

## 4

### Análise de perturbação da fonte de luz

Os sistemas integrais de controle oferecem facilidades para monitorar esforços dinâmicos localizadas em ductos de transporte de petróleo. Em vista disto precisa-se dos sensores a redes de Bragg por sua versatilidade de multiplexação, medição e instalação. A desvantagem que pode acontecer na operação destes sistemas são as perturbações de ruído, como também vibrações ou interferências eletromagnéticas aos equipamentos de medição.

Este desvio no espectro real com respeito a seu pico de comprimento de onda ocasiona medidas de erro pela incerteza da interrogação de leitura. Assim, este capítulo se acentua primeiramente na análise de perturbação realizada por uma fonte de luz para conseguir um espectro desviado que será um comprimento de onda diferente do real. Depois com ajuda da simulação de algoritmos representativos das perturbações na leitura dos sensores conseguiu-se corrigir estes distúrbios em tempo real nas condições de trabalho.

#### 4.1.

##### Análise de espectro desviado

Colocando um espectro como filtro de perturbação na faixa dinâmica de leitura do espectro transmitido da fonte de luz pode-se provocar um desvio no espectro do sensor medido, de tal forma que a posição real do sensor não corresponderá à verdadeira, é dizer, gerasse uma posição espectral desviada. Além disso, a intensidade de potência óptica deste espectro desviado é menor por perdas de superposição espectral, o que influi totalmente nas posições de varredura espectral do sensor e acrescentando incertezas na interrogação do comprimento de onda da rede. Cabe-se ressaltar que toda perturbação será validada experimentalmente com as respostas de simulação.

Para definir a análise de desvio na simulação numérica, estabelece-se a seguinte expressão do capítulo II - eq. (2.18), onde se pode mostrar o espectro transmitido da fonte de luz,  $T_l$ .



incrementando as incertezas de interrogação do sensor. Em vista disto para validar as simulações se realizou um teste experimental para representar a análise de perturbação.

## **4.2. Experimento para análise de perturbação**

Proporcionar um equipamento de leitura para a interrogação de sensores seguindo as aplicações dinâmicas, estáticas ou quase – estáticas de medição requer um acondicionamento prévio, com a finalidade de obter dados reais e com exatidão, conhecendo que cada equipamento de emissão, de leitura, de recepção e de medição forneceu incertezas experimentais.

### **4.2.1. Condições preliminares para montagem experimental**

A montagem experimental abarca dois sistemas de teste: um sistema de leitura com filtros fixos para interrogar um único sensor, e um sistema direto de leitura com um analisador de espectros ópticos (*Wavemeter*).

Cada sistema é perturbado na fonte de luz mediante um filtro de transmissão a rede de Bragg para o qual se instalará uma chave óptica que cumprirá a função de ligar e desligar a interferência do filtro de desvio para obter o distúrbio esperado.

No fim das condições se faz uma verificação das especificações de cada equipamento para identificar sua compatibilidade entre eles e conhecer a proporção de funcionalidade e versatilidade.

### **4.2.2. Fonte de banda larga**

Cabe-se ressaltar que a fonte deve ter um espectro plano em toda sua faixa de operação de leitura para evitar perdas de intensidade na interrogação dos sensores. No seguinte item se mostram as características do equipamento utilizado.

- |  |
|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Faixa Dinâmica: 1520 nm – 1570 nm</li> </ul>                |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Amplificação de sinal com bombeio de luz.</li> </ul>        |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Boa estabilidade de intensidade óptica na saída.</li> </ul> |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Aplicações com instrumentação de sensores.</li> </ul>       |



Figura 4.2 Fonte de banda larga.

Destaca-se que a faixa dinâmica de operação da fonte atingiu as larguras de banda dos espectros de análise.

#### 4.2.3. Analisador de espectros (*Wavemeter*)

- |   |
|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Faixa dinâmica: 1270 nm – 1680 nm</li> </ul>                                 |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Resolução de separação: 30 pm</li> </ul>                                     |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Exatidão absoluta em comprimento de onda: <math>\pm 1,5</math> pm</li> </ul> |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Faixa dinâmica óptica: &gt;35 dB</li> </ul>                                  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Aplicações com instrumentação de sensores.</li> </ul>                        |



Figura 4.3 Analisador de espectros para comprimentos de onda.

Este analisador proporciona uma boa estabilidade para medidas quase-estáticas por seu tempo de resposta e aquisição de dados. A desvantagem se encontra no ruído opto - eletrônico que distorce as curvas espectrais medidas por perdas de atenuação no sistema.

#### **4.2.4. Demultiplexador de comprimentos de onda (*DWDM*)**

O *DWDM* possui 16 canais espectrais dos quais se escolhem os canais mais próximos entre eles e, que estejam próximos à varredura espectral do sensor por sua dependência da posição experimental.

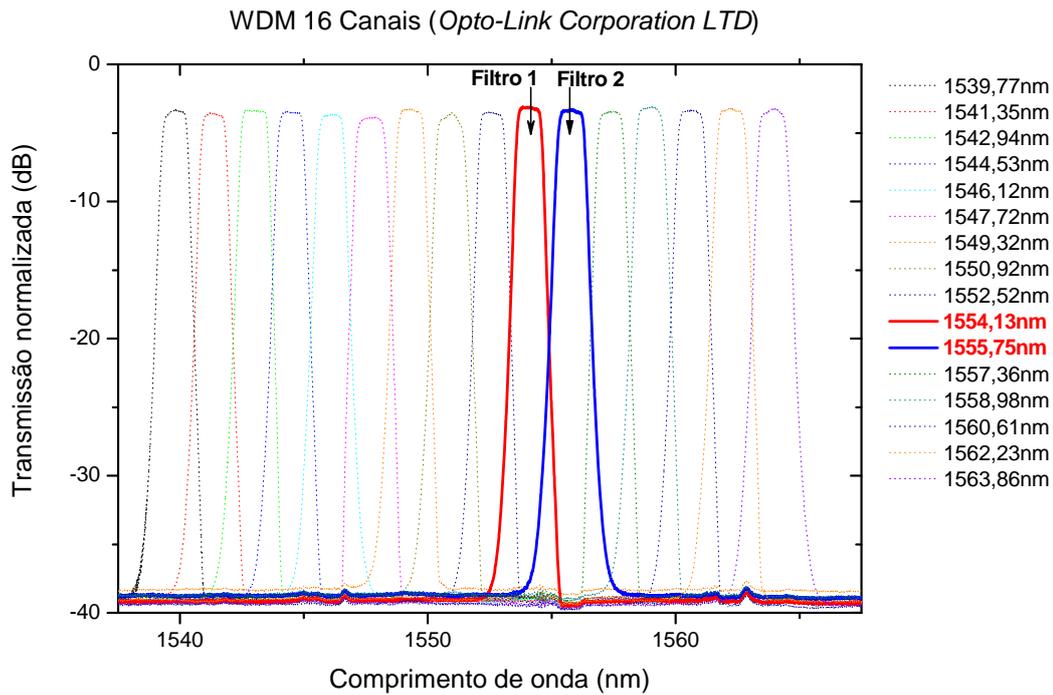


Figura 4.4 Demultiplexador com 16 espectros como filtros de transmissão.

Na figura 4.4 destaca-se a posição dos filtros fixos, onde o primeiro está na posição de 1554,13 nm e o segundo fica próximo na posição de 1555,75 nm. Ambos filtros têm alta refletividade de transmissão e seu intervalo entre picos máximos atingiu a varredura de operação do sensor.

#### 4.2.5. Medidor de potência óptica com dois canais

O medidor de potência opera com dois fotodetectores para os canais ópticos, suas faixas de detecção vão de 800 nm até 1650 nm. Este equipamento possui interface gráfica de aquisição de dados para o computador mediante instrumentação virtual pelo que se sintetizaram os tempos de medição com os filtros fixos. Além disso, oferece sincronização entre vários equipamentos, estabelecendo exatidão na leitura para testes de laboratório.



Figura 4.5 Medidor de potência com dois detectores ópticos.

Os detectores ópticos mediram um sinal de medição e um sinal de referência, que serão as respectivas convoluções do sensor com cada filtro fixo.

#### **4.2.6. Acondicionamento e aquisição da chave óptica**

Um aspecto importante é controlar e configurar o tempo de ligação de um canal 1 com respeito ao canal 2, dependendo da aplicação de chaveamento. Para seu funcionamento, este dispositivo precisa de uma alimentação de tensão em +5 VDC e um controle com contador de tempo para ligar e desligar ambos caminhos dos canais ópticos.

Usando um acondicionamento eletrônico e um dispositivo conector entre a instrumentação virtual e a entrada digital (0 – 1), controlou-se o sistema de chaveamento em intervalos de 30 segundos, para os dois canais respectivamente. A figura 4.6 mostra a arquitetura de instrumentação para a chave óptica.

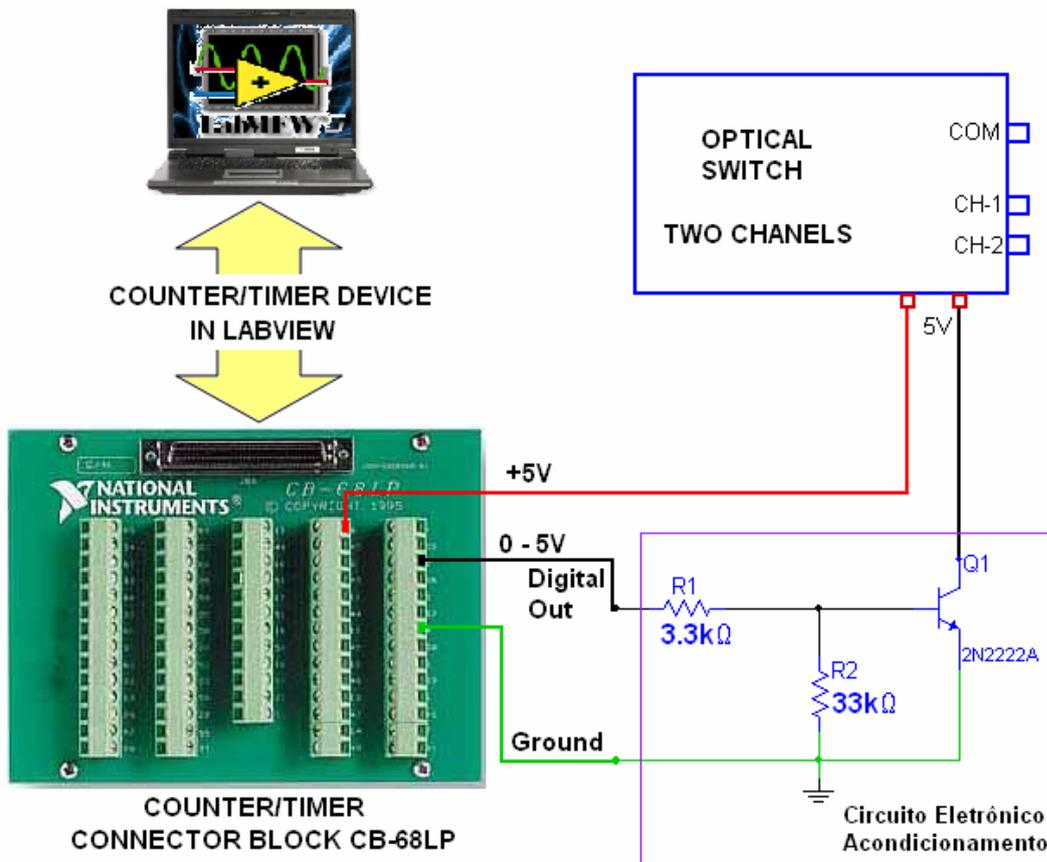


Figura 4.6 Arquitetura de acondicionamento da chave óptica.

Na figura 4.6 um instrumento virtual de programação controla o contador de tempo (programado em 30 seg.) para enviar um pulso de 0 VDC até 5 VDC à placa de aquisição eletrônica (CB-68LP), mas, para controlar a chaveamento óptico mediante este pulso, precisasse acondicionar um circuito eletrônico que atenuará a corrente elétrica (mediante 2 resistores, um de 3,3 kΩ em série, e outro de 33 kΩ em paralelo com um transistor 2N2222A). Esta placa de aquisição à sua vez fornecera os dados de aquisição do tempo e tensão elétrica na interface computacional do programa para verificação do teste de acondicionamento da chave óptica.

### 4.3. Montagem experimental

Prevista a identificação dos equipamentos e determinada a arquitetura de instrumentação do chaveamento óptico, mostra-se na figura 4.7 a montagem

experimental que fornece a perturbação da fonte no sistema de interrogação. A finalidade é comparar procedimentos de leitura normal do sensor, e a leitura com perturbação da fonte de luz.

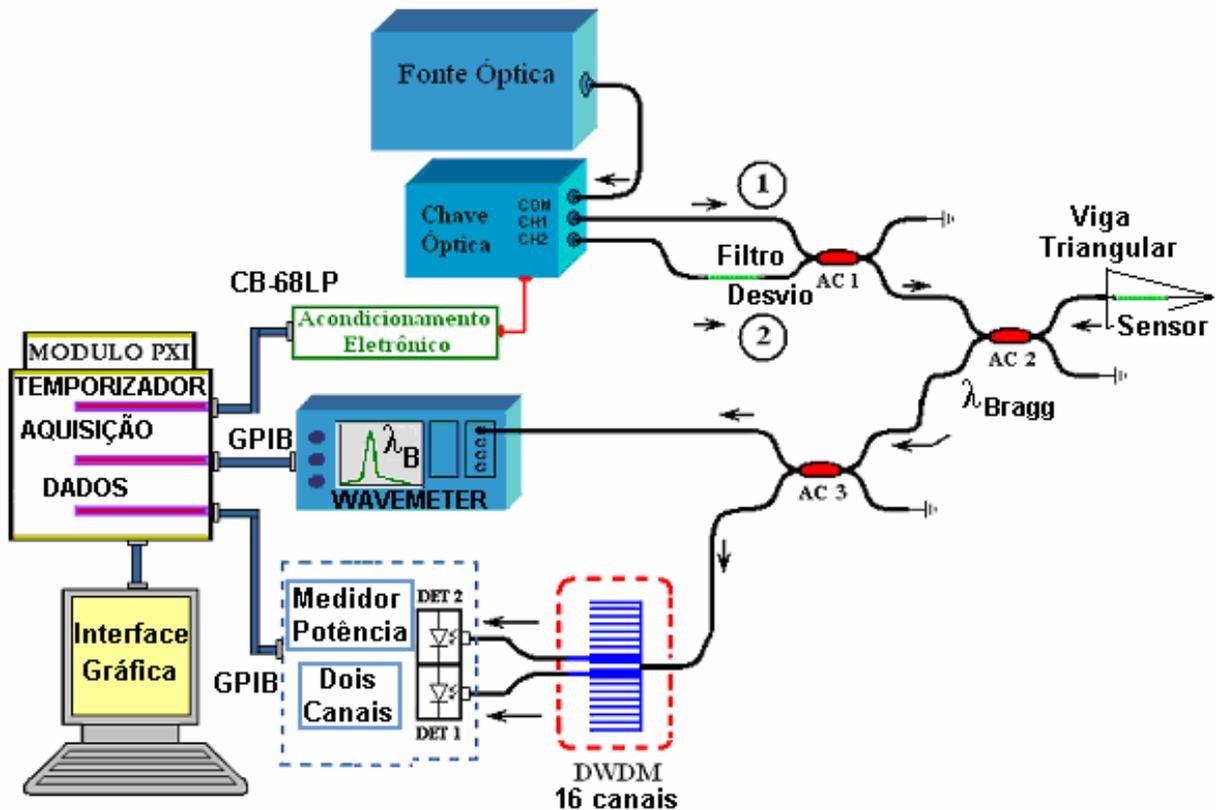


Figura 4.7 Montagem experimental e arquitetura de instrumentação para a análise de perturbação.

Do esquema na figura 4.7, a fonte de luz de banda larga incide luz no sistema através da chave óptica que tem dois canais para dirigir a luz em diferentes caminhos um de cada vez.

No caminho 1 a luz passa diretamente passando pelos acopladores e fazendo a leitura do sensor que é uma rede de Bragg de 1553,50 nm com FWHM=0,92 e 70% de refletividade, este sensor foi colado em uma viga triangular para ter uma deformação mecânica uniforme. Assim o espectro refletido do sensor chega simultaneamente ao analisador de espectro óptico (*Wavemeter*) e, também ao sistema de filtros fixos que está composto por um demultiplexador *DWDM* de 16 canais e, um medidor de potencia óptico (circuito receptor óptico). Este receptor

óptico tem dois canais diferentes para cada filtro fixo e recebem a sinal fornecido pelos fotodetectores DET 1 e DET 2.

O demultiplexador *DWDM* foi acondicionado para o funcionamento de dois filtros de transmissão (1554,13 nm e 1555,75 nm com  $FWHM=1,05$  nm) acoplados ao medidor de potência onde podem ser obtidos os valores independentes e simultâneos mediante instrumentação virtual de aquisição de dados.

Da figura 4.7, no caminho 2 da chave óptica, a luz passa por uma rede de Bragg utilizada como filtro de desvio (1554,90 nm com  $FWHM=0,92$  e 70% de refletividade) que ocasiona uma perturbação no espectro da fonte de luz, e conseqüentemente, provoca desvios na leitura do sensor a ser medido. Logo depois de passar pela perturbação óptica, a luz continua a trajetória para interrogar o sensor como anteriormente explicado no caminho 1. O espectro desviado do sensor será um comprimento de onda gerado ( $\lambda_{Gerado}$ ) pela perturbação, mas não real ( $\lambda_{Real}$ ).

Em resumo, o processo experimental se baseou em tomar dados do receptor óptico sem perturbação e conhecer o espectro real do sensor,  $\lambda_{Real}$ , da rede de Bragg. Passado 30 segundos se liga o receptor óptico com perturbação para conhecer o espectro gerado,  $\lambda_{Gerado}$ , do sensor. Cada posição diferente do sensor submetido a um esforço mecânico foi identificada como uma varredura de leitura sem desvio e com desvio respectivamente.

As condições do experimento foram integradas com um controle de instrumentação virtual para aquisição de dados e redução de tempos de ensaio em vista de obter uma monitoração remota.

Como já anunciado estes resultados experimentais do sistema de leitura direto (*Wavemeter*) foram comparadas com resultados de simulação com base de dados do sistema de filtros fixos.

#### **4.4. Simulação e validação da análise de perturbação**

Nesta perturbação provocada, observa-se que tanto o filtro de desvio e o sensor de interesse devem ter posições espectrais próximas para simular a multiplexação de vários sensores em uma mesma posição de comprimento de onda.

#### 4.4.1.

#### Simulação experimental da análise de distúrbio da fonte perturbada

- **Ajuste de entrada com FWHM**

Inicialmente cada espectro simulado foi centralizado por sua largura de banda a meia altura e corrigida respectivamente por o ruído de leitura experimental. Além disto, um aspecto importante é levar em conta as refletividades do sensor de leitura e o filtro de desvio respectivamente para compensar o ganho de intensidade óptica, como é mostrado na eq. (4.1). Desta forma, a normalização de cada espectro é independente um de outro e cada valor absoluto de intensidade pode ser representado por um algoritmo matemático na seguinte eq. (4.2).

$$I_D = \frac{I_D(FWHM)}{\left[ \text{Max}[I_D(FWHM)] \right]} \quad (4.2)$$

Onde,  $I_D$ : Intensidade do filtro de desvio

Porém, o vetor de intensidade de desvio que provocará uma perturbação na fonte de luz é mostrado na eq. (4.3).

$$I_{DG} = r_1 \cdot I_D \cdot I_F \quad (4.3)$$

Onde,  $I_{DG}$ : Intensidade de desvio gerado após passar pela fonte de luz.

Uma vez conhecidos os parâmetros iniciais para o sensor e o filtro de desvio, faz-se um gráfico de comparação na figura 4.8, mostrando as larguras de banda e faixa dinâmica de leitura dos espectros.

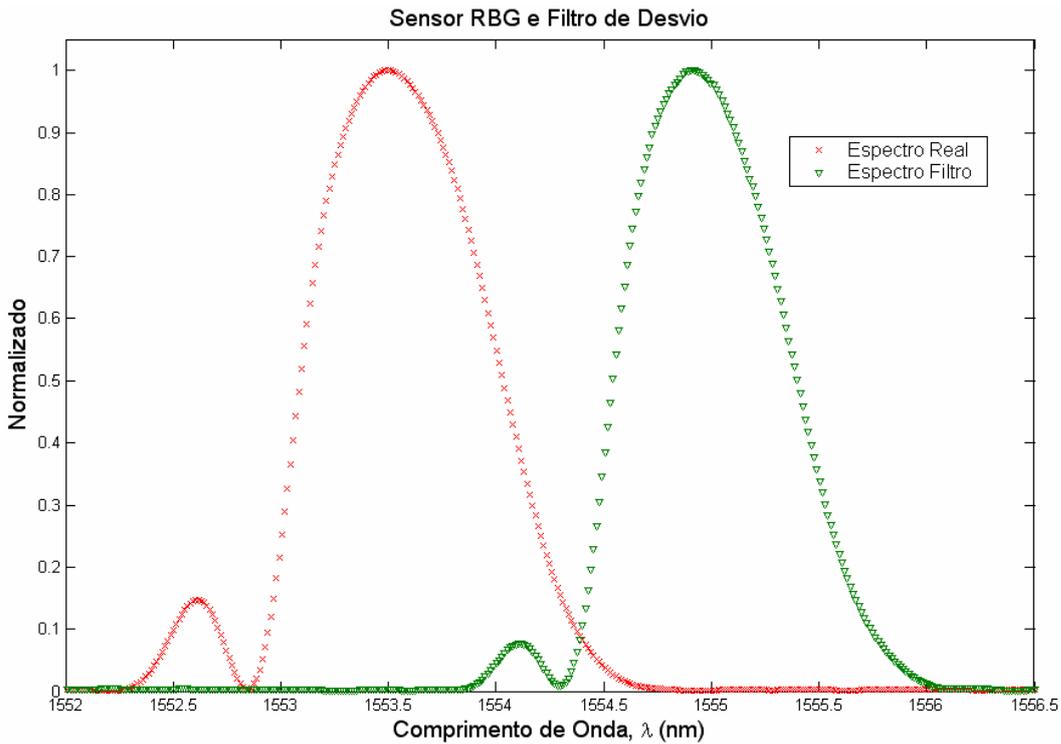


Figura 4.8 Posições espectrais do sensor real e do filtro a rede de Bragg.

Na figura 4.8, tanto o sensor como o filtro de desvio tem uma similar curva gaussiana com a intenção de adquirir um desvio real, quanto o sistema de leitura interroga um grupo de “ $n$ ” sensores com o mesmo comprimento de onda que perturbam a fonte de luz.

O espectro do filtro de desvio da rede de Bragg tem uma posição de comprimento de onda em 1554,90 nm com refletividade de 70%, tanto que a refletividade do sensor chega até 80% de intensidade. O intervalo entre as posições pico é de 1,4 nm, o que determina a posição próxima do sensor para exibir a maior varredura da faixa dinâmica na análise de desvio.

Por tanto, o espectro de transmissão da fonte perturbada se relaciona com o espectro do filtro de desvio e a fonte normal sem perturbação. Este algoritmo se apresenta na seguinte eq. (4.4).

$$I_{FP} = [1 - (I_D \cdot r_1)] \cdot I_F \quad (4.4)$$

Onde,  $I_{FP}$ : Intensidade da fonte perturbada

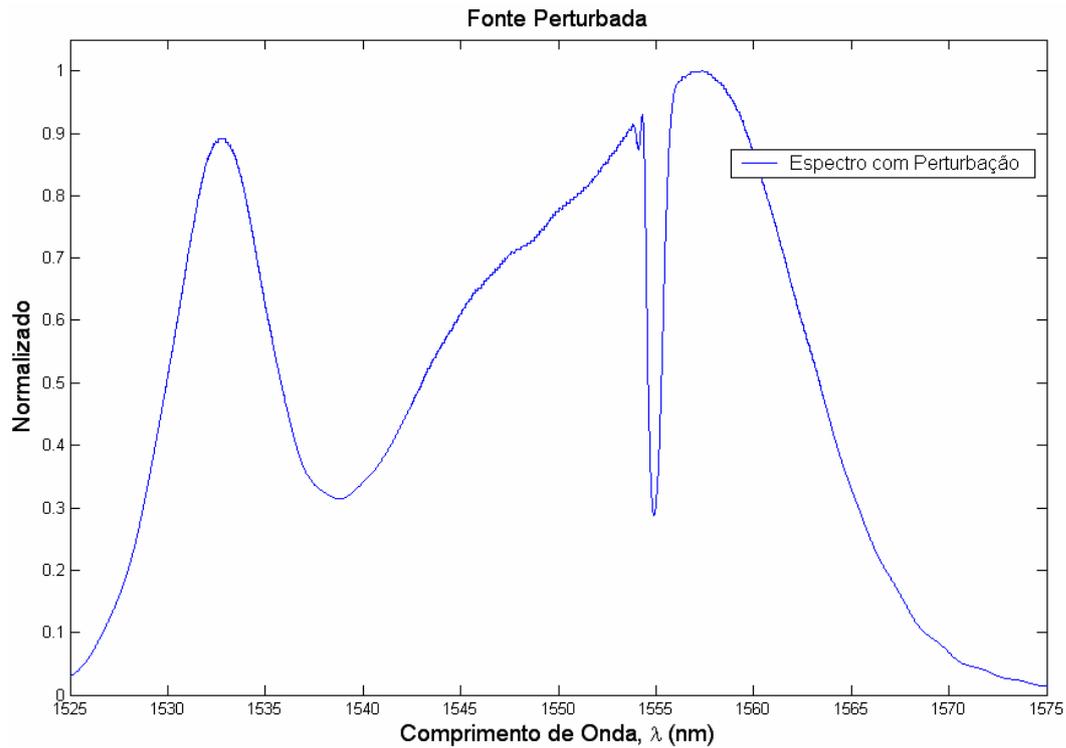


Figura 4.9 Espectro da fonte de luz perturbada como análise de desvio.

Do gráfico mostrado na figura 4.9 o espectro transmitido da fonte tem uma perturbação com largura de banda e faixa dinâmica igual ao filtro de desvio, o que significa que a simulação é íntegra na região de análise. No entanto, encontraram-se inconsistências de intensidade óptica o que influi diretamente na intensidade de leitura do sensor. Uma visualização na figura 4.10 interpreta com maior conhecimento as inconsistências de intensidade da fonte perturbada, os filtros fixos e o sensor a rede de Bragg.

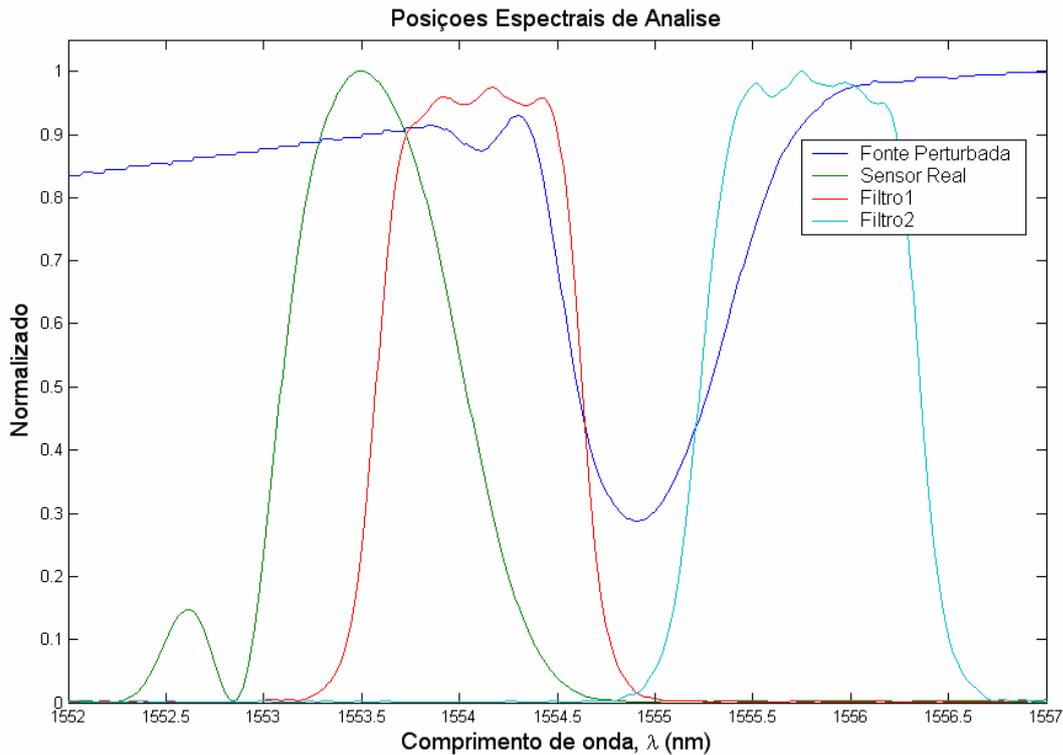


Figura 4.10 Espectro do sensor a RGB, dos filtros fixos e a faixa dinâmica da fonte de luz.

Aparentemente existem divergências na intensidade de cada espectro, mas devido que cada espectro foi normalizado independentemente um de outro, pode-se corrigir esta incerteza introduzindo os valores de refletividade e normalização para auto-referenciar o sistema de leitura. Como visto no capítulo anterior um algoritmo seqüencial de retro alimentação determina as potências ópticas na convolução de espectros.

- **Ajuste de varredura espectral e algoritmo seqüencial**

A seqüência de algoritmos mostrada na figura 4.11 para a varredura espectral com desvio é basicamente a mesma mostrada no capítulo anterior, mas incluem-se os parâmetros e ajustes de desvio que serão necessários nos resultados de perturbação.

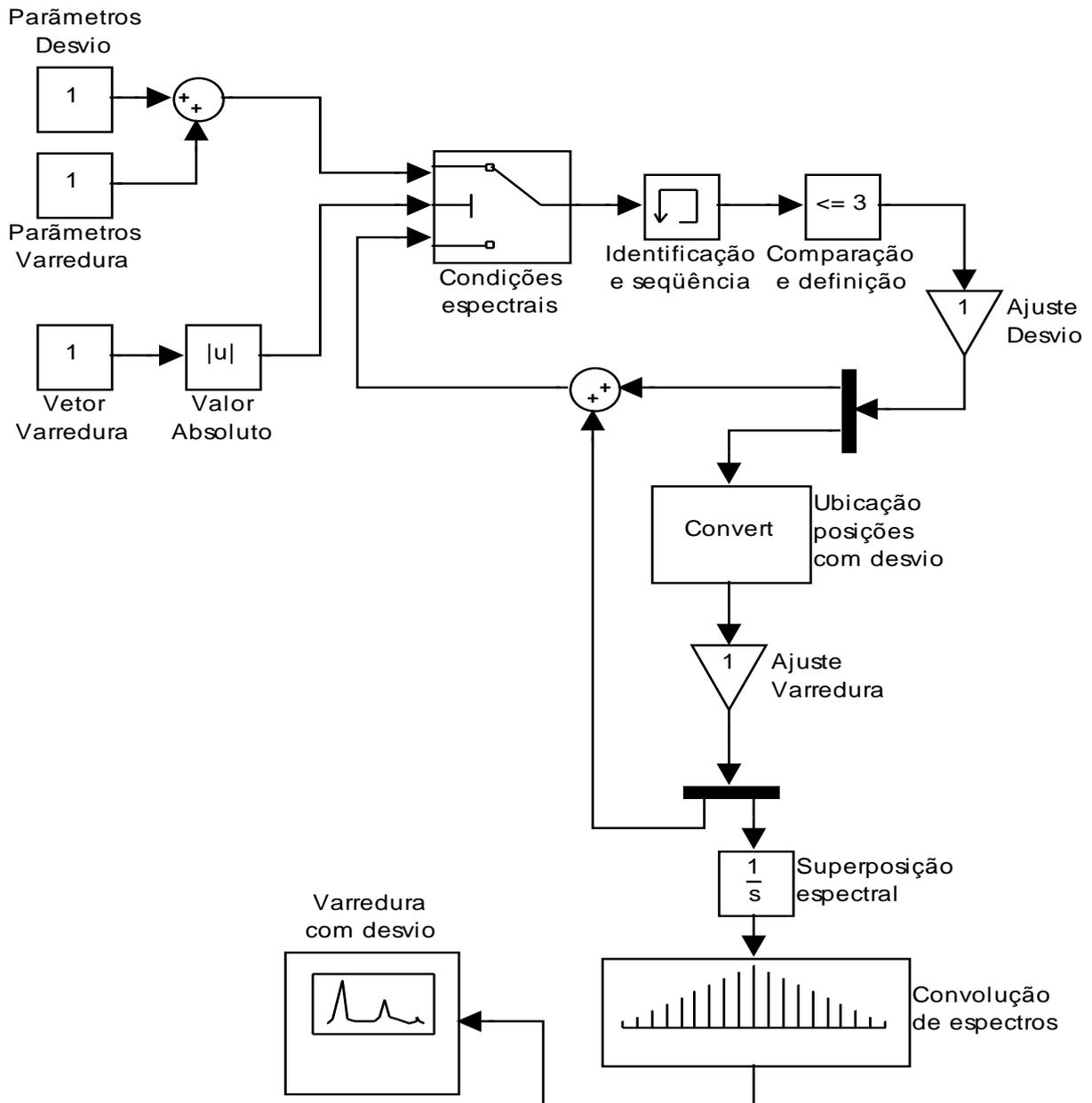


Figura 4.11 Fluxo de controle para a varredura do sensor com desvio.

O fluxo de controle da figura 4.11 mostra que para cada seqüência condicional de varredura a programação toma inicialmente os dados de entrada como “parâmetros iniciais de posição” e “dimensão de varredura” acrescentando-se agora os “parâmetros de desvio”. Estas condições iniciais de varredura e desvio espectral são correlacionadas ao sensor, o filtro de desvio, os filtros fixos e à fonte de luz. Assim, para o caso em que uma condição “identifica uma posição” é

levado para uma “memória de seqüência”, para depois ser “comparado e definido” pela retro-alimentação de ajuste de varredura.

Cada posição de varredura é “localizada e ajustada pela resolução e maximização da banda de leitura”. Logo, tanto as posições no vetor de comprimento de onda  $e$ , como no vetor de intensidade intersectam-se em “pontos de superposição” entre os dois filtros fixos e o sensor desviado (provocado pelo filtro de desvio de transmissão), em relação à fonte de luz. Cada superposição é uma “convolução integrada” e parametrizada no vetor de varredura. Em conclusão com a inserção de parâmetros e ajustes de desvio pela fonte perturbada se encontraram “ $n$ ” posições do sensor de leitura com distúrbio.

Já na seguinte figura 4.12 foram simuladas 12 posições diferentes do sensor e comparadas com posições de interrogação experimentais.

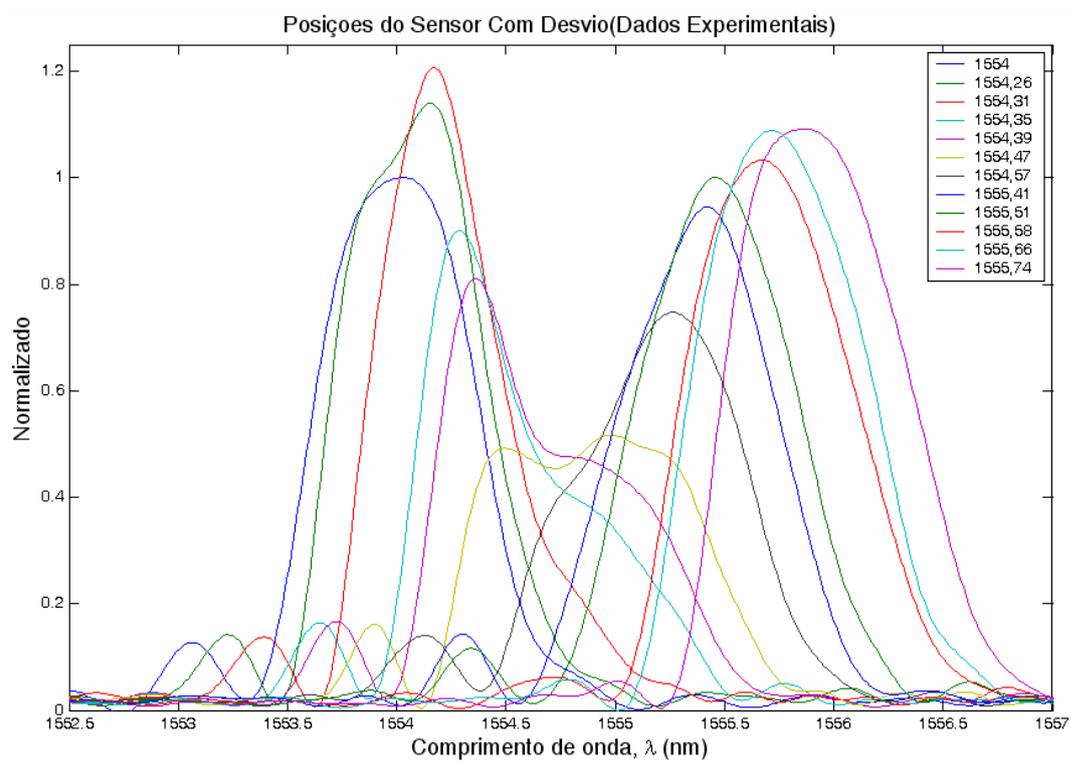
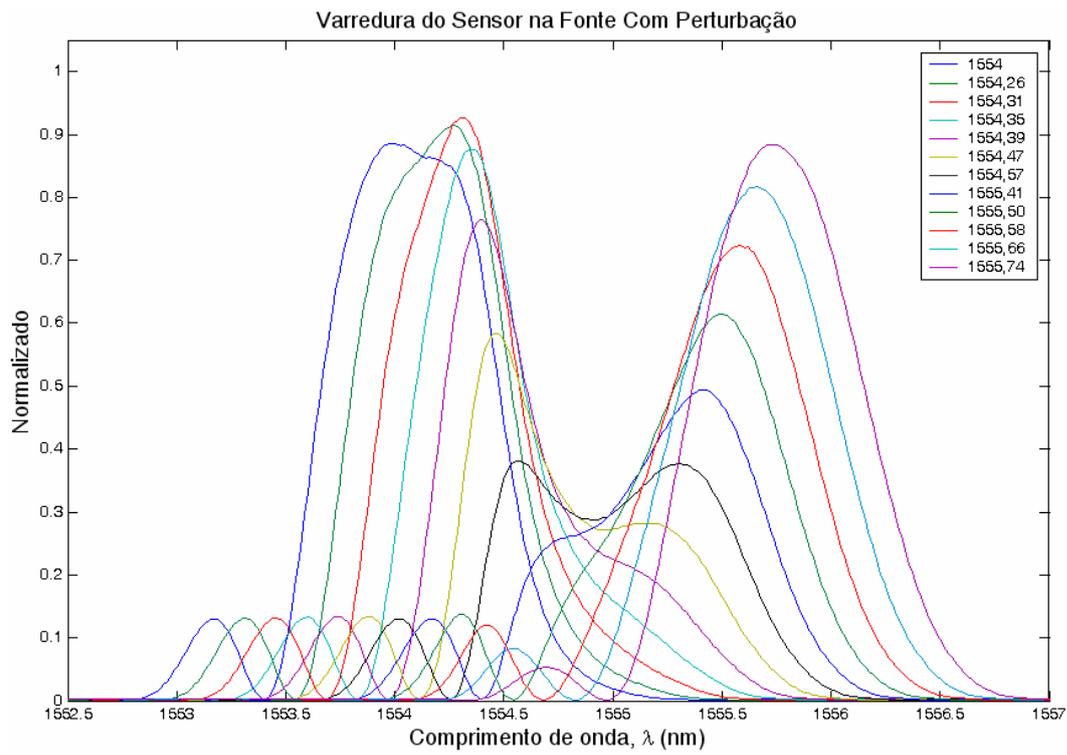


Figura 4.12 Varredura do sensor simulado e experimental para 12 posições.

Da figura 4.12 o desvio provocado causa posições deformadas no comprimento de onda do sensor. Cada posição do pico espectral muda distintamente um de outro com respeito à proximidade da posição do desvio, encontrando-se pontos onde os filtros não alcançam a detectar uma posição pico na zona central de desvio.

Também se conclui que os resultados experimentais têm divergências nas curvas espectrais em relação às simulações, mas as posições de comprimento de onda são muito próximas em ambos casos.

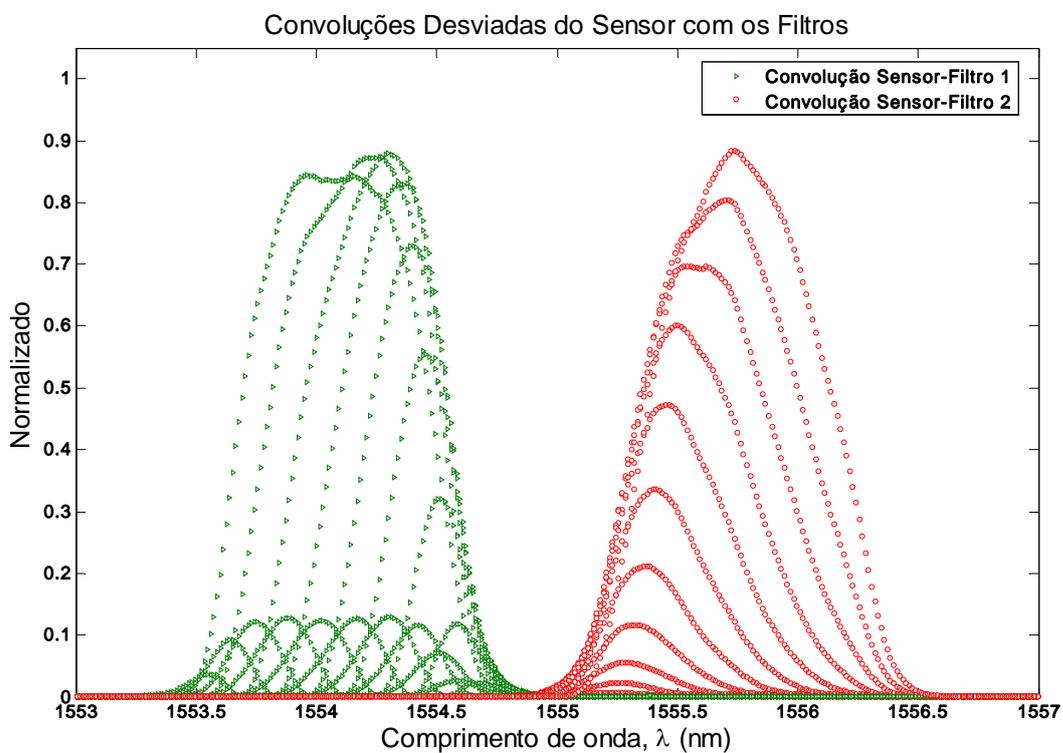


Figura 4.13 Intersecção do sensor com os filtros quando muda sua posição.

Na figura 4.13 as diferentes intersecções das posições espectrais no comprimento de onda do sensor com os filtros não serão iguais, pela influência da fonte perturbada. Desta forma, um dos filtros pode atingir mais pontos de intersecção em comparação com o outro devido ao alcance da varredura do sensor e sua largura de banda. Cada posição será a convolução necessária para encontrar uma razão de intensidades com cada filtro.

No gráfico da figura 4.14, pode-se avaliar concretamente a influencia total da perturbação provocada, mostrando prematuramente a faixa dinâmica de operação do sensor para sua calibração.

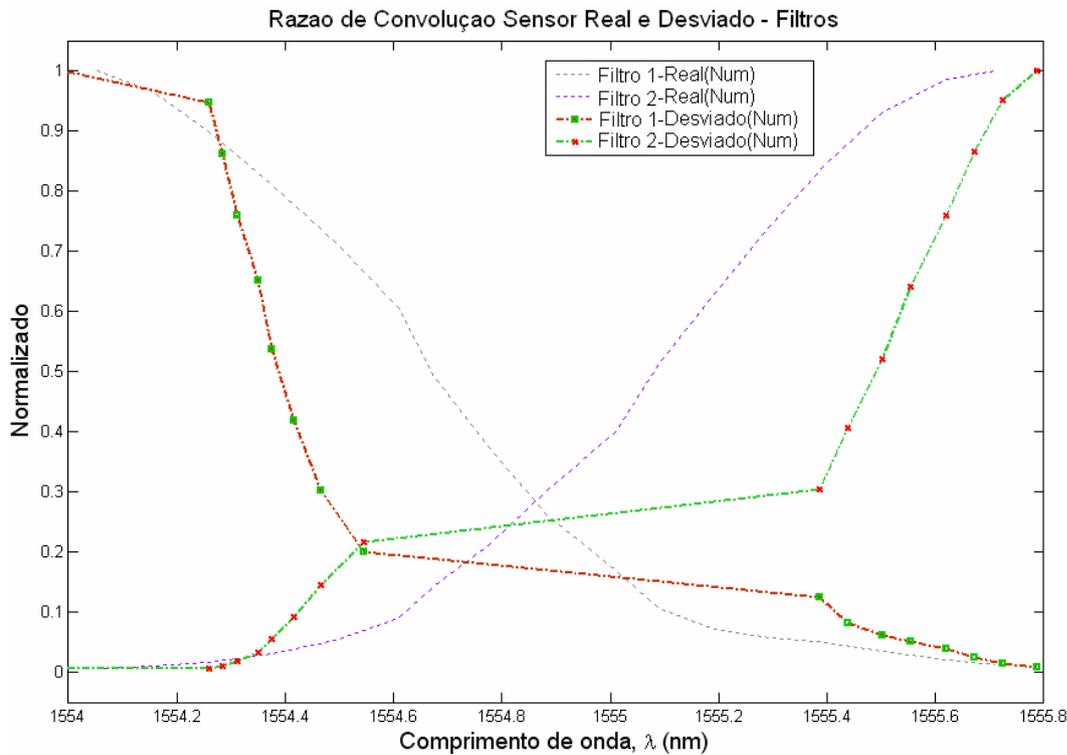


Figura 4.14 Comparação das razões do sensor sem desvio e com desvio.

Da figura 4.14 se faz uma comparação com as razões de intensidade do sensor sem desvio da figura 3.8 do capítulo III onde, se percebe uma total inconsistência na posição do sensor, em um intervalo desde 1554,5 nm até 1555,4 nm. Neste intervalo se desconhece alguma posição pico do sensor.

Para uma melhor compreensão, na figura 4.15, mostra-se a mudança das convoluções de posição para os filtros 1 e 2 sem perturbação e com perturbação, onde as razões das convoluções de intensidade óptica do sensor com os filtros fixos mostram a perturbação ocasionada pelo deslocamento da fonte de luz.

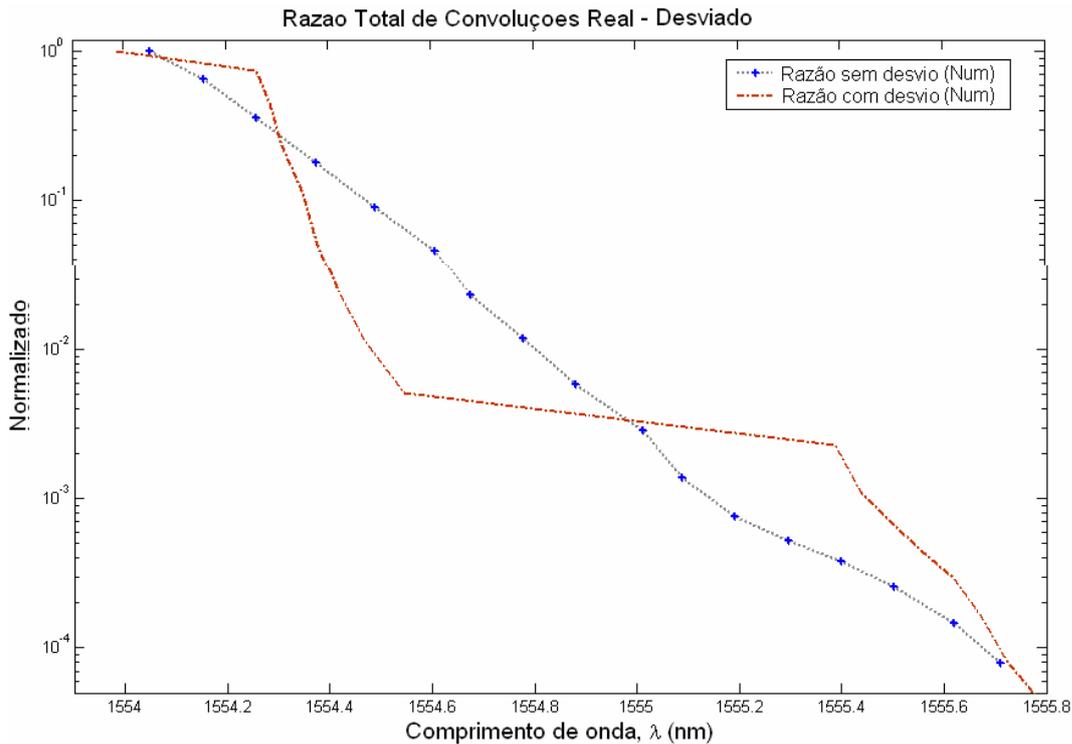


Figura 4.15 Comparação da razão total com desvio e sem desvio.

Na figura 4.15 mostra explicitamente a análise de desvio provocado, encontrando-se que só existem quatro pontos que coincidem com a posição real do sensor: 1554,1 nm; 1554,3 nm; 1555 nm; 1555,7 nm; conclui-se assim que a perturbação na fonte de luz provoca um desvio evidente na proximidade da posição do pico espectral do sensor.

- **Incertezas**

A comparação entre as incertezas de interrogação do sensor com a fonte sem desvio e com desvio, da figura 4.16, mostrará a importância da divergência de perturbação. Esta análise de incertezas foi baseada em uma diferencial de leitura do vetor de convolução.

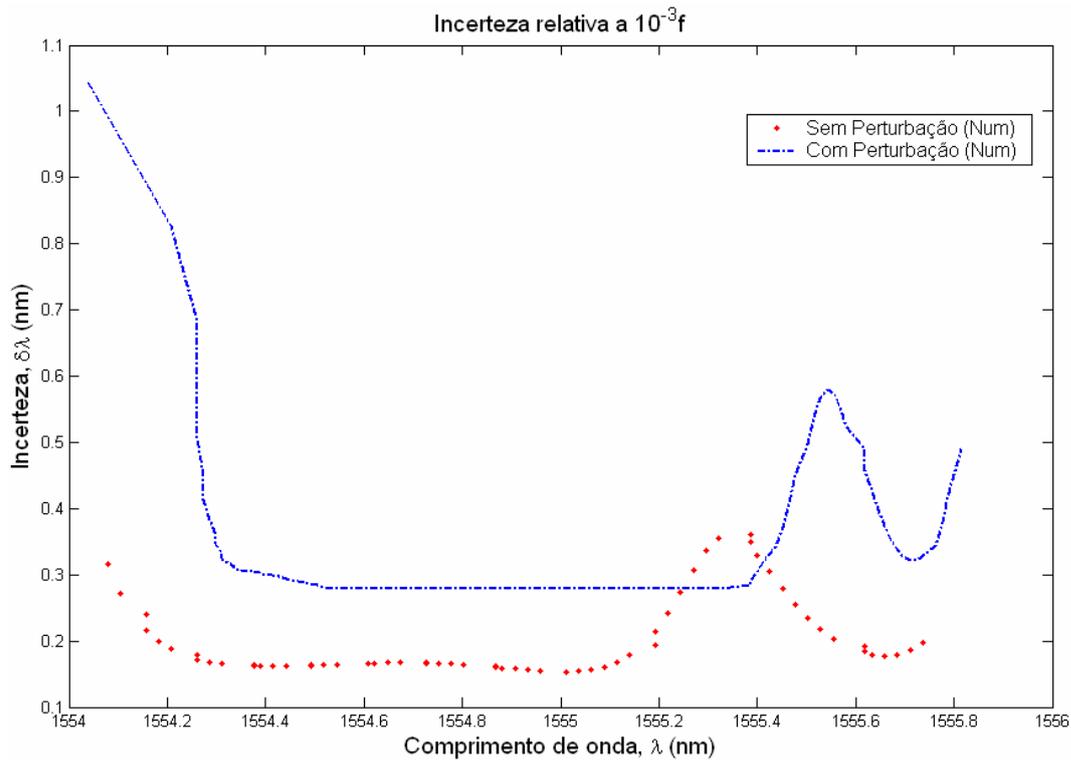


Figura 4.16 Incertezas da interrogação sem desvio e com desvio.

Da figura 4.16 a incerteza de leitura com a fonte de luz sem perturbação alcança até 0,35 pm em uma posição de 1555,33 nm. Já com a fonte de luz perturbada pode-se visualizar uma incerteza de 0,30 pm em toda a zona central da faixa dinâmica de operação com dois pontos críticos de quase 1 pm na posição de 1554,08 nm e, 0,60 pm na posição de 1555,52 nm do sensor respectivamente.

Em conclusão o sensor terá uma faixa de operação de varredura de 1554,32 nm até 1555,25 nm com um intervalo de incertezas entre 0,18 pm e 0,30 pm.