

**UNIVERSIDADE PRESBITERIANA MACKENZIE**

**Igor da Silva Ramos**

**Análise Sistêmica da Compensação de Dispersão e Amplificação  
Raman em Fibras Microestruturadas**

São Paulo  
2008

Igor da Silva Ramos

Análise Sistêmica da Compensação de Dispersão e Amplificação Raman em  
Fibras Microestruturadas

Dissertação apresentada ao programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da  
Universidade Presbiteriana Mackenzie,  
como requisito para obtenção do título de  
mestre.

Orientador: Prof. Dr. Christiano J. S. de Matos

São Paulo  
2008

Igor da Silva Ramos

Análise Sistêmica da Compensação de Dispersão e Amplificação Raman em  
Fibras Microestruturadas

Dissertação apresentada ao programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da  
Universidade Presbiteriana Mackenzie,  
como requisito para obtenção do título de  
mestre.

Aprovada em

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Christiano J. S. de Matos – Orientador  
Universidade Presbiteriana Mackenzie

---

Prof. Dr. Eunézio Antônio de Souza (Thoróh)  
Universidade Presbiteriana Mackenzie

---

Prof. Dr. Marcos A. R. Franco  
Instituto de Estudos Avançados (IEAv)

A Deus que me deu sabedoria, a minha  
querida esposa Vanessa que me deu todo  
apoio e amor e aos meus pais, Valério e  
Márcia que formaram o homem que sou.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, que tudo criou.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Christiano J. S. de Matos.

Ao Prof. Dr. Eunézio A. de Souza, conhecido como Thoróh, pelo conhecimento transmitido.

Ao Prof. Marcos A. R. Franco do Instituto de Estudos Avançados (IEAv) pela contribuição dada na elaboração deste trabalho.

À agência MACKPESQUISA pelo suporte financeiro.

Aos grandes amigos, Camila Dias e Fúlvio Ceragioli.

## Resumo

Este trabalho estuda através de modelamento sistêmico, uma fibra óptica microestruturada utilizada em um módulo de compensação de dispersão e amplificação Raman de sistemas ópticos. O uso deste dispositivo compensa a dispersão em faixas de frequência não cobertas por fibras de compensação de dispersão convencionais e simultaneamente amplifica o sinal a fim de permitir maiores distâncias de transmissão. Em particular, compensação de dispersão e amplificação são demonstradas na banda O (1260 nm a 1360 nm) para sistemas operando a taxas de 10 e 40 Gbps. Para isso, são utilizadas as características de um modelo de fibra microestruturada real no software de simulação numérica *VPI TransmissionMaker* por meio do qual é possível avaliar o desempenho deste dispositivo. A avaliação de desempenho é feita através de curvas de taxa de erro de bits (BER, do inglês Bit Error Rate) em função do comprimento do enlace e comprimento de onda do canal de transmissão.

**Palavras-chave:** *Compensação de dispersão, Amplificação Raman, Atenuação, Dispersão, fibra para compensação de dispersão (DCF), fibra óptica microestruturada (MOF).*

## **Abstract**

This work studies, through systemic modeling a microstructured optical fiber used in a module for dispersion compensation and Raman amplification for optical communication systems. The use of this device compensates the dispersion in a range of frequencies not covered by conventional dispersion compensating fibers and, simultaneously, amplifies the signal in order to reach longer transmission distances. In particular, dispersion compensation and amplification is demonstrated in the O Band (1260 nm up to 1360 nm) for systems operating at 10 and 40 Gbps. For this purpose, the parameters of a real microstructured optical fiber model are used in the *VPI TransmissionMaker* numerical simulation software through which is possible to evaluate the performance of the device. The performance evaluation is carried out through Bit Error Rate (BER) as a function of link distance and transmission channel wavelength.

**Key words:** *Dispersion Compensation, Raman Amplification, Attenuation, Dispersion, Dispersion compensating fiber (DCF), microstructured optical fiber (MOF).*

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
<b>2 DEGRADAÇÃO DO SINAL.....</b>	<b>13</b>
2.1 Causas e Efeitos da Atenuação .....	13
2.2 Causas e Efeitos da Dispersão .....	19
2.2.1 Dispersão Modal ou Intermodal .....	20
2.2.2 Dispersão Intramodal.....	21
2.2.3 Dispersão Total.....	23
<b>3 SOLUÇÕES PARA RECUPERAR O SINAL.....</b>	<b>26</b>
3.1 Amplificação Raman .....	26
3.1.1 Contexto Histórico.....	26
3.1.2 Espalhamento Raman Espontâneo.....	27
3.1.3 Espalhamento Raman Estimulado .....	30
3.1.4 Amplificação Raman em Fibras Ópticas .....	31
3.2 Compensação de Dispersão .....	36
3.2.1 Contexto Histórico.....	36
3.2.2 Uso e limites das DCFs .....	36
<b>4 FIBRAS ÓPTICAS MICROESTRUTURADAS (MOFs) .....</b>	<b>40</b>
4.1 Tecnologia das fibras microestruturadas .....	40
4.2 Guiamento da luz.....	42
4.3 Processo de Fabricação da MOF .....	43
4.4 Aplicações da MOF em Comunicações Ópticas .....	44
4.4.1 Uso da MOF como DCF.....	44
4.4.2 Uso da MOF como DCF e Amplificador Raman.....	47
<b>5 SISTEMA ÓPTICO SIMULADO .....</b>	<b>51</b>
5.1 Descrição da MOF utilizada .....	51
5.2 Descrição da fibra de transmissão utilizada .....	53
5.3 Descrição do dispositivo baseado na MOF .....	54
5.4 Descrição do sistema Simulado e Resultados .....	55
5.4.1 Configuração do sistema .....	55
5.4.2 Orçamento de Potência.....	57
5.4.3 Análise da Dispersão Residual .....	60
5.4.4 Resultados obtidos de BER vs comprimento do enlace .....	61
5.4.4.1 Análise do Impacto da Dispersão e da Atenuação .....	65
5.4.4.2 Resultados de BER para outros comprimentos de onda.....	72
5.4.5 Resultados de BER em toda Banda O .....	75
<b>6 CONCLUSÃO.....</b>	<b>77</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>79</b>



## ABREVIATURAS

BER	Bit Error Rate
CFBG	Chirped Fiber Bragg Gratings
DC-PCF	Dispersion Compensating- Photonic Crystal Fiber
DCF	Dispersion Compensating Fiber
EDFA	Erbium-Doped Fiber Amplifier
FOM	Figure of Merit
HOM-DCF	High Order Mode - Dispersion Compensating Fiber
MOF	Microstructured Optical Fiber
NRZ	Non-return to zero
NZDSF	Non-zero Dispersion Shifted Fiber
OSNR	Optical Signal-to-Noise Ratio
PRBS	Pseudorandom binary sequence
PCF	Photonic Crystal Fiber
PMD	Polarization Mode Dispersion
RDS	Relative Dispersion Slope
SRS	Stimulated Raman Scattering
SMF	Standard Single Mode Fiber
TIR	Total Internal Reflection
TWRS	True Wave RS fiber
WDM	Wavelength Division Multiplexing.
VPI	Virtual Photonics Incorporated.

# 1 INTRODUÇÃO

As telecomunicações vêm evoluindo e modificando os padrões de vida da sociedade ao criar novas aplicações e serviços. É cada vez maior a busca por recursos digitais tais como a telefonia, internet com alta velocidade, televisão, vídeo sob demanda, tele medicina, jogos *on-line* e ensino à distância. Esta crescente demanda por tráfego requer que as redes de transmissão e acesso sejam baseadas em fibras ópticas e suportem maiores larguras de banda, o que por sua vez, exigem um aumento nas taxas de transmissão e no número de canais multiplexados em comprimentos de onda (WDM). Este último requerimento faz com que a transmissão seja ativamente investigada em outras bandas, além da banda C (1530 nm a 1565 nm). Dentre as opções disponíveis, a banda O (1260 nm a 1360 nm) destaca-se pelas baixas atenuação e dispersão das fibras.

A implementação de sistemas ópticos com altas taxas de transmissão nestas redes está limitada por quatro fatores principais: razão sinal-ruído óptica (OSNR, do inglês *Optical Signal-to-Noise Ratio*), dispersão cromática, efeitos não-lineares e dispersão de modo de polarização (PMD, do inglês *Polarization Mode Dispersion*) [1].

A degradação da OSNR devido à atenuação pode ser parcialmente compensada com a utilização de amplificadores. Porém, com a necessidade da utilização de novas bandas em fibras ópticas busca-se que os amplificadores ópticos também atuem neste novo espectro e, portanto, que sejam desenvolvidos novos amplificadores. O fato de se ter um ganho distribuído em qualquer banda do espectro eletromagnético tem sido uma das vantagens do amplificador baseado no efeito Raman. Outra característica atraente é que o amplificador Raman não precisa ser dopado, dependendo somente das características intrínsecas do material que compõe a fibra. Como se baseiam em um efeito não-linear, estes amplificadores requerem a utilização de fibras com pequenas áreas modais para a maximização das intensidades de bombeio obteníveis.

A dispersão cromática é outro fator limitante em fibras ópticas já que diminui a amplitude e alarga temporalmente os sinais propagados. Uma seqüência de pulsos transmitidos pode sofrer sobreposição após passar pelo enlace levando a degradação do sinal recebido. Estes efeitos são particularmente relevantes quando se deseja transmitir o sinal a longas distâncias e principalmente quando se utilizam elevadas taxas de transmissão (>10 Gbps) [1]. Outro dado interessante é que a dispersão está diretamente relacionada ao perfil transversal da fibra. Ou seja, ao variar-se, por exemplo, a diferença entre o índice de refração

da casca e do núcleo pode-se ajustar o valor da dispersão. Diversas técnicas para compensação da dispersão vêm sendo propostas e implementadas, dentre as quais se destaca a utilização de fibras compensadoras de dispersão (DCFs) [1], que possuem dispersão de sinal oposto à das fibras de transmissão. Novamente, a expansão para novas bandas impõe desafios, requerendo que as DCFs operem em faixas espectrais cada vez maiores.

No sentido de evitar estes fenômenos que degradam o sinal, observa-se um grande potencial no uso das fibras ópticas recém desenvolvidas conhecidas como fibras microestruturadas, ou MOFs (do inglês, *microstructured optical fibers*). Nestas fibras tanto um maior controle do perfil de dispersão, quanto à obtenção de pequenas áreas modais são conseguidos com maior facilidade. As MOFs mais difundidas são constituídas por uma matriz periódica de capilares que circunda o núcleo, responsável pelo guiamento da luz e que permite um controle sem precedentes sobre o índice de refração da casca e sobre a dependência deste com comprimento de onda. Neste caso as MOFs também são chamadas de fibras de cristal fotônico, ou PCFs (do inglês, *Photonic Crystal Fibers*). Assim, através de um controle adequado da periodicidade da matriz e da fração de ar na casca é possível simultaneamente se confinar a radiação guiada em núcleos com dimensões próximas ao comprimento de onda, para a obtenção de altos ganhos Raman, e se obter altos valores de dispersão, para compensação de dispersão.

De fato, MOFs vêm sendo estudadas tanto para amplificadores Raman quanto para compensadores de dispersão [2-9]. Um grande número de trabalhos reportados dedica-se ao projeto de MOFs apresentando altíssimos valores de dispersão normal [2,3] ou capazes de compensar a dispersão por faixas mais largas do que as DCFs convencionais [4]. O número de demonstrações experimentais destes tipos de fibra é, entretanto, substancialmente menor. Na demonstração mais significativa, uma MOF apresentava uma dispersão de  $-1211 \text{ ps/nm.km}$  na banda C e inclinação de dispersão (em inglês, *dispersion slope*) adequada para compensar a dispersão em toda esta banda [5]. Entretanto, esta fibra apresentava perda de 100 dB/km, limitando a sua aplicabilidade.

Os amplificadores Raman também vêm sendo freqüentemente propostos em MOFs apresentando pequenas áreas modais ( $<10 \mu\text{m}^2$ ) [6]. Entretanto, a alta perda que acompanha MOFs com esta característica também prejudica a utilização prática destas como amplificadores para telecomunicações [7]. Alguns trabalhos encontrados na literatura também se dedicam ao projeto teórico de MOFs simultaneamente capazes de compensar a dispersão e prover amplificação Raman [8]. Novamente, o número de trabalhos experimentais é bastante pequeno [9] e os valores de perda medidos são importantes fatores limitantes.

MOFs com áreas modais maiores podem apresentar perdas idênticas às mais baixas perdas obtíveis em fibras convencionais [10]. Esta característica é, naturalmente, obtida em detrimento da eficiência de efeitos não-lineares e da capacidade de controle da dispersão. Entretanto, um trabalho recente demonstrou [11] que uma MOF experimental de baixa perda [12] apresentava área modal ainda suficientemente pequena ( $\sim 16 \mu\text{m}^2$ ) para proporcionar eficiência de ganho Raman superior à de fibras convencionais otimizadas para amplificação Raman. A baixa perda desta fibra permitia, então, a obtenção de ganhos líquidos superiores a 20 dB com potências de bombeio obtíveis com diodos laser. A mesma MOF apresenta ainda uma dispersão peculiar, sendo nula em 950 nm e anômala acima deste comprimento de onda [12]. O uso desta fibra para amplificação Raman e compensação de dispersão na banda O foi proposta e preliminarmente estudada [13].

No presente trabalho, um modelamento sistêmico detalhado é realizado através do uso da fibra reportada em [12] como amplificador Raman e compensador de dispersão para a banda O. O dispositivo é incorporado em um enlace baseado em uma fibra de dispersão deslocada não nula (NZDSF) comercial operando nesta banda. A alta dispersão anômala da MOF é utilizada para se compensar a dispersão normal do enlace. O modelo sistêmico foi construído no software de simulação *VPI TransmissionMaker* considerando taxas de repetição de 10 Gbps e 40 Gbps, um transmissor realista utilizando modulação NRZ (do inglês, *non-return to zero*) e um receptor realista ligado a um analisador de taxas de erro de bit (BER, do inglês *Bit Error Rate*). O desempenho do sistema é analisado em função do comprimento do enlace e do comprimento de onda utilizado.

Este trabalho foi dividido da seguinte forma: no capítulo 2, são abordados conceitos básicos sobre as causas da degradação do sinal devido à atenuação e à dispersão; no capítulo 3, são apresentadas as soluções para recuperar o sinal através de amplificação Raman e compensação de dispersão; já no capítulo 4, apresentam-se os conceitos das MOFs; no capítulo 5 são apresentadas as descrições das montagens simuladas e resultados das simulações realizadas; e finalmente no capítulo 6 são apresentadas as conclusões obtidas.

## 2 DEGRADAÇÃO DO SINAL

Nesta seção são apresentadas as principais razões da degradação do sinal em sistemas de comunicação óptica que são a atenuação e a dispersão.

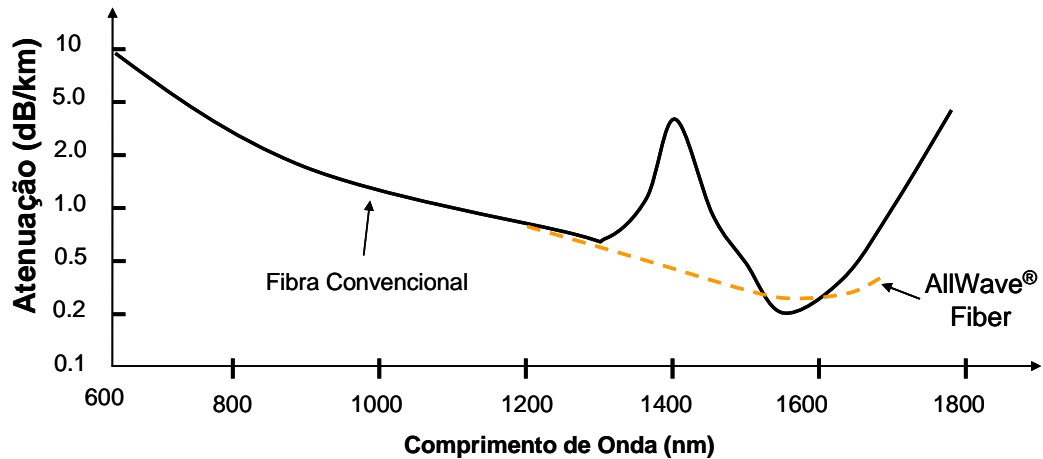
### 2.1 CAUSAS E EFEITOS DA ATENUAÇÃO

A atenuação é a perda da potência sofrida por um sinal luminoso ao se propagar ao longo de uma fibra óptica. Pelo fato do receptor necessitar de uma potência mínima que permita recuperar o sinal adequadamente, a atenuação determina a distância máxima do enlace entre o transmissor e o receptor. Dessa maneira consegue-se definir o ponto ideal no enlace para se inserir um amplificador.

As perdas podem ser definidas em termos da relação da potência de luz na entrada da fibra ( $P_{in}$ ) de comprimento  $L$  e a potência luminosa na sua saída ( $P_{out}$ ). Essa relação é em geral expressa em decibéis por quilômetro (dB/km) e dada por:

$$\alpha(dB/km) = \frac{10}{L} \log\left(\frac{P_{in}}{P_{out}}\right) \quad (1)$$

onde  $L$  é o comprimento da fibra de transmissão dado em quilômetros e  $\alpha$  é conhecido simplesmente como atenuação. Este é o parâmetro utilizado comercialmente para definir as perdas de uma determinada fibra e que depende do comprimento de onda como mostra a Figura 1.



**Figura 1 – Variação da atenuação em função do comprimento de onda para uma fibra convencional (linha contínua). Há um pico na atenuação em torno de 1390 nm causado pela absorção da luz devido à existência de hidroxilas formadas no processo de fabricação. As fibras do tipo “AllWave” não apresentam tal pico de atenuação em 1390 nm por melhorias no processo de fabricação (linha pontilhada) [14].**

Os fatores responsáveis por causar a atenuação são apresentados e explicados na seqüência:

- Absorção do material
- Mecanismos de espalhamento
- Curvaturas

#### **a) Perdas por absorção do material**

As perdas por absorção são causadas por dois tipos de mecanismos: absorção intrínseca e absorção extrínseca.

##### **Intrínseca**

Este tipo de absorção depende do próprio material usado na composição da fibra. A fabricação das fibras ópticas está usualmente baseada na sílica e os principais fatores de absorção intrínseca correspondem à banda de absorção eletrônica (pico em  $\lambda = 0,14 \mu\text{m}$  para a sílica fundida) e à banda de vibração atômica que ocorre na região do infravermelho ( $\lambda > 7 \mu\text{m}$ ). Um fato interessante é que a perda por absorção intrínseca é menor que 0,03 dB/km na janela de comprimento de onda que vai de 1300 nm a 1600 nm, a qual é tradicionalmente utilizada em sistemas ópticos [15].

## **Extrínseca**

Este tipo de absorção resulta da contaminação de impurezas que o material da fibra adquire durante o processo de fabricação. No caso das fibras ópticas construídas através do processo de fabricação convencional de fusão direta, a absorção de íons metálicos (Cu, Fe, Cr, etc.) constitui-se no principal fator de perdas na fibra e pode chegar a valores superiores a 1 dB/km [15]. Porém com técnicas mais avançadas que oferecem um melhor controle das impurezas é possível eliminar os efeitos dos íons metálicos, mantendo a contaminação em níveis aceitáveis (da ordem de 1 para  $10^{10}$ ).

Uma segunda causa de absorção extrínseca é a presença de íons  $\text{OH}^-$  (hidroxilas formadas no vidro a partir de vapor de água durante o processo de fabricação) cujo pico ocorre no comprimento de onda de 1390 nm podendo resultar em perdas de mais de 10 dB/km. Porém, com a evolução tecnológica as perdas por esta causa foram reduzidas devido à redução da concentração de vapor de água. Atualmente já existem fibras comercializadas como a *ALL-WAVE*, que não apresentam o pico de atenuação em torno do comprimento de onda de 1390 nm, como visto na Figura 1.

Em fibras microestruturadas, entretanto, a contaminação por vapor de água não se restringe ao processo de fabricação, podendo ocorrer deposição de vapor no interior dos capilares em qualquer momento, caso as extremidades não sejam devidamente seladas. A perda por contaminação é mais acentuada quando a superposição entre a luz guiada e os buracos é grande, o que ocorre em fibras microestruturadas com núcleo diminuto.

### **b) Perdas por Espalhamento**

As perdas por espalhamento estão vinculadas principalmente às imperfeições da estrutura da matéria prima. Os tipos de espalhamento que incorrem nas perdas de transmissão em fibras ópticas são: Rayleigh, Mie, Brillouin e Raman. Os dois primeiros (Rayleigh e Mie) são mecanismos lineares de espalhamento causados pela transferência (linear) de potência de um modo guiado para modos vazados, irradiados ou contra-propagantes com o sinal. Os outros dois tipos de espalhamento (Brillouin e Raman) são chamados não-lineares, pois transferem a potência de luz de um modo guiado para si mesmo ou para outros modos em um comprimento de onda diferente, de forma que há transferência de energia entre a radiação e a matéria.

### Espalhamento Rayleigh

O Espalhamento Rayleigh é o mecanismo principal de espalhamento em fibras convencionais e é devido às variações microscópicas na densidade do material da fibra. Este espalhamento causa perdas inversamente proporcionais à quarta potência do comprimento de onda, e, portanto, é reduzido ao operar um sistema em comprimentos de onda maiores. O coeficiente de perdas por espalhamento de Rayleigh é dado por:

$$\alpha_{scat} = \frac{8\pi^3}{3\lambda^4} n^8 p^2 K T_f \beta_T \quad (2)$$

onde  $\lambda$  é o comprimento de onda da luz transmitida,  $n$  é o índice de refração do meio,  $p$  é coeficiente fotoelástico do meio,  $K$  é a constante de Boltzmann,  $\beta_T$  é a compressibilidade isotérmica na temperatura  $T_f$  que por sua vez corresponde à temperatura em que o vidro entra em equilíbrio termodinâmico.

O aumento da atenuação para comprimentos de onda menores (visto na Figura 1) é principalmente devido ao espalhamento Rayleigh enquanto que o aumento da atenuação na direção de comprimentos de onda maiores é devido à absorção, conforme mostra a Figura 2.

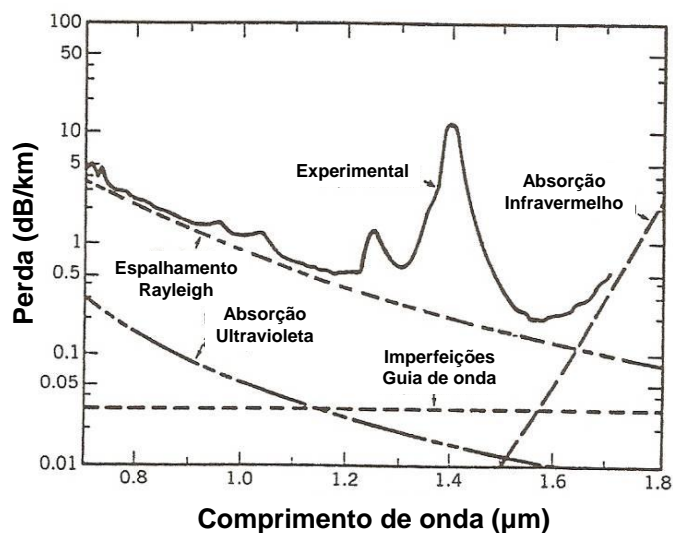


Figura 2 – Espectro de perda de uma fibra monomodo convencional que mostra a contribuição de algumas componentes que causam a atenuação do sinal [15].



### **Espalhamento Mie**

Uma fibra óptica guia perfeitamente o sinal luminoso pelo núcleo sem irradiação de energia para a camada que forma a casca, somente se a estrutura possuir uma geometria cilíndrica perfeita. Porém na prática a interface entre o núcleo e a casca usualmente possui bolhas, minúsculos defeitos na interface do núcleo com a casca, variações no diâmetro da fibra, sinuosidades no eixo, variações na relação entre o índice de refração do núcleo e o da casca ao longo da fibra. A presença destas imperfeições pode implicar a transferência de energia de um modo guiado para modos irradiados (espalhamento Mie) que pode ser muito importante, caso a frequência espacial das perturbações geométricas corresponda ao comprimento de onda de acoplamento dos modos.

O espalhamento Mie é particularmente importante tanto em fibras microestruturadas de núcleo oco como nas de núcleos sólidos de diâmetro bastante reduzido ( $\sim 1 \mu\text{m}$ ). Nestes casos, a rugosidade dos buracos causa espalhamento.

### **Espalhamento Brillouin**

O espalhamento Brillouin é um efeito não-linear que pode ser visto como sendo a modulação (em frequência) da luz transmitida pelas vibrações acústicas da fibra. Este efeito, que só é significativo acima de certos níveis de potência luminosa, resulta na transferência de potência de um modo para si mesmo, principalmente na direção contrária à de propagação e em outra frequência. O limiar de potência luminosa que estimula o espalhamento Brillouin em fibras convencionais é dado por:

$$P_{\text{Brillouin}} = 4,4 \times 10^{-3} d^2 \times \lambda^2 \times \alpha_f \times \nu \text{ watts} \quad (3)$$

onde  $d$  (em  $\mu\text{m}$ ) é o diâmetro do núcleo da fibra,  $\lambda$  (em  $\mu\text{m}$ ) é o comprimento de onda de operação,  $\alpha_f$  (em dB/km) é a atenuação da fibra e  $\nu$  (em gigahertz) é a largura de faixa da fonte luminosa (em geral um laser semiconductor). Para sinais de comunicação em altas taxas ( $\geq 10 \text{ Gbps}$ ),  $\nu$  possui um valor alto, fazendo com que  $P_{\text{Brillouin}}$  se torne bem maior do que as potências utilizadas por lasers na prática.

### **Espalhamento Raman**

O espalhamento Raman ocorre também a partir de certo limiar de potência luminosa, segundo um processo de geração similar ao espalhamento Brillouin. Neste caso, porém, a

transferência de potência ocorre principalmente na direção de propagação, sendo o limiar até três ordens de magnitude superior e dado por:

$$P_{Raman} = 5,9 \times 10^{-2} d^2 \times \lambda^2 \times \alpha_f \text{ watts} \quad (4)$$

onde  $d$  (em  $\mu\text{m}$ ) é o diâmetro do núcleo da fibra,  $\lambda$  (em  $\mu\text{m}$ ) é o comprimento de onda de operação,  $\alpha_f$  (em dB/km) é a atenuação da fibra. Os efeitos do espalhamento Raman, assim como o de Brillouin, não são usualmente observados em fibras multimodo em razão das dimensões do núcleo serem relativamente grandes. O mecanismo de espalhamento Raman será explanado mais a fundo no capítulo 3, pois é utilizado para a amplificação de sinais.

### c) Perdas por Curvatura

As fibras ópticas também estão sujeitas a perdas de transmissão quando submetidas a curvaturas que se classificam em dois tipos:

**Macrocurvaturas**, cujos raios de curvaturas são grandes comparados com o diâmetro da fibra (ocorrem, por exemplo, na instalação do cabo óptico ao dobrá-lo).

**Microcurvaturas**, que são curvaturas microscópicas aleatórias do eixo da fibra cujos raios de curvatura são próximos ao raio do núcleo da fibra (ocorrem quando as fibras são incorporadas em cabos ópticos).

## 2.2 CAUSAS E EFEITOS DA DISPERSÃO

A dispersão em uma fibra óptica é o fenômeno que ocasiona o alargamento temporal dos sinais propagados pelo fato de existir diferentes atrasos de propagação para cada um dos componentes (modos ou frequências) que transportam a energia luminosa, impondo, portanto, uma limitação na sua capacidade de transmissão. No caso de transmissão digital, a mais usual, o alargamento dos pulsos ópticos resultante da dispersão determina a taxa máxima de informação por unidade de tempo ( $B$  em bits por segundo) através da fibra e conseqüentemente a distância de transmissão máxima ( $L_{max}$ ) que é dada pela equação [1]:

$$L_{max} = \frac{K}{B^2 \cdot |D|} \quad (5)$$

onde  $D$  é o coeficiente de dispersão da fibra de transmissão e  $K$  é uma constante que depende das características do transmissor e receptor, formato de modulação, etc.

No caso mais geral de transmissão analógica, a distorção do sinal óptico transmitido traduz-se numa limitação de banda passante da fibra óptica.

Existem dois mecanismos básicos da dispersão em fibras ópticas com implicações distintas segundo o tipo de fibra:

- Dispersão Modal ou Intermodal
- Dispersão Intramodal (devido ao material, guia de onda e perfil).

A dispersão modal ou intermodal caracteriza-se por afetar a transmissão em fibras multimodo e resulta do fato de cada modo de propagação, para um mesmo comprimento de onda, ter uma diferente velocidade (de grupo) de propagação. Os outros três tipos de dispersão (material, guia de onda e perfil) correspondem à chamada dispersão cromática ou intramodal. Esta dispersão cromática é resultante da dependência da velocidade de grupo de propagação de um modo individual com relação ao comprimento de onda. Os efeitos deste último tipo de dispersão, na distorção do sinal transmitido, aumentam com a largura espectral da fonte luminosa.

De maneira geral, a capacidade de transmissão das fibras multimodo de índice degrau é afetada principalmente pela dispersão modal, enquanto que a capacidade de transmissão das

fibras multimodo índice gradual e das fibras monomodo é afetada principalmente pela dispersão modal e material e pela dispersão material, de guia de onda e do perfil, respectivamente.

É importante ressaltar que este trabalho basear-se-á nas dispersões das fibras mais amplamente utilizadas comercialmente, que são as do tipo monomodo. Porém será apresentada uma breve introdução sobre a dispersão intermodal ocorrida nas fibras multimodo.

### **2.2.1 Dispersão Modal ou Intermodal**

A dispersão modal ou intermodal afeta apenas as fibras multimodo e resulta dos diferentes atrasos na propagação, numa única frequência óptica (comprimento de onda).

O fenômeno da dispersão modal pode ser explicado através da teoria dos raios, bastando para isso observar as diferenças de caminhos percorridos ao longo do núcleo pelos vários raios. As diferenças de caminhos traduzem-se em tempos de propagação distintos para os raios com diferentes ângulos de incidência (modos), uma vez que o núcleo, sendo homogêneo, induz uma velocidade de propagação constante. Isso faz com que a luz transmitida pelos vários raios (modos) num determinado comprimento de onda chegue à extremidade da fibra multimodo em instantes diferentes, causando, portanto, a dispersão dos sinais transmitidos.

## 2.2.2 Dispersão Intramodal

Os mecanismos de dispersão cromática (material, guia de onda e perfil) possuem uma interdependência bastante complexa [16]. Porém, é possível estimar, de maneira simples e com precisão razoável, os efeitos da dispersão cromática ou intramodal, somando-se as contribuições das dispersões do material, do guia de onda e do perfil calculadas individualmente, uma na ausência da outra.

### Dispersão de Material

A dispersão de material, como o próprio nome já diz, depende das características constitutivas da fibra óptica. A sílica, assim como todos os materiais, possui um índice de refração que depende do comprimento de onda. Esta dependência tem origem na existência de picos de absorção no espectro de transmissão, e é dada pela equação de Sellmeier [17], que para sílica é:

$$n^2 - 1 = \frac{A_1 \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_1^2} + \frac{A_2 \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_2^2} + \frac{A_3 \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_3^2} \quad (6)$$

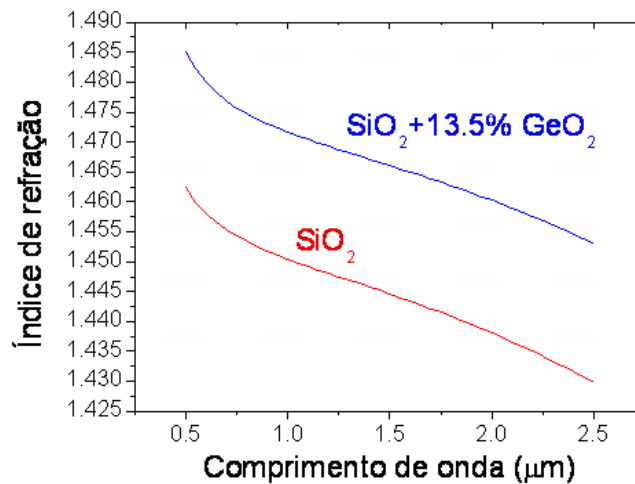
onde  $A_i$  e  $\lambda_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) são constantes que dependem da composição exata do vidro.

Pode-se observar na tabela 1 [17] que estes valores variam de acordo com a composição da sílica.

TABELA 1  
VALORES DAS CONSTANTES DA EQ. DE SELLMEIR EM FUNÇÃO DA COMPOSIÇÃO DA SÍLICA  
[17]

Material	$A_1$	$\lambda_1$ ( $\mu\text{m}$ )	$A_2$	$\lambda_2$ ( $\mu\text{m}$ )	$A_3$	$\lambda_3$ ( $\mu\text{m}$ )
Sílica pura	0,6961663	0,0684043	0,4079426	0,1162414	0,8974794	9,896161
Sílica c/ 13,5% de GeO <sub>2</sub>	0,711040	0,064270	0,451885	0,129408	0,704048	9,425478

O índice de refração do material que compõe uma fibra óptica tem, via de regra, uma dependência não-linear com o comprimento de onda, conforme mostrado na Figura 3 [18]. Isso implica em diferentes velocidades de propagação para os vários componentes espectrais de um dado modo de propagação, resultando na chamada Dispersão do Material. A diversidade de componentes espectrais nos modos transmitidos é imposta pelas fontes luminosas que se caracterizam de uma maneira geral, por emissão de luz policromática, isto é, emissão de luz em vários comprimentos de onda em torno de um comprimento de onda central.



**Figura 3 – Variação do índice de refração da sílica fundida com o comprimento de onda [18].**

Em uma fibra, a Dispersão do Material ( $D_m$ ) é dada a partir das variações do índice de refração de grupo do núcleo e da casca com o comprimento de onda ( $\lambda$ ) pela equação 7 conforme [17]:

$$D_m(\lambda) = \frac{1}{c} \left( \frac{dN_1}{d\lambda} A(V) + \frac{dN_2}{d\lambda} [1 - A(V)] \right) \quad (7)$$

onde  $c$  é a velocidade da luz no vácuo,  $N_1$  e  $N_2$  são os índices de refração de grupo do núcleo e da casca, respectivamente, e  $A(V)$  é aproximadamente a fração de potência óptica no núcleo, em função da frequência normalizada,  $V$ , definida como:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (8)$$

onde  $a$  é a área do núcleo, e  $n_1$  e  $n_2$  são os índices de refração do núcleo e da casca respectivamente.

### Dispersão de Guia de Onda

A dispersão de guia de onda ocorre porque o confinamento do modo ao núcleo,  $A(V)$ , varia de forma não linear com a frequência,  $V$ , mesmo que  $n_1$  e  $n_2$  sejam constantes. Em uma fibra com um único modo de propagação é razoável esperar-se que este confinamento diminua com o aumento do comprimento de onda devido a efeitos difrativos. Isto acarreta uma redução no índice de refração efetivo do modo, já que este interage mais com a região de menor índice (casca), resultando na dispersão do sinal.

### Dispersão de Perfil

A terceira causa para dispersão cromática em fibras ópticas monomodo é o fato de que os índices de refração da casca e do núcleo variam independentemente com o comprimento de onda. Assim, em geral o contraste de índice irá variar com comprimento de onda. Isto faz com que as propriedades modais (principalmente o confinamento) variem com o comprimento de onda, gerando dispersão. A dispersão de perfil é em geral muito menor do que as demais, sendo muitas vezes desprezada.

### 2.2.3 Dispersão Total

A dispersão total, dada em  $ps/nm.km$ , normalmente é medida e não calculada e trata-se de uma característica da fibra óptica. Isso significa que um pulso com largura  $\Delta\lambda$  em  $nm$  irá alargar de  $D.\Delta\lambda.L$  após ter viajado uma distância  $L$  dada em  $km$ . Como resultado da dispersão cromática total, obtém-se a seguinte equação aproximada conforme [17]:

$$D(\lambda) = D_m(\lambda) + D_w(\lambda) + D_p(\lambda), \quad (9)$$

onde  $D(\lambda)$  é a dispersão cromática total em uma fibra monomodo que é função do comprimento de onda,  $D_m(\lambda)$  é a dispersão do material,  $D_w(\lambda)$  é a dispersão do guia de onda e  $D_p(\lambda)$  a dispersão do perfil.

A Figura 4 mostra para uma fibra convencional a contribuição das dispersões do material, de guia de onda e de perfil em que é possível se notar que a maior parcela refere-se à dispersão do material. É comum referir-se às regiões espectrais com sinais de dispersão negativo e positivo respectivamente, como regiões de dispersão normal e anômala.

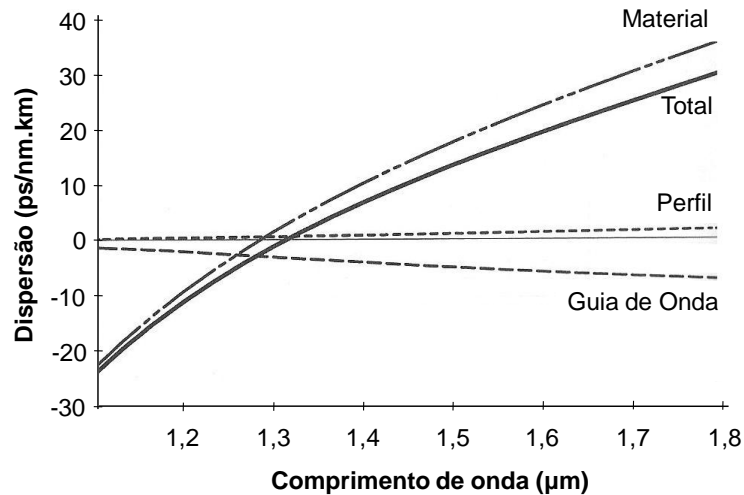


Figura 4 – Dispersão total em fibras monomodo (linha sólida) e contribuições referentes à dispersão do material, do guia de onda e de perfil (linhas pontilhadas).

Os valores típicos de dispersão em fibras ópticas de transmissão comercialmente disponíveis são mostrados na tabela 2 [1].

TABELA 2  
PROPRIEDADES TÍPICAS DE ALGUMAS FIBRAS COMERCIAIS EM 1550 NM [1]

Tipo de Fibra	Dispersão [ps/nm.km]	Inclinação de Dispersão [ps/nm <sup>2</sup> .km]	RDS [nm <sup>-1</sup> ]	Área Efetiva [μm <sup>2</sup> ]
Fibra Monomodo Padrão (SMF), ITU G652	16.5	0.058	0.0036	82
Fibras de Dispersão Não Nula (NZDSF) dispersão baixa, ITU G655				
Fibra TrueWave <sup>®</sup> RS	4.5	0.045	0.010	52
Fibra ELEAF*	4.2	0.085	0.020	72
Fibras de Dispersão Não Nula (NZDSF) dispersão média, ITU G656				
Fibra TrueWave <sup>®</sup> REACH	7.1	0.042	0.0058	55
TeraLight Ultra*	8	0.052	0.0065	63

Pode-se observar na tabela 2 que as fibras monomodo padrão (SMF, do inglês *Standard Single Mode Fiber*) atingem valores de dispersão iguais a 16,5 ps/nm.km. A tabela também indica os valores de inclinação de dispersão (taxa de variação da dispersão com o comprimento de onda), da inclinação relativa de dispersão (RDS, abordada na seção 3.2.2) e



da área efetiva do modo guiado. Além das SMFs, já existem modelos de fibras de transmissão que possuem valores de dispersão inferiores aos da SMF ( $\sim 4 \text{ ps/nm.km}$ ), conhecidas como NZDSF (do inglês, *Non-Zero Dispersion Shifted Fiber*) e que são tidas como as fibras de referência nos enlaces de nova geração. No entanto, mesmo com o uso destas fibras de valor de dispersão reduzido, observa-se que com o aumento da taxa de transmissão, as distâncias de transmissão são diminuídas. Alguns exemplos de distâncias máximas por transmissões limitadas pela dispersão em 1550 nm são mostrados na tabela 3 tanto para as fibras SMF como para as NZDSFs de modelo TW-RS [1]. É importante salientar que as SMFs possuem dispersão nula em  $\sim 1300 \text{ nm}$  (banda O), mas que as NZDSFs apresentam valores não desprezíveis de dispersão normal ( $\sim 8 \text{ ps/nm.km}$ ) nesta região. Desta forma, o gerenciamento de dispersão na banda O terá de ser realizado nos sistemas de comunicação do futuro.

TABELA 3  
DISTÂNCIAS DE TRANSMISSÃO MÁXIMA EM FUNÇÃO DA TAXA DE TRANSMISSÃO EM 1550NM

Bit rate Gbps	SMF km	TW-RS km
2.5	927	3400
10	58	213
40	3.6	13

### 3 SOLUÇÕES PARA RECUPERAR O SINAL

Neste capítulo, são apresentadas algumas das soluções possíveis para a degradação do sinal decorrente da atenuação e dispersão incorridas ao longo da fibra de transmissão através da amplificação Raman e compensação de dispersão realizada por fibras de compensação de dispersão convencionais.

#### 3.1 AMPLIFICAÇÃO RAMAN

##### 3.1.1 Contexto Histórico

Em 28 de fevereiro de 1928 foi publicada [19] a descoberta do fenômeno Espalhamento Raman Espontâneo pelo físico indiano radicado no Reino Unido, Sir Chandrasekhara Venkata Raman. Mais tarde, em 1930, foi-lhe concedido o prêmio Nobel por tal descoberta. No início dos anos 70, Stolen e Ippen [20] demonstraram a amplificação Raman em fibras ópticas. No entanto, de 1970 até a primeira metade dos anos 80, os amplificadores Raman permaneceram principalmente como objetos de estudos de laboratório. No final de 1980, vários artigos foram publicados apresentando o grande diferencial dos amplificadores Raman: a capacidade de operar em uma ampla faixa espectral. No entanto, esses trabalhos foram superados pelos amplificadores do tipo EDFA (do inglês, *Erbium-Doped Fiber Amplifier*). Os EDFAs foram temporariamente preferidos, pois a potência de bombeio requerida para estes amplificadores era significativamente menor que a requerida nos amplificadores Raman, e a tecnologia para produzir lasers com maior potência ainda não estava confiável [21]. Mais tarde em meados de 1990, com o desenvolvimento de novos lasers de bombeio e pela crescente demanda de banda, ressurgiu o interesse pela amplificação Raman, pois esta seria capaz de prover altos ganhos para uma faixa espectral muito mais ampla que os EDFAs e ainda utilizar as fibras ópticas de sílica convencionais [22]. Atualmente, os amplificadores Raman são amplamente empregados em sistemas de comunicações ópticas.

### 3.1.2 Espalhamento Raman Espontâneo

O espalhamento Raman espontâneo ocorre quando um fóton incide sobre um sistema físico e produz fótons espalhados com frequência maior ou menor que a do fóton incidente. A partir do efeito Raman, veremos adiante que é possível a construção de amplificadores ópticos através da emissão estimulada de fótons de forma a produzir ganho. Portanto, é necessário compreender alguns fenômenos físicos básicos. Dois deles são os processos de emissão espontânea e estimulada. Nesta seção abordaremos o espalhamento espontâneo e na seção seguinte, o estimulado.

A emissão é um processo oposto ao da absorção que gera atenuação nas fibras. Ao invés de haver o cancelamento de um fóton, na emissão há o aparecimento de um deles através da conversão de energia em algum sistema físico (átomo, molécula, etc.).

A absorção só pode ocorrer de forma estimulada; ou seja, é necessário que um fóton pré-existente interaja com o sistema físico para que se cancele. Caso a energia do fóton seja igual à diferença de energia entre os estados envolvidos em uma transição, o sistema físico absorve a energia do fóton incidente passando de um estado de menor para outro de maior energia.

Na emissão, um sistema físico inicialmente em um nível de energia mais alta emite um fóton ao decair para um nível de energia mais baixa. Nas emissões espontâneas o sistema físico decai sem nenhuma ação externa. Nas emissões estimuladas, o decaimento ocorre porque há um fóton como agente externo que o induz. Este fóton, ao atingir o sistema físico, provoca a transição forçando-o a transitar do nível de mais alta energia, no qual se encontra, para o nível de mais baixa energia. Nesses casos o fóton emitido é uma cópia do fóton incidente.

Para melhor compreender os processos absorção e emissão a Figura 5 utiliza um método usual de representação esquemática dos níveis de energia. Como o efeito Raman baseia-se em transições entre estados de vibração moleculares, a discussão daqui em diante restringe-se a este caso. Cada energia possível para a vibração de uma molécula é representada por um traço preto, que são ordenados segundo valores crescentes da energia. Para simplificar a descrição, supõe-se que cada modo normal de vibração só tem dois estados (e níveis de energia) possíveis. O mais baixo corresponde supostamente a uma molécula parada, sem vibrar, logo, com energia  $E_0 = 0$ . Esse é o chamado estado fundamental da vibração molecular. O outro nível corresponde à energia  $E_1$  que a molécula tem quando está vibrando em um de seus modos normais. Portanto, para fazer com que uma molécula em

repouso vibre com esse modo normal é preciso fornecer a ela uma energia de valor  $E_1$ . Isso significa excitar a molécula e, portanto, esse estado é chamado de estado excitado.

I	II	III	IV	V
Estado Fundamental	$E_f = E_1$	$E_f \gg E_1$	$E_f \gg E_1$ e molécula vibrando	$E_f \gg E_1$ e molécula vibrando
Molécula em repouso, sem vibrar	Fóton é absorvido pela molécula	Fóton pode excitá-la a um estado cuja energia $E_V \gg E_1$ .	Fóton pode excitá-la a um estado cuja energia $E_V \gg E_1$ . Energia do fóton diminui, gerando uma vibração da molécula	Fóton pode excitá-la a um estado cuja energia $E_V \gg E_1$ . Energia do fóton aumenta, roubando energia de vibração da molécula
		<b>Espalhamento Raman/Rayleigh</b>	<b>Raman Stokes</b>	<b>Raman Anti-Stokes</b>

Figura 5 – Diferentes casos de interação do fóton com uma molécula.

O caso I da Figura 5 mostra o estado inicial em que uma molécula se encontra no estado fundamental.

No exemplo do caso II, demonstra-se o fenômeno da absorção devido a que um fóton incidindo sobre a molécula com energia  $E_f$  igual à diferença de energia entre os níveis excitado e fundamental ( $E_f = E_1$ ) faz com que a molécula absorva a energia do mesmo. Diz-se então que o fóton foi absorvido. As vibrações moleculares costumam absorver fótons que pertencem à região do infravermelho médio e distante no espectro.

Em III, apresentam-se os mecanismos de espalhamento Raman e Rayleigh. Nesse caso, o fóton incidente tem uma energia  $E_f$  muito maior que a energia  $E_1$  do modo normal. Ao incidir sobre a molécula, o fóton pode momentaneamente excitá-la a um estado conhecido como virtual, de energia  $E_V$  e muito maior que a energia  $E_1$  do modo de vibração. Esses estados virtuais não correspondem aos estados normais de vibração e, portanto são instáveis e a molécula instantaneamente cai para estados reais de menor energia. A molécula pode, por exemplo, voltar ao estado fundamental, re-emitindo um fóton com a mesma energia do fóton incidente, em uma direção que pode ser diferente da direção de propagação do fóton original.

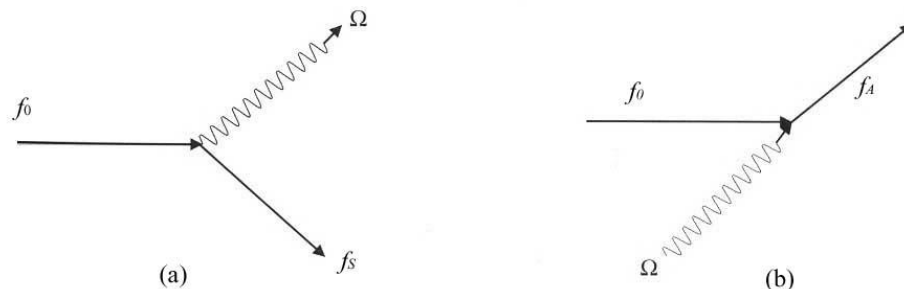
Para todos os efeitos, o fóton incidente foi simplesmente espalhado, sem perder sequer uma fração de sua energia inicial. Este fenômeno é conhecido como espalhamento Rayleigh.

Entretanto, em alguns casos, a molécula não retorna ao estado fundamental. Depois de decair, ela fica no estado vibracional, com energia  $E_1$ . Nesse caso, o fóton, que é re-emitido em uma direção qualquer, terá sua energia diminuída para  $E_f - E_1$ . A molécula e sua vibração adquirem uma parte da energia do fóton original. Esse é o tipo de espalhamento conhecido como Raman.

Porém, existe outra possibilidade. A molécula pode já estar vibrando com energia  $E_1$ , quando o fóton incide sobre ela, levando-a a uma energia bem mais alta  $E_{V'}$ . Desse estado  $V'$  a molécula decai, só que agora para o estado fundamental. No processo, um fóton de energia  $E_f + E_1$  é emitido. Neste caso, foi o fóton que adquiriu parte da energia da molécula. Portanto, o processo Raman pode produzir fóton com energia maior ou menor que a energia do fóton incidente.

Conforme mostrado na situação IV da Figura 5, quando a energia do fóton diminui, gerando uma vibração da molécula, o processo é chamado de **Stokes**. Através da Figura 6a pode-se interpretar o processo Stokes de outra forma. Quando o fóton incidente de frequência  $f_o$  é espalhado por uma molécula cedendo uma quantidade de energia vibracional  $\Omega$ , produz-se um fóton  $f_s$  com deslocamento de frequência para baixo  $f_s = f_o - \Omega$ .

No caso V da Figura 5, a energia do fóton aumenta adquirindo energia de vibração da molécula. Esse processo é chamado de **anti-Stokes**. A Figura 6b mostra que quando a molécula já se encontra excitada, o fóton incidente pode absorver uma quantidade de energia vibracional produzindo um fóton  $f_A$  com frequência mais alta  $f_A = f_o + \Omega$ .



**Figura 6 - Diagramas de espalhamento Stokes (a) e anti-Stokes (b) representando o espalhamento Raman [21].**

O motivo da vibração das moléculas, mesmo antes de receberem luz, deve-se à agitação térmica. No ambiente onde a amostra se encontra existe troca calor (energia) com as

moléculas, excitando algumas delas aos seus modos normais de vibração. Em amplificadores ópticos Raman, detalhado na seção seguinte, esta agitação térmica contribui para o espalhamento Raman espontâneo produzindo ruído indesejado no sinal.

### 3.1.3 Espalhamento Raman Estimulado

O processo de espalhamento Raman pode ser estimulado pela presença de um fóton Stokes (também chamado de sinal) no momento da interação do fóton causador do espalhamento (chamado de bombeio) com a molécula. Neste caso, o processo é chamado de espalhamento Raman estimulado. A Figura 7 mostra o fenômeno envolvendo moléculas de sílica (Si-O-Si), material que compõe as fibras analisadas por este trabalho, e os fótons de sinal e bombeio. A presença do fóton de sinal estimula a emissão de um fóton Stokes idêntico a este, de forma que este processo pode ser utilizado para se obter amplificação óptica.

Vale ressaltar que a presença de fótons anti-Stokes não desencadeia processo semelhante, pois estes são absorvidos no processo de espalhamento Raman estimulado. Isso significa que o sinal, ao invés de ser amplificado, sofre atenuação uma vez que a energia deste é transferida para o bombeio.

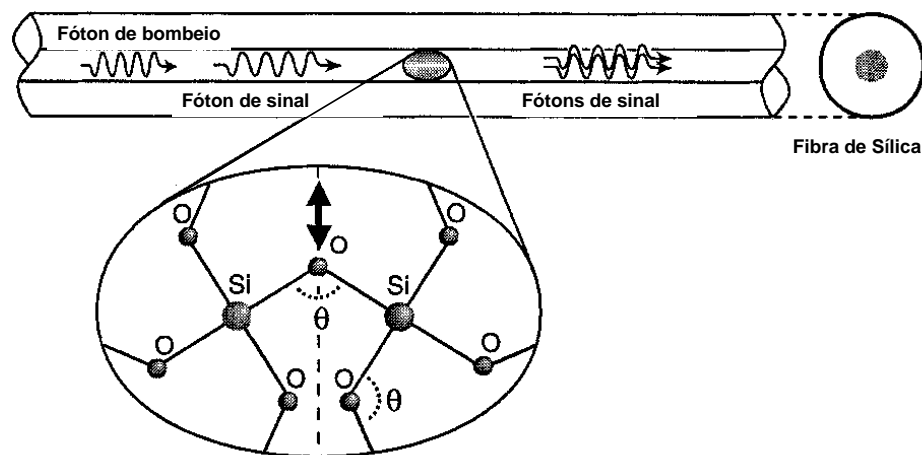


Figura 7 - Demonstração gráfica da amplificação por espalhamento Raman estimulado em uma fibra óptica de sílica. [23]

### 3.1.4 Amplificação Raman em Fibras Ópticas

Os amplificadores Raman são baseados em uma fibra que é bombeada por uma onda óptica de alta intensidade e de maior frequência que o sinal, conhecida como bombeio, responsável por transferir potência para o sinal óptico, e assim produzir amplificação através do efeito de espalhamento Raman estimulado (SRS, do inglês *Stimulated Raman Scattering*). Em outras palavras, pode-se dizer que esta transferência decorrente do efeito SRS faz com que bombeio ceda parte da energia para o sinal e a outra parte é transformada em energia vibracional.

Um dos parâmetros mais importantes nos amplificadores em geral é o ganho. No caso dos amplificadores ópticos Raman o ganho é definido principalmente pela diferença entre a frequência do sinal e do bombeio, também chamada de deslocamento em frequência. Porém, conforme já comentado na seção anterior, porém sob outro ponto de vista, se a frequência de sinal for maior que a de bombeio, o sinal sofrerá absorção não-linear ao invés de amplificação.

O fato de a sílica fundida ( $\text{SiO}_2$ ) ser um material amorfo faz com que os níveis de energia vibracionais sejam largos, o mesmo ocorrendo com o espectro de ganho Raman, que é apresentado na Figura 8.

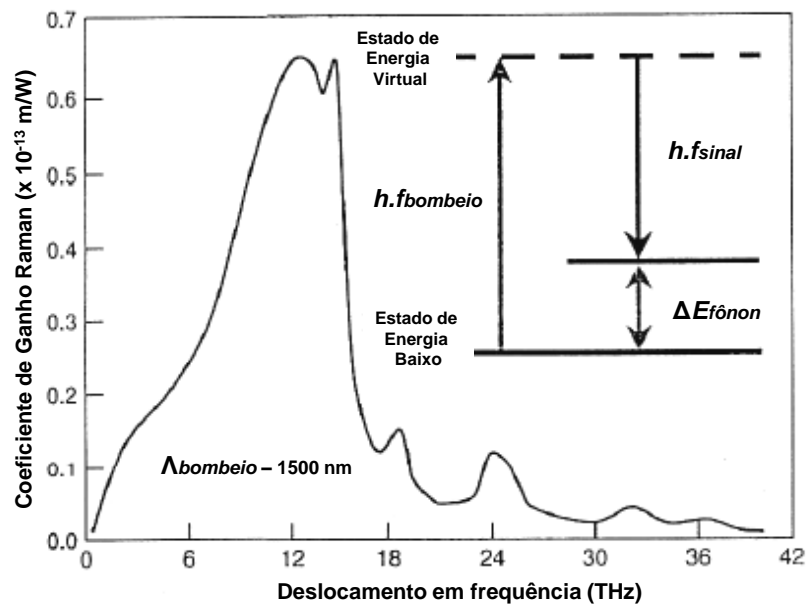
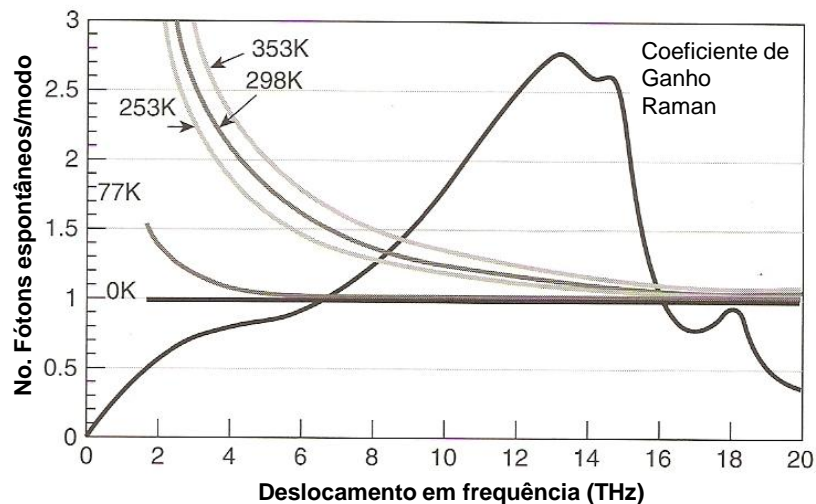


Figura 8 – Curva de ganho Raman para fibra de Sílica para bombeio e sinal co-polarizados [22]

O grande diferencial de ganho Raman em fibras de sílica é exatamente que o coeficiente de ganho Raman  $g_R$  se estende por uma larga de faixa de frequências (40 THz) e pode ser ajustado de acordo com o deslocamento em frequência. Pode-se observar um pico dominante quando o deslocamento é cerca de 13,2 THz. Como o bombeio não é ressonante com os níveis vibracionais, a banda de ganho se desloca de acordo com o comprimento de onda deste. Suponhamos, portanto, que o sinal o qual se deseja amplificar esteja em um comprimento de onda de 1550 nm. Dessa forma para obter máximo ganho, o comprimento de onda do bombeio deve estar ajustado para aproximadamente 1450 nm, o que equivale a 13,2 THz. Quando o deslocamento em frequência é pequeno, a temperatura passa a ter maior importância, pois há um aumento na emissão espontânea de fótons que gera ruído no sinal como mostra a figura abaixo [22]. Na maior parte deste trabalho o deslocamento em frequência será ajustado para se atingir o ganho Raman máximo e, portanto, não sofrendo de forma relevante o efeito da emissão espontânea gerada pela temperatura e causadora de ruído no sinal transmitido.

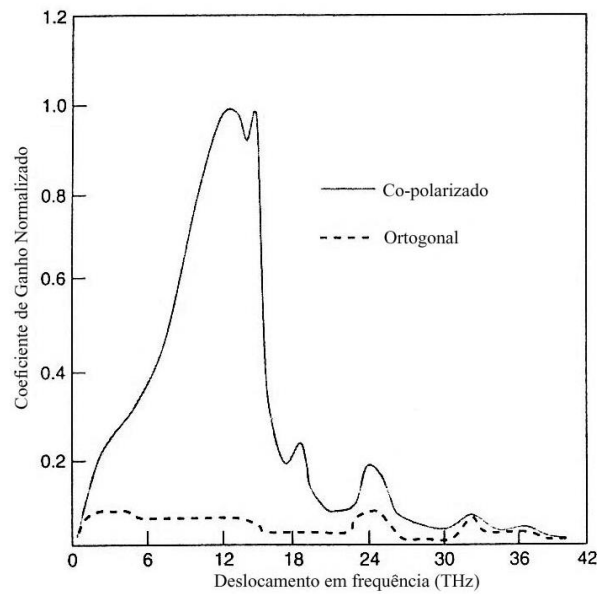


**Figura 9 – Número de fótons emitidos espontaneamente por modo versus o deslocamento em frequência em diferentes temperaturas [22].**

Além do deslocamento em frequência, a Figura 10 mostra que o ganho também depende do estado relativo de polarização entre o laser de bombeio e o de sinal. Quando o bombeio está co-polarizado com o sinal o coeficiente de ganho Raman é máximo e chega a ser cerca de uma ordem de magnitude maior que o coeficiente de ganho Raman na polarização ortogonal próximo ao pico da curva Raman. Porém, para se ter um amplificador



Raman independente da polarização pode-se utilizar diversos lasers de bombeio para prevenir as perdas por desalinhamento de polarização. Comumente, amplificadores Raman usam fibras suficientemente longas (alguns quilômetros) e bombeios contra-propagantes ou despolarizados, que fazem com o que o coeficiente de ganho Raman caia pela metade do valor obtido com o sinal e bombeio co-polarizados, porém a curva do coeficiente Raman mantém suas características independentemente da polarização do sinal.



**Figura 10 – Coeficiente de ganho Raman normalizado para bombeio e sinal co-polarizados e polarizados ortogonalmente [22].**

No caso de onda contínua, a interação entre o bombeio e o sinal é governada pelas seguintes equações [22]:

$$\frac{\partial P_S}{\partial z} = \frac{g_R}{A_{eff}} P_P P_S - \alpha_S P_S \quad (10)$$

$$\frac{\partial P_P}{\partial z} = -\frac{\omega_p}{\omega_s} \cdot \frac{g_R}{A_{eff}} P_P P_S - \alpha_P P_P, \quad (11)$$

onde os coeficientes de atenuação em escala linear  $\alpha_S$  e  $\alpha_P$  representam as perdas na fibra nos comprimentos de onda do sinal e do bombeio respectivamente,  $P_P$  e  $P_S$  são as potências

do sinal e do bombeio que variam ao longo da fibra,  $g_R$  é o coeficiente de ganho Raman,  $A_{eff}$  é a área efetiva e  $\omega_p$  e  $\omega_s$  são as frequências do bombeio e do sinal respectivamente.

Estas equações assumem que o bombeio e o sinal são co-propagantes. Para sinal contra-propagante com o bombeio o lado esquerdo da equação 11 troca de sinal.

Para simplificar a solução considerando sinais de baixa intensidade, pode-se desprezar o primeiro termo do lado direito da equação 10. Neste caso a potência do sinal pode ser expressa como:

$$P_S(z) = P_S(0) \exp((g_R/A_{eff})P_p z_{eff} - \alpha_S z), \quad (12)$$

onde:

$$z_{eff} = \frac{1 - \exp(-\alpha_p z)}{\alpha_p} \text{ é o comprimento efetivo da fibra,}$$

$\frac{g_R}{A_{eff}}$  é a eficiência do ganho Raman, com  $g_R$  sendo o coeficiente de ganho Raman,

$A_{eff}$  é a área efetiva de interação entre sinal e bombeio,

$P_S(z)$  é a potência do sinal no final da fibra óptica (saída do amplificador),

$P_S(0)$  é a potência do sinal no início da fibra óptica (entrada do amplificador),

$P_p$  é a potência do laser de bombeio na entrada da fibra.

Para sílica,  $g_R$  tem um valor de aproximadamente  $0,65 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ , em um comprimento de onda de 1500 nm e para o caso de sinal e bombeio co-polarizados, conforme mostrado na Figura 8. No entanto, a amplitude de  $g_R$  varia com o comprimento de onda de bombeio, sendo inversamente proporcional ao comprimento de onda do pico do espectro de ganho correspondente.

Em função da equação 12, busca-se que as fibras ópticas, para operarem como amplificadores Raman, tenham:

- Coeficiente de ganho Raman elevado
- Comprimento efetivo longo (o que significa comprimento longo e baixa atenuação para o bombeio)
- Área efetiva pequena
- Baixa atenuação

Por causa das necessidades citadas acima em se ter um longo comprimento de fibra com núcleo de tamanho reduzido, é possível combinar o processo de amplificação com a compensação de dispersão cromática. Para que o ganho Raman seja mais eficiente, é necessária que a área efetiva seja a menor possível. Dentre as fibras mais utilizadas comercialmente, as fibras de compensação de dispersão, conhecidas como DCF (do inglês, *Dispersion Compensation Fibers*), apresentam as menores áreas efetivas  $A_{eff}$ , resultando na maior eficiência de ganho Raman. Na seção seguinte, serão apresentadas as características das DCFs e suas limitações.

## 3.2 COMPENSAÇÃO DE DISPERSÃO

### 3.2.1 Contexto Histórico

Para compensar o alargamento dos sinais transmitidos ao longo de fibras ópticas decorrente da dispersão, vários dispositivos vêm sendo desenvolvidos para permitir a transmissão a longas distâncias e a altas taxas. Lin *et al.* propuseram a primeira solução com o uso das fibras compensadoras de dispersão (DCF) em 1980 [18]. Doze anos depois, foi feita a primeira demonstração do uso das DCFs [24]. Atualmente mais de 10.000 módulos DCFs já foram comercializados e estão em operação [1]. Além das atuais DCFs, pesquisadores estão desenvolvendo fibras de ordem modal mais elevada (HOM-DCF), redes de Bragg de período variável gravadas em fibra óptica (CFBG) [25], compensadores de dispersão eletrônica, e as recentes fibras microestruturadas (MOFs), também conhecidas como fibras de cristal fotônico, operando como compensadoras de dispersão (DC-PCF). O foco desta pesquisa é a análise do comportamento das fibras MOF operando na compensação de dispersão e simultaneamente na amplificação Raman.

### 3.2.2 Uso e limites das DCFs

A alteração do perfil transversal de índice da fibra óptica resulta numa alteração da sua dispersão através da componente de guia de onda, possibilitando assim seu projeto de acordo com as necessidades do sistema. As DCFs são normalmente projetadas com perfil de índice de casca triplo, também chamado de perfil W. As DCFs normalmente possuem um núcleo estreito e com alto índice de refração rodeado por uma casca com baixo índice de refração seguida por um anel com índice de refração intermediário de modo a obter o valor de dispersão alto e de sinal oposto ao da dispersão da fibra de transmissão. Para se obter os índices de refração desejados do núcleo e dos anéis que o rodeiam, é necessária a adequada dopagem da sílica. No entanto este processo de dopagem apresenta certas limitações [1]. A Figura 11 apresenta um exemplo de perfil de índice de refração de tripla casca usado em uma DCF [1]. O contraste de índice entre o núcleo e os anéis que o rodeiam chega ~1%. Veremos no próximo capítulo que este contraste em MOFs é extremamente maior, resultando em valores de dispersão negativamente maiores que nas DCFs.

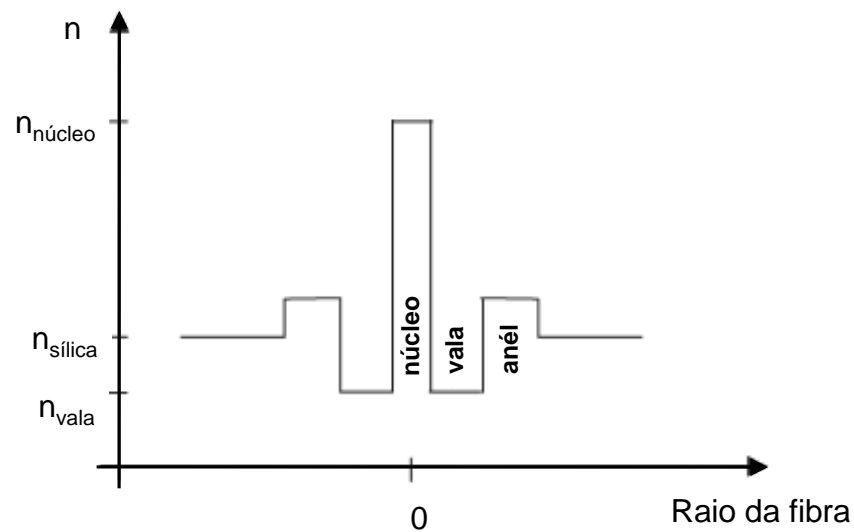


Figura 11 – Perfil de Índice de tripla casca.

Para compensar a dispersão causada pela fibra de transmissão de comprimento  $L_{TRANS}$  com valor de dispersão  $D_{TRANS}$  é necessário um comprimento  $L_{DCF}$  com dispersão  $D_{DCF}$  tal que:

$$L_{TRANS} D_{TRANS} = -L_{DCF} D_{DCF} \quad (13)$$

Quando esta equação não se satisfaz, pode-se dizer que a compensação de dispersão não é completa e o sinal após a DCF ainda possui dispersão. Pode-se definir esta dispersão residual como:

$$D_{RES} = \frac{L_{TRANS} D_{TRANS} + L_{DCF} D_{DCF}}{L_{TRANS} + L_{DCF}} \quad (14)$$

Pela equação 13, conclui-se que ao aumentar o módulo da dispersão  $D_{DCF}$ , obtém-se redução de  $L_{DCF}$ . Isso significa que com o valor de dispersão alto e de sinal oposto ao da dispersão da fibra de transmissão, a fibra de compensação de dispersão (DCF) tem a vantagem de ter seu comprimento reduzido.

Constata-se que para se obter maiores valores de dispersão, é necessário aumentar o índice de refração do núcleo [1]. Contudo, isso pode ser feito até certo limite antes que a fibra passe a suportar mais de um modo de propagação. Este comportamento deve ser evitado, pois

degrada o sinal propagado. Outro problema em aumentar o índice de propagação do núcleo é a elevação das perdas.

Os valores típicos de dispersão de DCFs comerciais são mostrados na Tabela 4 [1]. Estas DCFs são específicas para cada tipo de fibra de transmissão, tais como as convencionais (SMF, do inglês *Standard Single Mode Fiber*) e as de dispersão deslocada não-nula (NZDSF, do inglês *Non-zero Dispersion Fiber*).

TABELA 4  
PROPRIEDADES TÍPICAS DE ALGUMAS FIBRAS DCF COMERCIAIS DA OFS EM 1550NM

Tipo de Fibra	Dispersão [ps/nm.km]	RDS [nm <sup>-1</sup> ]	FOM [ps/nm.dB]	Perda por Emenda SMF [dB]	Área Efetiva [μm <sup>2</sup> ]	$n_2$ [10 <sup>-20</sup> m <sup>2</sup> /W]	
DCF para fibra monomodo padrão (SMF)							
	EWBDK	-120	0.0036	280	0.35	21	2.7
	MicroDK	-125	0.0036	220	0.05	15	2.7
	LLDK	-170	0.0036	340	0.10	21	2.5
	HFDK	-250	0.0036	420	0.20	15	2.7
DCF para fibra de dispersão não nula (NZDSF)							
	HSDK	-95	0.0065	160	0.25	15	2.7
	EHSDK	-160	0.01	270	0.20	14	2.7
	UHSDK	-110	0.017	170	0.40	14	2.7

Observa-se na tabela a presença de uma figura de mérito (FOM, do inglês, *Figure of Merit*) que é a razão entre a dispersão  $D_{DCF}$  e o coeficiente atenuação  $\alpha_{DCF}$  da DCF:

$$FOM = -\frac{D_{DCF}}{\alpha_{DCF}} \quad (15)$$

Quanto maior o valor deste parâmetro, melhor será o desempenho da DCF no que diz respeito a alto valor de dispersão e a baixa perda.

Além disso, constata-se que os valores de dispersão são sempre negativos e mais elevados em módulo quando comparados com os valores de dispersão da tabela 2 relativa às fibras de transmissão.

Tanto na fibra de transmissão, quanto na DCF, a dispersão varia com o comprimento de onda. Para se conseguir uma compensação de dispersão para uma ampla faixa de comprimentos de onda, a variação espectral da dispersão das DCFs deve acompanhar a

variação das fibras de transmissão. Para que isto aconteça, a inclinação relativa de dispersão (RDS, do inglês *Relative Dispersion Slope*), definida como a razão entre a inclinação da dispersão (*Dispersion Slope*) e a dispersão, de ambas as fibras deve ser a igual:

$$RDS_{DCF} = RDS_{TRANS} \quad (16)$$

Pode-se perceber, portanto, que os valores de RDS da Tabela 4 se aproximam bastante dos valores das fibras de transmissão dados na Tabela 2. Note, porém, que o casamento dos valores de RDS assume que a dispersão varia linearmente com o comprimento de onda. Como isto não ocorre na prática, a compensação ocorre em uma faixa espectral limitada (Largura de Banda Útil).

O valor recorde alcançado para a largura de banda útil foi de 165 nm com uma dispersão residual de  $\pm 0.18 \text{ ps/nm.km}$  [26]. A Figura 12 mostra um exemplo de compensação de dispersão apresentado por Nielsen *et al.*, onde a largura de banda útil com dispersão residual de  $\pm 0.05 \text{ ps/nm.km}$  alcançou valores de aproximadamente 50 nm [1].

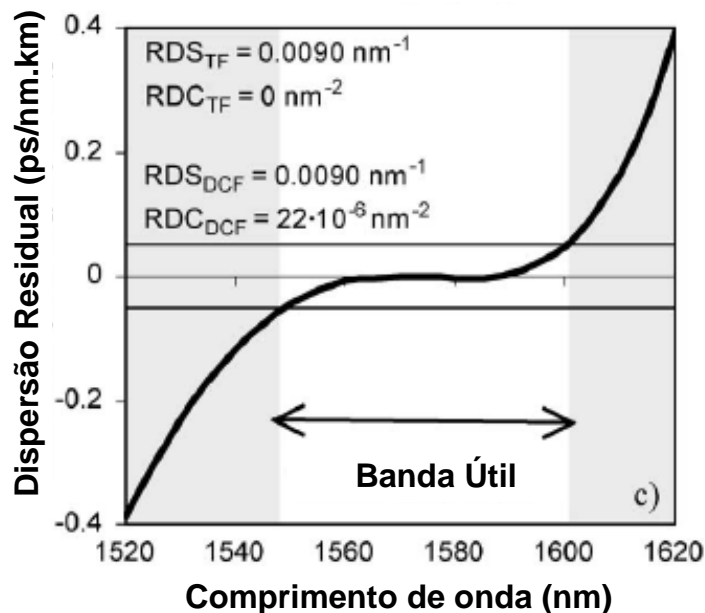


Figura 12 – Dispersão residual e largura de banda útil utilizando-se DCF tipo TWRS [1].

## 4 FIBRAS ÓPTICAS MICROESTRUTURADAS (MOFs)

Neste capítulo são apresentados os conceitos das fibras ópticas microestruturadas, o processo de guiamento da luz nestas fibras, o método de fabricação e principalmente as aplicações destas fibras em comunicações ópticas. Pretende-se mostrar que as fibras ópticas microestruturadas podem ser empregadas na compensação de dispersão e na amplificação baseada em Raman de modo a recuperar satisfatoriamente o sinal degradado ao longo de uma fibra de transmissão.

### 4.1 TECNOLOGIA DAS FIBRAS MICROESTRUTURADAS

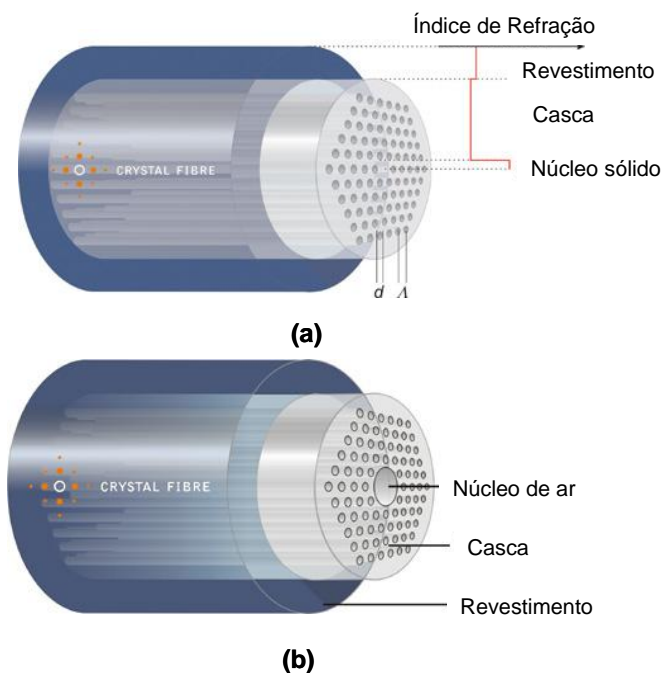
As novas fibras, conhecidas como fibras microestruturadas (MOF, do inglês *Microstructured Optical Fibers*) ou fibras de cristal fotônico (PCFs, do inglês *Photonic Crystal Fibers*) são constituídas por uma matriz periódica de capilares que circunda o núcleo e é responsável pelo guiamento da luz. Os capilares ou túneis correm paralelos ao eixo e ao longo de toda extensão da fibra. O núcleo pode ser de sílica, polímero ou mesmo ar.

As MOFs baseadas em núcleo sólido apresentam um alto índice de refração do núcleo e funcionam como as fibras convencionais, guiando a luz através do princípio da reflexão interna total. Já que, como veremos, a casca microestruturada apresenta um índice de refração médio (índice efetivo) mais baixo.

As fibras microestruturadas de núcleo oco se caracterizam pelo baixo índice de refração do núcleo, já que a luz viaja através do ar. O espaçamento entre os buracos de ar na parte que envolve a fibra deve ter dimensões da mesma ordem do comprimento de onda da luz que se pretende guiar no seu núcleo. A região microestruturada cria, então, ao redor do núcleo, uma zona proibida para certos comprimentos de onda, um “*band-gap*”, obrigando a luz a ficar confinada no núcleo da fibra.



Na Figura 13, são mostradas MOFs de núcleo sólido (a) e vazado (núcleo oco) (b), correspondendo respectivamente às categorias de alto e baixo índice de núcleo. Esse trabalho se concentra no estudo das fibras de núcleo sólido e a partir daqui, a denominação MOF está sempre relacionada às fibras microestruturadas com núcleo sólido.



**Figura 13 – Tipos de fibras microestruturadas: (a) MOF de núcleo sólido; (b) MOF de núcleo oco. [27]**

Uma das diferenças entre as fibras convencionais e as novas é que as MOFs não se baseiam em dopantes químicos para a obtenção de variações no índice de refração. Uma vantagem fundamental das MOFs é a possibilidade de se projetar a microestrutura formada por buracos e vidro de maneira que a fibra apresente propriedades escolhidas segundo a necessidade de cada caso.

Desta forma, as MOFs podem apresentar propriedades incomuns, como a grande capacidade de controle de dispersão devido à flexibilidade em se modelar o perfil de índice de refração através da variação da geometria da MOF; o maior controle dos efeitos não lineares; a ausência de frequência de corte e o alto confinamento de luz devido à maior diferença entre índices de refração de núcleo e casca. Estas características diferenciam-nas das fibras convencionais tanto com relação a propriedades quanto no que diz respeito a aplicações.

Elas podem possuir, por exemplo, diâmetros de núcleo de aproximadamente  $1\mu\text{m}$  e áreas efetivas muito pequenas, o que leva a uma não-linearidade muito alta. Isto é fundamental para se conseguir altos ganhos na amplificação Raman.

## 4.2 GUIAMENTO DA LUZ

O guiamento das fibras ópticas convencionais baseia-se no processo de reflexão interna total (TIR, do inglês *Total Internal Reflection*) o qual define que para que a luz seja guiada ao longo de uma fibra, a mesma deve estar confinada no núcleo central por reflexão total na interface com a camada externa que a envolve. Para isto, é necessário que o índice de refração do núcleo ( $n_1$ ) seja maior que o índice de refração da casca ( $n_2$ ).

Em MOFs, pelo fato da casca ser composta por buracos e vidro, com índices de refração distintos, não é possível se ter um índice de casca ( $n_2$ ) definido. Desta forma, é necessária a análise da fração da área da casca ocupada por ar, chamada em inglês de *air-filling fraction*, que, para uma matriz triangular de furos, é dada por:

$$f = \frac{A_{ar}}{A_{total}} = \frac{\pi d^2}{2\sqrt{3}\Lambda^2}, \quad (17)$$

onde  $d$  é o diâmetro do furo e  $\Lambda$  é o espaçamento entre furos, conforme mostra a Figura 13a.

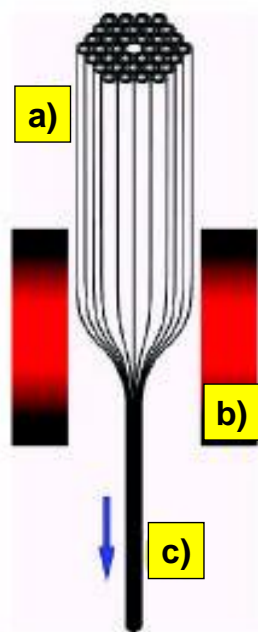
Quando  $f$  cresce, cresce também a interação da luz propagada com os furos, levando a um decréscimo do índice de refração efetivo  $n_2$ . Quando  $f$  tende a 1, o índice de refração da casca também tende a 1 (índice do ar). Com isso, imensos contrastes de índice são obtidos, fazendo com que praticamente toda a luz fique confinada no núcleo da fibra.

Além disso, quanto maior o comprimento de onda, maior a quantidade de luz guiada que se propaga pelos furos, de modo que o índice de refração efetivo da casca diminui. Quanto maior for  $f$ , mais acentuada será a variação do valor deste índice de refração efetivo com o comprimento de onda [28]. A forte dependência de  $n_2$  com comprimento de onda também leva, naturalmente, a uma dispersão cromática potencialmente alta.

### 4.3 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DA MOF

MOFs são produzidas usando técnicas adaptadas de métodos conhecidos para puxar feixes de fibras ópticas utilizadas em aplicações de imagens e iluminação. Este processo é constituído por uma série de estágios como mostra a Figura 14: primeiramente tubos de vidro são empilhados e fundidos juntos em um forno de alta temperatura (dependendo do tipo de vidro utilizado podem ser necessários 2000 °C) e puxados para formar um aglomerado de tubos conhecido como *cane*. Posteriormente, o *cane* é fundido novamente, reduzindo assim o diâmetro do mesmo e eliminando o espaço inicial entre os diversos tubos. Ao invés de tubos, também é possível utilizar bastões maciços de vidro para produzir regiões sólidas nas fibras microestruturadas. MOFs de núcleo sólido são, portanto, obtidas ao se substituir o tubo central por um bastão sólido. Para obter núcleos ocos basta retirar do centro do arranjo inicial um ou alguns tubos.

O processo de puxamento pode reduzir o diâmetro inicial do arranjo em até 10000 vezes, deixando os buracos internos com diâmetros tão pequenos quanto alguns nanômetros.



**Figura 14 – Estágios da fabricação das MOFs: a) Uma pilha de tubos de vidro é construída da maneira desejada (pré-forma). b) Para amolecer o vidro é utilizado um forno entre 1000 e 2000 °C. c) Então estes tubos são fundidos e puxados na forma de fibras.**

## 4.4 APLICAÇÕES DA MOF EM COMUNICAÇÕES ÓPTICAS

### 4.4.1 Uso da MOF como DCF

Recentemente, tem aumentado o interesse pelas MOFs em função das novas características apresentadas.

Em 2003, Shen *et al.* [29] reportaram teoricamente que conseguiram a compensação da dispersão de uma fibra monomodo convencional sobre uma banda de 236 nm com dispersão residual de  $\pm 0.5$  ps/nm.km utilizando-se uma MOF que possuía buracos de ar dispostos de maneira periódica e uniforme. Além disso, demonstrou-se que a dispersão da MOF atingiu valores de aproximadamente  $-474,4$  ps/nm.km em 1550 nm, o que significa ser possível compensar a dispersão de 28 vezes o comprimento da fibra convencional de transmissão (dispersão  $\sim 16,5$  ps/nm.km). Porém, a MOF modelada tinha um pequeno núcleo e conseqüentemente uma pequena área efetiva ( $1,6 \mu\text{m}^2$ ) e, portanto, apresentava uma alta perda de acoplamento com a fibra convencional.

Em 2005, resultados experimentais demonstraram [5] a fabricação de uma MOF com dispersão ainda mais negativa, de cerca de  $-1211$  ps/nm.km no comprimento de onda de 1550 nm, e que possuía RDS casado com fibras convencionais por toda a banda C (1530 nm a 1565 nm), conforme mostra a Figura 15.

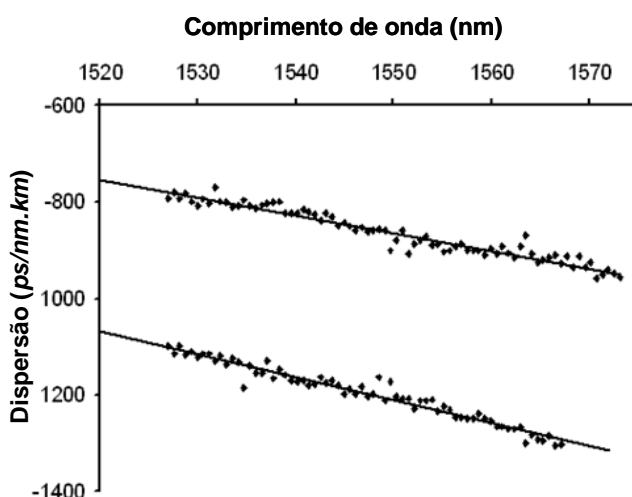


Figura 15 – Dispersão medida em dois modos de polarização da MOF fabricada. O modo mais dispersivo atinge os valores  $\text{RDS}=0,004\text{nm}^{-1}$ , que está próximo ao valor da SMF-28. [5]

O controle da dispersão nesta fibra baseava-se na geração de um perfil transversal de índice similar ao “W” de DCFs convencionais, obtido através da variação do diâmetro dos

buracos da casca. É importante mencionar que ainda hoje esta continua sendo uma das únicas demonstrações experimentais de MOFs operando como compensadoras de dispersão. O reduzido diâmetro do núcleo e o espalhamento decorrente das imperfeições levaram a uma perda de 100 dB/km, impedindo o uso prático da fibra para compensação de dispersão em enlaces reais.

Em estudo teórico mais recente [30], relata-se que a MOF poderá controlar a dispersão sobre uma faixa de comprimento de onda mais ampla do que as fibras convencionais, podendo se tornar a “nova DCF”. O modelo da MOF apresentado em [30] permite compensar a dispersão em todas as bandas de telecomunicações (de 1260 a 1625 nm) com dispersão residual de  $\pm 0,4$  ps/nm.km e ainda prover uma área efetiva ( $17,2 \mu\text{m}^2$ ) comparável com as fibras DCFs convencionais. A Figura 16 mostra os resultados da compensação de dispersão obtidos por 4 modelos de MOF (chamada de DC-PCF, do inglês *Dispersion Compensating – Photonic Crystal Fiber*) propostos por [30] para um enlace formado por uma fibra convencional SMF. Observa-se que a dispersão residual mantém-se entre  $\pm 0,8$  ps/nm.km desde 1260 a 1600 nm. A diferença entre os 4 tipos de MOF (ou DC-PCF) apresentados na Figura 16 deve-se a pequenas alterações na geometria da região microestruturada. Em particular, o modelo DC-PCF3 resultou em uma dispersão residual de  $-0,38 \sim 0,35$  ps/nm.km sobre toda as bandas de telecomunicações, porém com um valor de dispersão relativamente baixo de aproximadamente  $-50$  ps/nm.km no comprimento de onda de 1550 nm.

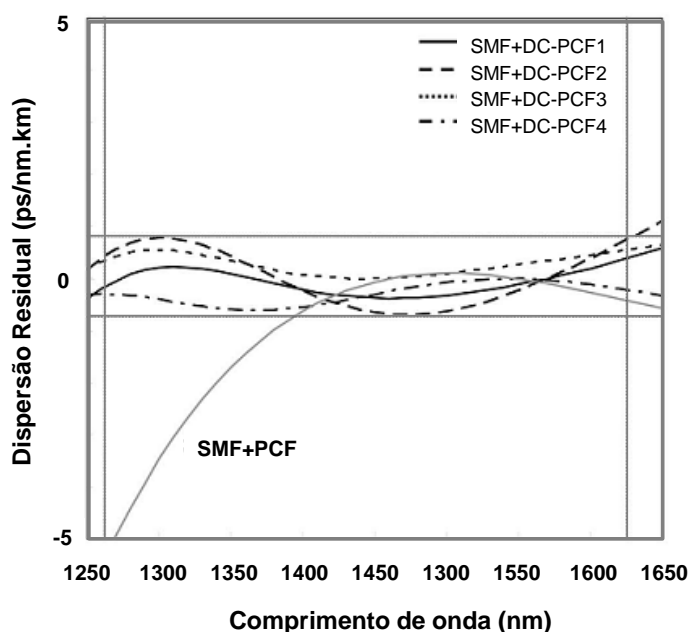
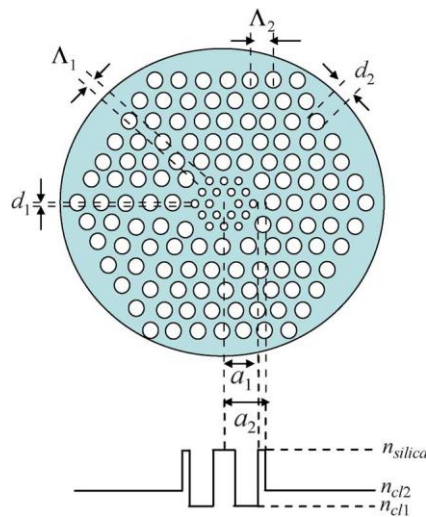


Figura 16 – Características da dispersão efetiva dos modelos de MOF [30].

Assim como em [5], em [30] para se obter uma MOF funcionando como compensadora de dispersão utiliza-se uma microestrutura possuindo anéis de buracos com diâmetros alternadamente maiores e menores que gera um perfil de índice similar ao de fibras DCF convencionais, com regiões de índice alternadamente alto e baixo (ver seção 3.2.2).

A seção transversal da MOF compensadora de dispersão proposta em [30] é mostrada na Figura 17. Pode-se observar que a fibra possui um núcleo sólido e uma concentração de buracos de menor diâmetro ( $d_1$ ) e menor periodicidade ( $\Lambda_1$ ) em torno deste, que gera um índice efetivo ( $n_{cl1}$ ) bastante baixo e buracos de maior diâmetro ( $d_2$ ) e maior periodicidade ( $\Lambda_2$ ) na casca mais externa após um anel de vidro sólido. Isso resulta em uma variação no perfil de índice desejado em uma fibra de compensação de dispersão.



**Figura 17 – Seção transversal de uma fibra microestruturada compensadora de dispersão e o perfil de índice resultante [30].**

O perfil de índice pode ser ajustado através da variação da geometria da região microestruturada dada por dois parâmetros principais: o diâmetro dos furos ( $d$ ) e o espaçamento entre eles ( $\Lambda$ ). Isto faz com que os índices efetivos possam ser melhores controlados do que os índices de casca obtidos por dopagem em DCFs convencionais, obtendo maior flexibilidade nas curvas de dispersão das MOFs compensadoras de dispersão.

Além de um maior controle do perfil de índice, as MOFs com uma diferença elevada entre o índice de refração da sílica e da casca, permitem atingir valores de dispersão muito mais elevados negativamente que as DCFs convencionais, respeitando uma tolerância aceitável da característica da dispersão aos parâmetros estruturais da fibra. O nível de dispersão que se pode alcançar está intrinsecamente ligado à área do modo: quanto menor for área modal, maior a dispersão que pode ser alcançada [5].

#### 4.4.2 Uso da MOF como DCF e Amplificador Raman

Alguns trabalhos foram feitos com MOFs no sentido de prover a compensação de dispersão simultaneamente com a amplificação Raman.

Em [9], foi proposto e experimentalmente demonstrado o uso de um modelo de MOF simplificado utilizando uma geometria uniforme em que o diâmetro dos furos e o espaçamento entre eles permanecem constantes ao longo da seção fibra. A MOF fabricada é formada por seis anéis de buracos e a seção transversal da mesma é mostrada na Figura 18.

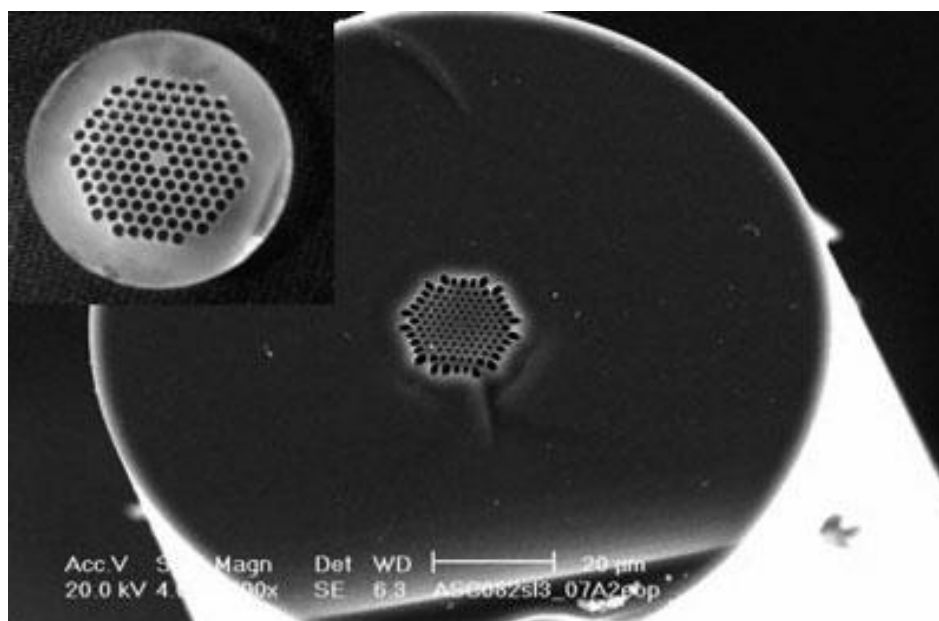
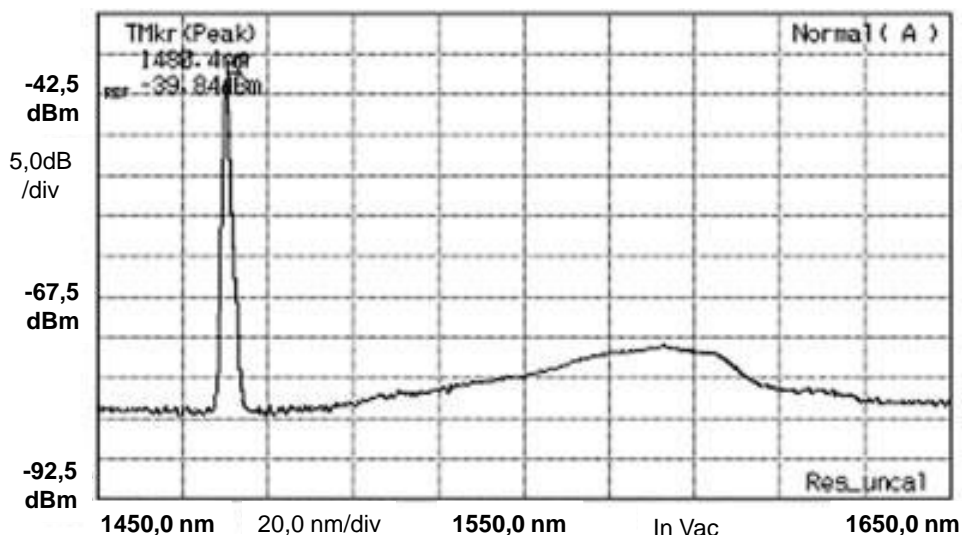


Figura 18 – Imagem da seção transversal da MOF de 125  $\mu\text{m}$  de núcleo demonstrada em [9]. O detalhe mostra a seção transversal da pré-forma de onde a fibra é puxada.

De acordo com os resultados obtidos, foi possível obter um ganho Raman *on-off* de apenas 1,5 dB. O ganho *on-off* é medido na saída da fibra comparando-se a potência de sinal com e sem laser de bombeio, não se levando em conta a perda do sinal ao longo da fibra. O baixo ganho demonstra que apesar de haver aumento do sinal ao se ligar o bombeio, a perda do sinal acarreta efetivamente em uma atenuação no amplificador. Esta atenuação deve-se às altas perdas encontradas na MOF, não só deste estudo, mas na maioria das MOFs fabricadas experimentalmente para aplicações em amplificação Raman [7].

A Figura 19 mostra o espectro de potência de saída medido em [9] depois de 100 m da MOF utilizando um laser de bombeio com potência de 1,5 W operando no comprimento de onda de 1480 nm.



**Figura 19 – Espectro de potência de saída da MOF demonstrada em [9] bombeada por um laser de alta potência em 1480 nm.**

Com relação à compensação de dispersão, a MOF apresentou resultados mais satisfatórios no que diz respeito ao que se espera de um dispositivo deste tipo. O coeficiente de dispersão foi negativo e a variação dos valores medidos foi de  $-70 \text{ ps/nm.km}$  em 1540 nm a  $-125 \text{ ps/nm.km}$  em 1560 nm. Estes resultados podem ser vistos como promissores, uma vez que estes valores estão bastante próximos aos suportados pelo estado-da-arte das fibras DCFs comerciais (ver tabela 4). Entretanto, ainda é necessário ajustar-se o RDS.

Em pesquisa realizada recentemente [13], avaliou-se teoricamente a utilização de uma fibra microestruturada de baixas perdas fabricada [12] como amplificador Raman. Para isto foi feita a análise do desempenho do ganho Raman por uma larga faixa espectral. Aproveitando a alta dispersão anômala desta MOF na banda O, este estudo também avaliou preliminarmente a fibra na função simultânea de compensar de dispersão de um enlace baseado em NZDSF nesta faixa espectral.

No que diz respeito à amplificação Raman, os resultados deste estudo demonstraram que um ganho máximo de 29,5 dB pode ser obtido em 1300 nm, correspondendo a uma figura de ruído de 5 dB e o sistema operando com um laser de bombeio de potência igual a 300 mW e com comprimento da MOF igual a 10 km.



A Figura 20 mostra a variação do ganho obtida no dispositivo em função do comprimento de onda do sinal para três comprimentos de MOF. O amplificador possuía uma largura de banda de 12 nm a 3 dB, dentro da qual a figura de ruído permanecia inferior a 5,5dB. A MOF apresentava na banda O uma área modal de  $\sim 15,5 \mu\text{m}^2$  levando a uma eficiência de ganho Raman de  $\sim 5,2 \text{ W}^{-1}\text{m}^{-1}$  [11].

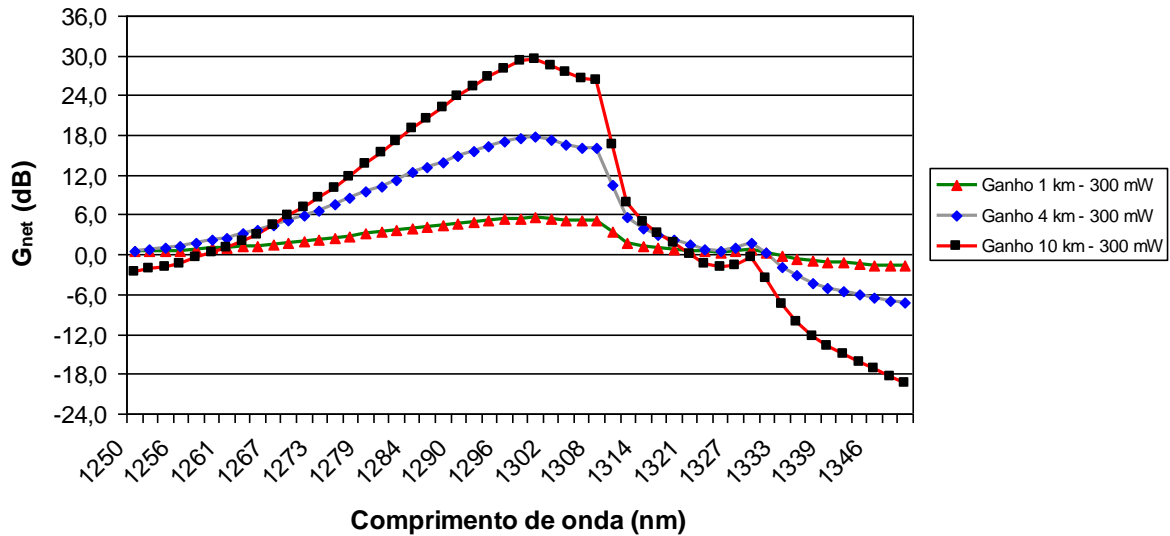
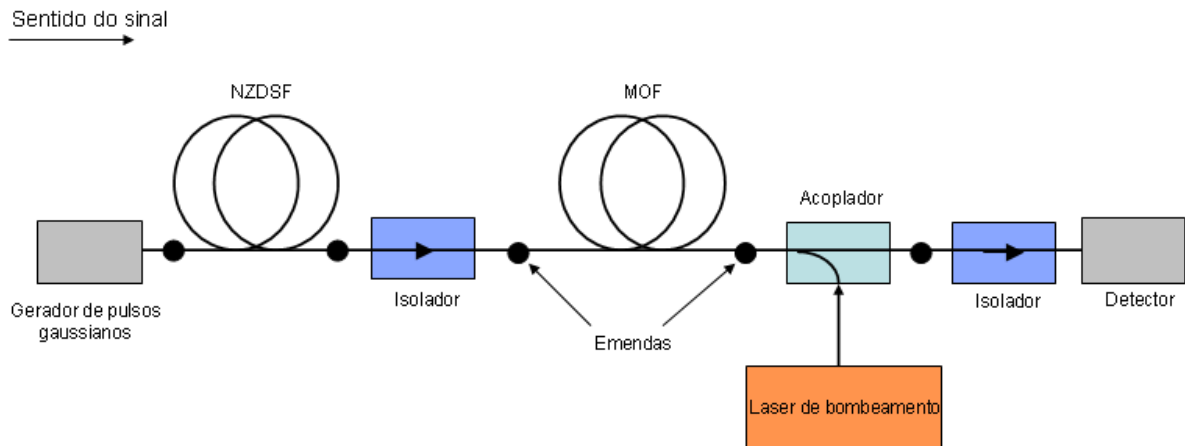


Figura 20 – Ganho Raman líquido em função do comprimento de onda para a banda O, com a variação de comprimento da fibra e bombeamento de 300 mW. [13]

Com relação à MOF na função de compensação de dispersão, o dispositivo de [13] também se mostrou promissor. Entretanto, como a taxa de operação usada no sistema foi somente de 10 Gbps, a dispersão não influenciava de forma expressiva a degradação do sinal, já que os valores de BER medidos se mostraram desprezíveis ao se anular a atenuação do enlace simulado.

Em [13] determinou-se numericamente as áreas efetivas da MOF o que permitiu determinar a eficiência do ganho e por fim o ganho Raman líquido ( $G_{\text{NET}}$ ) em função do comprimento de onda. Estes e outros parâmetros, tais como o comprimento da MOF, a atenuação, a dispersão e a inclinação de dispersão [12] foram usados no software de simulação numérica *VPI TransmissionMaker* onde foi possível montar e caracterizar a MOF operando como amplificador Raman e compensar a dispersão em um sistema completo.

A Figura 21 ilustra o sistema montado no simulador. O comprimento da NZDSF e da MOF foi mantido em 70 e 10 km respectivamente. O gerador de pulsos gaussianos gerava pulsos ideais de 30 ps em 1300 nm e com um padrão pseudo-aleatório. Assim como este transmissor, o receptor também era idealizado e correspondia a um detector diretamente ligado a um osciloscópio, onde a BER era estimada a partir de diagramas de olho.



**Figura 21 – Enlace na banda O incluindo 70 km de NZDSF e um amplificador Raman baseado em 10 km de MOF de baixa perda.**

No entanto o desempenho sistêmico do dispositivo não foi profundamente caracterizado em [13], por não se levar em conta, por exemplo, as características reais de transmissores e receptores usados em comunicações ópticas e da operação em maiores taxas de repetição. Conforme já comentado, o sistema montado [13] considerou apenas taxas de 10 Gbps e se baseou em um transmissor formado por gerador de pulsos gaussianos o que não reflete a realidade de sistemas ópticos e sem avaliar de forma expressiva função de compensador de dispersão da MOF. Desta forma, uma análise aprofundada e detalhada do sistema completo deve ser realizada.

## 5 SISTEMA ÓPTICO SIMULADO

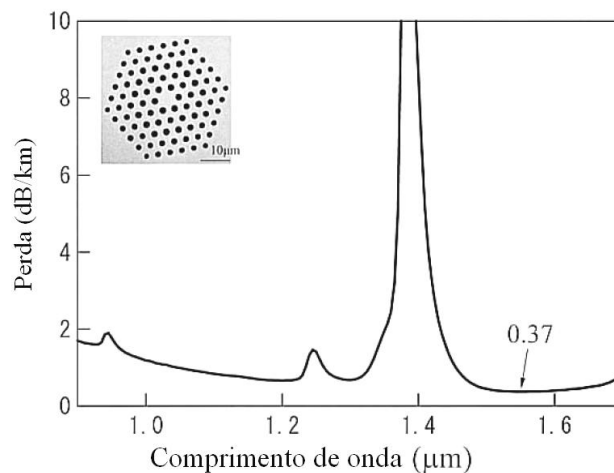
Com o objetivo de avaliar principalmente os efeitos da compensação de dispersão e simultaneamente da amplificação Raman através do uso de uma fibra microestruturada de baixa perda foi montado um sistema óptico de transmissão completo. O sistema simulado é constituído por um transmissor operando em 10 Gbps ou 40 Gbps na Banda O, uma fibra de transmissão, uma MOF que realiza as funções indicadas acima, e um receptor ligado a um analisador de taxa de erro de bit. Todos os elementos possuem características realistas. As partes que compõem o sistema bem como os testes simulados são apresentados nas próximas seções. É importante ressaltar que parte do sistema óptico aqui investigado, fará uso dos trabalhos já realizados descritos em [12] e [13]. No entanto, buscam-se realizar testes sistêmicos ainda não executados, tais como, por exemplo, a operação em taxas de 40 Gbps, o desempenho do sistema em função do comprimento do enlace e a caracterização detalhada e realista do sistema em toda a banda O.

### 5.1 DESCRIÇÃO DA MOF UTILIZADA

Esta seção dedica-se à apresentação das características particulares da fibra microestruturada utilizada neste trabalho para a construção de um dispositivo capaz de compensar a dispersão de forma simultânea a fornecer amplificação Raman, a ser descrito em seção posterior.

Em geral, a grande maioria das MOFs apresenta altas perdas prejudicando a construção de amplificadores Raman baseados nesta tecnologia. No entanto, uma MOF fabricada e descrita em [12] apresentou baixíssimas perdas através da melhora nos processos de fabricação. Além disso, esta MOF apresentou um perfil de dispersão não factível com fibras comuns. Com base nestas vantagens principais, adotamos a MOF apresentada por Tajima et al. [12] no sistema completo simulado.

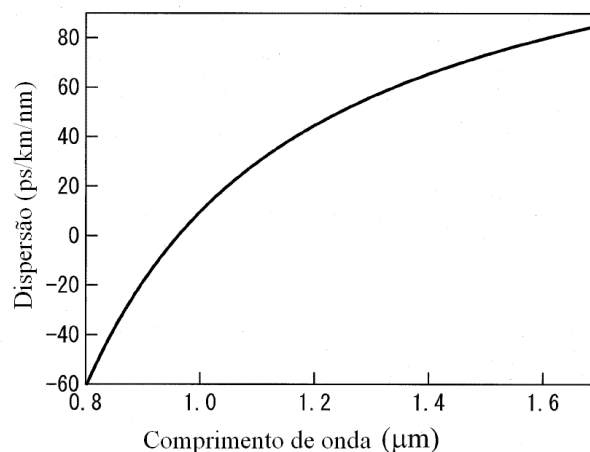
A MOF possui uma microestrutura hexagonal com 5 anéis de furos de  $2,5 \mu\text{m}$  de diâmetro ( $d$ ) e espaçamento ( $\Lambda$ ) de  $4 \mu\text{m}$ , com variações de cerca de 1% [12]. O comprimento fabricado foi de 10 km e o seu espectro de atenuação é mostrado na Figura 22. A atenuação mínima conseguida pela equipe que desenvolveu o trabalho foi de 0,37 dB/km para um comprimento de onda de 1550 nm e de 0,71 dB/km para o comprimento de onda de 1310 nm.



**Figura 22 - Espectro de atenuação da MOF de baixa perda analisada neste trabalho, e perfil de sua seção transversal. [12]**

O artigo analisado faz uma comparação entre as componentes das perdas de fibras convencionais e da MOF fabricada e comprova que os valores da MOF se aproximam das fibras monomodo convencionais, registrando uma perda total apenas 0,36 dB/km e 0,17 dB/km superior à da fibra convencional em 1310 nm e 1550 nm, respectivamente.

A MOF analisada possui valores altos de dispersão cromática, que, em 1550 nm e 1300 nm, têm valores de 76 *ps/nm.km* e 55 *ps/nm.km*, respectivamente, como pode ser visto na Figura 23. Pode-se observar também que a dispersão nula é encontrada em 950 nm. Este perfil de dispersão é bastante diferente dos obtidos em fibras convencionais, onde dispersão positiva só pode ser obtida acima de ~1300 nm. Com este perfil é possível compensar a dispersão das fibras do tipo NZDSF, que possuem valores de dispersão negativos em torno de 1300 nm.



**Figura 23 – Espectro de dispersão da MOF de baixa perda [12]**

## 5.2 DESCRIÇÃO DA FIBRA DE TRANSMISSÃO UTILIZADA

Esta seção dedica-se à apresentação das características particulares da fibra de transmissão utilizada neste trabalho. O fato da MOF adotada para este trabalho [12] possuir um valor de dispersão positivo na banda O, leva à necessidade de que a fibra de transmissão possua valores de dispersão negativos de forma a se obter uma dispersão residual próxima a zero.

Desta maneira, como meio de transmissão foi escolhida uma NZDSF modelo *TrueWave RS Fiber*, da empresa OFS [14]. NZDSFs (do inglês, *Non-zero Dispersion Shifted Fibers*) têm sido apontadas como a próxima geração de fibras de transmissão, de forma que sistemas operando em múltiplas bandas deverão estar adaptados a elas. A fibra escolhida possui uma perda de 0,35 dB/km, uma dispersão de  $-8$  ps/km/nm e uma inclinação de dispersão de  $0,047$  ps/nm<sup>2</sup>/km em  $1,31$   $\mu$ m. Vê-se, portanto, que ao contrário de fibras padrão de telecomunicações, as NZDSFs possuem valores não desprezíveis de dispersão na banda O, que devem ser levados em consideração, especialmente a altas taxas de transmissão. As curvas de atenuação e dispersão da *TrueWave RS Fiber* são apresentadas na Figura 24.

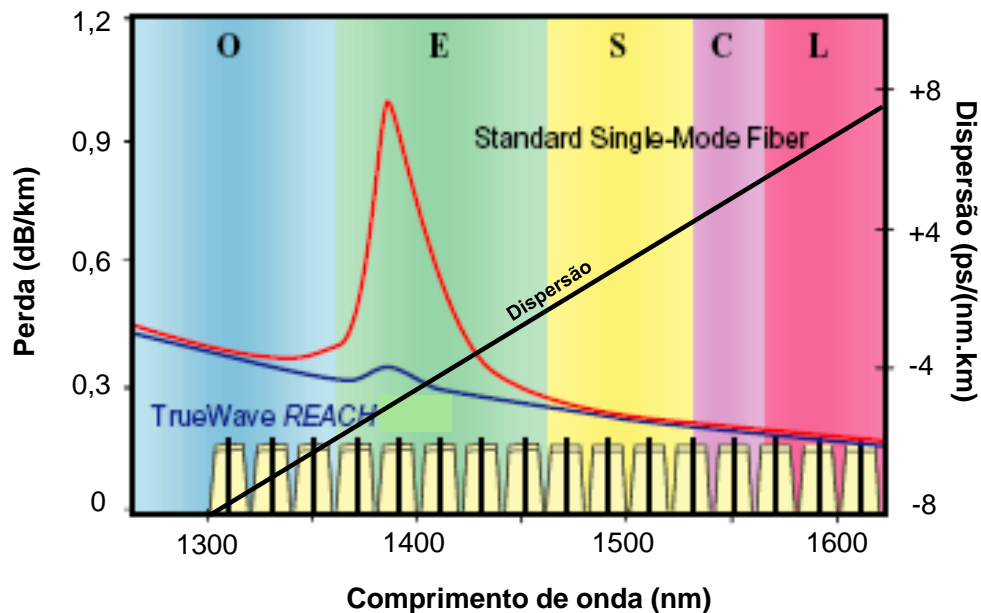


Figura 24 – Atenuação (curva azul) e dispersão (curva preta) na fibra NZDSF modelo TrueWave RS [14].

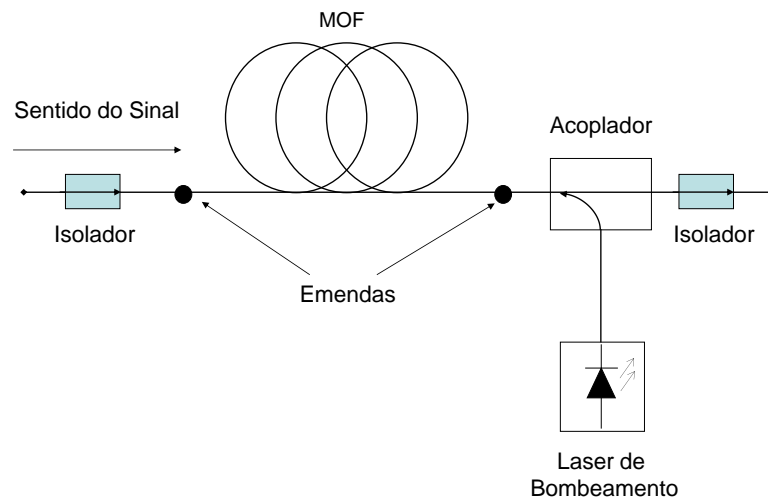
### 5.3 DESCRIÇÃO DO DISPOSITIVO BASEADO NA MOF

A presente seção pretende apresentar as características do dispositivo modelado em [13] e profundamente investigado neste trabalho.

O dispositivo (AR/CP, abreviação de Amplificador Raman/Compensador de dispersão) provê a amplificação Raman de forma simultânea com a compensação de dispersão e é formado principalmente pela MOF cujo comprimento foi mantido em 10 km[12].

Conforme já comentado, os sistemas ópticos precisam expandir para outras faixas de frequência além da banda C, e dentre as bandas disponíveis, a banda O se apresenta com baixa atenuação e baixa dispersão. Os dispositivos ópticos, tais como amplificadores Raman e compensadores de dispersão necessitam, dessa forma, se adequar a este novo espectro. Devido às fibras de transmissão de próxima geração (NZDSF) possuírem uma dispersão normal em 1,3  $\mu\text{m}$ , o dispositivo AR/CP foi dimensionado para funcionar em sistemas operando na banda O, e, mais precisamente, ajustado para compensar a dispersão em 1300 nm decorrente de uma fibra NZDSF de 70 km. Nesta situação o dispositivo AR/CP provê ganho Raman de cerca de 20 dB, considerando-se as perdas de inserção, e gera uma dispersão residual no receptor.

Para a geração do ganho Raman, foi inserido um laser de bombeio operando em 1229 nm e 300 mW de potência através de um acoplador. Isoladores foram posicionados na entrada e saída do amplificador. As perdas por inserção atribuídas aos isoladores e emendas foram levadas em conta, e possuíam valor de 1 dB na entrada e 1 dB na saída da MOF. Foi também considerada uma perda de acoplamento e emenda do laser de bombeio à MOF com valor de 1 dB. A configuração do dispositivo pode ser visualizada na Figura 25.

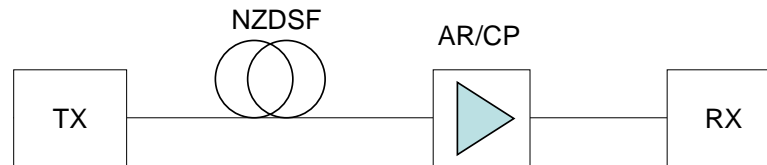


**Figura 25 – Dispositivo amplificador Raman/compensador de dispersão (AR/CP) para a banda O baseado em uma MOF real.**

## 5.4 DESCRIÇÃO DO SISTEMA SIMULADO E RESULTADOS

### 5.4.1 Configuração do sistema

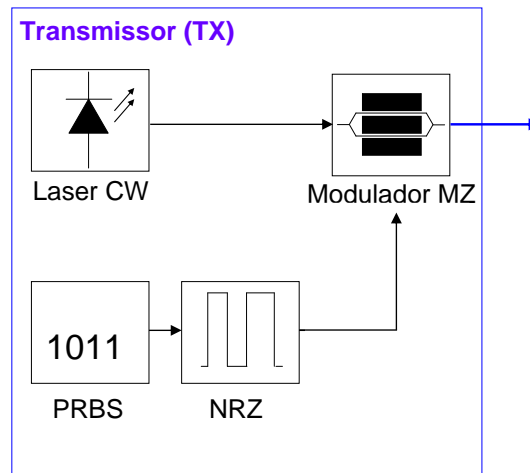
As simulações tanto do dispositivo AR/CP quanto do enlace como um todo foram realizadas através do software de simulação numérica *VPI TransmissionMaker*. A configuração do sistema pode ser visualizada na Figura 26. O sinal emitido pelo transmissor (TX) atravessa a fibra de transmissão antes de atingir o AR/CP e ser, finalmente, detectado no receptor (RX).



**Figura 26 – Configuração simplificada do enlace óptico testado numericamente.**

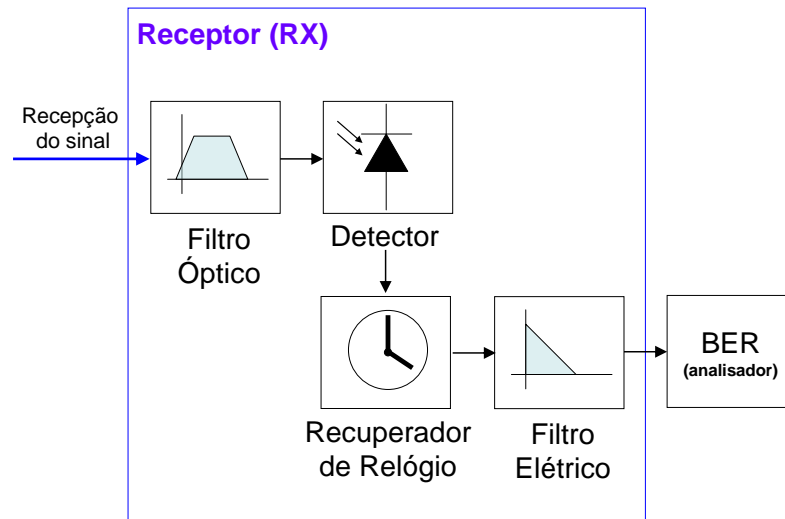
Utilizou-se a fibra de transmissão do tipo NZDSF conforme explicada na seção 5.4.2 utilizando os parâmetros informados em [14] no software *VPI*. Para a dispersão, foi possível carregar a curva característica conforme indicada na Figura 24 e no caso da atenuação utilizou-se um valor fixo de 0,35 dB/km. Para a MOF utilizada no dispositivo AR/CP, tanto a curva de atenuação como a de dispersão foram carregadas no software conforme mostra a Figura 22 e a Figura 23.

A Figura 27 mostra os elementos que compõem o transmissor (TX) do enlace simulado. Uma seqüência pseudo-aleatória de bits (PRBS, do inglês *Pseudorandom binary sequence*) é gerada e codificada por um módulo NRZ (do inglês *non-return to zero*), que modula um laser CW (em inglês, *Continuous Wave*) de 1300 nm e 1 mW de potência através de um modulador Mach-Zehnder de tempo de resposta finito ajustado para 25 ps para 10 Gbps e 6,25 ps para 40 Gbps.



**Figura 27 – Configuração interna do transmissor (TX) utilizado no sistema simulado.**

A Figura 28 mostra os elementos que compõem o receptor (RX). O sinal recebido passa inicialmente por um filtro óptico centrado no comprimento de onda do sinal, com banda passante de 40 GHz em 10 Gbps e 160 GHz em 40 Gbps. Para o detector, foi escolhido um fotodiodo do tipo PIN com responsividade  $r$  igual a 1,0 A/W e ruído térmico  $N_{th}$  igual a  $10^{-12}$ . Este está ligado a um recuperador de relógio, a um filtro elétrico do tipo Bessel passa-baixa com frequência de corte ajustada em 7 GHz para 10 Gbps e 28 GHz em 40 Gbps e, finalmente, a um analisador de taxa de erro de bit (BER) ideal.



**Figura 28 – Configuração interna do receptor (RX) utilizado no sistema testado.**

Testes foram feitos sem e com o amplificador/compensador de dispersão colocado após a NZDSF (imediatamente antes do receptor). O comprimento da fibra de transmissão foi



variado entre 20 km e 180 km para determinação da BER. O sistema completo utilizado no software de simulação numérica VPI é apresentado na Figura 29.

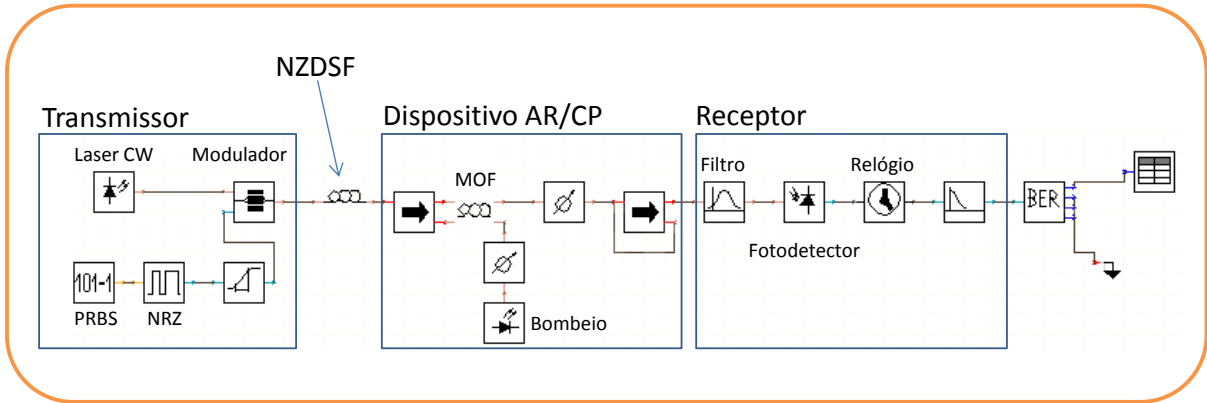


Figura 29 – Sistema completo montado no simulador VPI.

#### 5.4.2 Orçamento de Potência

O orçamento de potência (em inglês, *Power Budget*) é utilizado em sistemas ópticos para garantir que a potência no receptor seja suficiente para manter um desempenho confiável durante todo tempo de operação [15]. Dessa forma o sistema pode ser basicamente dividido em três partes: transmissor, enlace e receptor. Com base na potência média do transmissor e a potência mínima necessária no receptor, também conhecida como sensibilidade, pode-se calcular o orçamento de potência, que também pode ser compreendido como a perda máxima permitida ao longo de todo enlace. A expressão para o cálculo do orçamento de potência é dada pela equação 18 [15]:

$$P_{tr} = P_{rec} + C_L + M_S \quad (18)$$

onde  $P_{tr}$  é a potência do transmissor em dBm,  $P_{rec}$  é a potência mínima na recepção referente à sensibilidade do fotodetector também em dBm,  $C_L$  é a perda total no enlace e  $M_S$  a margem do sistema (estes dois últimos em decibéis).

A perda total no enlace  $C_L$  é expressa pela equação 19 [15] que inclui a perda da fibra de transmissão  $\alpha_f$  que cresce quanto maior o comprimento  $L$ , e as perdas por conector  $\alpha_{con}$  e emenda  $\alpha_{em}$ :

$$C_L = \alpha_f \cdot L + \alpha_{con} + \alpha_{em} \quad (19)$$

### Transmissor

Conforme informado anteriormente, os dispositivos do sistema deste trabalho possuem características realistas. Para o laser CW do transmissor utilizou-se uma potência óptica média de 1,0 mW, ou 0 dBm. Após a modulação do sinal o transmissor fornece uma potência óptica média de 250  $\mu$ W, o que equivale a -6,0 dBm. Isso significa que a potência  $P_{tr}$  do transmissor em é de -6,0 dBm.

### Receptor

No caso do receptor, o fotodetector utilizado foi do tipo PIN. Com base nos valores de ruído térmico e responsividade informados anteriormente, pode-se calcular a potência de sensibilidade. A expressão para a sensibilidade de um receptor óptico do tipo PIN está representada pela equação:

$$P_s = \frac{hf}{\eta q} Q(N_{th} \sqrt{B_e} + qQB_e) \quad (20)$$

Onde  $P_s$  representa a potência de sensibilidade do fotodetector,  $h$  é a constante de Planck,  $f$  é a frequência do sinal óptico, fator  $Q = 6$  para BER de  $10^{-9}$ ,  $\eta$  é a eficiência quântica do fotodetector,  $q$  é a carga do elétron,  $N_{th}$  é o ruído térmico,  $B_e$  é a banda passante do receptor.

A responsividade do fotodetector é dada por:

$$r = \frac{\eta q}{hf} \quad (21)$$

Combinando as equações 20 e 21, encontramos:

$$P_s = \frac{1}{r} Q(N_{th} \sqrt{B_e} + qQB_e) \quad (22)$$

Portanto a potência de sensibilidade do fotodetector utilizado em nosso sistema é de:

$$\text{Em 10 Gbps: } P_s = \frac{1}{1,0} 6(10^{-12} \sqrt{10 \times 10^9} + 1,6 \times 10^{-19} \cdot 6 \cdot 10 \times 10^9) \approx 0,6 \mu W \equiv -32 \text{ dBm} \quad (23)$$

$$\text{Em 40 Gbps: } P_s = \frac{1}{1,0} 6(10^{-12} \sqrt{40 \times 10^9} + 1,6 \times 10^{-19} \cdot 6 \cdot 40 \times 10^9) \approx 1,4 \mu W \equiv -28 \text{ dBm} \quad (24)$$

Utilizando as potências médias do transmissor e de sensibilidade do receptor, pode-se calcular teoricamente a máxima perda ( $C_{Lmáx}$ ) suportada pelo sistema:

$$\text{Em 10 Gbps } \rightarrow C_{Lmáx} = -6 \text{ dBm (Transmissor)} + 32 \text{ dBm (Receptor)} = 26 \text{ dB} \quad (25)$$

$$\text{Em 40 Gbps } \rightarrow C_{Lmáx} = -6 \text{ dBm (Transmissor)} + 28 \text{ dBm (Receptor)} = 22 \text{ dB} \quad (26)$$

Pode-se observar nas equações 25 e 26 que  $C_{Lmáx}$  corresponde a uma margem  $M_S$  nula. Mais adiante, a perda máxima acumulada acima será comparada aos níveis de BER em função do comprimento do enlace. A introdução do AR/CP efetivamente reduz a perda no enlace, aumentando a potência que chega ao receptor.

### 5.4.3 Análise da Dispersão Residual

De acordo com a equação 13 apresentada anteriormente, buscam-se fibras do tipo DCF capazes de compensar a dispersão gerada ao longo de uma fibra de transmissão. Isso ocorre, em primeira aproximação, quando o comprimento da DCF vezes a dispersão da DCF é igual ao comprimento da fibra de transmissão vezes a dispersão da mesma. Naturalmente, parâmetros de dispersão de mais alta ordem também devem ser compensados para um melhor desempenho do sistema.

O sistema em estudo opera e é otimizado para apenas um comprimento de onda (1300 nm). No entanto, com base nas curvas de dispersão da MOF e da NZDSF apresentadas nas Figura 23 e Figura 24, podemos calcular a dispersão residual definida pela equação 14 para toda Banda O conforme mostra a Figura 30.

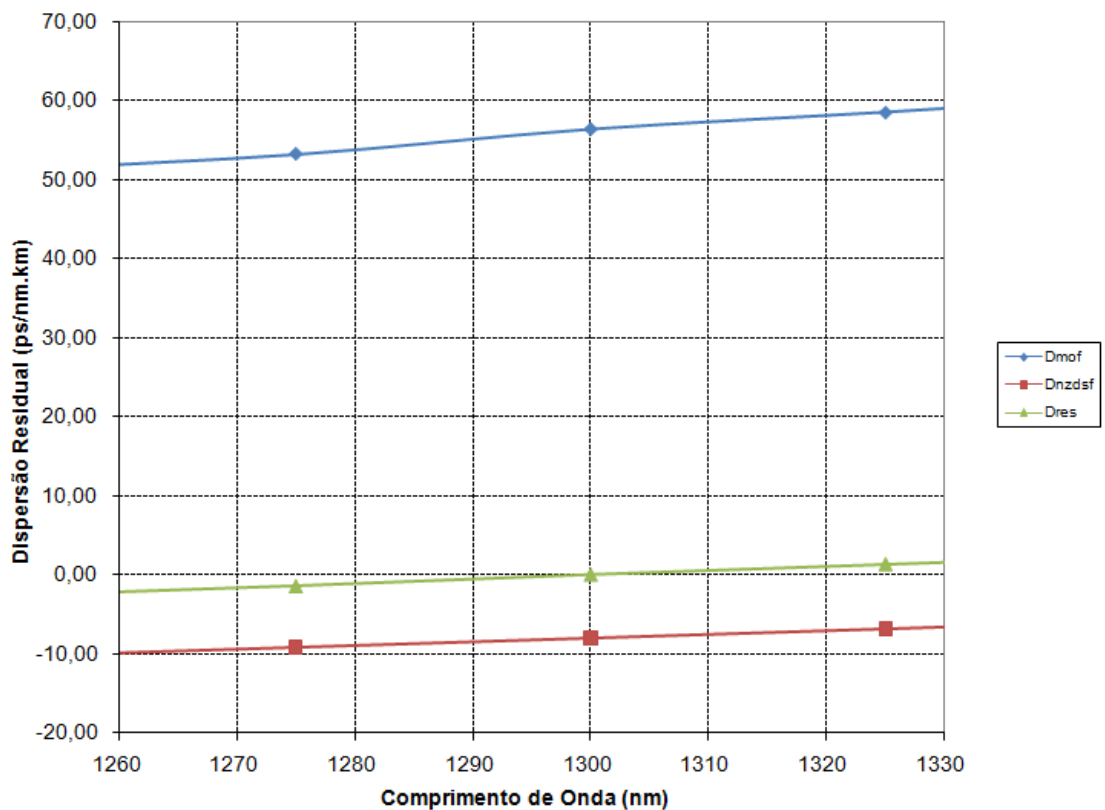


Figura 30 – Dispersão residual para toda Banda O para o sistema em estudo.

O sistema está dimensionado para compensar totalmente a dispersão em 1300 nm conforme indica a curva em verde. As curvas em vermelho e azul são, respectivamente, a

dispersão da fibra de transmissão de 70 km e da MOF que possui 10 km. A largura de banda útil depende dos níveis de dispersão residual considerados aceitáveis. Utilizando-se o mesmo critério usado em [1] (dispersão residual máxima de  $\pm 0,05 \text{ ps/nm.km}$ ), obtém-se uma largura de banda útil de 0,8 nm, que é bastante inferior aos das DCFs comerciais que apresentam 50 nm [1]. Usando-se o mesmo critério de dispersão residual máxima de  $\pm 0,18 \text{ ps/nm.km}$ , que levou ao recorde de largura de banda útil (165 nm) apresentada por [26], nosso sistema obteve  $\sim 7$  nm. Isso ocorre, pois a curva de dispersão da MOF não acompanha a curva de dispersão da NZDSF de forma a anular a dispersão em outros comprimentos de onda. Na realidade a MOF apresenta inclinação de dispersão de sinal oposto ao desejável. Entretanto, como será mostrado, o uso da MOF viabiliza a transmissão em enlaces de 70 km em faixas bem mais largas do que as previstas utilizando-se os critérios acima.

#### 5.4.4 Resultados obtidos de BER vs comprimento do enlace

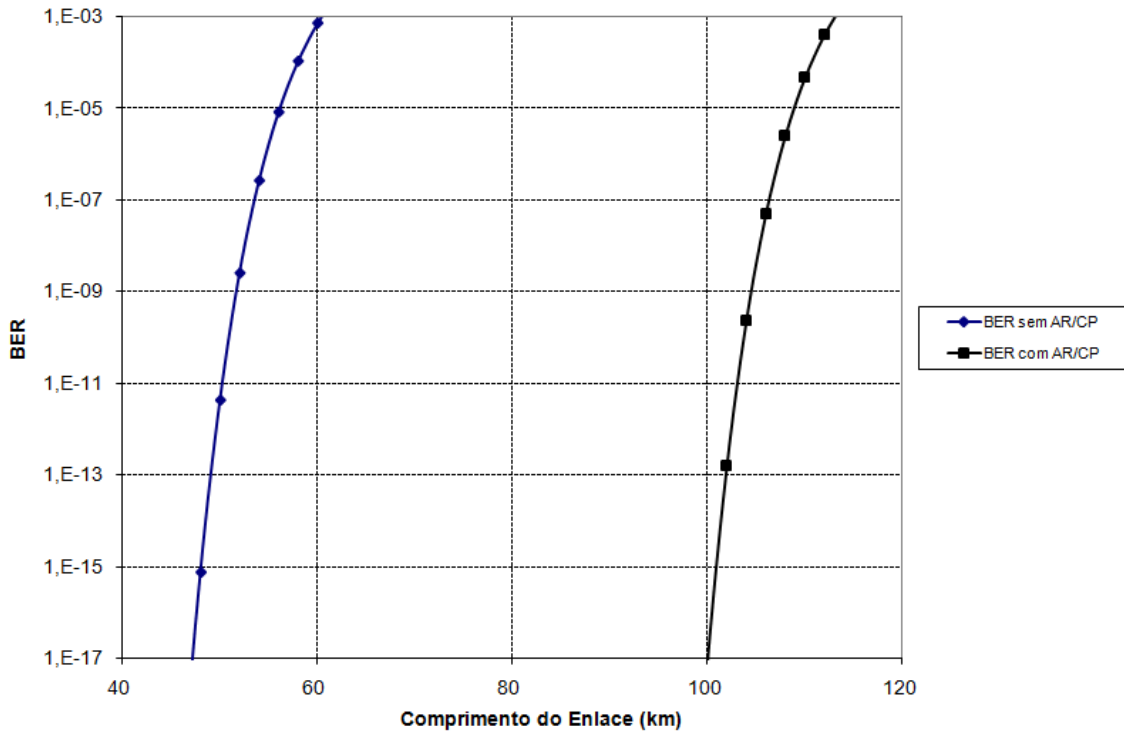
Nesta seção são apresentados resultados obtidos com o software de simulação *VPI TransmissionMaker* realizadas com o sistema óptico completo apresentado na seção 5.4.1. O objetivo é verificar o comprimento máximo do enlace entre o transmissor e o receptor sem o uso do dispositivo (AR/CP) respeitando a qualidade mínima do sinal exigida pelo receptor ( $\text{BER} < 10^{-9}$ ); e verificar, com o uso do dispositivo, em quanto é possível se estender o comprimento do enlace.

O software VPI é instalado sob um computador pessoal de configuração padrão (processador de 1 GHz, memória RAM de 512 MB e disco rígido de 60 GB) e os tempos das simulações variam com a complexidade do sistema montado (número de canais, taxa de repetição, precisão e quantidade de pontos de medições, etc.). Nas simulações realizadas, cada simulação levou cerca de 2 a 3 minutos para mostrar os resultados após montado o sistema.

Basicamente, estes testes foram feitos variando-se o comprimento do enlace e medindo-se a taxa de erros (BER). Além disso, foram executadas simulações utilizando-se taxas de repetição de 10 Gbps e 40 Gbps. O transmissor foi ajustado para operar com comprimento de onda de 1300 nm (ou 230,61 THz) e potência óptica de 1 mW antes do modulador. O laser de bombeio foi ajustado para operar em 1229 nm (ou 243,81 THz) com potência óptica de 300 mW.

### Sistema operando em 10 Gbps

O gráfico da Figura 31 mostra o resultado obtido para o sistema operando a taxas de 10 Gbps. São apresentados os valores de BER medidos com e sem o uso do dispositivo AR/CP responsável por compensar a dispersão e amplificar o sinal, em função do comprimento de NZDSF utilizado no enlace.

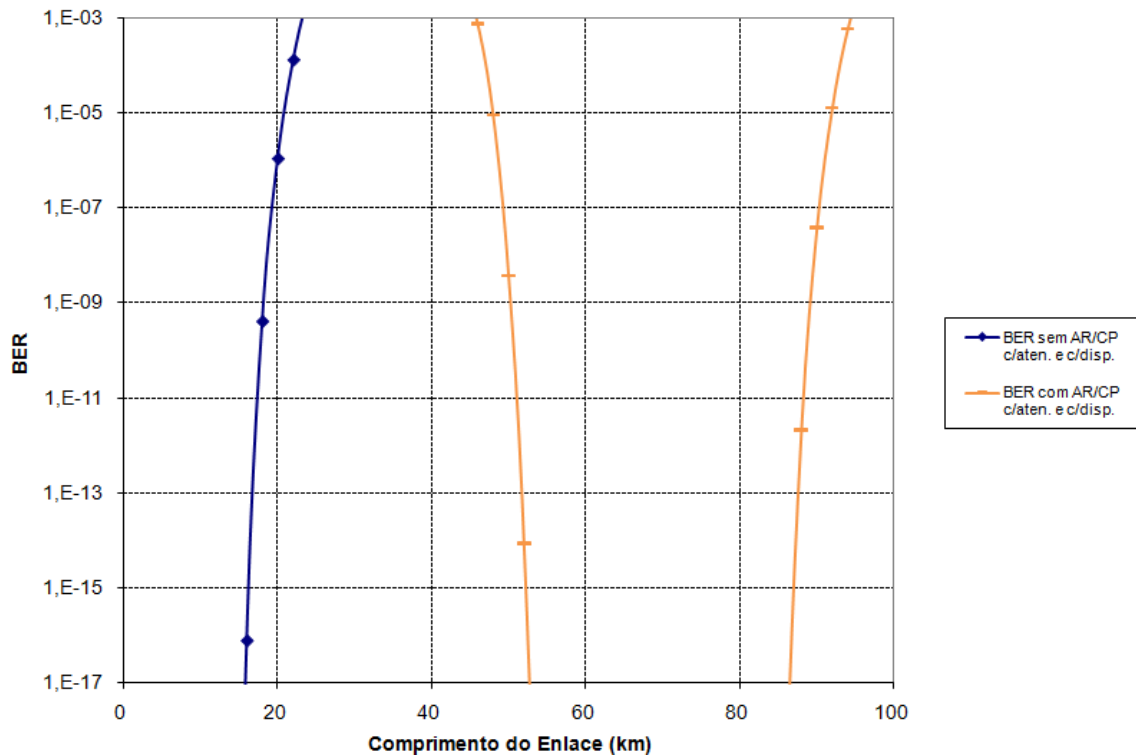


**Figura 31 – Curva de BER em função do comprimento da NZDSF para sistema operando em 10 Gbps. A curva em azul representa a variação da BER sem o uso do dispositivo AR/CP. A curva em preto representa a BER com o uso do dispositivo.**

Pode-se observar que sem o uso do dispositivo AR/CP (curva em azul) a BER excede o valor de  $10^{-9}$  para comprimentos de enlace acima de 54 km, enquanto que o uso do dispositivo permite praticamente dobrar o comprimento do enlace óptico estendendo-o a até 106 km.

### Sistema operando em 40 Gbps

O gráfico da Figura 32 mostra os resultados obtidos com sistema operando a taxas de 40 Gbps. Da mesma forma, são apresentados os valores de BER obtidos com e sem o uso do dispositivo AR/CP responsável por compensar a dispersão e amplificar o sinal, em função do comprimento de NZDSF utilizado no enlace.



**Figura 32 – Curva de BER em função do comprimento da NZDSF para sistema operando em 40 Gbps. A curva em azul representa a variação da BER sem o uso do dispositivo AR/CP. A curva em laranja representa a BER com o uso do dispositivo.**

Pode-se observar que sem o uso do dispositivo AR/CP (curva em azul) a BER excede o valor de  $10^{-9}$  para comprimentos de enlace acima de ~19 km, enquanto que o uso do dispositivo (curva em laranja) permite estender o enlace óptico a até ~90 km mais do que o quadruplicando. Nota-se na figura que com o uso do dispositivo AR/CP a BER volta a subir à medida que se encurta o enlace (para valores inferiores a 50 km). Isto se dá, pois a compensação de dispersão foi otimizada para um enlace de 70 km, abaixo do qual ocorre uma super-compensação. No entanto, este resultado não deve ser levado em consideração, já que o uso do dispositivo AR/CP ocorrerá com o objetivo de se maximizar a distância de enlace obtível entre o transmissor e o receptor. Uma exceção a isto seria o caso de já haver uma fibra de transmissão com comprimento inferior a 50 km existente a qual se pretende estendê-la. Nesta situação não seria recomendado o uso do dispositivo AR/CP.

## **Conclusão**

O resultado destes 2 testes demonstram que, em ambos os casos (10 Gbps e 40 Gbps) o sinal óptico apresentava-se completamente degradado (BER  $\sim 10^{-1}$ ) para um enlace de  $\sim 70$  km. A utilização do dispositivo AR/CP recupera a qualidade do sinal, resultando em BERs de níveis aceitáveis (inferiores a  $10^{-9}$ ) permitindo a extensão do enlace por cerca de mais 50 km.

A capacidade de extensão do enlace utilizando o AR/CP depende fortemente da taxa de transmissão. Isto se deve ao impacto de efeitos como a dispersão e a atenuação, que apresentam níveis bastante diferentes nas duas taxas estudadas. Este impacto é analisado mais profundamente na próxima seção.



#### 5.4.4.1 Análise do Impacto da Dispersão e da Atenuação

Esta seção restringe-se à análise dos impactos causados pela dispersão e atenuação ocorridos ao longo da fibra de transmissão com o objetivo de se identificar o fator principal de degradação em cada taxa de transmissão. Através do software VPI foi possível avaliar estes impactos na BER do sinal tanto para taxas de 10 Gbps como para 40 Gbps; primeiro, simulando hipoteticamente o desligamento da atenuação e dispersão; segundo, medindo-se a potência óptica no receptor com e sem o uso do dispositivo AR/CP.

##### Sistema operando em 10 Gbps

##### 1º Teste – Desligamento da atenuação

O gráfico da Figura 33 mostra o resultado obtido para o sistema operando a taxas de 10 Gbps ao se variar o comprimento do enlace. As simulações foram realizadas conforme indicadas abaixo:

- BER **sem** uso do dispositivo AR/CP **com** atenuação no enlace (curva em azul)
- BER **sem** uso do dispositivo AR/CP **sem** atenuação no enlace (curva não mostrada)
- BER **com** uso do dispositivo AR/CP **com** atenuação no enlace (curva em preto)

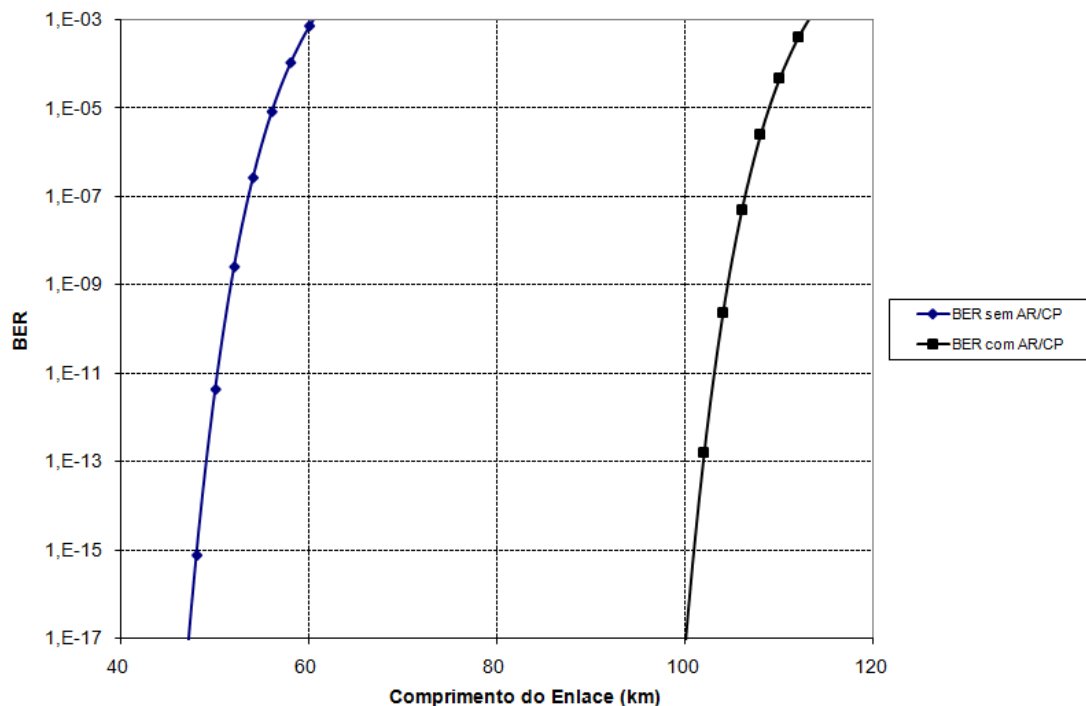


Figura 33 – Curva de BER para sistema operando em 10 Gbps. A curva em azul representa a variação da BER sem o uso do dispositivo AR/CP (teste a). A curva em preto representa a BER com o uso do dispositivo (teste c).

Para a simulação do caso b), observou-se que para taxas de 10 Gbps, ao se anular hipoteticamente a atenuação da fibra de transmissão, a BER sem o uso do dispositivo AR/CP permanecia desprezível ( $<10^{-50}$ ) para todos os comprimentos do enlace testados (até 180km), indicando que para sistemas de 10 Gbps, a atenuação é o fator dominante na degradação do sinal. Portanto neste caso o AR/CP opera principalmente como amplificador.

## 2º Teste – Análise da potência no receptor

No intuito de avaliar o impacto da atenuação na taxa de erro de bits (BER) levando-se em conta o orçamento de potência, realizamos testes através do software de simulação VPI variando-se o comprimento do enlace e obtendo-se as respectivas potências no receptor, com e sem o uso do dispositivo AR/CP e que podem ser comparadas à potência de sensibilidade do detector ( $P_s$ , ver equação 22) . A Figura 34 mostra o posicionamento dos medidores de potência representados por *IN* e *OUT*.

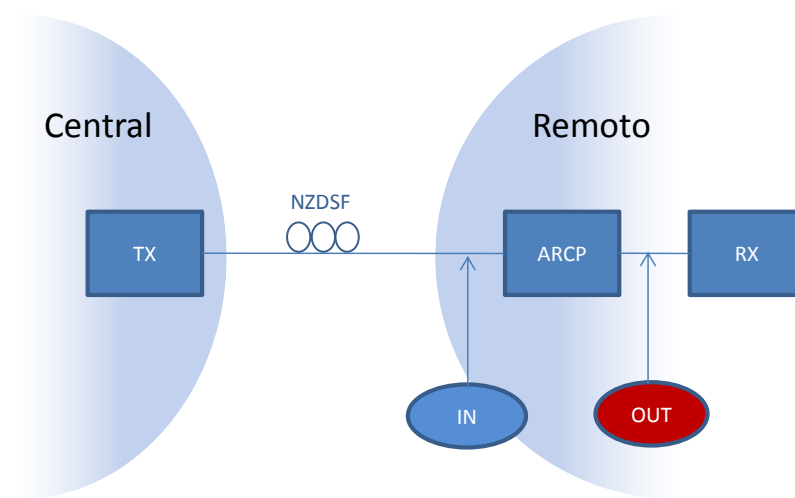
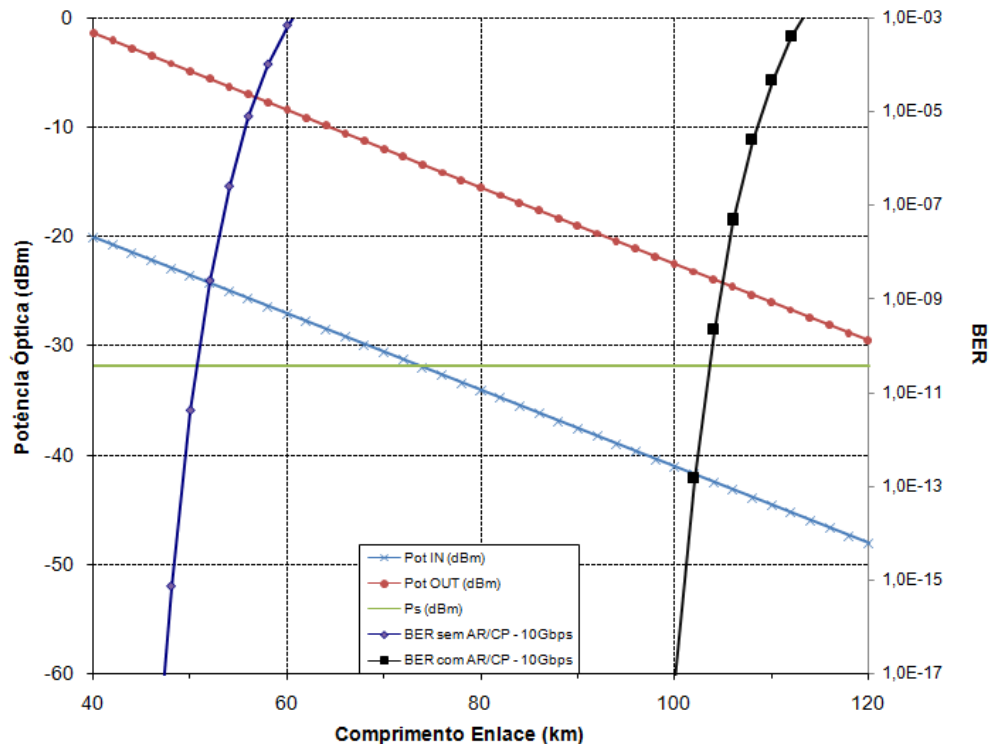


Figura 34 – Sistema utilizado para teste da potência no receptor com e sem o dispositivo.

O gráfico da Figura 35 apresenta os resultados obtidos no 2º teste em conjunto com os mesmos valores de BER obtidos no 1º teste para os diferentes comprimentos de enlace.



**Figura 35 – Curva da potência óptica no receptor e valores BER variando-se o comprimento do enlace para sistema operando em 10 Gbps.**

As curvas em azul escuro e preto são referentes aos valores de BER obtidos no teste anterior. As curvas em azul claro e vermelho representam a potência óptica no receptor sem e com o uso do dispositivo AR/CP, respectivamente. Em verde, está representada a potência de sensibilidade de -32 dBm do detector calculada pela equação 23.

Observa-se que sem o uso do dispositivo AR/CP, a BER atinge valores  $>10^{-9}$  para comprimentos de enlace maiores que ~54 km. Nestes casos a potência óptica no receptor (curva em azul claro) é inferior a -24,91 dBm que pode ser comparado com o limite imposto pelo orçamento de potência (curva em verde). A discrepância entre  $P_S$  calculado e a potência mínima observada para  $BER < 10^{-9}$  indica que outros parâmetros, além da atenuação, impactam o sistema.

Com o uso do dispositivo AR/CP em sistemas de 10 Gbps, observa-se que a BER atinge valores inferiores a  $10^{-9}$  para comprimentos de enlace maiores que ~106 km. A partir deste ponto, observa-se pela curva em vermelho que a potência no receptor atinge um valor de -24,59 dBm, bastante semelhante ao obtido sem o AR/CP, o que indica que a recuperação da potência do sinal não afeta os demais mecanismos de degradação deste.

## Sistema operando em 40 Gbps

### 1º Teste – Desligamento alternado da atenuação e dispersão

O gráfico da Figura 36 mostra o resultado obtido para o sistema operando a taxas de 40 Gbps ao se variar o comprimento do enlace. As simulações foram realizadas conforme indicadas abaixo:

- BER **sem** uso do dispositivo AR/CP **com** atenuação e **com** dispersão (curva em azul)
- BER **sem** uso do dispositivo AR/CP **sem** atenuação e **com** dispersão (curva em vermelho)
- BER **sem** uso do dispositivo AR/CP **com** atenuação e **sem** dispersão (curva em verde)
- BER **com** uso do dispositivo AR/CP **com** atenuação e **com** dispersão (curva em laranja)

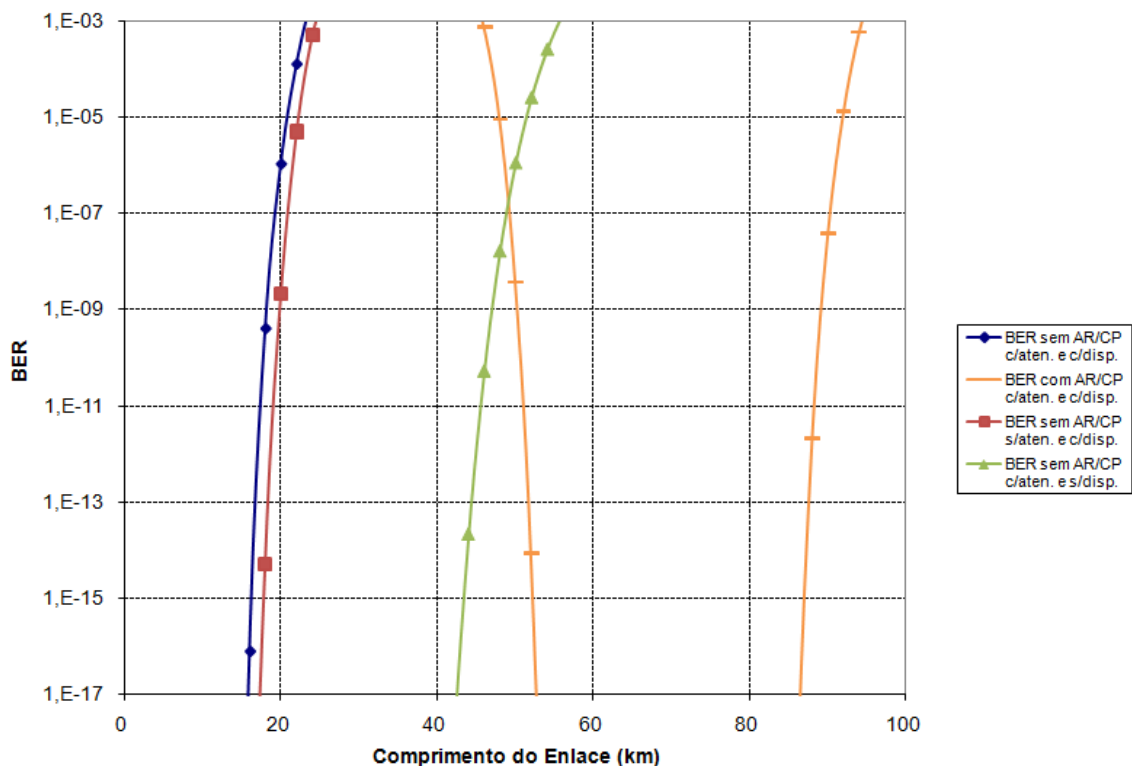


Figura 36 – Curvas de BER em função do comprimento do enlace para as situações analisadas no 1º teste com taxa de 40Gbps.

No caso de sistemas com taxas de 40 Gbps, um maior impacto da dispersão é esperado. Para avaliar tal impacto, a atenuação e a dispersão da fibra de enlace foram alternada e hipoteticamente desligadas (testes b e c). Note que os resultados dos testes a) e d) são exatamente os mesmos dos que foram apresentados no gráfico da Figura 32.

No teste b), em que a fibra de transmissão não possuía atenuação, o gráfico da Figura 36 mostra que os valores de BER representados pela curva em vermelho são praticamente os mesmos de quando a atenuação estava ativada (curva em azul). Isso indica que mesmo sem atenuação na fibra de transmissão o sistema não sofre grandes mudanças na curva de BER.

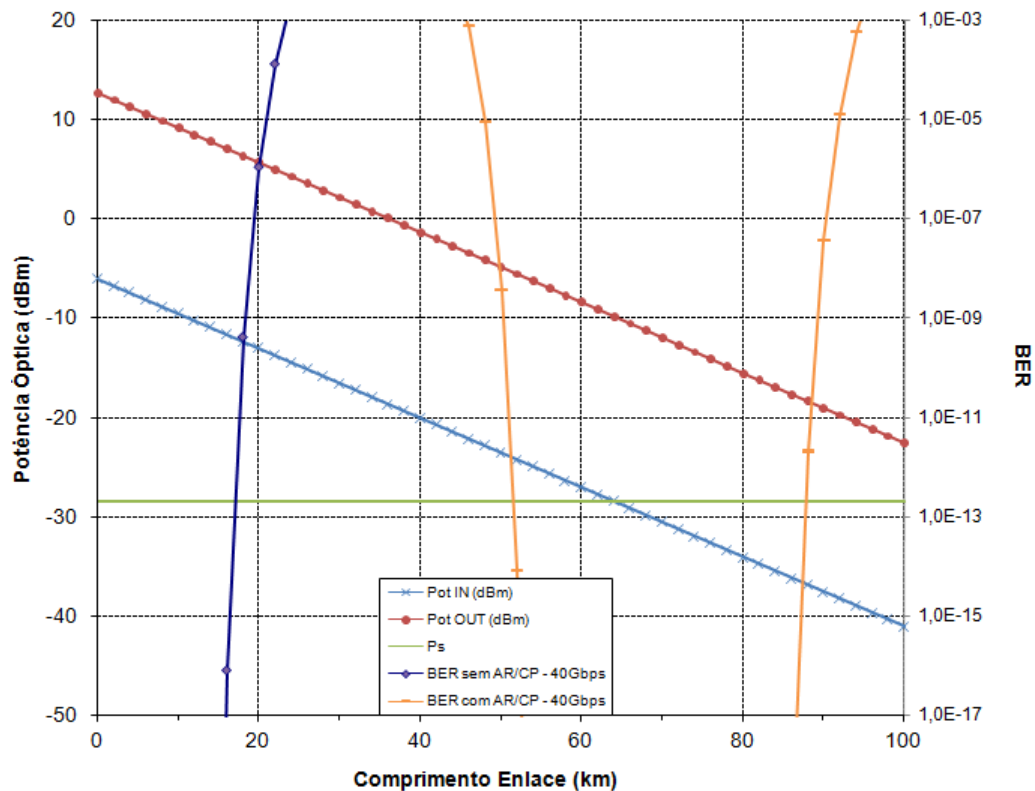
No teste c), em que a fibra de transmissão não possuía dispersão, o gráfico da Figura 36 mostra que a curva de BER em verde desloca-se para a direita indicando que o enlace permite ter maiores comprimentos do que o teste a). Desta forma pode-se concluir que o efeito da dispersão é o principal fator limitante para sistemas a 40 Gbps. Entretanto, nota-se que o uso do dispositivo AR/CP leva a um desempenho ainda melhor do que o do sistema sem dispersão, indicando que a sua atuação como amplificador também é importante.

Observa-se, portanto, que o dispositivo AR/CP estudado opera como amplificador Raman e compensador de dispersão na banda O para enlaces baseados em fibras do tipo NZDSF. Note que as fibras convencionais seriam incapazes de compensar a dispersão de uma NZDSF na banda O, já que isto requer dispersão anômala, o que somente é obtido acima de 1300 nm.

## 2º Teste – Análise da potência no receptor

Da mesma forma do teste realizado para o sistema de 10 Gbps, analisamos o impacto da atenuação na taxa de erro de bits (BER) levando-se em conta o orçamento de potência. Variamos o comprimento do enlace para obter as respectivas potências no receptor, com e sem o uso do dispositivo AR/CP. O sistema utilizado é o mesmo da Figura 34.

O gráfico da Figura 37 apresenta os resultados obtidos no 2º teste em conjunto com os mesmos valores de BER obtidos no 1º teste para os diferentes comprimentos de enlace.



**Figura 37 – Curva da potência óptica no receptor e valores BER variando-se o comprimento do enlace para sistema operando em 40 Gbps.**

As curvas em azul escuro e laranja são referentes aos valores de BER obtidos no teste anterior. As curvas em azul claro e vermelho representam a potência óptica no receptor sem e com o uso do dispositivo AR/CP, respectivamente. Em verde, está representado o valor da potência de sensibilidade do detector de -28 dBm para 40 Gbps, conforme calculado pela equação 24.

Observa-se que sem o uso do dispositivo AR/CP, a BER atinge valores  $>10^{-9}$  para comprimentos de enlace maiores que ~19 km mesmo com a potência óptica no receptor de -12,5 dBm (curva em azul claro) ainda bem superior à potência de sensibilidade (curva em verde). Podemos concluir que o aumento da discrepância entre estas potências (quando

comparada à observada a 10 Gbps) se deve ao efeito da dispersão, que apresenta maior impacto a 40 Gbps.

Com o uso do dispositivo AR/CP, observa-se que a BER atinge valores superiores a  $10^{-9}$  para comprimentos de enlace maiores que ~90 km. A partir deste ponto, observa-se pela curva em vermelho que a potência no receptor é inferior a -19 dBm, aproximando-se mais do valor calculado de -28 dBm para a potência de sensibilidade para 40 Gbps. Isto é explicado pelo fato de o impacto da dispersão ser minimizado através do uso do AR/CP, como era esperado.

Nota-se pelos testes realizados que o fato de o sistema respeitar os limites impostos pelo orçamento de potência não garante que o sinal possua alta qualidade no receptor, pois outros fatores tais como a dispersão, podem levar à degradação do sinal e a valores de BER superiores a  $10^{-9}$ . No entanto caso este limite não seja respeitado, certamente o sinal no receptor estará deteriorado.

#### 5.4.4.2 Resultados de BER para outros comprimentos de onda

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos utilizando-se comprimentos de onda do sinal de 1310 nm e 1290 nm a fim de avaliar o impacto na degradação do sinal através da análise da BER. O procedimento de testes foi o mesmo que o usado na seção 5.4.4, ou seja, variamos o comprimento do enlace para se obter os valores de BER com e sem o uso do dispositivo AR/CP para o sistema operando em 10 Gbps e 40 Gbps.

É importante ressaltar que estes testes foram os primeiros a serem realizados no software de simulação *VPI*. Portanto, alguns parâmetros não foram levados em conta, tais como a perda por acoplamento do laser de bombeio à MOF, as perdas por inserção atribuídas aos isoladores e emendas da MOF. Além disso, foram considerados valores fixos para atenuação e dispersão da MOF e da NZDSF. No entanto, foi possível extrair informações bastante interessantes como as mostradas a seguir.

##### Comprimento de onda de sinal em 1310nm

O gráfico da Figura 38, mostra os valores de BER com e sem o dispositivo AR/CP para as taxas de 10 e 40 Gbps e considerando o sinal operando em 1310nm.

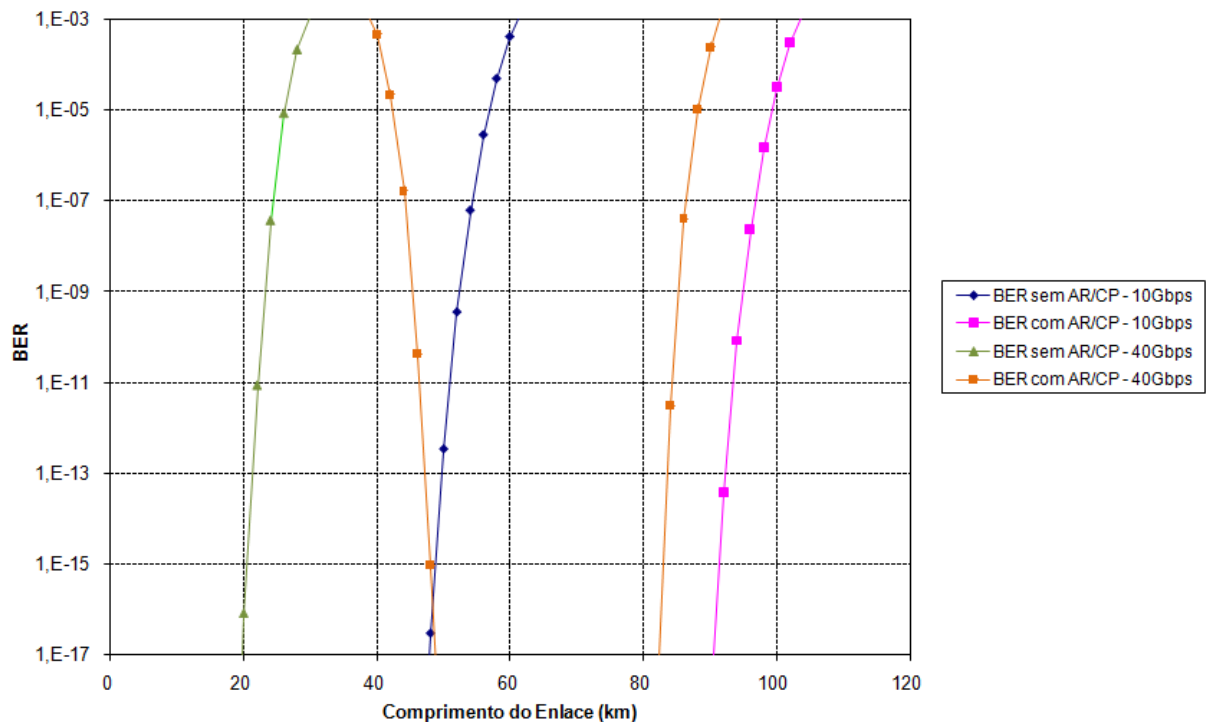


Figura 38 – Curvas de BER com sinal operando em 1310nm.

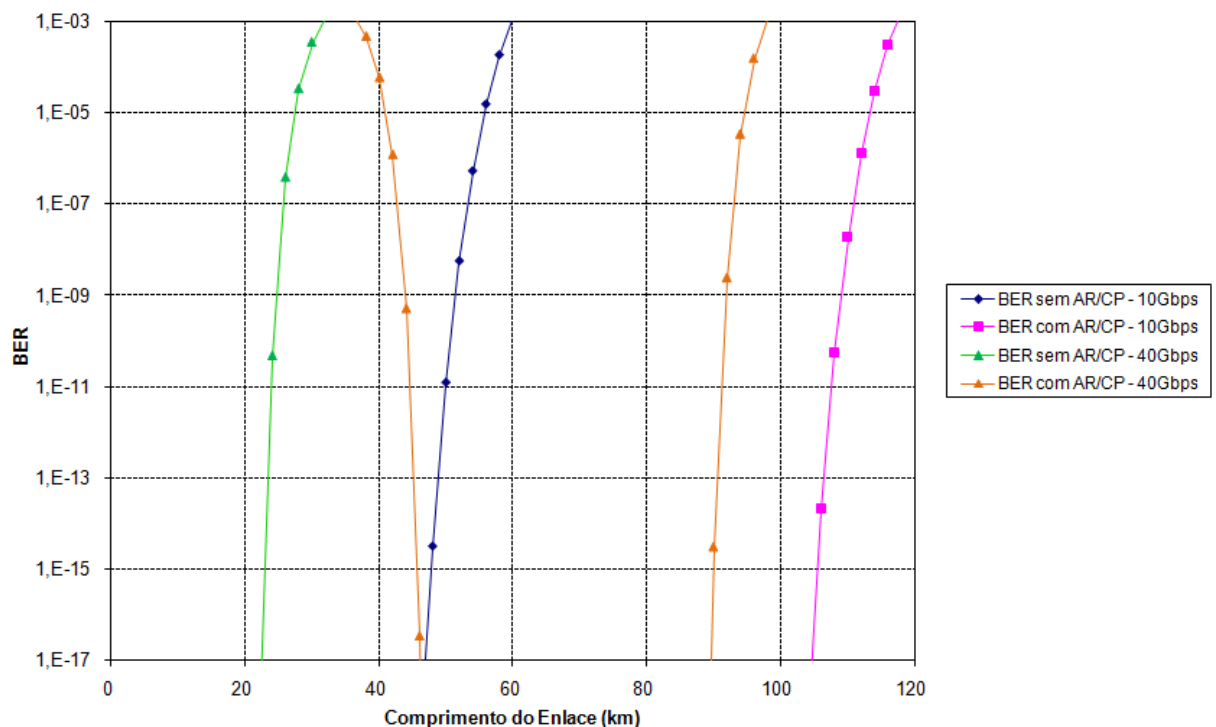


Para o sistema operando em 10 Gbps observa-se que, em comparação com o teste realizado usando os mesmos parâmetros de configuração desta seção com comprimento de onda em 1300 nm, houve uma redução no limite máximo do comprimento do enlace para cerca de 94 km (>120km foi o resultado do teste em 1300 nm). Tal redução se deve à queda do ganho Raman otimizado para 1300 nm, o qual será mostrado em maior detalhe na seção 5.4.5.

Para o sistema operando em 40 Gbps observa-se, em comparação com o teste realizado com comprimento de onda em 1300 nm, uma redução no limite máximo do comprimento do enlace de 94 km para cerca de 84 km. Esta redução se deve principalmente também a redução do ganho Raman, já que em comprimentos de onda maiores a dispersão da MOF aumenta, permitindo teoricamente uma compensação de enlaces mais longos.

#### Comprimento de onda de sinal em 1290nm

O gráfico da Figura 39 mostra os valores de BER com e sem o dispositivo AR/CP para as taxas de 10 e 40 Gbps e considerando o sinal operando em 1290 nm.



**Figura 39 – Curvas de BER com sinal operando em 1290 nm.**

Para o sistema operando em 10 Gbps observa-se que, em comparação com o teste realizado usando os mesmos parâmetros de configuração desta seção com comprimento de onda em 1300 nm, houve uma redução no limite máximo do comprimento do enlace para

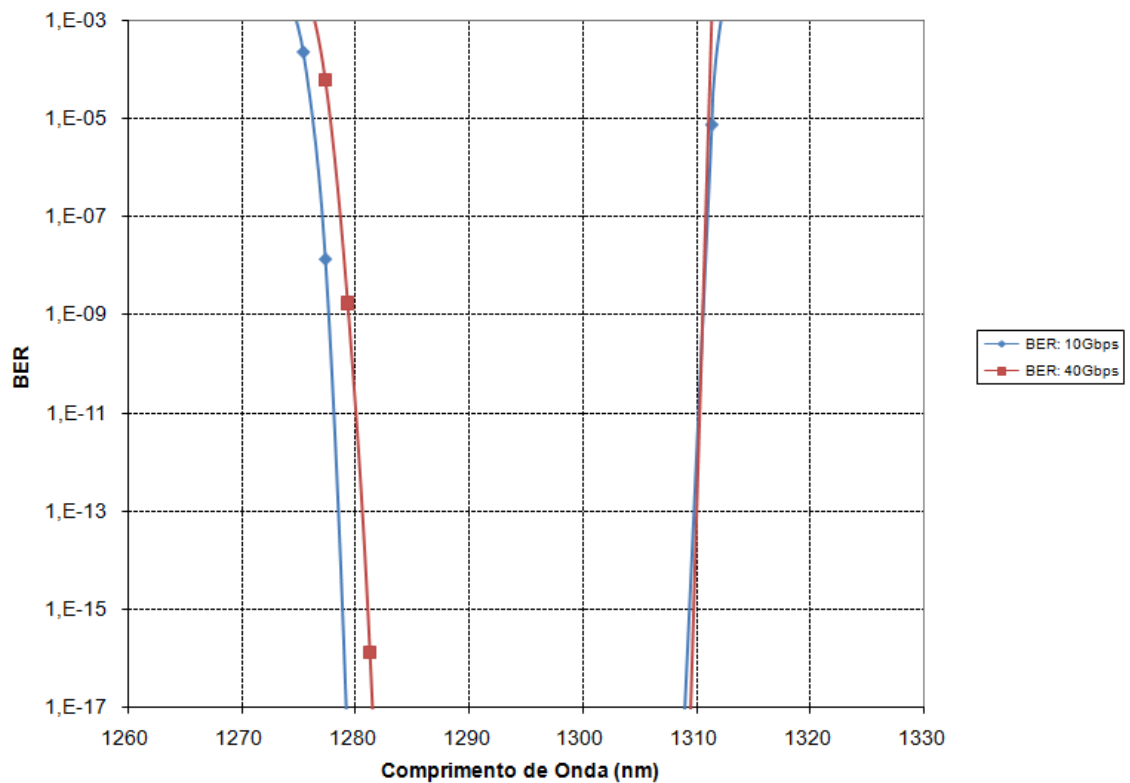
cerca de 108 km (>120 km foi o resultado do teste em 1300 nm). Como no caso de 1310 nm, a redução se dá pela redução do ganho Raman, já que o impacto da dispersão é pequeno em 10 Gbps.

Para o sistema operando em 40 Gbps observa-se, em comparação com o teste realizado com comprimento de onda em 1300 nm, uma redução no limite máximo do comprimento do enlace de 94 km para cerca de 92 km. Neste caso, tanto a redução do ganho Raman quanto o decréscimo no valor da dispersão da MOF podem contribuir para a redução observada.

A conclusão destes testes é que o sistema operando em 1290 nm possui melhores resultados de BER e maiores comprimentos de enlace quando comparados com a operação em 1310 nm. Principalmente porque o ganho Raman cai mais suavemente para comprimentos de onda mais curtos, a partir do seu pico, do que para comprimentos de onda mais longos.

### 5.4.5 Resultados de BER em toda Banda O

Nesta seção são apresentados através da Figura 40 os resultados obtidos de BER para toda banda O, para o sistema operando em 10 Gbps e 40 Gbps, fazendo uso do dispositivo AR/CP e com um comprimento de enlace fixo em 70 km.

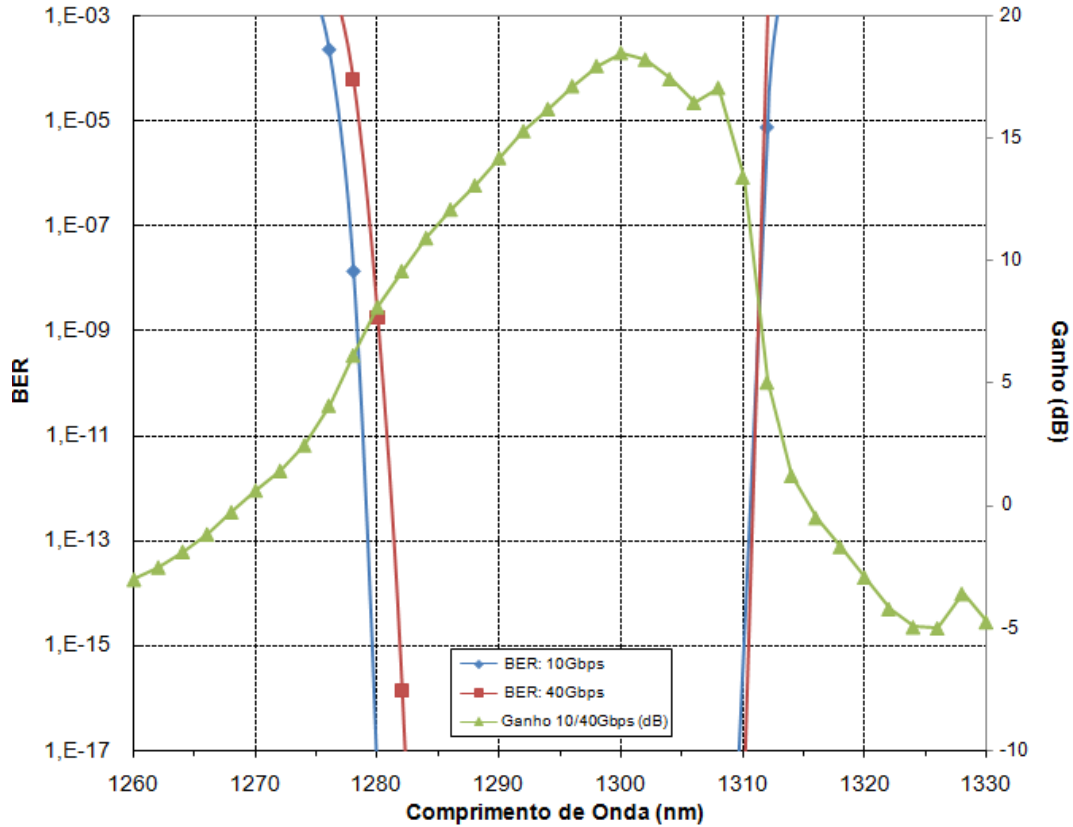


**Figura 40 – Curva de BER em função da variação do comprimento de onda por toda Banda O para taxas de 10 Gbps e 40 Gbps.**

As curvas em azul e vermelho representam, respectivamente, os valores de BER obtidos para o sistema operando em 10 Gbps e 40 Gbps. A banda útil (quando a BER é inferior a  $10^{-9}$ ) para o sistema operando em 10 Gbps e 40 Gbps é respectivamente 32,97 nm e 31,21 nm. É interessante notar que apesar das curvas para 10 e 40 Gbps estarem praticamente sobrepostas, ocorre uma variação de BER bastante expressiva entre as taxas para um mesmo comprimento de onda. Por exemplo, em 1280 nm a BER para 10 Gbps é menor que  $10^{-17}$  enquanto que para 40 Gbps, é  $\sim 10^{-11}$ .

Para melhor compreender a contribuição da amplificação para os resultados obtidos comparamos estes resultados com o ganho do dispositivo. Para isto levantamos a curva de ganho do dispositivo AR/CP levando-se em conta as perdas de emenda e inserção dos

acopladores, para toda banda O e sistema operando tanto em 10 Gbps como em 40 Gbps. O resultado é mostrado na Figura 41.



**Figura 41 – Curvas de Ganho do dispositivo AR/CP (em verde) expresso em decibéis (dB) e de BER em função da variação do comprimento de onda por toda Banda O para taxas de 10 Gbps e 40 Gbps.**

O ganho do dispositivo AR/CP é o mesmo para sistema em 10 Gbps e 40 Gbps. Pode-se observar que na faixa de 1280 nm a 1310 nm o ganho é maior que 8 dB e a BER inferior a  $10^{-9}$ . O aumento da BER pode, portanto, ser correlacionado com a queda do ganho Raman. O impacto da dispersão é apenas sentido na taxa de 40 Gbps na região de comprimentos de onda mais curtos.

## 6 CONCLUSÃO

Este trabalho avaliou o comportamento de uma fibra microestruturada de baixa perda em um sistema óptico completo funcionando como um dispositivo, chamado de AR/CP, que provê a amplificação Raman e a compensação de dispersão de forma simultânea. Para a análise, foi utilizado o software de simulação numérica *VPI TransmissionMaker* que permitiu incluir as características realistas dos elementos que compõem o sistema e realizar a análise do desempenho através de curvas de BER em função do comprimento do enlace e comprimento de onda do canal de transmissão. O sistema foi ajustado para operar na banda O e para taxas de 10 Gbps e 40 Gbps.

Para transmissão, utilizamos a fibra de próxima geração NZDSF que possui uma dispersão normal na banda O. A compensação de dispersão proporcionada nesta faixa não é obtível com fibras DCF convencionais. Dessa forma, o dispositivo AR/CP se ajusta a esta necessidade, pois possui dispersão anômala e foi dimensionado para compensar a dispersão em 1300 nm decorrente de uma fibra NZDSF de 70 km.

A utilização do dispositivo AR/CP projetado se mostrou capaz de recuperar o sinal transmitido na banda O praticamente duplicando a extensão do enlace em 10 Gbps e mais do que quadruplicando em 40 Gbps. Os enlaces foram estendidos a até aproximadamente 106 km e 90 km em 10 Gbps e 40 Gbps, respectivamente. Sem o uso do dispositivo, tanto em 10 Gbps como em e 40 Gbps, o sinal óptico apresentava-se completamente degradado (BER  $\sim 10^{-1}$ ) para um enlace de  $\sim 70$  km.

Verificamos que a taxa de transmissão afeta diretamente a capacidade de extensão do enlace utilizando o AR/CP, pois o impacto de efeitos como a dispersão e a atenuação apresentam níveis bastante diferentes nas duas taxas estudadas. Enquanto a 10 Gbps o dispositivo AR/CP atua primordialmente como um amplificador, a 40 Gbps sua principal função é compensar da dispersão apesar de também contribuir para a amplificação.

Verificou-se também respeitar os limites impostos pelo orçamento de potência não era suficiente para que o sinal tivesse alta qualidade no receptor, pois outros fatores tais como a dispersão, levam à degradação do sinal e a valores de BER superiores a  $10^{-9}$ .

Conforme mencionado, observou-se que a dispersão residual no receptor em 1300 nm era nula e, portanto, viabilizava uma qualidade de sinal adequada (BER  $< 10^{-9}$ ) para enlaces de até  $\sim 90$  km mesmo a 40 Gbps. No entanto, verificamos que o AR/CP compensa apenas parcialmente a dispersão em outros comprimentos de onda próximos a 1300 nm. Obtivemos

uma largura de banda útil de 0,8 nm, bastante inferior ao das DCFs comerciais que apresentam 50 nm [1]. A definição de banda útil utilizada é a mesma usada em [1] (dispersão residual máxima de  $\pm 0,05$  ps/nm.km). Este resultado deve-se à incompatibilidade entre as curvas de dispersão da MOF e da NZDSF, ou seja, a MOF possui inclinação de dispersão de mesmo sinal da NZDSF, quando deveria apresentar sinal oposto.

Mesmo assim, ao operar em outros comprimentos de onda além de 1300 nm para enlaces de 70 km, o dispositivo AR/CP se mostrou capaz de melhorar a qualidade do sinal ( $BER < 10^{-9}$ ) em uma banda de 32,97 nm para 10 Gbps e 31,21 nm para 40 Gbps. Conclui-se, portanto, que o dispositivo AR/CP proposto é capaz de satisfatoriamente viabilizar enlaces com este comprimento de fibra NZDSF em aproximadamente 30% da banda O tanto a 10 Gbps quanto a 40 Gbps.

Poder-se-á avaliar em projeto futuro o comportamento do dispositivo AR/CP com o uso vários canais. Além disso, como a banda de amplificação Raman é tida como o principal limitante para a faixa de operação, outra possível análise pode estudar a utilização de fontes adicionais de bombeio em outros comprimentos de onda possa contribuir para uma maior cobertura da banda O.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] L. Grüner-Nielsen, M. Wandel, P. Kristensen, C. Jorgensen, L. V. Jorgensen, et al., "Dispersion-Compensating Fibers," *J. Lightwave Technol.* vol. 23, pp. 3566-3579, Nov. 2005.
- [2] F. Gérôme, J. -L. Auguste, and J. -M. Blondy, "Design of dispersion-compensating fibers based on a dual-concentric-core photonic crystal fiber," *Opt. Lett.* vol. 29, pp. 2725-2727, Dec. 2004.
- [3] A. Huttunen and P. Törmä, "Optimization of dual-core and microstructure fiber geometries for dispersion compensation and large mode area," *Opt. Express* vol. 13, pp. 627-635, Feb. 2005.
- [4] S. K. Varshney, N. J. Florous, K. Saitoh, M. Koshiba, and T. Fujisawa, "Numerical investigation and optimization of a photonic crystal fiber for simultaneous dispersion compensation over S + C + L wavelength bands," *Opt. Commun.* vol. 274, pp. 74-79, June 2007.
- [5] P. J. Roberts, B. J. Mangan, H. Sabert, F. Couny, T. A. Birks, et al., "Control of dispersion in photonic crystal fibers," *J. Opt. Fiber Commun. Rep.*, vol. 2, pp. 435-461, Nov. 2005.
- [6] M. Bottacini, F. Poli, A. Cucinotta, S. Selleri, "Modeling of photonic crystal fiber Raman amplifiers," *J. Lightwave Technol.* vol. 22, pp. 1707-1713, July 2004.
- [7] C. J. S. de Matos, K. P. Hansen and J. R. Taylor, "Experimental characterisation of Raman gain efficiency of holey fibre," *Electron. Lett.* vol. 39, pp. 424-425, Mar 2003.
- [8] S. K. Varshney, K. Saitoh, and M. Koshiba, "A novel design for dispersion compensating photonic crystal fiber Raman amplifier," *IEEE Photon. Technol. Lett.* vol. 17, pp. 2062- 2064, Oct 2005.
- [9] Z. Digweed-Lyytikäinen, C. A. de Francisco, D. Spadoti, A. A. Juriollo, et al., "Photonic crystal optical fibers for dispersion compensation and Raman amplification: design and experiment," *Microwave Opt. Technol. Lett.* vol. 49, pp. 872-874, April 2007.

- [10] K. Tajima, "Low loss PCF by reduction of hole surface imperfection," in Proc. ECOC 2007, PD2.1, pp. 75-76, 2007.
- [11] A. A. de Araújo and C. J. S. de Matos, "Analysis of Raman Amplification in a Practical, Low-Loss, Photonic Crystal Fiber," In: IMOC 2007 - Technical Digest, pp. 211-213, 2007.
- [12] K.Tajima; J.Zhou; K. Nakajima; K. Sato. "Ultralow loss and long length photonic crystal fiber." Journal of Lightwave Technology, vol. 22, no. 1, pp. 7-10, January 2004.
- [13] A.A. de Araújo. Dissertação apresentada à Universidade Presbiteriana Mackenzie como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. "Análise de Amplificação Raman em Fibras Microestruturadas de Baixa Perda", 2007.
- [14] OFS ALLWAVE Fiber Catalog. Disponível em: <<http://www.ofsoptics.com>>. Acesso em: maio de 2008.
- [15] G.P. Agrawal, "Fiber-optic Communication Systems", 3<sup>rd</sup> Edition , Wiley-Interscience, New York, 2002.
- [16] D. Gloge, "Weakly guiding fibers," Appl. Opt. 10, 2252-2258 (1971)
- [17] J. Buck, "Fundamentals of Optical Fibers", Wiley-Interscience, 1995
- [18] C. Lin, H. Kogelnik e L.G. Cohen "Optical-pulse equalization of low dispersion transmission in single-mode fibers in the 1.3–1.7  $\mu\text{m}$  spectral region". Opt. Lett., vol. 5, no. 11, pp. 476–478, Nov. 1980.
- [19] Raman, C.V. e Krishnan, K.S., "A new type of secondary radiation", Nature, Vol. 121, pp 501-502, 1928
- [20] R.H. Stolen e E.P. Ippen, "Raman gain in glass optical waveguides". Appl.Phys. Lett.,22:6, pp 276-278, 1973



- [21] Headley C. e Agraval, G.P., “Raman Amplification in Fiber Optical Communication Systems” Elsevier 2005.
- [22] M.N. Islam, “Raman Amplifiers for Telecommunications 1”, Springer-Verlag, New York 2004
- [23] Bromage, "Raman Amplification for Fiber Communication systems", Journal of Lightwave technology, Vol 22, NO 1, pp.79-93 January 2004.
- [24] A.H. Cherin, “An Introduction to Optical Fibers”, McGraw-Hill, 1983.
- [25] P.André *et al.*, “Compensadores Adaptativos de Dispersão Cromática para Sistemas de Comunicação por Fibra Óptica”, IEEE Latin América Transactions, vol.4, no.5, September 2006, pp. 309-314
- [26] A.Gorlier *et al.*, “Optimized NZDSF-based link for wide-band seamless terrestrial transmissions”. Proc. Optical Fiber Communication (OFC), Anaheim, CA, 2002, pp. 621–622, Paper ThGG7
- [27] Acesso em site [www.crystal-fibre.com](http://www.crystal-fibre.com). em junho de 2008
- [28] BJARKLEV, Anders; BROENG, Jes; BJARKLEV, Araceli S. *Photonic Crystal Fibres*, Kluwer Academic Publishers, 2003.
- [29] L. Shen *et al.* “Design and optimization of photonic crystal fibers for broad-band dispersion compensation”, IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 15, no. 4, pp. 540–542, Apr. 2003.
- [30] T. Matsui, K.Nakajima e I. Sankawa, “Dispersion Compensation Over All the Telecommunication Bands With Double-Cladding Photonic-Crystal Fiber”, Journal of Lightwave Technology, VOL. 23, NO. 11, March 2007, pp.540-542.