

**UNIVERSIDADE PRESBITERIANA MACKENZIE**

Alfredo Almeida de Araujo

Análise de Amplificação Raman em Fibras Microestruturadas  
de Baixa Perda

São Paulo  
Dezembro – 2007

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

ALFREDO ALMEIDA DE ARAUJO

ANÁLISE DE AMPLIFICAÇÃO RAMAN EM FIBRAS MICROESTRUTURADAS DE  
BAIXA PERDA

Dissertação apresentada à Universidade  
Presbiteriana Mackenzie como requisito para a  
obtenção do título de Mestre em Engenharia  
Elétrica.

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

São Paulo  
2007

Aos meus pais, Antonina e Laudi, que me deram tudo na vida e fizeram de mim o homem que sou.

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Christiano J. S. de Matos, pelo comprometimento, profissionalismo e dedicação, além do conhecimento transmitido, que foram imprescindíveis para a realização deste trabalho. Muitas vezes sacrificando momentos de sua vida particular, soube dar o incentivo necessário nos momentos mais difíceis.

À agência MACKPESQUISA pelo suporte financeiro.

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

À pesquisadora Prof MsC Lúcia A. Saito pelas dicas e conhecimento passado nesta jornada.

Aos amigos de classe, Alexandre Bozolan, Emerson Bianchini, Erik Antonio, Jackson Ong, Prof. MsC. Joaquim Filho, Rodrigo Lopes pelos estudos e ajuda durante a realização das matérias.

Aos amigos de laboratório, Camila Dias, Daniel Ferreira, Suzanne Baruh pelas dúvidas esclarecidas.

Aos amigos Eduardo Brunetti e Marcus Costa, da Porto Seguro, pela flexibilidade de horários dada no trabalho.

Aos amigos Eduardo Medeiros, Jorge Ribeiro, Osmar Higashi e Roberto Murillo, da RSI Informática, pela flexibilidade de horários dada no trabalho.

Ao grande amigo Prof<sup>o</sup> MsC. Marcelo Zanateli pelos estudos em conjunto nos tempos de ITA e pelas oportunidades dadas a mim para a passagem de conhecimento a seus alunos, na UniFei.

## Resumo

Esta dissertação tem como objetivo descrever as características básicas das fibras microestruturadas, seu conceito e desempenho, e investigar a aplicação de uma fibra microestruturada de baixa perda para o desenvolvimento de amplificadores Raman. Uma análise do uso destes em aplicações de Telecomunicações é descrita. Para isso, foram realizadas simulações destes guias de onda com dados de uma fibra real descrita na literatura. Também foram realizadas simulações para verificação do ganho líquido e figura de ruído de um amplificador baseado nesta fibra e das vantagens de seu uso em um enlace óptico completo, incluindo compensação de dispersão para sinais da banda O (1260-1360 nm). Como resultado, demonstrou-se um desempenho superior em alguns aspectos aos amplificadores Raman convencionais, e complementar aos amplificadores disponíveis atualmente no mercado, como os baseados em fibra dopada com Érbio.

**Palavras-chave:** *fibras microestruturadas, amplificador Raman, espalhamento Raman, dispersão cromática, atenuação óptica, fibra óptica.*

## **Abstract**

This dissertation aims to describe the basic characteristics of microstructured fibers, their concept and performance, and to investigate the application of a low loss microstructured fiber to the development of Raman amplifiers. An analysis of the use of these amplifiers in Telecommunication applications is described. To this end, simulations were carried out with these waveguides with the data of a real fiber described in the literature. Simulations were also carried out to determine the amplifier's net gain and noise figure and to establish the advantages of its use in a complete optical fiber span, including the compensation dispersion in the O band (1260-1360 nm). As a result, it was demonstrated that the microstructured fiber presents, in some aspects, a performance that is higher than that of conventional Raman amplifiers, and complementary to that of a commercial amplifiers, such as those based on Erbium doped fiber.

**Key words:** *microstructured fibers, Raman amplification, Raman scattering, chromatic dispersion, optical attenuation, optical fiber.*

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>9</b>
<b>2 FIBRAS ÓPTICAS.....</b>	<b>13</b>
2.1 Breve histórico de fibras ópticas .....	13
2.2 Análise óptica da fibra.....	14
2.3 Geometria da fibra e fabricação.....	21
2.4 Propriedades de MOFs com núcleo sólido .....	24
2.5 Propriedades da MOF de baixa perda analisada.....	25
<b>3 AMPLIFICAÇÃO RAMAN EM FIBRAS ÓPTICAS .....</b>	<b>30</b>
3.1 Espalhamento Raman .....	30
3.2 Propriedades do ganho Raman em fibras de sílica .....	33
3.3 Aplicações de amplificadores Raman.....	37
3.3.1 Características.....	37
3.3.2 Tipos de Amplificadores .....	37
<b>4 AMPLIFICAÇÃO RAMAN EM FIBRAS MICROESTRUTURADAS.....</b>	<b>41</b>
4.1 Trabalhos realizados .....	41
4.2 Metodologia aplicada na pesquisa.....	43
4.3 Simulações.....	46
4.4 Resultados e discussões .....	54
4.4.1 Estimativa de ganho Raman em função do comprimento de onda de bombeamento .....	54
4.4.2 Modelagem de Amplificadores nas Bandas C e O.....	60
4.4.3 Amplificação e Compensação na MOF para um Enlace na Banda O.....	65
<b>5 CONCLUSÃO FINAL .....</b>	<b>70</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS .....</b>	<b>71</b>



## ABREVIATURAS

ASE	Amplified Spontaneous Emission.
BER	Bit Error Rate.
DCF	Dispersion Compensating Fiber.
CVD	Chemical Vapor Deposition.
DRA	Distributed Raman Amplifier.
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing.
ECOC	European Conference on Optical Communication.
EDFA	Erbium-Doped Fiber Amplifier.
LRA	Lumped Raman Amplifier.
MOF	Microstructured Optical Fiber.
NF	Noise Figure.
NTT	Nippon Telegraph and Telephone.
NZDSF	Non-zero Dispersion Shifted Fiber.
OSA	Optical Spectrum Analyzer.
PCF	Photonic Crystal Fiber.
PBG	Photonic Bandgap.
SNR	Signal to Noise Ratio.
WDM	Wavelength Division Multiplexing.
VPI	Virtual Photonics Incorporated.

## 1 INTRODUÇÃO

Fibras ópticas microestruturadas (ou MOFs, do inglês *microstructured optical fibres*), também chamadas de fibras de cristal fotônico (ou PCFs, do inglês *photonic crystal fibers*), são guias de onda com um conjunto de furos preenchidos com ar que circundam o núcleo e correm ao longo de todo o comprimento da fibra. O núcleo pode ser sólido ou vazado. MOFs são um meio de transmissão bastante interessante, pois podem apresentar propriedades incomuns, como grande capacidade de controle de dispersão, maior controle dos efeitos não lineares, ausência de frequência de corte e 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 diâmetros de núcleo de  $\sim 1 \mu\text{m}$  e áreas efetivas muito pequenas, o que direciona para uma não-linearidade muito alta. Porém, este último fato geralmente acarreta em altas perdas (de pelo menos  $\sim 10 \text{ dB/km}$  em  $1550 \text{ nm}$ ), o que muitas vezes impossibilita o uso prático das MOFs, por exemplo, em amplificadores Raman para telecomunicações (MATOS, HANSEN, TAYLOR, 2003).

No entanto, é importante ressaltar que desde o primeiro uso das MOFs, a atenuação óptica tem reduzido rapidamente. A mais baixa perda registrada é de  $0,18 \text{ dB/km}$  em  $1550 \text{ nm}$ , igualando a perda das melhores fibras convencionais, em uma MOF de comprimento de  $1,5 \text{ km}$ , fabricada por uma equipe de pesquisadores da *Nippon Telegraph and Telecommunications* (NTT) (TAJIMA, 2007). Esta fibra apresenta um núcleo relativamente grande para uma MOF (da ordem de  $12 \mu\text{m}$  de diâmetro), o que contribui para o resultado obtido. Em um trabalho anterior (TAJIMA, ZHOU, NAKAJIMA, SATO, 2004) o grupo da mesma companhia havia reportado uma fibra de menor núcleo ( $\sim 5,5 \mu\text{m}$  de diâmetro), maior comprimento ( $10 \text{ km}$ ) e uma perda ainda baixa de  $0,37 \text{ dB/km}$ .

Os amplificadores ópticos, por outro lado, têm revolucionado as telecomunicações

desde o início dos anos 1990 (BROMAGE, 2004). Inicialmente, foram desenvolvidos os amplificadores de fibra dopada por Érbio (EDFA, do inglês *Erbium-doped fiber amplifiers*), que possuem uma banda de ganho que estende-se de 1530 a 1610 nm, sendo ideais para transmissão numa janela de baixa perda espectral da fibra baseada em sílica.

As pesquisas de amplificadores Raman em fibras ópticas foram iniciadas ainda nos anos 70, sendo que seus benefícios surgiram em meados dos anos 80 (BROMAGE, 2004). Este fato adiou a implementação prática de amplificadores Raman para Telecomunicações. Tal implementação é hoje viável devido a desenvolvimentos recentes na tecnologia de lasers de diodo de alta potência. O ganho Raman requer maior potência de bombeamento, por volta de dezenas de miliwatts por dB de ganho, comparado com poucos miliwatts por dB requeridos em um amplificador EDFA para sinais de pequena potência (BROMAGE, 2004). A utilização deste tipo de amplificador tem uma expectativa de crescimento em futuros sistemas WDM, que atualmente necessitam trabalhar em outras bandas além da atual Banda C (1530-1565 nm).

Em estudos realizados recentemente, utilizando-se uma fibra convencional com alta não-linearidade, observou-se que o incremento de eficiência de ganho Raman à medida que o comprimento de onda é reduzido (gerado pela redução da área efetiva e o incremento do coeficiente de ganho Raman) pode compensar o aumento da perda (SAITO, TAVEIRA, SOUZA, GAARDE, SOUZA, 2006). Desta forma, os amplificadores Raman podem apresentar ganhos líquidos maiores (para uma potência de bombeamento fixa) na banda O (1260-1360 nm) do que na banda C.

O amplificador Raman, por ser baseado em um processo não linear, tem seu ganho dependente da densidade de potência (intensidade), e não da potência de bombeamento. Isto significa que um pequeno diâmetro de núcleo, que aumenta a intensidade da luz, também aumenta a eficiência do amplificador, já que a intensidade é inversamente proporcional à área

modal. Ou seja, em teoria, a utilização da fibra microestruturada aumenta o ganho do amplificador Raman.

Esta dissertação tem como objetivo estudar o desempenho de amplificadores Raman baseados em uma MOF de não linearidade moderadamente alta, mas que possui baixa atenuação. Demonstra-se que tais amplificadores possuem um desempenho complementar ao obtido com amplificadores convencionais (amplificadores EDFA e Raman baseados em fibras monomodo). Devido às suas características, as fibras microestruturadas podem não possuir frequência de corte, apresentando guiamento monomodo por todo o espectro. Assim, elas podem operar em comprimentos de onda mais curtos que uma fibra convencional. Além disso, é possível controlar de maneira mais flexível a dispersão cromática. Estas características propiciam a construção de amplificadores Raman com características até agora inexistentes.

Este trabalho foi dividido da seguinte forma: no capítulo 2, foram abordados conceitos básicos sobre fibras ópticas convencionais e MOFs; no capítulo 3, foram introduzidos conceitos de amplificação Raman; já no capítulo 4, foi explanada a realização de amplificação Raman em MOFs, além das descrições das montagens e resultados das simulações realizadas; e finalmente no capítulo 5 são apresentadas as conclusões finais do trabalho.

Nas simulações realizadas, os seguintes objetivos foram almeçados: (i) estudar a área modal em função do comprimento de onda; (ii) estudar o ganho Raman versus a perda em função do comprimento de onda; (iii) modelar configurações específicas de amplificadores Raman com MOFs; (iv) implementar estes amplificadores em sistemas ópticos completos, para verificação de ganho, figura de ruído e taxa de erro de bit (BER, do inglês *bit error rate*). Mostra-se que em certas situações as MOFs podem ser mais adequadas para a amplificação Raman do que fibras convencionais, devido às suas propriedades únicas. A geometria e

características da MOF que será utilizada neste trabalho serão as mesmas das demonstradas experimentalmente pela equipe da NTT (TAJIMA, ZHOU, NAKAJIMA, SATO, 2004).

Como resultado prático da realização do trabalho, tem-se a possibilidade de estender a banda de transmissão e de fazê-lo baseado em novas tecnologias. No cenário de utilização de amplificação Raman em MOFs, tem-se a possibilidade de realização de transmissões com menores potências de bombeamento, devido às características da MOF aumentarem a eficiência da amplificação Raman, obtendo possivelmente soluções de menor custo.

Amplificadores Raman em MOFs de baixa perda podem trazer ainda benefícios quanto à eficiência de ganho e dispersão, sendo melhores que os amplificadores Raman em fibras comuns em certas faixas de espectro. Além disso, atualmente, não existe um volume grande de trabalhos na literatura que estude sistematicamente MOFs de baixa perda para amplificação Raman.

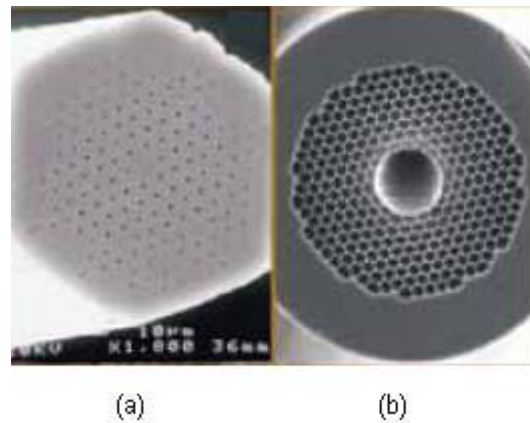
## 2 FIBRAS ÓPTICAS

### 2.1 BREVE HISTÓRICO DE FIBRAS ÓPTICAS

As fibras ópticas surgiram como um avanço nos estudos de propagação de ondas eletromagnéticas, desenvolvidos desde o início do século 20. No início, foram feitas experiências em cilindros dielétricos e posteriormente, já na década de 30, em estruturas de fibra de vidro. Porém, somente em 1951, com a invenção do Fiberscope, equipamento para transmissão de imagens através de um feixe flexível de fibras, a tecnologia tomou impulso (GIOZZA, CONFORTI, WALDMAN, 1991). Contudo, somente em 1960 com a primeira demonstração do laser pelo americano Theodore Maiman as pesquisas em fibras ópticas tomaram novo rumo, abrindo a possibilidade de concepção de sistemas de transmissão óptica de longo alcance e grande banda passante. Na mesma época, foi criada a primeira fibra com estrutura de núcleo e casca pelo indiano radicado na Inglaterra Kapany e sua equipe (GIOZZA, CONFORTI, WALDMAN, 1991).

No início dos anos 70, no intuito de se obter fibras ópticas de baixa perda, pesquisadores do Bell Laboratories propuseram e fabricaram fibras de vidro com o núcleo rodeado por ar e suspenso por estreitas pontes de vidro. A idéia foi logo abandonada com a demonstração de fibras totalmente sólidas apresentando perdas aceitáveis para Telecomunicações. Em 1991, a idéia foi retomada e aprimorada em um novo contexto com a preposição de fibras de cristal fotônico. A estrutura de buracos periodicamente dispostos na seção transversal destas fibras foi idealizada de modo a criar um cristal fotônico, apresentando um *bandgap* que aprisionasse e guiasse a luz pelo núcleo da fibra. Em 1996 houve a primeira demonstração de uma fibra de cristal fotônico (ou MOF) que mesmo sem apresentar *bandgap* fotônico guiava a luz por reflexão interna total e apresentava uma série de características incomuns. Conseqüentemente, pôde-se verificar os benefícios que este novo tipo de estrutura poderia trazer, como uma maior diferença entre os índices de refração de núcleo e casca e a utilização de apenas sílica não dopada.

As MOFs podem ser divididas em duas categorias: as de alto e as de baixo índice de refração do núcleo. As primeiras funcionam como as fibras convencionais, guiando a luz através do princípio da reflexão interna total. Já as fibras de baixo índice de refração de núcleo utilizam o efeito de *bandgap* fotônico (PBG, do inglês *photonic bandgap*), no qual a luz fica confinada ao núcleo por sofrer interferência destrutiva na casca microestruturada (PCF *Technology Tutorial*, 2005). Na Figura 1, são mostradas MOFs de núcleo sólido (a) e vazado (núcleo oco) (b), correspondendo respectivamente às categorias de alto e baixo índice de núcleo.



**Figura 1** – Tipos de fibras microestruturadas (a) MOF de núcleo sólido; (b) MOF de núcleo oco. (RUSSEL, 2007)

## 2.2 ANÁLISE ÓPTICA DA FIBRA

Um dos princípios físicos básicos de funcionamento das fibras ópticas convencionais é dado, numa análise de óptica de raios, pela lei da reflexão, que determina que o ângulo de incidência seja igual ao de reflexão em uma interface entre dois meios diferentes de índices de refração  $n_1$  e  $n_2$ , conforme apresentado na Figura 2(a). Também de importância crucial é a lei de refração (também chamada de Lei de Snell), que é dada por:

$$n_1 \sen \theta_1 = n_2 \sen \theta_2, \quad (1)$$

onde  $\theta_1$  é o ângulo do raio incidente com relação à normal à superfície,  $\theta_2$  é o ângulo do raio refratado,  $n_1$  é o índice de refração do meio de incidência (meio 1) e  $n_2$  é o índice de refração do meio 2. Todos estes parâmetros podem ser visualizados na Figura 2(a).

Analisando a lei da refração na estrutura da fibra, é possível verificar que quando há um aumento do valor de  $\theta_1$ , há também um aumento da luz refletida e uma diminuição da luz refratada. Numa fibra, o meio 1 é o núcleo e o meio 2 é a casca, e  $n_1 > n_2$ . Desta forma, verifica-se que  $\theta_1 < \theta_2$  e que, portanto, quando  $\theta_1$  tende a um determinado valor (ângulo limite), o ângulo  $\theta_2$  tende a  $90^\circ$ , fazendo com que a luz refratada tenda a zero (BISCUOLA, MAIALI, 1997), como visto na Figura 2(b). No caso de haver uma incidência com um ângulo maior, ocorrerá reflexão interna total, mostrada na Figura 2(c), técnica utilizada para prover uma propagação com baixa perda em qualquer fibra convencional.

Um outro parâmetro importante a ser analisado em uma fibra óptica é a constante de propagação  $\beta$ , correspondendo ao módulo da projeção do vetor de onda  $\vec{k}$  no sentido paralelo ao eixo da fibra, que é dado por:

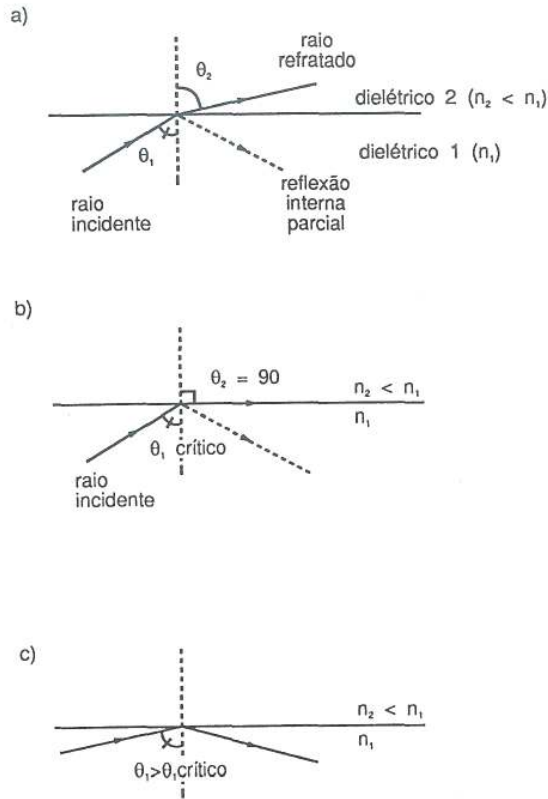
$$\beta = k \sin \theta_1, \quad (2)$$

numa visão de óptica de raios, os possíveis valores de  $\theta_1$  e, portanto, de  $\beta$  caracterizam os diferentes modos de propagação próprios da fibra. Pode-se também definir um índice de refração efetivo do modo de propagação ( $n_{\text{modo}}$ ), que permite escrever  $\beta$  de uma forma bastante semelhante à forma do módulo do vetor de onda:

$$\beta = \frac{2\pi n_{\text{modo}}}{\lambda}. \quad (3)$$



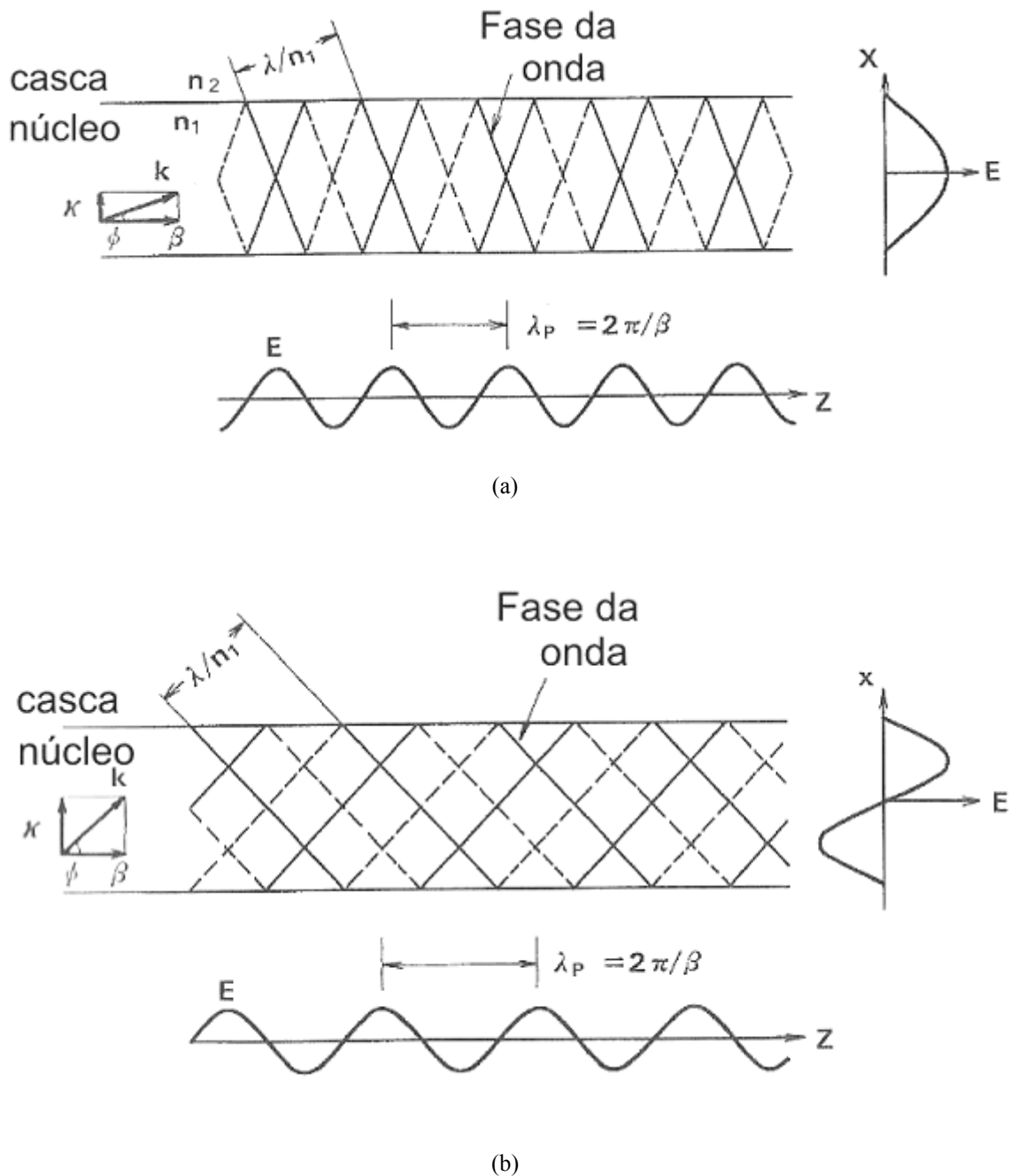
onde  $\lambda$  é o comprimento de onda.



**Figura 2** – Comportamento do feixe de luz com o ângulo de incidência menor (a), igual (b) e maior (c) que o ângulo limite. (GIOZZA, CONFORTI, WALDMAN, 1991)

Em termos de teoria eletromagnética (e óptica ondulatória), o modo de propagação é uma solução das equações de Maxwell para os campos elétricos,  $\vec{E}$ , e magnético,  $\vec{H}$ , numa determinada geometria. Sendo assim, as características de um modo dependem das propriedades do material e as condições de contorno que definem o meio pelo qual a luz propaga. A sua formação pode ser entendida a partir de uma decomposição da onda propagante dentro do núcleo da fibra em duas ondas planas. Uma onda plana se propaga ao longo do eixo da fibra e tem como número de onda a constante de propagação  $\beta$ . A outra onda plana se propaga transversalmente ao eixo da fibra, e tem a constante  $\kappa$ , vista na Figura 3, como número de onda. Devido a esta última estar ortogonal à interface casca-núcleo, ocorre

a formação de uma cavidade. Com isso, há a formação de uma onda estacionária (como ocorre em uma corda quando esta está presa em ambas as pontas e aplicam-se movimentos verticais à ela) constituindo a formação do modo.



**Figura 3** – Decomposição de dois modos de propagação nas componentes transversal e longitudinal, com geração de onda estacionária. (adaptado de OKAMOTO, 2000).  $\phi$ : ângulo entre o vetor de onda e o eixo da

fibra ( $z$ );  $\lambda_p$ : comprimento de onda plana se propagando ao longo do eixo da fibra.

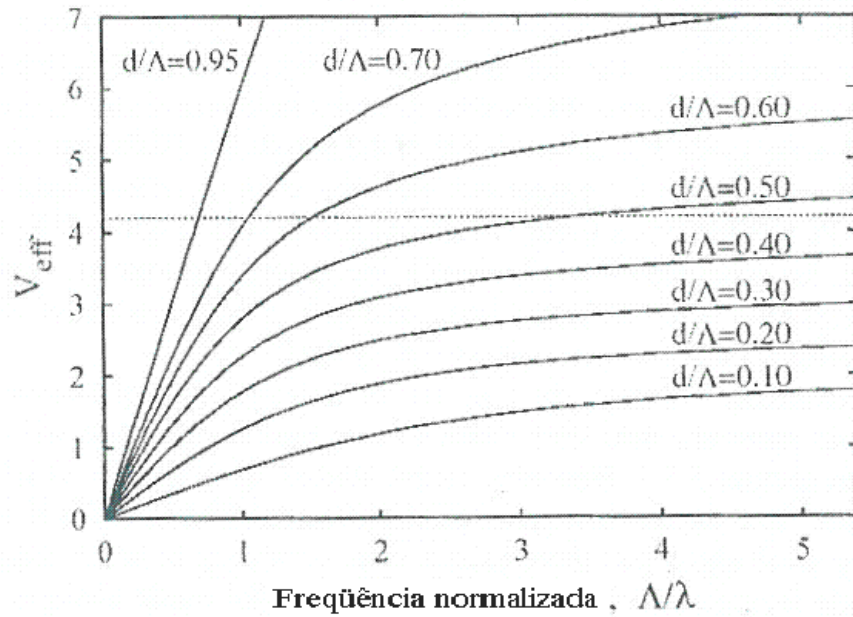
Em uma MOF, a análise da propagação por reflexão interna total deve levar em conta que o índice de refração da casca ( $n_2$ ) não é bem definido. Neste contexto, um importante parâmetro a ser analisado é a fração da área da casca ocupada por ar, chamada em inglês de *air-filling fraction*, que, para uma matriz triangular de furos, é dada por:

$$f = \frac{A_{ar}}{A_{total}} = \frac{\pi d^2}{2\sqrt{3}\Lambda^2}, \quad (4)$$

onde  $d$  é o diâmetro do furo e  $\Lambda$  é o espaçamento entre furos.

Quando  $f$  cresce, cresce também a quantidade de luz propagada nos furos, levando a um decréscimo de  $n_2$ . 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 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 (BJARKLEV, BROENG, BKARKLEV, 2003).



**Figura 4** – Comportamento da frequência normalizada em MOFs com matriz triangular de furos para diversos valores da razão entre  $d$  e  $\Lambda$ . (adaptado de BJARKLEV, BROENG, BKARKLEV, 2003)

Em qualquer fibra operando por reflexão interna total pode-se definir uma frequência normalizada,  $V$ , que sumariza diversas propriedades do guia:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad (5)$$

sendo  $a$  o raio do núcleo.

Para que haja somente um modo de propagação na fibra, o valor de  $V$  deve ser menor que 2,405 em fibras convencionais, sendo este chamado então de  $V_c$  ou frequência normalizada de corte. Inserindo este valor na equação 5, pode-se calcular o comprimento de onda de corte ( $\lambda_c$ ). Diante disto, é possível analisar que, para comprimentos de onda menores que  $\lambda_c$ , haverá mais de um modo de propagação e a fibra será multimodo. Em fibras microestruturadas, como já mencionado, o índice da casca varia fortemente com o

comprimento de onda. Dependendo da razão entre  $d$  e  $\Lambda$  (e portanto de  $f$ ), esta variação pode compensar a variação explícita de  $V$  com  $\lambda$ , resultando em valores de  $V$  que estão sempre abaixo de  $V_c$  (ver Figura 4). Neste caso tem-se na prática uma fibra monomodo para qualquer comprimento de onda. No caso de haver muitos modos de propagação, o número total de modos ( $N$ ) é aproximadamente dado por:

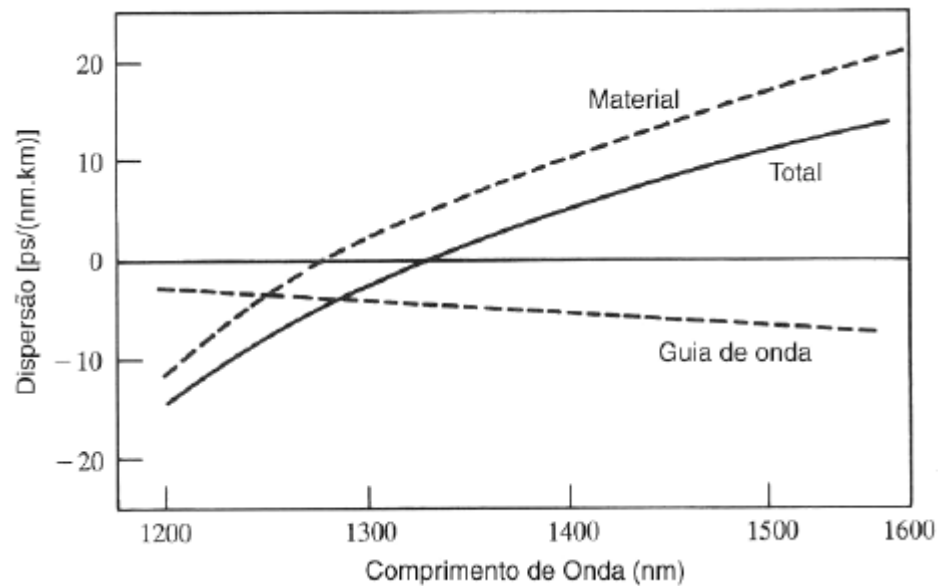
$$N \sim \frac{V^2}{2}, \quad (6)$$

e tal equação se mostra adequada tanto para fibras convencionais quanto para MOFs.

Um outro fator importante a ser analisado é a dispersão da velocidade de grupo que ocorre na fibra. Como o índice de refração varia com o comprimento de onda, as diferentes componentes espectrais que compõem um pulso se propagam com diferentes velocidades de grupo e com isso geram atraso entre si. Este atraso leva a um alargamento indesejado dos pulsos propagados é chamado de dispersão ( $D$ ). A dispersão pode ser decomposta em duas contribuições principais:

$$D = D_m + D_w, \quad (7)$$

onde  $D_m$  é a dispersão do material e  $D_w$  é a dispersão do guia de onda, que depende da estrutura e confinamento oferecido pelo guia de onda e é função do índice de refração efetivo do modo ( $n_{\text{modo}}$ ). O comportamento destes componentes para uma fibra convencional pode ser visualizado na Figura 5.



**Figura 5** – Composição dos componentes da dispersão. (SAITO, 2006)

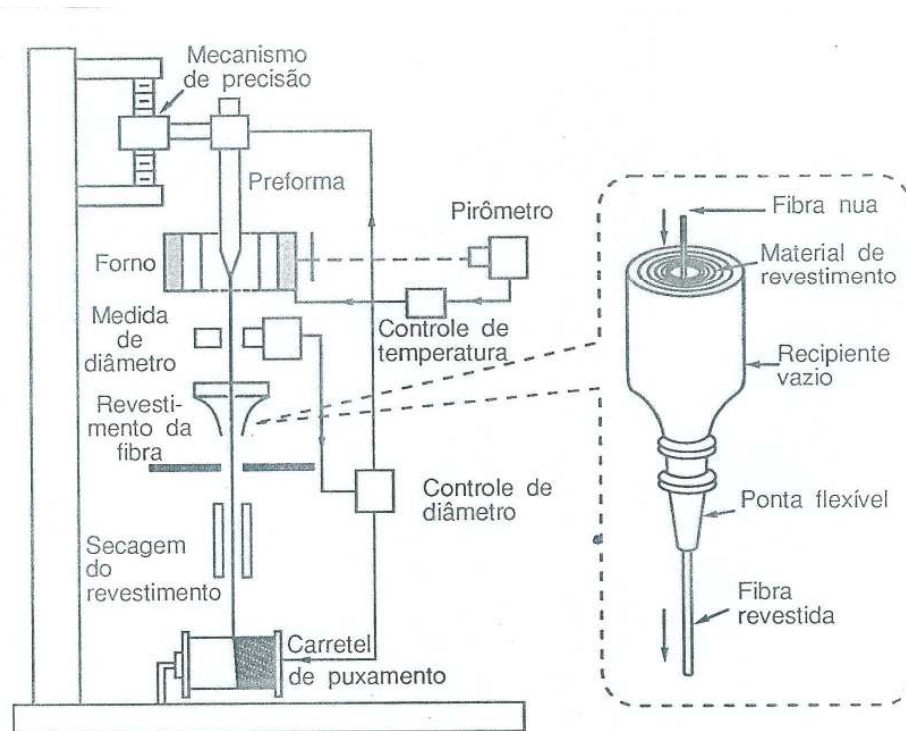
Em uma MOF, a dispersão do guia de onda  $D_w$  pode ser muito grande devido tanto às grandes variações de  $n_2$  com o comprimento de onda quanto ao alto confinamento oferecido por estas fibras. Esta característica faz com que se tenha grande flexibilidade para se projetar a dispersão total da fibra.

### 2.3 GEOMETRIA DA FIBRA E FABRICAÇÃO

Para a fabricação de uma fibra convencional, são montadas preformas constituídas de um bastão cilíndrico de vidro com uma região de sílica pura e outra dopada, que formarão o conjunto núcleo / casca. A diferença de material criada a partir do nível de dopagem aplicado dará origem à diferença de índice de refração entre núcleo e casca, necessária para o guiamento óptico. Esta dopagem, baseada no processo de deposição de vapor químico (CVD, do inglês *Chemical Vapor Deposition*) (GIOZZA, CONFORTI, WALDMAN, 1991), desenvolvido nos anos 70 pelo *Bell Laboratories* e outros (KNIGHT, 2003) é feita em altas temperaturas e gera óxidos dopantes, como por exemplo,  $\text{GeO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ , e BO (Óxido de Germânio, Fósforo e Boro respectivamente).

Após o processo de dopagem, a preforma irá passar pelo processo de puxamento.

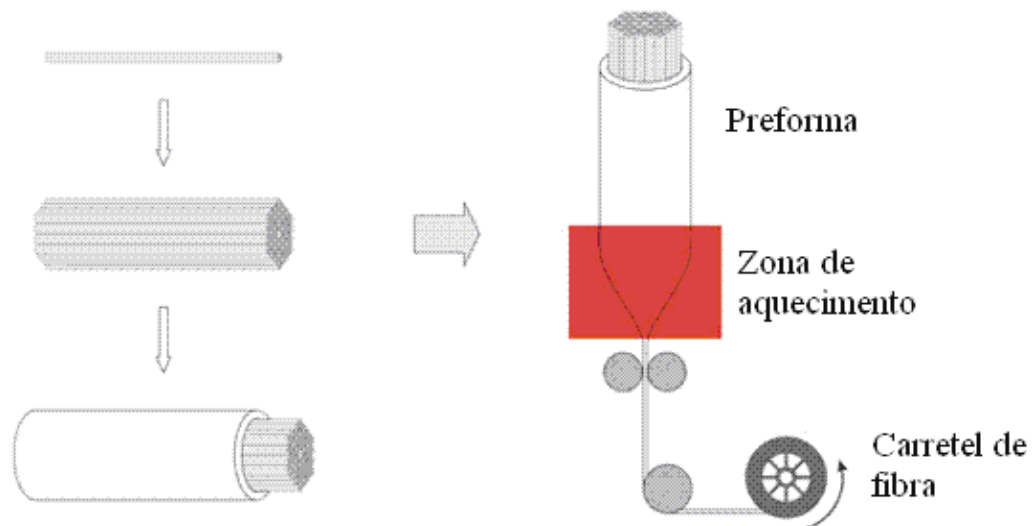
Neste, a preforma, com eixo na vertical, passará por um forno com temperaturas entre 1800° e 2000 °C. O vidro derretido e é então tracionado para baixo pela força gravitacional em uma torre de fabricação de fibras e enrolado a uma determinada força de tração, como pode ser visto na Figura 6.



**Figura 6** - Processo de fabricação da fibra convencional. (GIOZZA, CONFORTI, WALDMAN, 1991)

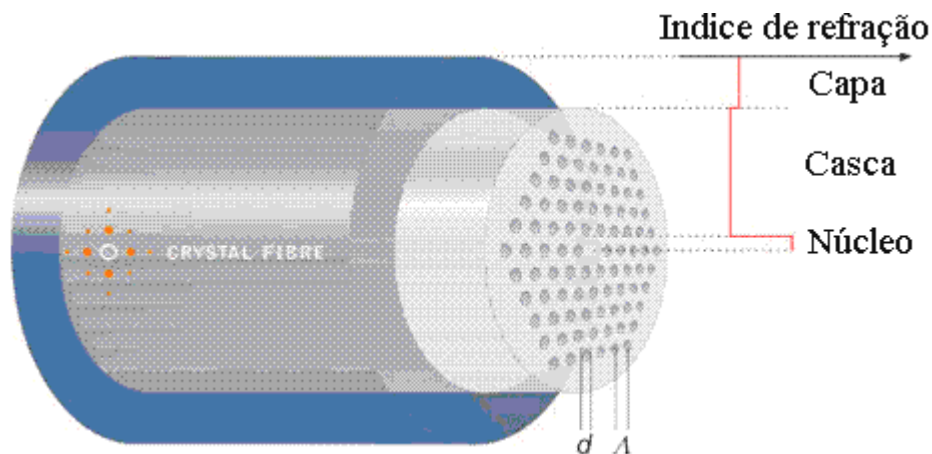
Um fator relevante no desenvolvimento das novas fibras ópticas é a capacidade de se controlar as características do guia de onda. Enquanto que numa fibra convencional monomodo o núcleo e a casca têm um índice de refração similar (diferindo em até ~1%), uma fibra microestruturada pode ter um alto contraste de índice (de até aproximadamente 50%). Este contraste é obtido devido ao ar existente na casca e exige que a fabricação da preforma seja baseada no agrupamento (ou empilhamento) de tubos capilares de sílica, como visto na Figura 7. Os capilares podem ter 20 mm de diâmetro, sendo que o capilar central é substituído por um tubo sólido no caso de MOFs de núcleo sólido. A preforma então passa pelo mesmo

processo de puxamento descrito anteriormente, como mostra a Figura 7. Após esta etapa, obtém-se a fibra em sua forma final, com a estrutura de furos e núcleo mostrada na Figura 8.



**Figura 7** - Processo de fabricação da fibra microestruturada. (adaptado de *Photonic Crystal Fibers Technology Tutorial*)

A estrutura perfurada das MOFs traz várias vantagens tanto para a fabricação quanto para o uso destas: o ar é mecânica e termicamente compatível com praticamente qualquer material, é transparente em uma larga faixa espectral e tem um índice de refração inferior ao de outros materiais em frequências ópticas.



**Figura 8** - Fibra microestruturada com núcleo sólido. (adaptado de *Photonic Crystal Fibers Technology Tutorial*)

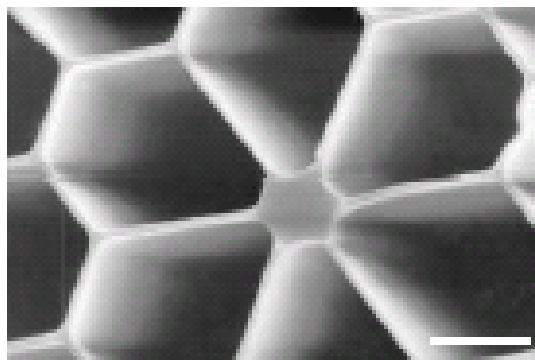


## 2.4 PROPRIEDADES DE MOFS COM NÚCLEO SÓLIDO

As MOFs possuem diversas características incomuns a outros tipos de fibras, o que possibilita aplicações que se baseiam em algumas propriedades especiais da casca microestruturada, as quais são causadas pelo alto contraste no índice de refração e pela natureza bidimensional da microestrutura. A microestrutura afeta a dispersão, permite obter pequenas áreas modais, permite maior controle do número de modos guiados e afeta a birrefringência da fibra, que é caracterizada pela capacidade da fibra em separar modos de polarização (GIOZZA, CONFORTI, WALDMAN, 1991).

A dispersão de velocidade de grupo pode ser radicalmente afetada pela dispersão de guia de onda nas MOFs com o núcleo pequeno e furos largos na casca (Figura 9). A dispersão leva a um alargamento dos pulsos propagados, o que em comunicações gera um crescimento da taxa de erro de bit devido à superposição de pulsos, degradando a informação transmitida. No caso de uma MOF, esta dispersão pode ser melhor controlada do que em uma fibra convencional.

De forma complementar, outras propriedades podem ser projetadas: podem-se criar estruturas com enorme birrefringência ou que suportem apenas um modo independentemente do comprimento de onda ou escala da microestrutura.



**Figura 9** - Corte transversal de uma fibra microestruturada de núcleo pequeno. Escala do traço: 1  $\mu\text{m}$  .

(KNIGHT, 2003)

Um outro fator importante a ser analisado é o conceito de índice de refração efetivo da casca. A dimensão da microestrutura em si é da mesma ordem de grandeza do comprimento de onda, o que faz com que a luz interaja com a estrutura da casca como um todo e não com cada parte dela. Com isso, na prática, há uma média ponderada entre o índice de refração da sílica e do ar, o que é chamado de índice de refração efetivo da casca ( $n_{ef}$ ) e que corresponde ao modo de propagação fundamental nesta. Quanto mais área de ar na casca, menor este índice efetivo, pois o índice de refração do ar é igual a 1, valor bem inferior ao da sílica ( $\sim 1,45$ ).

Uma forma mais específica de se calcular o índice de refração efetivo da casca é fazer uma análise da estrutura desta, separando-a em células hexagonais ao redor de cada furo. Encontra-se então os modos de propagação nestas células aplicando-se condições de contorno periódicas (BJARKLEV, BROENG, BJARKLEV, 2003). Define-se finalmente o índice efetivo da casca, a partir da constante de propagação do modo fundamental na célula:

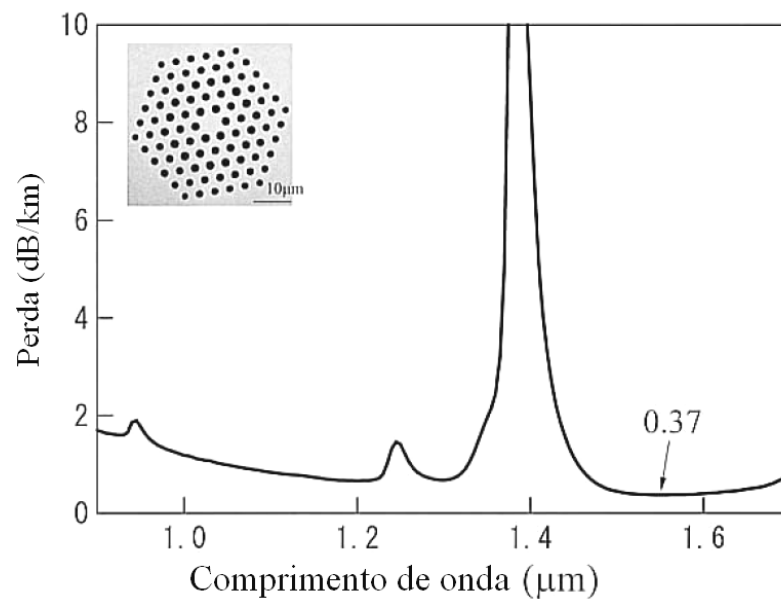
$$n_{ef} = \frac{\beta_{fsm}}{k_0}, \quad (8)$$

onde  $k_0$  é a constante de propagação no vácuo. Como já mencionado na seção 2.2,  $n_{ef}$  depende fortemente do comprimento de onda e da fração de ar na casca ( $f$ ).

## 2.5 PROPRIEDADES DA MOF DE BAIXA PERDA ANALISADA

O artigo que motivou e serviu como base para o estudo desta dissertação, descreve a fabricação e caracterização de uma MOF com 90 furos de  $2,5 \mu\text{m}$  de diâmetro ( $d$ ) e espaçamento ( $\Lambda$ ) de  $4 \mu\text{m}$ , com variações de cerca de 1% (TAJIMA, ZHOU, NAKAJIMA, SATO, 2004). O comprimento fabricado foi de 10 km e o seu espectro de atenuação é

mostrado na Figura 10. A atenuação mínima conseguida pela equipe que desenvolveu o trabalho foi de 0,37 dB/km para um comprimento de onda de 1,55  $\mu\text{m}$  e de 0,71 dB/km para o comprimento de onda de 1,31  $\mu\text{m}$ . Estas eram as menores perdas conseguidas até então em MOFs e se deviam a cuidados quanto à fabricação e para se evitar contaminação, mas também ao núcleo não ser demasiadamente pequeno (porém muito menor do que o de uma fibra monomodo convencional) e à relação  $d/\Lambda$  ter valor relativamente baixo.



**Figura 10** - Espectro de atenuação da MOF de baixa perda analisada nesta dissertação. (TAJIMA, ZHOU, NAKAJIMA, SATO, 2004)

No artigo analisado, a magnitude dos diversos componentes da perda foi comparada com a de uma fibra convencional, como mostra a Tabela I. É possível verificar que a MOF se aproxima de uma fibra monomodo convencional em termos de vários destes componentes. A perda total da MOF é apenas 0,36 dB/km e 0,17 dB/km superior à da fibra convencional em 1,31  $\mu\text{m}$  e 1,55  $\mu\text{m}$ , respectivamente. Pode-se observar também que a perda por rugosidade é um dos principais parâmetros de diferença entre a MOF e a fibra monomodo convencional, sendo uma ordem de grandeza maior naquela. Este tipo de perda é acentuado em uma MOF devido à rugosidade da superfície dos furos.

Além da rugosidade, a perda por absorção devido ao OH também é significativamente superior na MOF (~0,11 dB/km maior). Esta característica pode ser atribuída à presença dos furos da fibra, que fazem com que haja um depósito de umidade, fato que não ocorre em uma fibra convencional, que somente absorve umidade durante a fabricação.

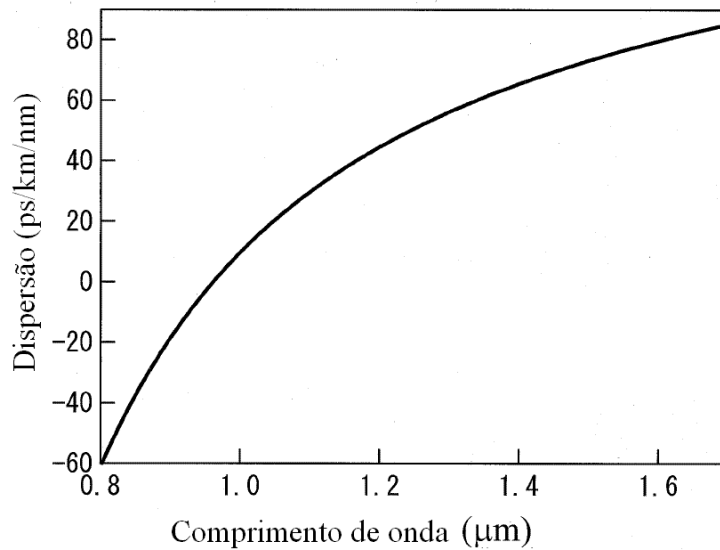
TABELA I  
**Comparação de componentes de perda entre a MOF analisada e uma fibra convencional**

	Fibra microestruturada	Monomodo convencional
Perda em 1,31 $\mu$ m, dB/km	0,71	0,35
Perda em 1,55 $\mu$ m, dB/km	0,37	0,2
Coefficiente de espalhamento Rayleigh, dB/km/ $\mu$ m <sup>4</sup>	1	1
Perda por rugosidade, dB/km	0,07	< 0,01
Perda por absorção de OH em 1,55 $\mu$ m, dB/km	0,12	< 0,01
Absorção IR em 1,55 $\mu$ m, dB/km	0,012	0,01

Fonte: TAJIMA, ZHOU, NAKAJIMA, SATO, 2004

A MOF analisada possui valores altos de dispersão cromática, que, em 1550 nm e 1300 nm, têm valores de 75 ps/nm/km e 55 ps/nm/km, respectivamente, como pode ser observado na Figura 11.

Este perfil de dispersão é bastante diferente dos obtidos em fibras convencionais, onde dispersão positiva só pode ser obtida acima de ~1300 nm.



**Figura 11** - Espectro de dispersão da MOF de baixa perda analisada nesta dissertação. (TAJIMA, ZHOU, NAKAJIMA, SATO, 2004)

Vale mencionar que depois do estudo relatado acima, o grupo de pesquisadores da NTT conseguiu ainda novas melhorias de desempenho em suas fibras e demonstrou uma série de aplicações para elas em Telecomunicações. Seis meses após o estudo original, foi atingida a marca de 0,28 dB/km de perda em 1550 nm, através da redução da rugosidade da superfície e da absorção de OH, devido a melhorias no processo de fabricação (TAJIMA, KUROKAWA, NAKAJIMA, SANSAWA, 2005). Entretanto, esta fibra possuía um núcleo maior que o da fibra escolhida para o presente estudo.

Ainda em 2005 foi realizado um estudo de transmissão por multiplexação por comprimento de onda densa (ou DWDM, do inglês *dense wavelength division multiplexing*) em uma MOF com extensão de 100 km, dividida em quatro enlaces de 25 km. A MOF possuía 60 furos e uma perda de 0,3 dB/km em 1550 nm e de 0,45 dB/km em 1310 nm (KUROKAWA, TAJIMA, TSUJIKAWA, NAKAJIMA, MATSUI, SANSAKAWA, HAIBARA, 2006). O espalhamento Rayleigh conseguido neste caso foi menor do que numa fibra convencional monomodo dopada com GeO<sub>2</sub> que, somado ao fato de a fibra ter uma grande extensão, comprova a real utilidade deste tipo de fibra em transmissões ópticas de

longa distância. Neste experimento também foi realizada a transmissão de sólitons, utilizando-se um circuito com amplificadores dopados a Érbio (EDFA) e intercalando os segmentos de MOFs com fibras de compensação de dispersão (ou DCF, do inglês *dispersion compensating fiber*). Com isso, foi atingida uma transmissão com baixa dispersão do sinal pelo mesmo percurso de 100 km, com uma razão de erro de bit (BER) abaixo de  $10^{-11}$ , o que também comprova a qualidade e a usabilidade das MOFs.

Já em 2007, um novo trabalho do grupo reportava um valor de 0,18 dB/km de perda em 1550 nm (TAJIMA, 2007). O grupo obteve redução das perdas por rugosidade na fibra, tornando-as menores do que as de uma fibra monomodo convencional. O espalhamento Rayleigh também apresentou menor valor do que o da fibra convencional, atingindo a marca de 0,03 dB/km. A perda por absorção de OH, que no passado era superior à de uma fibra convencional, neste experimento teve uma equiparação em termos de valor.

### 3 AMPLIFICAÇÃO RAMAN EM FIBRAS ÓPTICAS

#### 3.1 ESPALHAMENTO RAMAN

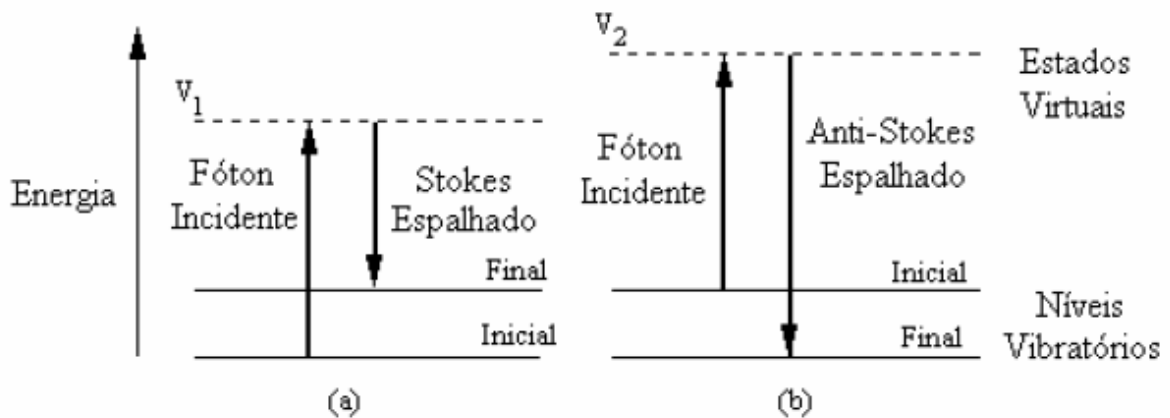
O espalhamento Raman espontâneo foi descoberto pelo físico indiano radicado no Reino Unido, Sir Chandrasekhara Venkata Raman em fevereiro de 1928 e em decorrência deste feito, foi-lhe outorgado o Prêmio Nobel de Física em 1930 (All Nobel Laureates in Physics, 2007). Porém, foi somente na década de 1970 que se iniciaram as pesquisas aplicadas deste fenômeno no campo de comunicações ópticas, com o desenvolvimento das fibras ópticas (AGRAWAL, 2001). Durante os anos 80, houve as primeiras implementações de amplificadores baseados neste processo, porém ainda com um desempenho inferior ao necessário em termos de ganho para o seu uso em larga escala. Somente do meio dos anos 90 foi possível o seu uso comercial, devido às melhorias de desempenho implementadas (BROMAGE, 2003).

O espalhamento Raman é um fenômeno quântico que descreve que quando há incidência de um feixe (campo) óptico em uma molécula, ocorre transferência de energia entre o campo óptico e os modos de vibração moleculares. Esta troca de energia ocorre em quantidades discretas, denominadas fônons. Desta forma, os fótons incidentes podem receber ou perder quanta de energia com valores que dependem das moléculas envolvidas no processo (BROMAGE, 2003). Neste caso, o processo é chamado de espalhamento Raman espontâneo.

O espalhamento Raman pode ocorrer em qualquer material. Quando há a perda de energia do fóton, diz-se que a rede molecular foi aquecida, pois há um aumento da vibração das moléculas que compõem a estrutura do meio. A perda de energia altera a frequência do fóton, diminuindo-a. Quando o fóton ganha energia, a rede é resfriada, pois ocorre o efeito inverso e, neste caso, a frequência aumenta.

Quando o fóton espalhado tem energia (frequência) menor que a do incidente, ele é chamado de linha de Stokes. Quando a energia do fóton espalhado é maior que a do fóton original, ele é conhecido como linha anti-Stokes. Quanticamente, o espalhamento Raman espontâneo pode ser entendido da seguinte forma (ver Figura 12): após a incidência do fóton, ocorre a mudança do estado do sistema para um nível virtual  $V_1$  e imediatamente o decaimento para um nível real,  $N_{\text{final}}$ , correspondendo a uma energia de vibração diferente daquela relativa ao nível inicial,  $N_{\text{inicial}}$ . Quando  $N_{\text{final}}$  é menor que  $N_{\text{inicial}}$ , o processo é chamado de Stokes. Quando  $N_{\text{final}}$  é maior que  $N_{\text{inicial}}$  o processo é o anti-Stokes.

A diferença de frequência entre o fóton incidente e o fóton espalhado corresponde à própria frequência do fônon gerado (quando há perda de energia no fóton) ou eliminado (quando há absorção de energia no fóton), como pode-se verificar na Figura 12.



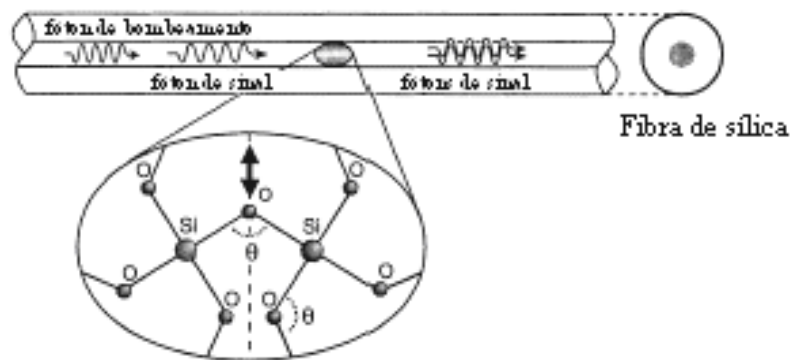
**Figura 12** – Diagramas de níveis de energia. (a) Linha Stokes (b) Linha anti-Stokes. (SAITO, 2006)

O processo de espalhamento Raman pode ser estimulado pela presença de um fóton Stokes no momento da interação do fóton causador do espalhamento (chamado de bombeamento) com a molécula. Neste caso, o processo é chamado de espalhamento Raman estimulado. A Figura 13 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



bombeamento. A presença do fóton de sinal estimula a emissão de um fóton Stokes idêntico ao original, de forma que este processo pode ser utilizado para se obter amplificação óptica.

Vale mencionar que a presença de um fóton anti-Stokes não desencadeia processo semelhante, sendo apenas absorvido no processo de espalhamento Raman estimulado. Sendo assim, não há ganho óptico para o anti-Stokes.



**Figura 13** – Demonstração gráfica da amplificação por espalhamento Raman estimulado em uma fibra óptica de sílica. (adaptado de BROMAGE, 2003)

Na Figura 13, o fóton de bombeamento (fóton causador do espalhamento) é decomposto numa cópia do fóton inicial de sinal (fóton originalmente transmitido) e o fônon, amplificando, desta forma, o sinal inicial. Para que o espalhamento Raman seja estimulado, a frequência do sinal deve ser deslocada em relação à de bombeamento de um valor que esteja dentro da banda de ganho Raman do material. Para a sílica, o pico Raman corresponde a um deslocamento de 13,2 THz, conforme visto no espectro de ganho Raman mostrado na Figura 14. A largura a meia altura da curva vista na Figura 14 é de  $\sim 8$  THz, indicando que uma larga faixa de frequências pode ser amplificada

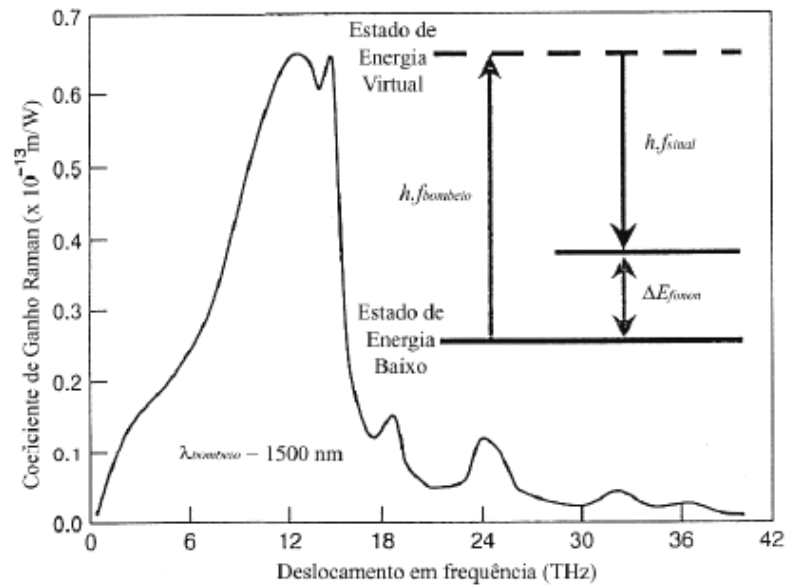


Figura 14 – Espectro de ganho Raman para a sílica. (SAITO, 2006)

### 3.2 PROPRIEDADES DO GANHO RAMAN EM FIBRAS DE SÍLICA

Algumas propriedades do espalhamento Raman em fibras devem ser observadas durante um projeto de amplificadores. Uma delas é que o ganho Raman está ligado diretamente à diferença de frequências entre o sinal e o bombeamento. O melhor ganho ocorre quando esta diferença é de 13,2 THz.

Uma outra característica é que o ganho está relacionado com a área efetiva de propagação. Para sinais de baixa potência, caso em que pode-se desprezar o decréscimo de potência de bombeamento devido à amplificação e em que não há saturação de ganho, o ganho líquido (ganho já descontadas as perdas) é dado por (HEADLEY, AGRAWAL, 2005):

$$G_{net} = \exp(C_R P_0 L_{eff} - \alpha_s L), \quad (9)$$

onde  $L$  é o comprimento da fibra,  $P_0$  é a potência de bombeamento na entrada da fibra,  $\alpha_s$  é o coeficiente de atenuação do sinal e  $C_R$  é a eficiência de ganho Raman, que pode ser expressa a partir do coeficiente de ganho Raman ( $g_R$ ) e da área efetiva ( $A_{eff}$ ) como:

$$C_R = \frac{g_R}{A_{eff}} . \quad (10)$$

$L_{eff}$  é o comprimento efetivo da fibra que leva em conta a perda sofrida pelo bombeamento durante a propagação e é dado por (HEADLEY, AGRAWAL, 2005):

$$L_{eff} = \frac{1 - \exp(-\alpha_p L)}{\alpha_p} . \quad (11)$$

Nesta equação,  $\alpha_p$  é o coeficiente de atenuação do bombeamento. Uma relação entre o coeficiente de atenuação  $\alpha$  e a perda em dB/km, comumente fornecida por fabricantes, é obtida ao se igualar as seguintes equações:

$$P(z) = P_0 e^{-\alpha z} , \quad (12)$$

$$P(z) = P_0 \times P_{linear} , \quad (13)$$

onde  $P(z)$  é a potência óptica a uma distância  $z$ ,  $P_0$  é a potência óptica inicial, e  $P_{linear}$  é a perda em escala linear obtida pela propagação.

Igualando-se as duas equações, chega-se à equação:

$$e^{-\alpha z} = P_{linear} = 10^{zP_{dB}/10} , \quad (14)$$

onde  $P_{dB}$  é a perda dada em dB por unidade de comprimento. Consequentemente:

$$\alpha = P_{dB} / 4,343. \quad (15)$$

Ainda para o cálculo da equação 10, é necessário o espectro do coeficiente de ganho Raman,  $g_R$ , que é uma característica do material que compõe a fibra. A amplitude de  $g_R$  varia com o comprimento de onda de bombeamento, sendo inversamente proporcional ao comprimento de onda do pico do espectro de ganho correspondente. Desta forma, se o espectro de  $g_R$  é conhecido para uma determinada região espectral (na qual tem valor  $g_{R_{REF}}$ ), atingindo um máximo em um comprimento de onda  $\lambda_{REF}$ , pode-se determinar  $g_R$  em outra região (em torno de um comprimento de onda  $\lambda$ ) utilizando (HEADLEY, AGRAWAL, 2005):

$$g_R = g_{R_{REF}} \frac{\lambda_{REF} [nm]}{\lambda [nm]}, \quad (16)$$

Neste trabalho, utilizou-se como  $g_{R_{REF}}$  os resultados disponíveis em (AGRAWAL, 2001) para  $\lambda_{REF} = 1046$  nm. A área efetiva para a interação Raman (equação 10) é dada por:

$$A_{eff} = \frac{(\int \int_{-\infty}^{\infty} I_p(x, y) dx dy) (\int \int_{-\infty}^{\infty} I_s(x, y) dx dy)}{\int \int_{-\infty}^{\infty} I_p(x, y) I_s(x, y) dx dy}, \quad (17)$$

onde  $I_p$  e  $I_s$  são as intensidades de campo do bombeamento e do sinal, respectivamente, e  $x$  e  $y$  são os eixos ortogonais ao eixo central da fibra.

Analisando a equação 10 ainda, pode-se verificar que fibras com núcleos menores têm um ganho incrementado em relação às de núcleos maiores. Este fato faz com que a utilização

de MOFs seja indicada, pois o núcleo destas pode ser consideravelmente menor que o de fibras monomodo convencionais, incluindo-se aí as fibras convencionais com alta não linearidade como, por exemplo, uma fibra fabricada pela empresa OFS, que possui um pico de eficiência de ganho Raman em 1550 nm de  $2,5 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$  (OFS Raman *Fiber Catalog*). Para fins de comparação, pode-se mencionar que uma fibra padrão de Telecomunicações possui um pico de eficiência de ganho Raman de  $0,4 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$  (BROMAGE, ROTTWITT, LINES, 2002).

A propagação do sinal pode ser feita em qualquer sentido da fibra amplificadora, pois o ganho Raman, fora do regime de saturação, independe da direção de propagação relativa entre o sinal e o bombeamento. Há, entretanto, uma dependência do ganho Raman com a polarização da luz, sendo que caso a polarização do sinal seja igual à do bombeamento, o ganho Raman terá um melhor desempenho. Quando o bombeamento é despolarizado, a eficiência de ganho Raman é duas vezes menor do que no caso de sinal e bombeamento copolarizados. Este também é o caso quando sinal e bombeamento são contra-propagantes e a fibra é longa ( $\sim 1$  km ou mais), já que a evolução da polarização dos dois feixes torna-se descorrelacionada.

Um fator que diferencia os amplificadores Raman dos EDFAs é o fato de os últimos terem um maior tempo de vida do estado excitado. Na realidade, o estado excitado no caso do espalhamento Raman é um nível virtual e, portanto, o seu tempo de vida é praticamente nulo. Este fato faz com que em amplificadores Raman as flutuações de bombeamento sejam diretamente transferidas para o sinal. Por outro lado, os EDFAs podem operar somente na faixa em torno de 1550 nm, o que limita muito a sua utilização se comparado a um amplificador Raman, que pode operar em qualquer banda de transmissão, dependendo apenas do bombeamento.

### 3.3 APLICAÇÕES DE AMPLIFICADORES RAMAN

As aplicações de amplificadores Raman são decorrentes de suas características específicas, que os diferenciam dos EDFAs. No que se seguem, estas características são sintetizadas e os tipos de amplificadores revisados.

#### 3.3.1 Características

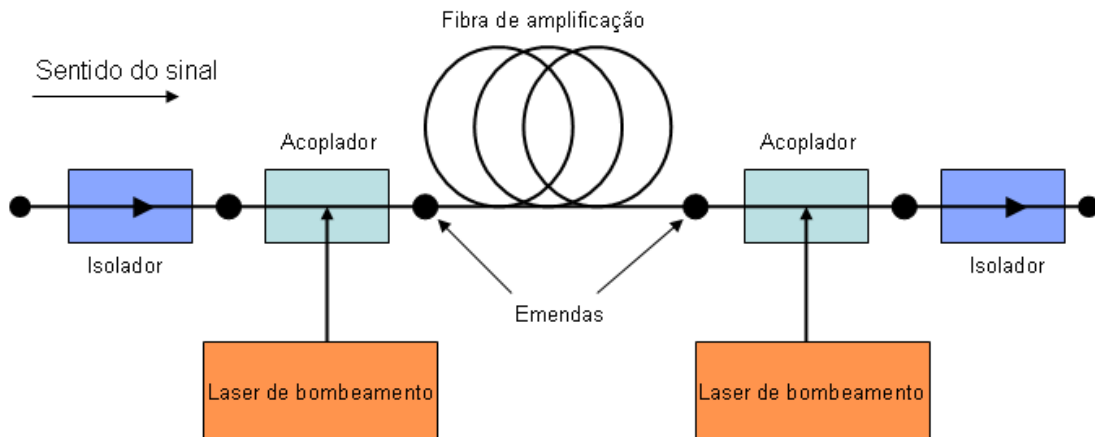
Como características dos amplificadores Raman, pode-se destacar:

- É possível utilizá-los com qualquer tipo de fibra óptica, sendo que sua implantação foi facilitada com o surgimento de novos lasers de bombeamento possuindo uma potência maior, disponíveis em uma faixa relativamente larga do espectro de interesse para comunicações ópticas. Os amplificadores Raman são, ainda, compatíveis com amplificadores EDFA existentes, podendo desta forma ser implantados em sistemas já existentes;
- Também é possível a utilização de fibras ópticas com menor diâmetro de núcleo, como por exemplo, as MOFs, aumentando assim a eficiência do ganho;
- Existem dois tipos de dispositivos: amplificadores Raman distribuídos (ou DRA, do inglês *Distributed Raman Amplifier*) e amplificadores Raman discretos (ou LRA, do inglês *Lumped Raman Amplifier*), que serão descritos a seguir.

#### 3.3.2 Tipos de Amplificadores

Como descrito acima, existem basicamente duas formas de implementação de amplificadores Raman: DRA e LRA. No caso do LRA, o amplificador é inserido de forma discreta em um ponto do enlace óptico, da mesma forma que ocorre com um amplificador EDFA. Os LRAs funcionam, portanto, como pré-amplificadores, pós-amplificadores ou amplificadores de linha. Amplificadores LRA podem possuir três geometrias diferentes para o bombeamento no que diz respeito ao seu sentido de propagação na fibra relativo ao sentido do

signal: co-direcional, contra-direcional ou combinada (co-direcional + contra-direcional), dos quais a primeira pode ser visualizada na Figura 15.



**Figura 15** - Esquema de um LRA com geometria de bombeamento combinada.

Cada uma das geometrias de bombeamento do LRA possui suas características e suas aplicabilidades, conforme visto na Tabela II.

TABELA II

**Comparação de tipos de bombeamento**

	<b>Combinado</b>	<b>Co-propagante</b>	<b>Contra-propagante</b>
<b>Ganho</b>	Médio	Alto	Baixo
<b>Ruído *</b>	Médio	Alto	Baixo
<b>Efeito não-linear</b>	Alto	Médio	Baixo

Fonte: SAITO, 2006

\* devido ao acoplamento com o laser de bombeamento

A figura de ruído visualizada na tabela relaciona-se à degradação ocorrida no amplificador quando o sinal é amplificado, através do decréscimo da relação sinal-ruído (ou SNR, do inglês *Signal Noise Ratio*) e é definida pela expressão (BROMAGE, 2004):

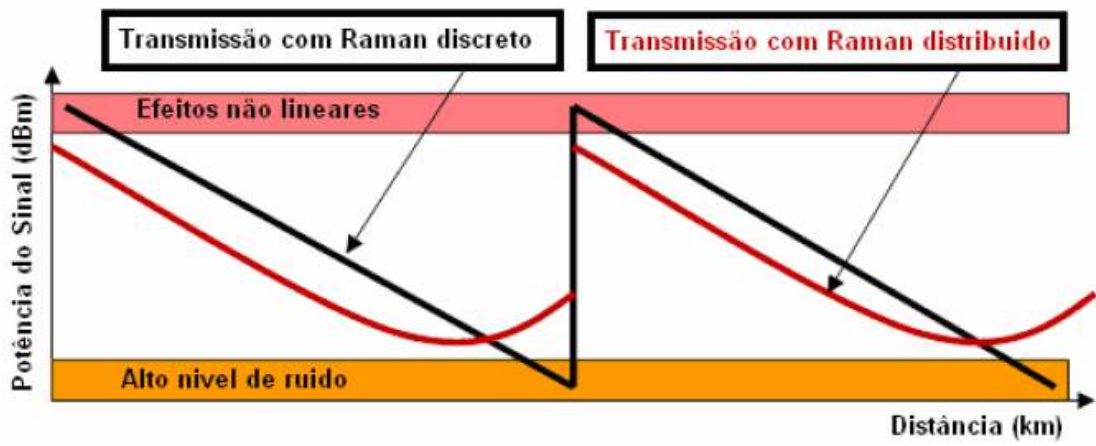
$$NF = \frac{SNR_{in}}{SNR_{out}}, \quad (18)$$

onde os índices *in* e *out* referem-se à entrada e saída, respectivamente, do dispositivo.

Já na implantação distribuída (DRA), a própria fibra de transmissão é utilizada como amplificador e com isso, tem-se como característica a possível melhoria do orçamento de potência do sistema, necessitando de fontes de sinal com menor potência. Além disso, a geração de outros efeitos não lineares é reduzida, pois o sistema trabalha com menores níveis de potência de entrada de sinal. A figura de ruído também é melhorada, pois se mantém o sinal longe da região de ruído mostrada na Figura 16. Com a aplicação deste modo, pode-se ter uma amplificação mais uniforme ao longo de todo o enlace, se comparado ao modo discreto.

Na Figura 16 é possível comparar o comportamento da amplificação Raman no modo LRA com aquela no modo DRA. A queda do sinal amplificado é devida à atenuação na fibra de transmissão. A linha vermelha é a evolução da potência de sinal com o uso do DRA nas fibras de transmissão. Já a linha preta é a mesma evolução com a utilização do LRA. Pode-se notar que no caso do DRA, a eficiência do sistema é maior, pois curva de ganho não entra nas regiões de efeitos não-lineares e de ruído do sistema.





**Figura 16** – Comparação entre comportamento do sinal amplificado no enlace com amplificação discreta e distribuída. (SAITO, 2006)

## 4 AMPLIFICAÇÃO RAMAN EM FIBRAS MICROESTRUTURADAS

### 4.1 TRABALHOS REALIZADOS

A amplificação Raman em MOFs de núcleos sólidos é interessante devido ao maior confinamento da luz nestas do que em fibras convencionais, o que aumenta a intensidade de bombeamento e, conseqüentemente, o ganho para uma mesma potência utilizada. A flexibilidade em se projetar a dispersão pode também ser explorada como uma funcionalidade adicional das MOFs. Além disso, as MOFs monomodo em todo o espectro (*endlessly single-mode fibres*) possibilitam a operação em qualquer banda de transmissão, enquanto que em certas fibras convencionais a obtenção de ganho em bandas de comprimentos de onda mais curtos requereriam bombeamento em uma região multimodo.

Até pouco tempo atrás, a perda das MOFs era grande, gerando, portanto, baixos ganhos líquidos. A primeira observação de ganho Raman ocorreu em uma fibra de 75m de comprimento e uma área efetiva de  $2,85 \mu\text{m}^2$  (YUSOFF, LEE, BELARDI, MONRO, TEH, RICHARDSON, 2001). Entretanto, a fibra apresentava uma perda de 40 dB/km e requeria altas potências (6,7 W foram utilizados) para a obtenção de ganhos significativos.

Pouco depois um trabalho mostrou que uma MOF apresentando área efetiva de  $7 \mu\text{m}^2$  e perda de 12,4 dB/km em 1550 nm apresentava ganho líquido inferior ao de uma fibra padrão de Telecomunicações, apesar de apresentar eficiência de ganho Raman 10 vezes maior (MATOS, HANSEN, TAYLOR, 2003).

Com o advento das MOFs de baixa perda, foram geradas novas possibilidades para amplificação Raman apesar das maiores áreas efetivas apresentadas por estas.

Em um experimento reportado por uma equipe de pesquisadores da NTT, foi realizada a amplificação Raman distribuída, de um sistema DWDM de 8 canais na faixa de 1571,5 a 1583,1 nm com espaçamento de 200 GHz (FUKAI, NAKAJIMA, ZHOU, TAJIMA, KUROKAWA, SANKAWA, 2004). A taxa de transmissão total foi de 80 Gbit/s, sobre um

enlace de MOF de 12,7 km de extensão. Neste caso, a atenuação obtida no comprimento de onda de 1580 nm foi de 0,55 dB/km, porém a BER do sistema outrora analisado situou-se abaixo de  $10^{-11}$ , comprovando mais uma vez as possibilidades de utilização deste tipo de fibra para futuros sistemas de transmissão de alta capacidade de largura de banda.

Em outro trabalho, foi verificada a aplicabilidade da amplificação Raman distribuída em uma MOF de 6,0 km de comprimento, na região espectral de 850 nm. Neste caso, foi aplicado um laser de bombeamento de 822 nm, para que houvesse uma diferença de 13,2 THz em relação ao comprimento de onda de sinal, com o intuito de obter o maior ganho possível. Como resultado, foi medida uma perda líquida de 1,6 dB no enlace, o que corresponde a 0,27 dB/km de perda na fibra (NAKAJIMA, FUKAI, KUROKAWA, TAJIMA, MATSUI, SANKAWA).

Um grande número de trabalhos combina amplificação Raman e compensação de dispersão em MOFs. Em um destes trabalhos, foi atingido um ganho Raman líquido de 1,5 dB em 1583 nm, utilizando-se um bombeamento de 1,5 W em uma fibra de 100 m de comprimento. Além disso, foram atingidos valores de dispersão de -70 ps/nm/km em 1540 nm e de -125 ps/nm/km em 1560 nm. O baixo ganho obtido foi devido às perdas da sílica utilizada na fabricação da MOF (DIGWEED-LYYTIKAINEN, DE FRANCISCO, SPADOTI, JURIOLLO, ROSOLEM, AYRES NETO, BORGES, CANNING, ROMERO, 2007).

Nesta linha, ainda foi realizado um trabalho numérico, no qual foi atingido um ganho de 8,3 dB em uma MOF para compensação de dispersão de 1 km de comprimento e de perda 5 dB/km, com um sinal de entrada em 1550 nm e uma potência de bombeamento de 520 mW. Além disso, foi feita a compensação da dispersão de um enlace de 70 km de fibra monomodo, deixando uma dispersão residual de +- 50 ps/nm (VARSHNEY, SAITOH, KOSHIBA, ROBERTS, 2007).

Por fim, também com o intuito de se obter amplificação Raman e compensação de dispersão, foi simulada a utilização de uma MOF com comprimento de 3,6 km em um enlace de fibra monomodo de 100 km, com transmissão WDM de 16 canais (1546 a 1558 nm) na banca C. A perda da MOF era de  $\sim 0,8$  dB/km e a dispersão variava entre -467 e -486 ps/nm/km. A eficiência de ganho obtida foi de  $20,26 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ , o que viabiliza este tipo de fibra para as aplicações propostas. Além disso, foi feita uma comparação com uma DCF, sendo que a MOF superou-a tanto em ganho quanto em compensação de dispersão (CANI, DE FRANCISCO, SPADOTI, NASCIMENTO, BORGES, CALMON, ROMERO, 2007).

## 4.2 METODOLOGIA APLICADA NA PESQUISA

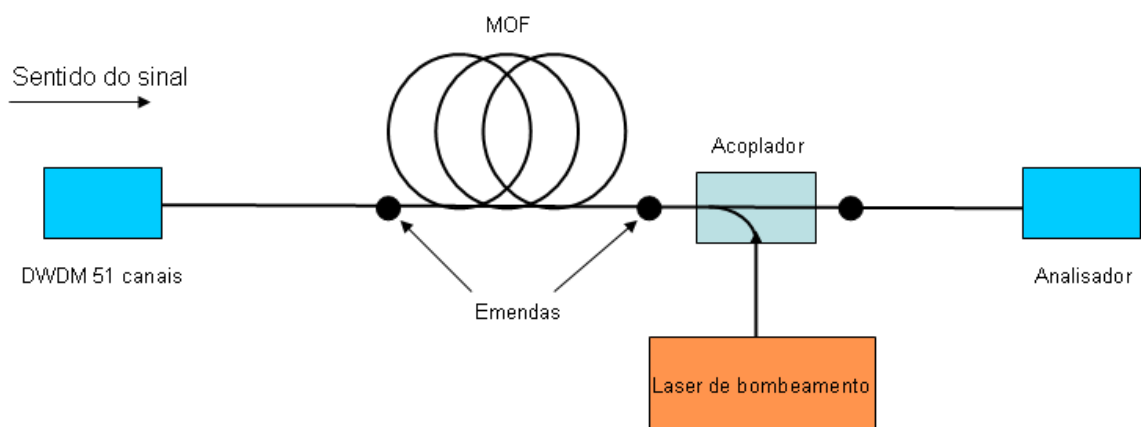
Como mencionado anteriormente, o objetivo do trabalho aqui descrito é analisar o desempenho do ganho Raman de uma MOF de baixa perda (TAJIMA, ZHOU, NAKAJIMA, SATO, 2004) por uma larga faixa espectral e testar a fibra em uma aplicação real de amplificação Raman. O desenvolvimento deste projeto se deu basicamente de forma teórica e numérica, utilizando softwares para simulação e análise. Inicialmente, foi utilizado o aplicativo *Mode Solutions*, da empresa Lumerical, para determinação dos modos guiados na fibra e suas características, como índice modal, perda e distribuição transversal dos campos elétrico e magnético. Este software baseia-se numa implementação vetorial do método de diferenças finitas e foi escolhido por oferecer um tempo de simulação baixo e uma interface gráfica que simplifica a implementação de estruturas.

Como o *Mode Solutions* faz somente a análise transversal do modo de propagação, foi utilizado também o aplicativo VPI *TransmissionMaker*, que simula a propagação de sinais ópticos ao longo do enlace da fibra, para a obtenção de ganhos, figuras de ruído e evolução de pulsos ao longo da MOF.

A partir dos resultados do *Mode Solutions*, foi possível uma determinação precisa da área efetiva do modo fundamental para ganho Raman, que está diretamente ligada à eficiência deste efeito. Esta área efetiva é calculada a partir dos vetores de Poynting nos comprimentos de onda de sinal e bombeamento e conseqüentemente das respectivas intensidades, como mostrado a seguir. Os resultados numéricos também possibilitaram a determinação do número de modos guiados, que é uma característica importante, já que para amplificação Raman em comunicações deseja-se operar em uma região espectral monomodo.

As áreas efetivas obtidas por simulação foram primeiramente utilizadas em expressões analíticas simplificadas para se obter o desempenho de amplificadores Raman baseados na fibra estudada em função do comprimento de onda de bombeamento.

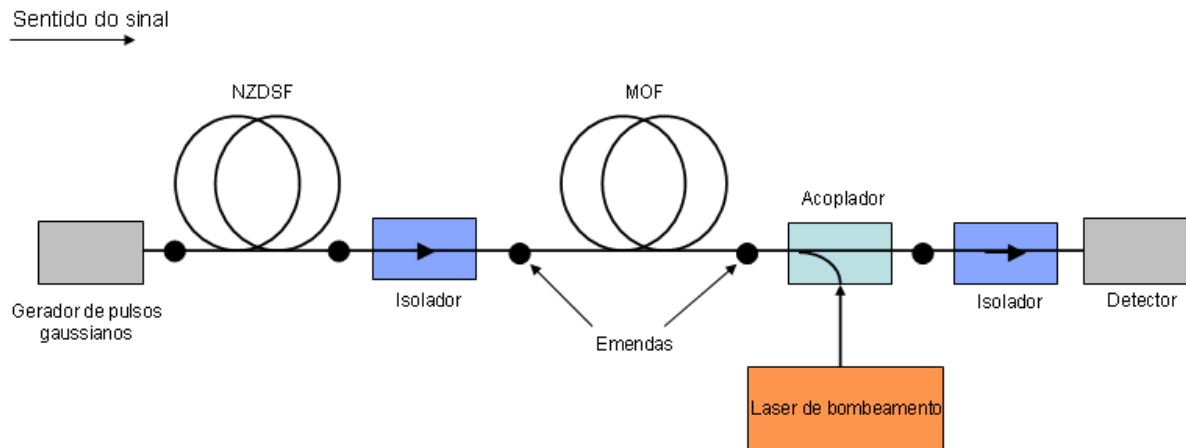
Em seguida, foi utilizado o aplicativo VPI *TransmissionMaker*, para a realização de simulações do amplificador Raman, como pode ser visto na Figura 17. Neste aplicativo, foram analisados o ganho do amplificador Raman nas bandas C e O, além das respectivas figuras de ruído. Nestas simulações foram realizadas seis configurações diferentes, variando-se o comprimento de fibra, entre 1 e 10 km, e a potência de bombeamento, entre 100 e 500 mW, em cada uma das bandas, para efeito comparativo de desempenho.



**Figura 17** – Amplificador Raman proposto.

Num próximo passo, para demonstração de uma aplicação prática em que as características da MOF desempenham papel fundamental, foi montado um circuito óptico para a banda O utilizando uma fibra de dispersão deslocada não nula (ou NZDSF, do inglês *non-zero dispersion shifted fiber*) de mercado como fibra de transmissão e a MOF estudada para compensação da dispersão e amplificação do sinal. O circuito utilizado é mostrado na Figura 18. Para este circuito, foram escolhidos 70 km da fibra *TrueWave RS Fiber*, da empresa OFS, que possui uma perda de 0,35 dB/km e uma dispersão de  $-8$  ps/km.nm em  $1,31$   $\mu\text{m}$  (OFS *TrueWave RS Fiber Catalog*, 2007). O sinal em 1300 nm consistia de pulsos ópticos de 30 ps de um gerador de sinais gaussianos emitindo seqüências pseudo-aleatórias a uma taxa de 10 GHz e com uma potência média de 0,7 mW. O amplificador / compensador de dispersão baseado na MOF posicionava-se após a NZDSF (imediatamente antes do receptor). Um comprimento de MOF de 10 km foi escolhido por propiciar uma compensação de dispersão otimizada. A perda da MOF em  $1,3$   $\mu\text{m}$  era de 0,71 dB/km. Os valores de rampa de dispersão (em inglês, *dispersion slope*) utilizados foram de  $0,047$  ps/nm<sup>2</sup>/km para a NZDSF e  $0,11$  ps/nm<sup>2</sup>/km para a MOF.

Para a geração do ganho Raman na MOF, foi inserido um laser de bombeamento com 300mW de potência através de um acoplador. Isoladores com perda de inserção de 1 dB foram posicionados na entrada e saída do amplificador. As perdas devido a emendas foram levadas em conta, com valores de 1 dB, na entrada e na saída da MOF. Para recepção do sinal, foi escolhido um diodo receptor, com características de ruído realistas, ligado a um osciloscópio. Receptores e osciloscópios idênticos foram também posicionados na saída do gerador de sinais e após a fibra NZDSF, para monitoramento da evolução da degradação do sinal.

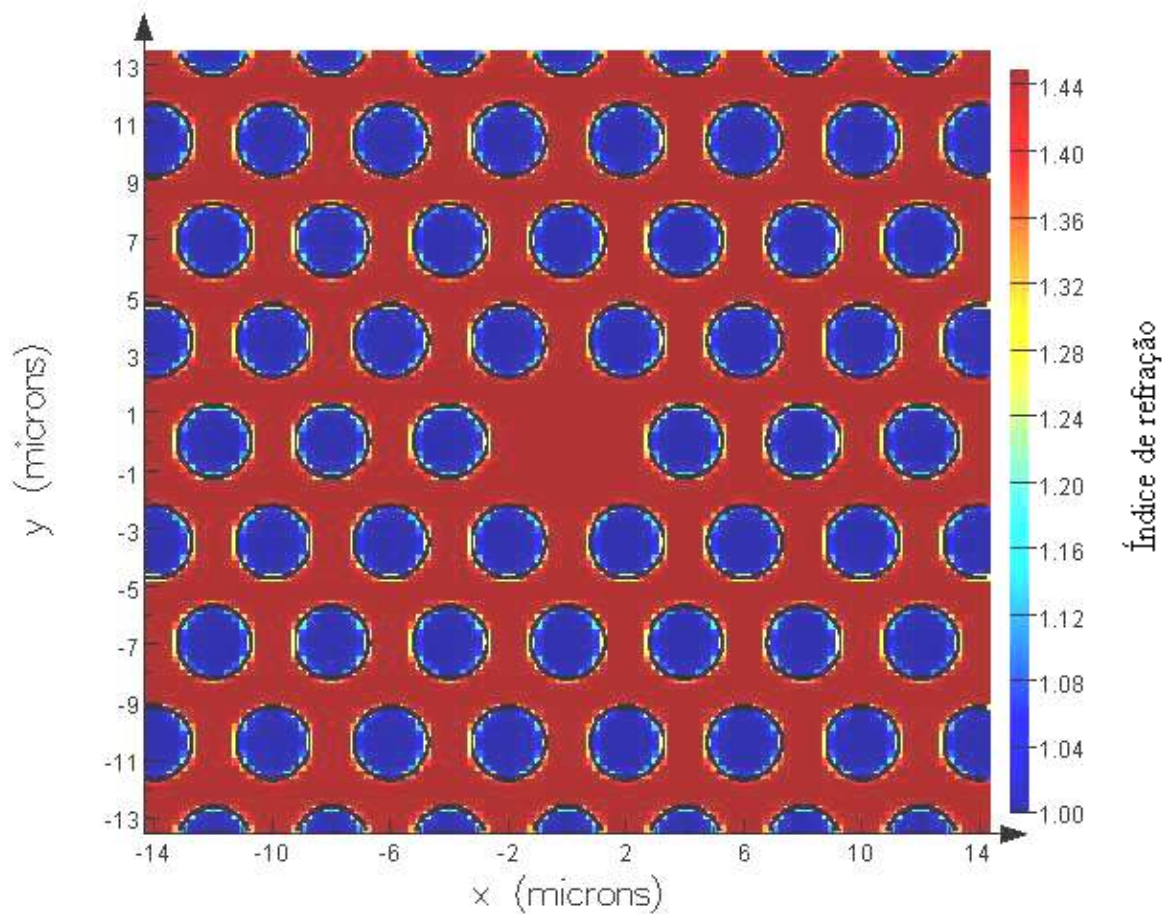


**Figura 18** – Enlace na banda O incluindo 70 km de NZDSF e um amplificador Raman baseado em 10 km de MOF de baixa perda.

Com o circuito descrito, foram feitas as análises de diagrama de olho e evolução do perfil do pulso transmitido devido à dispersão nos três pontos ao longo do enlace mencionado acima.

### 4.3 SIMULAÇÕES

No software Lumerical, foi feita a construção de uma MOF com as mesmas características da apresentada na seção 2.5. O perfil de índice de refração da seção transversal (plano xy) da fibra modelada pode ser visto na Figura 19.



**Figura 19** – Perfil de índices de refração da MOF simulada.

A partir deste perfil, foram realizadas simulações que determinaram as características modais de sinais em comprimentos de onda que variaram de 1100 a 1650 nm, com espaçamento de 50 nm, assim como as características modais dos bombeamentos, com o espaçamento entre o sinal e o bombeamento de 13,2 THz. Como resultado destas simulações, foram geradas matrizes com as distribuições transversais discretizadas dos campos magnéticos e elétricos do modo fundamental da fibra para sinal e bombeamento, de modo que a variação da área efetiva para interação Raman com comprimento de onda fosse obtida. Discretizando-se expressão (14), tem-se:

$$A_{eff} = \frac{(\sum_{colunas} \sum_{linhas} I_p) * (\sum_{colunas} \sum_{linhas} I_s)}{(\sum_{colunas} \sum_{linhas} I_s)} \Delta x \Delta y, \quad (19)$$



onde  $\Delta x$  e  $\Delta y$  são os passos em x e y utilizados na simulação. As intensidades foram tomadas como sendo as componentes z da média temporal do vetor de Poynting:

$$I = \langle \vec{S} \rangle = \frac{1}{2} \text{Re} \{ \vec{E} \times \vec{H}^* \}, \quad (20)$$

que, para propagação ao longo do eixo z e para bombeamento (p) e sinal (s), assume as formas:

$$I_p = \langle S_{z,p} \rangle = \frac{1}{2} \text{Re} \{ E_x H_y^* - E_y H_x^* \}_p, \quad (21)$$

$$I_s = \langle S_{z,s} \rangle = \frac{1}{2} \text{Re} \{ E_x H_y^* - E_y H_x^* \}_s. \quad (22)$$

Com as respectivas áreas efetivas calculadas, o próximo passo foi calcular o coeficiente de ganho Raman ( $g_R$ ) em função do comprimento de onda, utilizando-se a equação (16), onde foi utilizado o valor de  $1 \times 10^{-13}$  m/W para  $g_{R1046}$ , que assume um bombeamento despolarizado. Diante destes valores, o próximo passo foi calcular a eficiência de ganho Raman, através da equação (10).

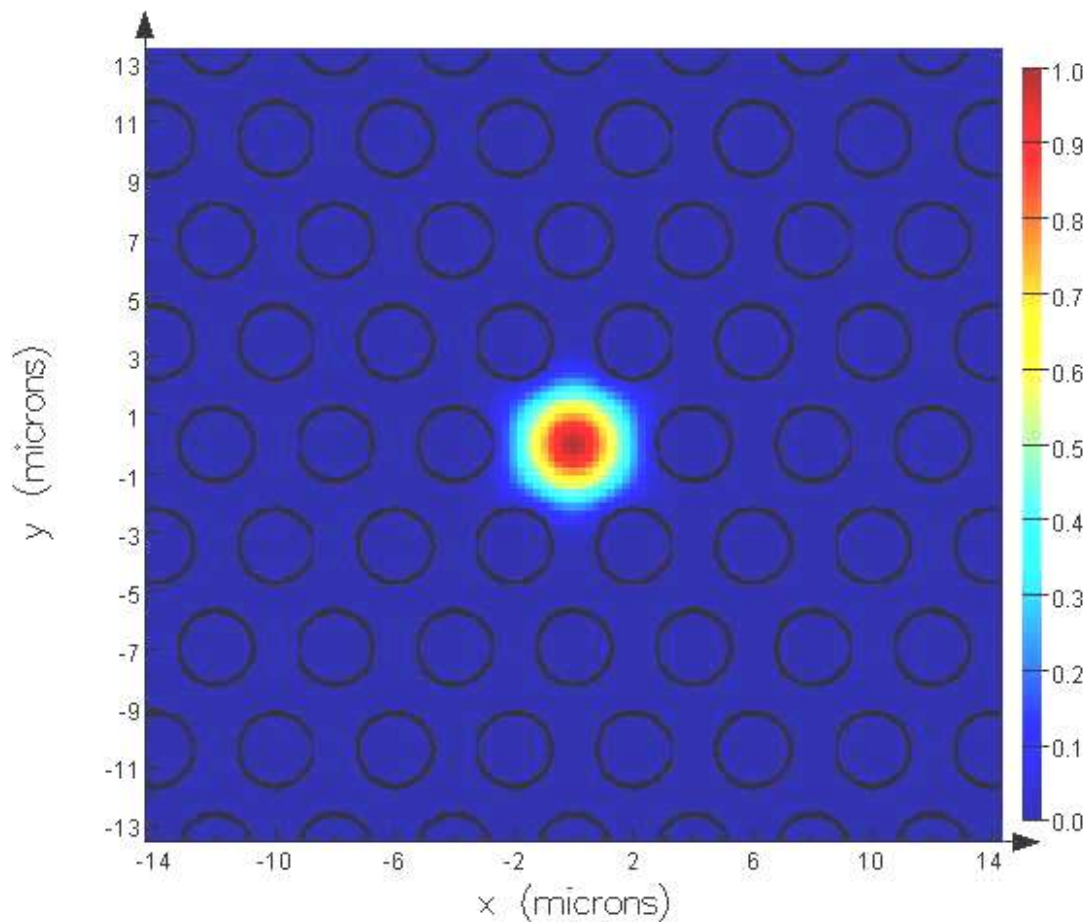
Um outro fator necessário para os cálculos de ganho é o coeficiente de atenuação  $\alpha$ , do bombeamento e do sinal, que é obtido a partir da perda (em dB/km) através da equação (15). Os valores de perda foram colhidos do gráfico disponibilizado em (TAJIMA, ZHOU, NAKAJIMA, SATO, 2004).

De posse destes valores, foi possível então calcular o ganho líquido ( $G_{net}$ ) em uma fibra de comprimento  $L$ , com uma potência de bombeamento  $P_0$ , a partir da equação (9). Para convertê-lo em decibéis (dB):

$$G_{net} [dB] = 10 \log G_{net}. \quad (23)$$

Esta última expressão é importante, pois dá o ganho da fibra da forma mais usual, permitindo que sejam feitas comparações com outros sistemas de amplificação, como por exemplo, o EDFA. Foram utilizados inicialmente os valores de potência  $P_0 = 0,3$  W e o comprimento de fibra de  $L = 4$  km. Num segundo momento, foram feitas variações tanto de  $P_0$  quanto de  $L$ , para estudo do comportamento destes.

Vale mencionar que em todos os comprimentos de onda investigados o software de simulação encontrou apenas um modo de propagação, indicando que a MOF é monomodo na região estudada. Na Figura 20 pode ser visualizado o modo de propagação confinado no núcleo da fibra para um comprimento de onda de 1550 nm.

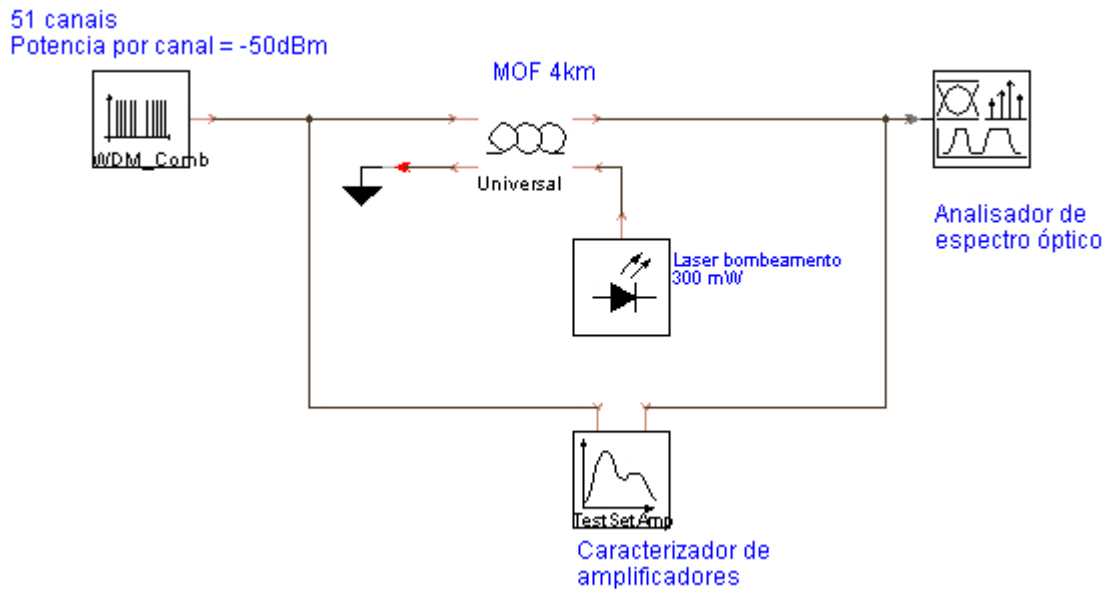


**Figura 20** – Distribuição de intensidade normalizada (em código de cores) do modo de propagação.

Ainda no aplicativo *Mode Solutions* foi feita uma análise da perda por confinamento na fibra e verificou-se que esta é desprezível, encontrando-se dentro da margem de erro do aplicativo ( $\sim 2 \cdot 10^{-8}$  dB/km). No artigo da equipe da NTT (TAJIMA, ZHOU, NAKAJIMA, SATO, 2004), um valor calculado em 0,01 dB/km é mencionado.

Para a caracterização de amplificadores Raman no aplicativo VPI *TransmissionMaker* foi implantado o circuito visto na Figura 21, com de 51 canais, nas faixas de 1500 à 1600 nm e de 1250 à 1350 nm, com espaçamento de 2 nm, que foram utilizados meramente para caracterizar ganho e figura de ruído em função do espectro. Estes sinais eram ideais (não apresentavam ruído) e possuíam uma potência de -50 dBm para que o amplificador estivesse no regime de pequenos sinais. Para a recepção do sinal, foram incluídos um analisador de espectro óptico e um caracterizador de amplificadores (*Test Set Amplifier*), equipamento que,

no aplicativo, mede o ganho e a figura de ruído. Estes equipamentos também eram ideais e não introduziam ruído na medição.



**Figura 21** – Montagem do amplificador baseado em MOF no aplicativo VPI *TransmissionMaker*.

Para cada uma das faixas de sinal – bandas C e O – foram simuladas as seguintes situações:

- Potência de bombeamento de 300 mW e comprimento de fibra de 4 km;
- Potência de bombeamento de 300 mW e comprimento de fibra de 1 km;
- Potência de bombeamento de 300 mW e comprimento de fibra de 10 km;
- Potência de bombeamento de 100 mW e comprimento de fibra de 4 km;
- Potência de bombeamento de 500 mW e comprimento de fibra de 4 km;
- Potência de bombeamento de 500 mW e comprimento de fibra de 1 km.

Para a implementação da simulação, é necessária a criação de vários arquivos de configuração para os diversos parâmetros existentes no VPI *TransmissionMaker*, como

eficiência de ganho Raman, atenuação e dispersão na fibra. No primeiro deles, foi tomado como base o arquivo padrão do próprio aplicativo válido para fibras convencionais com núcleo de sílica, no qual foram feitas as alterações necessárias para utilização nas faixas de frequência de interesse e para incorporação das áreas efetivas calculadas para a MOF em estudo. Os demais parâmetros foram obtidos a partir dos gráficos disponíveis em (TAJIMA, ZHOU, NAKAJIMA, SATO, 2004). Nestas simulações, foram desconsiderados os efeitos não-lineares de espalhamento Brillouin, modulação de fase e mistura de quatro ondas.

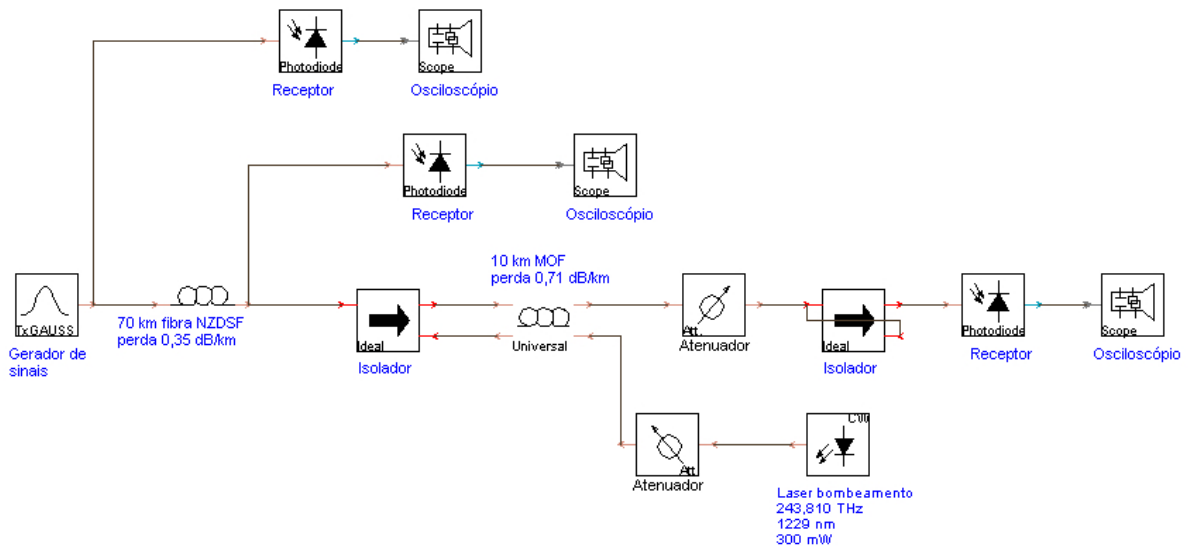
A figura de ruído (NF) de um dispositivo é definida pela equação (18). Em um amplificador, a NF também é dada por (ISLAN, 2004):

$$NF = \frac{1}{G} \cdot \left( \frac{P_{ASE}^+}{h\nu B_0} + 1 \right), \quad (24)$$

onde  $G$  é o ganho,  $P_{ASE}^+$  é a potência de ruído emitido espontaneamente co-propagante com o sinal,  $h$  é a constante de Planck,  $\nu$  é a frequência do sinal e  $B_0$  é a resolução espectral da medida óptica.

Na montagem para demonstração de aplicação da MOF em um sistema de transmissão, os parâmetros da fibra NZDSF foram configurados de acordo com o exposto na seção 4.2. O comprimento de 70 km foi determinado de modo que 10 km de MOF compensassem a dispersão do enlace. No gerador de pulsos, foi configurada a frequência de emissão de 1300 nm, a uma taxa de 10 Gbit/s. O comprimento de onda do laser de bombeamento foi ajustado para 1229 nm para obter a máxima eficiência (espaçamento sinal-bombeamento de 13,2 THz) e a sua potência era de 300 mW. A Figura 22 mostra o diagrama do VPI *TransmissionMaker* utilizado. A perda de 1 dB estimada para as emendas entre a MOF

e as fibras convencionais foi incorporada na perda do isolador de entrada e dos atenuadores mostrados no diagrama.



**Figura 22** – Diagrama do aplicativo VPI *TransmissionMaker*, modelando um enlace de 70 km de NZDSF seguido do amplificador baseado na MOF estudada.

Nesta montagem, foi verificada a qualidade do sinal gerado nos três osciloscópios implementados no sistema, onde foram analisados o diagrama de olho do sinal e a duração dos pulsos. Através de análise do diagrama de olho, o aplicativo fornecia também uma estimativa da BER em cada ponto do sistema. A BER é dada por (GHATAK, THYAGARAJAN, 1998):

$$BER = \frac{\text{bits lidos com erro em um período } \tau}{\text{total de bits enviados em } \tau} \quad (25)$$

## 4.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.4.1 Estimativa de ganho Raman em função do comprimento de onda de bombeamento

A Tabela III mostra os comprimentos de onda de sinal e bombeamento escolhidos para estimar o desempenho de ganho dos amplificadores Raman operando em várias regiões espectrais. Em cada caso, os comprimentos de onda de bombeamento e sinal são separados de 13,2 THz, de forma que todos os ganhos calculados correspondem aos valores de pico. Também são visualizados na Tabela III os valores calculados de área efetiva e os coeficientes de atenuação para os comprimentos de onda de sinal e bombeamento ( $\alpha_s$  e  $\alpha_p$  respectivamente). Já a Tabela IV mostra outros parâmetros que foram calculados para o estudo em questão, como o coeficiente de ganho Raman ( $g_R$ ), a eficiência de ganho Raman ( $C_R$ ), as perdas para os comprimentos de onda de sinal e de bombeamento (em dB/km), o comprimento efetivo da MOF ( $L_{\text{eff}}$ ) e os ganhos líquidos ( $G_{\text{net}}$ ), expressos em dB.

TABELA III

### Sumário dos parâmetros utilizados para cálculo da eficiência Raman e ganho Raman líquido

Comprimento de onda de sinal [nm]	Comprimento de onda de bombeamento [nm]	$A_{\text{eff}}$ [ $\mu\text{m}^2$ ]	$\alpha_s$ [ $\text{km}^{-1}$ ]	$\alpha_p$ [ $\text{km}^{-1}$ ]
1100	1049	15,16	0,18	0,41
1150	1095	15,26	0,16	0,18
1200	1140	15,35	0,14	0,23
1250	1185	15,44	0,28	0,18
1300	1230	15,53	0,14	0,14
1350	1274	15,62	0,51	0,25
1400	1319	15,71	1,84	0,17
1450	1363	15,81	0,23	0,86
1500	1407	16,02	0,09	1,84
1550	1451	16,07	0,09	0,23
1600	1495	16,16	0,09	0,10
1650	1538	16,25	0,10	0,09

TABELA IV

**Sumário dos parâmetros necessários para cálculo do ganho Raman líquido com 4 km de MOF e 300 mW de bombeamento**

Comprimento de onda de sinal [nm]	$g_R$ ( $\cdot E^{-14}$ ) [m/W]	$C_R$ ( $\cdot E^{-3}$ ) [ $W^{-1}m^{-1}$ ]	Perda sinal [dB/km]	Perda bombeamento [dB/km]	$L_{eff}$ [km]	$G_{net}$ [dB]
1100	9,51	6,27	0,80	1,80	1,95	12,76
1150	9,10	5,96	0,70	0,80	2,83	19,19
1200	8,72	5,68	0,60	1,00	2,61	16,95
1250	8,37	5,42	1,20	0,80	2,83	15,19
1300	8,05	5,18	0,60	0,60	3,07	18,35
1350	7,75	4,96	2,20	1,10	2,51	7,45
1400	7,47	4,76	8,00	0,75	2,89	-14,10
1450	7,21	4,56	1,00	3,75	1,12	2,67
1500	6,97	4,35	0,40	8,00	0,54	1,48
1550	6,75	4,20	0,40	1,00	2,61	12,70
1600	6,54	4,05	0,40	0,45	3,27	15,66
1650	6,34	3,90	0,45	0,40	3,35	15,21

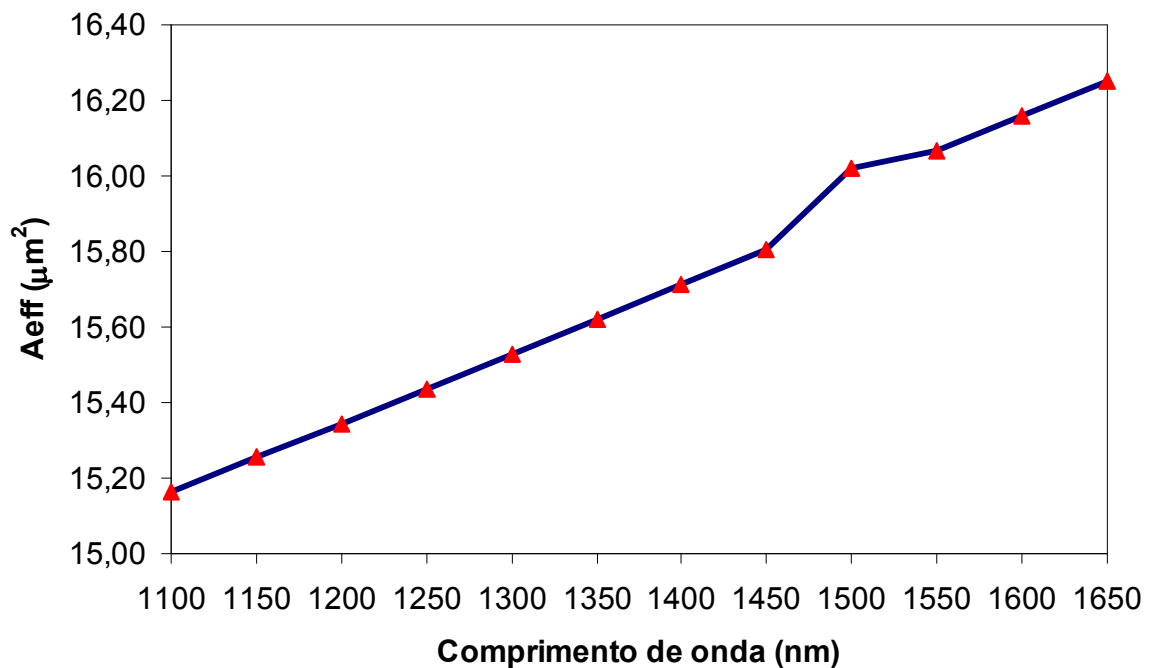
A Figura 23 mostra o comportamento da área efetiva em função do comprimento de onda de sinal. Pode-se observar que esta grandeza cresce conforme o comprimento de onda cresce. Entretanto, a variação observada é menor do que aquela estimada para uma fibra convencional desenvolvida para amplificação Raman (SAITO, 2006).

As Figuras 24 e 25 mostram o coeficiente de ganho Raman e a eficiência de ganho Raman respectivamente como função do comprimento de onda de sinal. Como esperado, à medida que o comprimento de onda decresce, a diminuição da área efetiva em conjunto com o incremento do coeficiente de ganho Raman causam um aumento da eficiência de ganho Raman. É notado que em todo o espectro esta eficiência é maior do que a obtida com uma fibra Raman convencional (Fibra Raman OFS) (SAITO, TAVEIRA, SOUZA, GAARDE, SOUZA, 2006).

A Figura 26 mostra o pico de ganho Raman líquido ( $G_{net}$ ) como função do comprimento de onda de sinal em uma MOF com 4 km de comprimento e uma potência de bombeamento de 0,3 W (em princípio atingível com um diodo de bombeamento). O comprimento de onda de bombeamento está sempre deslocado do comprimento de onda de



sinal conforme a tabela III. Uma importante constatação é que há um ganho maior do que 10 dB tanto nas bandas C e L quanto na faixa entre 1100 nm e 1340 nm. Em particular, um ganho líquido acima de 18 dB é atingido na banda O, indicando que esta MOF pode ser especialmente interessante para amplificação nesta região espectral. De acordo com (TAJIMA, ZHOU, NAKAJIMA, SATO, 2004) a dispersão na MOF em 1300 nm é de aproximadamente 55 ps/nm/km. Este alto valor de dispersão anômala não é atingido com fibras convencionais na banda O. Como consequência, o amplificador proposto aqui pode incorporar a função adicional de ajustar a dispersão no enlace de fibra para sinais na banda mencionada. A Figura 26 também mostra que um ganho líquido negativo é atingido na banda S (1460-1530 nm) devido à alta atenuação de bombeamento gerada pelo pico de absorção de água em 1380 nm.



**Figura 23** – Curva de área efetiva em função do comprimento de onda de sinal.

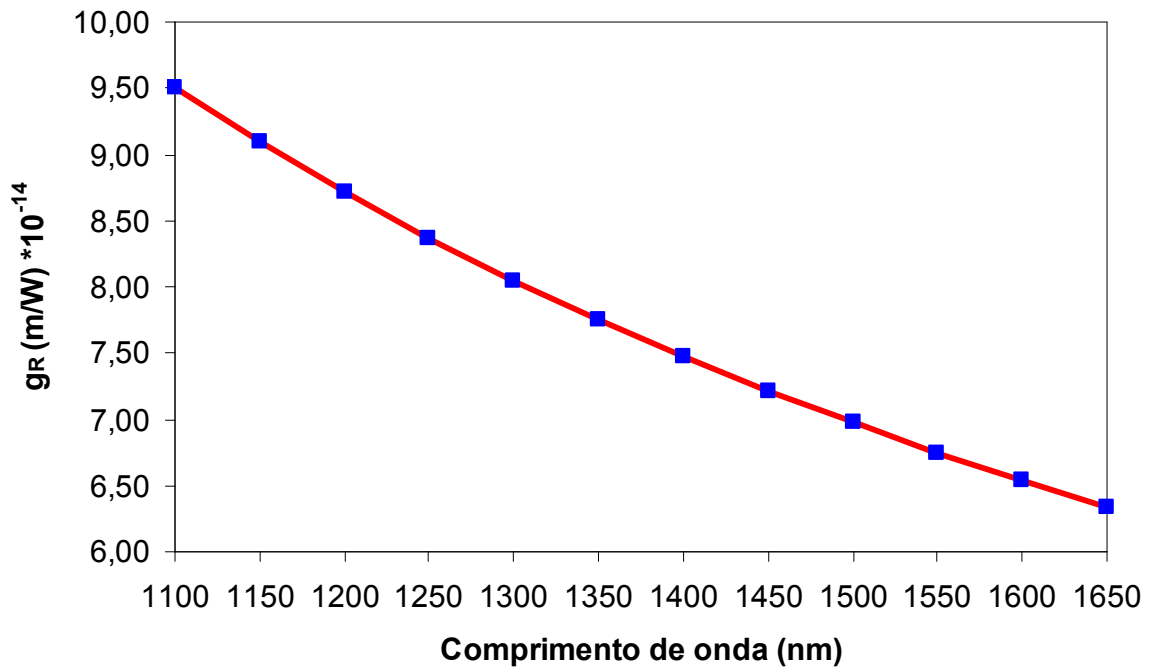


Figura 24 – Curva do coeficiente de ganho Raman em função do comprimento de onda de sinal.

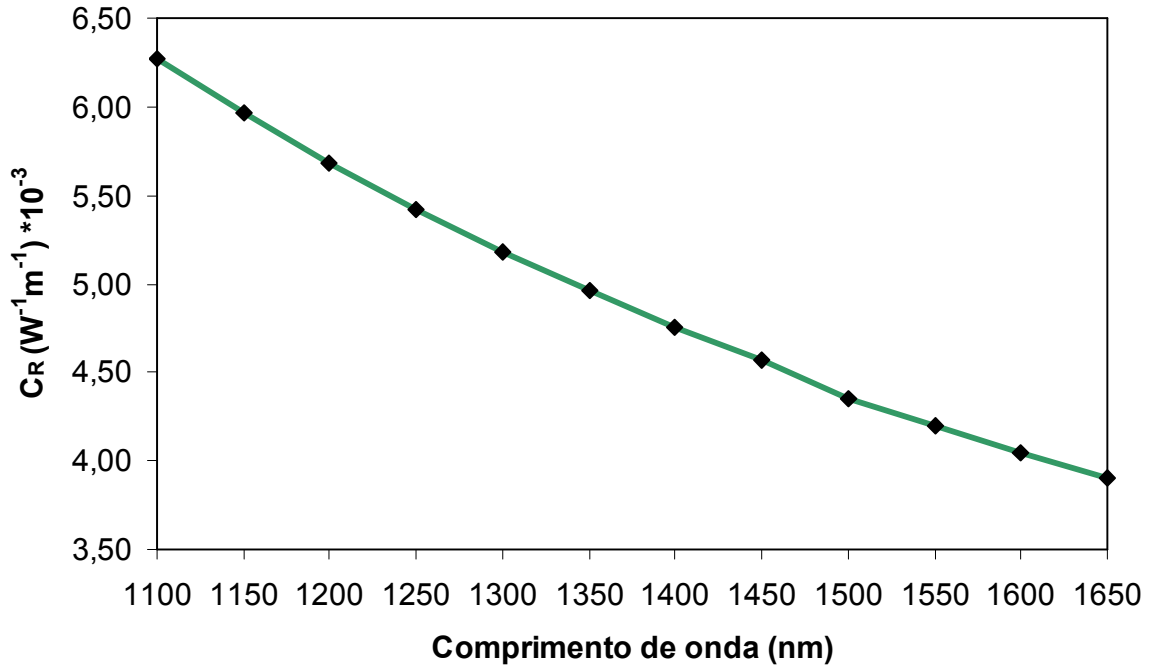
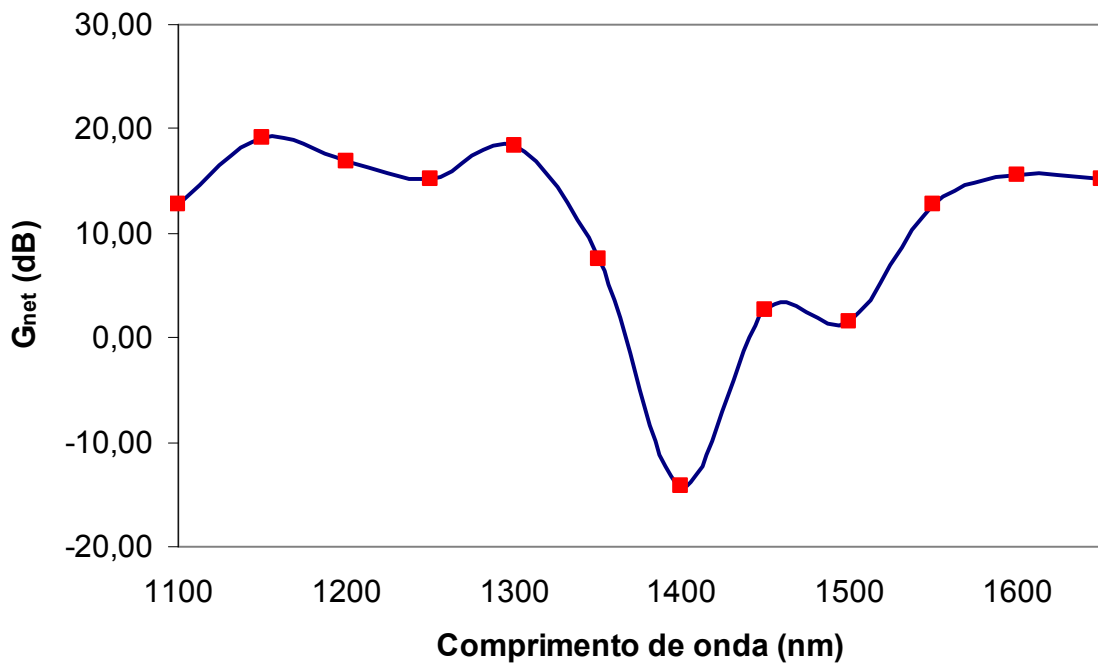
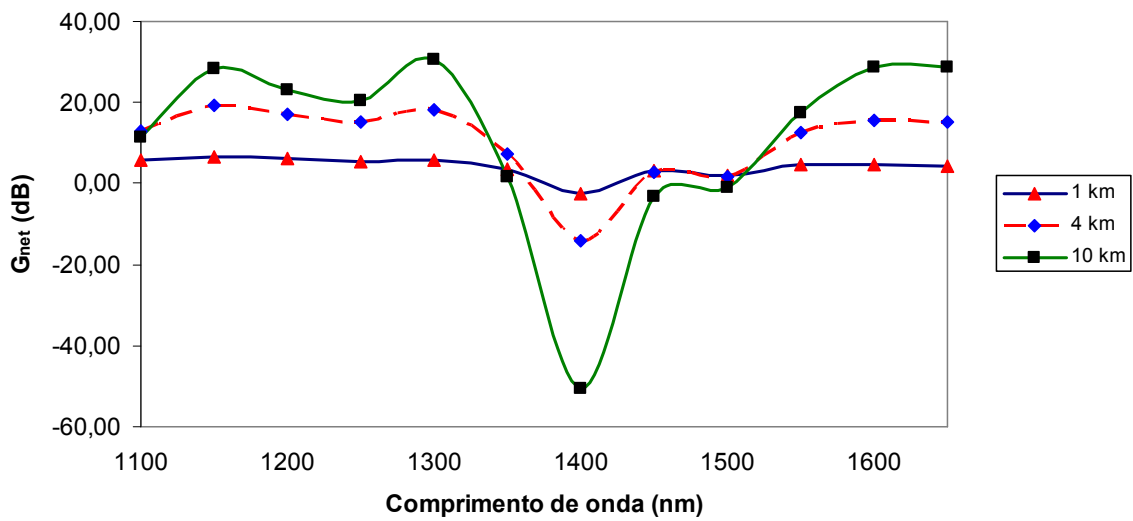


Figura 25 – Curva da eficiência de ganho Raman em função do comprimento de onda de sinal.

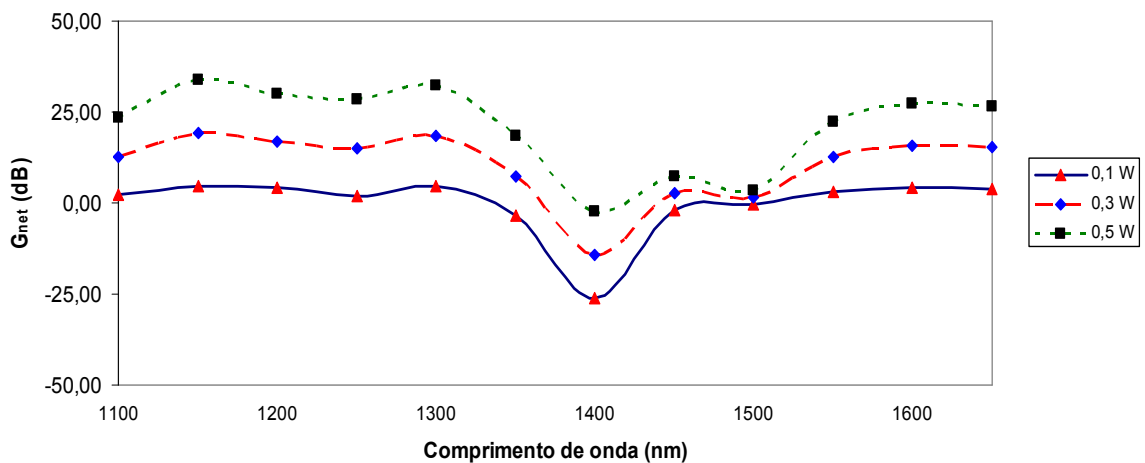


**Figura 26** – Máximo ganho Raman líquido ( $G_{net}$ ) em função do comprimento de onda de sinal.

A Figura 27 mostra a variação do espectro de  $G_{net}$  obtida quando o comprimento da fibra é alterado, para uma potência de bombeamento de 0,3 W. É possível observar que o uso de fibras mais longas é benéfico para todas as regiões onde o ganho líquido excede 10 dB no caso mostrado na Figura 26. Isso significa que o ganho nestas regiões ainda não é limitado pelas atenuações de bombeamento e sinal, caso em que um incremento do comprimento da fibra resulta numa diminuição do ganho (como ocorre, por exemplo, em 1400 nm).



**Figura 27** – Máximo ganho Raman líquido ( $G_{net}$ ) em função do comprimento de onda de sinal, variando-se o comprimento de fibra, para uma potência de bombeamento de 0,3 W.



**Figura 28** – Máximo ganho Raman líquido ( $G_{net}$ ) em função do comprimento de onda de sinal, variando-se a potência de bombeamento, para um comprimento de fibra de 4 km.

Finalmente, o pico do espectro do ganho líquido foi obtido com a variação da potência de bombeamento para um comprimento da MOF de 4 km e o resultado é visualizado na Figura 28. O formato do espectro permanece praticamente inalterado com somente variação da amplitude. A figura mostra que a ainda razoável potência de bombeamento de 0,5 W leva a um ganho acima de 30 dB na banda O e de aproximadamente 25 dB para as bandas C e L.

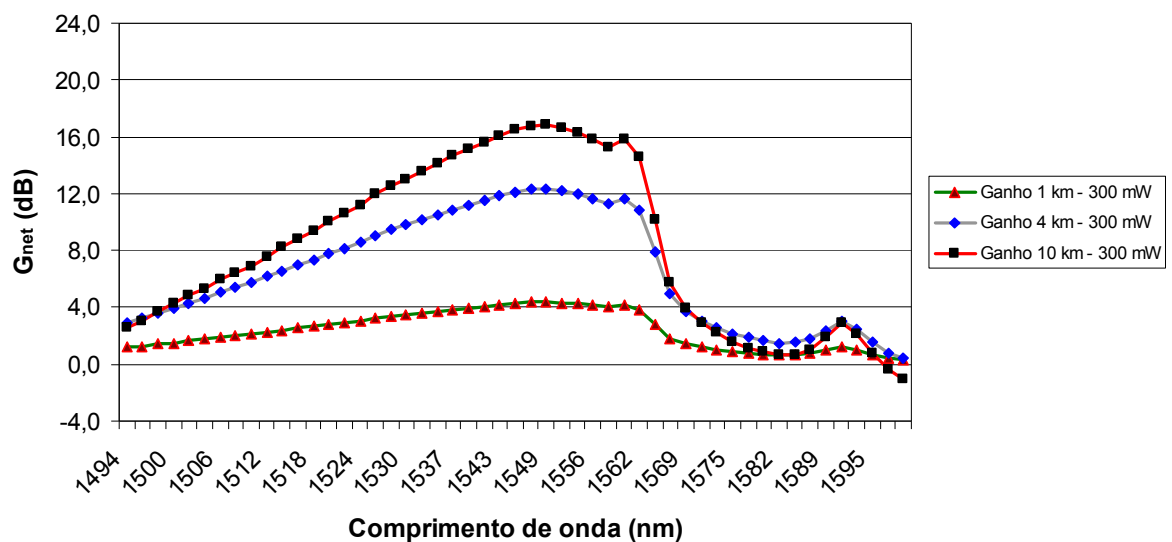
Também foi verificada a variação obtida no ganho Raman se a razão  $d/\Lambda$  é variada. Para tal, foi feita uma variação de 5% para mais e para menos no diâmetro  $d$  dos furos da

MOF analisada. Para um sinal em 1550 nm, observou-se que a variação total do diâmetro dos furos (de 10 %) levou a uma variação da área efetiva de 8,8 %. No cenário de 4 km de comprimento de fibra e 300 mW de potência de bombeamento, obteve-se uma variação de ganho líquido de 14% (0,57 dB). Demonstra-se, portanto, a robustez do ganho Raman obtido na MOF contra variações na seção reta causadas por problemas de fabricação.

#### 4.4.2 Modelagem de Amplificadores nas Bandas C e O

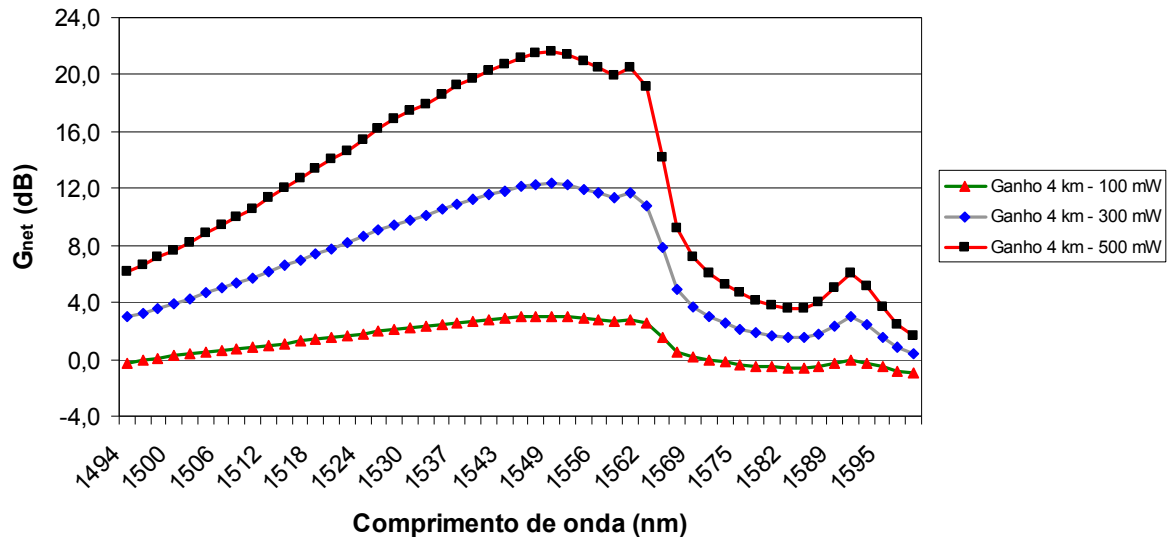
Na montagem no aplicativo VPI *TransmissionMaker* para o modelamento de amplificadores Raman baseados na MOF estudada, foram obtidos os espectros de ganho e figura de ruído, como descrito anteriormente. Para cada banda de transmissão, variou-se a de potência de bombeamento e o comprimento de fibra.

A Figura 29 mostra os ganhos líquidos obtidos quando a potência de bombeamento foi fixada em 300 mW e foi variado o comprimento de fibra entre 1 e 10 km, para a faixa de frequências da banda C.



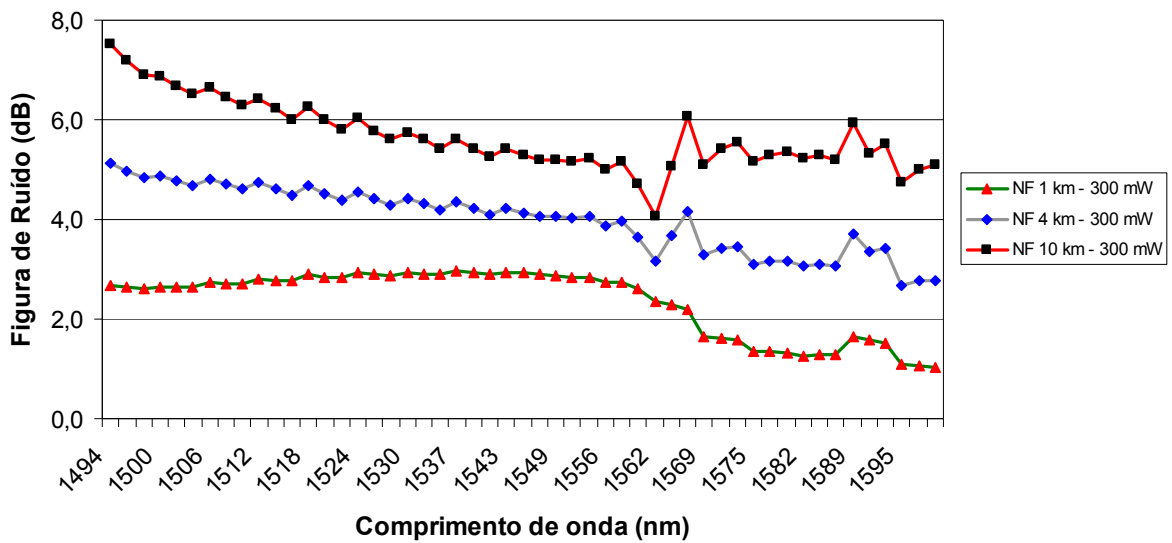
**Figura 29** – Ganho Raman líquido em função do comprimento de onda para a banda C, com a variação de comprimento da fibra e bombeamento de 300 mW.

Em seguida, foi mantido o comprimento da fibra em 4 km e foi alterada a potência de bombeamento para os valores de 100, 300 e 500 mW. Os ganhos neste caso são vistos na Figura 30.

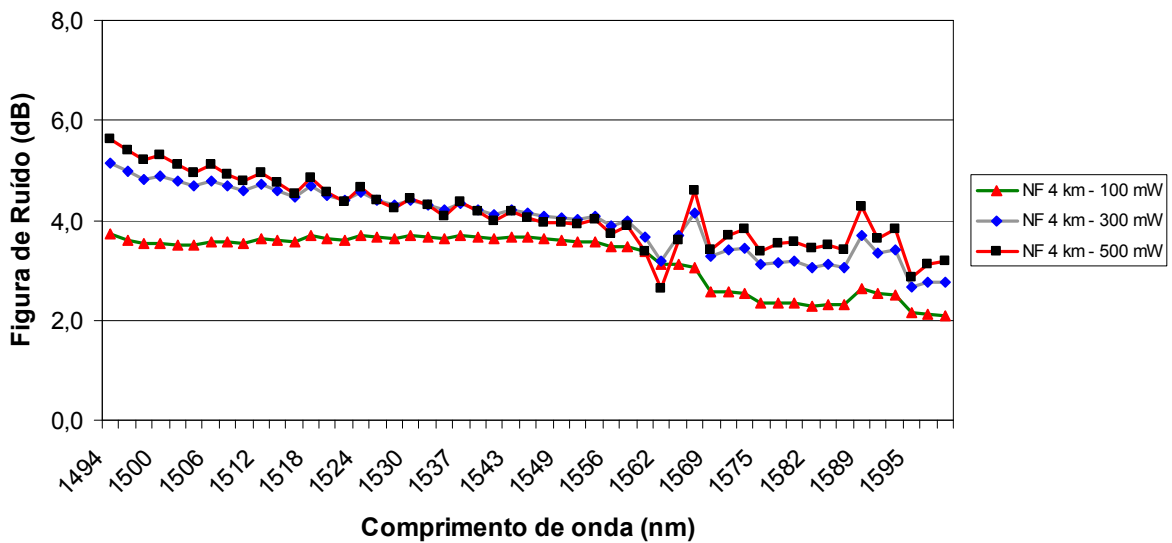


**Figura 30** – Ganho Raman líquido em função do comprimento de onda para a banda C, com a variação da potência de bombeamento e 4 km de comprimento.

A Figura 31 e 32 mostram as figuras de ruído obtidas para as configurações estudadas nas Figuras 29 e 30 respectivamente. Destes gráficos conclui-se que ganhos superiores a 10 dB são obtidos para potências de bombeamento maiores ou iguais a 300 mW. Nestas condições e para um comprimento de fibra de 4 km, a figura de ruído é praticamente independente da potência de bombeamento, permanecendo abaixo de 6 dB por toda a faixa investigada. Por outro lado, observou-se que a figura de ruído crescia com o aumento do comprimento da fibra (com potência de bombeamento fixa em 300 mW), atingindo valores de quase 8 dB para 10 km. Entretanto, mesmo neste último caso valores abaixo de 6 dB eram obtidos próximo ao pico de ganho Raman.



**Figura 31** – Figura de ruído em função do comprimento de onda para a banda C, com a variação de comprimento da fibra e potência de bombeamento de 300 mW.

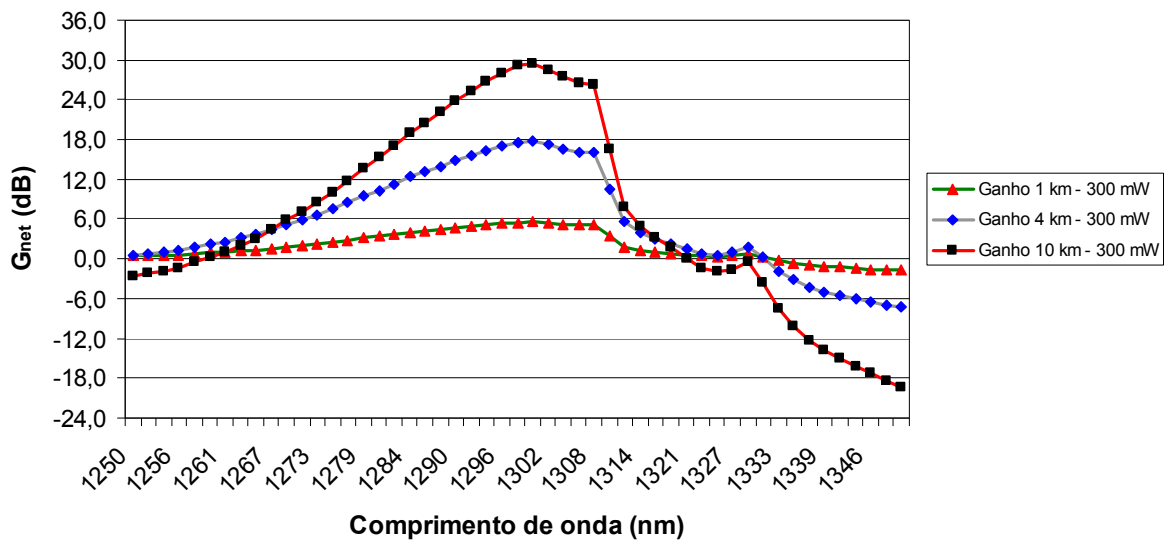


**Figura 32** – Figura de ruído em função do comprimento de onda para a banda C, com a variação da potência de bombeamento e 4 km de comprimento.

Numa comparação entre os valores calculados anteriormente e os simulados através do aplicativo, pode-se verificar que, no primeiro caso, obteve-se um ganho líquido de 12,70 dB e no segundo caso um ganho de 12,37 dB para a situação de 4km de fibra e 300 mW de potência de bombeamento, em 1550 nm. Esta proximidade nos valores valida o modelo

implementado, pois a diferença apresentada refere-se à aproximações de cálculos feitos pelos aplicativos utilizados.

Da mesma forma, foram realizadas as simulações para a banda O. Os resultados obtidos variando-se o comprimento da fibra e fixando-se a potência de bombeamento em 300 mW são mostrados nas Figuras 33 e 35 para ganho líquido e figura de ruído respectivamente, enquanto estes mesmos parâmetros são mostrados nas Figuras 34 e 36 para um comprimento de fibra de 4 km e três valores de potência de bombeamento.

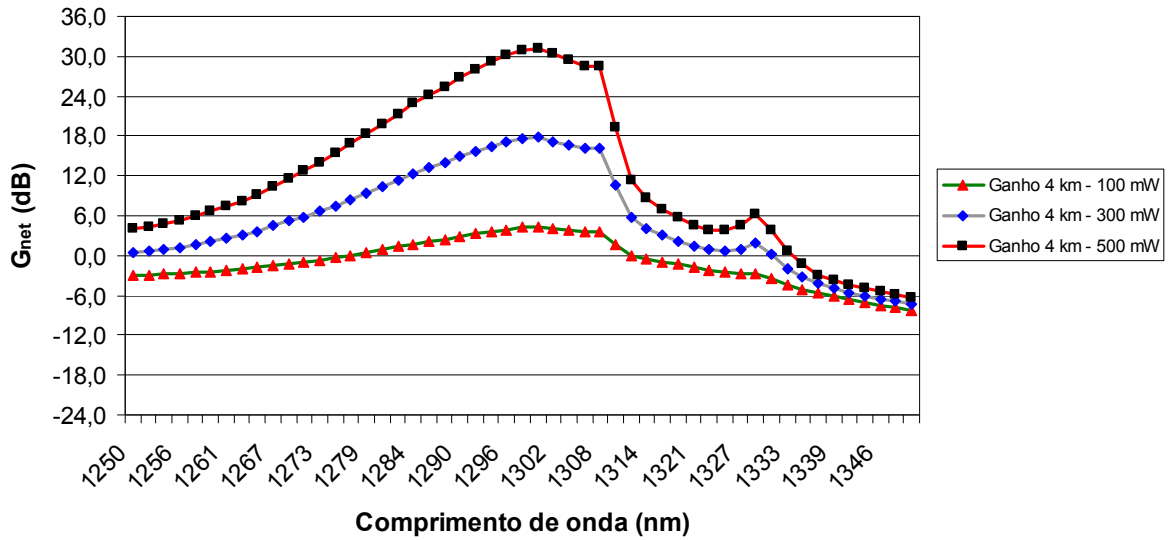


**Figura 33** – Ganho Raman líquido em função do comprimento de onda para a banda O, com a variação de comprimento da fibra e bombeamento de 300 mW.

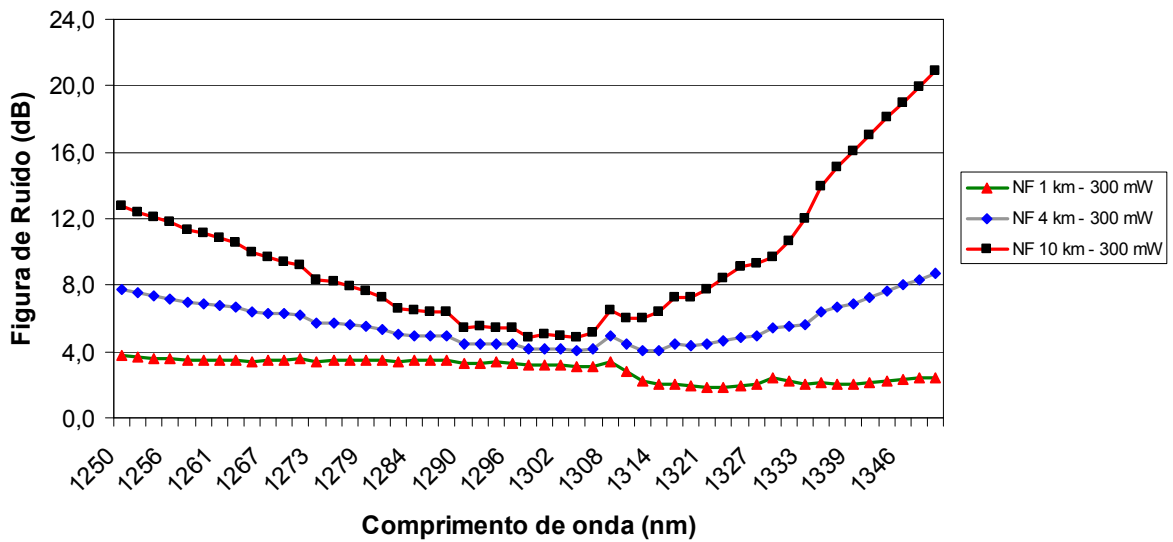
Estes resultados confirmam, como previsto na análise da seção 4.4.1, que os ganhos obtidos na banda O são maiores do que na banda C, e ganhos superiores a 18 dB foram obtidos para potências de bombeamento maiores ou iguais a 300 mW. As figuras de ruído apresentam comportamentos similares aos já discutidos para a banda C, mas crescem substancialmente à medida que se afasta do centro da banda O, tanto na direção de comprimentos de onda mais curtos quanto para comprimentos de onda mais longos, devido ao acentuado crescimento das perdas na MOF. Entretanto, a figura de ruído para uma potência de



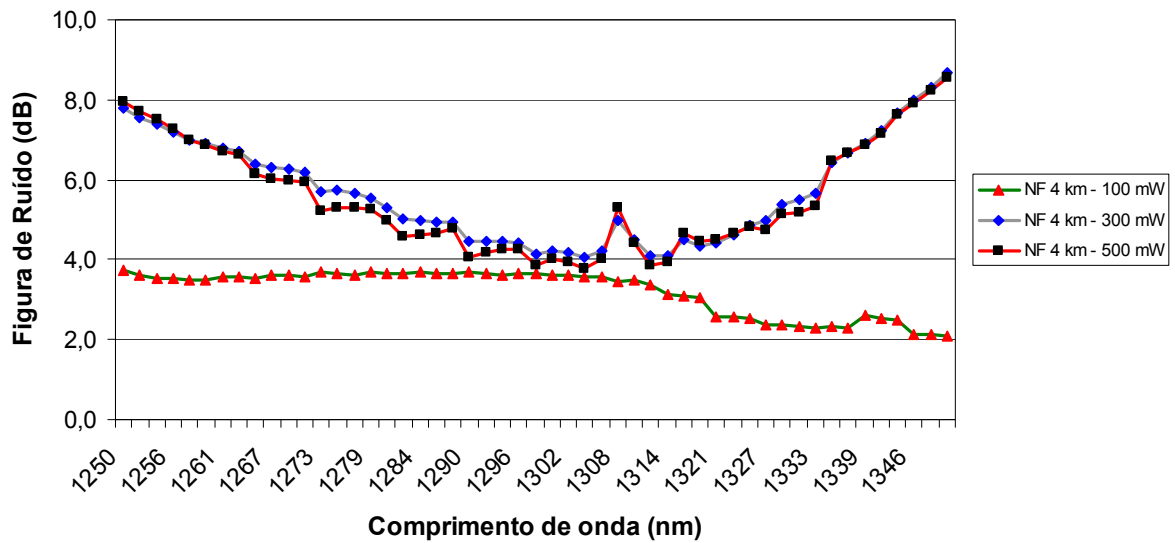
300 mW permanece abaixo de 8 dB por largas faixas, chegando a um valor inferior a 6 dB no pico do ganho Raman.



**Figura 34** – Ganho Raman líquido em função do comprimento de onda para a banda O, com a variação da potência de bombeamento e 4km de comprimento.



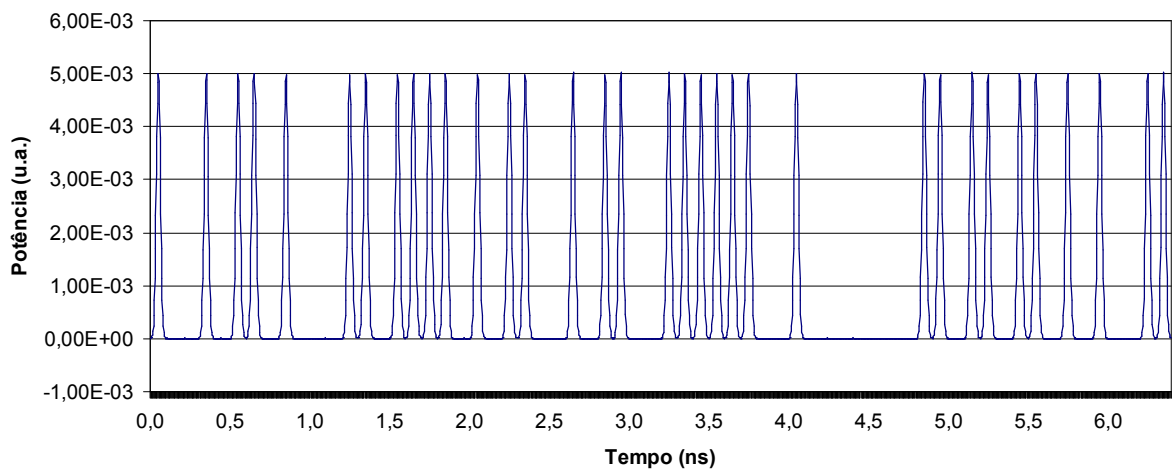
**Figura 35** – Figura de ruído em função do comprimento de onda para a banda O, com a variação de comprimento da fibra e bombeamento de 300 mW.



**Figura 36** – Figura de ruído em função do comprimento de onda para a banda O, com a variação da potência de bombeamento e 4km de comprimento.

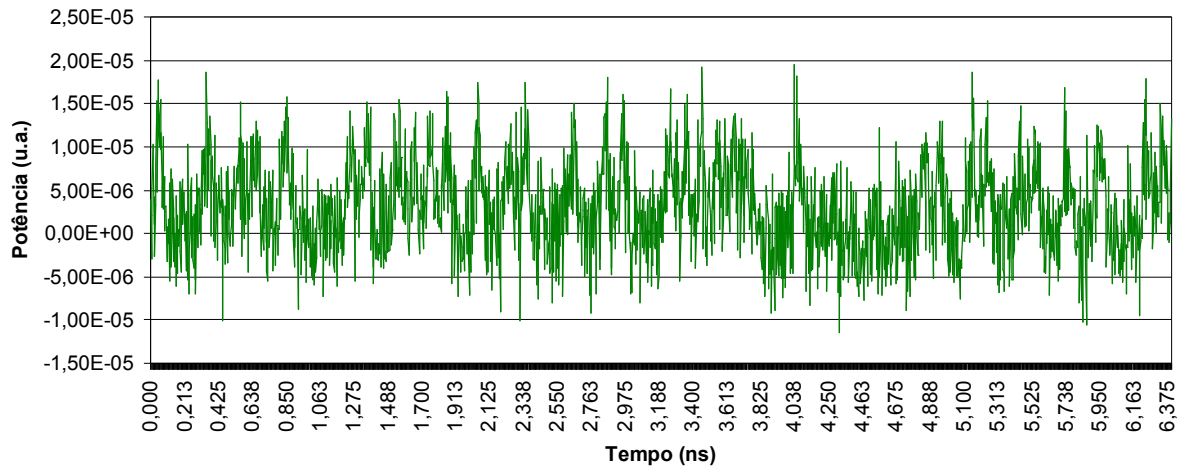
#### 4.4.3 Amplificação e Compensação na MOF para um Enlace na Banda O

Para a demonstração prática do uso do amplificador baseado em MOF, foi implementado o circuito da Figura 22 e foram feitas as medidas nas três posições indicadas, através dos osciloscópios. No primeiro caso, onde o osciloscópio está na saída do gerador de sinais, pode-se verificar a alta qualidade dos pulsos e da seqüência de bits, como mostrado na Figura 37.



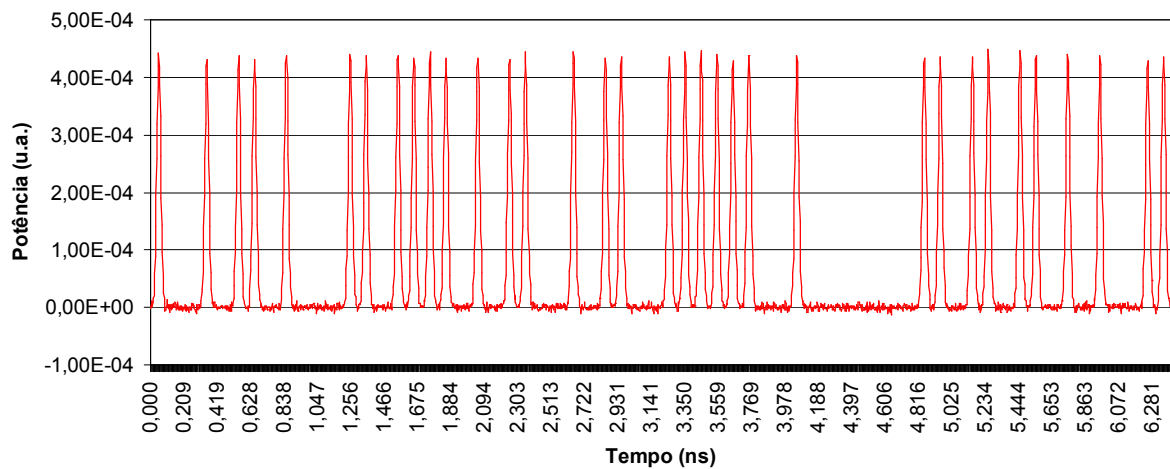
**Figura 37** – Seqüência de bits na saída do gerador de sinais.

Ao longo da NZDSF, ocorre a degradação do sinal tanto devido à atenuação existente no meio (perda total de 24,5 dB), quanto devido à dispersão, como pode ser visto na Figura 38. Neste caso, o sinal torna-se ilegível para um receptor, necessitando de uma regeneração para que possa ser interpretado.



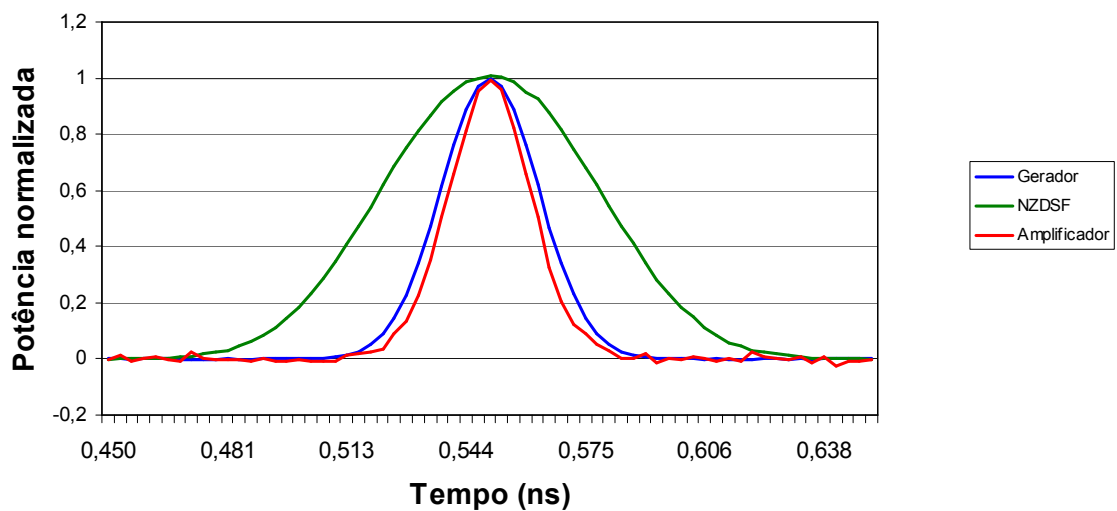
**Figura 38** – Seqüência de bits na saída da NZDSF.

Após a passagem pelo amplificador baseado em 10 km de MOF, na qual ocorre a amplificação do sinal e compensação de dispersão, o sinal volta a um estado onde pode ser lido pelo receptor, como pode ser visto na Figura 39.



**Figura 39** – Seqüência de bits na saída do amplificador.

Para quantificar o alargamento dos pulsos na NZDSF e a eficácia da recompressão na MOF sem que a atenuação da fibra prejudique a análise com a adição de ruído, o formato de um pulso individual foi analisado em cada um dos três pontos do sistema, desligando-se a perda na NZDSF e o ganho na MOF. A Figura 40 mostra pulsos individuais normalizados nestes 3 pontos. É possível verificar a forma gaussiana do pulso original de 30 ps – na saída do gerador de pulsos (linha azul). Na saída da NZDSF (linha verde), o sinal está alargado, possuindo uma duração de 66 ps. Por fim, na saída do amplificador, o pulso é novamente recomposto, apresentando formato próximo ao gaussiano e duração de 25 ps. A razão para a compressão da duração do pulso para valores ligeiramente inferiores ao original não é compreendida, já que o pulso original não apresentava varredura em frequência e as fibras não apresentam auto-modulação de fase, o que poderia levar a um alargamento do espectro. Atribui-se, portanto, este fato a problemas de caráter numérico.

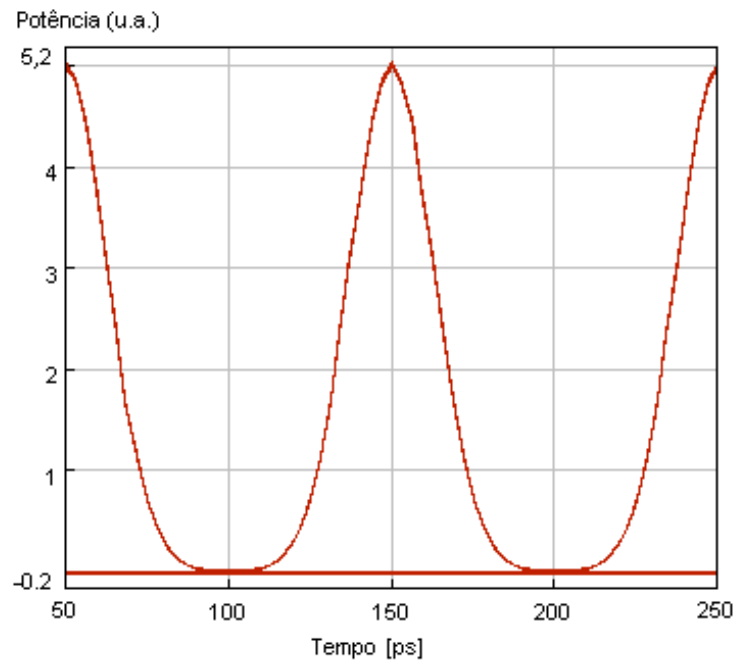


**Figura 40** – Formato dos pulsos medidos na saída do gerador (azul), na saída da NZDSF (verde) e na saída do amplificador (vermelho).

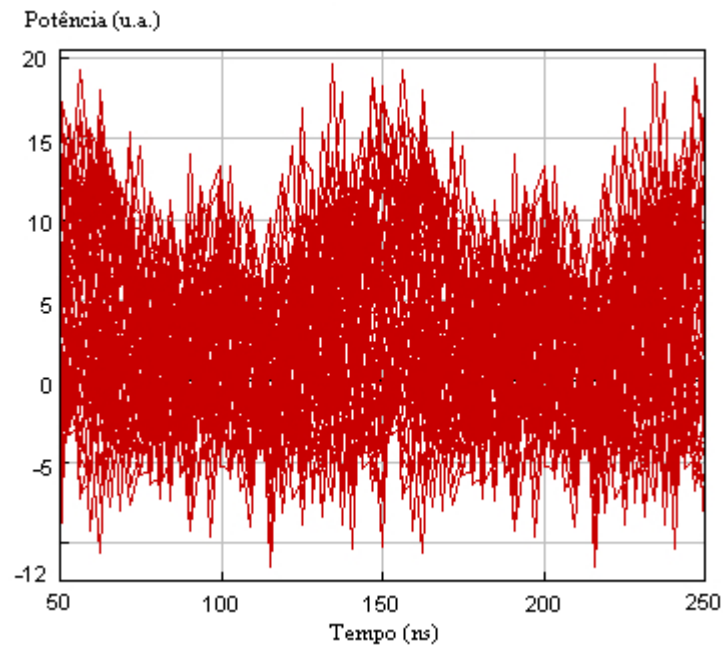
As Figuras 41, 42 e 43 mostram os diagramas de olho obtidos na saída do gerador, na saída da NZDSF e na saída do amplificador, respectivamente. Através destes diagramas de

olho, pode-se verificar mais uma vez a melhora do sinal ocorrida após a amplificação Raman, e compensação da dispersão no meio, já que o olho deixa a NZDSF totalmente fechado. A BER estimada a partir dos diagramas de olho confirma a ótima regeneração obtida:

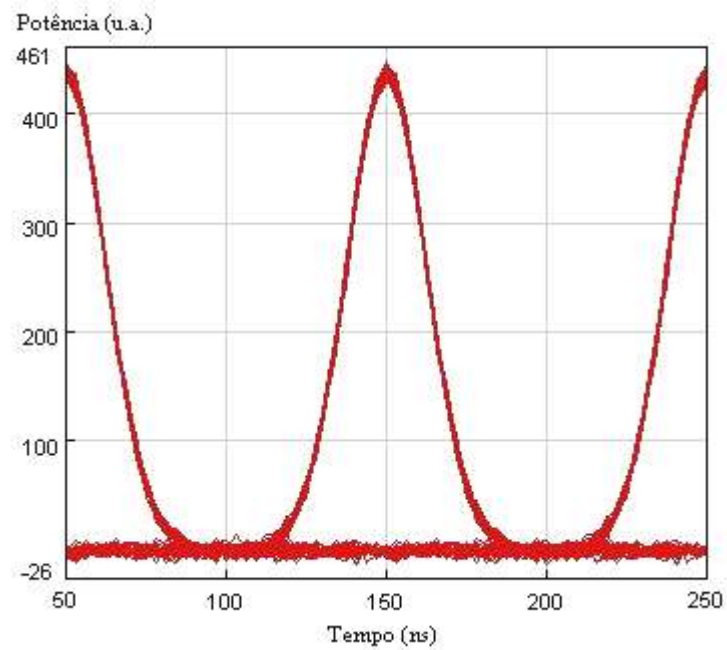
- BER na saída do gerador: zero (desprezível);
- BER na saída da NZDSF: 0,14289;
- BER na saída do amplificador: zero (desprezível).



**Figura 41** – Diagrama de olho na saída do gerador de sinais.



**Figura 42** – Diagrama de olho na saída da NZDSF.



**Figura 43** – Diagrama de olho na saída do amplificador.

Assim, demonstra-se a dupla utilidade da MOF no sistema. Ressalta-se que nenhuma fibra convencional poderia realizar a compensação da dispersão demonstrada.

## 5 CONCLUSÃO FINAL

A presente dissertação estudou teórica e numericamente o ganho Raman obtido em uma MOF de baixa perda demonstrada experimentalmente, com diâmetro de núcleo moderadamente pequeno. Altos valores de ganho líquido ( $> 10$  dB) foram previstos em três das principais regiões espectrais (bandas O, C e L), com uma fibra de 4 km de comprimento e uma potência de bombeamento de 0,3 W. O uso de fibras mais longas demonstrou ser benéfico, principalmente porque a perda na fibra não limita o desempenho no caso estudado. O uso de 0,5 W de potência de bombeamento resulta em ganhos de pelo menos 25 dB nas bandas previamente mencionadas.

Simulações de um amplificador Raman baseado na MOF estudada confirmam os valores de ganho obtidos e indicam que figuras de ruído próximas de 4 dB podem ser obtidas em determinadas situações. Considerando ganho e figura de ruído, o melhor desempenho obtido foi o de 4 km de comprimento de MOF e 500 mW de potência de bombeamento, tanto na banda C quanto na banda O.

Um ponto interessante nestas MOFs é a alta dispersão anômala disponível em toda a região espectral analisada. Esta funcionalidade pode ser explorada para projeto de mapas de dispersão específicos em enlaces de fibra ou para compensação da dispersão na região de 1300 nm, como demonstrado nesta dissertação. Para isso, foi simulado um circuito óptico completo, onde se utilizou a MOF para amplificação e regeneração de um sinal de 10 Gbit/s transmitido através de uma NZDSF. O sinal regenerado apresentou níveis desprezíveis de BER.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGRAWAL, Govind P. *Nonlinear Fiber Optics*. Academic Press, 2001.

All Nobel Laureates in Physics – Nobel Prize. Disponível em: <[http://nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/index.html](http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/index.html)>. Acesso em: dez 2007.

BISCUOLA Gualter J.; MAIALI, André C. *Física*, Volume Único, 2. ed., Editora Saraiva, 1997.

BJARKLEV, Anders; BROENG, Jes; BJARKLEV, Araceli S. *Photonic Crystal Fibres*, Kluwer Academic Publishers, 2003.

BROMAGE, Jake. Raman amplification for fiber communication systems, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 22, no. 1, pp. 79-93, January 2004.

BROMAGE, Jake; ROTTWITT, Karsten; LINES, M. E. A method to predict the Raman gain spectra of germanosilicate fibers with arbitrary index profiles. *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 14, no. 1, pp 24-26, January 2002.

CANI, Shirley P. N.; DE FRANCISCO, Carlos A.; SPADOTI, Danilo H., NASCIMENTO, Valtemir; BORGES, Ben-Hur V.; CALMON, Luiz de C.; ROMERO, Murilo A. Requirements for efficient Raman amplification and dispersion compensation using microstructured optical fibers. *Fiber and Integrated Optics*, vol. 26, no. 5, pp. 255-270, July 2007.

DIGWEED-LYYTIKAINEN, K.; DE FRANCISCO, C. A.; SPADOTI, D.; JURIOLLO, A. A; ROSOLEM, J. B.; AYRES NETO, J. B. M.; BORGES, B. V.; CANNING, J.; ROMERO, M. A. Photonic crystal optical fibers and dispersion compensation and Raman amplification: design and experiment. *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 49, no. 4, pp. 872-874, Abril 2007.

FUKAI, Chisato; NAKAJIMA ,Kazuhide; ZHOU, Jian ; TAJIMA, Katsusuke; KUROKAWA, Kenji; SANKAWA, Izumi. Distributed Raman amplification based DWDM



transmission in a low loss photonic crystal fibre. *ECOC 2004 Proceedings*, vol. 3, pp. 304-305, 2004.

GHATAK, Ajoy; THYAGARAJAN, K. *Introduction to Fiber Optics*, Cambridge University Press, 1998.

GIOZZA, William F.; CONFORTI, Evandro; WALDMAN, Hélio. *Fibras Ópticas – Tecnologia e Projeto de Sistemas*, Makron Books, 1991.

HEADLEY, Clifford; AGRAWAL, Govind P. *Raman Amplification in Fiber Optical Communication Systems*, Elsevier Academic Press, 2005.

ISLAM, Mohammed N. *Raman Amplifiers for Telecommunications – Sub-systems and Systems* - vol. 2, Springer-Verlag, 2004.

KNIGHT, Jonathan. Photonic crystal fibres, *Nature*, vol. 424, pp. 847-851, August 2003.

KUROKAWA, Kenji; TAJIMA, Katsusuke; TSUJIKAWA, Kyozo; NAKAJIMA, Kazuhide; MATSUI, Tadashi; SANKAWA, Izumi; HAIBARA, Tadashi. Penalty-free dispersion-managed soliton transmission over a 100-km low-loss PCF. *Journal of Lightwave Technology*, vol. 24, no. 1, pp. 32-37, January 2006.

KUROSAWA, Y.; TAKEDA, N.; KAWAZAWA, T.; TAGA, H.; GOTO, K. Raman assisted EDFA amplifier using 1460 nm pump wavelength for C-band transmission with long repeater span. *ECOC 2003*.

MATOS, C.J.S. de; HANSEN, K. P.; TAYLOR, J. R.. Experimental characterization of Raman gain efficiency of holey fibre. *Electronics Letters*, vol. 39, no. 5, pp. 424-425, March 2003.

NAKAJIMA, Kazuhide; FUKAI, Chisato; KUROKAWA, Kenji; TAJIMA, Katsusuke; MATSUI, Takashi; SANKAWA, Izumi. Distributed Raman amplification at 850 nm in a low loss photonic crystal fibre. *ECOC 2005*, vol. 2, pp 285-286.

OFS Fiber Catalog. Disponível em: <<http://www.ofsoptics.com>>. Acesso em: jun 2007.

OFS TrueWave RS Fiber Catalog. Disponível em: <<http://www.ofsoptics.com>>. Acesso em: dez 2007.

OKAMOTO, Katsunari. *Fundamentals of Optical Waveguides*. Academic Press, 2000.

Photonic Crystal Fibers Technology Tutorial. Crystal Fibre, Disponível em: <[http://www.crystal-fibre.com/technology/technology\\_tutorial.shtm](http://www.crystal-fibre.com/technology/technology_tutorial.shtm)>. Acesso em: 27 mar 2006.

RUSSEL, Philip. Photonic Crystal Fibers: A Historical Account, *IEEE-LEOS*, no. 5, vol. 21, pp. 11-15, October 2007.

SAITO, L. A. M.; TAVEIRA, P.D.; SOUZA, E. A.; GAARDE, R. B.; SOUZA K.; Raman gain efficiency enhancement in the O-band. *Frontiers in Optics*, 2006

SAITO, Lucia A. Amplificador Raman discreto para utilização em transmissão CWDM na banda “O”. 2006. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2006.

TAJIMA, Katsusuke; KUROKAWA, Kenji; NAKAJIMA, Kazuhide; SANKAWA, Izumi. Photonic Crystal Fiber. *NTT Technical Review*, vol. 3, no. 8, pp. 57-61, August 2005.

TAJIMA, Katsusuke. Low loss PCF by reduction of hole surface imperfection. ECOC 2007.

TAJIMA, Katsusuke; ZHOU, Jian; NAKAJIMA, Kazuhide; SATO, Kiminori. Ultralow loss and long length photonic crystal fiber. *Journal of Lightwave Technology*, vol. 22, no. 1, pp. 7-10, January 2004.

VARSHNEY, Shailendra K.; SAITOH, Kunimasa; KOSHIBA, Masanori; ROBERTS, Peter J. Analysis of a realistic and idealized dispersion compensating photonic crystal fiber Raman amplifier. *Optical Fiber Technology*, no. 13, pp. 174-179, 2007.

YUSOFF, Z.; LEE, J. H.; BELARDI, W.; MONRO, T. M.; TEH, P. C.; RICHARDSON, D. J. Raman effects in a highly nonlinear holey fiber: amplification and modulation. *Optics Letters*, vol. 27, no. 6, pp 424-426, 2002.

ARAÚJO, Alfredo Almeida de. *Análise de amplificação Raman em fibras microestruturadas de baixa perda*. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, SP, 2008.

<i>Página</i>	<i>Parágrafo</i>	<i>Linha</i>	<i>Onde se lê</i>	<i>Leia-se</i>
4	1	1	pelo	o
4	2	1	pelo	o
4	3	1	pelo	o
4	4	1	MsC	M.Sc.
4	4	1	pelas	as
4	5	2	MsC.	M.Sc.
4	6	1	pelas	as
4	7	1	pela	as
4	8	2	pela	as
4	9	1	MsC.	M.Sc.
4	9	1	pelos	os
4	9	3	pelas	as
9	1	3	furos	micro-capilares
10	2	4	lasers de diodo	diodo-lasers
10	4	2	, e não da	e da
13	2	6	buracos	capilares
18	1	4	furos	capilares
18	1	6	furos	capilares
18	2	1	quantidade	intensidade
18	2	1	furos	capilares
18	3	1	quantidade	intensidade
18	3	2	furos	capilares
19	legenda	1	furos	capilares
23	1	2	furos	capilares
24	2	2	furos	capilares
25	3	2	furos	capilares
26	2	8	furos	capilares
27	1	3	furos	capilares
28	2	4	furos	capilares
30	3	2	foi aquecida	recebeu energia
30	3	4	é resfriada	perde energia
44	Figura 17	-	DWDM 51 canais	51 canais com espaçamento de 2 nm baixa perda e comprimento de onda de bombeamento de 1229 nm
46	legenda	2	baixa perda	ISLAM
52	2	2	ISLAN	ISLAM
55	2	7	2006)	2006), que tem pico de $2,45 \times 10^{-3} \text{ W}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ para 1453 nm
56	1	2	bandas C e L	bandas C e L (1565-1625 nm)
59	2	2	furos	capilares
60	1	2	furos	capilares
60	2	1	modelamento	modelagem
70	2	1	apmplificador	amplificador
71	5	2	January	janeiro
71	6	3	January	janeiro
71	7	4	July	julho
72	6	1	August	agosto

72	7	4	January	janeiro
72	9	2	March	março
73	5	2	October	outubro
73	8	2	August	agosto
73	10	3	January	janeiro

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)