

## 5. Resultados experimentais

### 5.1. Monitoramento de uma rede WDM-PON

Este primeiro experimento foi baseado no HDR-PC-OTDR e é considerado o monitoramento de uma rede WDM-PON baseada num AWG no nó remoto (RN). O AWG é cíclico, cobrindo as bandas S, C, L e U, de modo que um ONT dado é conectado à *central office* (CO) com um único comprimento de onda em cada banda. Isso permite a transmissão de dados bidirecional e ao mesmo tempo o monitoramento da camada física da rede. É considerado o uso da banda C para o tráfego de dados *downstream*, com uma taxa de transmissão de 2.5 Gb/s, e, a banda S para o tráfego *upstream* a 155 Mb/s. Para explorar a ciclicidade do AWG no uso do monitoramento *in service*, o sinal de monitoramento deve estar na banda L ou banda U, o que significa que a faixa espectral livre do AWG seja tal que os sinais de dados e monitoramento estejam no mesmo canal.

A caracterização do AWG usado é apresentado na Figura 4.21. Para cada canal de *downstream* na banda C existem os correspondentes canais na banda S, L e U, que podem ser usados para o tráfego *upstream* ou para o sinal de monitoramento sobre o mesmo caminho óptico. O uso do AWG neste cenário é crucial, já que os sinais de *upstream*, *downstream* e monitoramento devem estar no mesmo canal.

A montagem básica da rede WDM-PON é apresentada na Figura 5.1. Na *central office* um WDM acopla o sinal de monitoramento, na banda L, à rede PON. Neste experimento são conectadas duas fibras nas saídas do AWG, correspondentes aos dois primeiros canais disponíveis na banda C, com comprimentos de onda  $\lambda_1=1534,4$  nm e  $\lambda_2=1535,2$  nm. Os comprimentos de onda de monitoramento correspondentes são 1575.2 nm e 1576.0 nm, determinados pela ciclicidade do AWG. Uma fibra de 3,3 km foi usada como *feeder*, conectando o RN com a CO. No canal 1 foram conectadas duas fibras, 12.32 km e

4.29 km, unidas por um conector APC, simulando uma pequena perda; por outro lado no canal 2 foi conectada uma fibra de 6.25 km. Um filtro passa banda (BPF) com largura espectral de 0.8 nm e razão de extinção de 35 dB foi introduzido no receptor do medidor de BER (BER *Tester*), sintonizado na banda C evitando a interferência entre o sinal de monitoramento e o sinal de dados.

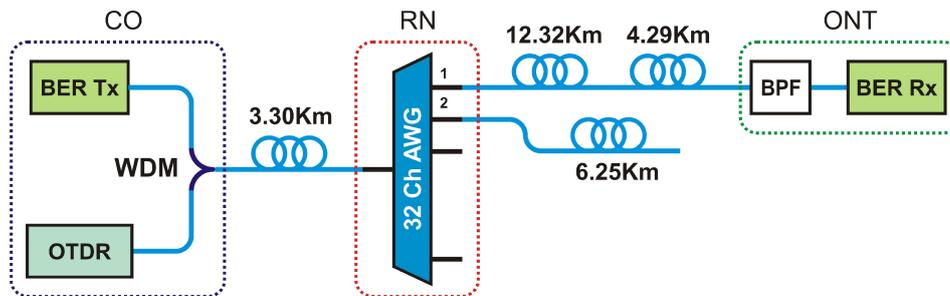


Figura 5.1 Montagem experimental do para o monitoramento de uma rede WDM-PON.

As fontes de ruído que podem surgir na montagem da WDM-PON e que podem afetar o HDR-PC-OTDR são principalmente: o retroespalhamento Rayleigh gerado pela ASE das fontes laser dos sinais de dados, fótons vazando através do acoplador WDM, e fótons devido ao espalhamento Raman do sinal de dados. Em medições por contagem de fótons, a simples presença de fótons espúrios gera ruído, assim podemos substituir o sinal de dados por um sinal laser contínuo (CW) no canal que será monitorado, independentemente se os fótons espúrios venham do espalhamento Raman ou Rayleigh.

Assim, para testar o HDR-PC-OTDR, com tráfego de dados, foi substituído o medidor de BER por duas fontes laser CW sintonizadas nos canais correspondentes e com 0 dBm de potência na direção de *downstream*. Com essa potência numa fibra monomodo de 3.3 km, o nível de Rayleigh estará na ordem de -40 dBm (vide Eq. 10), e sabendo que o relação entre o número de fótons e a potência óptica é dada por [7]:  $N_{ph} = [(T_{gate}) / (hc)] P_{init}$ , o número médio de fótons que chegam ao detector, para uma janela de detecção de 4ns na banda de 1550 nm, é de aproximadamente  $3 \times 10^3$ . Se considerarmos que a probabilidade de contagem de escuro do SPAD para essa janela, com eficiência =15%, é de  $2 \times 10^{-5}$  então, a relação entre o espalhamento Rayleigh não filtrado e a taxa de escuro é  $3 \cdot 10^3 \cdot 0.15 / 2 \cdot 10^{-5} = 2.3 \times 10^7$ . Isso significa que é necessária uma razão de extinção

de aproximadamente 74 dB na filtragem do sinal de dados, para obter assim a mesma probabilidade de detecção tanto para as contagens de escuro como para as contagens espúrias geradas pelo espalhamento Rayleigh do sinal de dados. A razão de extinção do WDM ( $>35$  dB), conjuntamente com a razão de extinção do BPF ( $>35$  dB) respondem a esse quesito, já que não foi observada uma variação na taxa de contagens de escuro. No caso da ASE gerada na banda L os seus valores são tipicamente 40 dB abaixo da potência pico do laser, sendo rejeitada também pelo WDM; assim a contribuição de fótons pelo seu espalhamento Rayleigh é muito pequena. É importante notar que também foi medida a densidade de potência de espalhamento Raman na banda L, produzido por 8 canais na banda C (um total de +10 dBm de potência), sendo de -85 dBm/nm para uma fibra de 10 km; ainda nestas condições a contribuição de fótons é desprezível.

Por outro lado para analisar o efeito do tráfego de dados *upstream* na contagem de fótons foi necessário adicionar um segundo filtro sintonizável no HDR-PC-OTDR, já que as bandas S e L atravessam a mesma porta do WDM utilizado. O filtro adicional assim emula a filtragem que seria obtida se tivéssemos usando um WDM com duas portas: SC e L. A potência média de chegada, emitida por cada canal de *upstream*, foi limitada em -30 dBm, tomando em conta uma margem de 4 dB e uma sensibilidade típica de -34 dBm para um receptor em 156 Mb/s. Assim para emular o tráfego total *upstream* foi injetada uma potência suficiente num canal do AWG tal que na porta SL do WDM chegue uma potência de -15 dBm, correspondendo ao tráfego de 32 canais.

A Figura 5.2 apresenta o traço do HDR-PC-OTDR dos canais 1 e 2 durante o tráfego de *downstream*. Na figura vemos que o AWG e o seus conectores apresentam uma atenuação de 5 dB para canal 1 e 5.5 dB para o canal 2. A conexão entre as duas fibras do canal 1 é também visível. No canal 2 o fim da fibra não apresenta reflexão porque foi submetida a uma grande perda por curvatura. É interessante ter em conta que a faixa dinâmica nessa medida é de aproximadamente 17 dB, o que está de acordo com o resultado obtido na sub seção 4.1, Eq. 23, mas, como explicado nessa mesma sub seção, a dinâmica total do HDR-PC-OTDR é de 32 dB.

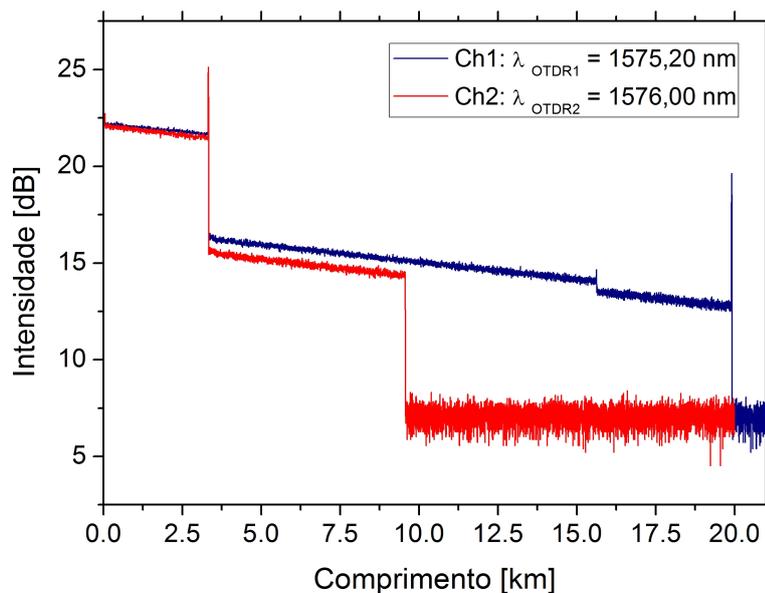


Figura 5.2 Traço do HDR-PC-OTDR para os canais #1 e #2 do AWG.

Quando foi incluído também o tráfego de dados *upstream*, na rede PON, observou-se um incremento no nível de ruído devido ao aumento das contagens de escuro. Esse incremento, de aproximadamente 2 dB, é basicamente pelo vazamento da banda S na banda de monitoramento; tendo em conta que foi necessário incluir um filtro na saída do laser de *upstream* suprimindo em 20 dB a ASE gerada na banda L.

Para testar uma condição ainda mais desfavorável, neste caso incrementando o nível de Rayleigh produzido pelo tráfego *downstream*, foi feita a medida com uma *feeder* de 10 km. O vazamento do nível de Rayleigh dentro da banda de monitoramento (L) introduziu uma penalidade de 1 dB no nível de ruído. Assim a faixa dinâmica total atingida nestas condições de monitoramento é de 29 dB.

Na medida do BER o fator mais importante é a razão de extinção do filtro no receptor independente do canal testado. Neste caso foi usado o canal 16 do AWG com  $\lambda_{16} = 1546.4$  nm e ao mesmo tempo foram gerados pulsos de OTDR no canal respectivo na banda L,  $\lambda_{16,L} = 1587.4$  nm. O sinal de dados é uma sequência binária, NRZ, pseudo-aleatória de  $2^{23}-1$  a 2.5 Gb/s. A comparação entre o resultado do BER com e sem monitoramento é apresentado na Figura 5.3. A figura mostra claramente que a razão de extinção entre as bandas C e L atingida pelo filtro no receptor foi suficiente para não introduzir penalidade.

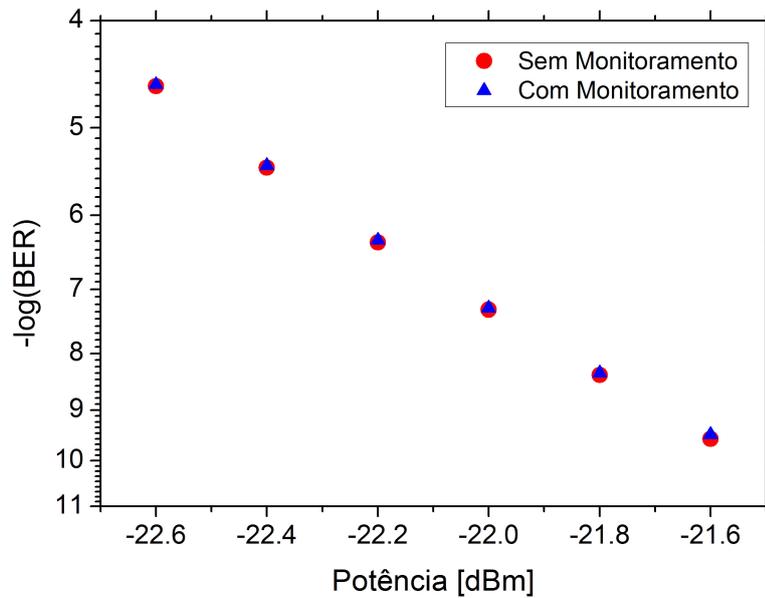


Figura 5.3 Comparação entre a transmissão de dados na banda C com e sem monitoramento na banda L.

As medidas do BER para o tráfego upstream não foram feitas pelo fato de que o WDM usado não consegue separar as bandas S e L. Não obstante os pulsos de monitoramento do OTDR não influenciariam o tráfego *upstream* já que eles viajam em direções diferentes ao longo da fibra. Os resultados obtidos neste experimento podem ser encontrados publicados na referência [54].

## 5.2. Reflexão por curvatura

Um dos maiores aportes deste trabalho é, sem dúvida, o fenômeno que é chamado nesta tese de: *reflexão por curvatura*. Embora as perdas por curvatura nas fibras ópticas tenham sido estudadas amplamente desde as primeiras abordagens nas comunicações ópticas, uma característica ainda não explorada pelos modelos teóricos é o "*pico de reflexão*" associado a essa curvatura. Como este fenômeno ainda não fora observado sua fundamentação teórica ainda está em investigação.

A baixa resolução dos OTDRs convencionais (na ordem de  $\sim 1.0$  m) gera um nível de retroespalhamento Rayleigh que mascara os picos de reflexão por curvatura, que ficam submersos dentro do patamar de recepção. A altíssima resolução possibilitada pelo UHR-PC-OTDR apresentado neste trabalho permite que esse fenômeno possa ser explorado e um modelo teórico, desenvolvido.

### 5.2.1. Mapeamento da reflexão por curvatura

A Figura 5.4, apresenta o traço de OTDR de uma fibra monomodo standard encapada (Jacketed SMF) que experimenta uma curvatura produzida por um poste cilíndrico de 4.7 mm de raio com uma distância angular de  $180^\circ$  (ou comprimento do trecho curvado de 4.7 mm). A curvatura gera um pico de 7.33 dB acima do nível de Rayleigh e uma perda de 7.76 dB.

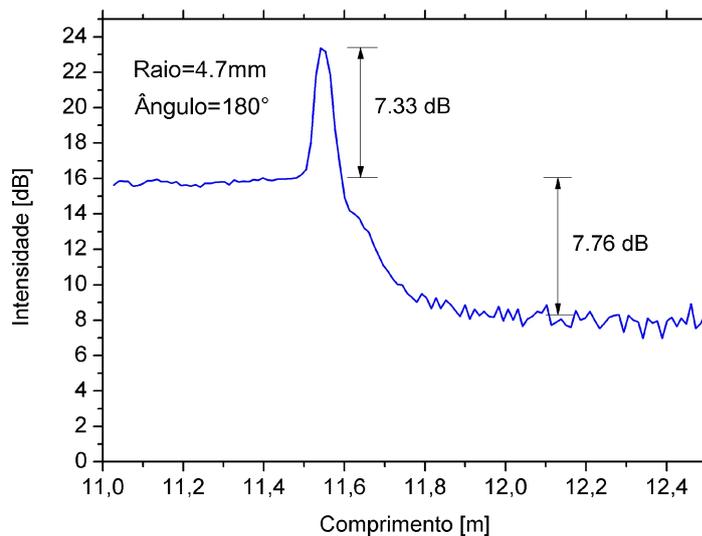


Figura 5.4 Exemplo de uma reflexão por curvatura.

A montagem experimental é apresentada na Figura 5.5. O poste que produz a curvatura é fixado a uma plataforma horizontal juntamente com um braço de suporte que garante que a fibra permaneça no plano horizontal perpendicular ao poste. Esse braço contém um cilindro com um diâmetro tal de forma que não haja perdas associadas, ou seja, com um raio consideravelmente maior que o raio crítico da fibra.

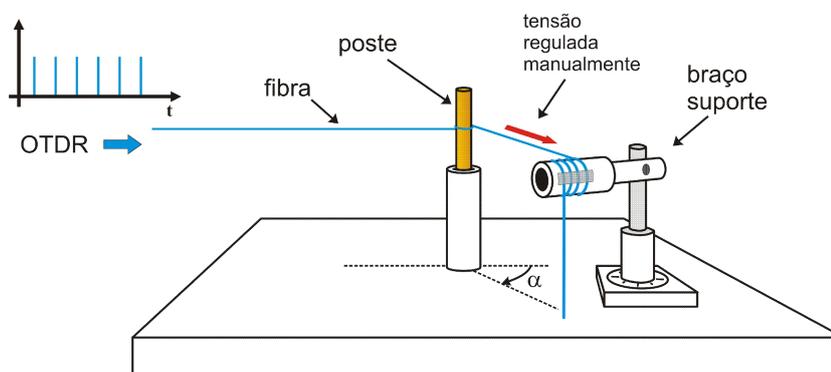


Figura 5.5 Montagem experimental para medição da reflexão por curvatura.

A tensão a que a fibra é submetida é regulada manualmente onde se procura evitar estresse ou esforços espúrios que alterem o efeito da curvatura. O comprimento da curvatura pode ser obtido pelo número de voltas da fibra no poste e pelo ângulo entre a direção de entrada da fibra no poste e a direção de saída da fibra do poste. Esse ângulo pode ser determinado através das projeções verticais que a fibra produz na plataforma. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 5.6.

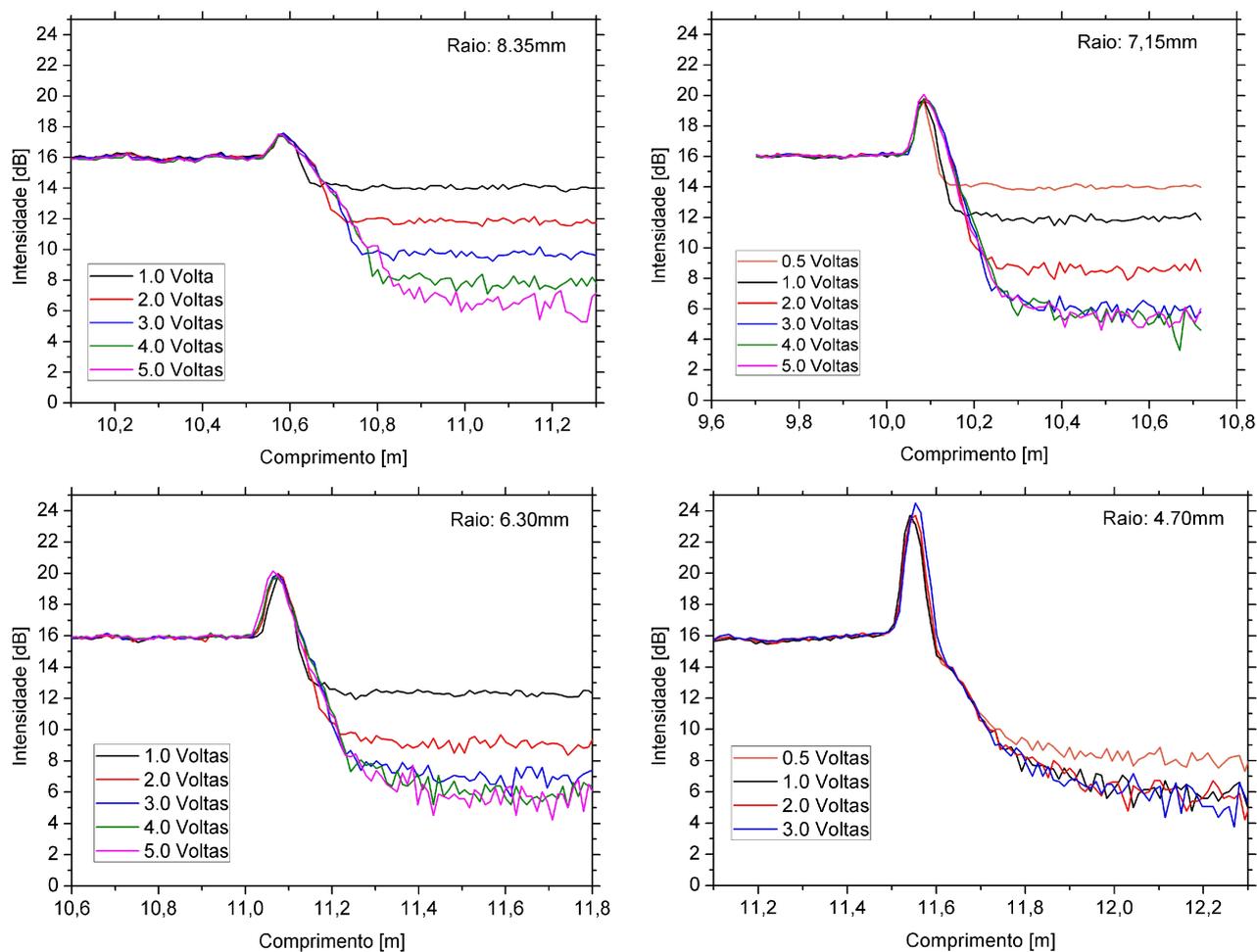


Figura 5.6 OTDR para diferentes raios de curvatura e distâncias angulares.

O efeito de alargamento do pico de reflexão com o número de voltas, apesar de sutil devido às curtas distâncias em questão, pode ser observado nas figuras acima e ocorre já que o comprimento de fibra curvada aumenta com o número de voltas. De forma geral, estes resultados não podem ser observados com OTDRs convencionas e somente um degrau associado à perda por curvatura seria observado.

É possível notar, ainda nos traços da Figura 5.6, que o fundo de ruído é atingido em algumas medidas (em especial no caso do raio de 4.7 mm com mais de uma volta em torno do poste). A saturação do nível de atenuação indica que a máxima dinâmica do UHR-PC-OTDR foi alcançada e seu valor gira em torno de 10.5 dB.

O resumo das medidas da Figura 5.6 é apresentado na Figura 5.7a e Figura 5.7b. Para traçar a reta correspondente à atenuação sem que a limitação da dinâmica distorça a curva, os resultados foram normalizados em relação às contagens de escuro. Dessa forma, uma dependência linear das perdas (em escala logarítmica) com o número de voltas é estabelecida, o que entra em acordo com os modelos já estabelecidos para perdas por curvatura [55], [56], [57].

Outra característica observada e, possivelmente, a mais importante, é o aumento da altura do pico em relação ao nível de Rayleigh antes da curvatura quando o raio de curvatura diminui (Figura 5.7b). Uma vez que não existem modelos teóricos que prevejam esse efeito, não é possível conferir sua consistência experimental. Neste trabalho, contudo, uma base teórica que seja capaz de prever esse comportamento é apresentada e será discutida mais a frente. Os resultados da Figura 5.6 podem ser encontrados publicados na referência [58].

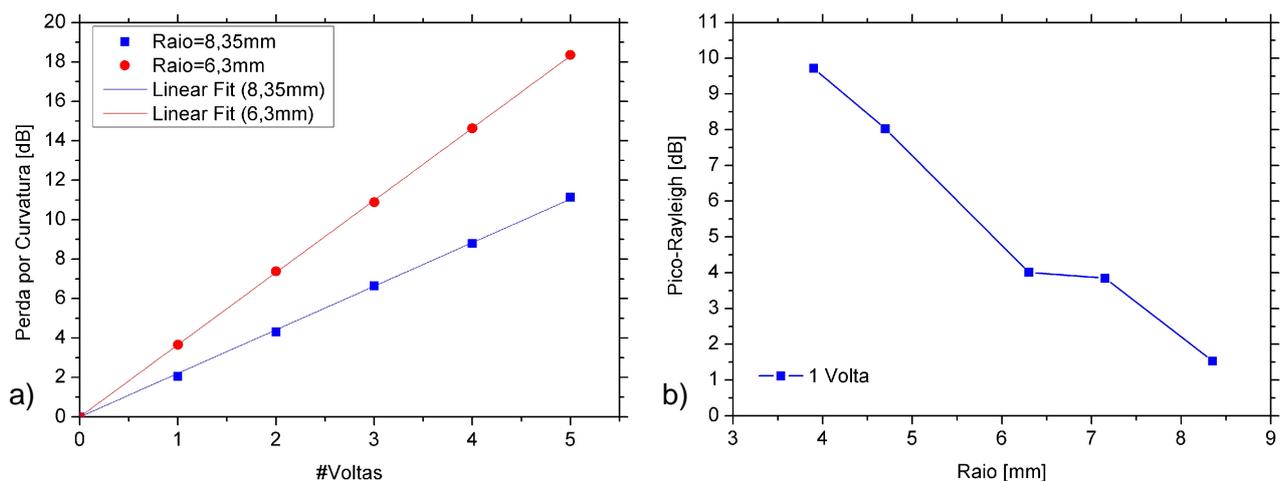


Figura 5.7(a) Variação da perda em função do número de voltas para dois raios de curvatura. (b) Diferença entre o nível do pico e o nível de Rayleigh em função do raio de curvatura.

Os resultados apresentados nesta seção foram obtidos com o montagem da Figura 5.5. Mesmo com resultados bastante promissores, essa montagem apresenta algumas deficiências que podem ser contornadas tanto para que as medidas sejam padronizadas quanto para que se tornem mais robustas e imunes a fatores externos. Essa é uma preocupação importante, uma vez que o fenômeno ainda não fora observado e efeitos externos podem mascarar suas características.

- A tensão aplicada na fibra pode não ser igual de um experimento para outro, já que o controle é feito manualmente. O fato de mudar um poste de um diâmetro para outro pode mudar drasticamente as condições do experimento, pois a fibra tem que ser desenrolada e enrolada novamente.
- Para um experimento com o mesmo diâmetro, a tensão da fibra não é a mesma antes e depois da curvatura. O atrito entre o poste e a fibra provoca um isolamento mecânico de modo que a tensão que a fibra experimenta depois da curvatura não é transmitida ao trecho da fibra antes do poste.
- O controle da distância angular, ou comprimento da curvatura, não é adequado. O cálculo da projeção que a fibra faz com a plataforma para obter o ângulo  $\theta$ , além de ser pouco preciso (feito a olho nu usando um transferidor), também é demorado.
- Outro detalhe a se considerar é o uso de fibra encapada (jacketed - 900  $\mu\text{m}$ ). Uma vez que o objetivo da capa é oferecer uma proteção química e mecânica à fibra, ela pode alterar os resultados. Para raios de curvaturas menores, a compressão (lado que faz contato com o poste) e a tensão (lado que não faz contato com o poste) da fibra geram micro deformações que influenciam diretamente as medições.

Uma nova estrutura experimental foi desenvolvida levando em consideração os pontos elencados acima e seu esquemático é apresentado na Figura 5.8. O objetivo principal agora é conseguir a mudança do ângulo  $\theta$  sem alterar nenhuma outra condição garantindo a robustez do experimento.

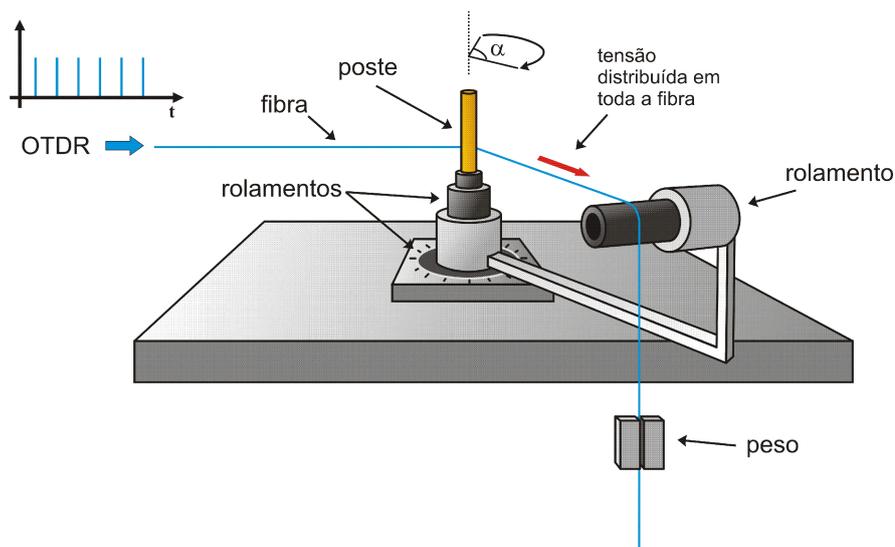


Figura 5.8 Esquemático da estrutura experimental aperfeiçoada para medição de reflexões por curvatura usando o UHR-PC-OTDR.

Uma base com marcações angulares e três rolamentos foram adicionados na nova montagem, dois conectados à base e um ao braço. Os rolamentos na base garantem a rotação do braço deixando o poste fixo. A tensão na fibra é aplicada através de um peso pendurado nela e é distribuída pelo sistema de rolamentos tornando-se, idealmente, homogênea ao longo da fibra inteira. O ângulo pode, agora, ser gerido usando as marcas da base. Finalmente, uma fibra standard com recobrimento primário (*Acrylate coating* - 250  $\mu\text{m}$ ) passou a ser utilizada para a realização de medidas.

Através de um controle mais fino do ângulo  $\alpha$ , a variação do pico e da perda em função da distância angular (em graus sexagesimais) puderam ser exploradas. Para um poste com raio de 4.8 mm, o resultado é apresentado na Figura 5.9.

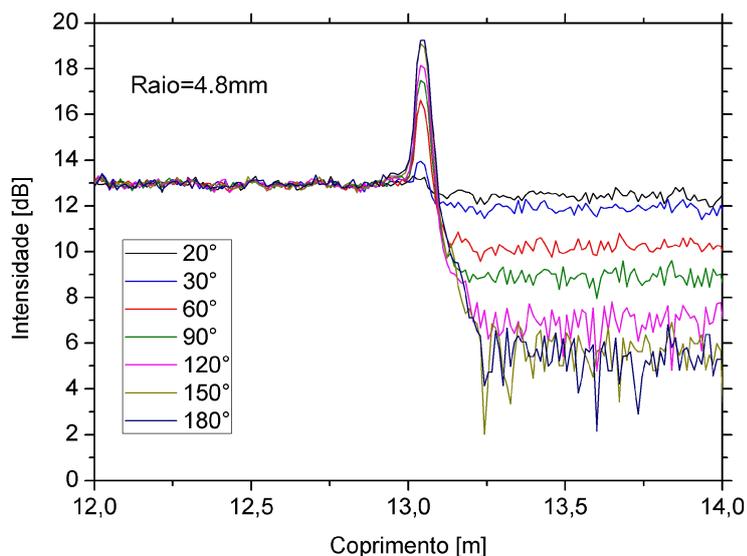


Figura 5.9 Traço do UHR-PC-OTDR para um raio de curvatura de 4.8 mm e diferentes distâncias angulares.

É interessante observar o crescimento do pico com o aumento da distância angular. Se comparado ao resultado obtido na Figura 5.6, onde as distâncias angulares foram muito maiores embora o pico não tenha apresentado nenhuma variação, pode-se concluir que o pico de reflexão experimenta um crescimento até chegar a um ponto de saturação. Determinar o padrão do crescimento do pico é essencial para entender sua origem e, para isso, uma sequência de 5 medidas para 7 ângulos diferentes (entre 20° e 180°) foi realizada. O resultado, após calculada a média das medidas, é apresentado na Figura 5.10.

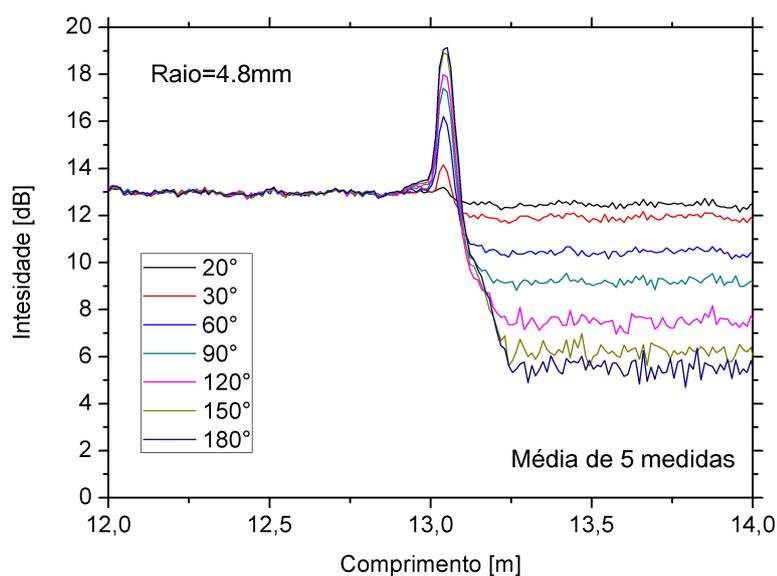


Figura 5.10 Traço do UHR-PC-OTDR para um raio de curvatura de 4.8 mm e diferentes distâncias angulares (média de 5 medidas).

Os comportamentos tanto da perda por curvatura quanto do pico associado a ela são apresentados na Figura 5.11 a e b. Pode-se observar claramente que as perdas crescem linearmente com a distância angular, o que era esperado. Por outro lado o crescimento do pico tende à saturação perto dos 180°.

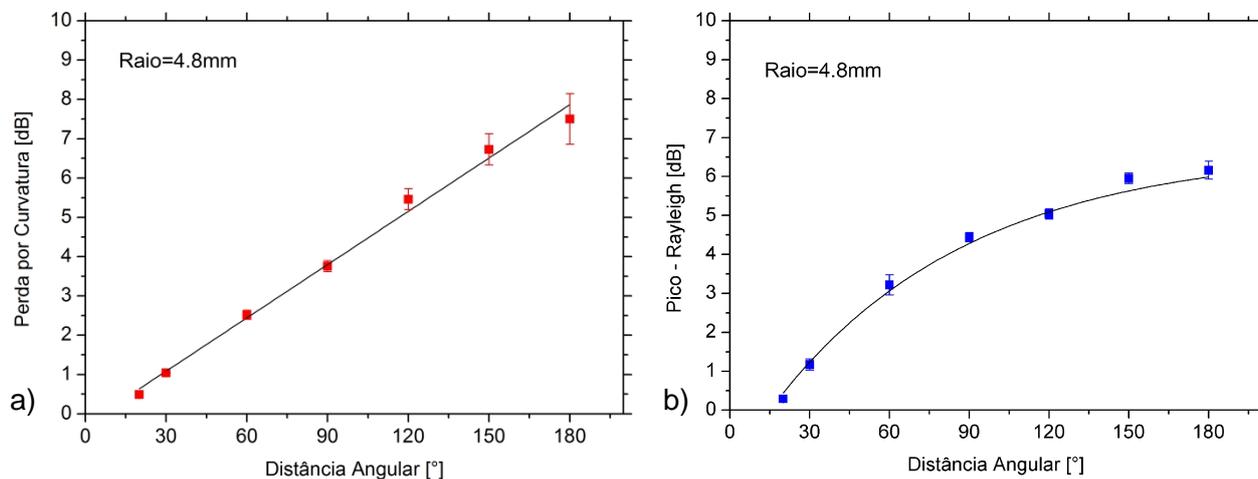


Figura 5.11 (a) Variação da perda e (b) Diferença entre o nível do pico e o nível de Rayleigh em função da distância angular para um raio de curvatura de 4.8 mm.

Da mesma forma, as médias de 5 medidas para várias distâncias angulares e para raios de 4.2, 6.3 e 7.3 mm foram realizadas. O traço de UHR-PC-OTDR somente para o raio de 7.3 mm, por simplicidade, é apresentado na Figura 5.12. O comportamento dos picos e das perdas para todas as medições é apresentado na Figura 5.13.

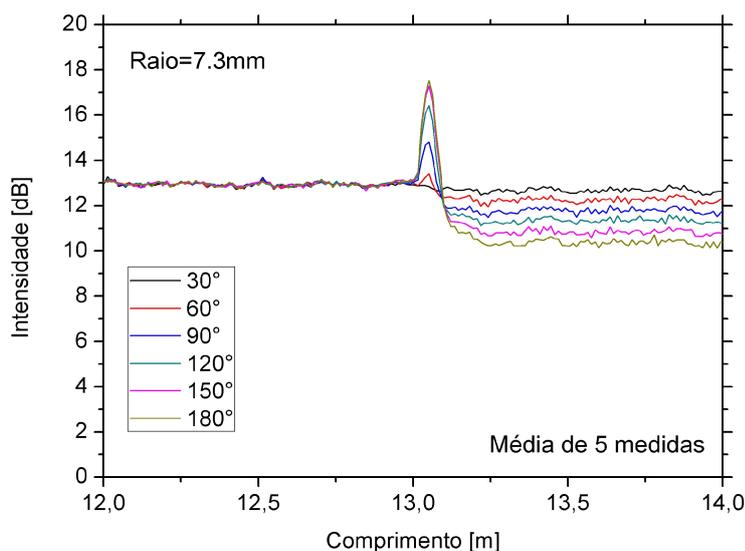


Figura 5.12 Traço do UHR-PC-OTDR para um raio de curvatura de 7.3 mm e diferentes distâncias angulares (média de 5 medidas).

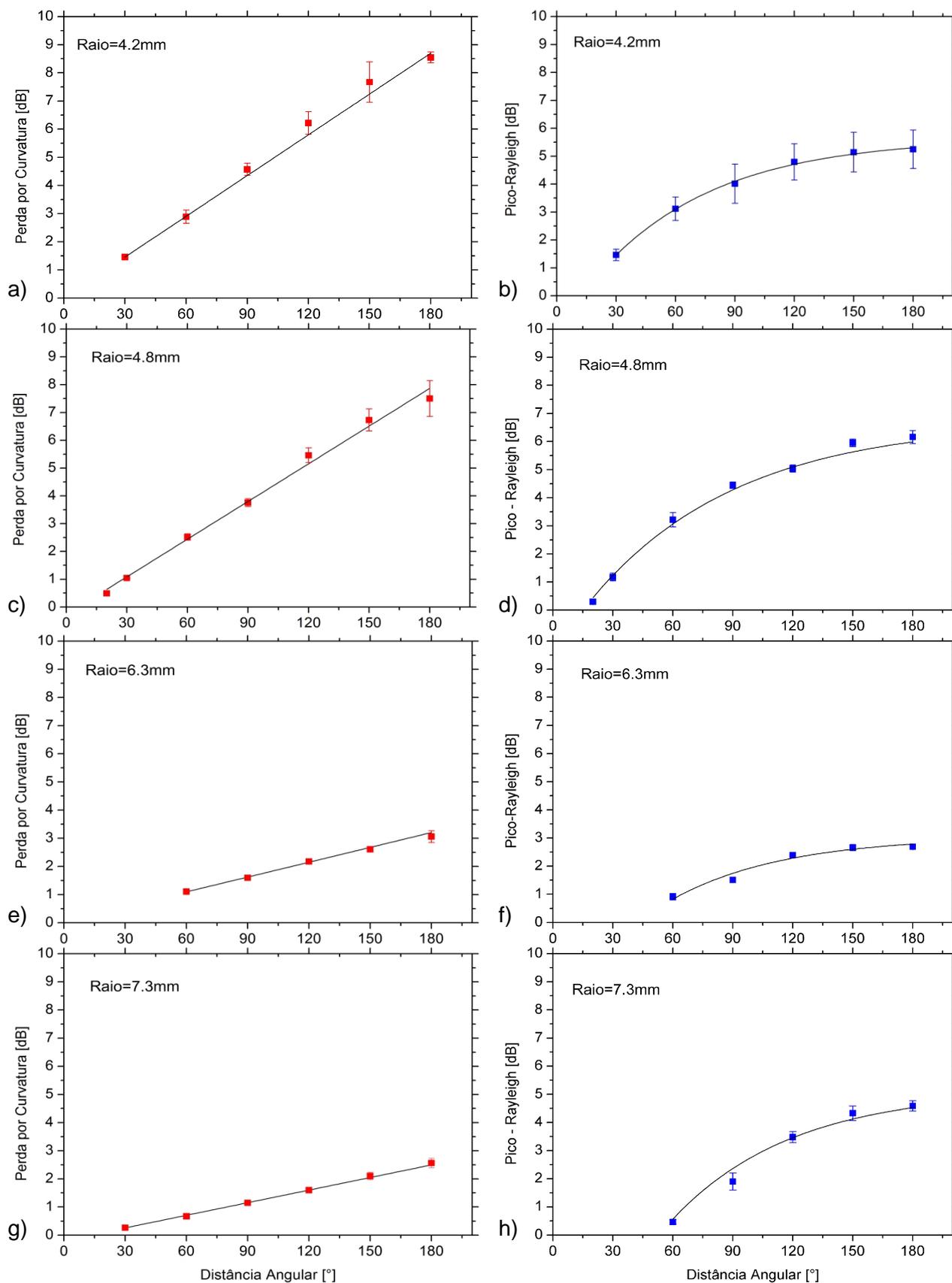


Figura 5.13 Variação da perda e do pico em função da distância angular para vários raios de curvatura.

Através dos resultados apresentados até aqui, é possível elencar alguns pontos conclusivos:

- As perdas por curvatura, como esperado, tem um comportamento linear em função da distância angular e crescem quando o raio de curvatura diminui.
- O uso de fibra encapada (*jacketed*) e de fibra com recobrimento primário gera uma forte variação das medições nos picos de reflexão como observado na Figura 5.7 e Figura 5.13.
- A altura do pico de reflexão tende a saturar ao redor de  $180^\circ$ . Assim nos resultados com a fibra encapada, a altura do pico não tem variação alguma já que as distâncias angulares foram maiores a 0,5 voltas (ou  $180^\circ$ ).
- Embora a altura do pico, no caso da fibra encapada, cresça enquanto o raio de curvatura diminui, esse comportamento não é muito claro no caso da fibra com recobrimento primário (Figura 5.13). Esta característica sugere que a altura do pico dependa também da localização da curvatura na fibra (posição axial). Esse raciocínio foi confirmado com a medição feita em outro ponto axial da fibra para o raio de 4.8 mm apresentado na Figura 5.14, onde os picos de reflexão obtidos foram menores, enquanto as perdas não sofrem muita variação.

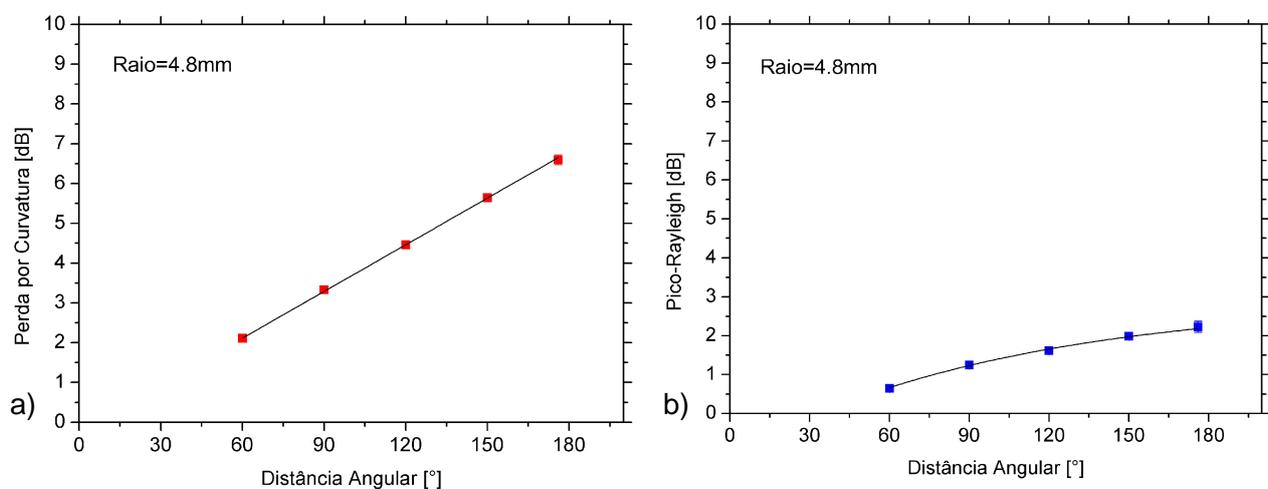


Figura 5.14 (a) Variação da perda e (b) do pico em função da distância angular para um raio de curvatura de 4.8 mm medido em outro ponto da fibra.

Levando em conta as conclusões acima e o resultado da Figura 5.14, a montagem experimental foi modificada mais uma vez. Agora, o objetivo é reforçar o entendimento acerca da modificação da assinatura da fibra quando a posição axial em contato com o poste varia. A nova montagem, apresentada na Figura 5.15, inclui um posicionador linear que permite o deslocamento controlado da fibra com uma precisão de 5 $\mu$ m.

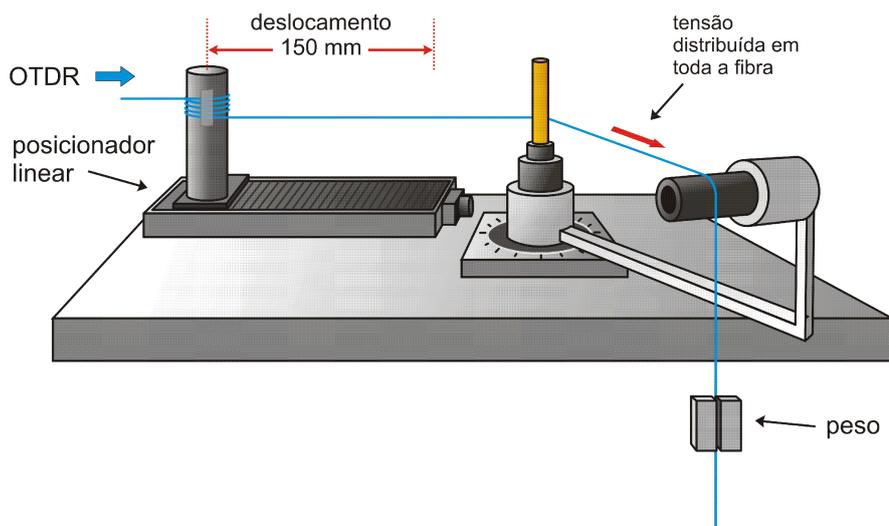


Figura 5.15 Montagem para medição de reflexões por curvatura incluindo um posicionador linear.

Com a ajuda do posicionador linear foram feitas as medições deslocando o ponto da curvatura em intervalos de 10 mm, num total de 9 diferentes posições. Em um primeiro experimento, utilizou-se um raio de curvatura de 4.8 mm com uma distância angular de 180°. Uma vez atingido o último ponto de medição, o posicionador retorna ao ponto inicial, e inicia uma nova sequência de medições para um total de 3 sequências (Medida A, B e C), como mostrado na Figura 5.16.

Os resultados das novas medidas indicam que o comportamento da perda é bastante estável com respeito ao ponto axial da fibra como exibido na Figura 5.16a, As reflexões, no entanto, experimentam variações muito grandes - Figura 5.16b. Outros dois experimentos, para raios de 6.3 mm e 7.3 mm ratificam esses comportamentos e são mostrados na Figura 5.17.

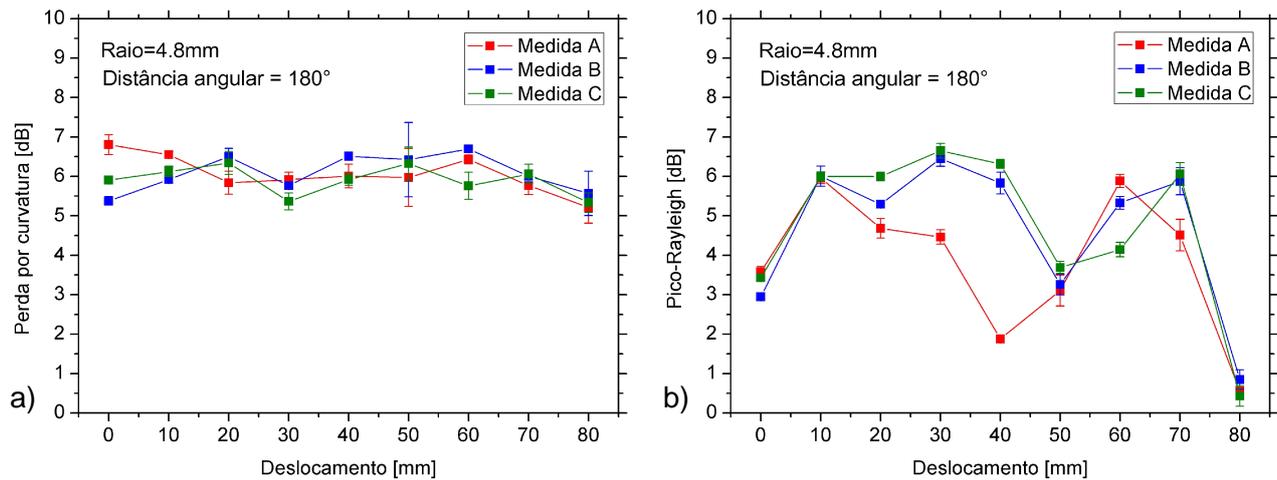


Figura 5.16 Três seqüências de medições de (a) Variação da perda e (b) do pico, em função da localização da curvatura na fibra, para um raio de 4.8 mm e distância angular de 180°.

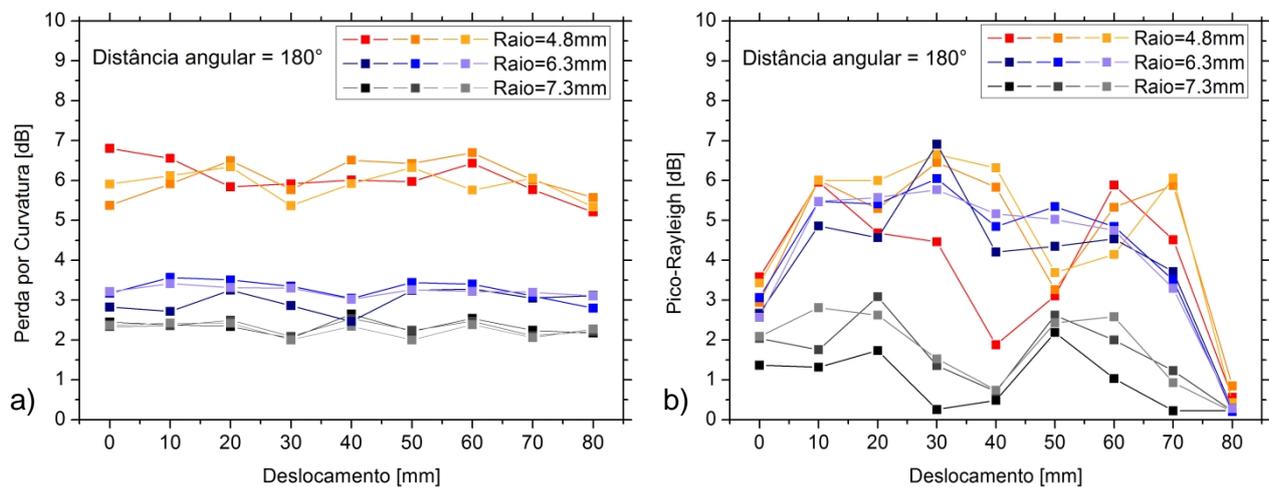


Figura 5.17 Três seqüências de medições de (a) Variação da perda e (b) do pico, em função da localização da curvatura na fibra, para três raios diferentes com uma distância angular de 180°.

## 5.2.2. Proposta de modelo para a reflexão por curvatura.

Após os resultados destes experimentos, surge a questão: qual é o fenômeno físico que produz essas reflexões nas curvaturas?

Uma possível abordagem é o descasamento de impedâncias. O perfil dos índices de refração de uma fibra reta muda quando ela é curvada [57]. Assim, existe um ponto no qual a fibra passa de um padrão reto para outro curvado, ou seja, duas fibras com padrões diferentes são unidas no ponto da curvatura. Nesse

sentido as reflexões produzidas poderiam ser descritas pelas equações de Fresnel [59]. Seria esperado, portanto, que a união de uma fibra standard e uma com dispersão deslocada (*DS Fiber*) geraria uma reflexão, mas isso não acontece nem na interface standard-DS nem DS-standard onde é observado somente o já conhecido acréscimo (ou decréscimo) no nível de Rayleigh, Figura 5.18.

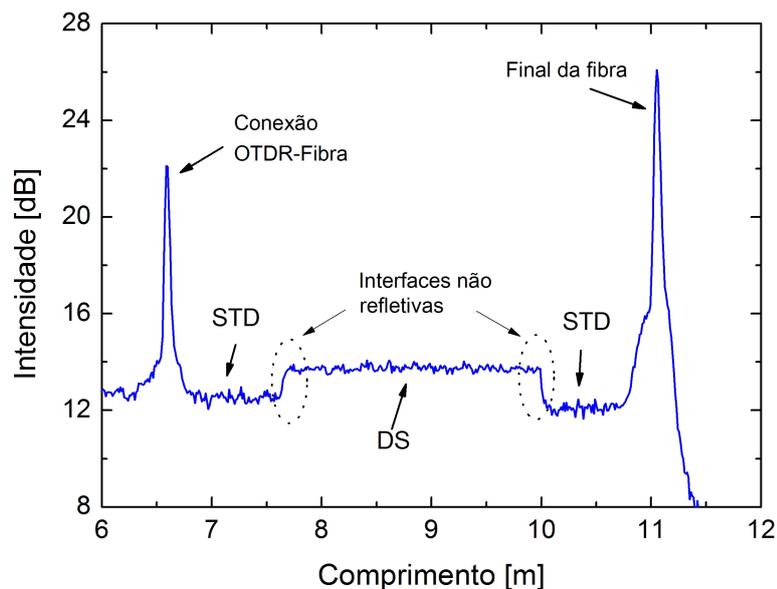


Figura 5.18 UHR-PC-OTDR para a união de uma fibra DS e uma standard.

A proposta desta tese é um modelo baseado na modificação do valor do coeficiente de captura de retroespalhamento e na não homogeneidade da fibra.

O mecanismo de espalhamento nas fibras pode se dividir em dois tipos: Rayleigh e não-Rayleigh. Como já é conhecido, o espalhamento Rayleigh se dá pelas pequenas variações dos índices de refração e nas flutuações dos dopantes, o qual ocorre em uma escala pequena comparada ao comprimento de onda da luz.

O coeficiente  $S$ , que indica a porcentagem de luz que é capturada pelo núcleo da fibra após ter sido espalhada, é dado por [60] [61]:

$$S = \frac{1.5}{\left(\frac{w_0}{a}\right)^2 V^2} \frac{n_1^2 - n_2^2}{n_1^2} \cong \left[\frac{NA}{n_1}\right]^2 \frac{1}{m} \quad \text{Eq. 30}$$

onde  $a$  é o raio de núcleo,  $w_0$  é o diâmetro do campo modal,  $V$  é a frequência normalizada,  $n_1$  e  $n_2$  são os índices de refração do núcleo e da casca,  $NA$  é a abertura numérica e  $m$  depende do perfil de índices de refração, tendo um valor típico de 4.55 [61].

Por outro lado, o espalhamento não-Rayleigh inclui fenômenos como micro-curvaturas, espalhamento de Mie, espalhamento devido à interface núcleo-revestimento, radiação por curvatura e espalhamento ou reflexões devido às imperfeições no guia de onda. Contudo, pelo fato destes mecanismos de espalhamento serem gerados na direção de propagação da luz, a sua contribuição ao valor do parâmetro  $S$  é pequena [62].

A análise teórica das perdas por curvatura da referência [63] mostra que a potência dos modos de radiação têm um comportamento oscilatório em função do comprimento de fibra curvada, indicando que parte da luz perdida para os modos de radiação é acoplada novamente ao modo fundamental  $HE_{11}$ . Todavia, a oscilação diminui e atinge um nível estável quando o comprimento da fibra curvada cresce.

A tese se baseia na idéia de que o coeficiente  $S$  aumenta significativamente quando a fibra é curvada gerando um nível de retroespalhamento maior e que, aparentemente, é observado como uma reflexão.

O aumento de  $S$  poderia se atribuir ao aumento da abertura numérica ( $NA$ ) já que o perfil de índices de refração muda com a curvatura [57]. Segundo a referência [60], para uma fibra monomodo com perfil de índice degrau, o parâmetro  $S$ , é aproximadamente constante para  $1.5 \leq V \leq 2.4$ :

$$0.210 \frac{n_1^2 - n_2^2}{n_1^2} \leq S \leq 0.235 \frac{n_1^2 - n_2^2}{n_1^2} \quad \text{Eq. 31}$$

onde  $V$  é a frequência normalizada. Ainda nessa mesma referência, comenta-se que, para outros perfis de índices de refração (ex. índice gradual), a equação ainda seria válida com uma pequena porcentagem de erro. Assim, já que, para uma fibra

curvada, o perfil de índices de refração muda consideravelmente, o coeficiente  $S$  também mudaria de forma considerável.

Além do aumento no valor de  $S$ , modos "leaky" podem ser excitados nas interfaces núcleo-casca e casca-revestimento [64], embora com perdas maiores [2]. Esses modos podem gerar níveis de retroespalhamento adicionais aos do modo fundamental. Nesse caso, a luz perdida para os modos de radiação é acoplada novamente ao modo fundamental [63] em um processo que pode ser modelado como um aumento ainda maior do valor de  $S$ .

Para testar a premissa da variação do valor de  $S$ , foi desenvolvida uma rotina que seja capaz de simular o funcionamento de um OTDR. Em particular, a rotina envolve a inclusão das equações que governam a transmissão de um pulso óptico através da fibra e o cálculo da parcela de luz que é enviada de volta ao início da fibra. A descrição em diagrama de blocos desta rotina é a seguinte (vide Figura 5.19):

- Parâmetros ópticos da fibra:
  - $n_1, n_2$  : índices de refração do núcleo e da casca;
  - $a$  : raio do núcleo ( $\mu\text{m}$ ),
  - $\lambda$  : comprimento de onda (nm).
- Parâmetros de simulação:
  - $R_{curv}$ : Raio de curvatura (m)
  - $\theta_{curv}$ : Distância angular da curvatura ( $^\circ$ ).
  - $\theta_{tran}$ : Distância angular de transição ( $^\circ$ ). Ângulo menor que  $\theta_{curv}$ .
  - $Res$  : Resolução da simulação (m).
  - $jitter_{det}$  : Jitter temporal do detector (ps)
  - $P_0$ : Potência pico de entrada na fibra (dBm)
  - $\alpha_{fibra}$  : Coeficiente de atenuação da fibra (dB/m).
  - $\alpha_k$  : Coeficiente de atenuação por curvatura dos modos irradiantes (dB/m). Valor inserido para ajustar os resultados das medições.
  - $S_{modif}$ : Parâmetro  $S$  modificado: constante arbitrária, maior que o parâmetro  $S$  padrão, cujo valor é inserido para ajustar os resultados da simulação com os das medidas.

- Variáveis calculadas em função dos parâmetros iniciais:
  - $NA$ : Abertura numérica da fibra.
  - $\lambda_c$ : Comprimento de onda de corte (nm).
  - $S_{fibra}$ : Coeficiente de captura de retroespalhamento.
  - $w_0$ : Raio do campo modal ( $\mu\text{m}$ )
  - $\alpha$ : Coeficiente de atenuação por curvatura (dB/m).
- Bloco tracejado vermelho (fibra não curvada): A potência de pico na entrada ( $P_0$ ) experimenta uma atenuação de  $e^{-2\alpha R_{res}}$  produzida no intervalo de resolução  $R_{res}$ . O coeficiente de atenuação neste caso é  $\alpha = \alpha_{fibra}$  e o coeficiente de captura,  $S = S_{fibra}$ .
- Bloco tracejado verde (fibra curvada): A transição de um trecho de fibra reto a um curvado não é abrupto e ocorre de forma contínua devido a sua rigidez. Assim, existe uma zona de transição onde o raio de curvatura vai de raio  $\infty$  até um valor constante raio  $= R_{curv}$ . Da mesma forma, a transição do trecho curvado ao reto,  $R_{curv}$  a  $\infty$ , também possui uma zona de transição. Essas zonas são descritas pela seguinte equação [56] [63]:

$$\begin{aligned}
 R(z) &= 2R_{curv} [1 - \cos bz]^{-1} && \text{para } 0 \leq z \leq f/b \\
 &= R_{curv} && \text{para } f/b \leq z \leq L_c - f/b \\
 &= 2R_{curv} [1 - \cos(b(L_c - z))]^{-1} && \text{para } L_c - f/b \leq z \leq L_c
 \end{aligned}
 \tag{Eq. 32}$$

onde  $L_c$  é o comprimento de fibra curvada, e  $b$  uma constante arbitrária. O valor de  $b$  determina a velocidade de transição. Se  $b$  for pequeno, a transição é gradual, se  $b$  for grande, a transição se torna abrupta. Assim, a atenuação do pulso óptico dentro do intervalo de curvatura varia entre  $\alpha_{fibra}$  e  $\alpha_{curv}$ , e, novamente para  $\alpha_{fibra}$ . O valor de  $\alpha_{curv}$  depende do raio  $R(z)$ , e é calculado com a seguinte equação [57]:

$$\alpha_{curv} = A_c R^{-1/2} e^{-UR}
 \tag{Eq. 33}$$

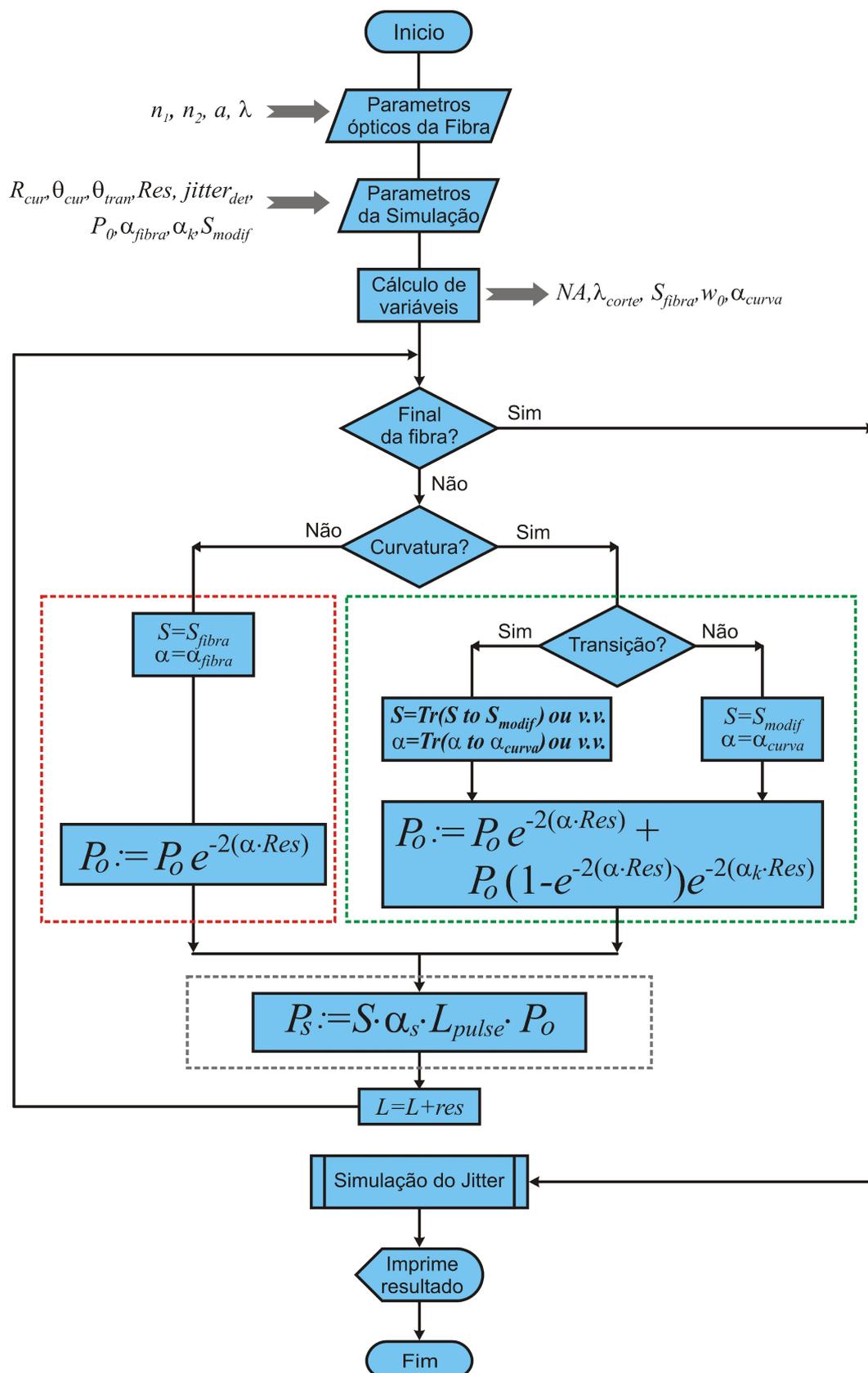


Figura 5.19 Diagrama de blocos da simulação da transmissão de um pulso do UHR-PC-OTDR por uma zona de curvatura na fibra e cálculo da parcela de potência que chega ao detector.

onde:

$$A_c = 30(n_1 - n_2)^{1/4} \left\{ \frac{\} }{\} \right\}^{-1/2} \left( \frac{\} }{\} \right)^{3/2} \quad \text{Eq. 34}$$

$$U = 0.705 \frac{(n_1 - n_2)^{3/2}}{\} } \left( 2.748 - 0.966 \frac{\} }{\} } \right)^3 \quad \text{Eq. 35}$$

Da mesma forma, o coeficiente de captura  $S$  também experimenta as zonas de transição  $S$ ,  $S_{modif}$  e  $S_{modif}$   $S$  que seguem o padrão da Eq. 32.

Assim, com esses novos valores de  $\}$  e  $S$ , a potência de entrada ( $P_o$ ) experimenta uma atenuação:

$$P_o := P_o e^{-2(r_{Res})} + \left[ P_o \left( 1 - e^{-2(r_{Res})} \right) \right] e^{-2(r_k Res)} \quad \text{Eq. 36}$$

onde a primeira parcela é o valor da potência depois de ser atenuada pela curvatura. O valor entre colchetes representa a potência que o modo fundamental perde para os modos irradiantes. Essa parcela experimenta uma atenuação,  $e^{-2(r_k Res)}$ , antes de se acoplar novamente ao modo fundamental.

- Bloco tracejado cinza: calcula a potência enviada no sentido do detector em função do comprimento da fibra e do valor  $P_o$  obtido anteriormente com a equação [61]:

$$P_s(L) = S \cdot r_s \cdot L_{pulse} \cdot P_o \quad \text{Eq. 37}$$

Para o parâmetro  $L_{pulse}$  (largura do pulso) assume-se o valor da resolução de simulação,  $Res$ .

- Bloco : Simulação do Jitter: simula o jitter produzido pelo detector de fótons únicos [49]. Este bloco implementa uma média móvel ponderada por uma gaussiana, cujo desvio padrão é  $\dagger = OTDR_{res} / (2\sqrt{\ln 4})$ , sendo  $OTDR_{res} = 2.8$  cm, a resolução do UHR-PC-OTDR.

Os resultados das simulações são apresentados a seguir.

A Figura 5.20, apresenta a simulação de um OTDR numa fibra com raio de curvatura de 4.8 mm e distância angular de  $90^\circ$ . A resolução da simulação é de  $Res=0.0001m$ , o que corresponderia a um TDC com resolução de 1ps aproximadamente, e um detector SPAD com jitter igual ou menor a esse valor. Nesse caso, o resultado seria como o traço azul (*Full\_Res\_OTDR*) apresentado no gráfico. O traço vermelho, UHR-PC-OTDR, corresponde à introdução do jitter real do detector (aproximadamente 280 ps). Uma ampliação detalhada (gráfico inserido) do formato do pulso mostra a zona de transição na subida e na descida da "reflexão".

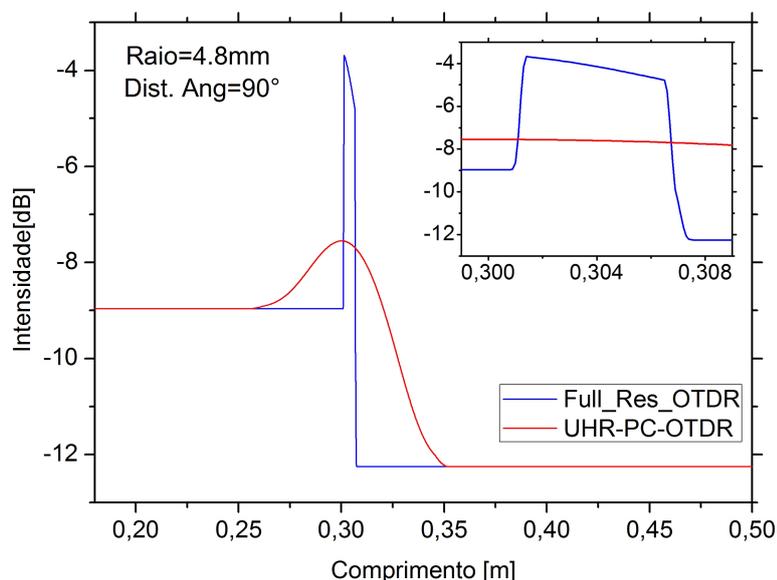


Figura 5.20 Simulação de uma fibra curvada vista por um OTDR. O gráfico inserido apresenta, em detalhe, as zonas de transição. Parâmetros:  $a=4.2 \mu m$ ,  $n_1=1.4682$ ,  $n_2=1.4628$ ,  $\lambda=1545 \text{ nm}$ ,  $S=0.0016$ ,  $S_{modif}=0.0183$ ,  $\theta_{tran}=10^\circ$ ,  $k=995 \text{ dB/m}$ .

Os valores dos parâmetros,  $S_{modif}$ ,  $\theta_{tran}$  e  $k$  na Figura 5.20, foram selecionados para que se o resultado simulado se ajustasse ao resultado da medição da Figura 5.14. Usando esses mesmos parâmetros, foi realizada a simulação de diferentes distâncias angulares. O resultado é apresentado na Figura 5.21.

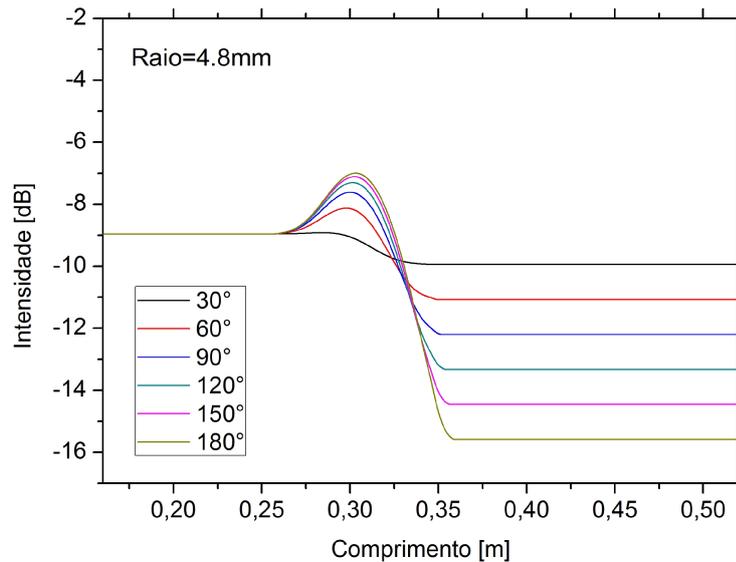


Figura 5.21 Simulação obtida com os mesmos parâmetros da Figura 5.20, para diferentes distâncias angulares.

A comparação entre os dados simulados e os dados medidos da Figura 5.14, Raio=4.8 mm, é apresentada na Figura 5.22. No caso das perdas, o resultado é altamente consistente confirmando o modelo clássico já estabelecido [63], [57], [55]. Para o caso do pico de reflexão, os resultados mostram uma alta concordância reforçando a validade do modelo.

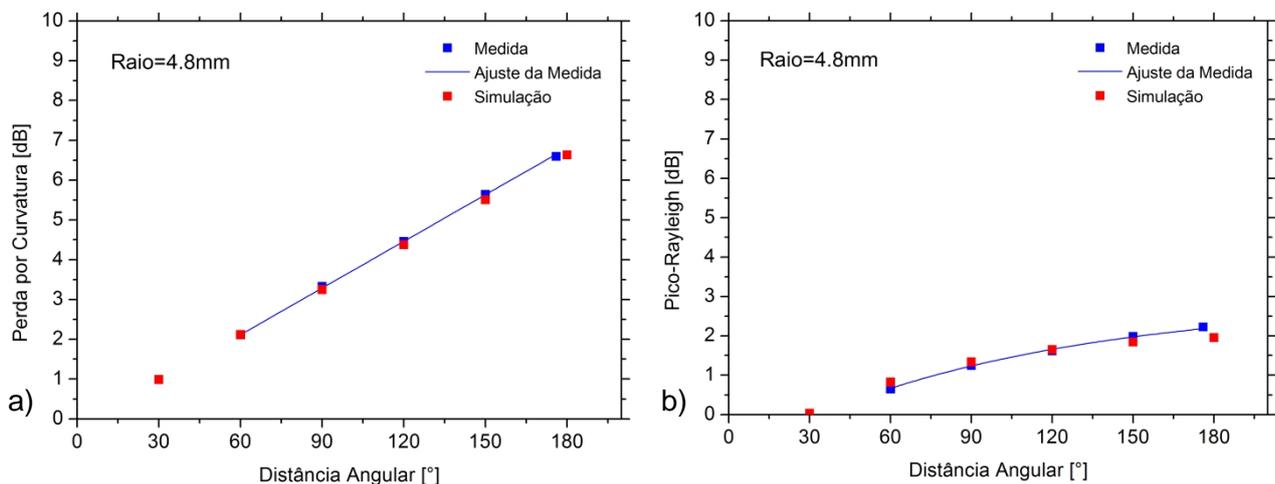


Figura 5.22 Comparação entre a simulação e as medidas da Figura 5.14. Parâmetros:  $a=4.2 \mu\text{m}$ ,  $n_1=1.4682$ ,  $n_2=1.4628$ ,  $\lambda=1545 \text{ nm}$ ,  $S=0.0016$ ,  $S_{\text{modif}}=0.0183$ ,  $\theta_{\text{tran}}=10^\circ$ ,  $k=995 \text{ dB/m}$ .

Agora fazemos a comparação com o caso onde o raio de curvatura de 4.8 mm, Figura 5.13d, produziu um pico maior se compararmos com o resultado da

Figura 5.14. Assim para gerar um pico maior os parâmetros tomam os seguintes valores:  $S_{modif}=0.0991$ ,  $\theta_{tran}=10^\circ$ ,  $k=670$  dB/m e o resultado é apresentado na Figura 5.23.

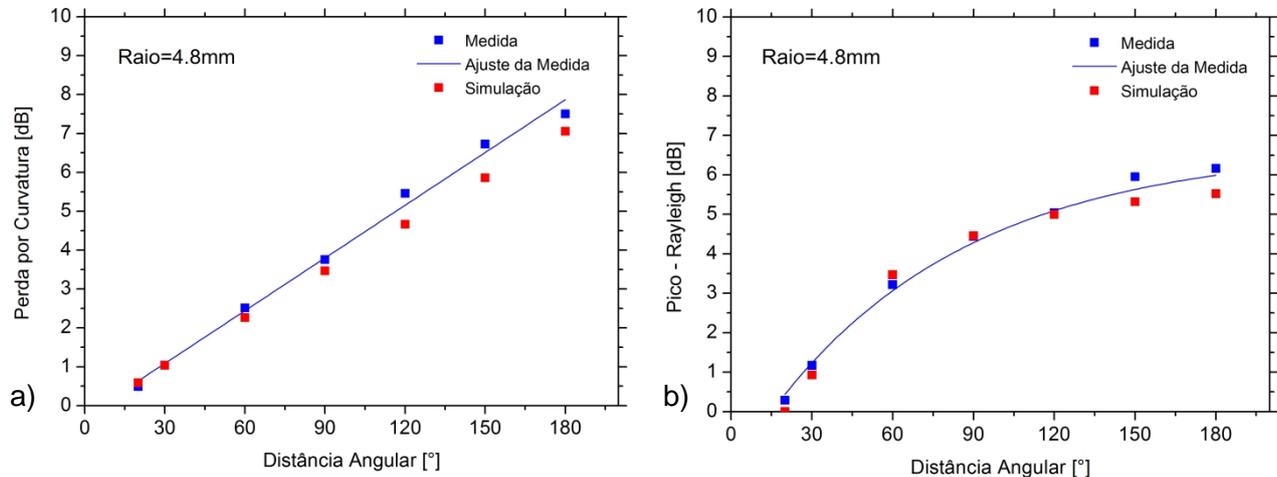


Figura 5.23 Comparação entre a simulação e as medidas da Figura 5.13c e Figura 5.13d. Parâmetros:  $a=4.16$   $\mu\text{m}$ ,  $n_1=1.4682$ ,  $n_2=1.4628$ ,  $\lambda=1545$  nm,  $S=0.0016$ ,  $S_{modif}=0.0991$ ,  $\theta_{tran}=10^\circ$ ,  $k=670$  dB/m.

A mesma comparação é feita para os outros casos observados na Figura 5.13, e são mostrados nas Figura 5.24, Figura 5.25 e Figura 5.26.

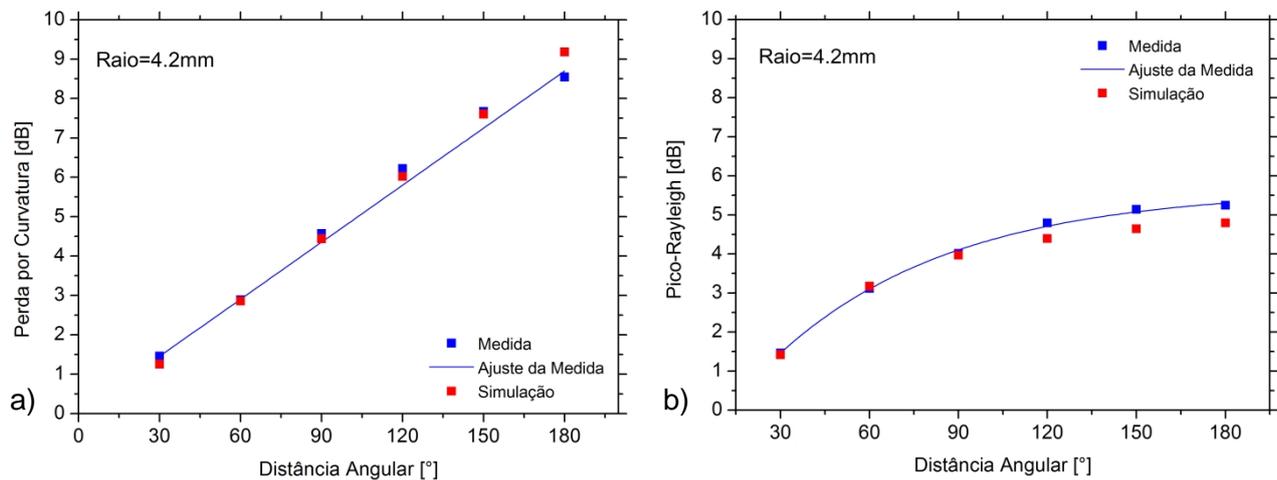


Figura 5.24 Comparação entre a simulação e as medidas da Figura 5.13a e Figura 5.13b. Parâmetros:  $a=4.26$   $\mu\text{m}$ ,  $n_1=1.4682$ ,  $n_2=1.4628$ ,  $\lambda=1545$  nm,  $S=0.0016$ ,  $S_{modif}=0.0850$ ,  $\theta_{tran}=8^\circ$ ,  $k=863$  dB/m.

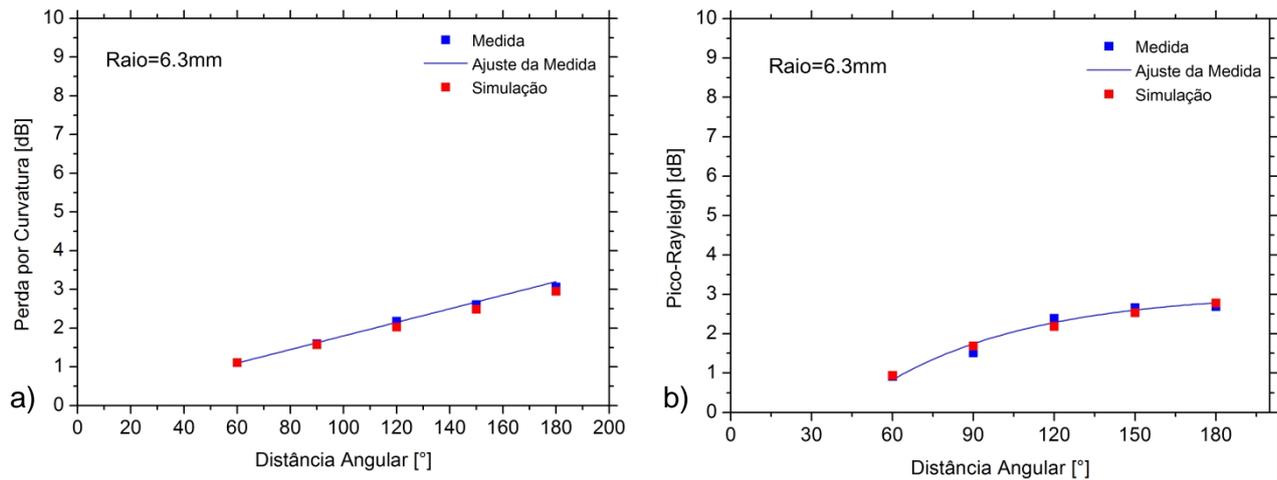


Figura 5.25 Comparação entre a simulação e as medidas da Figura 5.13e e Figura 5.13f.  
 Parâmetros:  $a=4.13 \mu\text{m}$ ,  $n_1=1.4682$ ,  $n_2=1.4628$ ,  $\lambda=1545 \text{ nm}$ ,  $S=0.0016$ ,  $S_{\text{modif}}=0.0160$ ,  
 $\theta_{\text{tran}}=12^\circ$ ,  $k=391 \text{ dB/m}$ .

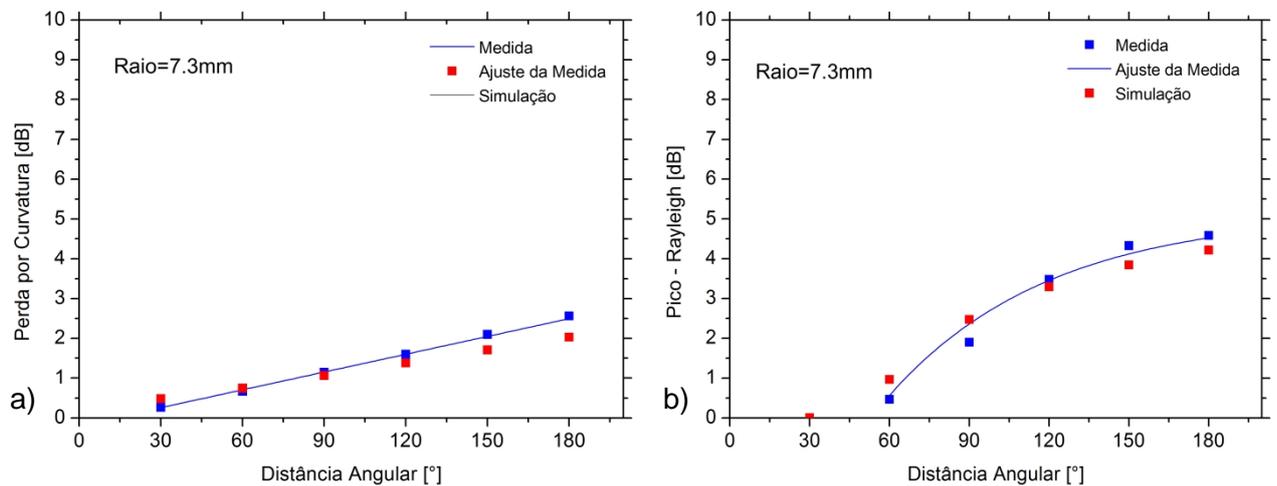


Figura 5.26 Comparação entre a simulação e as medidas da Figura 5.13g e Figura 5.13h.  
 Parâmetros:  $a=4.00 \mu\text{m}$ ,  $n_1=1.4682$ ,  $n_2=1.4628$ ,  $\lambda=1545 \text{ nm}$ ,  $S=0.0016$ ,  $S_{\text{modif}}=0.0290$ ,  
 $\theta_{\text{tran}}=19^\circ$ ,  $k=251 \text{ dB/m}$ .

### 5.2.3. Discussão dos resultados da reflexão por curvatura.

As variações do pico e das perdas em função do deslocamento, mostrado na Figura 5.16 e Figura 5.17, podem ser atribuídos à variação dos parâmetros ópticos da fibra ao longo dela. Parâmetros como diâmetro do campo modal, diferença de índices de refração e dispersão cromática são parâmetros locais da fibra, e existem técnicas para medir a sua variação. As referências [65] [66] apresentam técnicas baseadas em OTDR para a medição destes parâmetros onde a resolução depende do tamanho do pulso. Contudo, resta saber se essas variações percebidas na escala dos metros também aparecem na escala dos centímetros ou, ainda, dos milímetros.

Os valores do parâmetro de atenuação  $k$  dos modos irradiantes foram selecionados arbitrariamente para ajustar os resultados. Não obstante, esses valores estão na mesma ordem de grandeza de valores já reportados na referência [67]. A mesma referência faz uma pequena discussão sobre alguns modelos teóricos propostos, onde valores de  $k$  variam consideravelmente. A base teórica que explica as perdas por curvatura dos modos guiados, portanto, não se aplica aos modos "leaky". O valor da distância angular de transição  $r_{tran}$  também ficou de acordo com resultados já publicados na referência [56]. Para raios de curvatura maiores, a distância de transição é maior.

### 5.3. Supervisão de uma Rede TDM-PON de curto alcance

As medidas feitas neste trabalho foram de um TDM-PON 1x4. A Figura 5.27 apresenta o esquema geral da montagem.

Antes das medições da rede PON, é feita a caracterização do divisor passivo reconhecendo cada uma de suas saídas; a medição é apresentada na Figura 5.28. É possível observar o detalhe enquanto a perda (perda esperada de 3 dB) e também o conector em cada canal de saída.

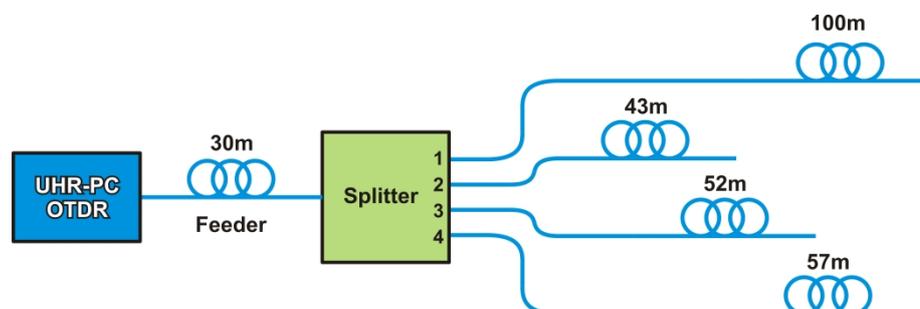


Figura 5.27 Montagem experimental de uma rede PON 1x4.

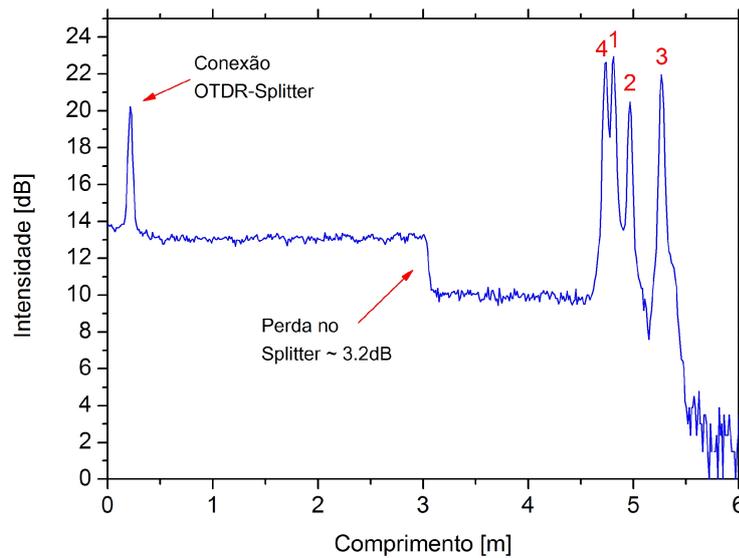


Figura 5.28 Divisor passivo 1x4 visto pelo UHR-PC-OTDR.

O mesmo divisor 1x4 visto por um OTDR convencional, cuja resolução máxima é de 3ns, é apresentado na Figura 5.29. A figura mostra que o UHR-PC-OTDR tem uma riqueza de detalhes muito superior.

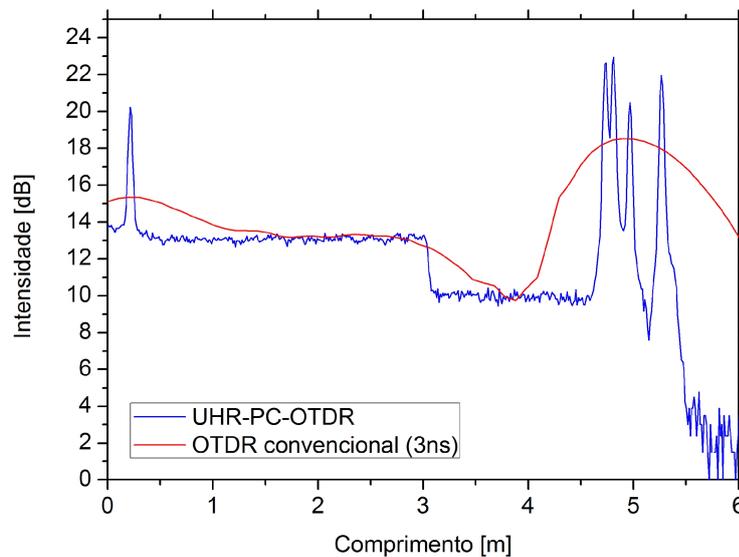


Figura 5.29 Comparação do UHR-PC-OTDR e um OTDR convencional (3ns resolução) na medida de um divisor passivo 1x4.

Uma vez reconhecidos os canais do divisor, a rede PON vista pelo UHR-PC-OTDR é mostrado na Figura 5.30. Neste experimento a taxa de gatilhamento do detector também foi de 29 kHz, a janela de aquisição efetiva de 24 ns e o VOA foi ajustado para obter uma taxa de contagens de 2.2 kHz no trecho inicial e assim poder usar curva de correção da Figura 4.13 e o algoritmo da Figura 4.15. A traço do UHR-PC-OTDR, após a correção feita pelo algoritmo, permite saber com mais

exatidão os comprimentos das fibras nos quatro canais da rede PON, sendo Fibra1=101,45 m, Fibra2=43,68 m, Fibra3=52,60 m e Fibra4=57,23 m, além a Feeder=30,99.

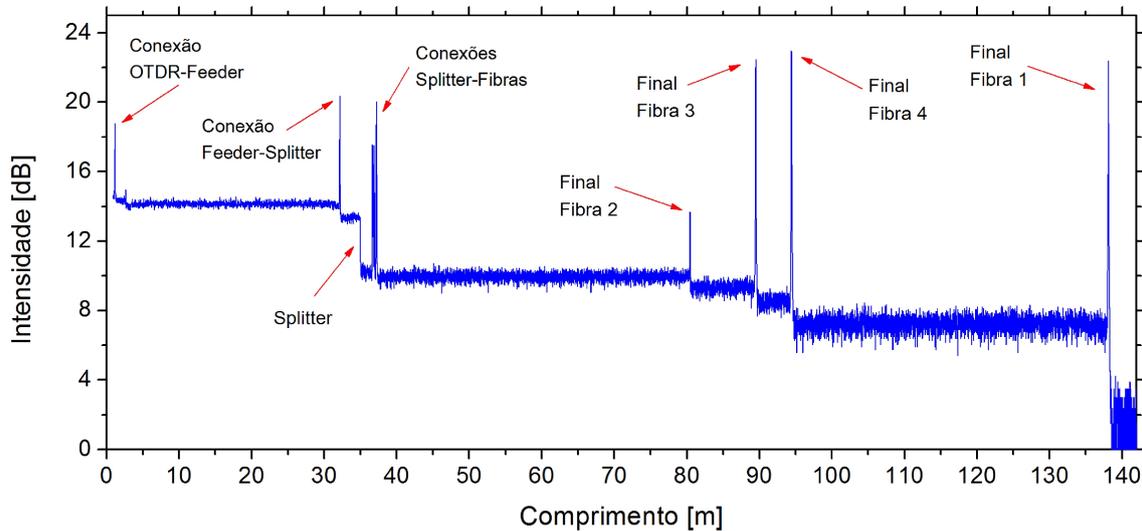


Figura 5.30 Traço corrigido do UHR-PC-OTDR na rede PON da Figura 5.27.

Uma visualização mais detalhada no *feeder*, Figura 5.31, entre 5 e 35 m, permite comparar o resultado obtido após a correção feita pelo algoritmo com o resultado original (antes da correção). O traço original apresenta um formato abrupto com inclinações que deixam perceber ainda as janelas de detecção. No entanto, no sinal corrigido essa percepção não é evidente, sendo o traço mais comportado.

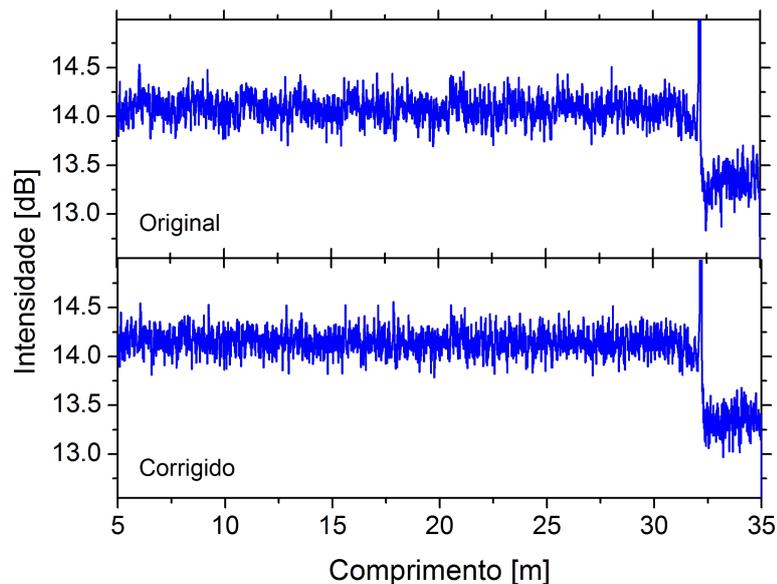


Figura 5.31 Detalhe do tramo inicial da rede PON (*feeder*) antes e depois da correção feita com o algoritmo da Figura 4.15 .

Pode-se simular assim uma anomalia ou falha na instalação da fibra, a qual produziria uma curvatura, neste caso na Fibra 3. A curvatura induzida para essa simulação tem um raio de curvatura de  $Raio=4.8$  mm, com distância angular de  $90^\circ$ . O resultado da medição em estas condições é apresentado na Figura 5.32. Como já é conhecido, a curvatura numa fibra é caracterizada por uma perda e, também como visto nesta tese na sub-seção 5.1, por um pico de "reflexão"; isso é claramente indicado na figura.

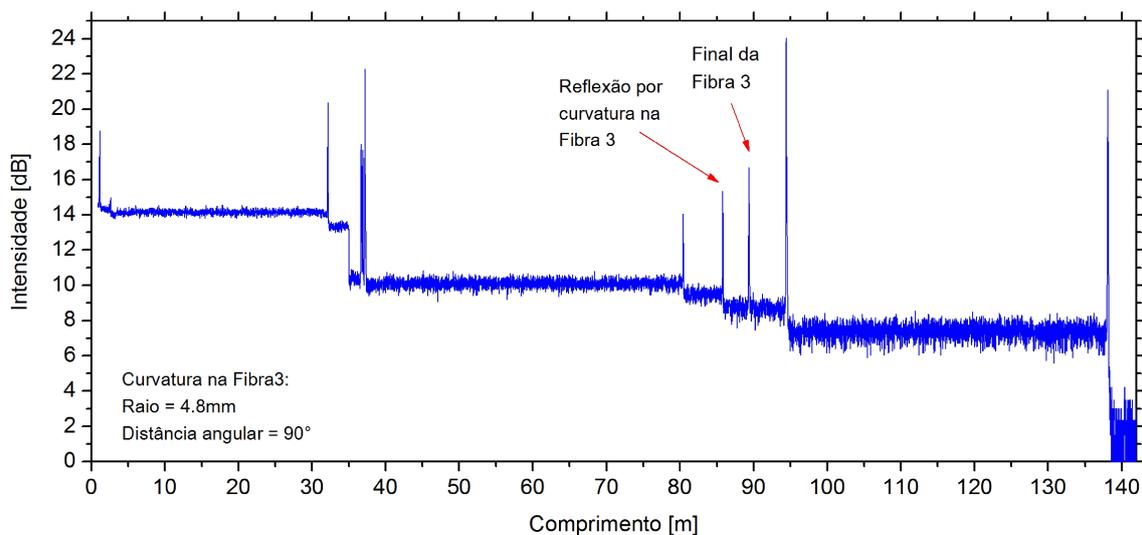


Figura 5.32 Traço do UHR-PC-OTDR da rede PON com uma curvatura induzida na Fibra3 .

A posição do pico de reflexão, segundo a medição da Figura 5.32, está a 3.56 m antes do final da fibra. Enquanto á perda, tomando em conta os resultados da sub-seção 5.1, Figura 5.13c, a atenuação produzida seria de aproximadamente 3.8 dB. Esse resultado é confirmado com uma nova medição da PON, Figura 5.33, onde foram desconectadas todas as fibras menos a Fibra3; na figura a perda por curvatura medida é de 4 dB (traço vermelho).

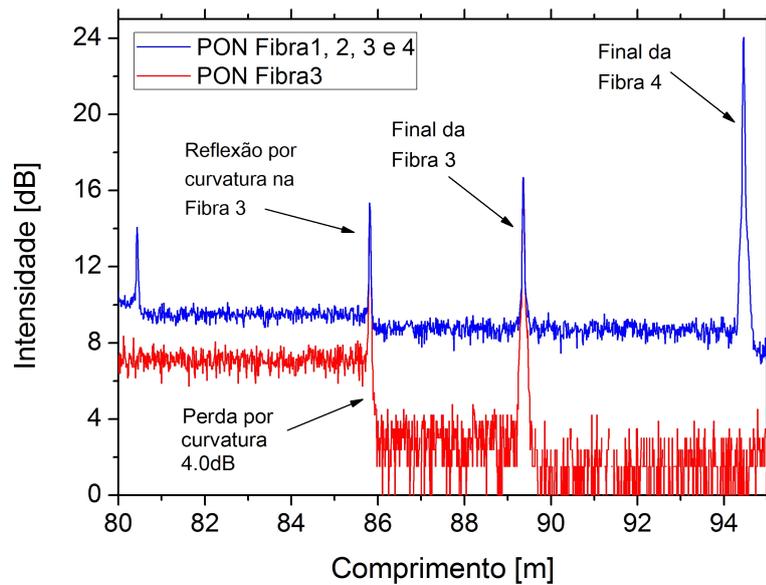


Figura 5.33 Traço do UHR-PC-OTDR da PON com curvatura induzida na Fibra 3. PON com as 4 fibras conectadas (traço azul) e com só a Fibra 3 conectada (traço vermelho).

Como sabemos, a faixa dinâmica obtida nos primeiros experimentos, sub seção 5.1 (Reflexão por curvatura), foi de 10.5 dB aproximadamente. Esses resultados foram obtidos sem o aumento na tensão do pulso que gatilha o SOA (Figura 4.9) resultando numa taxa de contagens de 0.8 kHz quando o detector era gatilhado em 29 kHz. O resultado da rede PON contudo, já inclui esse aumento da tensão, onde VOA foi ajustado para obter uma taxa de contagem de 2.2 kHz. Como resultado desta modificação, se observarmos a Figura 5.30, a faixa dinâmica subiu para 12.5 dB aproximadamente; conseqüentemente obtivemos um ganho aproximado de 2 dB.

Um outro experimento foi feito tentando melhorar ainda mais a faixa dinâmica. Desta maneira o VOA foi ajustado para obter uma taxa de contagens de 6.3 kHz, mantendo o detector gatilhado a 29 kHz. A Figura 5.34, apresenta uma comparação, dos primeiros 35m, entre o sinal original do UHR-PC-OTDR e o sinal corrigido pelo algoritmo. O sinal original neste experimento apresenta uma inclinação maior nas janelas do que o sinal original da Figura 5.31, contudo o algoritmo conseguiu realizar a correção de forma satisfatória.

O resultado dessa correção se mostra na Figura 5.35 onde a faixa dinâmica passou para 14.2 dB, um ganho de 1.7 dB em comparação ao obtido na Figura 5.30 e de 3.7 dB em comparação aos resultados da sub seção 5.1 (Reflexão por

curvatura). Embora o ganho total teórico aumentando a potência óptica seja de:  $5 \cdot \log_{10}(6.3 \text{ kHz}/0.8 \text{ kHz}) = 4.48 \text{ dB}$ , o resultado obtido aqui (de 3.7 dB) é ainda satisfatório.

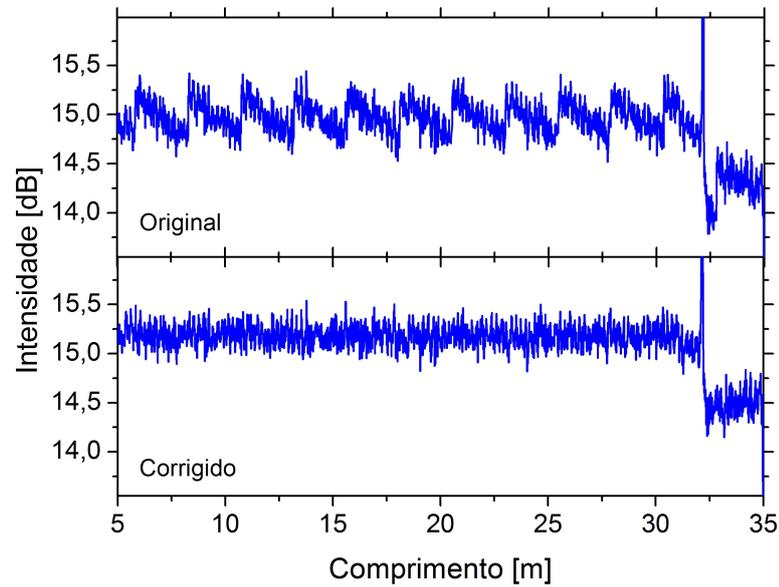


Figura 5.34 Detalhe do tramo inicial da rede PON (*feeder*) antes e depois da correção, para uma taxa de contagens de 6.3 kHz.

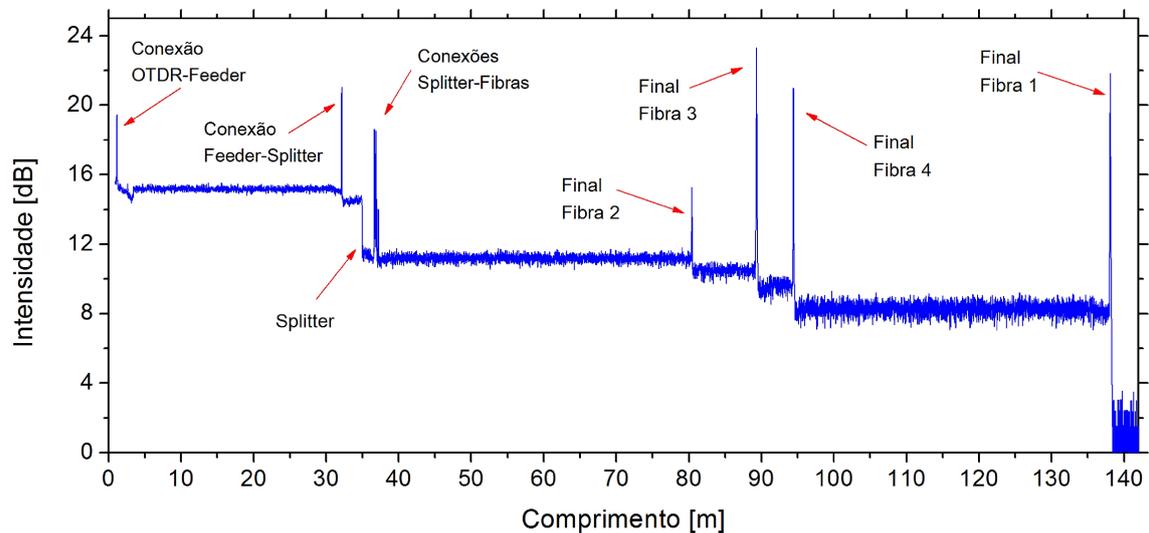


Figura 5.35 Traço corrigido do UHR-PC-OTDR na PON, para uma taxa de contagens de 6.3 kHz. A faixa dinâmica obtida é de 14.2 dB aproximadamente.

#### 5.4. Caracterização de uma rede de Bragg dispersiva

As redes de Bragg tem numerosas aplicações as quais incluem: estabilização e controle do comprimento de onda em lasers semicondutores [68] [69] [70], filtros, compensação da dispersão cromática [71] [72] e sensores de fibra óptica [73]. Atualmente o sensoriamento, baseados em redes de Bragg, [74] [75] [76] [77], é uma das aplicações mais promissoras, nas quais a sensibilidade do sensor depende altamente da qualidade da rede. Assim tanto a dispersão produzida como o comprimento físico é de muita importância na caracterização de uma rede de Bragg dispersiva.

Como foi apresentado na sub seção 4.2 o UHR-PC-OTDR usa uma fonte laser de banda larga (UWS) conjuntamente com um filtro passa-banda. Nesse sentido podemos aproveitar essas características tornando o UHR-PC-OTDR sintonizável dentro dos comprimento de onda atingidos pelo filtro. Assim sintonizando o comprimento de onda, dentro de uma banda que cubra a região de operação de uma rede dispersiva, é possível medir dispersão e o comprimento físico dela.

A Figura 5.36 apresenta a montagem para a caracterização de uma rede de Bragg dispersiva. Se compararmos com a montagem da Figura 4.4, nota-se que foi incluído um segundo filtro passa-banda depois do circulador. A inclusão desse filtro tem como objetivo eliminar as componentes espectrais da ASE do SOA, as quais são evidentes pela alta intensidade das reflexões produzidas pela rede de Bragg. A figura também apresenta uns rótulos indicando cada uma das partes da conexão a partir do circulador até o final da rede.

O traço do UHR-PC-OTDR resultante desta montagem pode ser visto na Figura 5.37. É possível observar as caudas das reflexões antes do segundo filtro produzidas pela ASE; após esse filtro as caudas são eliminadas. O nível de Rayleigh apresentado é muito baixo já que a atenuação do VOA foi aproximadamente 40 dB acima dos níveis de atenuação usados nos outros experimentos nesta tese, sendo necessária pela alta intensidade das reflexões.

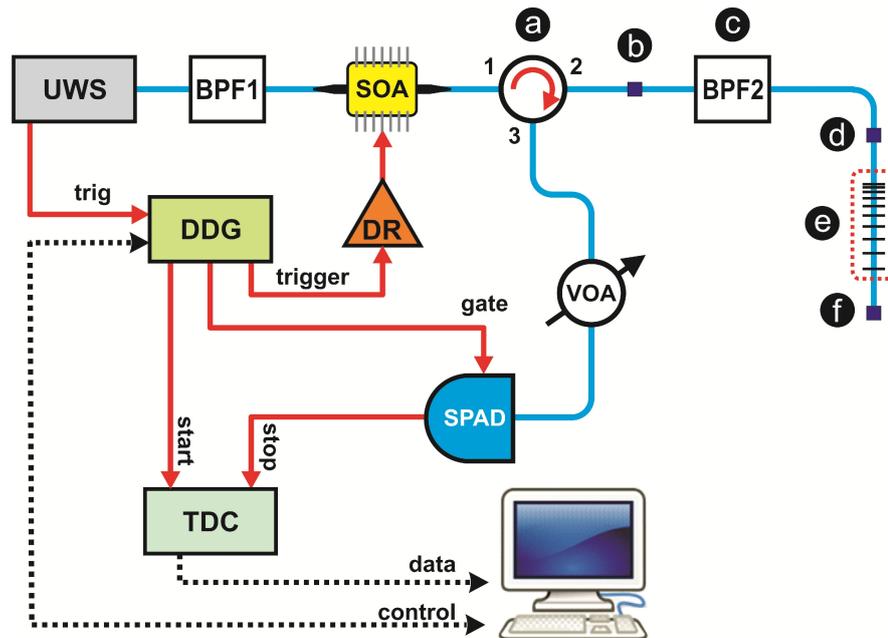


Figura 5.36 Montagem do UHR-PC-OTDR para a caracterização de uma rede de Bragg dispersiva. **a**: Corpo do circulador, **b** e **d**: Conexão APC, **c**: Filtro passa-banda, **e**: Rede dispersiva, **f**: final da fibra.

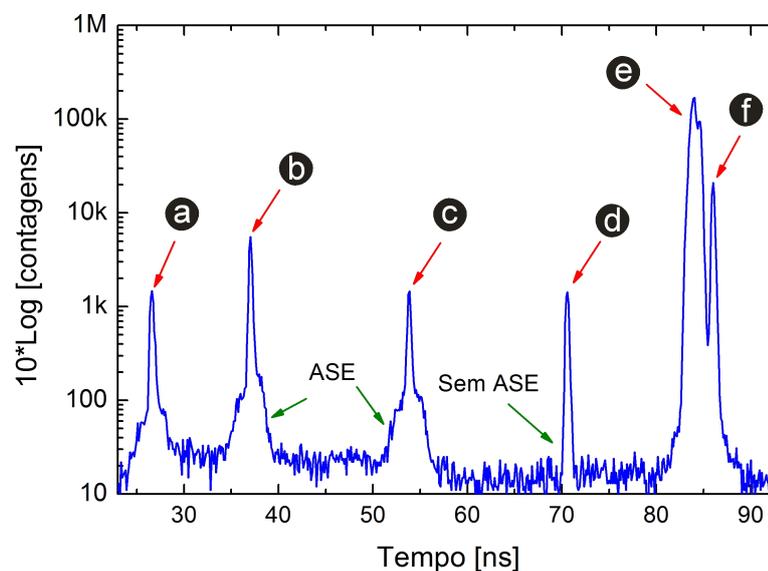


Figura 5.37 Traço do UHR-PC-OTDR para montagem da Figura 5.36.

O primeiro passo para a caracterização espectral da rede dispersiva é identificar seus comprimentos de onda de operação. Para isso é feita a varredura de comprimentos de onda e ao mesmo tempo a variação do valor de atenuação no VOA para manter o nível de contagens de fótons no SPAD constante. O valor de atenuação no VOA em função do comprimento de onda reflete desta forma a

resposta espectral da rede. O resultado obtido é apresentado na Figura 5.38, onde também observa-se a caracterização espectral medida com um analisador de espectro óptico (OSA), mostrando a equivalência entre os dois métodos. A diferença entre os níveis de intensidade dos traços apresentados na figura deve-se basicamente à resposta espectral do UHR-PC-OTDR. Assim, usando a medida de referência, medida feita pelo OSA, pode-se construir uma curva de correção dos níveis de intensidade em função do comprimento de onda, Figura 5.39.

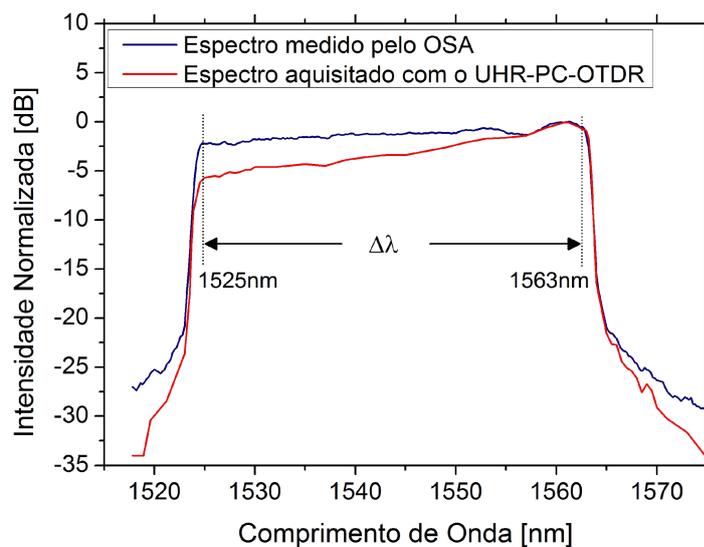


Figura 5.38 Caracterização da rede de Bragg dispersiva obtida com o OSA (traço azul) e o UHR-PC-OTDR (traço vermelho).

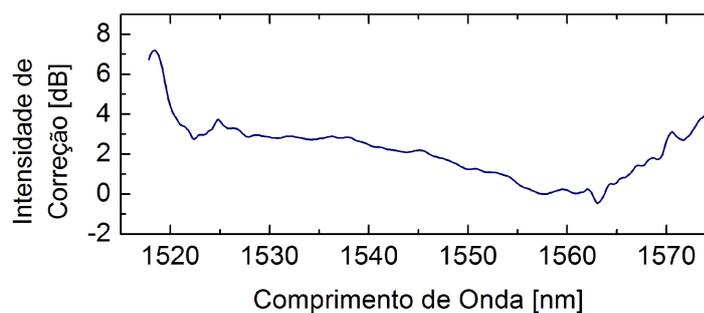


Figura 5.39 Curva de correção para os níveis de potência em função do comprimento de onda.

Com o resultado da Figura 5.38 pode-se por tanto determinar os comprimentos de onda inicial e final da rede, neste caso  $\lambda_{ini}=1525$  nm e  $\lambda_{fin}=1563$  nm. Assim o traço do UHR-PC-OTDR adquirido nestes comprimentos de onda nos dá o comprimento físico da rede, como observado na Figura 5.40, de aproximadamente 17.35 cm se considerarmos um índice de refração efetivo de  $n=1.468$ .

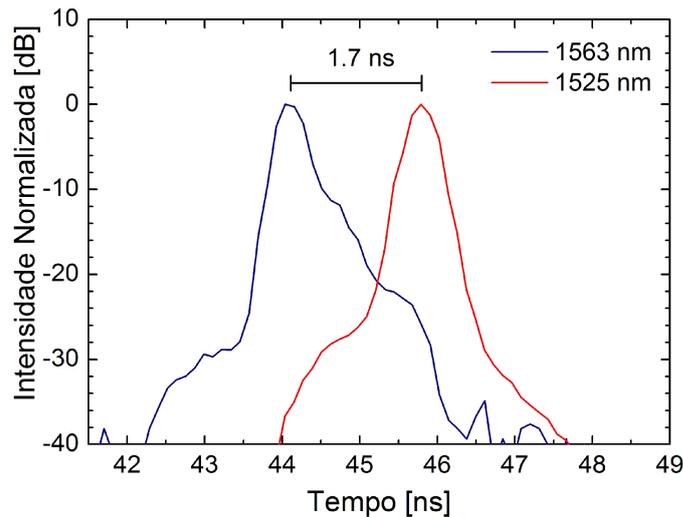


Figura 5.40 Comprimento físico da rede dispersiva. Usando a relação dada pela velocidade da luz e o índice de refração efetivo dentro da rede o comprimento é aproximadamente 17.35 cm.

A dispersão cromática induzida é determinada fazendo a varredura de comprimentos de onda e adquirido o traço de OTDR para cada uma, como apresentado na Figura 5.41a.

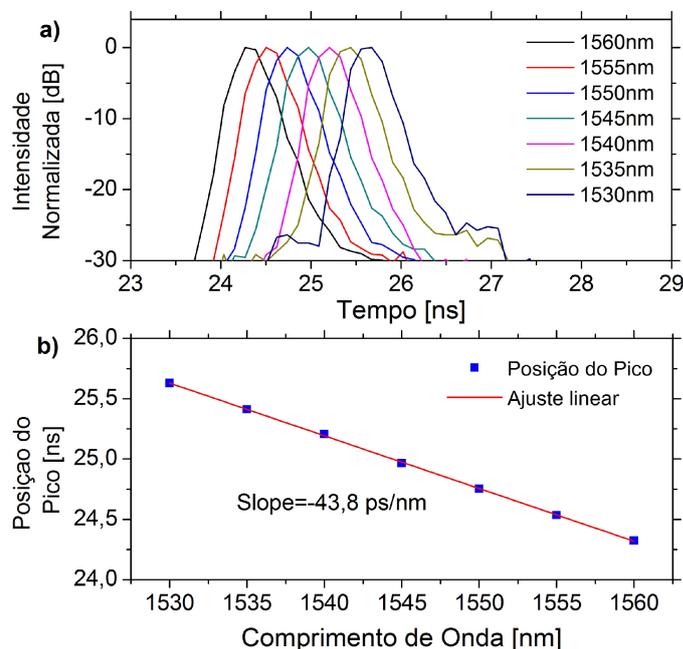


Figura 5.41 a) Traço do UHR-PC-OTDR para diferentes comprimentos de onda dentro da rede dispersiva. b) Dispersão cromática induzida de -43.8 ps/nm.

O atraso no pico de reflexão em função do comprimento de onda é mostrado na Figura 5.41b, onde o *slope* associado ao ajuste linear das medidas indica o valor da dispersão cromática, neste caso de -43.8 ps/nm.