um atenuador óptico para a leitura dos outros canais com o circuito elétrico que inicialmente tinha um ganho de 1000. Por isso foi possível diminuir o ganho para 500, conseqüentemente o ruído. A figura 5.19 ilustra duas situações semelhantes de posição do sensor 1, mas com ganhos de 1000 e 500 para o circuito de detecção.

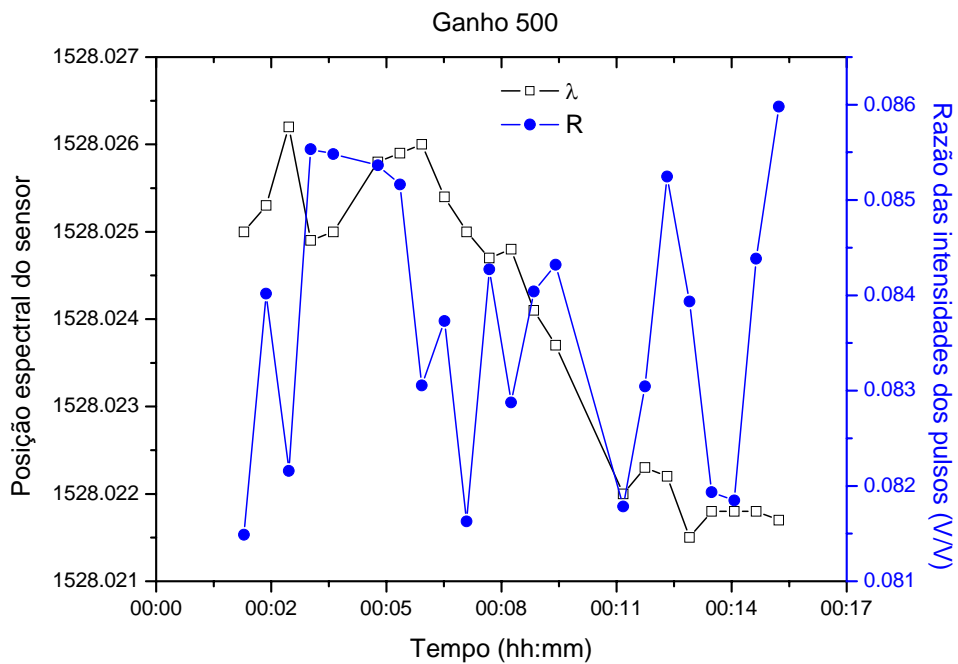
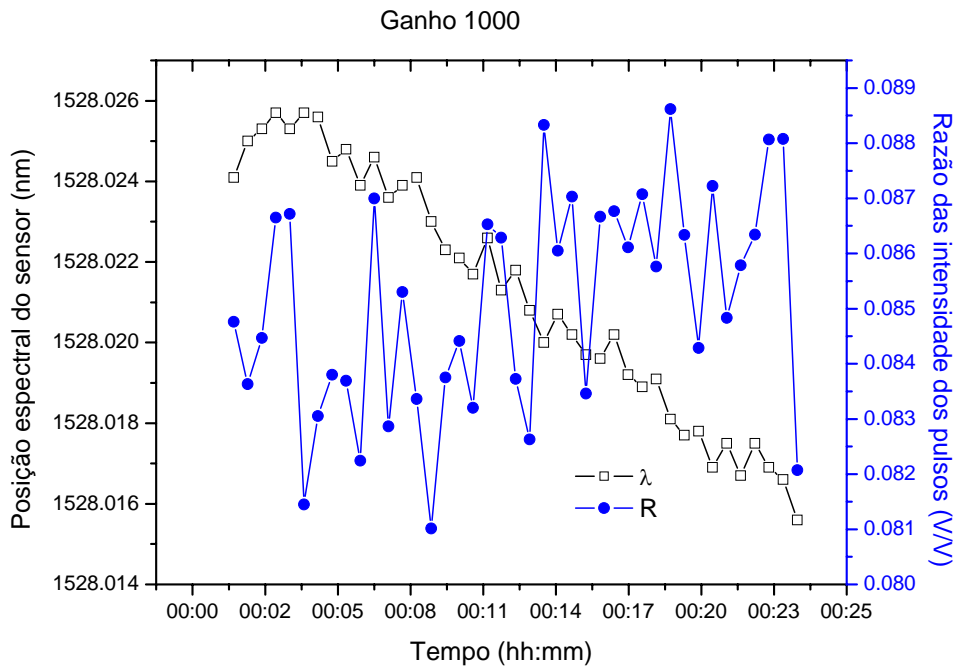


Figura 5.19 Resposta do sistema para dois ganhos elétricos do circuito de detecção, (a) e (b), média de 256 medidas.

Ganho	Média da Razão	s (%) Razão	s (pm) λ
1000	0,0845	2,27	4,9
500	0,0837	1,72	3,7

Tabela 5.1 Estatísticas para ganhos diferentes

A tabela 5.1 mostra a média da razão, o desvio padrão relativo da razão e o desvio padrão associado ao comprimento de onda para essas medidas. O desvio padrão em pm foi estimado a partir da derivada da curva de calibração nesta região encontrada para o canal 1, 20dB/nm. Como era previsto, o desvio médio relativo diminuiu, e conseqüentemente a incerteza da medição.

Tomando o cuidado de manter as condições de temperatura constantes na sala, uma nova série de amostras foi feita com média de 1024 medidas no osciloscópio e o ganho novo obtido, figura 5.20. Sabendo que se o número de média aumenta de um certo valor, o desvio padrão das amostras é dividido pela raiz quadrada deste valor, então o desvio padrão relativo da razão para o ganho de 500 e 1024 medidas deve ser igual à metade do valor encontrado para 256 medidas, 0,86%. Com isso a curva de variação da razão em função do comprimento de onda foi plotada junto com uma reta de ajuste e uma faixa equivalente a dois desvios padrão para 95% de nível de confiabilidade, 1,72% (incerteza expandida, apêndice B). A figura 5.21 mostra este gráfico e a partir dele pode-se concluir que essa faixa de incerteza da razão equivale a uma incerteza em comprimento de onda de 1pm, sendo possível uma resolução de 2pm. Nota-se que para essa curva a derivada é aproximadamente 10dB/nm, diferente da encontrada para os valores calculados na tabela 5.1.

Os valores das supostas incertezas encontradas até agora eram maiores que a incerteza especificada do equipamento, não sendo considerada nos cálculos das incertezas finais por serem irrelevantes. Com essa incerteza de 1pm encontrada para esses pontos, torna-se necessário a inclusão da incerteza do equipamento no cálculo da incerteza padrão combinada da medida (raiz quadrada positiva da soma das variâncias). Então, como a incerteza do equipamento é igual a 2pm, a incerteza expandida para essas medidas passa a ser 2,2pm.

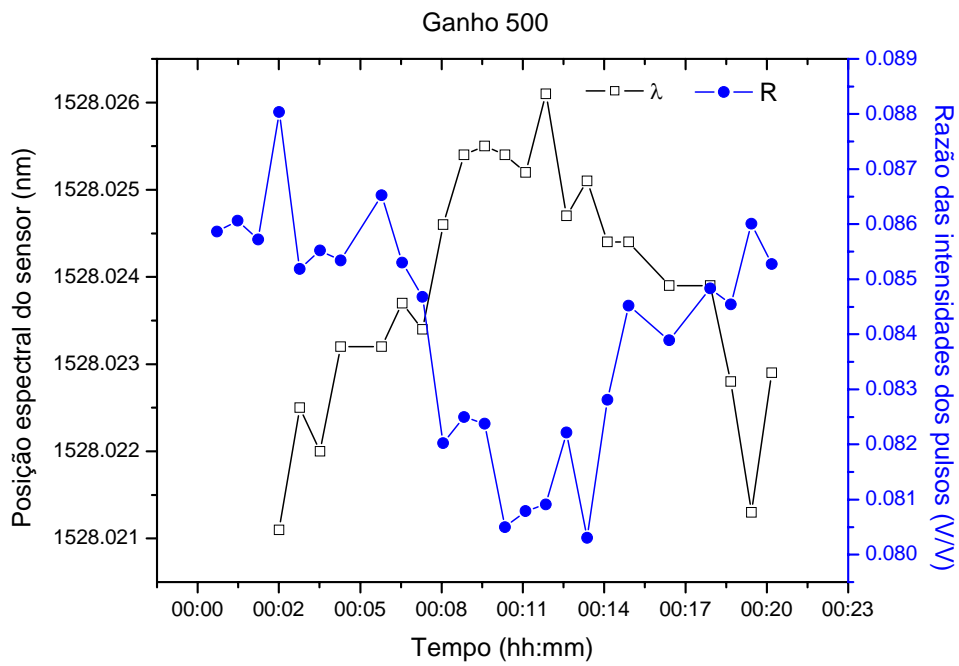


Figura 5.20 Resposta do sistema para ganho elétrico do circuito de detecção de 500 e média de 1024 medidas.

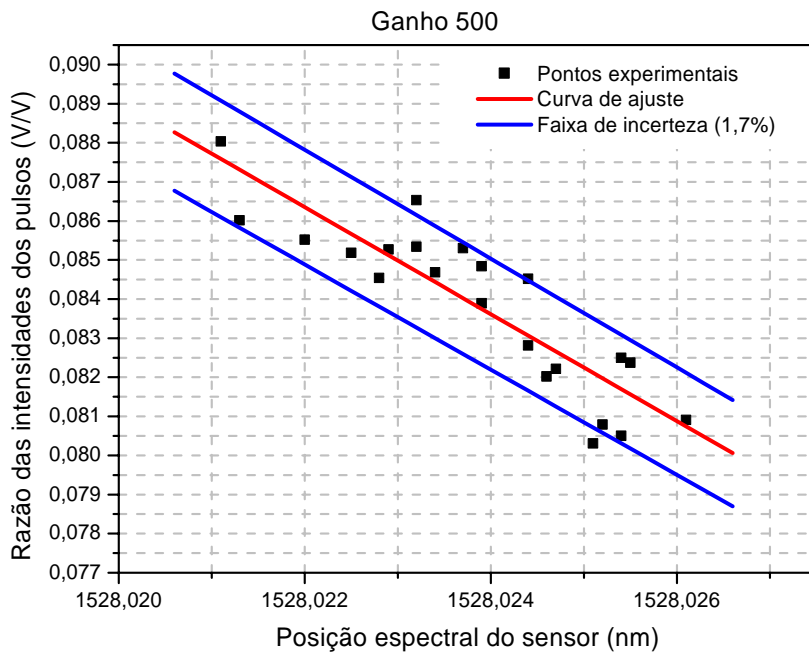


Figura 5.21 Razão entre as intensidades versus variação da posição espectral do sensor 1 para a situação da figura 5.20.

Mudanças de temperatura ocasionam variações no índice de refração da fibra e acarretam em efeitos lineares que podem alargar, distorcer e diminuir intensidade do pulso [18]. Uma vez que o sistema não utiliza pulsos extremamente curtos ($\sim 10\text{ns}$) e os comprimentos das fibras no módulo de atraso espectral são relativamente pequenos ($\sim 40\text{m}$), o alargamento e a distorção do pulso não causam efeitos que possam ser percebidos nas medições. Mas a variação dos estados de polarização durante o percurso dos pulsos pode ser crítica, principalmente se os componentes no módulo de acoplamento tiverem perda dependente dos estados de polarização (PDL) e se a luz da fonte for polarizada, [18, 35].

Os circuitos eletrônicos em geral alteram suas características conforme a temperatura (corrente de operação, ruído branco, nível DC, ganho total, entre outros). No caso de utilizar somente um circuito de detecção, essas características se alteram de forma equivalente para todos os pulsos e, assim como a variação da potência de luz, ao se fazer a razão entre dois pulso do mesmo canal essas alterações são praticamente anuladas.

Para avaliar as fontes de incerteza devido à temperatura, a configuração ilustrada na figura 5.22 foi montada em bancada. Esta configuração utiliza todos os módulos do sistema proposto a fim de obter uma caracterização do conjunto. As intensidades detectadas são as refletidas diretamente do módulo de atraso espectral para garantir que é a variação da luz da fonte e não a mudança no espectro das redes. Isso poderia ser feito estabilizando os sensores termicamente e aferindo as intensidades refletidas por eles e posteriormente pelos filtros, mas a incerteza da estabilização da temperatura tanto dos filtros quanto dos sensores aumentaria a incerteza da medida final. Foi colocado um atenuador antes do fotodetector, pois os pulsos referentes às reflexões dos filtros estavam saturando o módulo de detecção, uma vez que o acoplamento utilizado proporciona menos perda e é lida a reflexão direta da luz nas redes de filtro. A figura 4.12 foi obtida da mesma forma, mas aqui são apresentadas as intensidades máximas dos pulsos ao longo do tempo processados no computador pelo programa do LABVIEW.

O ruído e a mudança dos estados de polarização da luz entre os filtros de um mesmo canal podem ser as maiores causas da incerteza. Para estimar a influência da polarização nas medidas, foi colocado um controlador de polarização (CP) na saída do módulo de emissão, figura 5.22. Os dados apresentados na figura 5.23, 5.24 e tabela 5.2 foram aferidos de forma a evitar a influência da temperatura e

variando o controlador de estados de polarização com 125 posições para obter a maioria dos estados num curto intervalo de tempo.

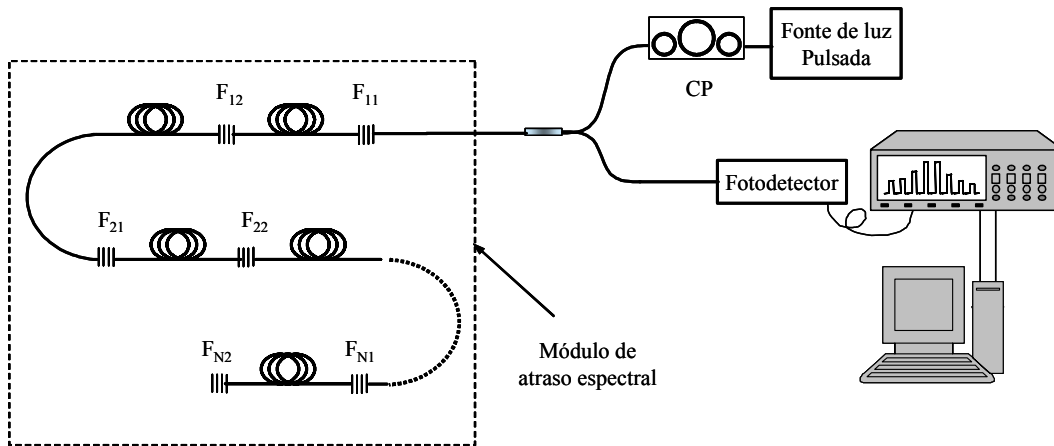


Figura 5.22 Configuração para caracterizar a dependência do sistema com os estados de polarização, situação 1

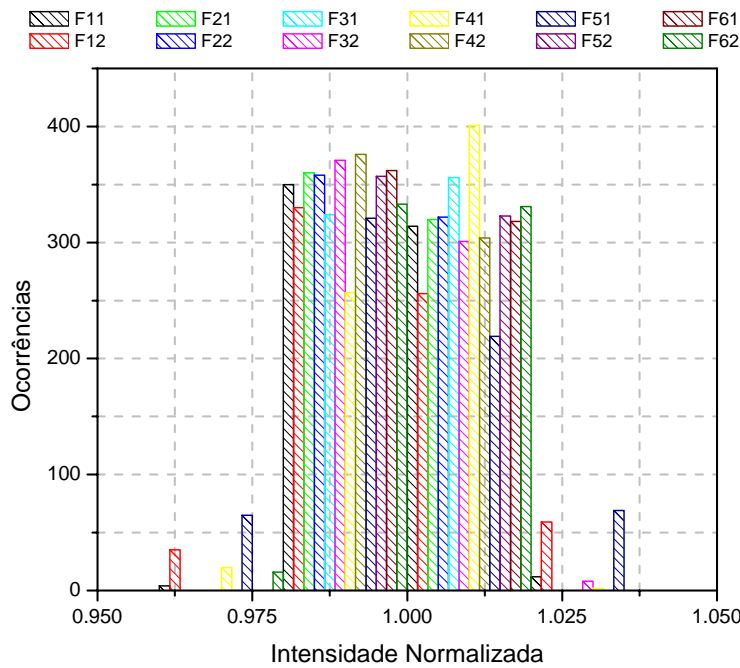


Figura 5.23 Histograma das intensidades normalizadas dos pulsos refletidos pelos filtros ao variar os estados de polarização da fonte, onde Fnm equivale ao filtro m do canal n.

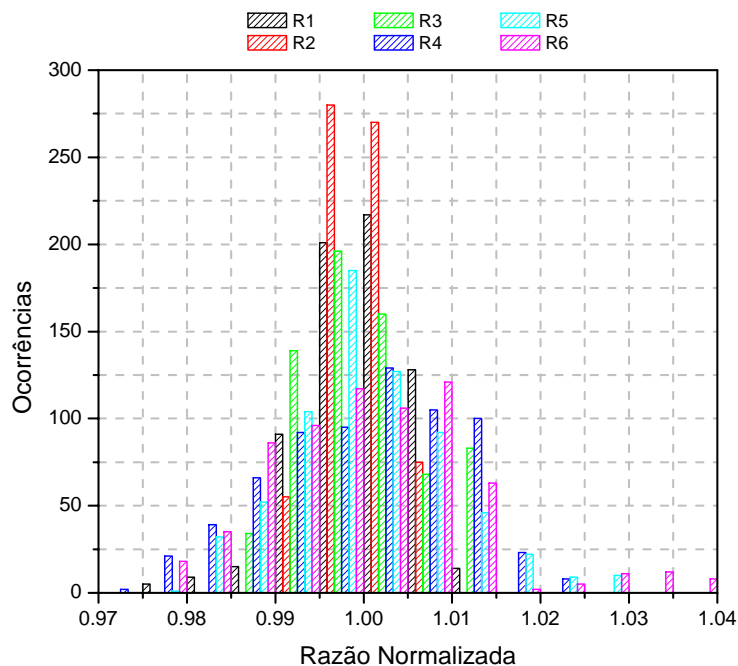


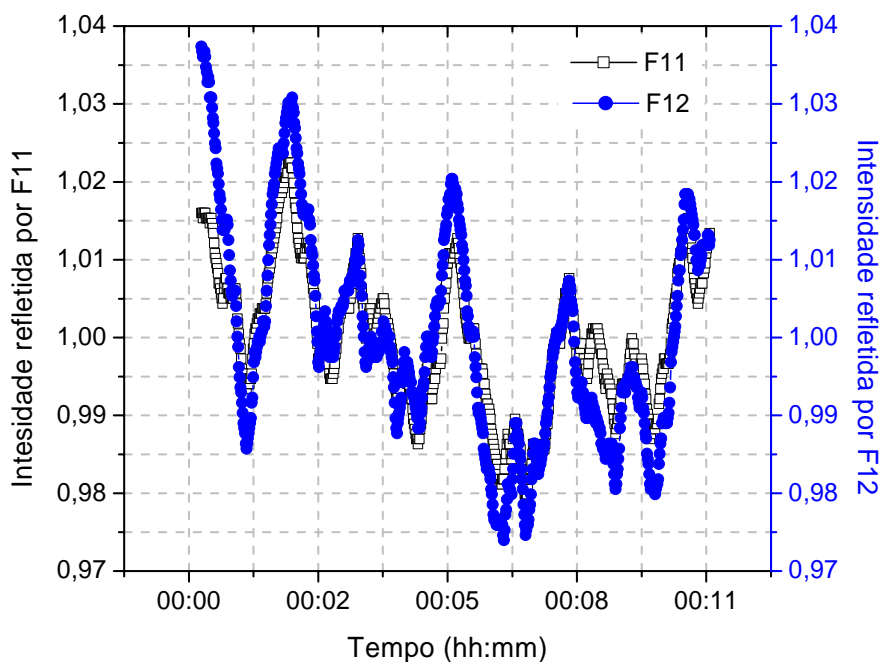
Figura 5.24 Histograma da razão normalizada, $R_n = F_{n1}/F_{n2}$, das intensidades de pico dos filtros para a situação da figura 5.22.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0220877/CA

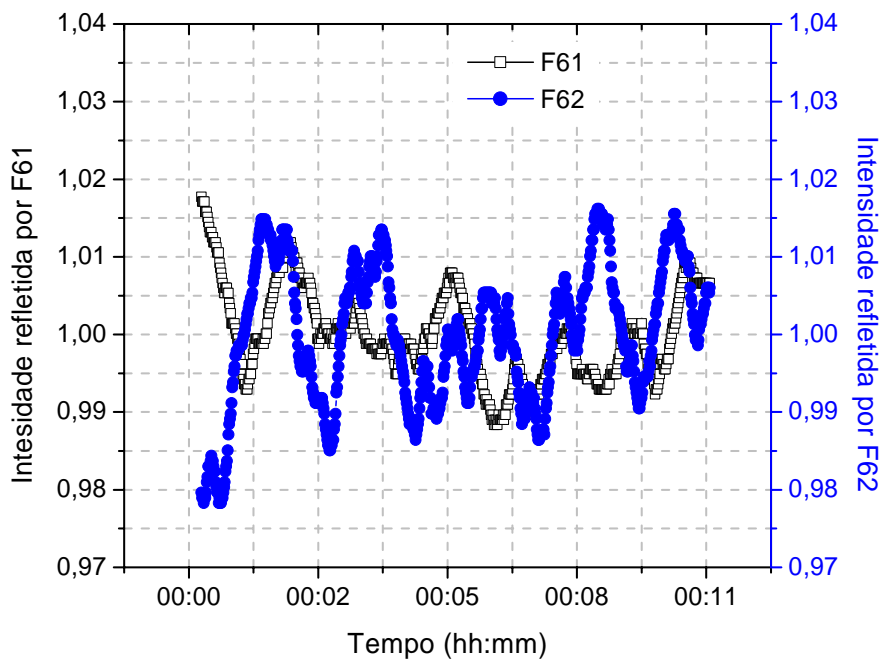
	Média	s (%) I	s (pm) λ
Filtro 11	1,55	0,93	
Filtro 12	1,53	1,38	
Razão 1	1,01	0,59	1,71
Filtro 21	2,11	0,47	
Filtro 22	2,51	0,69	
Razão 2	0,84	0,34	0,98
Filtro 31	2,67	0,75	
Filtro 32	2,40	0,87	
Razão 3	1,11	0,67	1,93
Filtro 41	2,82	0,94	
Filtro 42	2,56	0,46	
Razão 4	1,10	1,03	2,98
Filtro 51	2,47	1,55	
Filtro 52	1,93	0,69	
Razão 5	1,28	0,91	2,62
Filtro 61	1,53	0,59	
Filtro 62	1,48	0,90	
Razão 6	1,04	1,15	3,32

Tabela 5.2 Média e desvio padrão referentes aos gráficos das figuras 5.26 e 5.27.

A tabela 5.2 prova que a dependência da polarização é um fator aleatório. Para entender melhor esse efeito, a figura 5.25 mostra em detalhe as intensidades normalizadas dos filtros de dois canais, 1 e 6. Ao mudar o estado de polarização da fonte, a intensidade de luz que passa para os filtros varia de acordo com a PDL do acoplador. O tamanho e o diâmetro das voltas das fibras que estão entre os filtros propiciam pouca variação no estado de polarização da luz. Já quando a distância aumenta há uma variação maior e aleatória destes estados e vale ressaltar que além da distância percorrida pelo pulso, a polarização também varia com o comprimento de onda da luz. Na figura 5.25a nota-se uma variação conjunta das intensidades dos dois filtros e uma pequena variação independente entre eles. A variação conjunta indica que houve uma predominância da PDL do acoplador e que percurso do pulso entre os dois filtros ocasionou uma variação do estado de polarização que pode ser percebida na razão. Para os filtros do canal 6, figura 5.25b, os pulsos percorreram uma distância maior variando de modo diferente e aleatório os estados de polarização, sendo impossível ver uma correlação entre as intensidades dos pulsos. Considerando que a variação da temperatura da sala ao fazer as medidas não é suficiente para proporcionar variações dos estados de polarização equivalentes ao aqui conseguido, a incerteza da medida da razão na pode ser justificado pela variação da polarização.



(a)



(b)

Figura 5.25 Variação das intensidades refletidas pelos filtros, para a situação da figura 5.22, dos canais 1 (a) e 6 (b).

Uma forma de diminuir o grau de polarização de uma luz linearmente polarizada é utilizar um despolarizador de Lyot em fibra óptica [39, 40, 41]. Este despolarizador consiste em utilizar dois pedaços de fibra mono-modo com alta birrefringência (fibras HiBi) emendadas com uma rotação de 45° entre os eixos. O princípio de operação do despolarizador de Lyot é o mesmo que um simples pedaço de fibra HiBi com potência igual nos dois eixos principais. O estado de polarização na saída varia com o comprimento de onda, então uma fonte de banda larga terá seu espectro despolarizado na média.

Partindo deste princípio foi montado um despolarizador de Lyot que atendesse as especificações necessárias para despolarizar a luz do SLED. Com isso, conseguiu-se que o grau de polarização do SLED baixasse de 98% para 3%. Mas o que interessa é diminuir o grau de polarização da luz refletida pela rede de Bragg. Constatou-se que após colocar o despolarizador na saída do SLED a luz refletida por uma rede de Bragg com largura aproximada de 1nm ainda tinha 22% de grau de polarização. Para diminuir esse grau de polarização seria necessário aumentar o comprimento das fibras HiBi utilizadas no despolarizador. Mesmo

assim, com esse grau de polarização da luz refletida pela rede já seria suficiente para ver uma possível melhora nos resultados.

Foi posicionado o despolarizador de Lyot entre a fonte de luz e o controlador de polarização, figura 5.26, para verificar se há realmente uma melhora. Então, repetiram-se as medidas anteriores, figuras 5.27 e 5.28 e tabela 5.3.

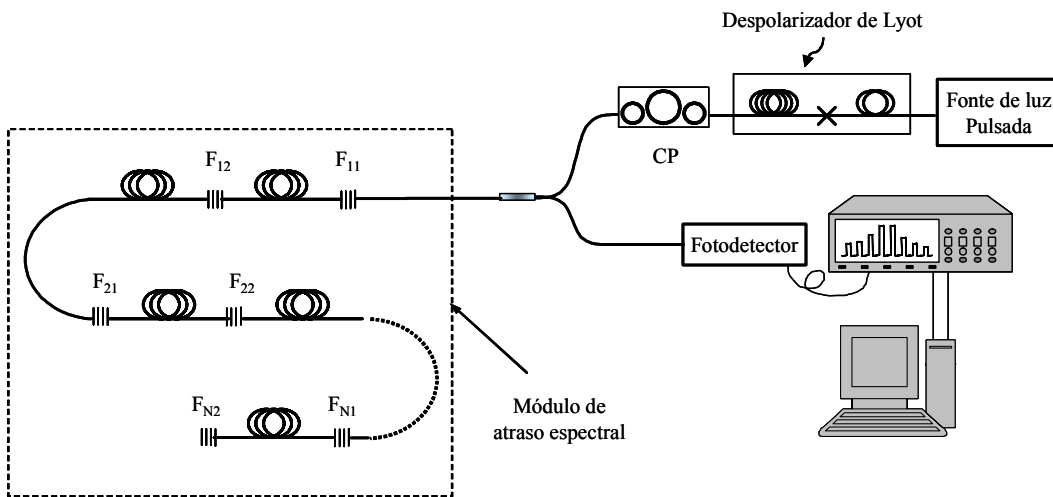


Figura 5.26 Configuração com despolarizador de Lyot para caracterizar a da dependência do sistema com os estados de polarização.

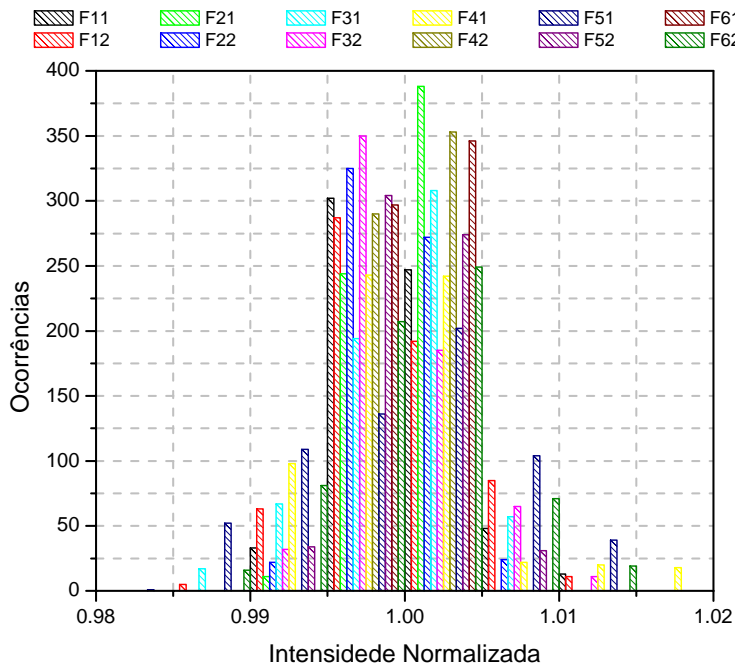


Figura 5.27 Histograma das intensidades normalizadas dos pulsos refletidos pelos filtros ao variar os estados de polarização da fonte com o despolarizador de Lyot, onde Fnm equivale ao filtro m do canal n.

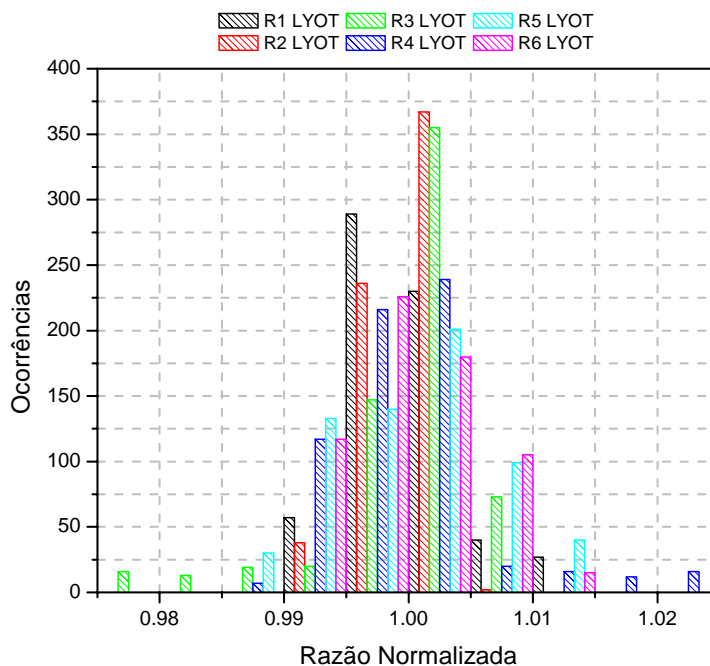


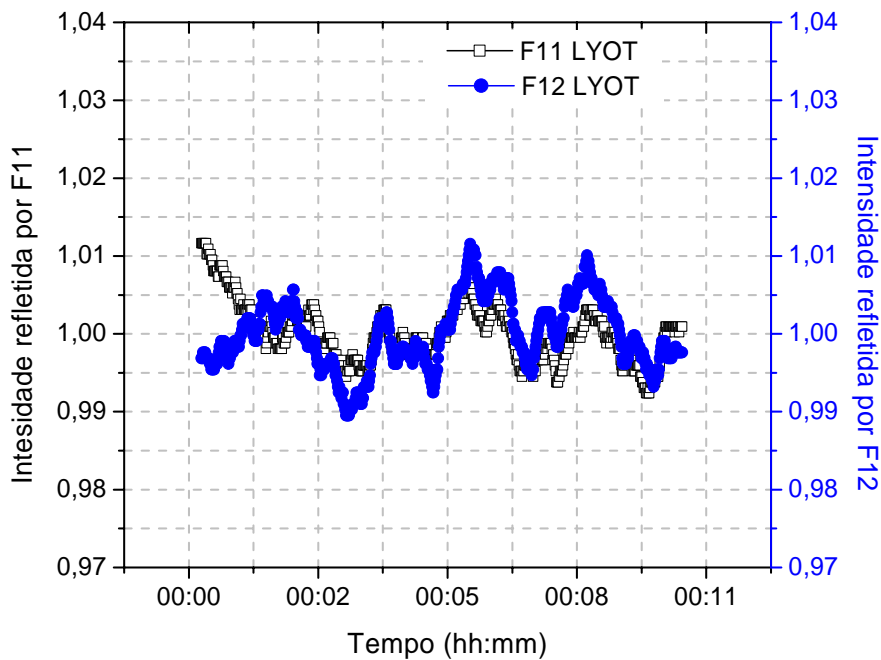
Figura 5.28 Histograma da razão normalizada, $R_n = F_{n1}/F_{n2}$, das intensidades de pico dos filtros para a situação da figura 5.26.

	Média	s (%) I	s (pm) λ
Filtro 11	1,40	0,37	
Filtro 12	1,36	0,45	
Razão 1	1,03	0,45	1,31
Filtro 21	1,87	0,22	
Filtro 22	2,22	0,26	
Razão 2	0,85	0,24	0,70
Filtro 31	2,33	0,41	
Filtro 32	2,09	0,40	
Razão 3	1,12	0,59	1,70
Filtro 41	2,45	0,52	
Filtro 42	2,19	0,16	
Razão 4	1,12	0,61	1,76
Filtro 51	2,10	0,66	
Filtro 52	1,63	0,32	
Razão 5	1,29	0,60	1,74
Filtro 61	1,29	0,25	
Filtro 62	1,24	0,51	
Razão 6	1,04	0,50	1,44

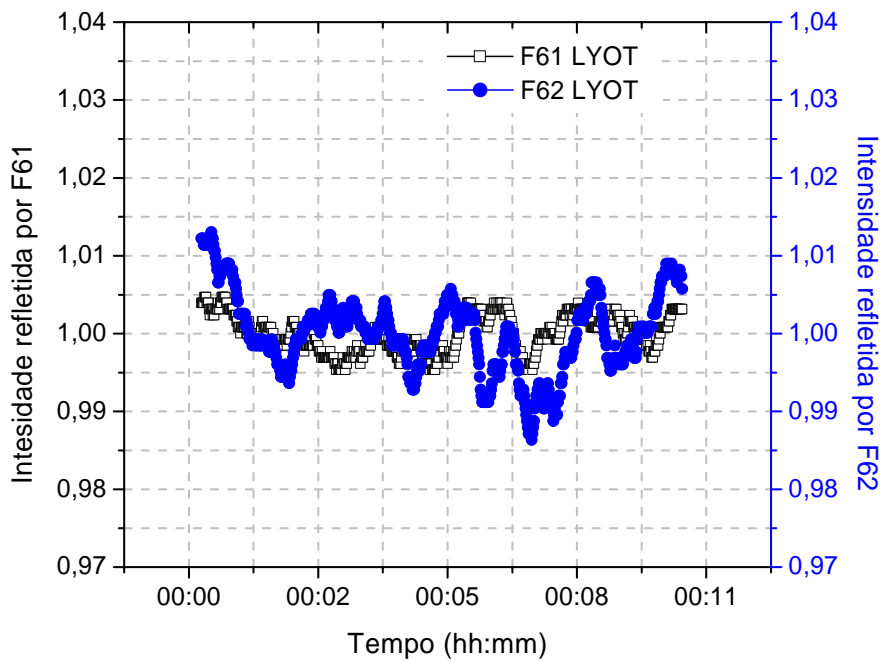
Tabela 5.3 Média e desvio padrão referentes aos gráficos das figuras 5.27 e 5.28.

Comparando estes dados com os dados da tabela 5.2 percebe-se que há uma melhora para todos os canais. Como visto antes, o grau de polarização da luz, depende da largura espectral e do comprimento de onda do espectro analisado, isso justifica a melhora desigual da incerteza dos canais ao colocar o despolarizador de lyot.

A figura 5.29, ao comparar com a figura 5.25, ilustra a melhora da variação da intensidade do SLED ao passar pelo acoplador com diferentes estados de polarização. Fica também evidente na figura 5.29 a variação independente das amplitudes refletidas por filtros diferentes devido à polarização residual para espectros mais finos.



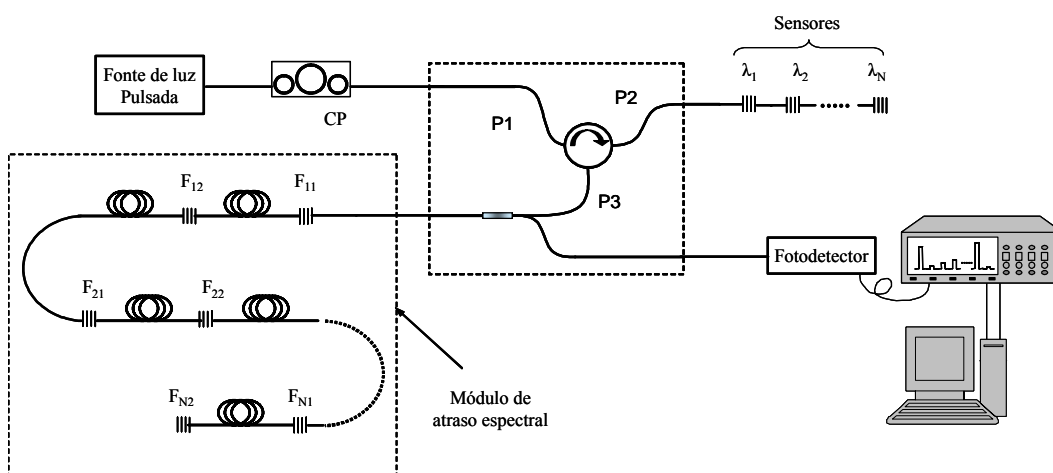
(a)



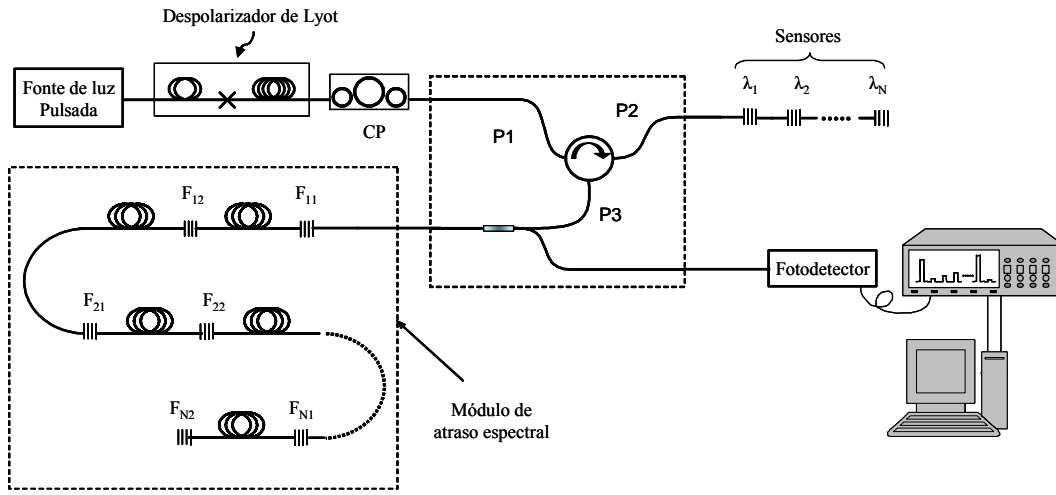
(b)

Figura 5.29 Detalhe da variação das intensidades refletidas pelos filtros dos canais 1 (a) e 6 (b) com o despolarizador de Lyot.

Para ver se esses resultados se aplicam quando colocados os sensores, as configurações da figura 5.30 foram montadas e o mesmo método de medição foi aplicado.



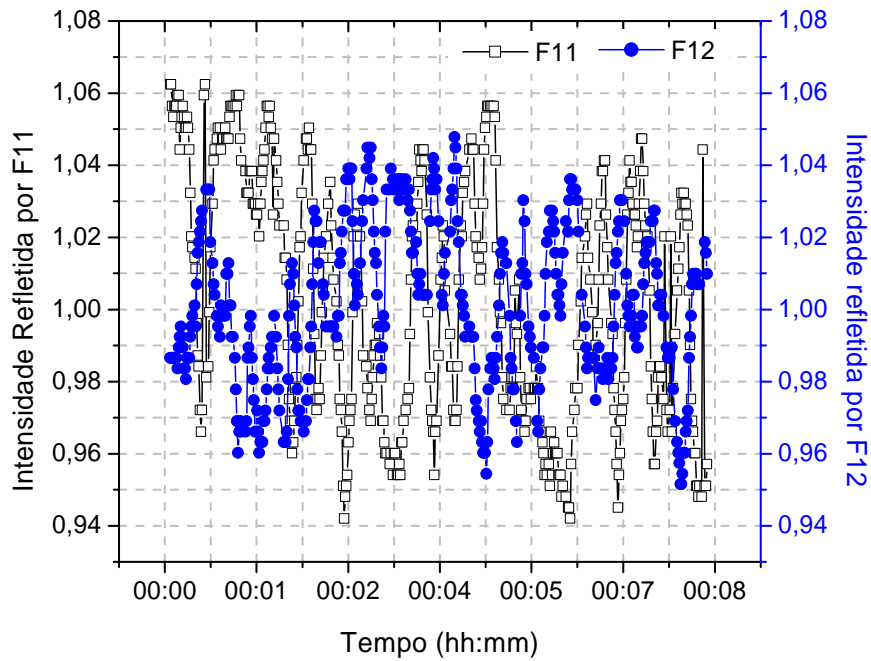
(a)



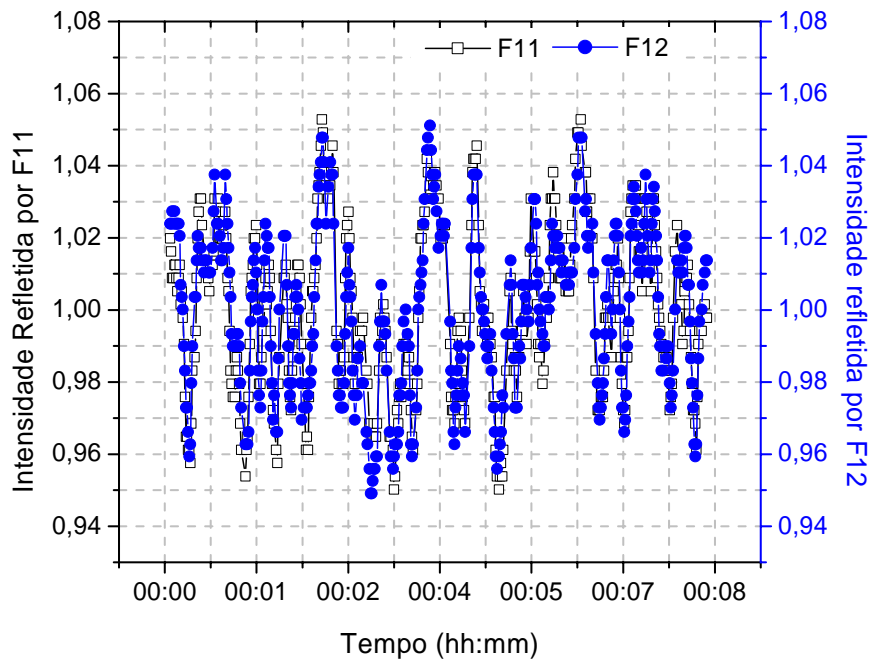
(b)

Figura 5.30 Configurações do sistema, sem (a) e com (b) despolarizador de Lyot.

As figuras 5.31 e 5.32 e a tabela 5.4 mostram os resultados destas medidas.



(a)



(b)

Figura 5.31 Variação das intensidades referentes ao canal 1, sem (a) e com (b) despolarizador de Lyot.

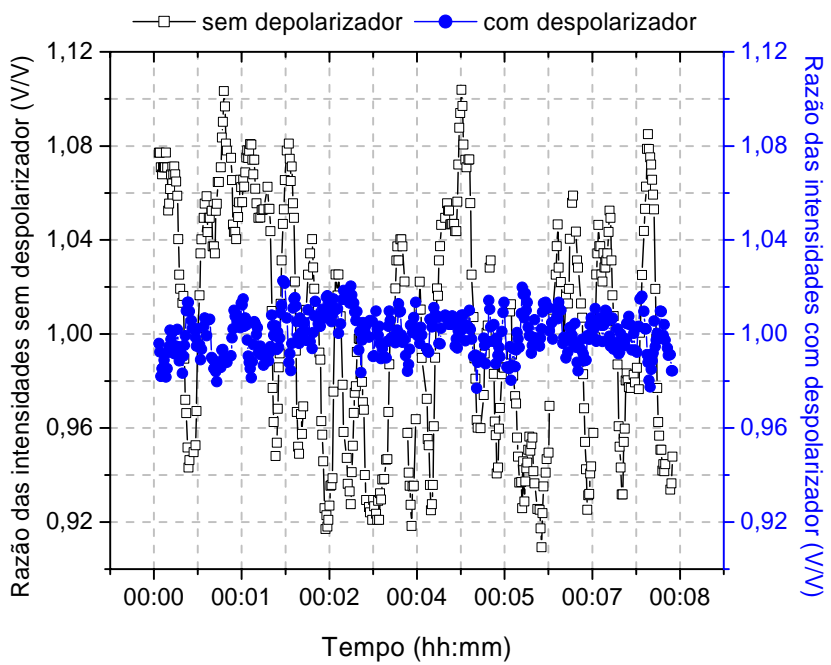


Figura 5.32 Comparação entre as razões encontradas para o canal 1 em duas situações, sem e com o despolarizador de Lyot.

	Sem Lyot		
	Média	s (%) I	s (pm) λ
Filtro 11	0,33	3,18	9,08
Filtro 12	0,34	2,12	6,09
Razão 1	0,97	4,65	13,15

	Com Lyot		
	Média	s (%) I	s (pm) λ
Filtro 11	0,27	2,30	6,58
Filtro 12	0,29	2,29	6,56
Razão 1	0,93	0,89	2,56

Tabela 5.4 Média e desvio padrão referentes aos gráficos das figuras 5.31 e 5.32.

Comparando os valores da tabela 5.4, obteve-se uma significativa melhora na incerteza final ao se colocar o despolarizador de Lyot. As variações do estado de polarização proporcionadas nestas medidas foram muito maiores que as mudanças de estado de polarização que podem ser causadas pela temperatura ambiente. Com isso, conclui-se que se a luz refletida por uma rede de Bragg for completamente despolarizada só sobrar o ruído eletrônico, podendo chegar a um desvio padrão para a razão em torno de 0,1%, equivalendo a incertezas de 0,2% da razão e valores para incerteza na posição espectral do sensor da ordem de 0,6 pm.

Vale lembrar que as incertezas estimadas neste capítulo são incertezas padrões independentes umas das outras e que se baseiam na análise estatística de uma série de observações. Para estimar a incerteza expandida do sistema completo é necessário calcular a incerteza padrão combinada que é alcançada a partir da raiz quadrada positiva da soma das variâncias e covariâncias de todas as grandezas, inclusive a incerteza do equipamento padrão. Com isso o valor extrapolado de 0,6 pm pode aumentar chegando a incertezas da ordem de 5 pm dependendo das especificações dos sensores.