

## 4. Desenvolvimento dos Reflectômetros ópticos no domínio do tempo por contagem de fótons

Neste capítulo são apresentados as montagens básicas dos reflectômetros implementados. O primeiro prioriza a faixa dinâmica, assim é chamado de *OTDR por contagem de fótons de alta faixa dinâmica*: HDR-PC-OTDR. O segundo é chamado de UHR-PC-OTDR, ou seja *OTDR por contagem de fótons de ultra resolução*. Finalmente são apresentadas as características mais relevantes dos equipamentos e dispositivos usados nessas montagens.

### 4.1. OTDR de Alta faixa dinâmica: HDR-PC-OTDR.

A montagem básica do HDR-PC-OTDR é apresentado na Figura 4.1. Um FPGA é programado para gatilhar os amplificadores ópticos semicondutores (SOAs), através do gerador de atraso digital (DDG) e dois *drivers* de corrente (DR), os quais chaveiam e amplificam uma fonte laser sintonizável (TLS) de onda contínua. O uso dos SOAs em série garantem uma razão de extinção suficiente evitando vazamentos, os quais gerariam um nível de ruído acima das contagens de escuro. Os pulsos gerados assim são enviados até a fibra de teste através de um circulador. Os pulsos refletidos são captados pelo SPAD, passam pelo BPF e o VOA, sendo enviados ao computador para análise.

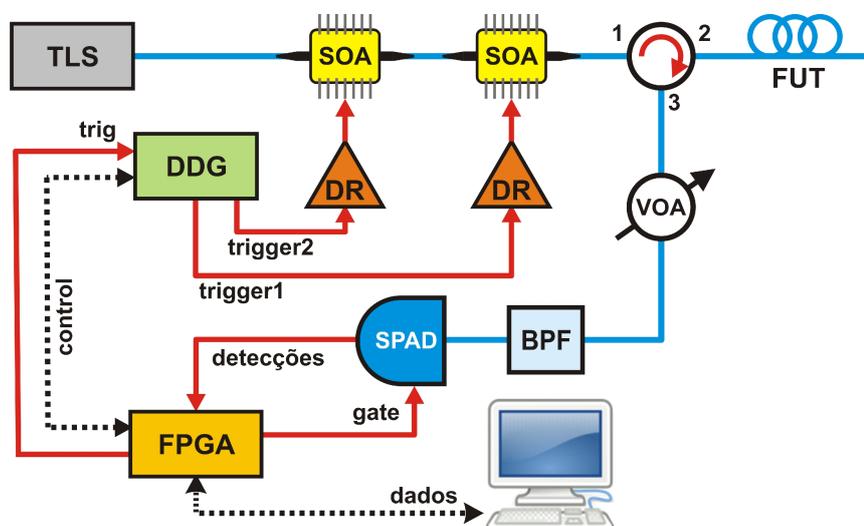


Figura 4.1 Montagem experimental do HDR-PC-OTDR

O atenuador óptico variável (VOA) é usado para controlar a intensidade de luz garantindo que a probabilidade de ter mais de um fóton num pulso óptico retroespalhado, chegando ao detector de fótons únicos (SPAD), seja desprezível. Na chegada ao detector, um filtro sintonizável de banda passante (BPF) é usado para eliminar as componentes de frequência fora da banda do TLS.

Devido á banda muito estreita do TLS, é esperado que o traço do OTDR adquirido por esta montagem seja poluído pelo ruído de coerência, vide sub seção 2.3.5. Contudo esse comportamento foi mitigado usando o TLS no modo de varredura de comprimento de onda.

A interface gráfica do software de aquisição do HDR-PC-OTDR está baseada em Python, Figura 4.2. Mas a parte propriamente de controle e aquisição é feita por uma FPGA programado em VHDL (VHSIC Hardware Description Language) na qual é implementada a lógica de aquisição chamada de *Gatilhado semi-rápido*, como descrito na sub seção 3.4.4. Para cada pulso enviado são ativadas sequencialmente várias janelas de detecção separadas temporalmente pelo tempo morto ( ) até cobrir toda a fibra de teste. Os parâmetros principais para a aquisição são:

- *Fibre Setup Length*: determina a posição inicial dentro da fibra a qual será considerada como o zero da aquisição.
- *Dead Time*: introduz o tempo morto, .
- *Time Window*: granularidade de aquisição, limitada pela FPGA de 100 MHz.
- *Fiber Length*: comprimento máximo de fibra a ser medido.
- *Gate Width*: determina o tamanho da janela de aquisição do SPAD.
- *Pulse Width*: largura do pulso óptico, cujo valor mínimo de 50ns é limitado pela resposta temporal do *driver* que gatilha o SOA.
- *Zoom Start*: Posição dentro da fibra, a partir de onde começa a aquisição.
- *Zoom End*: Posição final de aquisição dentro da fibra.
- *Time Threshold*: Tempo de aquisição.

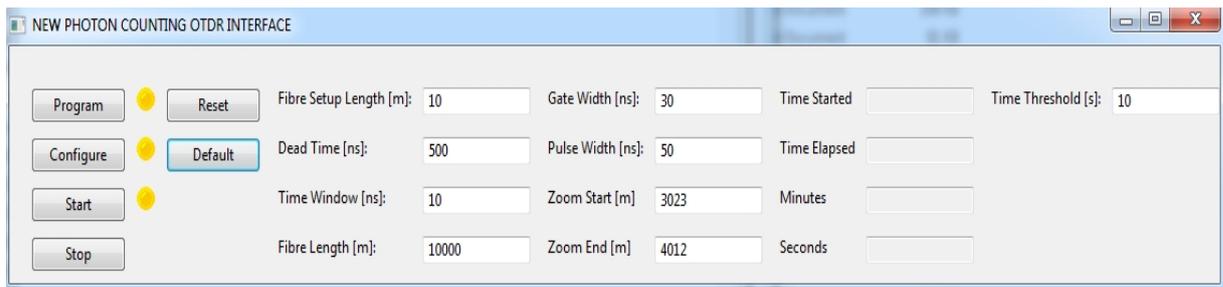


Figura 4.2 Interface gráfica do software de aquisição do HDR-PC-OTDR.

A faixa dinâmica é definida como a diferença entre o nível inicial da luz retroespalhada,  $P_{init}$ , e o nível de ruído, como descrito na sub seção 2.3.1. No caso de um OTDR por contagem de fótons o nível de ruído é equivalente à taxa de escuro do SPAD. Tendo em conta que o detector não deve apresentar saturação (detectar no máximo 1 fóton por pulso), é necessário ajustar o VOA para atenuar o valor da potência  $P_{init}$ , assim, sabendo que a contagem de fótons apresenta uma distribuição de Poisson, podemos calcular a potência máxima recebida para obter uma alta probabilidade de detectar no máximo um fóton por pulso. Logo a probabilidade  $p(n=1) \gg p(n=2)$ . A distribuição de Poisson é dada por:

$$p(n=k) = \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!} \quad \text{Eq. 21}$$

Se quisermos garantir uma distorção menor do que 0,1 dB (saturação < 2%) então:  $p(n=1) \gg (1/0,02) p(n=2)$ , assim:

$$\lambda e^{-\lambda} \geq \frac{1}{0,02} (1 - e^{-\lambda} - \lambda e^{-\lambda}) \quad \text{Eq. 22}$$

A solução desta inequação é:  $0 < \lambda < 0,04$ . Consequentemente, o número esperado de fótons por pulsos tem que ser de 0,04. A faixa dinâmica é então a relação  $0,04/n_{dark}$ . A probabilidade de escuro do detector, para um pulso de 4ns e  $\tau = 10\%$  é  $n_{dark} = 1,6 \times 10^{-5}$  (valor medido experimentalmente), assim a faixa dinâmica (considerando a atenuação de ida e volta na fibra) é:

$$\text{dynR} = 5 \log \left( \frac{0,04}{1,6 \times 10^{-5}} \right) = 5 \log(2500) = 17 \text{ dB} \quad \text{Eq. 23}$$

O valor  $dynR$  é a dinâmica do detector, mas a dinâmica total do sistema inclui também a potência disponível atenuada pelo VOA, neste caso a atenuação foi de 32 dB. Assim a dinâmica total é:  $dynR_s = dynR + at_{VOA}/2 = 33$  dB.

A medição feita para determinar a faixa dinâmica total do sistema, consistiu de duas fibras unidas através de um divisor passivo 1:32, Figura 4.3. A atenuação que o divisor introduz, entre a primeira (3.5 km) e a segunda fibra (4 km), foi de aproximadamente 16 dB. Numa primeira medição a atenuação do VOA foi de 32 dB, sendo adquirida a totalidade do enlace. Numa segunda medição a atenuação do VOA foi de 0 dB e a aquisição começou a partir da segunda fibra. O resultado das duas medições juntas é apresentado na figura, onde a dinâmica real medida do sistema é assim de 32 dB.

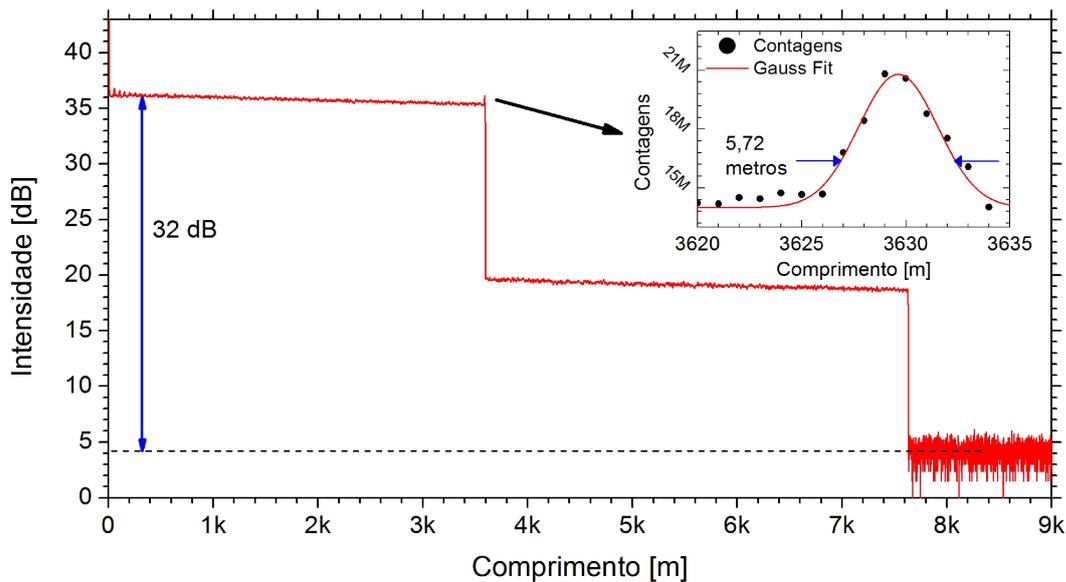


Figura 4.3 Faixa dinâmica e resolução do HDR-PC-OTDR

A resolução espacial esperada nesta montagem é de aproximadamente 6m, limitada pela convolução entre a largura do pulso óptico (50 ns) e largura da janela de detecção do SPAD (4 ns), como visto na sub seção 2.3.4. A resolução medida experimentalmente foi de 5.72 m, como apresentado no pequeno traço inserido na Figura 4.3, onde a reflexão produzida pelo conector FC/APC do divisor passivo é mostrada com mais detalhe.

## 4.2. OTDR de Ultra Resolução (UHR-PC-OTDR)

A Figura 4.4 apresenta a montagem experimental do UHR- PC-OTDR. Pulsos ultracurtos, 115 ps, gerados pela fonte laser UWS (*Ultra Wideband Source*) são modulados pelo SOA, reduzindo a taxa de repetição dos pulsos e, assim, garantindo a condição de ter unicamente um pulso por vez dentro da fibra. O SOA é gatilhado pelo gerador de atraso digital, DDG (*Digital Delay Generator*), através de um gerador de pulsos, PG (*Pulse Generator*).

O relógio mestre para a sincronização é produzido pelo próprio UWS gatilhando o DDG. O DDG gera também o sinal de *start* para o TDC (Time to Digital Converter). O sinal de *stop*, gerado pela detecção de um fóton, vem do SPAD o qual também é gatilhado pelo DDG com atrasos variáveis dependendo do pedaço de fibra a ser monitorado. O controle da potência óptica chegando ao SPAD é conseguido através do VOA. Os intervalos temporais entre *start* e *stop* são assim processadas pelo TDC sendo logo enviadas para o computador. O BPF restringe as faixas de comprimento de onda dentro da banda *C* ajudando também a manter a razão de extinção do SOA. Esta montagem usa o modo *gatilhado simples* descrito na subseção 3.4.2.

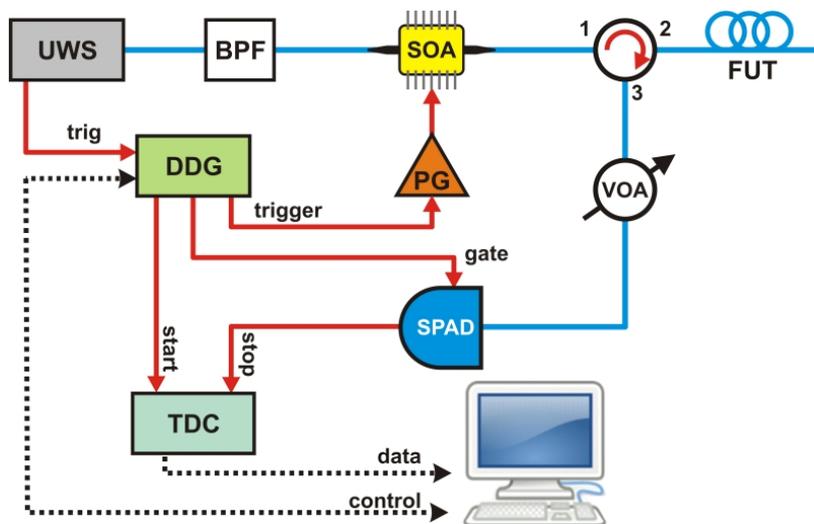


Figura 4.4 Montagem experimental do UHR-PC-OTDR

O software de automação e aquisição do UHR-PC-OTDR está baseado em LabView. A configuração do DDG é feita através de um bus GPIB (*General Purpose Interface Bus*) e a do TDC através de uma placa de aquisição no

barramento PCI (*Peripheral Component Interconnect*) do computador. A interface gráfica é apresentada na Figura 4.5. Os parâmetros principais para a aquisição são:

- *DDG Prescaler*: determina a taxa de emissão de pulsos ópticos dentro da fibra. Um valor de 200, por exemplo, seleciona 1 de cada 200 pulsos, que são gerados no UWS, para ser habilitado pelo SOA.
- *Tempo de Aquisição (s)* : Determina o tempo de aquisição para cada janela.
- *Tempo de Atual (s)* : Indica o avanço da aquisição no tempo.
- *Zero do TDC (ns)*: Estabelece o ponto dentro de fibra a partir de onde começa a medição.
- *SOA Pulse Delay*: Sincroniza o gatilhamento do SOA através do PG, de forma tal que um pulso de luz seja habilitado no momento que atravessa o SOA.
- *Atraso Inicial (ns)*: Atraso em relação ao Zero do TDC, necessário já que o intervalo mínimo que o TDC mede é de 5ns.
- *Atraso Final (ns)*: Atraso em relação ao Zero do TDC, determina até onde (no tempo) a aquisição será feita.
- *Largura de Janela (ns)*: Estabelece a largura de janela de detecção do SPAD.
- *LeftCut e RightCut (ns)*: Determina a porção da janela de aquisição que será descartada tanto do lado esquerdo como direito (vide Figura 4.7).
- *Passo (ns)*: Indica o passo (em tempo) que o DDG faz entre uma janela e outra.

$$\text{Passo} = \text{LarguraDeJanela} - \text{LeftCut} - \text{RightCut}.$$

- *Janelas* : Indica o número de janelas a serem adquiridas.

$$\text{Janelas} = \text{floor}((\text{AtrasoFinal} - \text{AtrasoInicial})/\text{LarguraDeJanela}).$$

- *Atraso atual (ns)*: Indica o atraso de acordo ao número de janela que está sendo adquirida.

$$\text{Atraso atual} = \text{Atraso Inicial} + \text{Passo} * \text{JanelaAtual}$$

- *Janela atual* : Indica o número de janela que está sendo adquirida.

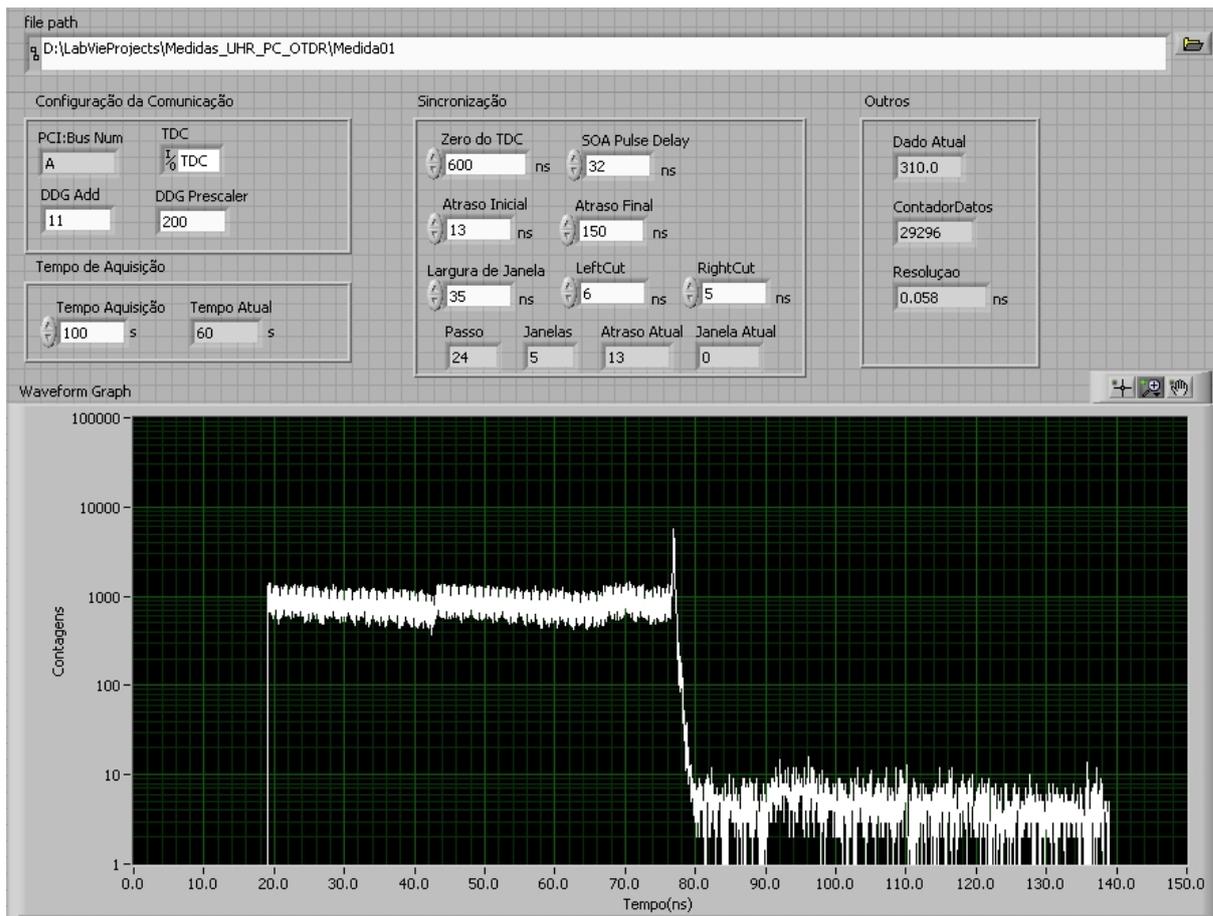


Figura 4.5 Interface gráfica do software de aquisição desenvolvido em LabView.

O programa faz a aquisição e armazena os dados em 3 colunas. A primeira coluna armazena o tempo em nano segundos, com intervalos de resolução de 0.116 ns (resolução atingida pelo TDC). A segunda coluna contém o número de contagens para cada intervalo de resolução. E a terceira coluna armazena o número de janela à qual pertence cada intervalo.

Como sabemos os pulsos ópticos emitido pelo UWS são de aproximadamente 115 fs, cuja banda espectral está entre 1100 e 1700 nm. O BPF restringe essa banda entre 1550-1565 nm, resultando num pulso de 5ps aproximadamente, limitado pela transformada de Fourier. Por outro lado o TDC tem uma granularidade de aquisição de 116ps.

Contudo a resolução do UHR-PC-OTDR é limitada pelo jitter do SPAD de aproximadamente 300 ps. A resolução medida experimentalmente neste caso é apresentada na Figura 4.6; 2.8 cm em 500 m e 11.4 cm em 25 km. Na medida do

pico de reflexão em 25 km a banda espectral do BPF passou para 1.24 nm diminuindo a dispersão cromática.

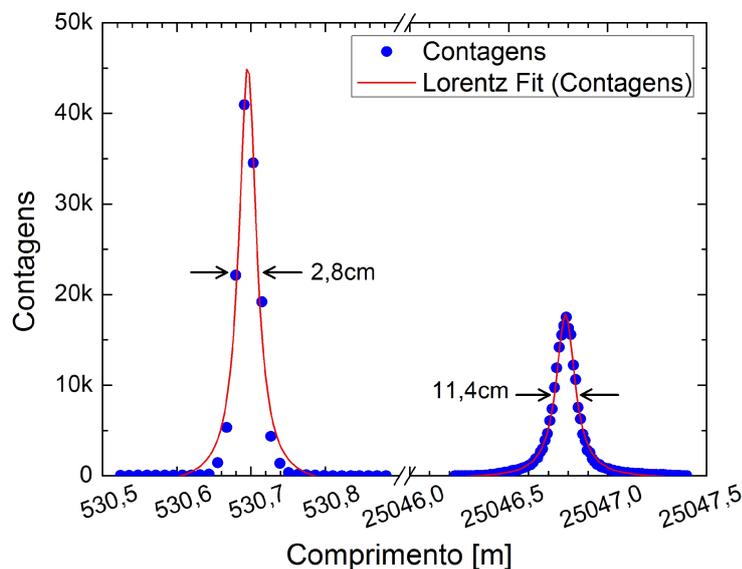


Figura 4.6 Resolução atingida pelo UHR-PC-OTDR

Antes de determinar a faixa dinâmica do UHR-PC-OTDR algumas características inesperadas nas medições serão expostas. Basicamente o SPAD apresentou três efeitos interessantes; tais efeitos são relevantes na montagem do traço do OTDR.

O primeiro efeito foi a instabilidade na ativação e desativação da janela do detector. Este efeito pode-se observar facilmente fazendo a medida de um pedaço de fibra garantido que somente o retroespalhamento Rayleigh seja adquirido (ou seja sem reflexões o perdas). A Figura 4.7 apresenta o resultado feito com uma janela de aquisição de 35 ns, eficiência do detector =15% e taxa de emissão de pulsos ópticos de 29 kHz (*Prescaler* = 200). O VOA foi ajustado para obter uma taxa de contagens de 1 kHz. Como se observa na figura, existe um regime transitório tanto no começo (oscilação) como no final da janela (oscilação seguida de uma diminuição total de contagens) onde o número de contagens não é estável. Isso não é desejado se quisermos fazer a aquisição de várias janelas, uma após a outra.

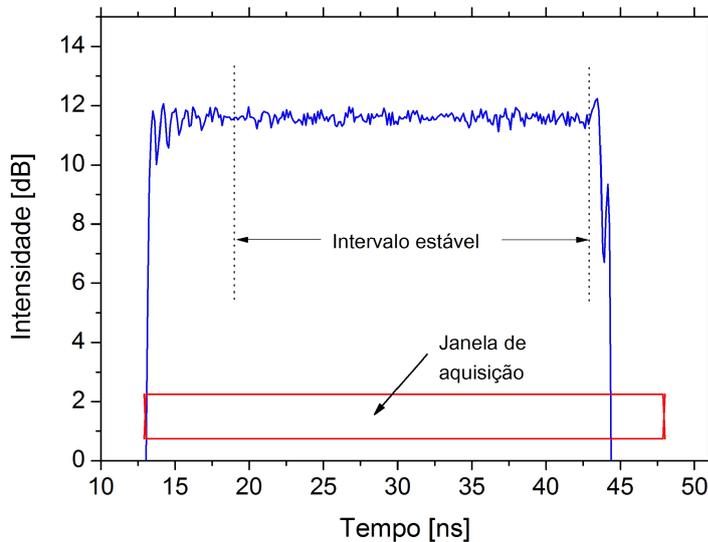


Figura 4.7 Janela de aquisição apresentando uma oscilação no nível de detecção no início e no final. No final da janela o nível de contagens é zero.

A solução adotada então é descartar as contagens no começo e no final da janela (*LeftCut*=6ns e *RightCut*=5ns) deixando como medida útil o intervalo estável. Assim a largura da janela efetiva passa de 35 para 24ns.

O segundo efeito observado é o incremento das contagens de escuro quando o detector é gatilhado com taxas maiores, ou seja a potência óptica média, que chega no detector, aumenta. Este efeito pode-se observar na Figura 4.8, onde três taxas de gatilhamento foram testadas.

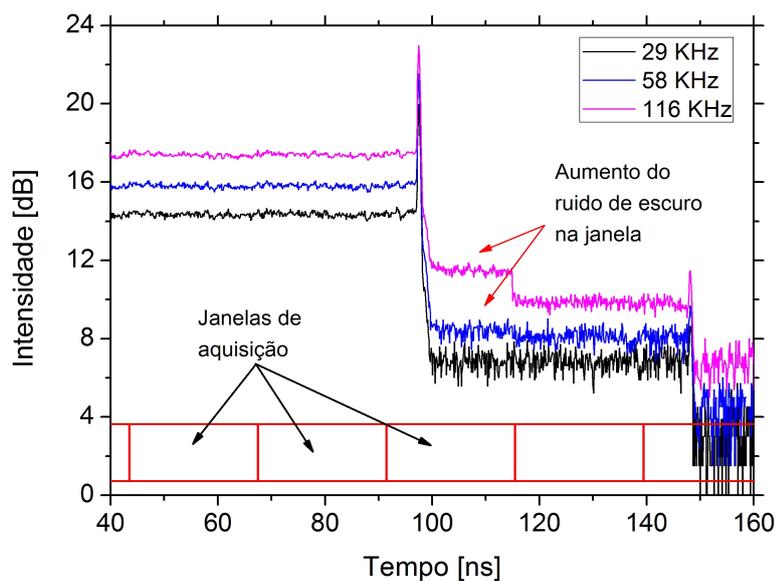


Figura 4.8 Aumento das contagens de escuro evidenciado na janela que contém dois níveis de intensidade diferentes. O efeito é maior quando a taxa de gatilhamento aumenta.

O aumento das contagens de escuro é evidente após a perda induzida, dentro da janela que contém o primeiro pico de reflexão, para uma taxa de gatilhamento de 116 kHz ( $Prescaler = 50$ ). Nas janelas subsequentes o efeito não acontece porque a perda reduziu a potência óptica média. O efeito diminui para uma taxa de 58 kHz e praticamente não acontece para 29 kHz. Assim a taxa de 29 kHz é adotada nos experimentos desta tese.

O terceiro efeito foi observado no intento de melhorar a faixa dinâmica do UHR-PC-OTDR. Como será visto na sub-seção 5.1 as primeiras medições chegaram até 10.5 dB de dinâmica; para aplicações em redes TDM-PON, baseadas em divisores passivos, o fator de atenuação em função do número de portas é dado por  $1/N$ , assim, por exemplo, um divisor 1x32 introduz uma perda de 15 dB. Por outro lado, os AWG usados nas redes WDM-PON apresentam perdas de inserção típicas de 6 dB. Portanto a faixa dinâmica do UHR-PC-OTDR estaria limitada para divisores de até 1x4 (6 dB), deixando uma margem de 4.5 dB para o monitoramento das fibras após o divisor.

O aumento da faixa dinâmica pode ser obtido diminuindo a taxa de contagem de escuro mas essa taxa é fixa e não pode ser mudada no detector. Assim a solução adotada foi o aumento da potência pico  $P_o$ , vide Eq. 10. O aumento da potência pico foi conseguido gatilhando o SOA com um pulso de tensão maior, passando de 7 para 15 V (50%). Na Figura 4.9, é apresentada a variação da potência média de saída do SOA em função da tensão de gatilhamento num pulso de 4ns de largura, pode-se observar um ganho na potência de quase 13 dB quando a tensão passa de 7 para 15 volts. Contudo esse ganho representa um aumento nas contagens no detector podendo levá-lo à saturação, mas isso é controlado com o atenuador variável antes do detector (vide Figura 4.4).

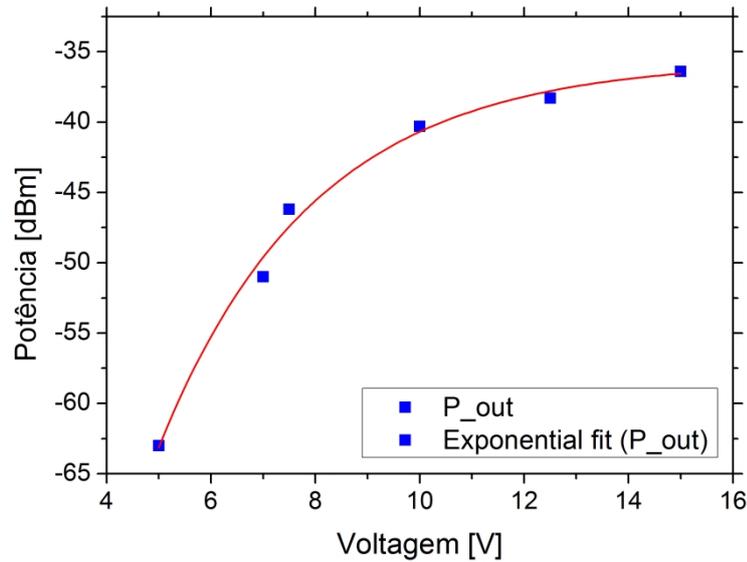


Figura 4.9 Potência média de saída do SOA em função da voltagem de gatilhamento num pulso de 4 ns.

O aumento da potência óptica, não obstante, revelou esse terceiro efeito no comportamento do SPAD, o qual consiste de um decaimento no nível de intensidade dentro de uma mesma janela de aquisição. Este comportamento é observado na Figura 4.10. É possível observar que o decaimento é proporcional à potência, já que, como visto na terceira janela, após uma perda o decaimento diminui dentro da mesma janela

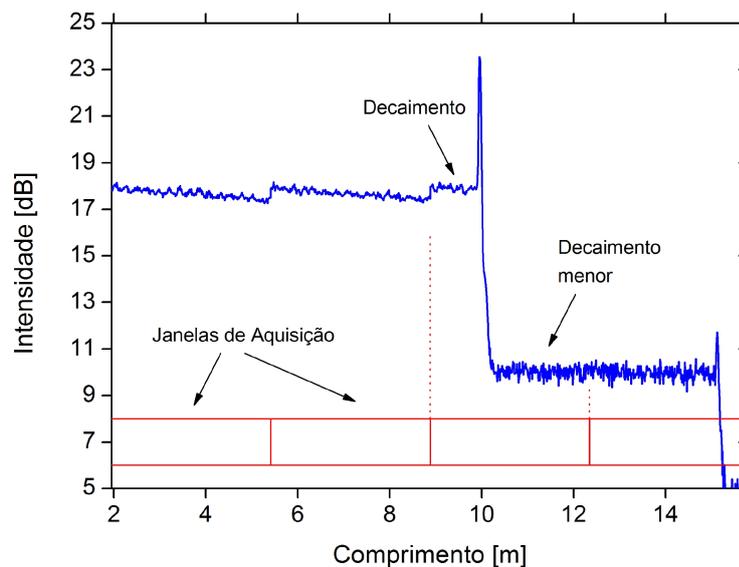


Figura 4.10 Decaimento do número de contagens dentro em cada janela.

O comportamento pode ser explicado pelo fato de que dentro de uma janela de aquisição a probabilidade de detectar um fóton num intervalo pequeno

depende da não detecção num intervalo anterior. Esse comportamento pode ser descrito na Figura 4.11. A probabilidade de um fóton ser detectado dentro de um intervalo pequeno dentro da janela é:

$$P_d = p(1-p)^d$$

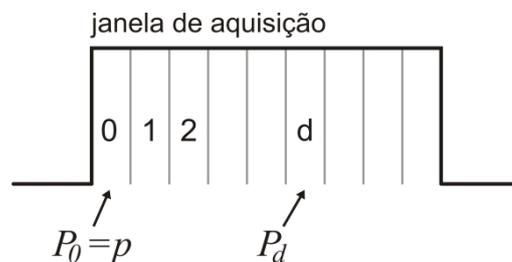


Figura 4.11 Probabilidade de detectar um fóton dentro de uma janela.

Em escala logarítmica, considerando a atenuação de ida e volta na fibra, a equação é:

$$5 \log_{10}(P_d) = 5 \log_{10}(p) + d 5 \log_{10}(1-p) \quad \text{Eq. 24}$$

Podemos dizer então que a probabilidade de detectar um fóton dentro de uma janela tem um comportamento linear (em escala logarítmica) cuja inclinação em função da distância,  $d$ , é dada por  $5 \log_{10}(1-p)$ . Sendo assim, essa probabilidade é proporcional ao número de contagens adquiridas dentro da janela, de forma que:

$$5 \log_{10}(C) = 5 \log_{10}(C_0) + d r_a \quad \text{Eq. 25}$$

onde  $C$  é a função que representa o número de contagens dentro de uma janela,  $C_0$  é o número de contagens no primeiro intervalo de janela,  $d$  é a distância e  $r_a$  é o coeficiente angular de inclinação. O valor de  $r_a$  pode ser aproximado a  $5 \log_{10}(1-p) \approx -5p \log_{10}(e)$  sabendo que o valor de  $p$  é muito pequeno. Nesse sentido, é factível matematicamente determinar essa inclinação e corrigi-la.

Como dito anteriormente a inclinação observada depende da potência óptica que chega no detector. O aumento da potência se traduz num aumento do número de contagens para uma taxa de gatilhamento e largura de janela fixas. A

Figura 4.12a apresenta a diminuição da intensidade em função da distância para três taxas de contagens diferentes; o controle das taxas de contagens é conseguido com o controle do VOA na frente do SPAD (Figura 4.4). Neste caso as medidas foram normalizadas para atingirem o mesmo nível de intensidade no início da janela, a largura da janela efetiva utilizada foi de 24ns o que representa uma distância aproximada de 2.45m, e a taxa de gatilhamento do detector foi de 29 kHz. A Figura 4.12b apresenta o ajuste linear das curvas de inclinação em função da distância para diferentes taxas de contagens.

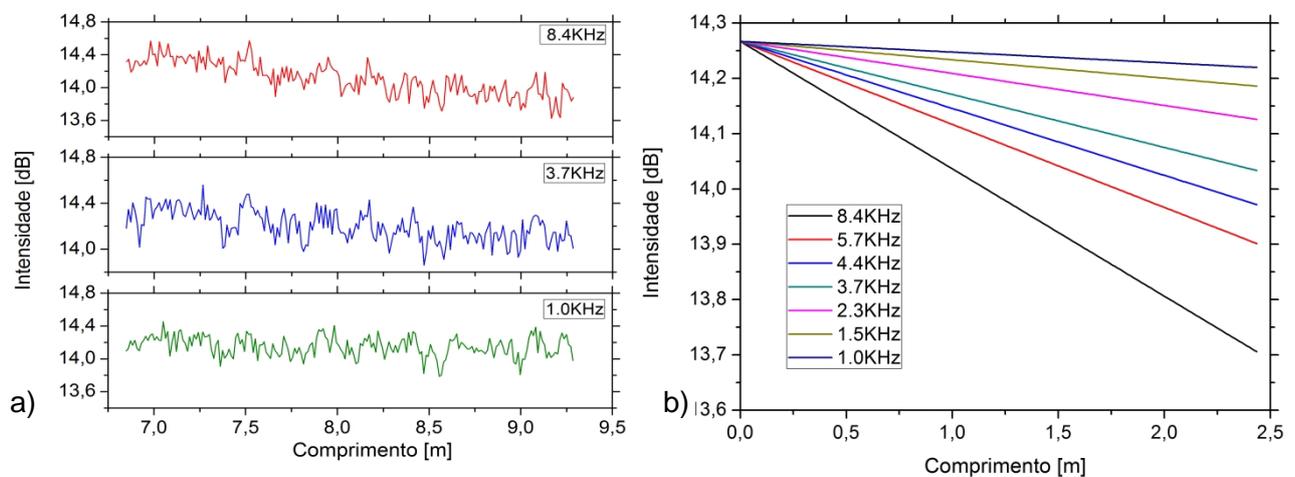


Figura 4.12 a) Decaimento do número de contagens numa janela em função da distância para 3 taxas de contagens. b) Ajuste linear. A taxa de gatilhamento foi de 29 kHz.

Com a análise feita até este ponto podemos propor um algoritmo de correção baseado no mapeamento das taxas de contagens e das inclinações. Seria assim proveitoso representar as inclinações em função das taxas de contagens, como na Figura 4.13a, onde o *Slope* tem um comportamento linear em função da taxa de contagens pelo fato de  $p$  ser muito pequeno. Melhor ainda é representar as taxas de contagens em escala logarítmica, Figura 4.13b, onde a intensidade é normalizada pela máxima taxa de contagens medida, 8.4 kHz.

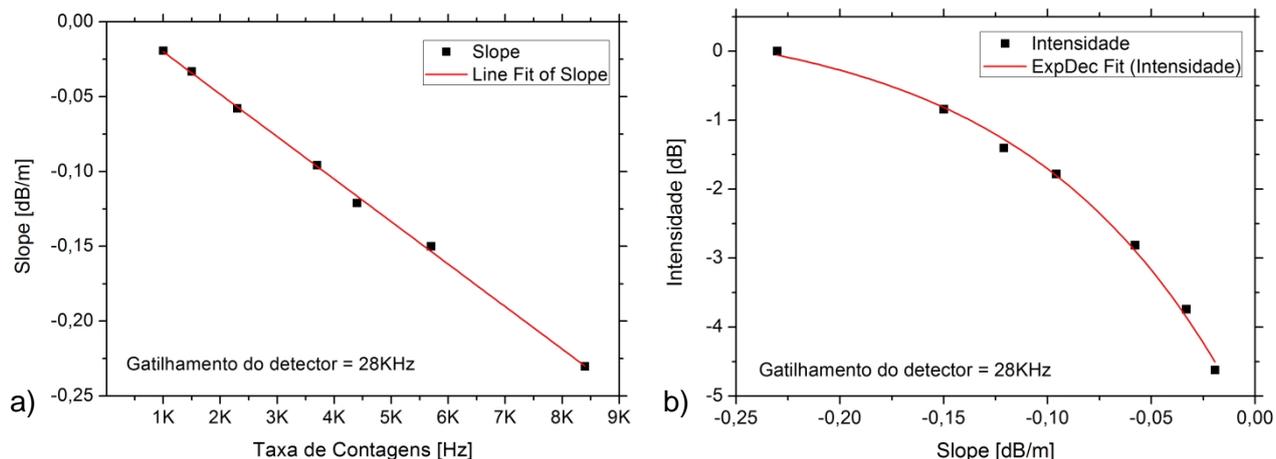


Figura 4.13 a) Inclinação em função da taxa contagens, b) a intensidade normalizada em função da inclinação.

Após algumas medições, foi comprovado que a inclinação observada nas janelas depende apenas da potência de pico que chega ao detector, portanto um novo valor na eficiência do detector ( ) precisa da construção de uma nova curva (como da Figura 4.13). O aumento da potência média, com taxas de gatilhamento ou larguras de janelas maiores, não influi na inclinação.

#### 4.2.1. Algoritmo para a correção da inclinação das janelas de aquisição.

Antes de descrever o algoritmo temos que assumir as seguintes premissas:

- No início, o algoritmo deve saber a potência óptica que vem do trecho inicial da fibra. Essa potência pode-se calcular pelo decaimento apresentado nesse primeiro pedaço ( $slope_i$ ), para logo localizar em que ponto da curva da Figura 4.13b se está trabalhando. Conhecido esse decaimento inicial o primeiro tramo é corrigido, e o seu nível de intensidade  $Int_i$  (em dB) fica como nível de referência; perdas ou "ganhos" referentes a  $Int_i$ , ao longo do restante da fibra, fazem deslocar o ponto de trabalho da curva, estimando assim o  $slope$  necessário na correção para cada caso. O tramo inicial pode ser uma pequena fibra de lançamento (ex.: 10m ~ 4 janelas de 2.45m) na qual é garantido que não existem perdas nem reflexões, podendo-se estimar o decaimento com o menor erro possível.

- Por outro lado durante as medições foi observado que o nível de Rayleigh no começo de cada janela é o nível desejado da medição e, são os níveis subsequentes os que precisam ser corrigidos. Para efeitos práticos a largura considerada como o começo de uma janela, chamado de *intervalo inicial*, é  $6 \times 0.116 \text{ ns} \approx 7 \text{ cm}$ , sendo 116 ps a granularidade de aquisição do TDC, como apresentado na Figura 4.14. Assim o nível de Rayleigh no *intervalo inicial* é a média de 6 medidas.

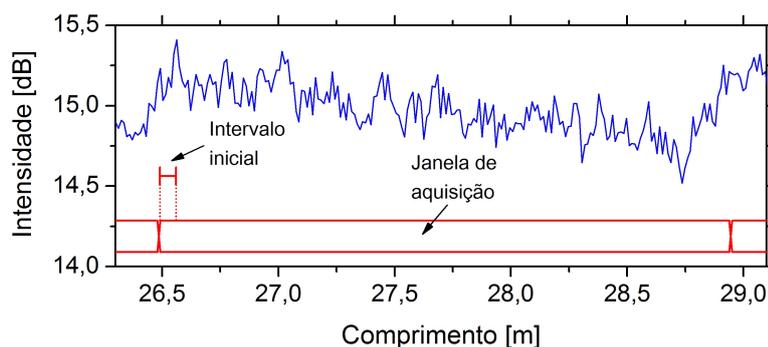


Figura 4.14 Intervalo inicial, considerado como nível de Rayleigh no começo de uma janela de aquisição.

- É considerado que dentro de uma janela pode existir tanto perdas como picos de reflexões. As reflexões sempre vem ligadas a uma perda e podem haver mas de 1 dentro da janela, o algoritmo chama a este tipo de janela "*peak*". As janelas que só tem perdas são chamadas de "*loss*" e as janelas sem perdas nem reflexões de "*regular*". A correção do decaimento é igual nas janelas *peak* e *loss*, já que, dependendo do valor da perda ou perdas podem existir mais de um *slope* dentro de uma janela só.

O fluxograma do algoritmo de correção é apresentado na Figura 4.15 e na Figura 4.17. No fluxograma principal o bloco "*Inclinação Inicial*" calcula o *slope<sub>i</sub>* da fibra de lançamento (de 4 janelas aproximadamente) e logo a sua intensidade *Int<sub>i</sub>*, que são os valores de referência do algoritmo.

O bloco seguinte, "*Tipo de janela*", começa já com a 5<sup>a</sup> janela (contendo já a fibra a ser medida) e determina se a janela é do tipo *peak*, *loss* ou *regular*. Se a janela for *regular* o algoritmo calcula o nível do *intervalo inicial* para logo compará-lo com *Int<sub>i</sub>* e assim determinar a inclinação necessária usando a curva da Figura 4.13b.

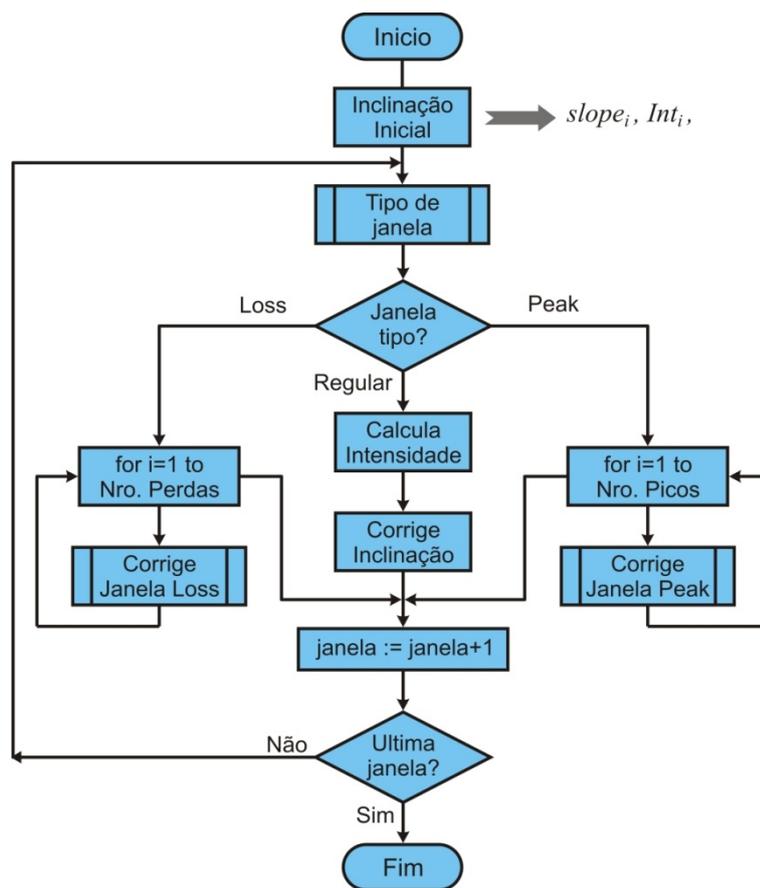


Figura 4.15 Fluxograma principal do algoritmo para a correção do decaimento nas janelas de aquisição.

Se a janela for tipo *peak*, dependendo do número de picos, o algoritmo implementa a correção de acordo com o exemplo da Figura 4.16, onde duas perdas (associadas a dois picos) definem três níveis de intensidade os quais se traduzem em três *slopes*:  $S_1$ ,  $S_2$  e  $S_3$ . O *intervalo inicial*, Figura 4.16a, determina o valor de  $S_1$ , mas a correção com esse valor de inclinação só é válida até a chegada do primeiro pico, assim a curva de correção é aquela em traço vermelho. Aplicada essa primeira correção o resultado é a Figura 4.16b. Numa segunda iteração o *intervalo inicial* é aquele depois do primeiro pico, Figura 4.16b, calcula-se assim o seu nível de intensidade e logo o valor de  $S_2$ , a correção é aquela em traço vermelho. Na terceira iteração a correção é completada resultando na Figura 4.16d. Esta sequência de correção é válida tanto para janelas tipo *peak* como para janelas tipo *loss*, já que a única diferença entre elas são a existência dos picos, sendo as perdas as que definem a inclinação para a correção.

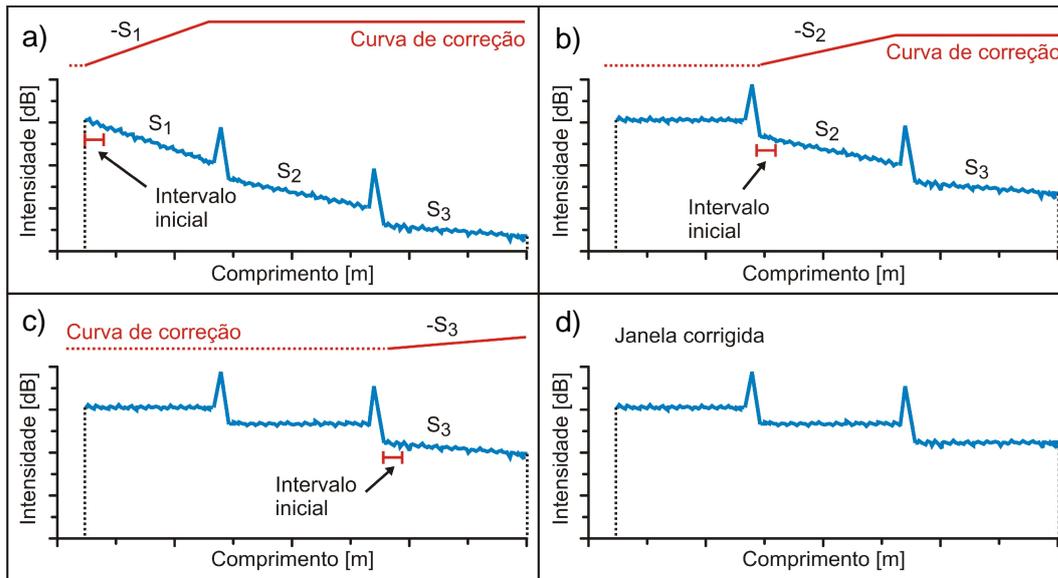


Figura 4.16 Sequência de correção para uma janela com dois picos (ou perdas) e 3 níveis de intensidade:  $S_1$ ,  $S_2$  e  $S_3$ .

Como já vimos, o bloco "*Tipo de janela*" define os tipos *peak*, *loss* e *regular*. O fluxograma desse bloco, Figura 4.17, está baseado no filtro:  $\ell_1$  [51]. Esse filtro recebe como entrada os dados ruidosos, chamados neste caso de *Janela*, o parâmetro  $max$  e uma constante multiplicativa; o resultado da filtragem é  $S$ . A filtragem  $\ell_1$  produz uma estimativa,  $x_t$ , com tendência linear de uma série de dados ruidosos,  $y_t$ , mas, com a vantagem de ser do tipo "*piecewise*" ou seja dentro da série pode haver mais de um tendência, dando como resultado uma estimativa linear por partes. O filtro  $\ell_1$  minimiza a função objetivo da soma ponderada:

$$(1/2) \sum_{t=1}^n (y_t - x_t)^2 + \sum_{t=2}^{n-1} |x_{t-1} - 2x_t + x_{t+1}| \quad \text{Eq. 26}$$

que pode ser escrita em forma matricial:

$$(1/2) \| \mathbf{y} - \mathbf{x} \|_2^2 + \| \mathbf{Dx} \|_1 \quad \text{Eq. 27}$$

onde  $\| \mathbf{u} \|_2 = (\sum_i u_i^2)^{1/2}$  é a norma Euclidiana,  $\| \mathbf{u} \|_1 = \sum_i |u_i|$  a norma 1 e,  $\mathbf{D}$  é a matriz diferença de segundo ordem, dada por:

$$D = \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 & & & \\ & 1 & -2 & 1 & & \\ & & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & & 1 & -2 & 1 \\ & & & & 1 & -2 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 28}$$

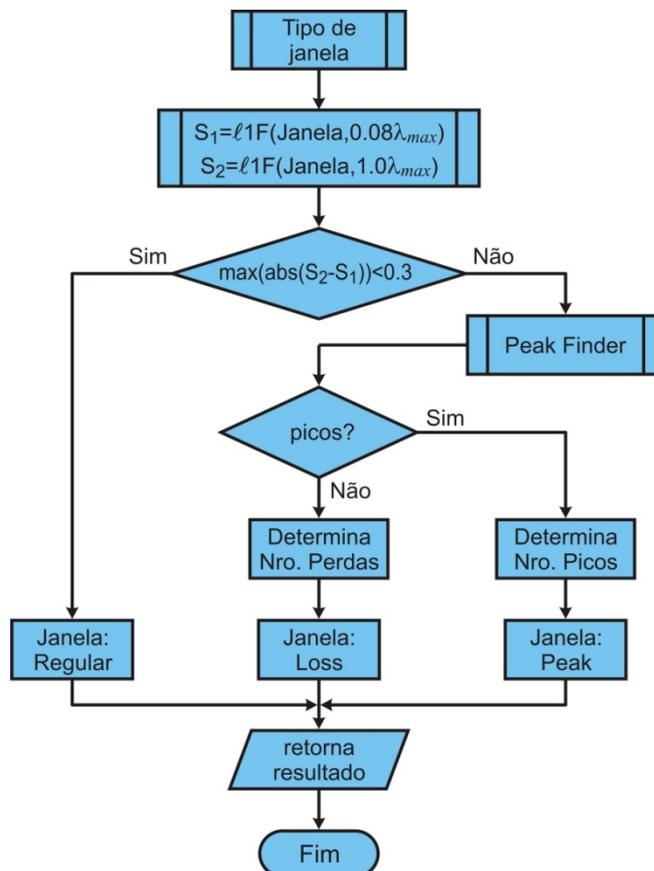


Figura 4.17 Fluxograma "Tipo de Janela" baseada no  $\ell_1$ Filter

O número de troços é definido pelo parâmetro  $\lambda$ . Quando  $\lambda = 0$  a estimativa converge à série de dados ruidosa original (a filtragem praticamente não acontece), assim o número de troços é igual ao números de dados dentro da série. Quando  $\lambda = \lambda_{max}$  o número de troços é igual a 1, isto é, uma única tendência representa toda a série de dados. O valor de  $\lambda_{max}$  é dado por:

$$\lambda_{max} = \left\| (DD^T)^{-1} Dy \right\|_{\infty} \quad \text{Eq. 29}$$

onde  $\|u\|_{\infty} = \max_i |u_i|$  é a norma infinita do vetor  $u$ . Assim o valor  $\lambda_{max}$  é diferente de uma serie de dados para outra, ou seja de uma janela para outra.

A Figura 4.18, apresenta o traço do UHR-PC-OTDR para os três tipos de janela: *regular*, *peak* e *loss*; e também o ajuste feito com o filtro  $\ell_1$  para dois valores de  $\lambda_{\max}$ :  $\lambda_{\max} = 0.08$  e  $\lambda_{\max} = 1.0$ . Pode-se ver que o valor de  $\lambda_{\max}$  é diferente para cada caso.

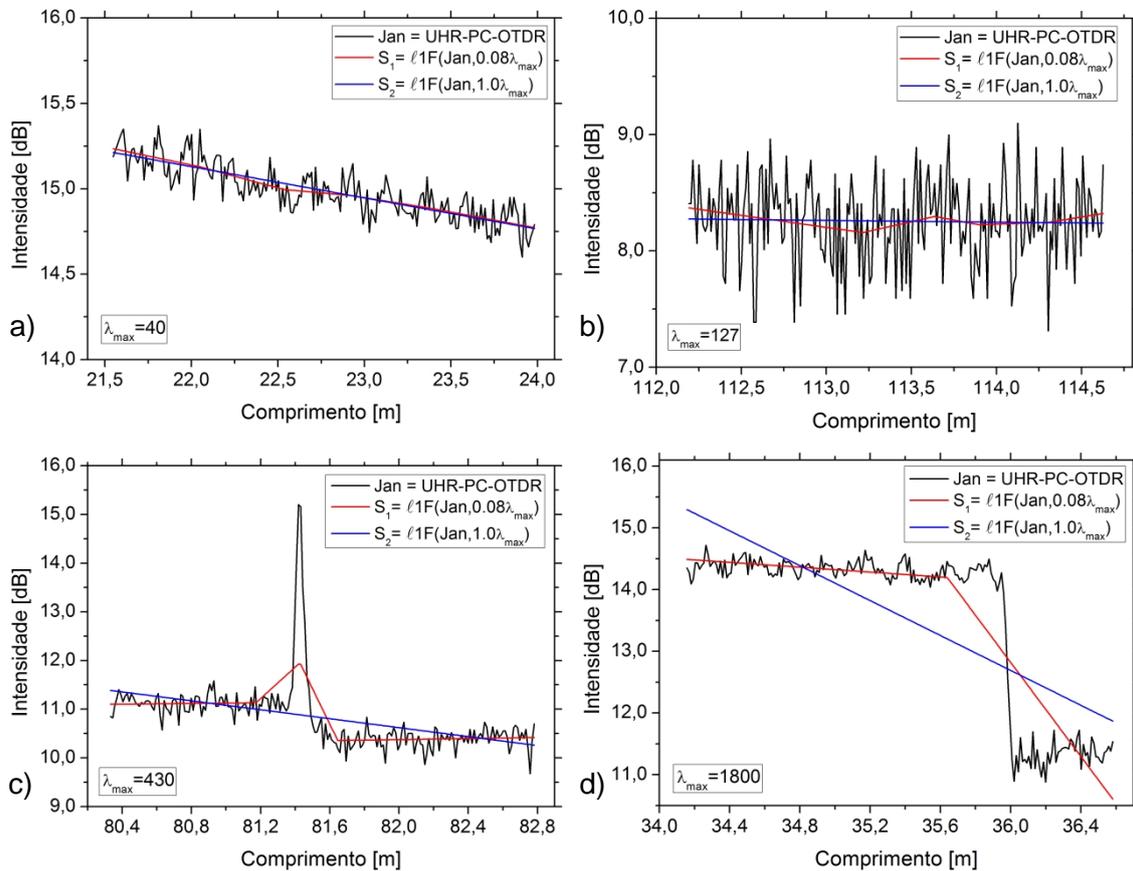


Figura 4.18 Resultado do filtro  $\ell_1$  em três tipos de janela. a) Janela tipo *regular*, b) Janela tipo *regular*, com um nível de ruído maior, c) Janela tipo *peak* e d) tipo *loss*.

O fator de 0.08, na fluxograma da Figura 4.17, foi selecionado de tal forma que o valor máximo de  $\text{abs}(S_2 - S_1)$  numa janela *regular* não seja maior do que a 0.3 dB, se o valor fosse maior então a janela não é *regular*. Se a janela não é *regular* o algoritmo determina se existem picos, resolvendo o número deles e definindo a janela tipo *peak*. Se não existirem picos então passa-se a buscar perdas, calculando também o número delas, definindo assim a janela *loss*.

Esse algoritmo com os parâmetros de filtragem propostos consegue distinguir picos não menores do que um 1 dB. Para picos menores, não obstante, o algoritmo considera que a janela é *regular* se a perda depois do pico não for representativa ( $< 0.5$  dB) e *loss* se a perda for maior.

Nas janelas contendo somente perdas o menor valor detectado é de 0.5 dB. Janelas que apresentam perdas sem pico são pouco frequentes nos traço de OTDR se trabalharmos com resoluções altíssimas. As perdas por curvatura poderiam ser consideradas como janelas sem pico, mas como será visto na seção 5.1, existe sempre um pico associado nelas e o algoritmo conseguiria detectá-los. Outro exemplo de perdas sem pico seriam as emendas, mas com valores muito baixos <0.1 dB, o qual é considerado pelo algoritmo como uma janela tipo *regular*. É possível também encontrar esse tipo de janelas no caso dos divisores passivos (*splitter*) que dependendo do número de divisões as perdas podem ser maiores do que 1.5 dB e o algoritmo também conseguiria detectá-las.

Finalmente a faixa dinâmica atingida pelo UHR-PC-OTDR, após o exposto acima, é de 14.2 dB a qual será apresentada graficamente na subseção 5.3, Figura 5.35.

### 4.3. Descrição dos equipamentos

#### 4.3.1. Fonte Laser de Banda Larga (UWS: Ultra-Wideband Source)

O laser usado (UWS) é uma fonte pulsada de aproximadamente 5.8 MHz com uma largura espectral de 1200 até 1700 nm. O pulso gerado é de aproximadamente 115 femtosegundos, sendo um dos fatores mais determinantes na resolução temporal do OTDR. As características mais relevantes da UWS são apresentadas na Tabela 4.1 [52].

Tabela 4.1 Características da UWS

Categoria	Parâmetro	Unidades	min	max
Características Espectrais	Largura espectral	nm	1200	1700
	Densidade de Potência Espectral	dBm/nm	-20	
	Estabilidade Espectral (25°C, em um período de 30min, depois de 1 hora de aquecimento)	dB		±0.1
	Taxa de repetição	MHz	6±0,5	
Interface	Conector óptico		FC/APC	

A fonte laser conta ainda com uma saída elétrica (conector BNC) para sincronização (Pulse OUT), além de uma interface RS232 (conector DB9).

#### 4.3.2. Semiconductor Optical Amplifier (SOA)

A caracterização do SOA usado nesta tese, já foi feita no trabalho da referência [53], apresentando dois regimes, o pulsado e o contínuo. Mesmo que o espectro da emissão espontânea amplificada (ASE) do SOA não seja exatamente o espectro de ganho, ele é muito próximo. Na Figura 4.19 é apresentado o espectro da ASE no regime contínuo para diferentes correntes quiescentes (ou bias), sendo mostrados também as bandas ópticas S, C, L e U.

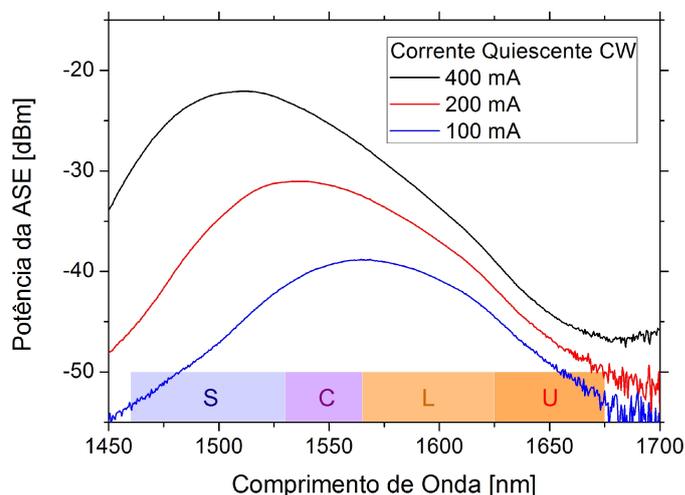


Figura 4.19 Espectro do ASE do SOA para diferentes correntes quiescentes em CW.

A corrente máxima sugerida pelo fabricante é de 400 mA, onde o pico de emissão está em 1510 nm. Não obstante, pode-se observar que existe emissão até na banda U, e um pouco maior, na banda L, que é a banda de monitoramento do OTDR usada nos experimentos de esta tese. Assim o SOA pode ser usado como comutador, ainda que com pouca potência, nesta banda de monitoramento.

Na Figura 4.20, é apresentado o espectro da ASE no regime pulsado, para duas correntes de pico. Os pulsos foram de 100ns com uma taxa de repetição de 5 kHz [53]. A corrente máxima pulsada pode ser aumentada acima do valor máximo permitido pelo fato do *duty cycle* ser bastante pequeno.

A razão de extinção medido para dois comprimentos de onda são apresentados na Tabela 4.2, e na Tabela 4.3 são apresentadas algumas das características principais do SOA segundo o fabricante.

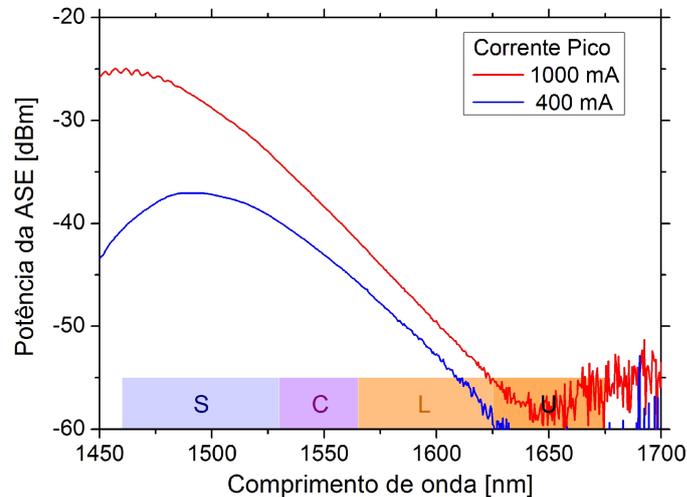


Figura 4.20 Espectro do ASE do SOA para diferentes correntes de pico pulsadas

Tabela 4.2 Razão de extinção do SOA para dois comprimentos de onda

Comprimento de Onda	Razão de extinção
1520 nm	83.5 dB
1615 nm	75.0 dB

Tabela 4.3 Características do SOA

Parâmetro	Valor	Unidades
Corrente de operação	500	mA
Comprimento de Onda	1528 - 1562	nm
Isolamento óptico	45	dB
Razão de extinção	60	dB
Velocidade de chaveamento	1	ns
Ganho dependente da polarização	1	dB
Potência de saída máxima (sinal de entrada CW)	17	dBm
Potência de saída máxima (sinal de entrada modulado)	9	dBm
Potência de saturação (-3 dB)	14	dBm
Ganho ( $P_{in} = -20$ dBm)	13	dB
Figura de ruído	8	dB

### 4.3.3. Gerador de Atraso Digital (DDG)

Tabela 4.4 Características do gerador de atraso digital

Parâmetro	Valor	Unidades
Faixa de atrasos	0 – 2000	s
Resolução temporal	5	ps
Jitter temporal	12	ps
Rising e Falling edges	< 2	ns
Voltagem de saída	0,5 – 5 (0,01 de resolução)	V
Offset da Voltagem	$\pm 2$	V

### 4.3.4. Detector de Fótons Únicos (SPAD)

O dispositivo mais importante em uma aplicação por contagem de fótons é, sem dúvida, o detector de fótons únicos. O equipamento para detecção de fótons únicos utilizado nesta tese [49] está baseado em um fotodiodo de avalanche InGaAs/ InP. A Tabela 4.5 apresenta algumas das características mais relevantes do equipamento.

Tabela 4.5 Características técnicas do detector de fótons únicos

Parâmetro	Min.	Típico	Max.	Unidades
Banda de detecção	900		1700	nm
Eficiência de detecção ( )	5		25	%
Jitter temporal ( =10%)			600	ps
Jitter temporal ( =25%)			300	ps
Janela de ativação	0,5 - 25			ns
Tempo morto	0, 1, 2, 5, 10, 20, 40, 60, 80, 100			$\mu$ s
Freq. gatilhado externo max.			100	MHz
Freq. gatilhado interno	0,001		100	MHz
Probabilidade de contagem de escuro ( =10%, <i>Freq. gate</i> =100kHz)		$2,5 \times 10^{-6}$		counts/ns

### 4.3.5. Time to Digital Converter (TDC)

O TDC é um circuito integrado que converte diretamente intervalos de tempo muito curtos em valores digitais. Ele usa o retardo de propagação que uma

porta lógica simples produz (ex. inversores CMOS) para quantizar de forma muito fina um intervalo de tempo. O TDC conjuntamente com a fonte UWS, o DDG e o SPAD, são os fatores determinantes na resolução temporal de OTDR. A Tabela 4.6 apresenta algumas das suas características segundo o fabricante.

Tabela 4.6 Características técnicas do TDC

	Valor	Unidades
Resolução	Normal ~ 116 Alta ~ 58	ps
Número de canais	8 (Resolução normal) 4 (Alta resolução)	
Faixa de Medição	5 até 7800 (Resolução normal) 5 até 3900 (Alta resolução)	ns
Outras	Sensibilidade de borda de subida e descida. Ativação de desativação individuais de canais.	

#### 4.3.6. Arrayed Waveguide Grating (AWG)

Um AWG de 32 canais utilizou-se na emulação de uma rede WDM-PON. Este dispositivo é cíclico trabalhando nas bandas S, C, L e U as quais tipicamente são utilizadas para realizar a transmissão, recepção e monitoramento. O espectro de transmissão dos 32 canais para cada banda foi medido e o resultado é apresentado na Figura 4.21, sendo o espaçamento entre canais de 0,8 nm. A medida de um canal de transmissão em alta resolução é apresentado na Figura 4.22, onde se pode observar 0,63 nm de largura de banda em -3 dB com uma razão de extinção de 35,5 dB.

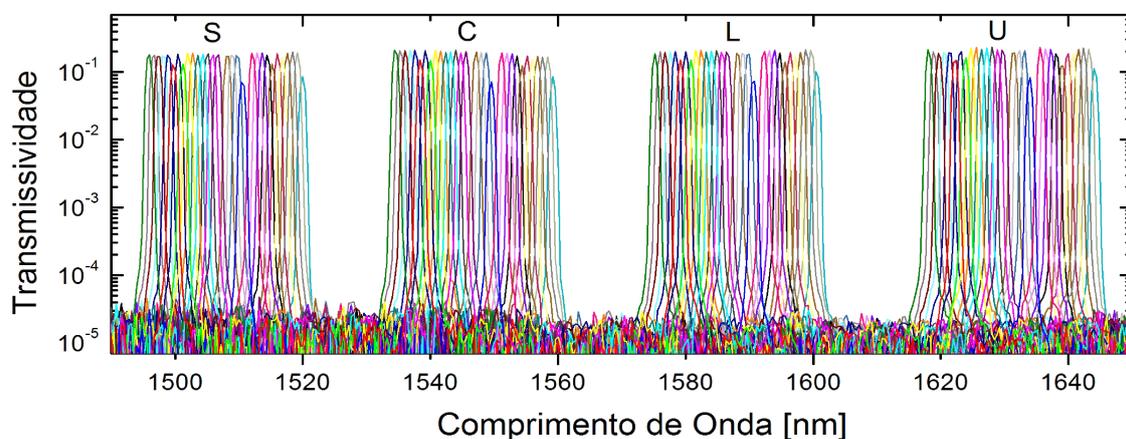


Figura 4.21 Espectro de transmissão do AWG para bandas diferentes.

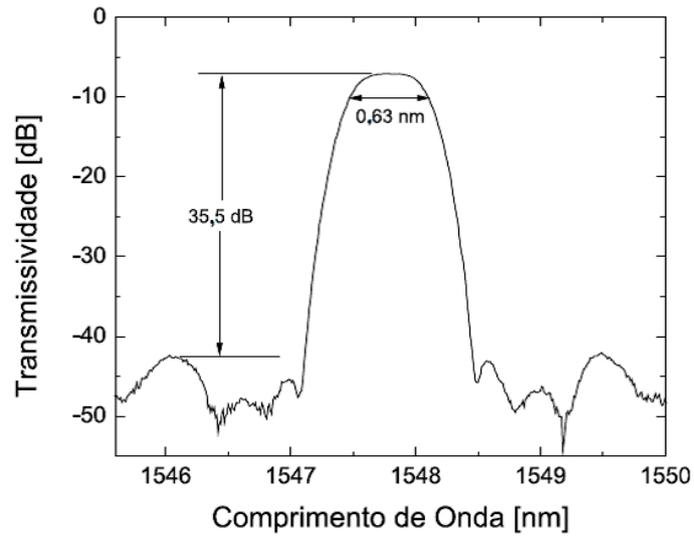


Figura 4.22 Espectro de transmissão para um canal do AWG.