

### 3

## Análise de simulação por modelo numérico

A simulação consta de seqüências operacionais de programação dos dados experimentais que proporcionam tarefas baseadas em funções e operadores lógicos. Assim se conseguiu conhecer o comportamento e controle da varredura espectral do sensor, e acrescentando a fonte de luz na análise se determinaram um algoritmo programável para estabelecer o sistema auto-referenciado em diferentes situações.

Como anteriormente definido a técnica de interrogação é baseada no pico máximo espectral, mas cada curva gaussiana, por ser uma base de dados de um vetor, nem sempre está centrada em seu valor máximo de intensidade, pelo que cada espectro de análise foi centralizado por uma aproximação estatística: A largura de banda à meia altura [17].

Na curva gaussiana da figura 3.1 pode-se descrever a posição central da função a partir da aproximação da largura de banda a meia altura, onde dois pontos de referência no eixo das abscissas “x” são relacionados com a meia altura máxima da curva no eixo das ordenadas “y”. Esta posição central seria a média aritmética da função que é representada na eq. (3.1).

$$X_c = X_1 + \frac{X_2 - X_1}{2} = \frac{X_2 + X_1}{2} \quad (3.1)$$

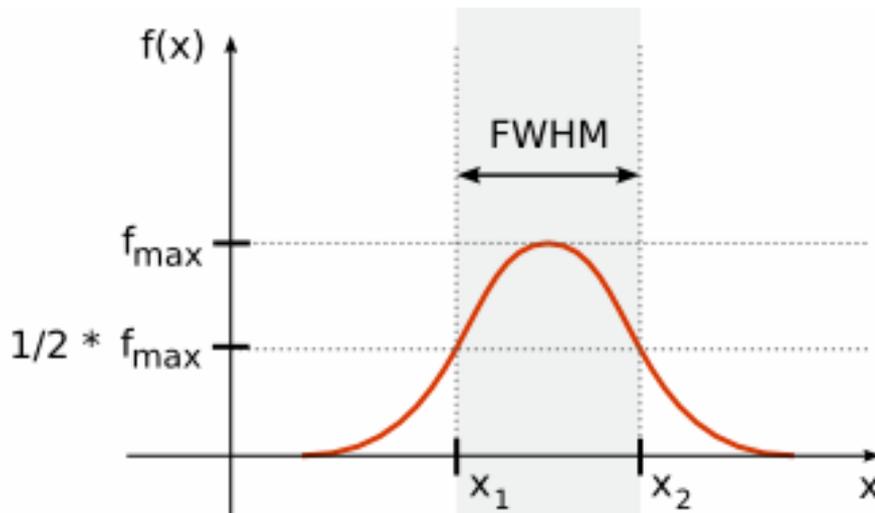


Figura 3.1 Esquema da região e posição da largura de banda à meia altura em uma curva gaussiana.

Como foi mencionada anteriormente, a posição central da curva gaussiana não necessariamente será o pico máximo espectral. Este parâmetro importante simplifica em grande parte a análise de posições quando existem espectros irregulares ou com distúrbios de modulação residual da fonte de luz.

Outro aspecto importante de análise se apresenta nos equipamentos de leitura, onde, nem sempre é factível quantificar a posição real do comprimento de onda e sua faixa de operação. É por isso que foi necessária uma correção espectral filtrando estas imperfeições dos equipamentos provenientes do ruído eletrônico para continuar com a análise de simulação.

### 3.1. Correção do ruído espectral na leitura experimental

Na leitura experimental dos elementos analisados encontraram-se perturbações espectrais devido ao ruído eletrônico. Na figura 3.2 é mostrado o distúrbio no espectro real da fonte de luz, o que dificulta a análise de leitura do sensor para as simulações previstas.

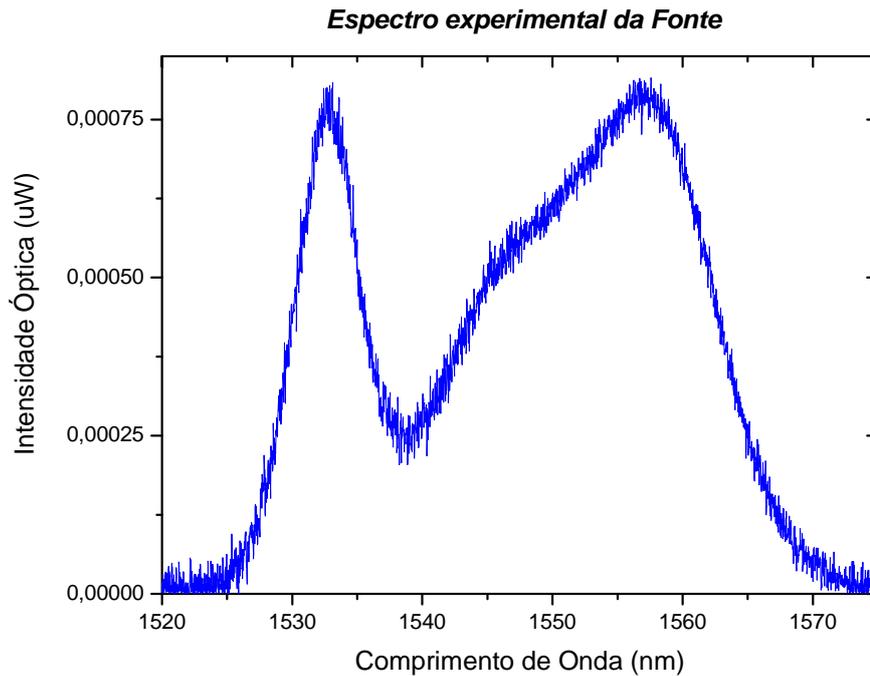


Figura 3.2 Espectro da fonte de luz lida experimentalmente do equipamento com seu respectivo ruído eletrônico.

Na figura 3.2 mostra-se um ruído que se incrementa nos picos do espectro da fonte que influíu uma perturbação no espectro refletido do sensor, porém se escolheu uma região com maior largura espectral constante para determinar a faixa operacional da varredura de convoluções do sensor com os filtros fixos.

Em vista de eliminar este ruído eletrônico foi necessário fornecer um filtro passa baixo de 0,5 Hz e uma constante de tempo com relação ao eixo das abscissas, processado por aproximações matemáticas como mostrado na figura 3.3.

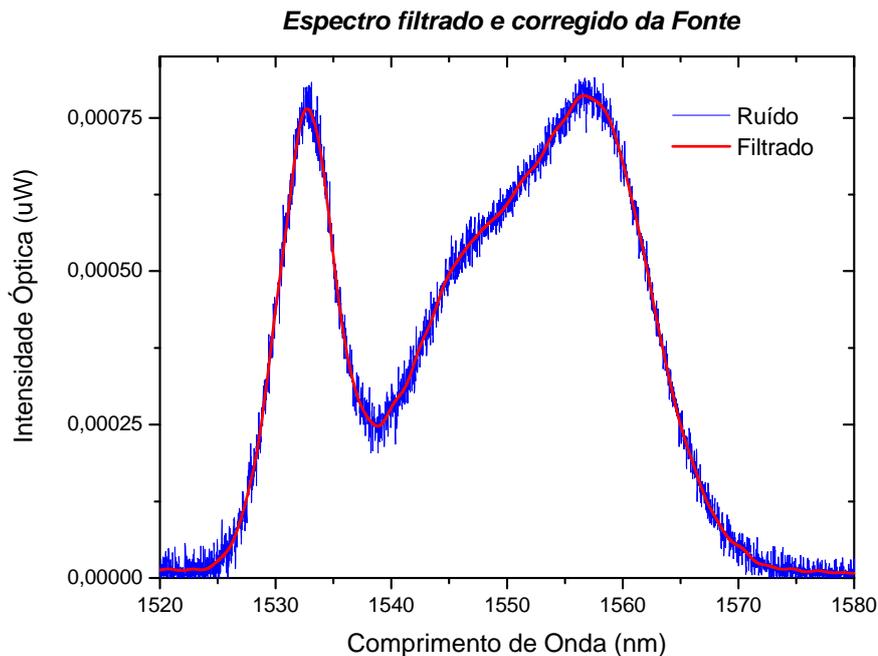


Figura 3.3 Espectro da fonte de luz com ruído e corrigida por um filtro passa baixo.

Como se pode visualizar no gráfico da figura 3.3, o espectro avaliado tem uma curva mais suave e atenuado e, manteve sua faixa espectral e intensidade óptica. Por conseguinte a faixa de leitura da fonte vai de 1525 nm até 1575 nm; e a faixa operacional de varredura para o sensor com os filtros fixos é escolhida de 1545 nm até 1560 nm aproximadamente.

Determina-se assim que todos os vetores de posição dos espectros experimentais sejam corrigidos para obter melhores resultados de simulação.

### 3.2. Simulação incluindo a fonte de luz

Pode-se dizer que a simulação se concentra em dois parâmetros espectrais: o sensor de leitura e os filtros fixos como referência de interrogação. Mas, a inclusão de mais um parâmetro: o espectro da fonte de luz aportará resultados com maior validação que será comparada com resultados experimentais.

Como já mostrado na teoria de multiplexação, o primeiro passo para descrever a análise é configurar os espectros da fonte, do sensor, e dos filtros fixos. Em tanto, para obter resultados exatos se faz as simulações tomando bases de dados como vetores de posição.

Cada dado do vetor de posição foi tomado do espectro de uma fonte de luz, com faixa de leitura de 1525 nm até 1575 nm e alta refletividade óptica.

O espectro da rede de Bragg é o sensor variável de detecção (1553,5 nm com FWHM=0,9 nm e 70% de refletividade).

Para a simulação na varredura do sensor com respeito aos filtros fixos, foram representados dois canais do demultiplexador com posições de 1554,13 nm para o primeiro filtro e de 1555,75 nm para o segundo filtro (ambos têm FWHM=1,2 nm e 90% de refletividade).

Deve-se acrescentar que a varredura do espectro do sensor a rede de Bragg deve estar no intervalo da faixa operacional entre as posições centrais dos espectros dos dois filtros fixos.

Buscando-se simplificar o programa de simulação, foram desenvolvidos algoritmos matemáticos mais concretos. Tanto assim que as respostas lineares se podem discriminar dos dados experimentais que são repetitivos nos vetores de entrada [18].

### **3.3. Procedimento de programação**

#### **3.3.1. Dados de entrada**

A primeira seqüência da programação é estabelecida por um dado de entrada que é a posição do comprimento de onda da rede de Bragg (1553,5 nm) obtida experimentalmente durante sua construção. Seguidamente seleciona-se a faixa operacional de leitura das posições espectrais dos filtros fixos, assim a varredura desejada do sensor está parametrizada pela posição dos filtros.

$$\text{Sensor: } \lambda_s = 1553,5 \text{ nm}$$

$$\text{Onde: Filtro 1: } \lambda_{f1} = 1554,13 \text{ nm}$$

$$\text{Filtro 2: } \lambda_{f2} = 1555,75 \text{ nm}$$

A posição inicial da varredura do sensor será igual à posição central do primeiro filtro fixo, e a posição final da varredura do sensor será igual à posição central do segundo filtro fixo. Nota-se que as posições pico dos filtros são diferentes das posições centrais.

Posição inicial:  $\lambda_{p1} = 1554,11 \text{ nm}$

Posição final:  $\lambda_{p2} = 1555,80 \text{ nm}$

Encontradas as posições de operação de trabalho, definam-se os dados vetoriais da intensidade óptica e comprimento de onda do sensor, dos filtros fixos e a fonte de luz para definir a seqüência de algoritmos.

$I_F$  : Intensidade da fonte

$\lambda_F$  : Comprimento de onda da fonte

$I_S$  : Intensidade do sensor

$\lambda_S$  : Comprimento de onda do sensor

$I_{f1}$  : Intensidade do filtro fixo 1

$\lambda_{f1}$  : Comprimento de onda do filtro fixo 1

$I_{f2}$  : Intensidade do filtro fixo 2

$\lambda_{f2}$  : Comprimento de onda do filtro fixo 2

Cada faixa dinâmica dos vetores de intensidade é somada por uma constante que simula o ruído eletrônico dos filtros fixos (*offset*), este parâmetro é fornecido pelo equipamento experimental. A eq. (3.2) define as intensidades com *offset*.

$$\begin{aligned} I_F &= I_F + \text{offset} \\ I_S &= I_S + \text{offset} \\ I_{f1} &= I_{f1} + \text{offset} \\ I_{f2} &= I_{f2} + \text{offset} \end{aligned} \tag{3.2}$$

### 3.3.2. Ajustes com a largura de banda à meia altura

Uma das características importantes da simulação é normalizar cada espectro em seu pico máximo para compensar perdas de intensidade e inconsistências de faixa dinâmica. Isto é definido na eq. (3.3).

$$I_F = \frac{I_F}{f_{\max}} \tag{3.3}$$

Onde  $f_{\max}$  é o máximo pico espectral da função gaussiana.

Com todas as características apresentadas se mostra uma primeira visualização do espectro da fonte de luz na figura 3.8.

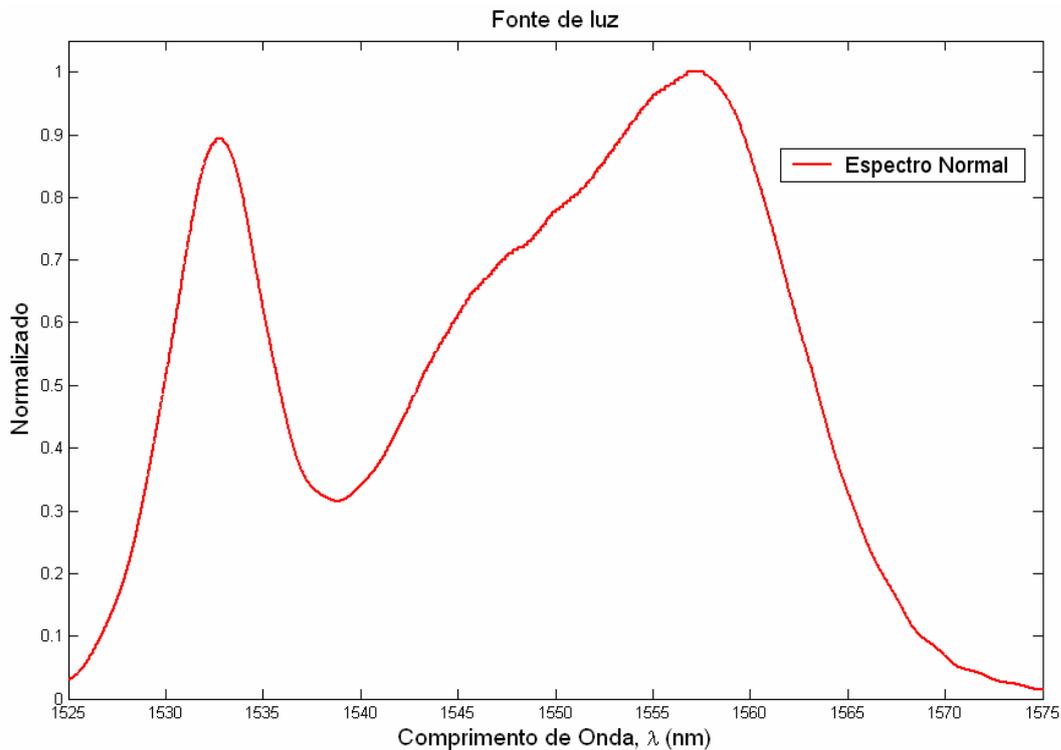


Figura 3.4 Espectro da fonte de luz simulada.

Cabe-se ressaltar dois picos máximos na figura 3.4 do espectro da fonte, o que poderia levar a uma confusão na normalização. Mas para a simulação se tomou como referência o pico espectral na posição de 1557,2 nm.

Da seqüência da subdivisão 3.3.1 se caracteriza as posições do comprimento de onda do sensor e dos filtros. Para isto todo espectro é normalizado pelo pico máximo avaliado na largura de banda a media altura ( $FWHM$ ).

Como visto anteriormente na equação 3.1 sabe-se que a posição central do comprimento de onda se encontra a partir do vetor de intensidade ( $\Delta I_{FWHM}$ ) que está relacionado com um vetor de comprimento de onda ( $\Delta \lambda_{FWHM}$ ), onde a cada grandeza de intensidade corresponde um único comprimento de onda.

A variação de intensidade  $\Delta I_{FWHM}$  apresenta uma ordenada inicial [ $I_{FWHM}(1)$ ] e uma final [ $I_{FWHM}(2)$ ], assim, por correspondência encontra-se um comprimento de onda inicial [ $\lambda_{FWHM}(1)$ ] e final [ $\lambda_{FWHM}(2)$ ] do vetor  $\Delta \lambda_{FWHM}$ , os quais

estabelecem o comprimento de onda central  $[\lambda_C]$ . Logo para encontrar esta posição central dos espectros estabelece-se a seguinte seqüência:

- Posicionar os pontos extremos do vetor de intensidade  $I(FWHM)$  dos filtros fixos e do sensor:

$$I_{FWHM}(1) = \frac{2}{3} \cdot \text{Max}[I_{f1,f2,S}(1)]$$

$$I_{FWHM}(2) = \frac{2}{3} \cdot \text{Max}[I_{f1,f2,S}(2)]$$
(3.4)

- Pela relação de correspondência se conhecem as posições extremas de comprimento de onda:

$$I_{FWHM}(1) \rightarrow \lambda_{FWHM}(1)$$

$$I_{FWHM}(2) \rightarrow \lambda_{FWHM}(2)$$
(3.5)

- Onde a posição central do comprimento de onda dos espectros é caracterizada por:

$$\lambda_C' = \frac{\lambda_{FWHM}(2) + \lambda_{FWHM}(1)}{2}$$
(3.6)

- O valor  $\lambda_C'$ , é tomado como aproximação da posição central verdadeira  $\lambda_C$ .

$$\lambda_C \approx \lambda_C'$$
(3.7)

- Finalmente os vetores de intensidade ( $I_{f1,f2,S}$ ) são normalizados pela razão do vetor intensidade  $I(FWHM)$  e o máximo pico de intensidade dos espectros.

$$I_{f1,f2,S} = \frac{I_{f1,f2,S}(FWHM)}{\text{Max}[I_{f1,f2,S}(FWHM)]}$$
(3.8)

Estas condições permitem a simulação da figura 3.5 para mostrar a posição dos espectros dos filtros, do sensor e da fonte de luz com intensidades normalizadas. Nota-se que cada espectro tem diferente características.

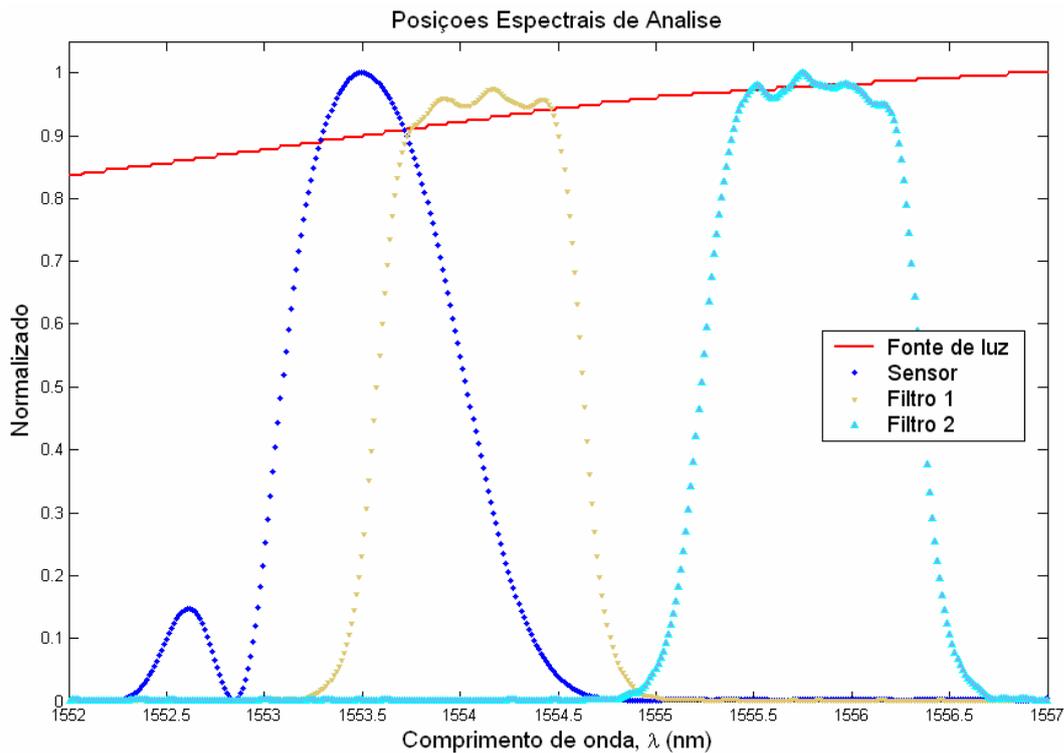


Figura 3.5 Espectro do sensor, dos filtros fixos e a faixa dinâmica da fonte de luz para a varredura de simulação.

Cada espectro foi normalizado independentemente com seu próprio pico máximo para ter expressões adimensionais o que facilita a análise, mas não significa que as intensidades ópticas sejam as reais como mostradas no gráfico da figura 3.5.

### 3.3.3. Ajustes na varredura espectral do sensor

Definidos anteriormente os parâmetros de posição, agora se acrescentam ajustes na varredura do sensor com respeito à posição dos filtros fixos, pelo que a seguir se descrevem as equações:

- Devido ao gradiente entre o comprimento de onda central e o pico máximo calcula-se um ajuste de posição nos filtros fixos.

$$\begin{aligned}\Delta\lambda_{C1} &= \lambda_{C1} - \lambda_{P1} \\ \Delta\lambda_{C2} &= \lambda_{C1} - \lambda_{P2}\end{aligned}\quad (3.9)$$

- $\Delta\lambda_{C1,C2}$  : Variação de ajuste das posições nos filtros fixos.  
 $\lambda_{C1,C2}$  : Posição central dos filtros fixos 1 e 2 respectivamente.  
 $\lambda_{P1,P2}$  : Posição de pico máximo dos filtros fixos 1 e 2 respectivamente.

Esta variação de ajuste nas posições dos filtros fixos fornece outra constante que será um ajuste do comprimento de onda dos filtros fixos ( $\lambda_{f1aj}$ ,  $\lambda_{f2aj}$ ). Definido como a diferença entre o vetor posição do comprimento de onda ( $\lambda_{f1}$ ,  $\lambda_{f2}$ ) e a variação de ajuste na posição dos filtros fixos ( $\Delta\lambda_{C1}$ ,  $\Delta\lambda_{C2}$ ).

$$\begin{aligned}\lambda_{f1aj} &= \lambda_{f1} - \Delta\lambda_{C1} \\ \lambda_{f2aj} &= \lambda_{f2} - \Delta\lambda_{C2}\end{aligned}\quad (3.10)$$

- A otimização da separação entre os picos máximos dos filtros e a resolução de leitura se define a partir da menor medida de largura de banda da faixa de operação do equipamento experimental (*Wavemeter*).

Assim,  $X$  : Posição qualquer do vetor de comprimento de onda e,

$\lambda_{f1,f2,S}$  : Vetores de comprimento de onda dos filtros e o sensor.

E com estes parâmetros  $X$  e  $\lambda_{f1,f2,S}$  avalia-se uma posição qualquer na eq. (3.11).

$$\begin{aligned}\lambda_X &= \lambda_{f1,f2,S}(X) \\ \lambda_{X+1} &= \lambda_{f1,f2,S}(X+1)\end{aligned}\quad (3.11)$$

$\lambda_X$ ,  $\lambda_{X+1}$  são posições de continuidade do vetor de comprimento de onda. E  $\Delta\lambda_X$  será a menor medida da faixa de leitura mostrada na eq. (3.12).

$$\Delta\lambda_X = \lambda_{X+1} - \lambda_X \quad (3.12)$$

- Considerando isto, a resolução de varredura de operação do sensor é avaliada na eq. (3.13).

$$R_\lambda = \frac{C}{\Delta\lambda_X} \quad (3.13)$$

Onde  $C = 1$ , e é uma constante unitária de continuidade para aumentar a resolução do sensor.

- Para maximizar o ajuste de separação entre picos dos filtros fixos na varredura de operação do sensor, tem-se que:

$$\lambda_{aj} = \lambda_{f2aj} - \lambda_{f1aj} \quad (3.14)$$

$\lambda_{aj}$ , é uma constante entre os gradientes de ajuste dos filtros. Assim para maximizar o ajuste da separação dos filtros na varredura do sensor define-se a eq. (3.15).

$$V_{\Delta\lambda} = \frac{\lambda_{aj}}{\Delta\lambda_X} \quad (3.15)$$

Uma vez compensados os valores de resolução e maximização de separação dos filtros fixos inicia-se a varredura espectral do sensor em função das constantes definidas anteriormente como parâmetros de leitura.

### 3.3.4. Algoritmo seqüencial da varredura espectral do sensor

Para iniciar um algoritmo que represente a variação dos comprimentos de onda do sensor nos filtros fixos se estabelece um vetor de varredura que será definido referencialmente às posições dos filtros e do sensor. Então, define-se a eq. (3.16) como a posição inicial e final do vetor de varredura:

$$P_i = \frac{\Delta\lambda_{vi}}{\Delta\lambda_X} \quad (3.16)$$

$$P_f = \frac{\Delta\lambda_{vf}}{\Delta\lambda_X}$$

- $\Delta\lambda_{\psi_i}$  : Compensação da posição inicial de varredura do sensor.
- $\Delta\lambda_{\psi_f}$  : Compensação da posição inicial de varredura do sensor.
- $P_i$  e  $P_f$  : Posições inicial e final do vetor de varredura.

Da eq. (3.16) as posições serão os parâmetros iniciais de varredura e, em função de um algoritmo sequencial condicional se simularam as convoluções encontradas nos espectros referidos. Na seguinte figura 3.6 se visualiza o algoritmo completo de varredura do sensor na convolução com os dois filtros fixos.

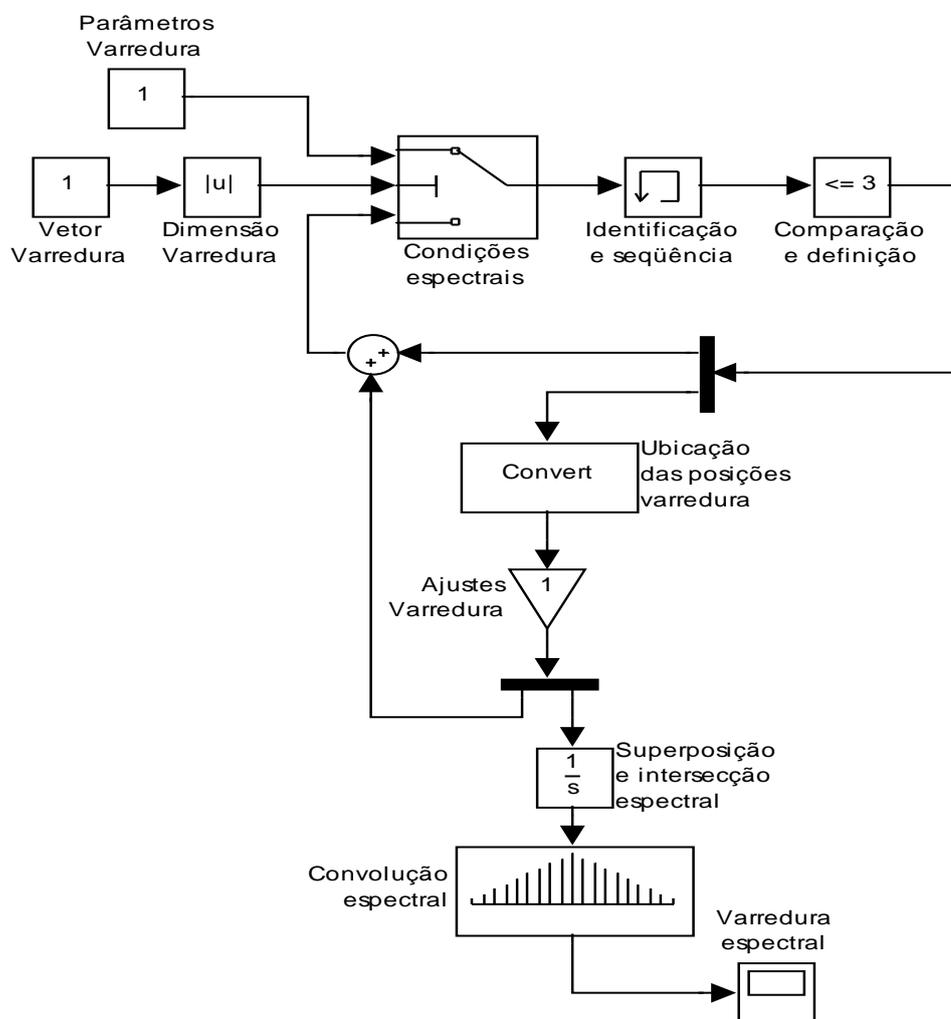


Figura 3.6 Fluxo de controle que representa o algoritmo de varredura espectral.

O fluxo de controle da figura 3.6 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”. Estas condições iniciais são correspondentes ao sensor, aos filtros fixos e à fonte de luz. Logo serão analisados avaliando-se com as “condições espectrais”.

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”. No entanto, 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, em relação à fonte de luz. Cada superposição é uma “convolução integrada” e parametrizada no vetor de varredura. Adicionalmente depois de encontrarem-se as convoluções de varredura será visualizado na figura 3.7.

- Cabe-se ressaltar que as posições de varredura foram analisadas para seqüências centralizadas por a largura de banda à meia altura.

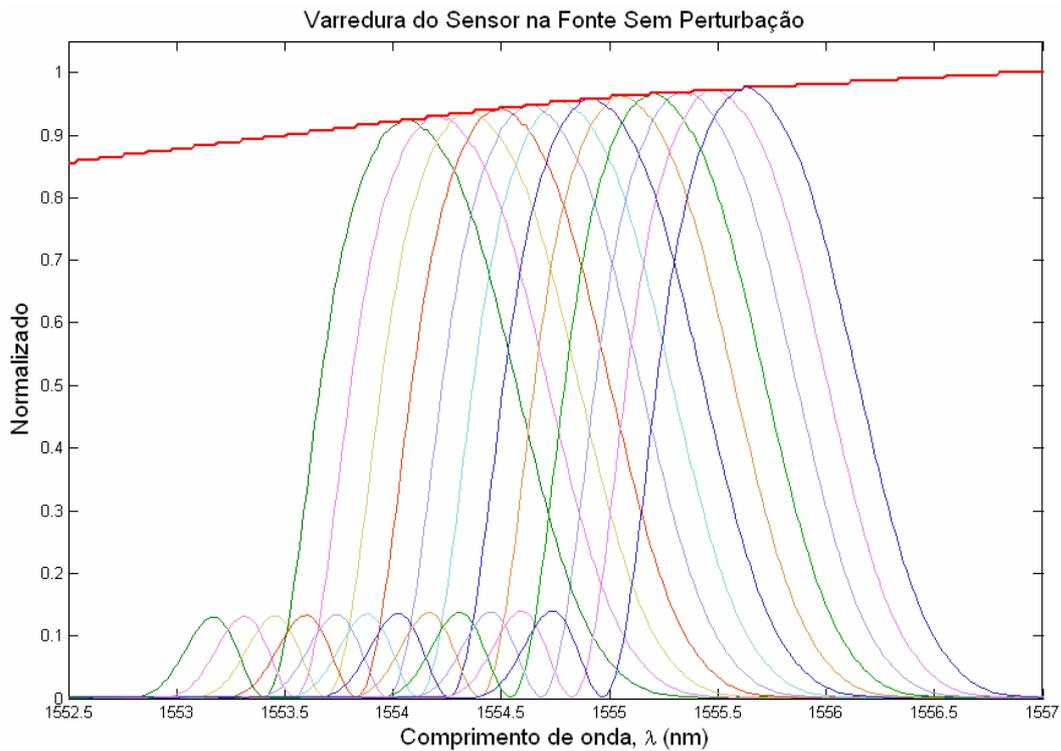


Figura 3.7 Simulação da varredura espectral do sensor com 12 posições diferentes.

Na figura 3.7 mostram-se 12 posições diferentes na varredura do sensor em relação à fonte de luz e aos filtros fixos. Nota-se que a intensidade óptica das posições espectrais do sensor varia em relação da intensidade da fonte, mas a variação de varredura do comprimento de onda permanece constante em base à programação simulada.

### 3.3.5. Ajuste de convoluções

As convoluções do sensor com cada filtro fixo se apresentam na seguinte figura 3.8 visualizando a formação da razão de intensidades nas posições indicadas de leitura.

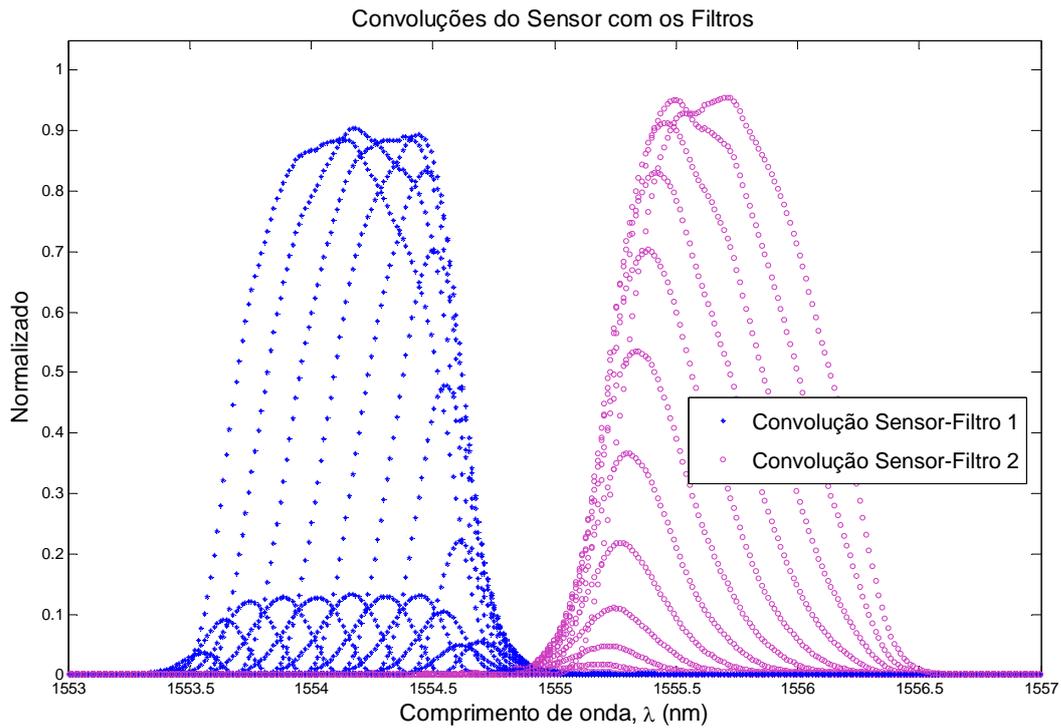


Figura 3.8 Superposição de convoluções do sensor com os filtros quando muda a posição de varredura espectral.

Na figura 3.8, mostra-se que são 12 espectros contidos dentro das curvas dos filtros fixos. Quando uma região espectral do sensor não abrange totalmente o espectro de um filtro, o outro filtro atua como complemento abrangendo o restante espectral.

A normalização das convoluções permite encontrar uma relação de razão sem perdas de intensidade como mostrado na figura 3.9. Cada convolução final estará em função da intensidade do sensor, da fonte e do filtro fixo, como é descrita nas seguintes equações:

$$C_1 = I_S * I_F \quad (3.17)$$

$$C_{11} = C_1 * I_{f1} \Rightarrow C_{11} = I_S * I_F * I_{f1} \quad (3.18)$$

$$C_{22} = I_S * I_F * I_{f2} \quad (3.19)$$

Onde:  $C_1$  = Convolução fonte – sensor.

$C_{11}$  = Convolução fonte – sensor – filtro 1.

$C_{22}$  = Convolução fonte – sensor – filtro 2.

Para validar a simulação, a figura 3.9 foi comparada com dados experimentais tomados em um medidor de potência óptica.

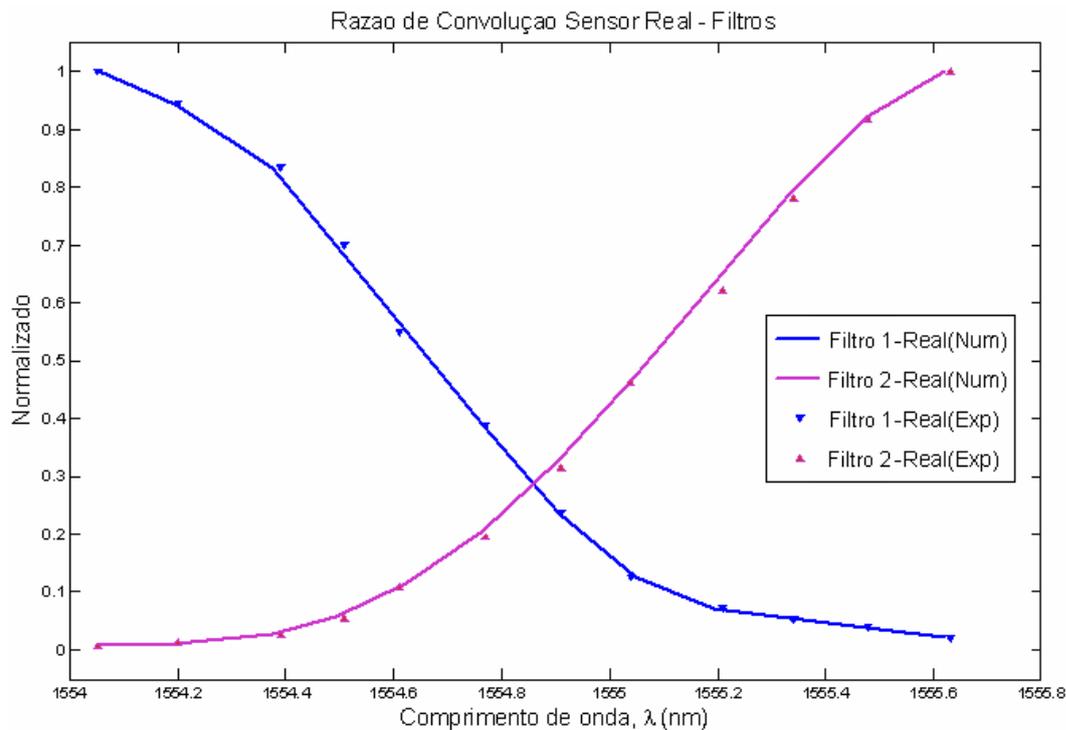


Figura 3.9 Duas razões de convolução do sensor com cada filtro fixo.

Nota-se da figura 3.9 que as curvas de razões experimentais são próximas às curvas de razões simuladas. A integração dos pontos de convolução das posições para traçar as duas curvas do sensor com o filtro 1 e do sensor com o filtro 2 respectivamente será uma curva de calibração.

Na seguinte eq. (3.20) se expressa a relação de ambas convoluções dos filtros fixos com o sensor:

$$C_r = \frac{C_{11}}{C_{22}} \quad (3.20)$$

Onde:  $C_r$  = Razão de convoluções.

Por tanto a curva de razão total de convoluções será uma curva de calibração das posições do sensor com a intensidade óptica. Como é mostrada na figura 3.10.

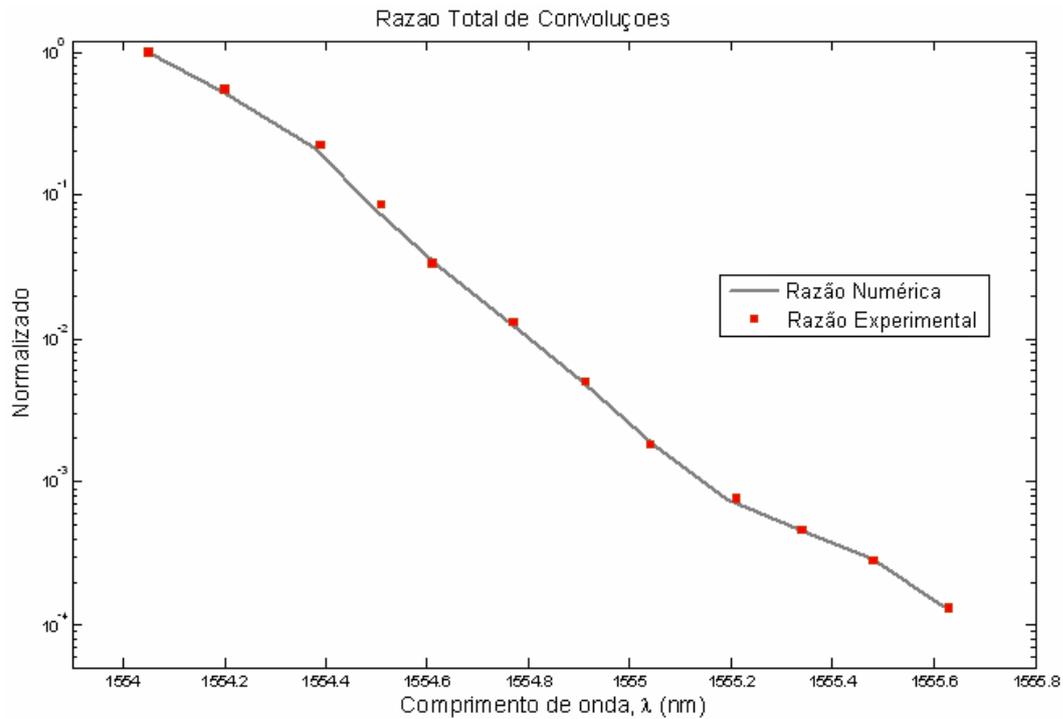


Figura 3.10 Razão total de convolução do sensor com os filtros fixos (Numérico e experimental).

Na figura 3.10 os dados experimentais são muito próximos à curva de calibração simulada. Nota-se que para um maior número de iterações de simulação tem-se uma curva com maior resolução, o que significa uma maior exatidão nas posições do comprimento de onda do sensor.

### 3.3.6. Análise de incertezas

Numericamente pode-se avaliar os erros de leitura e faixa de operação de varredura com uma análise de incerteza, o que é simplesmente a diferencial de leitura do vetor de convolução dos filtros fixos com respeito ao comprimento de onda do sensor referenciado na simulação.

A representação desta análise é estabelecida por um algoritmo seqüencial como um fluxo de controle mostrado na seguinte figura 3.11.

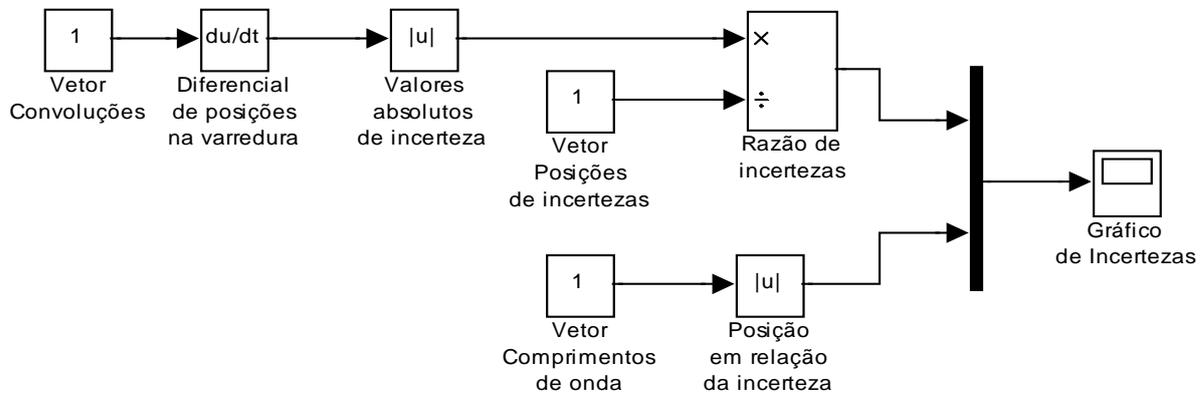


Figura 3.11 Fluxo de controle do calculo de incertezas da posição do sensor quando se avalia em uma varredura entre os filtros.

Na figura 3.11 o fluxo de controle mostra que cada vetor de convoluções é filtrado por uma diferencial de posições na varredura. Todo valor absoluto deste diferencial é dividido conjuntamente com um vetor de posição do comprimento de onda de varredura do sensor.

É dizer, cada intensidade de varredura do sensor entre os filtros fixos foi relacionada à razão de ajuste de convoluções e referenciada às posições de comprimento de onda do sensor, onde matematicamente a incerteza de medição é mostrada na eq. (3.21) e visualizada na figura 3.12.

$$\delta\lambda = \frac{dI_{\lambda}}{d\lambda_{VS}} \quad (3.21)$$

$\delta\lambda$  : Incerteza de comprimento de onda.

$I_{\lambda}$  : Vetor de intensidades de varredura.

$\lambda_{VS}$  : Vetor de comprimento de onda da varredura do sensor.

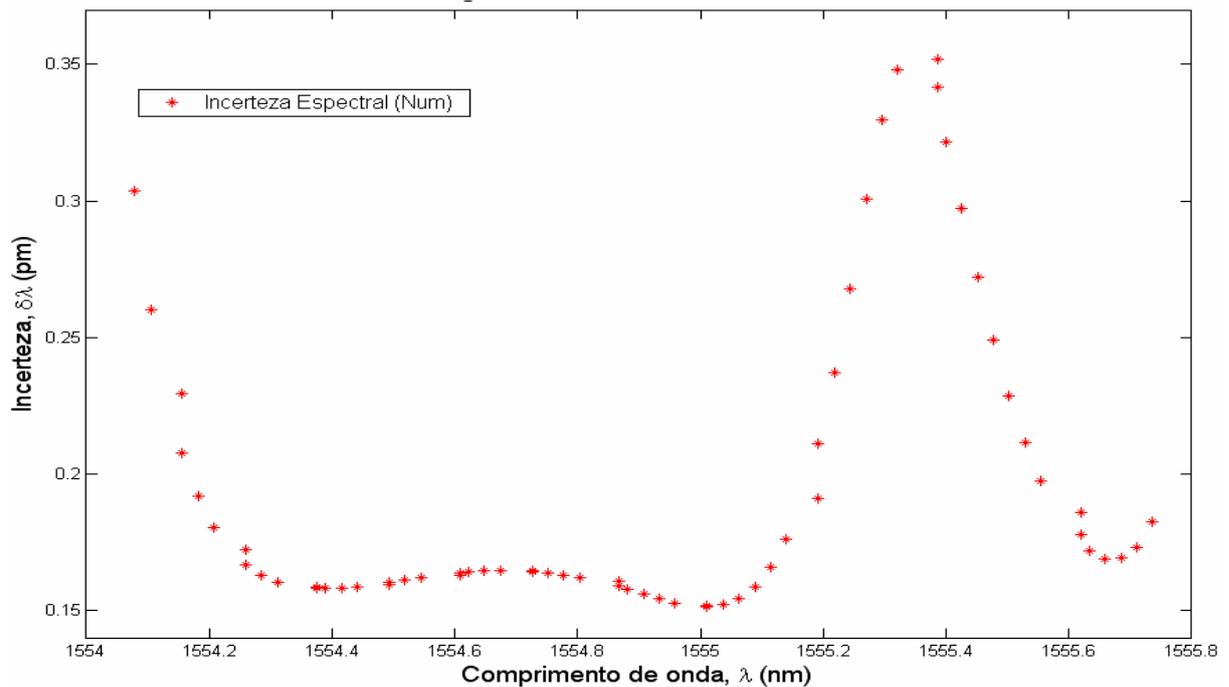


Figura 3.12 Análise de incertezas da posição do sensor quando se avalia em uma varredura entre os filtros.

Na figura 3.12 visualiza-se a curva de incerteza, onde os picos máximos estão entre 0,3 pm no intervalo de 1555,2 nm até 1555,5 nm. A faixa de operação na varredura do sensor se concentra entre 1554,2 nm até 1555,2 nm com uma baixa incerteza de 0,15 pm aproximadamente. Concluindo-se uma boa resolução de medida.

Até aqui se encontraram resultados de simulação em base dos algoritmos de programação e, para sintetizar a compreensão dos resultados de varredura espectral, no seguinte item descreve-se o diagrama de blocos que interpreta o algoritmo completo.

### 3.4. Diagrama de blocos da simulação de varredura espectral

Na figura 3.13 se mostra o diagrama de blocos da programação configurada:

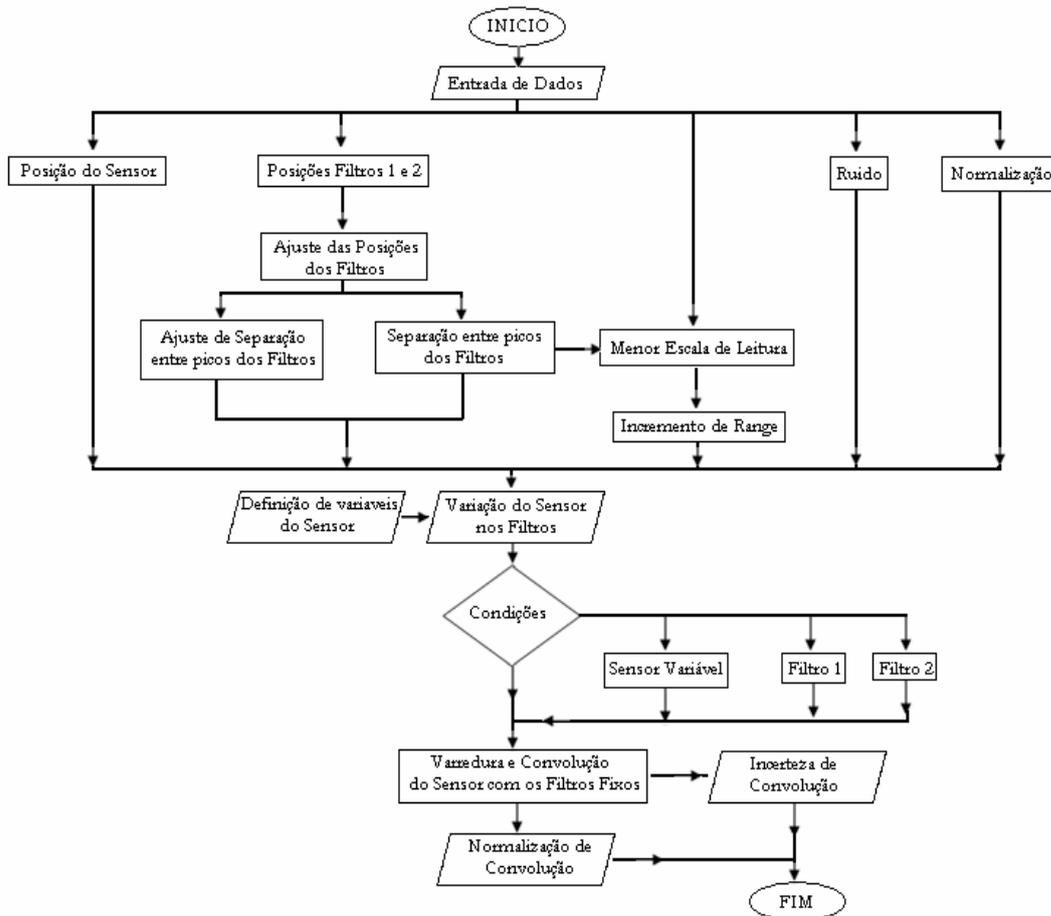


Figura 3.13 Diagrama de blocos total da simulação da varredura do sensor.

Abrangendo em uma vista geral do diagrama da figura 3.13 a análise de simulação se resume em executar os dados experimentais (vetores de posição), incluindo parâmetros de ajuste de leitura (escala de leitura, *offset*, etc), para logo depois definir os fatores de varredura. Toda varredura estará condicionada pela posição dos filtros fixos e do sensor, assim como também a inserção da fonte de luz. Cada ponto de interseção se relaciona com o número de varredura e esta posição será a convolução procurada. Finalmente, as razões das convoluções desenvolveram uma curva de calibração auto-referenciada.