

Projeto de Graduação



02 de Julho de 2019

# **EFEITOS NÃO LINEARES EM FIBRAS ÓTICAS**

Dykson Henrique Silva



[www.ele.puc-rio.br](http://www.ele.puc-rio.br)

Projeto de Graduação



# **EFEITOS NÃO LINEARES EM FIBRAS ÓPTICAS**

**Aluno: Dykson Henrique Silva**

**Orientador: Guilherme Penello Temporão**

Trabalho apresentado com requisito parcial à conclusão do curso de Engenharia Elétrica na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

## **Agradecimentos**

Gostaria de agradecer a à minha família por todo incentivo e suporte para a realização desse sonho. Não obstante gostaria de agradecer aos Professores que foram fundamentais no meu processo de aprendizado ao longo de quase duas décadas.

"Estudar é um ato de amor por você. Tudo o que conseguir aprender ninguém lhe roubará. Sua cabeça é um cofre inviolável do qual só você tem a chave. As riquezas acumuladas serão eternamente sua fortuna. Infeliz daquele que tem "o cofre vazio". Vai ser o quê, amanhã? Provavelmente o escravo de alguém. É isso o que você quer para a sua vida? **Seja seu dono, aprenda tudo que puder.**"

Miriam Maia

## Resumo

Este trabalho tem por objetivo apresentar os principais efeitos ópticos não lineares existentes numa fibra óptica, sendo esses o espalhamento Rayleigh, espalhamento de Brillouin, espalhamento Raman e Misturador de Quatro Ondas. Além disso, fazer uma revisão sobre fibra ópticas e características relevantes para sua utilização em sistemas de comunicação ópticos. Não obstante neste trabalho é feita uma revisão sobre as equações que regem a propagação de ondas eletromagnéticas e a solução dessas num guia de onda circular.

**Palavras-chave: fibra ótica; efeitos não lineares, equação de Maxwell, guia de onda;**

## Nonlinear Effects in Optical Fibers

### Abstract

The objective of this work is to present the main nonlinear optical effects in an optical fiber, such as Rayleigh scattering, Brillouin scattering, Raman scattering and Four Wave Mixer. In addition, make a review on fiber optics and features relevant to their use in optical communication systems. Nevertheless in this work a revision is made on the equations that govern the propagation of electromagnetic waves and its solution in a circular wave guide.

**Keywords:** optical fiber; nonlinear effects, Maxwell equations, waveguide.

<b>1- Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1 Contexto .....	1
1.2 Problemática.....	2
1.3 Objetivo e Relevância .....	2
1.4 Estrutura do Trabalho .....	2
<b>2 - Revisão teórica .....</b>	<b>3</b>
2.1 Equações de Maxwell .....	3
2.2 Guia de onda circular .....	4
2.3 Solução da equação diferencial do guia de onda circular.....	5
<b>3 - Sistema de comunicação óptica .....</b>	<b>8</b>
3.1 Sistema de comunicação óptico.....	8
3.2 Transmissores ópticos.....	8
3.3 Receptor Óptico .....	9
3.4 Repetidores e Amplificadores ópticos .....	10
3.5 Fibra óptica .....	10
3.6 Fibra de Índice Gradual .....	12
3.7 Perdas em fibras ópticas .....	13
3.7.1 Coeficiente de atenuação.....	13
3.7.2 Janela de atuação de uma fibra óptica.....	13
3.7.3 Absorção do material .....	14
3.7.4 Espalhamento de Rayleigh .....	15
3.7.5 Outras perdas .....	15
<b>4 - Efeito não lineares .....</b>	<b>17</b>
4.1 Efeitos não lineares .....	17
4.2 Espalhamento Estimulado de Brillouin (SBS).....	17
4.3 Espalhamento Estimulado de Raman (SRS) .....	18
<b>5 - Montagem experimental .....</b>	<b>20</b>
5.1 Medição do efeito de Brillouin.....	20
5.2 Detecção do espalhamento de Rayleigh e Brillouin-Stokes .....	21
5.3 Misturador de quatro ondas (FWM).....	24
<b>6 - Conclusão .....</b>	<b>28</b>
<b>7 - Referências .....</b>	<b>29</b>

## Lista de Figuras

Figura 1 - Aumento no produto taxa de bits-distância BL entre 1850-2000 [1] .....	1
Figura 2 - Aumento de BL em diferentes gerações de ondas luminosas. ....	2
Figura 3 - Corte transversal fibra óptica .....	4
Figura 4 - Funções de Bessel de primeira espécie.....	7
Figura 5 - Funções de Bessel de segunda espécie.....	7
Figura 6 - Sistema de comunicação óptico.....	8
Figura 7 - Esquema de um receptor óptico .....	9
Figura 8 - Esquema de um repetidor óptico .....	10
Figura 9 - Esquema de um EDFA.....	10
Figura 10 - Estrutura de uma fibra óptica.....	11
Figura 11 - Fibra de índice degrau e gradual.....	11
Figura 12 - Trajetória dos raios de luz numa fibra de índice gradual .....	12
Figura 13 - Perda de uma fibra monomodo em relação ao comprimento de onda .....	13
Figura 14 - Perda de dispersão fibra seca e convencional .....	15
Figura 15 - Espalhamento de Rayleigh .....	15
Figura 16 - Perdas em uma fibra óptica .....	16
Figura 17 - Representação do Espalhamento de Brillouin.....	18
Figura 18- Setup do Experimento 1 para medir o espalhamento de Brillouin em uma fibra DS .....	20
Figura 19-Potência Retroespalhada - Potência de Saída na fibra em função da potência de entrada. ....	21
Figura 20-Potência de Stokes e Potência de Saída para Pin=17.3dBm.....	22
Figura 21-Potência de Stokes e Potência de Saída para Pin=7.0dBm .....	22
Figura 22-Potência de Stokes e Potência de Saída para Pin=4dBm .....	23
Figura 23-Potência de Stokes e Potência de Saída para Pin=1dBm .....	23
Figura 24- Setup do experimento 2. ....	24
Figura 25-Espectro FWM .....	25
Figura 26- Potência no pico da direita para a fibra DS 15.7km .....	26
Figura 27-Potência no pico da direita para a fibra Standard 12.6km .....	27

## Lista de Tabelas

Tabela 1 - Comparação das propriedades para LEDs e Diodo Laser.....	9
Tabela 2 - Largura das Janelas de Transmissão e Comprimentos de Onda de Operação da Fibra Óptica .....	14
Tabela 3 - Absorção para diferentes tipos de íons.....	14

## 1- Introdução

### 1.1 Contexto

Um enlace de comunicação é responsável por transmitir uma informação de um ponto ao outro, utilizando meios de propagação como portadoras eletromagnéticas, micro-ondas, ondas luminosas. Sistemas de comunicação ópticas são sistemas de ondas luminosas que empregam fibra óptica para transmitir informação.

Ao longo do tempo a capacidade de tráfego de informação foi aumentando conforme novas tecnologias foram sendo desenvolvidas. O produto taxa de bits-distância, BL, em que B é a taxa de bits e L, o espaçamento entre repetidores aumentou exponencialmente desde meados de 1800 até os anos 2000. Esse aumento deve-se no desenvolvimento de novas tecnologias de comunicação.

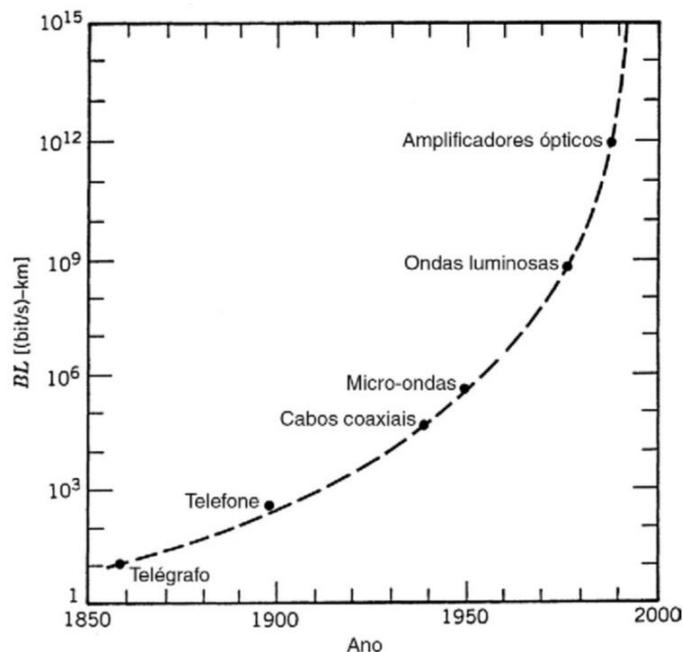


Figura 1 - Aumento no produto taxa de bits-distância BL entre 1850-2000 [1]

Conforme podemos analisar na figura acima, em decorrência de sistemas utilizando ondas luminosas as taxas BL se aproximaram de 100(Mb/s)-km. Essa, era viabilizada devido a utilização da luz do laser (que havia sido inventado na década de 1960) para comunicação ópticas. As fibras ópticas a partir de então foram escolhidas como sendo um sistema capaz de guiar a luz de forma similar ao fluxo de elétrons num fio de cobre. Todavia essas fibras atenuavam o sinal, gerando grandes perdas da ordem de 1000dB/km.

Depois de muitas pesquisas e a utilização de lasers semicondutores (em sua maioria de GaAs) a taxa BL aumentou de forma significativa viabilizando assim operações de sistemas de comunicação ópticas no mundo.

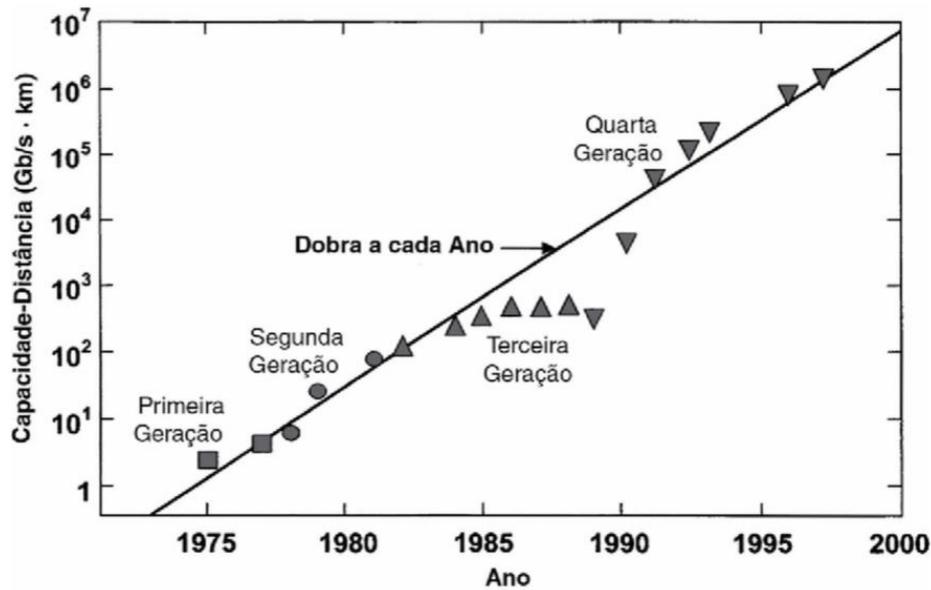


Figura 2 - Aumento de BL em diferentes gerações de ondas luminosas.

Da primeira para a quarta geração de comunicação óptica, BL aumentou numa ordem de grandeza de  $10^7$ . Esse ganho se deve unicamente a utilização de amplificadores ópticos e utilização da técnica de multiplexação por divisão de comprimento de onda para aumentar a taxa de bits. Foi realizado um experimento em 1991 utilizando fibra óptica com comprimento de 21.000km que mostrou a possibilidade de transmitir dados a 2,5Gb/s e em 14.300km a 5Gb/s [2]. Com essas características era possível fazer transmissão de dados intercontinental.

## 1.2 Problemática

As fibras ópticas são na sua maioria fabricadas utilizando sílica, material que não possui características lineares. A geometria do guia de onda cria a ocorrência de efeitos não lineares, efeitos esses extremamente importantes na concepção de alguns modernos sistemas de onda.

## 1.3 Objetivo e Relevância

O objetivo deste trabalho é estudar efeitos dispersivos na propagação de luz em fibras ópticas (Brillouin, Raman) e efeitos paramétricos: mistura de quatro de onda (FWM), além de realizar experimento em fibra ópticas para detecção dessas anomalias.

## 1.4 Estrutura do Trabalho

No capítulo 2 será relembrando as equações de Maxwell, equação e solução de guia de onda circular. No capítulo 3 será elaborado uma revisão sobre comunicações ópticas, fibra ótica e suas características. No capítulo 4 será discutido os fundamentos dos efeitos não lineares. No capítulo 5 será mostrado o setup, explicação do experimento realizado. No capítulo 6 serão discutidos dos resultados do experimento e conclusão do trabalho.

## 2 - Revisão teórica

### 2.1 Equações de Maxwell

A propagação de ondas eletromagnéticas numa fibra óptica é regida pelas equações de Maxwell, que relacionam campos elétrico e magnéticos. Num meio sem carga e sem perdas as equações são descritas da seguinte forma [3]:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (2.1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.3)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2.4)$$

Onde  $\mathbf{E}$  representa o vetor campo elétrico,  $\mathbf{H}$  representa o vetor campo magnético,  $\mathbf{D}$  é a densidade de fluxo elétrico e  $\mathbf{B}$  é a densidade de fluxo magnético. Sabemos também que  $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$  onde  $\epsilon$  é a permissividade elétrica. Temos também que  $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$  onde  $\mu$  é a permeabilidade magnética. Manipulando as equações (2.3) e (2.4) conseguimos chegar a soluções individuais para o campo elétrico e magnético. Fazendo o rotacional de (2.4) temos:

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = -\mu \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \mathbf{H}) = \mu \epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (2.5)$$

Utilizando a propriedade vetorial:

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E} \quad (2.6)$$

Com isso chegamos a:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \mu \epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (2.7)$$

Da mesma forma conseguimos chegar na equação de onda magnética:

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \mu \epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (2.8)$$

Esses campos podem variar no tempo e no espaço. Com isso admitimos que esses campos possam variar de forma harmônica no tempo, e assim as equações podem ser reescritas da seguinte forma:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \mu \epsilon \omega^2 \mathbf{E} = 0 \quad (2.9)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \mu \epsilon \omega^2 \mathbf{H} = 0 \quad (2.10)$$

Onde  $\omega$  é a frequência angular em radianos por segundo. Com isso as soluções descrevem um campo harmônico no tempo e mostram um deslocamento no espaço, formando uma onda progressiva. Tomando que isso ocorra na direção  $z$  positiva as equações no domínio da frequência podem ser reescritas da seguinte maneira:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{-j\beta z} \quad (2.11)$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_0 e^{-j\beta z} \quad (2.12)$$

O fator de fase  $\beta = \omega \sqrt{\epsilon \mu}$  dado em radianos por metro (rad/m).

### 2.2 Guia de onda circular

O termo guia de onda pode significar qualquer estrutura que suporte a propagação de uma onda, seja ela eletromagnética ou acústica. Uma fibra óptica nada mais é que um guia de onda com formato cilíndrico onde a luz é propagada ao longo do seu comprimento. Se observarmos uma seção transversal de uma fibra óptica, verificaremos que para chegar na equação de onda é necessário a utilização do sistema de coordenadas cilíndricas.

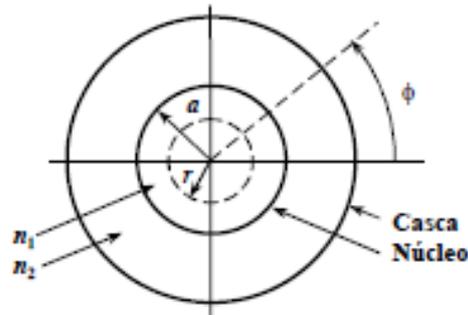


Figura 3 - Corte transversal fibra óptica

Sendo n1 o índice de refração no núcleo e n2 o índice de refração da casca. O eixo de coordenada z é exatamente o eixo da fibra, onde está sendo propagada a onda. Com isso a equação de campo elétrico e magnético são descrevidas da seguinte forma [4]:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0(\mathbf{r}, \varphi)e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (2.13)$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_0(\mathbf{r}, \varphi)e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (2.14)$$

Utilizando os operadores de Maxwell temos para E:

$$\frac{1}{r} \left( \frac{\partial E_z}{\partial \varphi} + jr\beta E_\varphi \right) = -j\omega\mu H_r \quad (2.15)$$

$$j\beta E_r + \frac{\partial E_z}{\partial r} = -j\omega\mu H_\varphi \quad (2.16)$$

$$\frac{1}{r} \left( \frac{\partial}{\partial r} (rE_\varphi) - \frac{\partial E_r}{\partial \varphi} \right) = -j\omega\mu H_\varphi \quad (2.17)$$

Utilizando os operadores de Maxwell temos para H:

$$\frac{1}{r} \left( \frac{\partial H_z}{\partial \varphi} + jr\beta H_\varphi \right) = j\omega\varepsilon E_r \quad (2.18)$$

$$j\beta H_r + \frac{\partial H_z}{\partial r} = -j\omega\varepsilon E_\varphi \quad (2.19)$$

$$\frac{1}{r} \left( \frac{\partial}{\partial r} (rH_\varphi) - \frac{\partial H_r}{\partial \varphi} \right) = -j\omega\varepsilon E_\varphi \quad (2.20)$$

Com as equações acima conseguimos escrever as equações do campo elétrico e magnético nas coordenadas  $r$  e  $\varphi$ , sendo elas:

$$E_r = \frac{-j}{q^2} \left( \beta \frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{\mu\omega}{r} \frac{\partial H_z}{\partial \varphi} \right) \quad (2.21)$$

$$E_\varphi = \frac{-j}{q^2} \left( \frac{\beta}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \varphi} + \mu\omega \frac{\partial H_z}{\partial r} \right) \quad (2.22)$$

$$H_r = \frac{-j}{q^2} \left( \beta \frac{\partial H_z}{\partial r} + \frac{\varepsilon\omega}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \varphi} \right) \quad (2.23)$$

$$H_\varphi = \frac{-j}{q^2} \left( \frac{\beta}{r} \frac{\partial H_z}{\partial \varphi} + \varepsilon\omega \frac{\partial E_z}{\partial r} \right) \quad (2.24)$$

Onde  $q^2 = \omega^2 \varepsilon \mu - \beta^2 = k^2 - \beta^2$  e  $k^2$  é o número de onda.

Finalmente, conseguimos chegar à equação de onda para o campo elétrico e magnético trocando respectivamente as equações (2.21) e (2.22) em (2.17) além de (2.23) e (2.24) em (2.20):

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial \varphi^2} + q^2 E_z = 0 \quad (2.25)$$

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 H_z}{\partial \varphi^2} + q^2 H_z = 0 \quad (2.26)$$

As equações acima representam as componentes longitudinais do campo elétrico e magnético numa fibra óptica de índice de refração,  $n_1$  e  $n_2$  constantes.

O tipo de configuração do campo que satisfaz as condições de contorno define os modos de propagação. Os mais usuais são:

- Modo TE (transverso elétrico): quando  $E_z = 0$  e a única componente longitudinal é a de  $H_z$ . O campo elétrico está presente apenas no plano transversal.
- Modo TM (transverso magnético): quando  $H_z = 0$  e a única componente longitudinal é a de  $E_z$ .
- Modo TEM (transverso eletromagnético): Não existe nenhum campo na direção de propagação.

## 2.3 Solução da equação diferencial do guia de onda circular.

Para solucionar as equações diferenciais (2.25) e (2.26), será necessário utilizar método de separação de variáveis cuja solução da equação é dada por:

$$E_z = A F_1(r). F_2(\varphi). F_3(z). F_4(t) \quad (2.27)$$

Devemos observar que  $F_3$  e  $F_4$  se relacionam de maneira exponencial conforme a equação (2.13) e (2.14), com isso podemos reescrever  $F_3(z).F_4(t) = e^{j(\omega t - \beta z)}$  quando a onda se propaga em  $z$ . A componente  $\varphi$  varia de 0 a  $2\pi$  com isso a solução de é  $F_2(\varphi) = e^{jv\varphi}$  onde  $v$  pode ser positivo negativo interferindo apenas no sentido de rotação.

Vamos então substituir (2.27) em (2.25):

$$\frac{\partial^2 F_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial F_1}{\partial r} + \left( q^2 - \frac{v^2}{r^2} \right) F_1 = 0 \quad (2.28)$$

A equação acima pode ser aplicada também para o campo magnético. Observando a equação (2.28) temos que essa é uma equação diferencial de Bessel. Para prosseguir devemos resolver a equação para as diferentes camadas da fibra e admitindo:

- Núcleo: os modos guiados têm que ser finitos.
- Região externa: os modos guiados têm que decair exponencialmente a zero ao se aproximar da fronteira da fibra.

Com isso, para a região interna (núcleo) a solução da equação (2.28) será a equação de Bessel de primeira espécie e as expressões se comportam da seguinte forma:

$$E_z(r < a) = A J_v(ur). e^{jv\varphi} . e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (2.29)$$

$$H_z(r < a) = B J_v(ur). e^{jv\varphi} . e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (2.30)$$

Onde A e B são constantes e  $J_v(ur)$  é a representação da função de Bessel de ordem  $v$ .

Para a região externa ao núcleo a solução da equação (2.28) será a equação de Bessel de segunda espécie ordem e as expressões se comportam da seguinte forma:

$$E_z(r > a) = A K_v(wr). e^{jv\varphi} . e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (2.31)$$

$$H_z(r > a) = B K_v(wr). e^{jv\varphi} . e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (2.32)$$

Onde C e D são constantes e  $K_v(wr)$  é a representação da função de Bessel de ordem  $v$ .

Podemos analisar graficamente as funções de Bessel de primeira e segunda espécie nos gráficos abaixo.

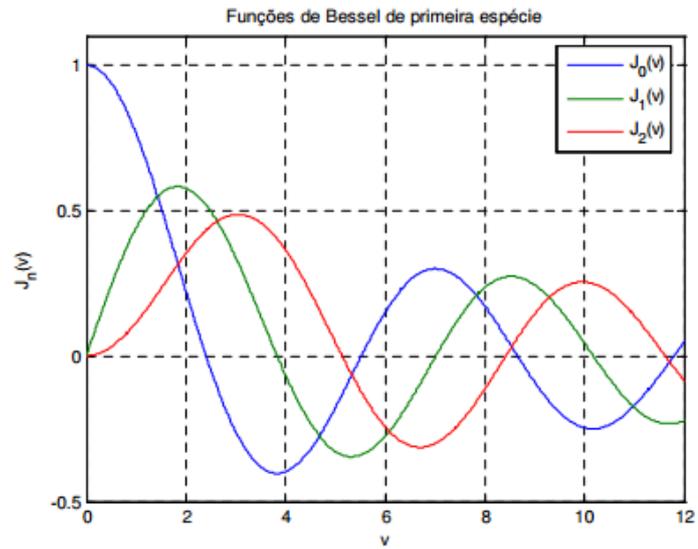


Figura 4 - Funções de Bessel de primeira espécie

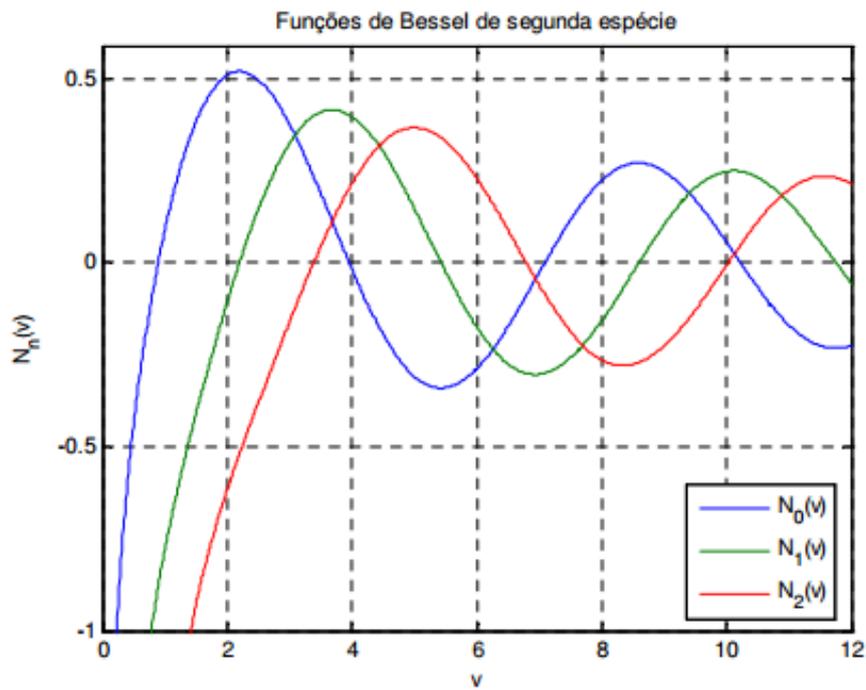


Figura 5 - Funções de Bessel de segunda espécie

### 3 - Sistema de comunicação óptica

#### 3.1 Sistema de comunicação óptico

Um sistema de comunicação óptico, assim como qualquer sistema de comunicação consiste essencialmente em um transmissor, um canal de comunicação e um receptor. No sistema óptico, um sinal elétrico modula corrente de entrada de uma fonte de luz. Essa, modula a intensidade da luz emitida.

Essa luz é acoplada a uma fibra e propagada ao longo do seu comprimento até chegar a um detector. Esse sinal é demodulado e o sinal elétrico é recuperado.

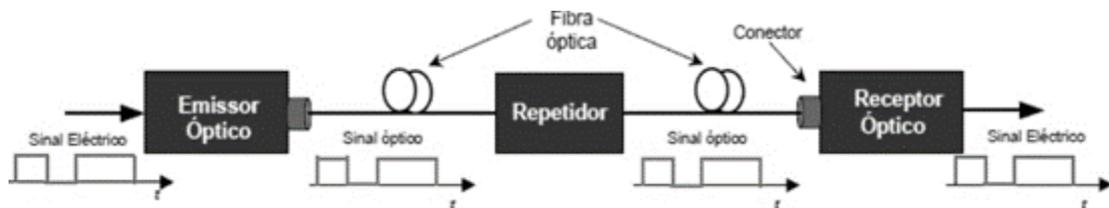


Figura 6 - Sistema de comunicação óptico

A presença do repetidor no esquema acima se dá, pois como o sinal luminoso se propaga por longas distâncias na fibra e poder cair a níveis muito baixos, inviabilizando a detecção. Dado isso o sinal recebe é detectado e amplificado no repetidor permitindo que ele se propague com um nível de intensidade que permita sua detecção.

O canal de comunicação utilizado pelo sistema de comunicação óptica é a fibra óptica. As fibras na sua maioria são produzidas de Sílica, pois suas características permitem que a luz se propague com uma perda em torno de 0,2dB/km. Além dessa perda, também existem dispersões em fibras. As fibras multimodos, por exemplo, fazem com que a luz se propague com diferentes velocidades devido aos muitos modos de propagação. Esse fenômeno faz com que os pulsos dos sinais se alarguem inviabilizando a detecção.

#### 3.2 Transmissores ópticos

O papel do transmissor óptico no sistema é essencialmente converter o sinal elétrico em luz para ser transmitido pela fibra. Esse é formado por um modulador óptico, uma fonte óptica (laser ou diodo) e um acoplador de canal.

O sinal elétrico recebido é modulado e então o sinal óptico é acoplado na fibra de tal forma que maximize a eficiência. Ou seja, garantindo que a potência lançada na fibra seja a maior possível. Isso faz com que o sinal luminoso se propague por uma distância maior sem a necessidade da instalação de muitos repetidores ou amplificadores.

O uso de laser ou diodo variam de acordo com a necessidade da transmissão que será feita, todavia na sua maioria o laser é mais utilizado pois os diodos têm capacidade de modulação limitada. A potência que é lançada na fibra é medida em dBm. Além disso, o laser oferece uma luz mais intensa com uma largura do feixe menor do que os LEDs. Todavia, deve-se projetar o sistema de acordo com a suas especificações.

Conforme podemos observar na tabela abaixo, temos uma comparação nas propriedades dos Lasers e LED no que se refere a ao comprimento de onda óptico, largura espectral, potência de saída do sinal óptico, eficiência do acoplamento e custo. [5]

Propriedade	LED	Diodo laser
Comprimento de onda óptico (nm)	850, 1300	1300, 1550
( $\Delta\lambda$ ) Largura espectral (nm)		
faixa	20–100	1–5
típico	50	3
Tempo de resposta (ns)		
faixa	2–20	0,1–1
típico	10	0,4
Potência de saída (mW)		
faixa	0,1–10	$10^{-9}$ –10
típico		
Eficiência de acoplamento	baixo	moderado
Tempo de vida (h)	$10^5$ – $10^7$	$10^4$ – $10^5$
Custo	baixo	alto
Uso primário	percursos curtos, taxa de dados moderados	percursos longos, altas taxas de dados

Tabela 1 - Comparação das propriedades para LEDs e Diodo Laser.

### 3.3 Receptor Óptico

O papel do receptor óptico é fundamentalmente, converter o sinal óptico recebido em sinal elétrico. O acoplador óptico utilizado foca o sinal luminoso no fotodetector, depois disso o sinal é demodulado de acordo com a modulação do sinal gerado. A estrutura mais usada para realizar a detecção do sinal é um fotodiodo PIN, seguido de um fotodiodo avalanche.

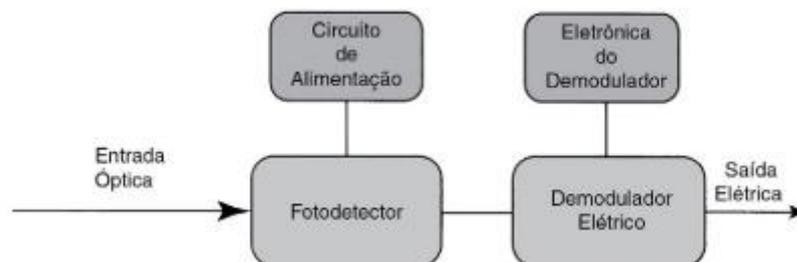


Figura 7 - Esquema de um receptor óptico

O fotodiodo PIN largamente utilizado possui uma camada intrínseca, uma camada de semiconductor tipo p e outra tipo n. A grande região intrínseca permite que o fotodiodo consiga ter grande espaço para capturar os fótons. [6]

Uma medida importante que tem de ser levada em consideração é a BER, taxa de erro de bit, que define a quantidade de erros por segundo. Num enlace de comunicação óptica essa taxa fica em torno de  $10^{-9}$ . Como em qualquer sistema de comunicação a razão sinal ruído do sinal (SNR) também tem que ser levada em consideração. O ruído na comunicação óptica pode ser de natureza quântica, térmica ou causado no processo de amplificação do sinal.

### 3.4 Repetidores e Amplificadores ópticos

Ao longo do deslocamento dentro da fibra óptica o raio luminoso sofre dispersões e atenuações que fazem com que o nível do sinal caia. Num enlace de comunicação óptica é comum a instalação de repetidores e amplificadores a cada 50km.

Basicamente num repetidor óptico o sinal luminoso é convertido em sinal elétrico utilizando um fotodetector PIN, esse sinal é amplificado e usado para modular a saída da fonte óptica. Os repetidores requerem sua própria fonte de potência e por esse motivo levam a um gasto maior de energia.

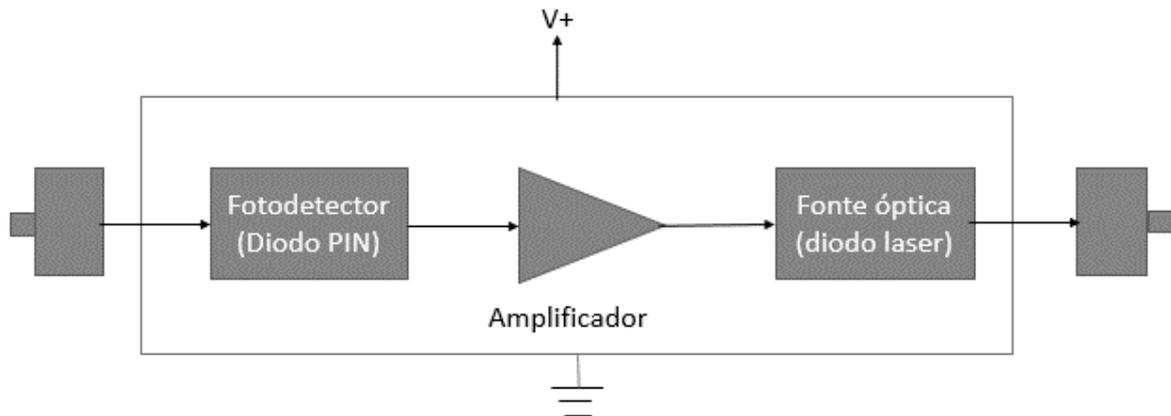


Figura 8 - Esquema de um repetidor óptico

Além de repetidores, ou até mesmo uma substituição desse é a utilização de um amplificador óptico. O largamente utilizado na indústria é o amplificador de fibra dopada com erbium (EDFA). A fibra de sílica dopada com erbium tem elétrons num estado de energia que faz com que o sinal seja amplificado. O sinal óptico estimula a relaxação dos elétrons excitados gerando fótons que aumentam o sinal. A potência da bomba laser é convertida em potência de sinal. O sinal de saída é ligado a um acoplador que extrai os sinais não convertidos. O EDFA gera um ganho em torno de 40dB e com alta potência associado a pouca introdução de ruído.

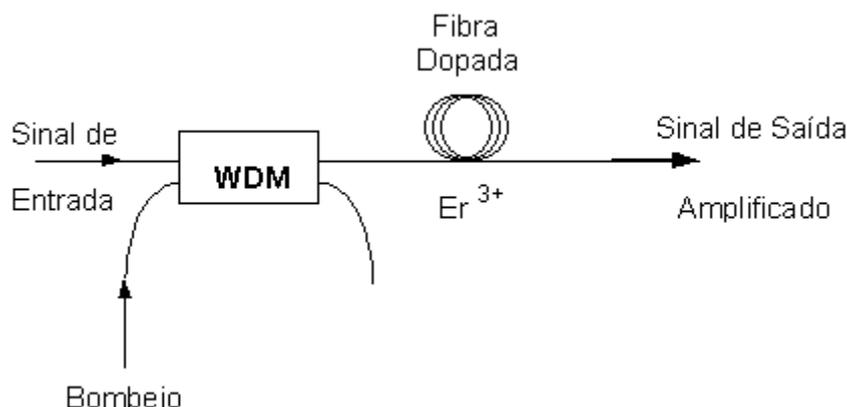


Figura 9 - Esquema de um EDFA

### 3.5 Fibra óptica

Uma fibra óptica consiste numa estrutura geométrica cilíndrica fabricado em vidro, sílica ou plástico. A região onde a luz se propaga na fibra é chamada de núcleo, esse tem um diâmetro de cerca de 125 micrômetros. Essa fibra é envolvida normalmente por um material que possui índice de refração menor. Isso se dá, pois, a diferença de índice de refração entre a casca e o núcleo permite a reflexão da luz no interior da fibra [7].

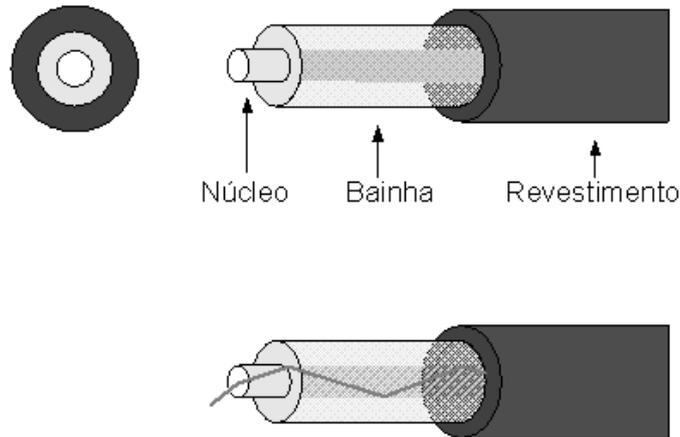


Figura 10 - Estrutura de uma fibra óptica

Essa mudança de índice de refração entre a casca e o núcleo permitiram o desenvolvimento de dois tipos de fibra. Uma chamada de fibra de índice degrau, onde há a mudança abrupta entre os índices de refração da casca e do núcleo. E a fibra de índice gradual, onde o índice de refração diminui gradualmente entre o núcleo e a casca.

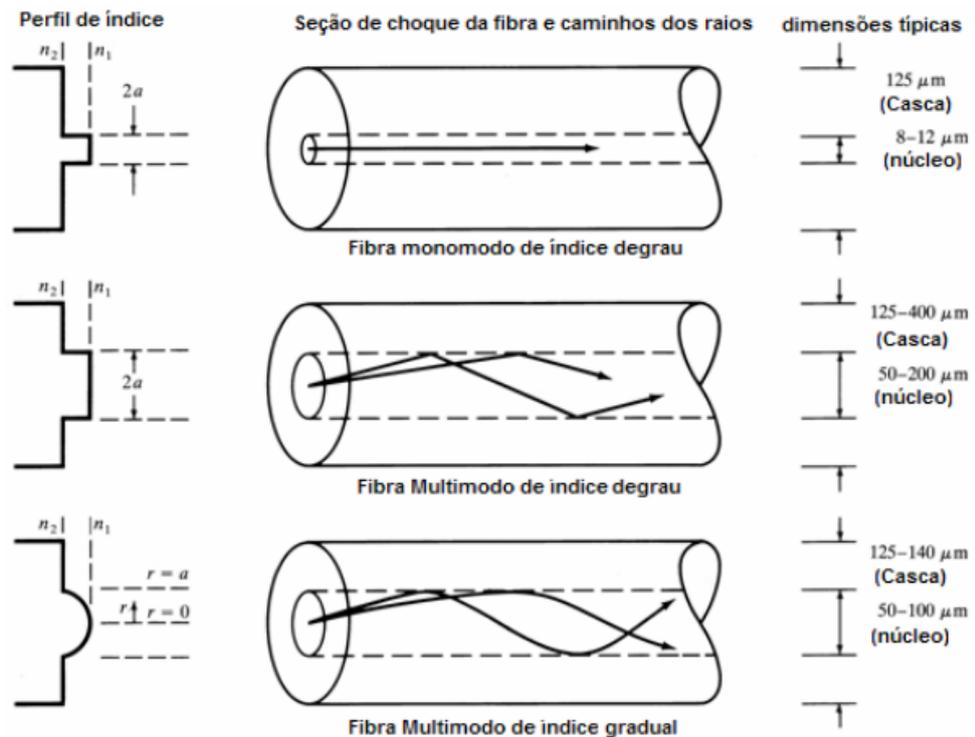


Figura 11 - Fibra de índice degrau e gradual

Para uma fibra de índice degrau a propagação do raio de luz obedece a Lei de Snell e é calculada da seguinte forma:

$$n_0 \cdot \sin(\theta_i) = n_1 \cdot \sin(\theta_r) \quad (3.1)$$

O raio de luz atinge a interface núcleo-ar e é refratado. Na equação acima  $n_0$  é o índice de refração do ar e  $n_1$  o índice de refração na fibra.

Outra medida importante que pode ser analisada é abertura numérica de uma fibra óptica. Essa medida representa a capacidade de coleta de luz de uma fibra e é calculada da seguinte forma:

$$NA = n_1 \sqrt{2\Delta} \quad \text{onde } \Delta = (n_1 - n_2)/n_1 \quad (3.2)$$

Na equação (3.2),  $\Delta$  é mudança fracionária do índice de refração entre a casca e o núcleo. Ou seja, quanto maior esse valor mais luz será acoplada a fibra óptica.

As fibras de índice degrau tem problemas quanto a dispersão no percurso do raio luminoso. Esses raios trafegam percursos com diferentes comprimentos, isso faz com que eles se dispersem no tempo. Os pulsos se alargam conforme o percurso feito gerando um atraso temporal nas fibras de índice degrau. Esse atraso é mensurado e calculado da seguinte forma:

$$\Delta T = \frac{n_1}{c} \left( \frac{L}{\sin \theta_c} - L \right) = \frac{L n_1^2}{c n_2} \Delta \quad (3.3)$$

Sendo  $L$  o comprimento da fibra,  $c$  velocidade da luz.

### 3.6 Fibra de Índice Gradual

As fibras de índice gradual, tem o seu índice de refração função do raio do núcleo e da casca. Esse tipo de fibra tem uma característica interessante pois a dispersão intermodal é reduzida. Conforme os raios de luz se propagam, as velocidades deles variam ao longo do percurso. Ou seja, o raio que viaja no eixo da fibra faz um percurso menor, porém com uma velocidade menor, pois índice de refração é alto no eixo. Os raios oblíquos fazem um percurso maior, mas suas velocidades são maiores pois eles estão mais próximos da casca onde o índice de refração é menor.

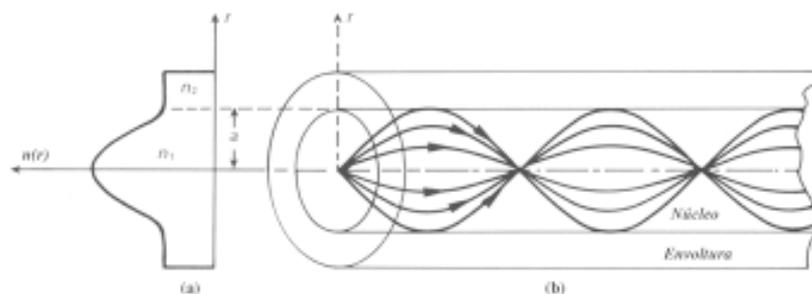


Figura 12 - Trajetória dos raios de luz numa fibra de índice gradual

Uma aproximação para o cálculo do índice de refração numa fibra de índice gradual é:

$$n(\rho) = \begin{cases} n_1 \left[ 1 - \Delta \left( \frac{\rho}{a} \right)^\alpha \right]; & \rho < a \\ n_1(1 - \Delta) = n_2; & \rho \geq a \end{cases} \quad (3.4)$$

O parâmetro  $a$  é o raio do núcleo da fibra, quanto maior o parâmetro  $\alpha$  mais a fibra se aproxima da fibra de índice degrau.

### 3.7 Perdas em fibras ópticas

Como todo sistema de comunicação a transmissão de informação via fibra óptica geram perdas. Essas reduzem a potência recebida e dificultam a recuperação do sinal. Essas perdas em comunicação ópticas estão associadas diretamente com a distância pela qual o sinal percorre e pelo tipo de fibra que é utilizada no enlace. Via de regra quanto a maior a distância maior será a perda de sinal associada. Não obstante, as perdas em fibras dependem do comprimento de onda da luz que é transmitida.

#### 3.7.1 Coeficiente de atenuação

O coeficiente de atenuação numa fibra óptica é dado pela Lei de Beer: " A intensidade de um feixe de luz monocromático decresce exponencialmente à medida que a concentração da substância absorvente aumenta aritmeticamente ". [8]

Seja  $P_{in}$  a potência de entrada na fibra.  $P_{out}$  a potência de saída é calculada da seguinte forma:

$$P_{out} = P_{in}e^{-\alpha L} \quad (3.5)$$

Expressando a equação acima em dB/km temos que:

$$\alpha \left( \frac{dB}{km} \right) = -\frac{10}{L} \log_{10} \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (3.6)$$

Ou seja, existe uma queda exponencial à medida que o comprimento L aumenta.

#### 3.7.2 Janela de atuação de uma fibra óptica

Dadas as características de atenuação numa fibra óptica e da dependência da frequência de luz utilizada, existem 3 janelas de comprimento de onda que viabilizam o enlace de comunicação óptica. Essa janela se dá devido a perda (dB/km) em virtude do comprimento de onda utilizado.

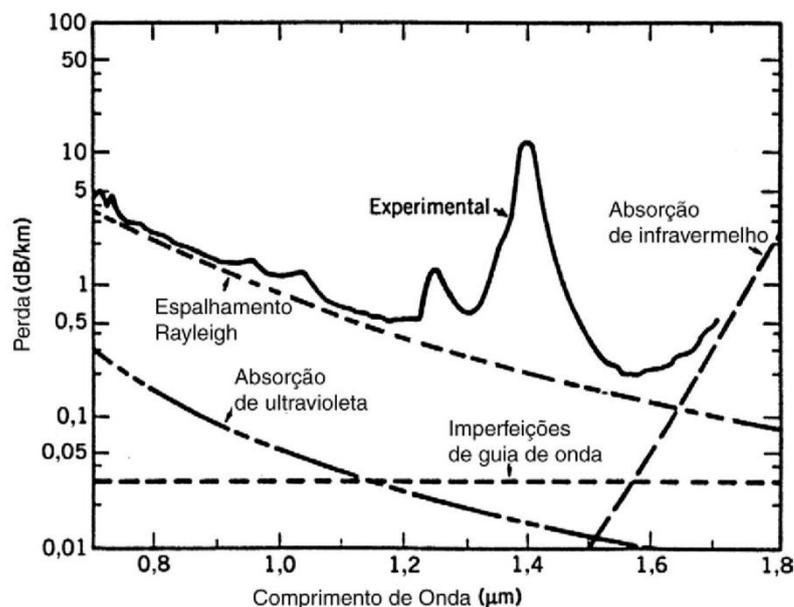


Figura 13 - Perda de uma fibra monomodo em relação ao comprimento de onda

Conforme podemos observar na figura acima o comprimento de onda que minimiza a perda é o de 1550nm porém outras faixas de comprimento são utilizadas para a transmissão de sinal. Sendo eles:

	Largura das Janelas de Transmissão	Comprimentos de Onda de Operação
Primeira Janela	800 nm – 900 nm	850 nm
Segunda Janela	1,260 nm – 1,360 nm	1,310 nm
Terceira Janela	1,500 nm – 1,600 nm	1,550 nm

Tabela 2 - Largura das Janelas de Transmissão e Comprimentos de Onda de Operação da Fibra Óptica

Além das perdas devido ao que foi observado por Beer, existem outros fenômenos que geram perdas nas fibras, como por exemplo, as perdas nos conectores, espalhamento de Rayleigh, imperfeições no guia de onda e a própria absorção da luz pela fibra. Todas essas perdas têm que ser bem dimensionadas, pois caso isso não ocorra elas podem inviabilizar a transmissão de informação.

### 3.7.3 Absorção do material

O material utilizado na fabricação da fibra óptica, não é 100% transparente e por esse motivo a fibra absorve parte da luz a medida em que ela está sendo propagada (absorção intrínseca). Essa absorção se dá, pois, a sílica, assim como qualquer outro material, absorve energia em determinados comprimentos de onda que corresponde a ressonâncias associadas as moléculas. Na sílica por exemplo isso ocorre para comprimentos menores que 400nm e maiores que 700nm.

Outro tipo de absorção existente é a extrínseca que se dá devido a variações de densidade da fibra, imperfeições no momento da fabricação e impurezas que podem surgir no material. A quantidade de impurezas e a contaminação com materiais metálicos podem gerar uma perda da ordem de 1dB/km.

Íon presente no vidro	Comprimento de onda de máxima absorção (nm)	Concentração em ppm para atenuação de 1dB/km em 800nm
Fe <sup>2+</sup>	1.100	0,0025
Fe <sup>3+</sup>	300	10
Cr <sup>3+</sup>	625	0,0016
Cr <sup>2+</sup>	685	0,0001
Cu <sup>+</sup>	200	1
Cu <sup>2+</sup>	800	0,0008

Tabela 3 - Absorção para diferentes tipos de íons

A maior fonte de absorção extrínseca numa fibra se dá devido aos íons OH<sup>-</sup> causada pelo vapor da água. Essa hidroxila entra em ressonância em combinação com a sílica em comprimentos de onda de 1390nm, 1240nm, 950nm. Se esse tipo de absorção não for controlado, a fibra em 1390nm pode ter perda de 50dB/km. Porém, utilizando um novo tipo de fibra seca (dry fiber) as perdas associadas ao OH<sup>-</sup> em 1390nm caíram drasticamente.[9]

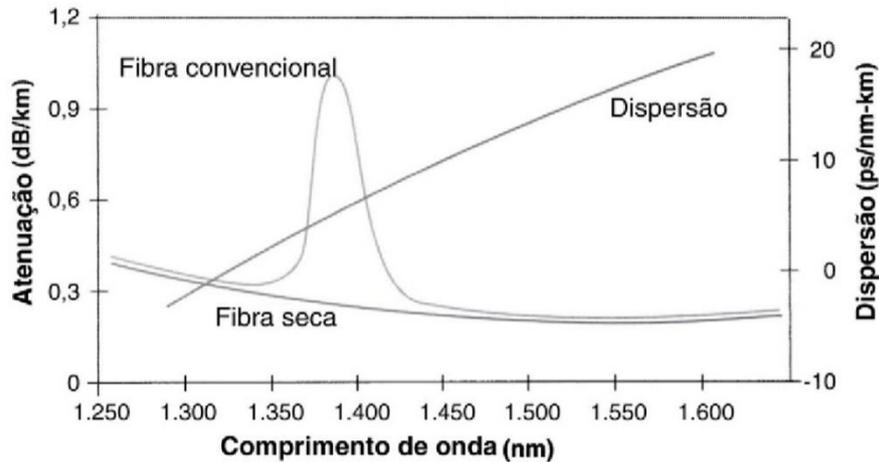


Figura 14 - Perda de dispersão fibra seca e convencional

### 3.7.4 Espalhamento de Rayleigh

O espalhamento de Rayleigh é a dispersão de qualquer radiação eletromagnética por partículas muito menores que o comprimento de onda, sendo chamado de espalhamento elástico. Quando a luz se propaga em um meio, parte da sua energia é espalhada, fazendo com que se desvaneça. Esse espalhamento ocorre devido a flutuações do índice de refração do meio causado por impurezas do meio e ainda por sua estrutura molecular. Assim, um pulso luminoso ao se propagar pela sílica, de natureza amorfa, vai sendo espalhado conforme progride no meio em questão. Esse fenômeno é chamado espalhamento de Rayleigh e possui natureza linear, pois parte da luz espalhada não perde energia, apenas muda de direção em relação ao sinal inicial. Em outras palavras, os fótons sofrem colisões elásticas com as moléculas do meio.

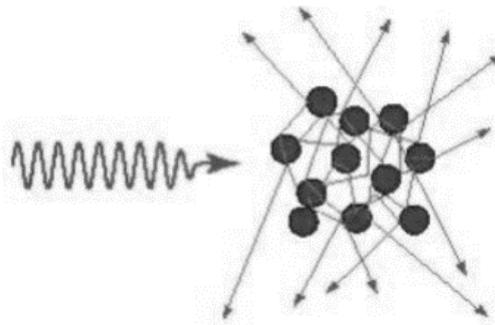


Figura 15 - Espalhamento de Rayleigh

Esse espalhamento é calculado da seguinte forma:

$$\alpha_R = \frac{C}{\lambda^4} \quad (3.7)$$

Onde C é uma constante que varia num intervalo de 0,7-0,9(dB/km)- $\mu m^4$  dependendo do matéria do núcleo da fibra.

### 3.7.5 Outras perdas

Além das perdas já citadas, existem outras associadas a utilização de fibras ópticas. As perdas por deformações mecânicas sendo ela macro ou microcurvaturas. Além de outras perdas como:

- Perdas causada pelos conectores;

- Atenuação dada a diferença de diâmetros das fibras;
- Desalinhamento das fibras ópticas;
- Atenuação por rugosidade nas extremidades;

A figura abaixo resume os tipos de perdas associados a uma fibra.

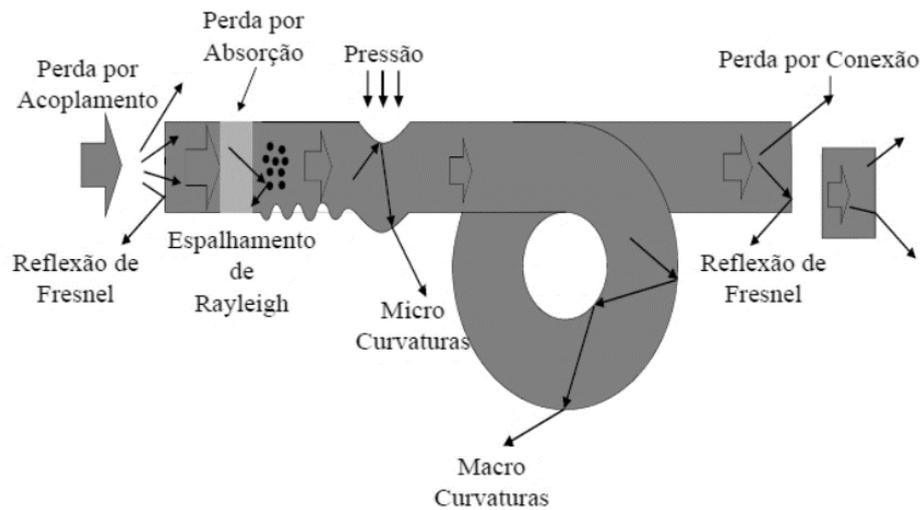


Figura 16 - Perdas em uma fibra óptica

## 4 - Efeito não lineares

### 4.1 Efeitos não lineares

Quando campos eletromagnéticos intensos incidem sobre um dielétrico sua resposta se comporta de maneira não linear, seja em fibra óptica ou em outros materiais. O espalhamento Rayleigh é a dispersão de qualquer radiação eletromagnética por partículas muito menores que o comprimento de onda, sendo chamado também de espalhamento elástico. Por outro lado, existem frequências de espalhamento que sofrem um deslocamento em relação a frequência central, esses espalhamentos são conhecidos como inelásticos e são essas as características do Brillouin e do Raman [10]. O espalhamento de Brillouin refere-se à interação da luz com fônons acústicos e o espalhamento de Raman se refere a fônons ópticos.

### 4.2 Espalhamento Estimulado de Brillouin (SBS)

O espalhamento de Brillouin trata-se de um processo não-linear que surge quando a potência óptica é suficiente para produzir pequenas vibrações acústicas na fibra, que por sua vez variam a densidade do material e, conseqüentemente, seu índice de refração ( $n$ ). O espalhamento para um campo oscilatório numa frequência de bombeio  $\omega_p$  gera uma onda acústica em uma frequência  $\Omega$ . Como a energia deve ser conservada esse gera um deslocamento de Stokes definido por:

$$\Omega = \omega_p - \omega_s \quad (4.1)$$

Onde  $\Omega$  é a frequência do fônon acústico criado,  $\omega_p$  a frequência da onda de excitação e  $\omega_s$  a frequência da onda espalhada.

Já para a conservação do momento os vetores de onda  $K_a = K_p - K_s$  sabendo que  $K_a = \Omega/v_a$  onde  $v_a$  é a velocidade acústica. Com isso podemos definir:

$$\Omega = |K_a|v_a = 2v_a|K_p| \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (4.2)$$

O ângulo do argumento da equação acima é definido pelo ângulo entre as ondas de bombeio e espalhada. Quando  $\theta=0$  o espalhamento não ocorre e quando esse vale  $180^\circ$  ocorre retroespalhamento. Como o espalhamento pode ocorrer em uma direção inversa a propagação da onda, com um deslocamento na frequência de  $\Omega_b = 2v_a|K_p|$ . Usando  $K_p=2\pi/\lambda_p$  e sendo  $\lambda_p$  comprimento da onda de bombeio temos que o deslocamento de Brillouin é dado por:

$$v_b = \frac{\Omega_b}{2\pi} = \frac{2nv_a}{\lambda_p} \quad (4.3)$$

Onde  $n$  é o índice moda. Para uma fibra de sílica temos valores típicos de  $v_a = 5,96\text{km/s}$   $n=1,45$  temos que  $v_b = 11,1\text{GHz}$   $\lambda_p = 1,55\ \mu\text{m}$ . Ou seja, o espalhamento se mostra evidenciado numa frequência 11,1Gh. O efeito de Brillouin pode ser considerado como uma atenuação, pois como ele se propaga em uma direção inversa a da onda de luz ele rouba a potência da luz do laser atenuando o sinal.

A onda espalhada gerada pode ser amplificada à medida que outras ondas acústicas vão sendo geradas na propagação. Esse fenômeno aumenta a amplitude da onda espalhada e gera uma malha de realimentação positiva. Uma medida importante que pode ser analisada é o ganho de Brillouin que varia conforme a frequência e o tempo de vida da onda acústica gerada. Esse ganho é dado por:

$$g_b(\Omega) = \frac{g_b(\Omega_b)}{1 + (\Omega - \Omega_b)^2 T_b^2} \quad (4.4)$$

Onde o  $T_b$  é dado pelo tempo de amortecimento das ondas acústicas criadas. Simplificando o efeito de Brillouin pode ser resumido através da figura abaixo:

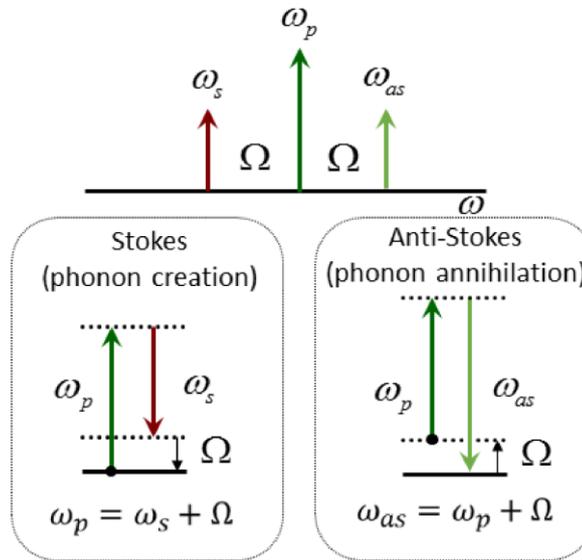


Figura 17 - Representação do Espalhamento de Brillouin

O valor de pico do ganho Brillouin ocorre para  $\Omega = \Omega_b$ . A potência de limiar  $P_{th} = I_p A_{eff}$ , sendo  $A_{eff}$  a área modal efetiva e  $I_p$  intensidade do campo de bombeio, satisfaz a seguinte condição:

$$\frac{g_b L_{eff} P_{th}}{A_{eff}} \approx 21 \quad (4.5)$$

Sendo  $L_{eff}$  comprimento efetivo de interação, definido como:

$$L_{eff} = \frac{1 - e^{-\alpha L}}{\alpha} \quad (4.6)$$

Onde o parâmetro  $\alpha$  representa as perdas na fibra e  $L_{eff}$  tende a por  $1/\alpha$ . Usando  $A_{eff} = \pi w^2$ , sendo  $w$  o raio de feixe,  $P_{th}$  pode ser tão baixa quanto 1 mW. Uma vez que a potência lançada em uma fibra óptica exceda o nível de limiar, a maior parte da luz será refletida pelo espalhamento de Brillouin.

### 4.3 Espalhamento Estimulado de Raman (SRS)

Segundo este efeito, quando um material for submetido a um feixe óptico, uma pequena porção da luz espalhada apresenta frequências diferentes daquela da onda incidente. O efeito ocorre quando um fóton incidente colidir com moléculas do meio (geralmente sílica) e interagir com seus elétrons.

Em outras palavras, ocorre, quando radiações luminosas interagem com as vibrações dos átomos dos elementos constituintes da fibra óptica. Esses átomos absorvem as radiações luminosas e, rapidamente, as reemitem na forma de fótons. A energia vibracional dos referidos átomos, dependendo

do caso, propicia um aumento ou, inflige uma diminuição dos níveis de energia que estes fótons originalmente possuíam.

O efeito Raman aparece nas fibras ópticas por diferentes modos de vibração do meio, observados na sílica fundida e em outros elementos utilizados como dopantes. Vale ressaltar que no espalhamento de Raman não existe uma onda acústica envolvida, esse espalhamento ocorre em todas as direções.

O deslocamento de Raman é calculado por:

$$\Omega_r = \omega_p - \omega_s \quad (4.7)$$

O limiar de potência  $P_{th}$  definido como o valor da potência incidente para o qual a metade da potência da bomba é transferida para o campo de Stokes na saída da fibra de comprimento  $L$ . Esse é calculado da seguinte forma:

$$\frac{g_r L_{eff} P_{th}}{A_{eff}} \approx 16 \quad (4.8)$$

Onde  $g_r$  é o ganho de Raman e os outros parâmetros já foram aqui definidos. Assumindo as mesmas condições de área efetiva chegamos que a potência limiar pode ser calculada por:

$$P_{th} = \frac{16\alpha(\pi w^2)}{g_r} \quad (4.9)$$

A largura espectral do ganho de Raman é muito elevada (aproximadamente 125nm), permitindo construir amplificadores ópticos com grande largura de banda. O ganho máximo ocorre em 13 THz.

## 5 - Montagem experimental

### 5.1 Medição do efeito de Brillouin

A primeira parte do experimento consiste na montagem do link óptico exposto na figura 4, nele identificamos um LASER ILX com comprimento de onda central de 1565 nm, um EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier), um VOA (Variable Optical Attenuator), um Splitter 90/10, uma fibra DS de 18.7 km, e dois Power Meter.

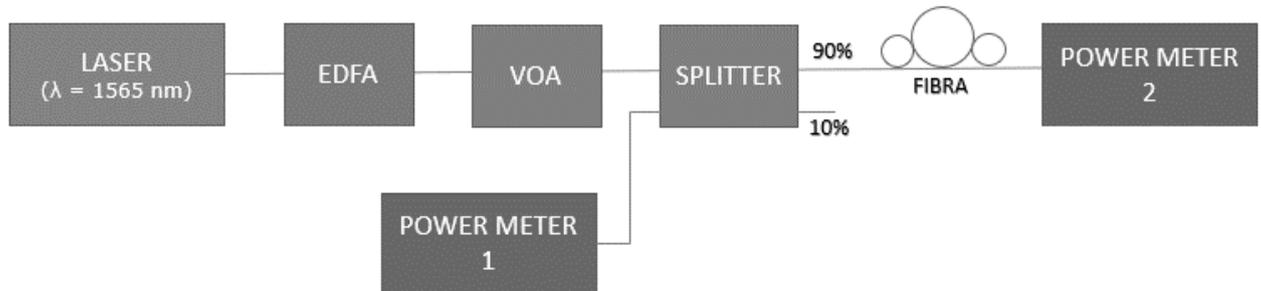


Figura 18- Setup do Experimento 1 para medir o espalhamento de Brillouin em uma fibra DS

Foi utilizado um LASER ajustado no comprimento de onda de 1565nm. A partir disso, a saída do LASER foi conectada a um EDFA cujo LASER interno possui comprimento de onda de 980nm. O EDFA é um típico amplificador utilizado em links ópticos, seu núcleo é uma fibra óptica dopada com Erbium, essa fibra normalmente é monomodo. A ideia principal de um EDFA está na emissão de um feixe de alta potência que excita os íons de Erbium ao seu estado de maior energia.

Quando os fótons pertencentes a uma radiação de diferente comprimento de onda colidem com esses átomos excitados, os íons de Erbium perdem parte de sua energia e retornam ao estado inicial, essa energia liberada pelo Erbium está na forma de fótons e possui a característica de estar exatamente na mesma direção e fase do sinal original, criando assim a amplificação do sinal [12].

É válido ressaltar que o dispositivo possui um limiar de recepção, no caso está em torno de 10 dBm, logo para a radiação ser amplificada tem que ter essa relação satisfeita. A saída o EDFA foi conectado a um atenuador variável (VOA).

Os VOAs são componentes ópticos ativos utilizados no controle da potência que se propaga num enlace de fibra óptica. O mecanismo utilizado nos VOAs comerciais é geralmente de natureza mecânica (com partes móveis): filtro neutro com densidade óptica gradual controlado por motor-de-passo de forma que o feixe de luz colimado a partir da fibra óptica atravessasse o filtro, indução de algum tipo de desalinhamento geométrico entre as duas extremidades da fibra óptica. Após o VOA, utilizamos um Beam Splitter 90/10.

Na entrada 1 do Beam Splitter foi conectado a saída do VOA e na entrada 2 conectamos o Power Meter 1 para medir a potência retro espalhada. Na Saída 1 do Beam Splitter foi conectada uma fibra DS (Dispersion Shifted) de 18.7km, e através dessa conectorização observaremos no Power Meter 2 a potência de saída.

Com isso, ajustamos o VOA manualmente para permitir a transmissão máxima de potência (17.3dBm) e começamos a atenuar o sinal em uma unidade e foi registrado a potência de saída na fibra e a potência retro espalhada. Os valores foram registrados e plotados no MATLAB gerando o gráfico abaixo:

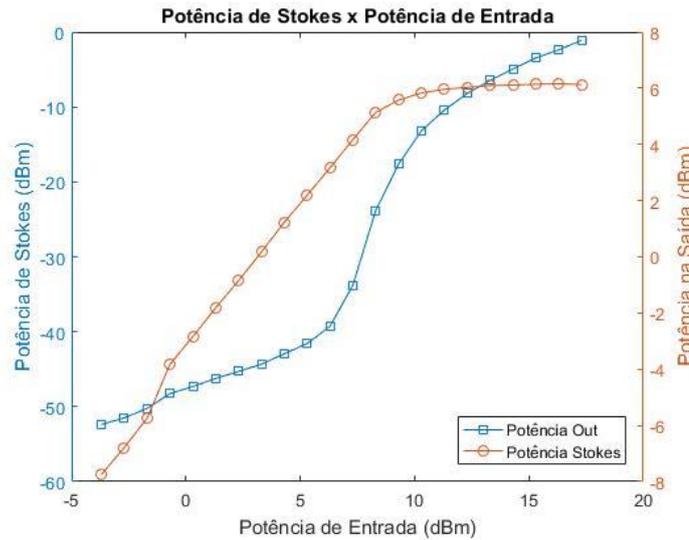


Figura 19-Potência Retroespalhada - Potência de Saída na fibra em função da potência de entrada.

O nível de potência óptica incidente necessária para iniciar o processo de difusão estimulada de Brillouin é dado pela seguinte expressão:

$$P_{th} \sim \chi_B \frac{A_{eff} \alpha}{g_0} \quad (5.1)$$

Os coeficiente  $\chi_B$  varia de 19 a 21, dependendo das características da fibra;  $g_0$  é o ganho de Brillouin que assume um valor próximo de  $5 \cdot 10^{11}$  m/W em fibras de sílica;  $\alpha$  é a atenuação na fibra; e  $A_{eff}$  é a área efetiva da fibra óptica.

A potência transmitida sofre uma saturação quando o processo de espalhamento é estimulado. A potência incidente acima da qual a potência transmitida está no regime saturado (como indicado na figura) é o limiar de Brillouin.

Quando a potência transmitida numa fibra excede o limiar de Brillouin, uma parte significativa dela é convertida na radiação de Stokes e passa a propagar-se no sentido contrário.

Como podemos observar pelo gráfico plotado acima, gerado a partir de dados extraídos do experimento 1, podemos observar que o limiar de Brillouin é de aproximadamente 7,7 dBm, ou seja, 5,89 mW.

Substituindo os valores na equação (5.1) para comparar o valor de potência para o qual ocorre espalhamento Brillouin e utilizando uma área efetiva de acordo com as características de performance para uma fibra DS da Corning, temos:

$$P_{th} \sim \frac{21(72 \cdot 10^{-12})(0,2 \cdot 10^{-3})}{5 \cdot 10^{-11}} = 6.05 \text{ mW}$$

Assim, vemos que os valores de potência estão próximos entre o valor calculado teoricamente e o valor obtido a partir da figura 18.

## 5.2 Detecção do espalhamento de Rayleigh e Brillouin-Stokes

Na Segunda parte do experimento, conectamos a saída do Power Meter 1 e a saída da fibra no OSA, para analisar o efeito de Brillouin através de diferentes medidas, atenuando o sinal no VOA.

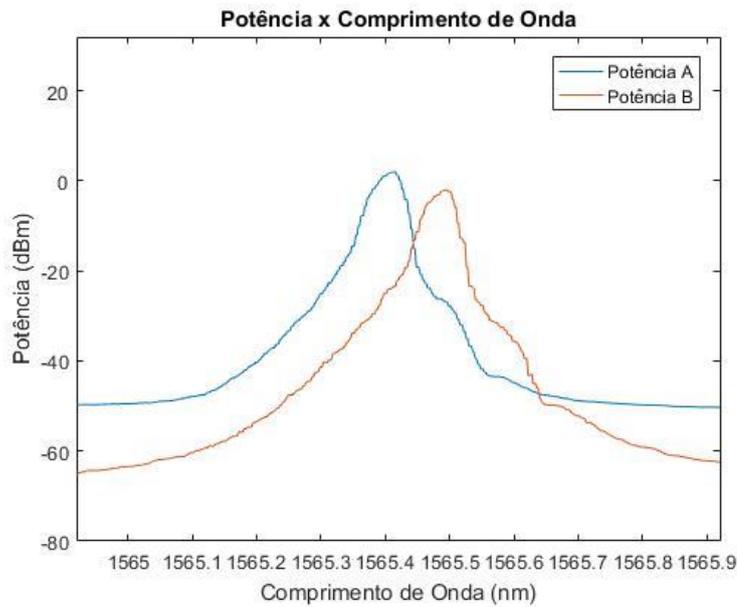


Figura 20-Potência de Stokes e Potência de Saída para  $P_{in}=17.3\text{dBm}$

A curva azul apresenta apenas um pico central no comprimento de onda do LASER incidente. O primeiro pico vermelho refere-se ao espalhamento de Rayleigh, já o surgimento do segundo pico é caracterizado como o pico de espalhamento Brillouin- Stokes, deslocado de aproximadamente 11 GHz para comprimentos de onda maiores.

Ao aumentarmos a potência incidente, um segundo pico deslocado para comprimentos de onda maiores aparece e cresce com o aumento da potência.

O deslocamento de 11GHz tem uma dependência da composição da fibra óptica, podendo esse sofrer variações não somente pelo material utilizado para fabricação, assim como o comprimento e o diâmetro da fibra.

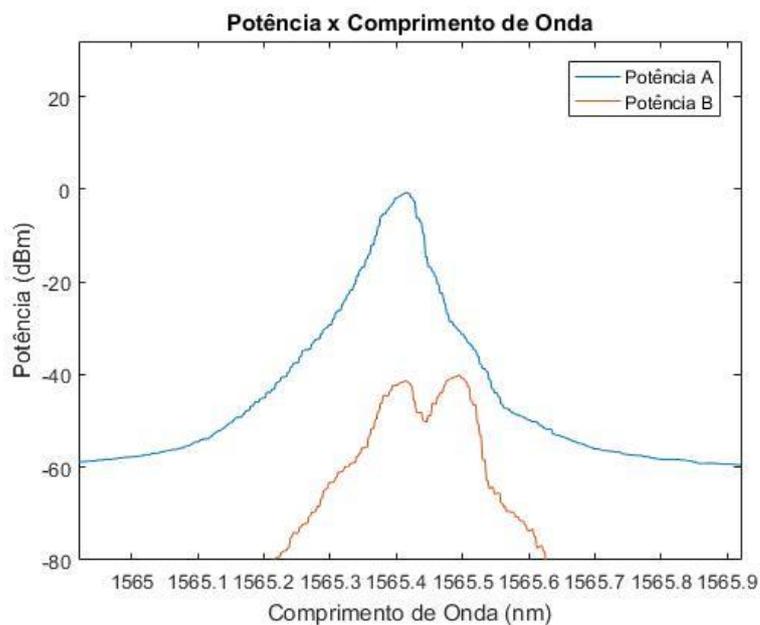


Figura 21-Potência de Stokes e Potência de Saída para  $P_{in}=7.0\text{dBm}$

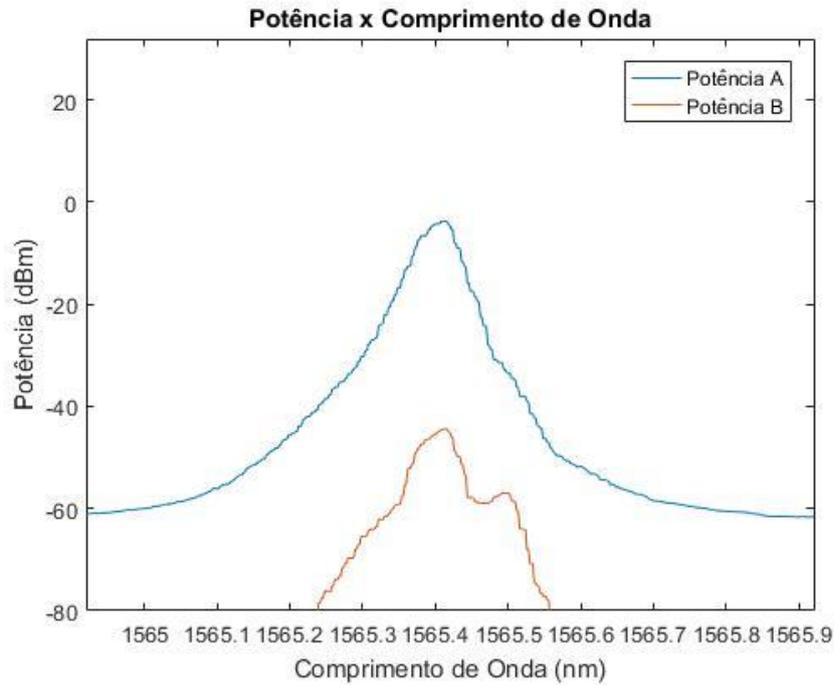


Figura 22-Potência de Stokes e Potência de Saída para Pin=4dBm

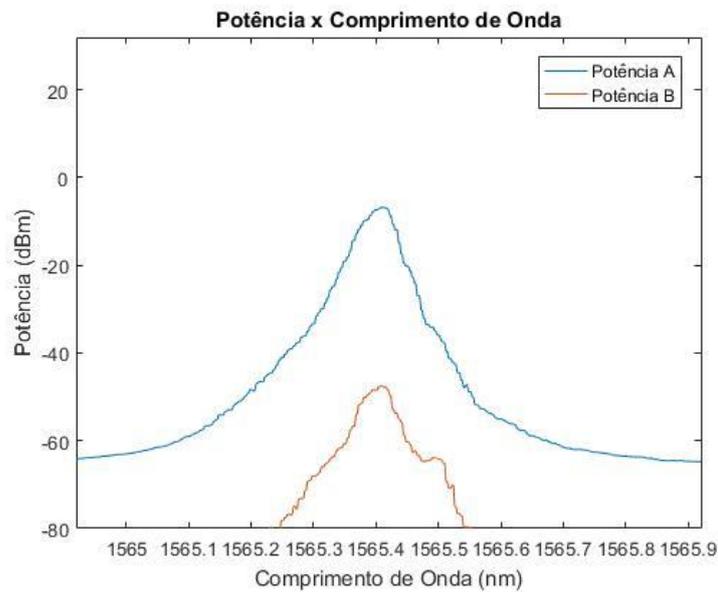


Figura 23-Potência de Stokes e Potência de Saída para Pin=1dBm

A partir dos gráficos plotados acima, calcularemos o deslocamento para o efeito Brillouin. A distância entre picos foi de 0.1nm entre os comprimentos de onda de 1565.4nm e 1565.5nm. Assim:

$$f = \frac{c(\lambda_2 - \lambda_1)}{(\lambda_2\lambda_1)} = 10.77GHz$$

Podemos concluir então que o resultado foi bem próximo ao esperado, o erro pode ser devido à imprecisão da leitura correta do comprimento de onda através do gráfico obtido pelo Matlab.

### 5.3 Misturador de quatro ondas (FWM)

A mistura de quatro ondas, ou FWM, significa que dois sinais, em um meio não-linear, podem produzir frequências que não existiam antes no meio, os chamados produtos de intermodulação.

O processo de FWM pode ser entendido como o espalhamento de dois fótons de energia  $h\nu_1$  e  $h\nu_2$ , que são destruídos e suas energias criam outros dois fótons de energias  $h\nu_3$  e  $h\nu_4$  tais que o momento e a energia se conservem. Como se trata de um fenômeno coerente, há a necessidade de que os sinais possuam casamento de fase e polarização controlada.

A amplitude das ondas geradas é proporcional ao produto das amplitudes das ondas de entrada, enquanto a fase e a frequência das ondas resultantes são combinações lineares das fases e frequências de entrada.

Quando portadoras ópticas de alta potência (maior que 10 dBm) são lançadas em fibras DS longas (acima de 15 km) surgem os produtos de intermodulação pelo processo FWM.

Como o valor da dispersão da fibra DS é reduzido em relação à fibra convencional, pode-se tirar proveito do baixo coeficiente de atenuação na região de 1550nm.

Parte dos efeitos não lineares que ocorrem no meio óptico tem sua origem na dependência do índice de refração do meio com a intensidade do campo elétrico que compõe o sinal óptico, conhecido como Efeito Kerr. No FWM, os efeitos não lineares ocorrem quando dois ou mais sinais de frequências diferentes se propagam juntos e interagem com um meio dielétrico não linear. A fibra, como já falado aqui, transforma-se em um meio não linear sob sinais mais intensos. Com isso, ocorrerá a geração de um conjunto de novas frequências co-propagantes dentro de um espectro de operação. Através do setup abaixo iremos identificar tais fenômenos:

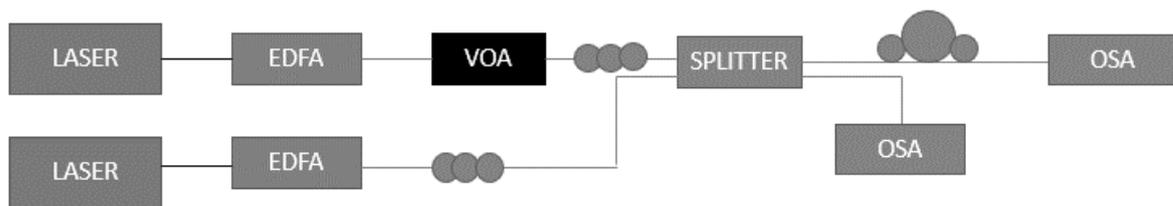


Figura 24- Setup do experimento 2.

Foram utilizados dois LASERs com comprimento de onda de 1554nm e 1555nm aproximadamente. A fibra utilizada foi a mesma do experimento anterior. A amplitude do campo dos dois lasers com frequências  $\omega_1$  e  $\omega_2$  é dada por:

$$A_{int} = A_0 [e^{-j\omega_1 t} + e^{-j\omega_2 t}] \quad (5.2)$$

A potência óptica do sinal de entrada na fibra é dado por:

$$P(t) = |A_{int}|^2 \quad (5.3)$$

Já a potência de saída na fibra é dada por:

$$P(t_{out}) = 2A_0 e^{-\frac{\alpha L}{2}} \cos(\omega_0 t) \cos(\Delta\omega) \exp(j\Delta\varphi_{NL}, \max \cos^2(\Delta\omega t)) \quad (5.4)$$

Onde  $\omega_0 = (\omega_1 + \omega_2)/2$  e é a média de frequência dos dois lasers,  $\Delta\varphi_{NL}$  é magnitude da fase não linear e  $\alpha$  é o coeficiente de atenuação na fibra.

Analisando a saída do OSA conseguimos visualizar o espectro FWM foi obtido o seguinte resultado:

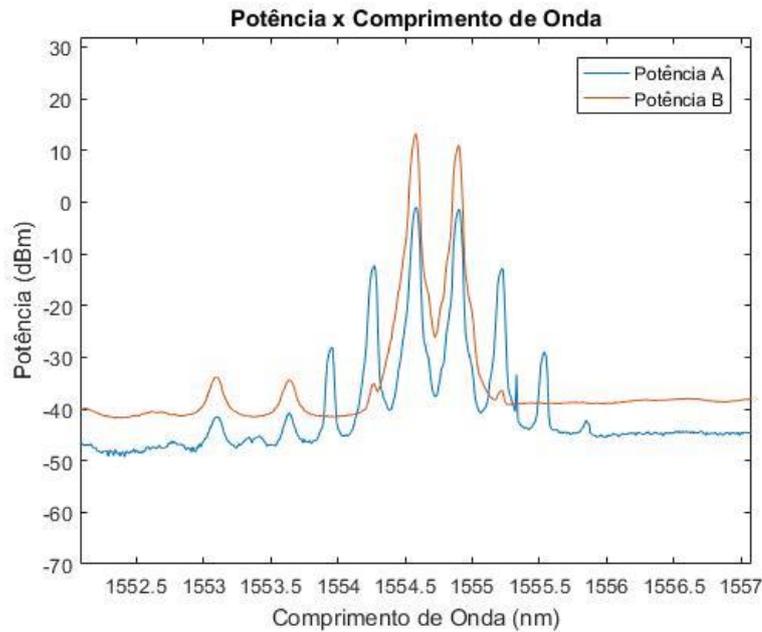


Figura 25-Espectro FWM

A curva vermelha apresenta os picos centrais dos LASERs utilizados. Já a curva azul mostra os picos de componente FWM. Cabe ressaltar que a polarização no meio óptico também assume componentes não lineares sendo importante controlar a polarização para maximizar os picos de potência FWM.

Para verificar, efetivamente, se na saída da fibra a potência FWM é não linear, setamos o VOA para que a potência de saída seja 3.95dBm e partir de então, atenuamos o sinal e analisamos o que ocorre com a potência de todos os picos da curva azul do gráfico acima. Com isso, foi obtido o seguinte gráfico:

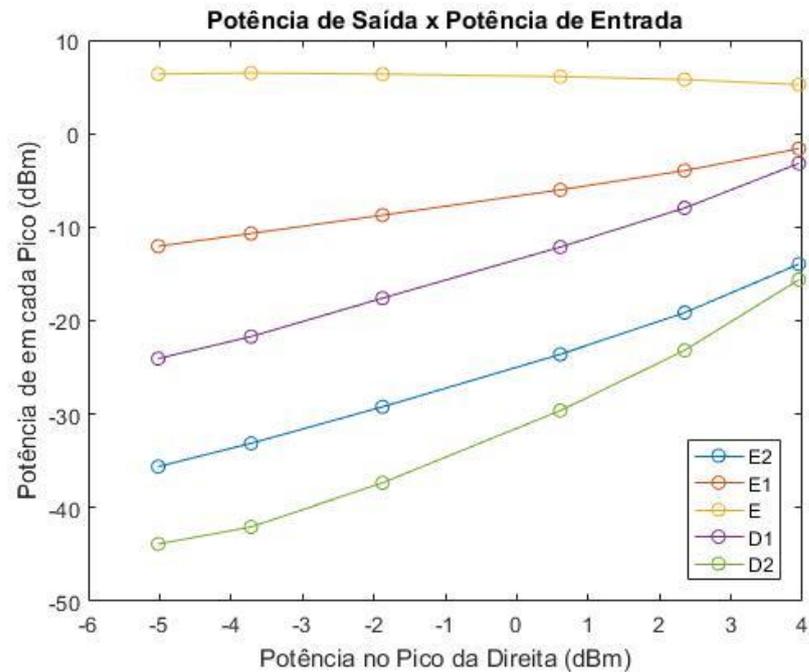


Figura 26- Potência no pico da direita para a fibra DS 15.7km

Primeiro analisamos para a fibra DS que possui zero dispersão, com um comprimento de 15.7Km. Pelo gráfico acima, percebe-se que a curva E permanece constante, conforme era esperado pois essa representa o pico original do LASER utilizado que não foi atenuado. A curva E1 tem comportamento linear com inclinação aproximada de 1.1433. As curvas E2 e D2, que correspondem aos picos de FWM, tem comportamento não linear, conforme facilmente visto pelo gráfico. Também é possível identificar que a curva D2 é a que possui maior configuração não-linear (podendo ser aproximada por uma curva do tipo  $e \cdot \alpha^3$ ). Temos que o coeficiente de inclinação em relação ao maior pico para cada umas das curvas é:

$$E2: \beta = 2.74$$

$$E1: \beta = 1.143$$

$$E: \beta = -0.08$$

$$D1: \beta = 2.3040$$

$$D2: \beta = 3.143$$

Agora fazendo o mesmo para a fibra Standard de 12.6km obtivemos o que segue:

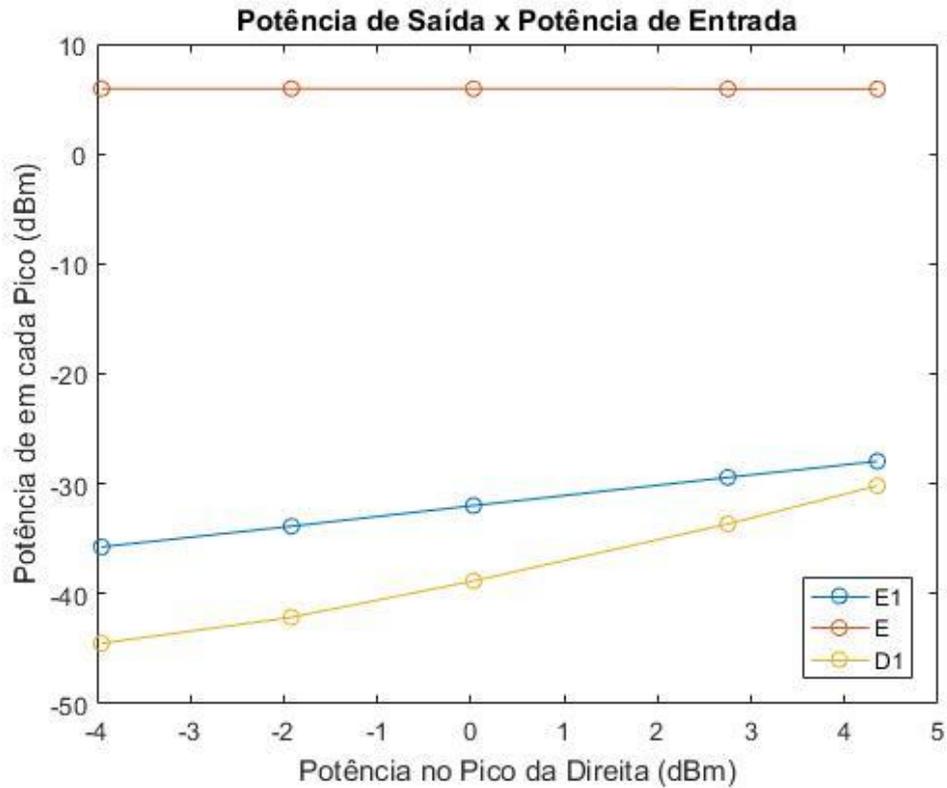


Figura 27-Potência no pico da direita para a fibra Standard 12.6km

Para a fibra Standard, vemos que pelo gráfico abaixo que as curvas não exibem o mesmo comportamento não-linear quando comparada à fibra DS. Também é possível notar um menor número de modos propagantes. A curva E assumiu um comportamento constante como era previsto, enquanto E1 e D1 possuem coeficientes de inclinação de:

$$E: \beta = -0.0375$$

$$D1: \beta = 1.74$$

$$E1: \beta = 0.94$$

Com isso, conseguimos evidenciar o surgimento do efeito não linear.

## 6 - Conclusão

Verificamos e discutimos ao longo do trabalho alguns dos efeitos não lineares presentes na propagação do campo ao longo de uma fibra óptica. Podemos destacar o efeito da mistura de quatro ondas e o espalhamento Brillouin estimulado. Estes fenômenos são muito presentes em sistemas DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) por serem enlaces de longa distância e utilizam feixes de alta potência para transmissão. Quanto maior for a distribuição da compensação da dispersão, mais eficiente será o controle dos efeitos não lineares.

Foi levantado alguns fenômenos que conduzem degradações dos sinais transmitidos em sistemas de comunicações por fibras ópticas. Vários desses são originadas na interação do feixe óptico incidente com as propriedades do meio de propagação. Isto ocorre quando a potência do feixe óptico ultrapassar determinado valor capaz de alterar essas propriedades de uma forma não-linear. O espalhamento de Brillouin limita a potência luminosa que pode trafegar em uma fibra numa mesma direção, pois, à medida que a potência óptica aumenta, aumenta a atenuação, de forma a saturar a fibra.

Na mistura de quatro ondas, os efeitos não-lineares no índice de refração levam à formação de novos comprimentos de onda ópticos, alguns dos quais se situam na faixa de valores de transmissão da fibra.

Não obstante foi feito um resumo sobre a propagação de ondas eletromagnéticas em fibras ópticas e levantado alguns dos parâmetros mais importantes quando se deseja desenvolver um sistema de comunicação óptica.

## 7 - Referências

- [1] G. P. Agrawal, "Fiber-Optic Communication Systems", Second Edition, Impresso em New York (1997) por John Wiley & Sons, Inc.
- [2] Bergano, N.S, "Electron. Lett.,v.27,p.1889,1991.
- [3] Maxwell, mechanism, and the nature of electricity. Physics in Perspective, 3, p. 425-38, 2001.
- [4] D. Cheng, "Field and wave electromagnetics", Addison-Wesley, 1989.
- [5] J. Palais, Fiber Optic Communications, 4th edition, Prentice-Hall, 1998.
- [6] J. Palais, Fiber Optic Communications, 4th edition, Prentice-Hall, 1998.
- [7] Fibras ópticas - Conceitos e Composição - [https://www.gta.ufrj.br/grad/08\\_1/wdm1/Fibraspticas-ConceitoseComposio.html](https://www.gta.ufrj.br/grad/08_1/wdm1/Fibraspticas-ConceitoseComposio.html)
- [8] Leis dos processos de absorção de radiação - [www.chemkeys.com](http://www.chemkeys.com)
- [9] Thomas,G.A, Nature, v.404,p.262,2000.
- [10] R. Ramaswami, K.Sivarajan, Optical Networks – a practical perspective, 2nd. Ed., Morgan Kaufman, San Francisco, USA, 2002.
- [11] AGRAWAL, G. P. (2001). Nonlinear Fiber Optics (3rd ed.)
- [12] G. Keiser, optical Fiber Communications. EUA: McGraw-Hill