



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DO CEARÁ
PRÓ-REITORIA DE ENSINO
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
TELECOMUNICAÇÕES**

BRANDON MENDONÇA DOS SANTOS

**BIESTABILIDADE ÓPTICA EM GRADES DE BRAGG EM FIBRAS
ÓPTICAS COM PERFIS ASSIMÉTRICOS DE NÃO LINEARIDADE**

FORTALEZA

2018

BRANDON MENDONÇA DOS SANTOS

BIESTABILIDADE ÓPTICA EM GRADES DE BRAGG
EM FIBRAS ÓPTICAS COM PERFIS ASSIMÉTRICOS
DE NÃO LINEARIDADE

Dissertação submetida à Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações do Instituto Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Telecomunicações.

Área de concentração: Microondas e Óptica Integrada.

Orientador: Prof. Dr. Glendo de Freitas Guimarães.

Fortaleza
2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Instituto Federal do Ceará - IFCE
Sistema de Bibliotecas - SIBI
Ficha catalográfica elaborada pelo SIBI/IFCE, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S237b Santos, Brandon.
BIESTABILIDADE ÓPTICA EM GRADES DE BRAGG EM FIBRAS ÓPTICAS COM PERFIS ASSIMÉTRICOS DE NÃO LINEARIDADE / Brandon Santos. - 2018.
81 f. : il. color.
- Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Ceará, Mestrado em Engenharia de Telecomunicações, Campus Fortaleza, 2018.
Orientação: Prof. Dr. Glendo de Freitas Guimarães.
Coorientação: Prof. Dr. Alisson da Conceição Ferreira.
1. Grade de Bragg em fibra. 2. Bandgap fotônico. 3. Biestabilidade óptica. 4. Fibras ópticas. 5. Portas lógicas.. I. Título.

CDD 621.382



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
TELECOMUNICAÇÕES

Brandon Mendonça dos Santos

Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Telecomunicações, sendo aprovada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará e pela banca examinadora, a seguir:

Prof. Dr. Glendo de Freitas Guimarães

Prof. Dr. Alisson da Conceição Ferreira

Prof. Dr. Juscelino Chaves Sales

Prof. Dr. José Rubens Rodrigues de Sousa

Fortaleza, 02 de Maio de 2018

Dedico este trabalho aos meus pais, que são o meu maior exemplo de vida. A minha esposa Priscila por sempre ter me apoiado no meu sonho de me tornar mestre. A minha família, amigos e professores, pelas palavras de encorajamento e incentivo durante essa árdua jornada.

Agradecimentos

Muitas foram as pessoas que colaboraram para a conclusão deste texto, de forma direta ou indireta, com contribuições técnicas, experiências compartilhadas ou até mesmo palavras de incentivo e motivação.

Primeiramente, gostaria de agradecer a minha família, mais especificamente a meu pai Gelson e a minha mãe Márcia. Vocês são o meu maior exemplo de vida, apesar das dificuldades sempre me motivaram a seguir em frente e a nunca desistir dos meus sonhos. Muito obrigado pelos ensinamentos, amor e carinho durante essa jornada.

Agradeço a minha esposa Priscila pelo apoio, companheirismo, cumplicidade e pelas palavras de encorajamento. Desde que iniciei o meu curso de graduação, você tem sido peça fundamental para o meu crescimento pessoal e profissional. Muito obrigado por estar ao meu lado em todos os momentos. Lutamos e vencemos, sempre unidos!

Gostaria de agradecer aos professores Fábio, Régis, Daniel, Alisson, Agliberto e, especialmente, ao meu orientador Glendo, que teve papel fundamental neste trabalho, sempre me direcionando e buscando obter o meu melhor. Agradeço também ao professor José Wally, por ter acreditado em meu potencial e por ter me incentivado a trilhar este caminho.

Aos amigos e colegas do mestrado, em especial, ao George Sales e Paulo Vitor, companheiros de projeto, sem os quais este trabalho não estaria completo. Juntos fizemos diversas reuniões, passando horas e horas na tentativa de resolver os desafios encontrados durante esse percurso, realizando simulações e pesquisas, dentre outras atividades.

Por fim, o meu muito obrigado aos demais familiares, amigos e colegas que, de alguma forma, me ajudaram e contribuíram para que eu pudesse finalizar este texto.

“A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo”.

Albert Einstein

Resumo

Em razão da sua relevância, a grade de Bragg em fibra óptica (FBG), filtro óptico baseado em *bandgap* fotônico, tem sido amplamente pesquisado nos últimos anos. Tendo surgido como uma opção de baixo custo, alta flexibilidade e precisão. Neste contexto, essa pesquisa, por meio de simulações através do software Matlab (versão R2014a e licença 898894), demonstra os comportamentos das curvas de biestabilidade óptica em FBG's com perfis assimétricos de não linearidade. Para isso, foi utilizado uma FBG com comprimento longitudinal de 14 cm, a qual foi dividida ao meio, sendo atribuído o valor de não linearidade (γ) para a primeira parte e $\frac{\gamma}{\sigma}$ para a segunda metade, o cenário inverso também foi estudado. O valor de (σ) foi variado de 1 a 10. Os pulsos utilizados foram na ordem de pico e femtosegundos. Na FBG composta por (γ) e $\frac{\gamma}{\sigma}$, utilizando pulso em picosegundos e $\sigma = 10$, foi encontrado os valores de $P_{up} \uparrow = 77,15 \text{ W}$ e $P_{down} \downarrow = 396,14 \text{ W}$. Já para pulsos em femtosegundos os valores verificados foram de $P_{up} \uparrow = 101,79 \text{ MW}$ e $P_{down} \downarrow = 529,00 \text{ MW}$. Quando submetidos ao perfil de não linearidade inverso, onde a primeira parte da FBG é $\frac{\gamma}{\sigma}$ e a segunda (γ), os saltos de potência obtidos em picosegundo foram $P_{up} \uparrow = 7,08 \text{ W}$ e $P_{down} \downarrow = 104,22 \text{ MW}$, e em femtosegundos $P_{up} \uparrow = 9,64 \text{ MW}$ e $P_{down} \downarrow = 140,99 \text{ MW}$. De posse desses dados, foram analisadas a variação do gap fotônico, delta de potência, que é representada pela diferença entre as potências $P_{up} \uparrow$ e $P_{down} \downarrow$, que deve ser a maior possível para aplicações de chaveamento óptico com gap fotônico seguro. Ainda neste âmbito foram apreciados a obtenção de portas lógicas e o comportamento dos pulsos refletidos. Após a análise dos resultados alcançados, tendo sido ilustrados por meio de gráficos e tabelas, conclui-se, portanto, que a mudança nos parâmetros da não linearidade da fibra, juntamente com a largura do comprimento do pulso, afetam diretamente o desempenho da FBG.

Palavras-chave: Grade de Bragg em fibra, bandgap fotônico, biestabilidade óptica, fibras ópticas, portas lógicas.

Abstract

Due to its relevance, the Bragg fiber optic grid (FBG), optical filter based on in photonic bandgap, has been extensively researched in recent years. Having emerged as a low cost option, high flexibility and precision. In this context, this research, through simulations using Matlab software (version R2014a and license 898894), demonstrates the behavior of the optical bistability curves in FBG's with asymmetric linearity. For this, a FBG with a longitudinal length of 14 cm was used, was divided in half, the nonlinearity value γ being assigned to the first part and $\frac{\gamma}{\sigma}$ for the second half, the inverse scenario was also studied. The value of σ was varied from 1 to 10. The pulses used were of the order of picoseconds and femtoseconds. In the FBG composed of γ and $\frac{\gamma}{\sigma}$, using pulse in picoseconds and $\sigma = 10$, we find the values of $P_{up} \uparrow = 77,15 \text{ W}$ and $P_{down} \downarrow = 396,14 \text{ W}$. For femtosecond pulses, the values verified were $P_{up} \uparrow = 101.79 \text{ MW}$ and $P_{down} \downarrow = 529.00 \text{ MW}$. When submitted to the inverse nonlinearity profile, where the first part of the FBG is $\frac{\gamma}{\sigma}$ and the second one γ , the power jumps obtained in picoseconds were $P_{up} \uparrow = 7,08 \text{ W}$ and $P_{down} \downarrow = 104,22 \text{ MW}$, and in femtoseconds $P_{up} \uparrow = 9,64 \text{ MW}$ and $P_{down} \downarrow = 140,99 \text{ MW}$. With this data, we analyzed the variation of the photon gap, power delta, which is represented by the difference between the $P_{up} \uparrow$ and $P_{down} \downarrow$ powers, which should be the highest possible for optical switching with photonic gap safe. In this context, the logical gates and the behavior of the reflected pulses were also appreciated. After analyzing the results achieved, having been illustrated by graphs and tables, it's therefore concluded that the change in the parameters of the non linearity of the fiber, along with the width of the pulse length, directly affect the performance of the FBG.

Keywords: Fiber bragg gratings, photonic bandgap, optical biestability, optical fiber, logic Gates.

Lista de Figuras

1	Esquema demonstrando o conceito de reflexão interna total na fibra óptica. . . .	20
2	Conceito de abertura numérica e ângulo de aceitação na face da fibra óptica. . .	22
3	Seção reta e perfil de índice de refração para fibras de índice em degrau e índice gradual.	23
4	Pulso luminoso sob influência do efeito <i>Self Steepening</i>	25
5	Ilustração dos defeitos causados pela fotossensibilidade em fibras ópticas dopadas com germânio.	30
6	Ilustração conceitual da Grade de Bragg.	35
7	Ilustração conceitual da Grade de Bragg de período Uniforme.	36
8	Exemplo de formação de lóbulos laterais em espectros de reflexão em FBG de período Uniforme.	37
9	Representação do Sinal de modulação da Grade Aperiódica Linear.	37
10	Princípio de funcionamento da Grade de Bragg não Uniforme.	38
11	Ilustração teórica das Grades de Bragg auto-induzidas usando um laser de íon com argônio.	39
12	Ilustração teórica do método Máscara de fase.	40
13	Esquema de um interferômetro por divisão de amplitude para a gravação de redes de Bragg.	42
14	Representação do método de gravação de redes de Bragg por interferômetro com máscara de fase.	42
15	Ilustração teórica do método Ponto a Ponto.	43
16	Gráfico de ilustração da Biestabilidade óptica.	48
17	Gráfico de biestabilidade óptica com diferentes valores de <i>detuning</i>	49

18	Gráfico de ilustração da Biestabilidade óptica para uma FBG com coeficiente de não linearidade $\gamma = 1.2 \text{ W}^{-1} \text{ Km}^{-1}$	50
19	Grade aperiódica de Bragg composta pela primeira metade por um período γ e a segunda metade por $\frac{\gamma}{\sigma}$	52
20	Grade aperiódica de Bragg composta pela primeira metade por um período $\frac{\gamma}{\sigma}$ e a segunda metade por γ	52
21	Estrutura lógica para obtenção das portas <i>And</i> e <i>Or</i>	53
22	Curvas da Biestabilidade óptica para o primeiro modelo de FBG, apresentada na Figura 19.	55
23	Curva delta de potência obtida em FBG com perfil assimétrico de não linearidade, sendo composta pela primeira metade por um período γ e a segunda metade por $\frac{\gamma}{\sigma}$	56
24	Curvas de Biestabilidade óptica para o segundo modelo de FBG, apresentado na Figura 20.	58
25	Imagem aproximada da segunda curva de biestabilidade apresentada na Figura 24.	59
26	Curva delta de potência obtida na primeira curva da biestabilidade gerada em uma FBG com perfil assimétrico de não linearidade, sendo composta pela primeira metade por $\frac{\gamma}{\sigma}$ e a segunda metade por γ	60
27	Curva delta de potência obtida na segunda curva da biestabilidade gerada em uma FBG com perfil assimétrico de não linearidade, sendo composta pela primeira metade por $\frac{\gamma}{\sigma}$ e a segunda metade por γ	61
28	Curvas da Biestabilidade óptica com largura de pulso na ordem de femtosegundos para o primeiro modelo de FBG apresentado na figura 19. . . .	64
29	Curva delta de potência obtida na segunda curva da biestabilidade gerada em uma FBG com perfil assimétrico de não linearidade, sendo composta pela primeira metade por $\frac{\gamma}{\sigma}$ e a segunda metade por γ	66
30	Curvas da Biestabilidade óptica com largura de pulso na ordem de femtosegundos para o segundo modelo de FBG apresentado na figura 20. . . .	67

- 31 Refletividade do pulso para FBG composta pelo perfil de não linearidade na sua primeira metade por γ e a segunda parte por $\frac{\gamma}{\sigma}$, submetida a uma potência de 396 W e $\sigma = 10$. (A) Pulso em picosegundos e (B) Pulso em Femtossegundos. 69
- 32 Refletividade do pulso para FBG composta pelo perfil de não linearidade na sua primeira metade por γ e a segunda parte por $\frac{\gamma}{\sigma}$, submetida a uma potência de 0,4 MW e $\sigma = 10$. (A) Pulso em picosegundos e (B) Pulso em Femtossegundos. 69
- 33 Refletividade do pulso para FBG composta pelo perfil de não linearidade na sua primeira metade por $\frac{\gamma}{\sigma}$ e a segunda parte por γ , submetida a uma potência de 104 W e $\sigma = 10$. (A) Pulso em picosegundos e (B) Pulso em femtossegundos. 70
- 34 Refletividade do pulso para FBG composta pelo perfil de não linearidade na sua primeira metade por $\frac{\gamma}{\sigma}$ e a segunda parte por γ , submetida a uma potência de 300 W e $\sigma = 10$. (A) Pulso em picosegundos e (B) Pulso em femtossegundos. 70
- 35 Refletividade do pulso para FBG composta pelo perfil de não linearidade na sua primeira metade por $\frac{\gamma}{\sigma}$ e a segunda parte por γ , submetida a uma potência de 2 kW e $\sigma = 10$. (A) Pulso em picosegundos e (B) Pulso em femtossegundos. . . 71

Lista de Tabelas

- 1 Valores de $P_{up}\uparrow$ e $P_{down}\downarrow$ para FBG com perfil assimétrico de não linearidade, sendo composta pela primeira metade por γ e a segunda metade por $\frac{\gamma}{\sigma}$ 55
- 2 Valores de $P_{up}\uparrow$ e $P_{down}\downarrow$ para FBG com perfil assimétrico de não linearidade, sendo composta pela primeira metade por γ e a segunda metade por $\frac{\gamma}{\sigma}$, tendo como referencial o eixo $P_{IN}(W)$ 57
- 3 Valores de $P_{up}\uparrow$ e $P_{down}\downarrow$ para FBG assimétrica composta pela primeira parte por um perfil de não linearidade $\frac{\gamma}{\sigma}$ e a segunda metade por γ , tendo como referência o eixo $P_{OUT}(W)$ 59
- 4 Portas lógicas obtidas em FBG com perfil assimétrico de não linearidade, sendo composta pela primeira metade por γ e a segunda parte por $\frac{\gamma}{\sigma}$ 62
- 5 Valores das curvas de potência da Biestabilidade, $P_{up}\uparrow$ e $P_{down}\downarrow$ para FBG assimétrica composta pela primeira metade por uma não linearidade γ e a segunda metade por $\frac{\gamma}{\sigma}$ 64
- 6 Valores de $P_{up}\uparrow$, e $P_{down}\downarrow$ e $\Delta P \uparrow\downarrow$ para FBG com perfil assimétrico de não linearidade, sendo composta pela primeira metade por (γ) e a segunda metade por $(\frac{\gamma}{\sigma})$, tendo como referencial o eixo $P_{IN}(W)$ 65
- 7 Valores das curvas de potência da Biestabilidade, $P_{up}\uparrow$ e $P_{down}\downarrow$ para FBG assimétrica composta pela primeira metade por uma não linearidade $\frac{\gamma}{\sigma}$ e a segunda metade por γ , utilizando um pulso na ordem de femtossegundos. . . . 68

Lista de Símbolos

ω_0	Frequência Central do Pulso
λ_B	Comprimento de Onda de Bragg
Λ	Período da FBG
n_0	Índice de Refração Médio
δn_1	Perturbação do Índice de Refração da FBG
n_2	Coefficiente Não-Linear do Índice de Refração
λ_{uv}	Comprimento de Onda da Fonte de Ultra-Violeta
A_f	Amplitude do Pulso Propagante
A_b	Amplitude do Pulso Contra-Propagante
β_1	Coefficiente de Dispersão de Primeira Ordem
β_2	Coefficiente de Dispersão de Segunda Ordem
β_3	Coefficiente de Dispersão de Terceira Ordem
α	Coefficiente de Perda
κ	Coefficiente de Acoplamento da FBG
δ	Dessintonia (ou <i>Detuning</i>)
γ_0	Parâmetro de Não-Linearidade
r_g	Coefficiente de Reflexão
t_g	Coefficiente de Transmissão
$P_{entrada}$	Potência de Entrada do Sinal Luminoso
T_0	Largura a Meia Altura do Pulso no Domínio Temporal
$\xi(Z)$	Perfil de Não-Linearidade
σ	Amplitude de Variação da Não-Linearidade
$P_{up\uparrow}$	Potência de Chaveamento Up
$P_{down\downarrow}$	Potência de Chaveamento Down
$\Delta P \uparrow\downarrow$	Potência delta do Intervalo de Chaveamento Não-linear

Lista de Abreviações

BGF	<i>Bandgap</i> Fotônico
FBG	Grade de Bragg em Fibra (<i>Fiber Bragg Grating</i>)
AN	Abertura Numérica
CW	Onda Contínua (<i>Continuous Wave</i>)
CME	Equações do Modo Acoplado (<i>Coupled Mode Equation</i>)
SPM	Auto-Modulação de Fase (<i>Self-Phase Modulation</i>)
XPM	Modulação de Fase Cruzada (<i>Cross-Phase Modulation</i>)
FT	Transformada de Fourier (<i>Fourier Transform</i>)
IFT	Transformada Inversa de Fourier (<i>Inverse Fourier Transform</i>)
GVD	Dispersão da Velocidade de Grupo (<i>Group Velocity Dispersion</i>)
WDM	Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda (<i>Wavelength Division Multiplexing</i>)

Sumário

1	Introdução	16
1.1	Motivação	17
1.2	Objetivos	17
1.3	Organização da Dissertação	18
2	Fundamentos	19
2.1	Fibras Ópticas	19
2.1.1	Fibras de Índice Degrau	19
2.1.2	Fibras de Índice Gradual	22
2.1.3	Efeitos Ópticos	23
2.1.4	Vantagens da Fibra Óptica	27
2.2	Propagação de Onda em Fibras Ópticas	27
2.2.1	Equações de Maxwell	27
2.3	Fotossensibilidade em Fibras Ópticas	29
2.3.1	Teoria do Modo Acoplado	31
2.4	Teoria sobre redes de Bragg em fibras ópticas	34
2.5	Tipos de Redes de Bragg	35
2.5.1	Redes Uniformes	35
2.5.2	Redes Aperiódicas	36
2.6	Técnicas de Fabricação de Grades de Bragg	38
2.6.1	Método por máscara de fase	40
2.6.2	Gravação por interferômetro	41

2.6.3	Gravação por ponto a ponto	43
2.7	Aplicações de Grades de Bragg	44
2.8	Bandgap Fotônico	44
2.9	Biestabilidade Óptica	47
3	Metodologia	51
3.1	Metodologia	51
3.1.1	Grade com assimetria longitudinal do parâmetro de não linearidade em fibra convencional utilizando pulsos na ordem de picossegundos	51
3.1.2	Grade com assimetria longitudinal do parâmetro de não linearidade considerando os efeitos de alta ordem	52
3.1.3	Obtenção de portas lógicas	53
4	Resultados obtidos na simulação	54
4.1	Resultados com largura de pulso na ordem de picossegundos	54
4.1.1	Análise dos resultados do perfil de Biestabilidade	54
4.1.2	Proposta de obtenção de Portas Lógicas	61
4.2	Resultados com largura de pulso na ordem de femtossegundos	63
4.2.1	Análise dos resultados do perfil de Biestabilidade	63
4.3	Análise dos Pulsos Refletidos	68
5	Conclusões	72
5.1	Trabalhos Futuros	73
	Referências Bibliográficas	74

INTRODUÇÃO

Os sistemas de comunicação são responsáveis pela transmissão de informações de um ponto a outro (AGRAWAL, 2014). Atualmente, as limitações da taxa de transmissão dos sistemas eletrônicos, devido aos limites insuperáveis de suas características físicas no chaveamento dos seus dispositivos, também conhecido como gargalo eletrônico, propiciam a utilização de sistemas puramente ópticos. Dentre os meios físicos utilizados, a fibra óptica tornou-se o principal meio capaz de acompanhar o desenvolvimento constante das novas tecnologias que necessitam cada vez mais de maiores larguras de banda, maiores velocidades de processamento e alcance, menores perdas de transmissão, dentre outros quesitos de eficiência.

Uma fibra óptica se comporta como um guia de ondas dielétricas, porém com uma especificidade por ter geometria cilíndrica, sendo formada por um núcleo envolto de outro material dielétrico com menor índice de refração, facilitando assim para que o sinal seja propagado enclausurado no interior do material supra mencionado (BOQUERA, 2005). Com o aumento da aplicação dos sistemas de comunicação baseados em fibras ópticas nas últimas três décadas, alavancou-se a necessidade de desenvolvimento de novos dispositivos para o processamento desses sinais, possuindo características opticamente ativas, inclusive com propriedades ópticas controladas por parâmetros externos.

Logo, foram desenvolvidos vários recursos, como por exemplo, amplificadores, acopladores, divisores, conversores, fotodetectores, chaves e filtros ópticos com as mais diversas configurações, dentre outros. Levando em consideração a evolução desses dispositivos e a constante necessidade de precisão nas medições realizadas, bem como aplicações com maiores especificidades, os filtros ópticos baseados em estrutura de bandgap fotônico (FBG) têm sido amplamente utilizados, seja para aplicações destinadas ao sensoriamento ou a comunicações ópticas, conforme descrito por (ZHANG *et al.*, 2012) e (AMADOR, 2008).

Neste contexto, em razão da sua relevância, a grade de Bragg em fibra óptica (FBG), tem sido amplamente pesquisada nos últimos anos. Surgindo como uma opção de baixo custo, alta flexibilidade e precisão (AGRAWAL, 2001).

1.1 Motivação

Com a evolução contínua das tecnologias, em especial os sistemas de comunicação via fibra óptica, que mostram-se capazes de suportar maiores larguras de banda, fazem-se necessários novos sistemas voltados à telecomunicações, dentre esses o próprio sensoriamento da rede.

Neste contexto, as FBG's surgiram como uma solução viável, devido a sua grande flexibilidade. Logo, no decorrer dos últimos anos, foram intensificados os estudos acerca deste tema, tendo em vista as dificuldades envolvendo o controle dos diversos parâmetros envolvidos nas aplicações específicas dos sistemas de comunicação óptica.

O estudo das curvas da biestabilidade óptica geradas em FBG's para obtenção de portas lógicas com maior eficiência tem sido fortemente explorado, podendo ser verificado nos trabalhos desenvolvidos por (PINTO, 2016), (ZANG, 2012) e (TIAN, 2011).

A motivação para o trabalho desenvolvido no âmbito da dissertação surge neste contexto, da simulação e validação dos parâmetros de não linearidade óptica aplicados a FBG's e as suas respectivas curvas da biestabilidade e refletividade, visando obter a melhor eficiência em chaveamentos ópticos.

1.2 Objetivos

O propósito principal deste trabalho consiste em simular por meio de software os diferentes comportamentos da biestabilidade óptica causados em grades de Bragg, devido a variação do parâmetro da não linearidade. Pretende-se dividir as FBG's em partes iguais e estabelecer diferentes valores deste parâmetro para cada metade.

Objetiva-se utilizar pulsos luminosos com diferentes larguras a meia altura no domínio do tempo, visando analisar a incidência dos efeitos *self steepening*, auto modulação de fase, modulação de fase cruzada, espalhamento Raman e Dispersão.

Ao final, visa-se validar as diversas curvas da biestabilidade óptica, a fim de demonstrar as melhores faixas para obtenção de maior eficiência na realização de chaveamento óptico, sendo ilustrada a obtenção de portas lógicas, tendo em vista as potências de subida ($P_{up}\uparrow$) e descida ($P_{down}\downarrow$).

1.3 Organização da Dissertação

Esta dissertação está estruturada em quatro capítulos na seguinte sequência: Introdução, Fundamentos, Metodologia e Resultados, finalizando com o tópico Conclusões.

O primeiro capítulo informa ao leitor o objetivo traçado para este estudo e o percurso que será trilhado para obtenção dos resultados, situando-o em relação à relevância e à motivação para o desenvolvimento deste tema.

O capítulo dois trata do embasamento teórico acerca das grades de Bragg e os seus temas correlatos. Este tópico inicia-se com uma visão geral sobre a evolução histórica das redes de comunicação e posteriormente uma abordagem sobre o tema fibras ópticas, onde são relatados os seus avanços, comportamentos de transmissão e efeitos. Ainda são destacadas as equações de Maxwell e da Teria do modo acoplado, sendo essenciais a compreensão do leitor para os próximos temas. Após, são introduzidos os conceitos pertinentes as grades de Bragg tais como: características, forma de fabricação, tipos de grade e aplicações. Por fim, são especificados os fenômenos da Biestabilidade e *Bandgap* Fotônico.

Em seguida, no capítulo três, foi abordado sobre a metodologia utilizada para a realização deste trabalho, materiais e softwares manuseados para simulações e coletas de dados. São descritos os modelos e parâmetros utilizados em cada uma das situações simuladas.

Posteriormente, no capítulo quatro, são apresentados os resultados. Por meio de imagens, figuras e tabelas, são evidenciados o comportamento da biestabilidade para os diversos cenários propostos ao alterar os índices de não linearidade da FBG. Mostra-se ainda a possibilidade de obtenção de portas lógicas de alta eficiência para realização chaveamento óptico e os pulsos refletidos em Pico e Femtossegundos.

O capítulo cinco descreve as considerações finais e uma conclusão geral, ressaltando as principais contribuições deixadas durante este trabalho de mestrado. Por fim, sugestões para trabalhos futuros são apresentadas.

FUNDAMENTOS

2.1 Fibras Ópticas

O fenômeno da reflexão total de sinais ópticos é conhecido desde de 1854 (AGRAWAL, 2014), contudo a fibra de vidro já era fabricada décadas antes, porém os altos índices de perdas na transmissão, fato este que inviabilizavam o avanço desta tecnologia, que a princípio só poderia ser utilizada em pequenas distâncias. Já na década de 1950, a inclusão de um material envolto a fibra, conhecido como casca, fez com que houvessem ganhos significativos na transmissão ampliando a aplicação desta solução (MOREIRA, 2004).

Segundo COELHO (2009), o desenvolvimento de novas técnicas de telecomunicações e sensoriamento, entre os anos 1970 e 1980, correspondendo aos repentinos avanços de tráfego de dados, possibilitaram comunicações e controle em longas distâncias. Ainda segundo LOPES (2011), desde o princípio das décadas de 1980 e 1990, existe uma grande expectativa em torno das redes baseadas em fibra óptica, como sendo estas capazes de resolver as problemáticas relacionadas ao acesso de banda larga com qualidade, permitindo usufruir dos serviços de vídeo, voz, dados, de forma adequada e satisfatória.

Quanto à estrutura física das fibras (WIRTH, 2002), comparou o seu diâmetro a um fio de cabelo humano, feitas de vidro e podendo ser disposta em feixes, sendo mais conhecido como cabos ópticos, tendo grande capacidade de condução de sinais luminosos por grandes distâncias.

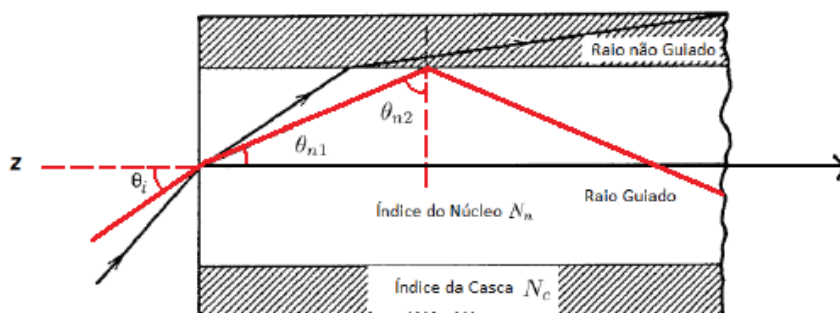
2.1.1 Fibras de Índice Degrau

Uma fibra óptica é composta por um núcleo central em formato cilíndrico feito essencialmente por sílica pura (SiO_2), tendo o seu núcleo dopado com outros compostos como: alumínio, fluoreno e Germânio, o mais utilizado (RIBEIRO, 1999). A finalidade desta dopagem é a alteração da viscosidade do vidro e consequentemente a mudança do índice de refração. O núcleo é envolto por um material comumente nomeado por casca, que no exemplo ilustrado na Figura 1, foi representado por (N_c). A aplicação externa deste material

visa propiciar a reflexão dos sinais luminosos (MOREIRA, 2004). Para comentar o índice de refração do núcleo também demonstrado nesta imagem, adotou-se a variável (N_n), cujo valor deverá ser sempre maior que o índice de refração da casca (N_c), para que seja possível a obtenção da condição de reflexão interna total no interior da fibra, propiciando o guiamento da onda através do núcleo (THYAGARAJAN; GHATAK, 2007).

Na Figura 1, o raio guiado foi destacado na cor vermelho para uma melhor visualização. Nesta imagem, o ângulo (θ_i) demonstra o plano do raio incidente ao entrar na fibra, que, posteriormente ao mudar de meio, sofre a incidência do novo índice de refração, formando o ângulo (θ_{n1}). Por fim, este raio prossegue em direção as extremidades do núcleo formando o ângulo (θ_{n2}), referente a reflexão causada pela diferença entre os índices de refração entre o núcleo e a casca, respectivamente. O cenário oposto pode ser observado na coloração preto, onde o raio não guiado ultrapassa os limites do núcleo, adentrando na casca, não sendo refletido.

Figura 1: Esquema demonstrando o conceito de reflexão interna total na fibra óptica.



Fonte: AGRAWAL (2014). (adaptado)

Este princípio pode ser verificado através da lei de Snell, que assegura o cálculo de refração entre os meios utilizados, sendo descrita por (CRISP, 2001) e (GRIFFITHS; COLLEGE, 1999). Primeiramente, realiza-se a análise entre meio incidente e o meio refrator. Neste caso, trabalha-se inicialmente com o ar e o próprio núcleo da fibra, conforme observa-se na Figura 1. Pois o sinal luminoso inicia o seu trajeto na parte externa da fibra e posteriormente adentra ao núcleo desta, sendo possível realizar a sua análise pelas equações matemáticas descritas abaixo.

$$\text{sen}\theta_i N_{ar} = \text{sen}\theta_{n1} N_n. \quad (2.1)$$

Como o índice de refração do ar é de aproximadamente 1, a equação é simplificada obtendo-se:

$$\text{sen}\theta_i = \text{sen}\theta_{n1} N_n. \quad (2.2)$$

No momento seguinte, o sinal já encontra-se no interior da fibra, agora teremos a interação

entre o núcleo e a casca, repetindo-se o fenômeno da refração. Nesta situação, quando θ_c for igual $(\frac{\pi}{2})$, ou seja, $\text{sen}\theta_c=1$, teremos a reflexão interna total.

$$\text{sen}\theta_{n2} = \frac{N_c}{N_n}. \quad (2.3)$$

Ainda considerando os ângulos complementares θ_{n2} e θ_{n1} , conclui-se que $\text{sen}\theta_{n2} = \cos\theta_{n1}$. Portanto, pode-se afirmar que $\theta_{n2} = \frac{\pi}{2} - \theta_{n1}$. Logo, obtém-se: $\text{sen}\theta_{n2} = \sqrt{1 - \text{sen}^2\theta_{n1}}$. Retomando a equação (2.3), tem-se:

$$\begin{aligned} \left(\frac{N_c}{N_n}\right)^2 &= 1 - \text{sen}^2\theta_{n1}, \\ \text{sen}\theta_{n1} &= \sqrt{1 - \left(\frac{N_c}{N_n}\right)^2}. \end{aligned} \quad (2.4)$$

Seguidamente, substitui-se a Equação (2.4) em (2.2), obtendo-se:

$$\begin{aligned} \text{sen}\theta_i &= \sqrt{1 - \left(\frac{N_c}{N_n}\right)^2 N_n}, \\ AN &= \text{sen}\theta_i = \sqrt{N_n^2 - N_c^2}. \end{aligned} \quad (2.5)$$

O valor referente ao $\text{sen}\theta_i$ aludi-se a capacidade da fibra para captar luz, sendo também conhecida como abertura numérica (AN). Se $N_n \approx N_c$, a abertura numérica será aproximadamente:

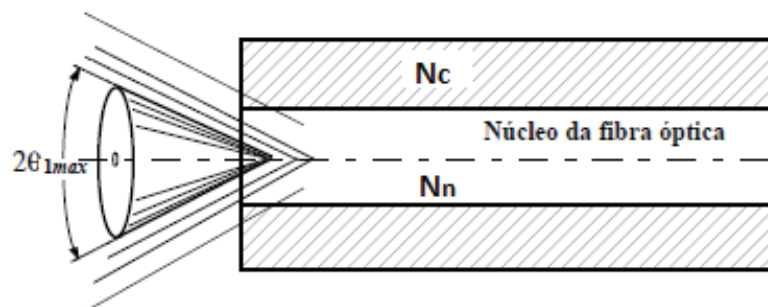
$$AN = N_n(2\Delta)^{1/2}, \quad \Delta = \frac{N_n - N_c}{N_n}. \quad (2.6)$$

O delta (Δ) caracteriza a variação relativa ao índice de refração entre o núcleo e a casca da fibra óptica. Quanto maior este valor, maior será a eficiência no acoplamento da quantidade de luz na fibra. Devido a simetria cilíndrica circular da fibra óptica, a abertura numérica delimita um cone de captação da fonte luminosa, conforme demonstrado na Figura 2.

Segundo RIBEIRO (1999), o posicionamento do raio luminoso dentro dos limites do cone, propicia uma circunstância conveniente para que ocorra o guiamento através do núcleo da fibra. Esta situação ocorre em ambas extremidades, inclusive com características de simetria. Por existir uma quantidade finita de modos possíveis e úteis, a transmissão da fibra óptica utiliza-se um parâmetro denominado (V), ou ainda, frequência normalizadora, para determinar este número.

$$V = \frac{2\pi a \sqrt{N_n^2 - N_c^2}}{\lambda_0}. \quad (2.7)$$

Sendo a o raio do núcleo (λ_0) o comprimento da luz medida no vácuo, N_n e N_c os índices de refração do núcleo e da casca, respectivamente. Logo, valida-se a relação direta e proporcional a

Figura 2: Conceito de abertura numérica e ângulo de aceitação na face da fibra óptica.

Fonte: RIBEIRO (1999).

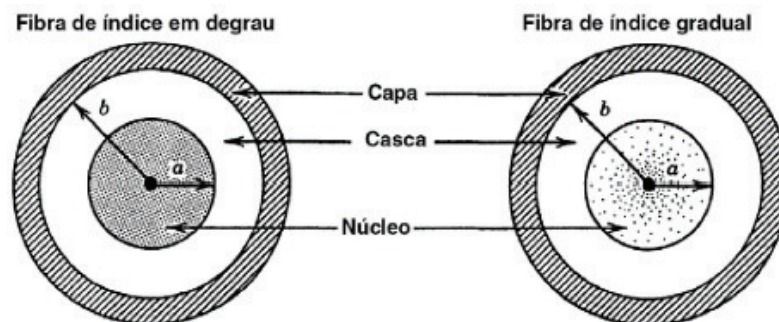
abertura numérica da fibra óptica. A forma de incidência dos sinais provenientes da fonte terão implicação direta com a quantidade de modos guiados, bem como a distribuição do campo óptico, sofrendo variações até que atinja o seu ponto de estabilidade e permanecendo inalterada deste ponto em diante (RIBEIRO, 1999). Este parâmetro também utilizado para identificação do tipo de fibra. Neste caso, se o resultado do parâmetro for $V < 2,405$, estaremos diante de uma fibra monomodo, caso contrário, será uma fibra multimodo.

Contudo, fibras que apresentam o fenômeno da dispersão modal não são úteis para sistemas de telecomunicações. A dispersão modal pode ser definida como os diferentes percursos ópticos ao longo do núcleo de uma fibra, de acordo com o ângulo de incidência de cada feixe de luz. Ou seja, pode-se percorrer a mesma fibra em tempos diferentes, causando o atraso na chegada do sinal. Este efeito é reduzido com a utilização de fibras com índice gradual (MOREIRA, 2004), (AGRAWAL, 2014) e (THYAGARAJAN; GHATAK, 2007).

2.1.2 Fibras de Índice Gradual

Nas fibras de índice gradual, a refração varia gradualmente de um valor máximo N_n diminuindo radialmente na direção da casca até um valor mínimo de N_c . Esta variação ocorre usualmente de forma quadrática decrescente. Apesar da diferença no ângulo de incidência dos feixes de luz, fato que influencia diretamente a velocidade, os sinais tendem a chegar de forma simultânea, pois a variação do índice de refração faz com que a onda se propague em velocidade proporcional as demais, compensando o atraso ou avanço (AGRAWAL, 2014). Demonstra-se este conceito na Figura 3.

Figura 3: Seção reta e perfil de índice de refração para fibras de índice em degrau e índice gradual.



Fonte: AGRAWAL (2014).

2.1.3 Efeitos Ópticos

Conforme descrito nos tópicos anteriores, a fibra óptica levou algum tempo entre a sua descoberta e a viabilidade técnica comercial, pois ao propagar um pulso óptico por meio de uma fibra, incidirão sobre esse os efeitos causados em virtude do meio de condução, sendo abordados nos tópicos a seguir.

Atenuação

O fenômeno linear da atenuação foi um dos primeiros a ser intensamente estudados, pois causava grandes perdas dos sinais ópticos ao longo do comprimento da fibra, devido as características de absorção da potência. Fato que inviabilizava esta tecnologia por superar inicialmente 20 dB/km. Contudo, com a evolução nas técnicas de fabricação e a maior pureza dos material alcançou-se melhores índices de perdas, fator este que contribuiu para alavancar as redes de fibras ópticas (KEISER, 1991) e (BASS; STRYLAND, 2002). Segundo AGRAWAL (2001), os valores desta perda poderão ser estimados por meio da fórmula 2.8.

$$\alpha(\text{dB/km}) = \frac{10}{L(\text{km})} \log_{10} \frac{P_{out}}{P_{in}}, \quad (2.8)$$

Onde α representa a perda na fibra, L o comprimento, P_{out} e P_{in} a potência de saída e entrada, respectivamente.

Ainda de acordo com THYAGARAJAN (2002), atualmente, os sistemas de comunicação baseados em fibras ópticas composta por sílica trabalham em sua grande maioria com janelas de 1550 nm, cujo o índice de perda gira em torno de 0,2 dB/km, consideradas aceitáveis para os sistemas de comunicação.

Dispersão

O efeito de dispersão está relacionado a modificação da forma da onda, mais precisamente na alteração temporal do sinal óptico transmitido na entrada da fibra, fato que impacta diretamente na eficiência da taxa de transmissão. Para uma melhor compreensão, deve-se observar a Figura 1, onde percebe-se que o guiamento de onda faz com que os raios percorram diferentes caminhos em fibras multimodos, causando atrasos nos sinais luminosos ao decorrer do percurso, caracterizando a dispersão intermodal ou dispersão de primeira ordem. Esse fato não afeta as fibras monomodos, contudo o alargamento do pulso ainda persiste nelas, devido a dispersão de segunda ordem ou dispersão cromática, que é determinada pela dependência da frequência em relação ao modo fundamental. Logo, a pequena diferença na velocidade espectral do grupo também conhecida por (GVD - *Group velocity Dispersion*), acarretam o alargamento do sinal (AGRAWAL, 2001). A abertura matemática deste fenômeno é demonstrada no tópico 2.8, mais precisamente a partir da Equação (2.58).

Já os processos de dispersão de terceira ordem são governados pelo parâmetro de inclinação da dispersão, comumente representado por S , devido ao termo em inglês (*Dispersion Slope*), tendo esse em grande parte das fibras valor maior que zero. Em virtude desta característica, diferentes canais poderão ter pequenas diferenças de GVD e logo acarretar atrasos no sinal, ocasionando o fenômeno da dispersão. Matematicamente falando, esta variável representa $S = \frac{dD}{d\lambda}$, desta forma, chega-se a expressão geral da dispersão diferencial (KEISER, 1991).

$$S = \left(\frac{2\pi c}{\lambda^2}\right)^2 \beta_3 + \left(\frac{4\pi c}{\lambda^3}\right) \beta_2, \quad (2.9)$$

Logo, por meio da Equação (2.9), pode-se obter o parâmetro de terceira ordem, descrito abaixo.

$$\beta_3 = \frac{d\beta_2}{d\omega} = \frac{d^3\beta}{d\omega^3}, \quad (2.10)$$

Não Lineares

Conforme descrito por LEE, KIM & LEE (2002), o perfeito entendimento dos efeitos ópticos não-lineares em fibras ópticas é essencial para o correto e pleno funcionamento dos sistemas, pois esses podem ser utilizados como uma ferramenta construtiva ou caso não controlados poderão agir de forma prejudicial ao desempenho atrelado a este meio de comunicação. Esses fatores se intensificam nas aplicações com multiplexação por divisão de comprimento de onda, sendo responsáveis por limitar a performance deste método. Apesar da vasta gama de efeitos, neste trabalho, atém-se apenas aos listados nas subseções abaixo.

Self Steepening

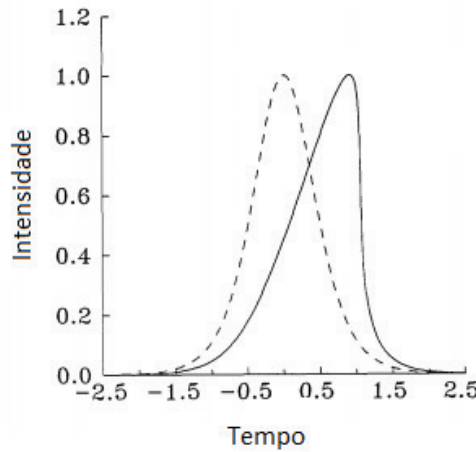
Segundo DEMARTINI *et al.* (1967), este efeito caracteriza-se pela mudança da forma do pulso luminoso na extensão do comprimento longitudinal do meio de transmissão, tendo uma relação direta com dois fatores: intensidade do sinal incidente e índice de refração, pois a intensidade será sempre ajustada a medida que houverem maiores distorções ao longo do percurso (OLIVEIRA *et al.*, 1992). O resultado deste acontecimento pode ser visualizado na Figura 4.

Conforme descrito por COELHO (2009), essa dependência entre o índice de refração e a intensidade poderá ser expressada pela equação matemática abaixo.

$$n = n_0 + n_2 \frac{P_o}{A_{eff}}, \quad (2.11)$$

Na qual n_0 representa o índice de refração do material, n_2 simboliza o parâmetro de não linearidade, P_o a potência óptica e A_{eff} a área efetiva.

Figura 4: Pulso luminoso sob influência do efeito *Self Steepening*.



Fonte: OLIVEIRA *et al.* (1992). (adaptado)

Automodulação de fase

A automodulação de fase que também é conhecida pelo termo em inglês (*SPM - Self Phase Modulation*), atua diretamente sobre o próprio sinal fazendo com que este seja estendido ao decorrer do tempo, e isso ocorre em virtude das características relacionadas ao auto induzimento do pulso (STOLEN; LIN, 1978) e (AGRAWAL, 2014). Essa característica impacta de forma direta sobre o desempenho do sistema óptico, pois poderá ter o seu efeito acumulado nos

diversos amplificadores do sistema óptico (MAMYSHEV, 1998) e (AGRAWAL, 2011).

De acordo com MATOS (2007), pode-se mensurar a dimensão deste evento pela equação 2.12.

$$\phi_{NL} = \gamma P_{in} L_{eff}, \quad (2.12)$$

O γ retrata o termo de não linearidade, P_{in} a potência de entrada e L_{eff} o comprimento longitudinal efetivo.

Modulação de fase cruzada

De acordo com AGRAWAL (2014), o efeito de modulação de fase cruzada ou (*XPM - Cross Phase Modulation*) ocorre devido as interferências entre as faixas de potências transmitidas por diferentes canais que utilizam-se da técnica de multiplexação por divisão de comprimento de onda e são transmitidos em uma mesma fibra óptica. Portanto, para que este efeito ocorra necessariamente deverão haver dois ou mais canais ópticos. Logo, implica-se a possibilidade de estarem em diferentes velocidades e que podem se sobrepor no tempo, diferentemente do *SPM* onde temos apenas um sinal (COELHO, 2009). Ainda segundo MATOS (2007), quando este evento ocorre, o espectro de cada pulso é ampliado distorcendo a sua forma inicial.

Espalhamento Raman

Quando um feixe de luz é aplicado sobre um material pode-se verificar que uma parcela desse sinal será espalhado, e ao analisar esta porção luminosa valida-se que existem diferentes frequências se comparadas ao raio de luz incidente, fato este, que caracteriza a ocorrência do fenômeno não linear denominado de espalhamento Raman, podendo acontecer de forma espontânea ou estimulada (SMITH, 1972), (CHRAPLYVY; HENRY, 1983) e (STOLEN, 1980).

Conforme mencionado por MIRANDA (2011), trata-se de um efeito diretamente relacionado a pureza da composição das fibras, portanto a fabricação por meio de codopagem implicará neste evento, pois refletem o quão cristalino será o meio óptico. Contudo, alguns fatores podem colaborar com o aparecimento deste episódio, como por exemplo: disposição de faixas de frequências muito próximas entre si e a utilização das faixas de potências mais susceptíveis a ocorrência do fenômeno (MOCHIZUKI, 1985).

2.1.4 Vantagens da Fibra Óptica

Existem diversas vantagens em construir uma rede baseada em fibra óptica, dentre as principais destacam-se (COELHO, 2009), (BERTOLOTO, 2012), (RIBEIRO, 1999) e (LOUREIRO, 2011):

- Espessura mais fina se comparadas aos cabos metálicos;
- Maior capacidade de transmissão: possuem grandes larguras de banda;
- Menores índices de dispersão e atenuação, resultando na menor degradação do sinal e consequentemente a um maior espaçamento entre repetidores de sinal;
- São mais leves, flexíveis e ocupam menor espaço físico;
- Imune a campos magnéticos, corrosão, interferências entre outros cabos, inclusive de outra fibra óptica;
- Oferecem maior segurança e confiabilidade no transporte de informações;
- Não necessitam de aterramento, pois são fabricadas de material altamente isolante, fato que traz maior segurança no manuseio de instalações e manutenção;
- Material de fabricação abundante na natureza, dentre outras qualidades.

2.2 Propagação de Onda em Fibras Ópticas

2.2.1 Equações de Maxwell

A propagação de onda para um campo elétrico em um dielétrico livre de cargas e correntes, pode ser demonstrada através das equações de Maxwell (GRIFFITHS; COLLEGE, 1999). Nesta seção são apresentadas as equações de Maxwell aplicadas a uma fibra óptica com perfil de índice degrau e seus respectivos modos de guiamento ao longo da fibra (CUNHA, 2007) e (MOREIRA, 2004).

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (2.13)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \quad (2.14)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 0, \quad (2.15)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0. \quad (2.16)$$

Onde $\mathbf{E}$ representa o campo elétrico, $\mathbf{D}$ o deslocamento deste, $\mathbf{H}$ retrata o campo magnético e a variável $\mathbf{B}$ infere o respectivo deslocamento (GRIFFITHS; COLLEGE, 1999). A resposta do meio aos campos elétrico e magnético do sinal óptico é dada por:

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}, \quad (2.17)$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} + \mathbf{M}. \quad (2.18)$$

No qual ϵ_0 e μ_0 representam a permissividade elétrica e permeabilidade magnética do vácuo, respectivamente. Já o termo $\mathbf{P}$ infere as polarizações elétrica e $\mathbf{M}$ as polarizações magnéticas, ambos fatores dependem das características do material. Contudo, os materiais de composição da fibra, composta na sua grande parte de sílica, não apresentam perfis magnéticos, sendo assim, temos $\mathbf{M}=0$. Logo, pode-se obter a relação da Equação (2.19) por intermédio das equações já apresentadas.

$$\nabla \mathbf{x} \nabla \mathbf{x} \mathbf{E} = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} - \mu \frac{\partial^2 \mathbf{P}}{\partial t^2}, \quad (2.19)$$

Em que c^2 é a velocidade da luz, cujo valor é expressado por $\mu_0 \epsilon_0^{-\frac{1}{2}}$. A polarização $\mathbf{P}$ expressa a resposta da fibra a presença de um campo óptico, sendo desprezados os efeitos não lineares quando submetidos a baixas intensidades de luz. Portanto, obtém-se a polarização elétrica através da Equação (2.20).

$$\mathbf{P} = \epsilon_0 \mathbf{X}^{(1)} \mathbf{E}, \quad (2.20)$$

No qual $X^{(1)}$ simboliza a susceptibilidade linear. A relação de linearidade de $\mathbf{P}$ e $\mathbf{E}$ dependerá da intensidade da luz, caso esta seja muito alta poderá não ser linear. Desta forma, pode-se reescrever a Equação (2.19).

$$\nabla \mathbf{x} \nabla \mathbf{x} \mathbf{E} + \frac{n^2}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0. \quad (2.21)$$

Onde n é o índice de refração, sendo este definido por $n^2 = 1 + X^{(1)}$, na ausência de absorção. O índice de refração tem relação direta ao comprimento da onda. Logo, utilizando-se da transformada de Fourier (FT), encontra-se a equação do campo elétrico como descrita abaixo.

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{2\pi} \int \mathbf{E}(\mathbf{r}, \omega) \exp(-i\omega t) d\omega, \quad (2.22)$$

Aplicando-se este conceito a equação 2.21, obtém-se:

$$\nabla^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}, \omega) + n^2 k^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}, \omega) = 0. \quad (2.23)$$

Onde $k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$, define o número de onda e λ o comprimento de onda do campo óptico oscilando na frequência ω .

2.3 Fotossensibilidade em Fibras Ópticas

Segundo os pesquisadores (BENNION *et al.*, 1995), (HIGUERA, 1997) e (ALBERTO, 2011), a fotossensibilidade pode ser caracterizada por qualquer mudança permanente em um material devido a exposição a uma fonte luminosa. Mais especificamente, falando sobre as fibras ópticas, esse fenômeno físico, não linear, deu surgimento as FBG's. Quando a luz UV (ultravioleta) irradia em uma fibra óptica, o índice de refração da fibra é alterado permanentemente (HILL; MELTZ, 1997). Essa descoberta foi apresentada apenas no ano de 1978, pela *Canadian Communication Research Center*, através dos pesquisadores (HILL *et al.*, 1978), que por meio de experimento utilizaram um sinal luminoso de laser de íons de argônio no comprimento de 488 nm sendo direcionado a um divisor de feixe, por seguinte, transmitido sobre um determinado comprimento de fibra.

Esta simulação conseguiu demonstrar a mudança de comportamento do sinal luminoso ao longo de fibras dopadas com germânio, e observar a alteração do índice de refletividade em relação ao tempo, sendo descrito como o primeiro processo de gravação interna das redes de Bragg (TU *et al.*, 2009), (FIGUEIREDO, 2009) e (MASTRO, 2005). Este fato nos remete aos princípios da fibra com índice gradual já apresentados no tópico 2.1.2, devido às variações no índice de refração.

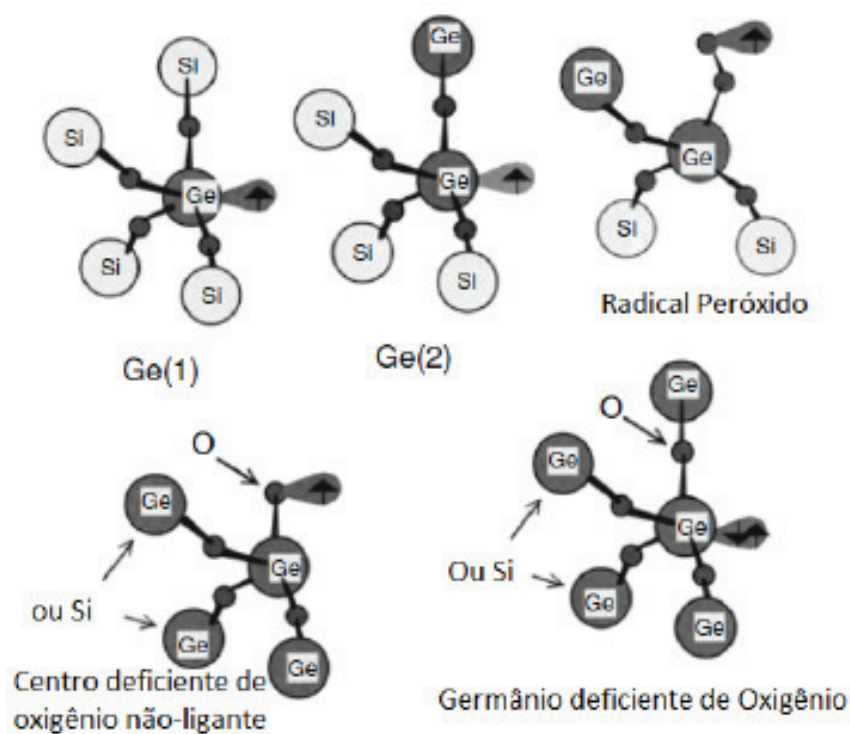
A alteração do índice de refração dependerá de diversos fatores, como: as condições de irradiação, comprimento de onda, intensidade e quantidade total de luz irradiada, a composição de material vítreo que forma o núcleo de fibra, dentre outras (HILL; MELTZ, 1997). Inicialmente, a operação das FBG's eram limitadas apenas na faixa visível perto do comprimento de onda da luz que criou a grade.

Contudo, no ano de 1989, essa limitação foi superada em um estudo apresentado por MELTZ; MOREY; GLENN, tornando-se possível a criação de uma grade com qualquer comprimento de onda por intermédio da técnica de gravação holográfica, utilizando-se de raios ultravioleta (UV) na faixa de 240-250 nm, demonstrando ser possível a utilização de dois sinais incidentes e inclusive com a possibilidade de alteração dos ângulos de inscrição. Desta forma, surgiu uma nova etapa nos estudos da fotossensibilidade, agora, já com a técnica de escrita externa, demonstrada no experimento supramencionado (HILL *et al.*, 1993). Este efeito durará por tempo indefinido, desde que sejam respeitadas as temperaturas de operação da fibra, bem

como o máximo tempo de exposição desta, podendo operar a temperaturas que chegam até a 600°celsius (CANNING; SOMMER; ENGLUND, 2001).

Apesar de ser possível realizar o procedimento em fibras dopadas com vários materiais, a fibra óptica dopada com germânio predominou como preferência na fabricação das FBG's (ATKINS, 1996). Diante do exposto, vale ressaltar que a presença de átomos de germânio e à exposição da fibra a radiação UV leva a formação de ligações deficientes de oxigênio que geram defeitos no núcleo da fibra, aumentando o índice de refração, conforme ilustrado na Figura 5 (KASHYAP, 1994).

Figura 5: Ilustração dos defeitos causados pela fotossensibilidade em fibras ópticas dopadas com germânio.



Fonte: PINTO (2016).

Ainda segundo BRAMBILLA G. and VALERIO (2001), o fenômeno da fotossensibilidade vem sendo estudado ao longo dessas últimas décadas. O melhor conhecimento desta tem permitido a evolução das técnicas de gravação, bem como o aprimoramento nas técnicas de produção das fibras ópticas e as suas diferentes composições. Estes fatores impactam diretamente na manufatura das FBG's, pois interferem diretamente no tempo necessário para realização do processo de inscrição na fibra.

O processo de codopagem representa um destes avanços, pois em certas circunstâncias, a gravação por meio de radiação UV poderá ser lenta, porém a utilização de hidrogênio, boro,

dentre outros compostos, tornam o núcleo da fibra mais susceptível a marcações, cuja reação é a criação de (si-OH), o que também ocasiona incrementos no índice de refração (MASTRO, 2005).

2.3.1 Teoria do Modo Acoplado

A teoria do modo acoplado e as suas respectivas equações (CME), do termo inglês (*Coupled Mode Equations*), são aplicadas de forma extensiva para análise matemática sobre os efeitos ocorridos na propagação de ondas ópticas guiadas (HUANG, 1994) e (HORIE; USHIKI; WINNIK, 2000). A equação da propagação de onda para o campo elétrico em um dielétrico no domínio temporal foi demonstrada no tópico 2.2.1, sendo essencial para o entendimento a seguir. No caso das fibras ópticas, precisamos incluir as mudanças não-lineares e as variações periódicas no índice de refração (AGRAWAL, 2001), conforme demonstrado abaixo.

$$\tilde{n}(\omega, z) = \bar{n}(\omega) + n_2|E|^2 + \delta n_g(z), \quad (2.24)$$

Onde n_2 representa os parâmetros não lineares e $\delta n_g(z)$ o índice de variação periódica dentro da FBG. Caso a mudança no índice de não linearidade $n_2|E|^2$ seja pequeno, a equação de modo acoplado poderá ser generalizada.

Resolvendo as equações de Maxwell utilizando os índices de refração apresentados na Equação (2.24). Ainda segundo AGRAWAL (2001), caso os efeitos não lineares sejam relativamente fracos, podemos trabalhar no domínio da frequência e resolver a equação de Helmholtz (KUMBHAJ *et al.*, 2013).

$$\nabla^2 \tilde{E} + \frac{\tilde{n}^2(\omega, z)}{c^2} \omega^2 \tilde{E} = 0, \quad (2.25)$$

Onde $\tilde{E}$ representa a transformada de Fourier do campo elétrico no domínio do tempo, $\tilde{n}$ é uma função periódica de z , sendo útil para expandir $\delta n_g(z)$ em uma série de Fourier.

$$\tilde{n}(\omega, z) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta n_m \exp[2\pi i m \frac{z}{\Lambda}]. \quad (2.26)$$

Incluindo as ondas propagantes (*forward*) e contrapropagantes (*backward*), que propagam-se em seus respectivos sentidos na equação 2.25.

$$\tilde{E}(r, \omega) = F(x, y) [\tilde{A}_f(z, \omega) \exp(i\beta_B z) + \tilde{A}_b(z, \omega) \exp(-i\beta_B z)]. \quad (2.27)$$

Onde $\beta_B = \frac{\pi}{\Lambda}$ é definido como o número de onda de Bragg para uma grade de primeira ordem, sendo relacionado ao comprimento de onda de Bragg $\lambda_B = 2\pi\Lambda$. Esta relação pode ser utilizada para obtenção da frequência de Bragg, tendo a seguinte formulação $\omega_B = \frac{\pi C}{\pi\Lambda}$. Considerando $\tilde{A}_f$ o sinal propagante, que também é denominado pelo termo em inglês (*forward signal*) e $\tilde{A}_b$ o sinal contra-propagante (*backward signal*), aplica-se este conceito nas Equações (2.24) e (2.27), logo, obtém-se as equações do modo acoplado (CME) no domínio da frequência.

$$\frac{\partial \tilde{A}_f}{\partial z} = i[\delta(\omega) + \Delta\beta]\tilde{A}_f + i\kappa\tilde{A}_b, \quad (2.28)$$

$$-\frac{\partial \tilde{A}_b}{\partial z} = i[\delta(\omega) + \Delta\beta]\tilde{A}_b + i\kappa\tilde{A}_f, \quad (2.29)$$

Onde $\Delta\beta$ representam os efeitos não lineares, sendo apresentados na Equação (2.35). O δ representa o coeficiente de dessintonia também conhecido pelo termo em inglês (*detuning*), e pode ser obtido através da equação abaixo.

$$\delta(\omega) = \frac{\bar{n}}{c}(\omega - \omega_B) = \beta(\omega) - \beta_B. \quad (2.30)$$

Já o termo (κ) é o coeficiente de acoplamento. Este representa o índice de acoplamento da FBG entre as ondas propagantes e contra-propagantes. Caso seja de primeira ordem será dado por:

$$\kappa = \frac{\kappa_0 \int_{-\infty}^{\infty} \delta n_1 |F(x,y)|^2 dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} |F(x,y)|^2 dx dy}, \quad (2.31)$$

Nesta forma geral, na Equação (2.31), o coeficiente κ poderá incluir mudanças de variações transversais no índice δ , devido a variações não uniformes da potência fotoinduzida no núcleo da fibra. Contudo, caso tenhamos uma FBG uniforme, o coeficiente de acoplamento κ será dado por:

$$\kappa = \frac{2\pi}{\lambda} \delta n_1, \quad (2.32)$$

Onde λ é o comprimento de onda da luz incidente e δn_1 é definido como a perturbação no índice de refração característica da FBG.

Aplicando a transformada inversa de Fourier (IFT) nas Equações (2.28) e (2.29), obtemos as Equações acopladas no domínio temporal. Segundo PINTO (2016), o termo acoplado refere-se a dependência entre os termos A_b e A_f e os seus respectivos sinais de propagação.

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_f}{\partial z} + \beta_1 \frac{\partial A_f}{\partial t} + \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A_f}{\partial t^2} - \frac{i\beta_3}{3} \frac{\partial^3 A_f}{\partial t^3} + \frac{\alpha}{2} A_f + \gamma A_f T_r \frac{|(\partial A_f)^2|}{\partial t} = \\ i\delta A_f + i\kappa A_b + i\gamma(|A_f|^2 + 2|A_b|^2)A_f + i\frac{\gamma}{\omega} \frac{|(\partial A_f)^2| A_\beta}{\partial t}, \end{aligned} \quad (2.33)$$

$$\begin{aligned} -\frac{\partial A_b}{\partial z} + \beta_1 \frac{\partial A_b}{\partial t} + \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A_b}{\partial t^2} - \frac{i\beta_3}{3} \frac{\partial^3 A_b}{\partial t^3} + \frac{\alpha}{2} A_b + \gamma A_b T_r \frac{|(\partial A_b)^2|}{\partial t} = \\ i\delta A_b + i\kappa A_f + i\gamma(|A_b|^2 + 2|A_f|^2)A_b + i\frac{\gamma}{\omega} \frac{|(\partial A_b)^2| A_\beta}{\partial t}, \end{aligned} \quad (2.34)$$

No domínio temporal aparecem outros coeficientes sendo eles: β_1 dispersão de primeira ordem, concernente a dispersão intermodal, β_2 dispersão de segunda ordem, atinente a dispersão da velocidade de grupo ou dispersão cromática (GVD) e β_3 dispersão de terceira ordem, que se refere à inclinação. Já o fator $\gamma A_f T_r$, esta ligado ao efeito de espalhamento Raman, e $\frac{\alpha}{2}$ as perdas ao longo da propagação, contudo, neste trabalho, foi considerado $\alpha = 0$, devido ao pequeno comprimento da grade 14 cm.

Os termos multiplicados por $i\gamma$, nas Equações (2.33) e (2.34), caracterizam os efeitos não-lineares de automodulação de fase (SPM) e modulação de fase cruzada (XPM). Segundo LOPES (2012), estes possuem enorme subordinação a intensidade dos pulsos propagante e contrapropagante.

E ainda, a parte da equação em que se tem $i\frac{\gamma}{\omega}$, apresenta a porção responsável pela caracterização do efeito *Self steepening*. E por último chega-se ao parâmetro de não linearidade γ , o qual foi descrito por (MATOS, 2007) e (AGRAWAL, 2011).

$$\gamma_0 = \frac{n_2 \omega_0}{c A_{eff}}, \quad (2.35)$$

Em que A_{eff} é a área efetiva do modo propagante. Quando ocorre uma exposição da fibra óptica a grandes potências de transmissão, essas sujeitam-se ao surgimento de efeitos não-lineares (PINTO, 2016).

2.4 Teoria sobre redes de Bragg em fibras ópticas

Em uma fibra óptica convencional, os índices de refração do núcleo e da casca permanecem os mesmos por todo o seu comprimento, pois mudanças podem representar desvios na propagação dos sinais luminosos e consequentemente perdas na propagação (THYAGARAJAN; GHATAK, 2007), (VIDAL, 2009) e (HUANG *et al.*, 1995). Contudo, FBG's são componentes de guia de onda com uma modulação periódica no índice de refração do núcleo da fibra (OSUCH *et al.*, 2014), (SILVA; SODRE, 2016) e (O'DWYER *et al.*, 2004), a qual utiliza-se dos princípios de espelho dielétrico, sendo capazes de provocar o espelhamento de um determinado comprimento de onda, conforme ilustrado na Figura 6. Ainda segundo AGRAWAL (2014), esta peculiaridade faz com que a grade funcione como um filtro óptico, tendo este uma banda espectral cuja maior parte da luz incidente é refletida, sendo conhecida por banda de rejeição ou banda refletida (DIAS, 2016). O comprimento da onda central refletida pela grade de Bragg λ_B é expressado por (GHOSH; ALFRED; GHOSH, 2015):

$$\Lambda[\sin\theta_i + \sin\theta_d] = \frac{\lambda_B}{n_{ef}}, \quad (2.36)$$

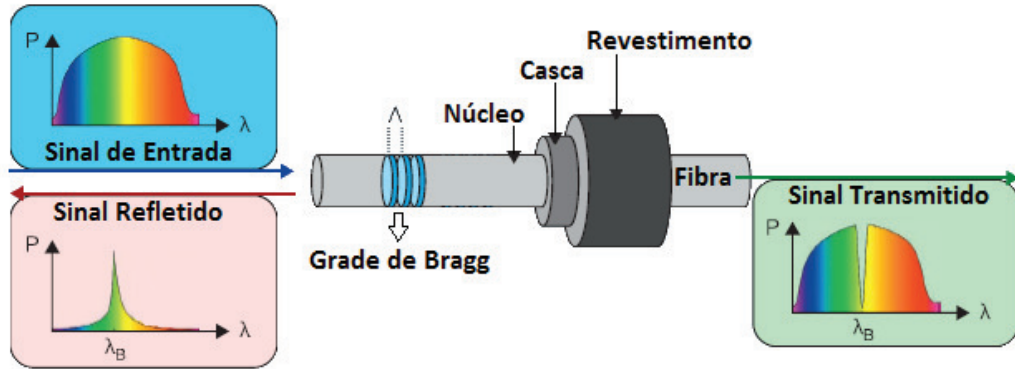
Onde n_{ef} representa o índice de refração efetivo, Λ a periodicidade da rede de Bragg, θ_i o ângulo de incidência e θ_d o ângulo de difração. Levando em consideração que uma rede de Bragg monomodo tem a propagação perpendicular ao plano do índice, encontra-se a relação de $\theta_i = \theta_d = \frac{\pi}{2}$. Logo, é possível realizar a simplificação da equação (2.36), obtendo-se a expressão (2.37), (CHEN; LIU; ZHANG, 2011), (ANTUNES; VARUM; ANDRÉ, 2011) e (JURISOVA; MULLEROVA; KOSCOVA, 2011):

$$\Lambda n_{ef}[1 + 1] = \lambda_B, \quad (2.37)$$

$$\lambda_B = 2n_{ef}\Lambda.$$

Uma aplicação comum em sistemas de comunicação óptica utiliza a grade de Bragg com uma janela de 1500 nm, para tanto, a periodicidade da modulação deverá ser $\Lambda \approx 0.5\mu m$ (NOGUEIRA, 2005).

Nas últimas décadas, a FBG tem sido massivamente pesquisada, pois apresenta grande potencial para aplicações de filtros e sensoriamento (KERSEY, 1996). Esta intervenção no núcleo da fibra pode ser feita por meio de diferentes técnicas, as quais serão abordadas com maiores detalhes na secção 2.6.

Figura 6: Ilustração conceitual da Grade de Bragg.

Fonte: BOTERO *et al.* (2017). (adaptado)

2.5 Tipos de Redes de Bragg

Para classificação e identificação dos tipos de FBG's disponíveis, deve-se observar as características inerentes aos perfis de modulação e índice de refração, sendo estes responsáveis pelas variações no núcleo da fibra. O índice geral de refração pode ser obtido a partir da Equação (2.41), (MUNIZ, 2004), (MARQUES, 2008) e (MITRA; STARK, 2001).

$$n(x) = n_0 + \Delta n, \quad (2.38)$$

Em que n_0 representa o índice inicial no núcleo da fibra e Δn a respectiva modulação, podendo ser verificada durante e após o processo de gravação na fibra. A denominação da categorização das FBG's ocorrerá em virtude deste índice.

2.5.1 Redes Uniformes

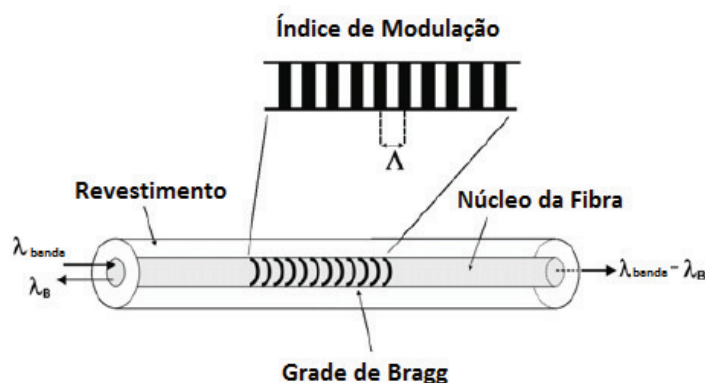
Nas FBG's configuradas como uniformes, o índice de modulação da refração permanece o mesmo ao longo do comprimento da grade, fato este que facilita a sua produção (BLACK; GAGNON, 2010), (AGRAWAL, 2001) e (MARTINS, 2016). Este padrão de modulação pode ser visualizado na Figura 7, onde percebe-se a manutenção deste mesmo índice por todo comprimento longitudinal da grade. O comportamento descrito pode ser obtido por intermédio da relação matemática a seguir (VENGHAUS, 2006).

$$n(z) = n_0 + \Delta n \left[\cos \left(\frac{2\pi z}{\Lambda} \right) \right]. \quad (2.39)$$

Onde n_0 infere o índice inicial de refração do núcleo, Δ_n a variação provocada sobre a condição inicial do índice de refração e z a posição longitudinal ao longo do eixo da fibra óptica (KEISER, 2014), (FIGUEIREDO, 2009) e (OTHONOS, 1997).

Apesar de não apresentar variação ao longo da grade, a refletividade e a largura de banda podem ser controladas por meio da variação da amplitude de modulação ou ainda pelo seu respectivo comprimento (SANTOS, 2008).

Figura 7: Ilustração conceitual da Grade de Bragg de período Uniforme.



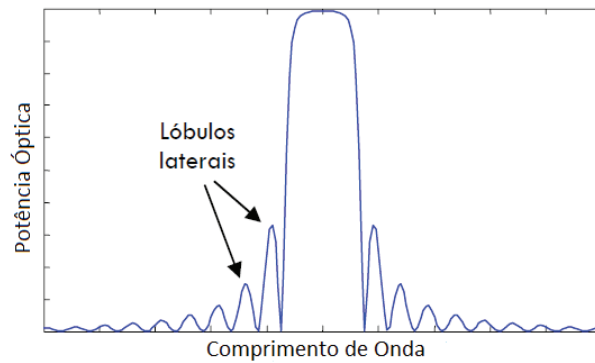
Fonte: VENGHAUS (2006). (adaptado)

Apesar das vantagens descritas acima, a FBG uniforme é geralmente utilizada para sensoriamentos simples, devido ao surgimento de lóbulos laterais de elevadas amplitudes no espectro de reflexão apresentados neste modelo de grade, podendo ser observado na Figura 8 (MARQUES, 2008) e (SANTOS, 2008). Este evento ocorre devido as bruscas mudanças entre os limites da FBG e a fibra, e o resultado negativo é o surgimento do fenômeno de diafonia, afetando os canais com medidas aproximadas ao comprimento da onda (NOGUEIRA, 2005) e (CALDEIRA, 2010).

2.5.2 Redes Aperiódicas

As redes aperiódicas, não possuem o índice de refração constante, ou seja, diferentes comprimentos de onda poderão ser refletidos ao longo da FBG (MARQUES, 2013) e (AGRAWAL, 2001). O padrão de modulação do índice de refração poderá ser linear ou não. Na Figura 9, demonstra-se a simulação das variações do índice de refração sofridas por uma FBG com perfil não linear, sendo possível observar o crescimento gradual em seu espectro, de acordo com o incremento do índice de refração inicial, representado pela variável Δ_0 .

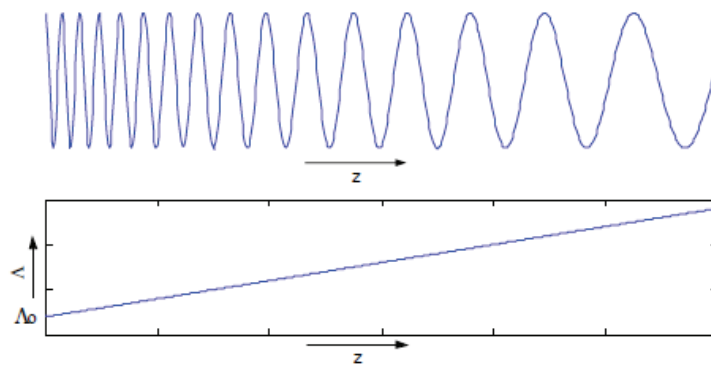
Figura 8: Exemplo de formação de lóbulos laterais em espectros de reflexão em FBG de período Uniforme.



Fonte: NOGUEIRA (2005).

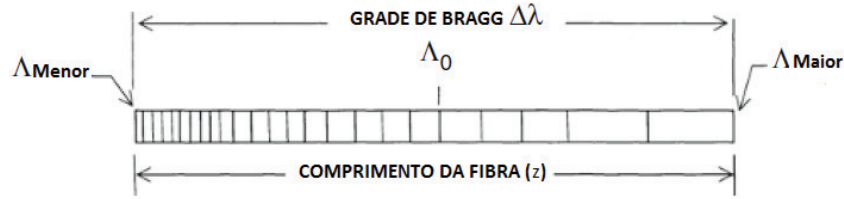
Segundo PINTO (2016), uma grade em que o inicia-se com menor Δ_0 e ao longo da fibra ocorre o seu incremento linear, estaremos diante de uma grade com o *chirp* positivo, caso aconteça o oposto, será classificada como *chirp* linearmente negativo.

Figura 9: Representação do Sinal de modulação da Grade Aperiódica Linear.



Fonte: NOGUEIRA (2005).

Contudo, como mencionado anteriormente, existem casos em que a variação neste índice de refração pode ocorrer de forma não linear, então, tem-se incrementos com valores distintos ao longo da grade. Na Figura 10, pode-se observar com maior nível de detalhe a variação do referido índice, que terá sempre como referência o parâmetro inicial Δ_0 . Ainda de acordo com MELO (2006), ao percorrer uma grade com este perfil, as ondas sofrem atrasos distintos, pois estarão submetidas ao índice variável ao longo do trajeto.

Figura 10: Princípio de funcionamento da Grade de Bragg não Uniforme.

Fonte: KASHYAP (2010). (adaptado)

Neste padrão de variação, o período do índice de refração e sua amplitude podem ser determinadas respectivamente por (MUNIZ, 2004) e (MARQUES, 2008):

$$n(z) = n_0 + \Delta n = n_0 + \delta n \left[\cos \left(\frac{2\pi z}{\Lambda(z)} \right) \right], \quad (2.40)$$

$$n(z) = n_0 + \Delta n = n_0 + \delta n(z) \left[\cos \left(\frac{2\pi z}{\Lambda} \right) \right]. \quad (2.41)$$

Ou ainda segundo NOGUEIRA (2005), poderá ser obtido por meio da forma geral expressada pela equação abaixo.

$$\Delta(x) = \Delta_0 + \Delta_1 x^2 + \Delta_2 x^3 + \dots + \Delta_n x^n. \quad (2.42)$$

Na qual Δ_0 representa o período inicial da rede e x expressa o deslocamento longitudinal no eixo da fibra.

2.6 Técnicas de Fabricação de Grades de Bragg

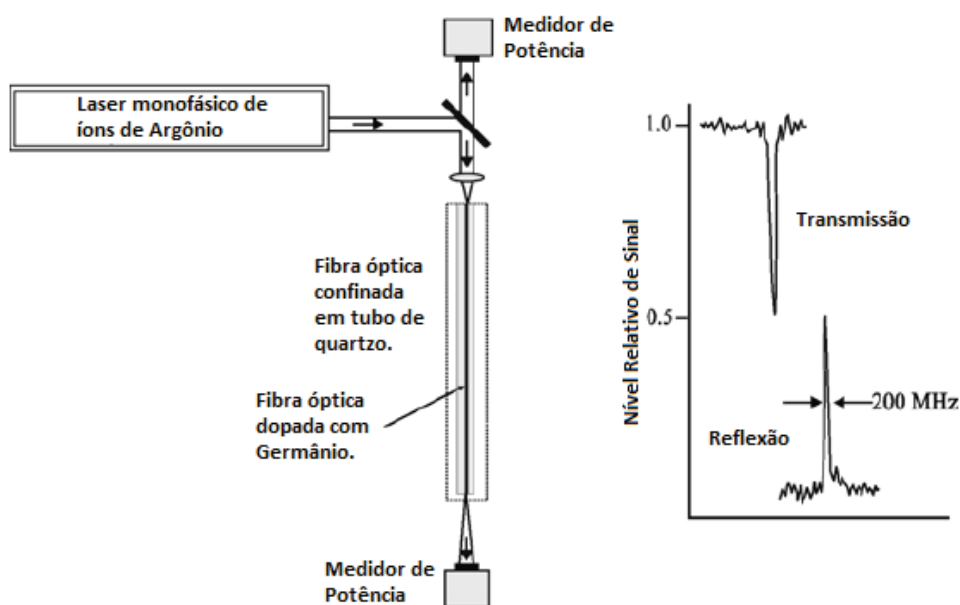
De forma resumida, grande parte das técnicas de fabricação se ligam a alteração do índice de refração de regiões do núcleo da fibra por meio de exposição deste meio a um padrão periódico de luz UV. Posteriormente, passam por um tratamento térmico, algo em torno de 300°C e 500°C, a fim de garantir a sua resistência as variações de temperatura, evitando que os padrões gravados da FBG sejam apagados da fibra com facilidade (SILVA; SODRE, 2016). De acordo com VENGHAUS (2006), dependendo da técnica aplicada na fabricação da FBG, essa poderá ser classificadas como escrita interna ou externa.

No que se refere as grades com a escrita interna, não são consideradas eficientes e exigem maior nível de complexidade para produção, além de não terem grande utilidade prática, pois geralmente possuem grande espaçamento e operam somente no mesmo comprimento de onda do laser responsável pela excitação (OLIVEIRA, 2009). Apesar dessas características, serão

abordadas para um melhor entendimento da perspectiva histórica.

As primeiras FBG's foram fabricadas através do método de escrita interna (HILL *et al.*, 1978), conforme experimento ilustrado na Figura 11. Neste experimento, um laser de argônio foi utilizado como fonte oscilando em um único modo longitudinal de 488 nm, expondo a fotossensibilidade da fibra e acoplando luz em seu núcleo. O laser incidente interferiu com a reflexão de 4 por cento (a partir da extremidade cortada da fibra) para formar inicialmente um fraco padrão de intensidade de ondas estável dentro do núcleo da fibra. Nos pontos de alta intensidade, o índice de refração na fibra fotossensível mudou permanentemente (VENGHAUS, 2006).

Figura 11: Ilustração teórica das Grades de Bragg auto-induzidas usando um laser de íon com argônio.



Fonte: VENGHAUS (2006). (adaptado)

De acordo com SILVA & SODRE (2016), os procedimentos utilizados, hoje em dia, já permitem uma alta precisão na gravação das camadas no núcleo da fibra. As FBGs fabricadas pela técnica da escrita externa apresentam diversas vantagens se comparados ao modelo anteriormente apresentado. A técnica interferométrica foi a primeira publicada pelos pesquisadores (MELTZ; MOREY; GLENN, 1989), porém, dentre os principais meios de produção, menciona-se também a máscara de fase e a técnica ponto a ponto, ambas serão melhores detalhadas no tópico a seguir.

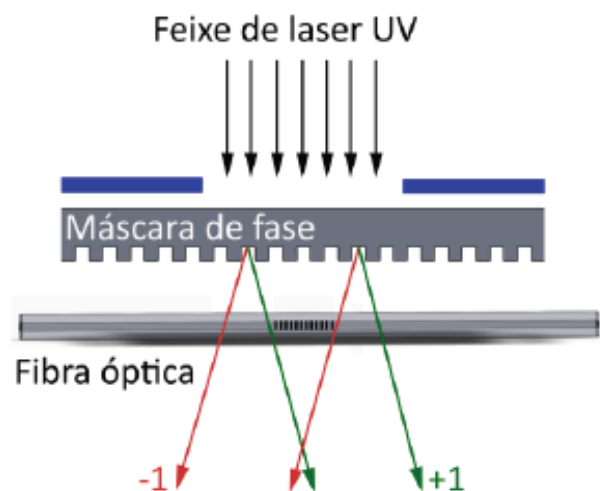
2.6.1 Método por máscara de fase

Este método é considerado um dos processos mais eficazes e práticos para a gravação de redes de Bragg em fibra óptica (ANDERSON *et al.*, 1993), (OTHONOS, 1997) e (BARBOSA; RABELO; LISBÔA, 2000). A máscara de fase que fica sobreposta a fibra consiste em um elemento de difração óptica com depressões longitudinais na superfície de um substrato de sílica, podendo ser formadas holograficamente ou por litografia de feixe de elétrons (AGRAWAL, 2001). Ainda segundo CARVALHO (2010) e OLIVEIRA (2009), ao incidir os feixes da radiação ultravioleta na máscara de fase, a radiação transmitida produz a formação de um padrão de interferência que agirá diretamente no núcleo da fibra de forma periódica, sendo expressado por Λ_{mf} , período das depressões da máscara de fase. A rede gravada no núcleo da fibra terá um espaçamento Λ que poderá ser obtido através da equação matemática 2.43, inferindo-se que a modulação de interferência será sempre a metade do período gravado na máscara de fase (OTHONOS, 1997), (MALO *et al.*, 1993) e (RUSSO; NORIEGA; DUCHOWICZ, 2011).

$$\Lambda = \frac{\Lambda_{mf}}{2}, \quad (2.43)$$

Na Figura 12, demonstra-se a montagem experimental típica usada neste procedimento. Quando a incidência é normal, o que se pretende é maximizar as ordens de difração +1 e -1 e minimizar a ordem zero (MARQUES, 2008) e (ALVES, 2007).

Figura 12: Ilustração teórica do método Máscara de fase.



Fonte: ALBERTO (2011) (Adaptado).

Pode-se apontar como uma desvantagem deste método a fixação do comprimento de onda de reflexão para cada máscara de fase, logo para produção de diferentes comprimentos faz-se necessário outras máscaras de fase (OLIVEIRA, 2009).

2.6.2 Gravação por interferômetro

A metodologia apresentada por (MELTZ; MOREY; GLENN, 1989), caracterizou um grande avanço para as FBG's. Neste processo, um feixe de radiação UV passa por um divisor de cinquenta por cento, que poderá ser de amplitude ou máscara de fase, fracionando em duas partes iguais.

Interferômetro por divisão de amplitude

A primeira parte refletirá em um espelho UV e posteriormente sobre a fibra. Já a segunda parte fará um caminho maior, como forma de compensar este percurso após ser dividida, esta passa por uma lâmina de compensação do caminho óptico. Seguidamente, reflete em um espelho UV e subsequentemente sobre a fibra, completando o ciclo e formando juntamente com o outro feixe de luz o padrão de interferência que determinará o comprimento de onda de reflexão λ_B (KASHYAP, 2010), (OLIVEIRA, 2009) e (ANTUNES, 2007). Desta forma, o padrão de interferência será (AGRAWAL, 2001):

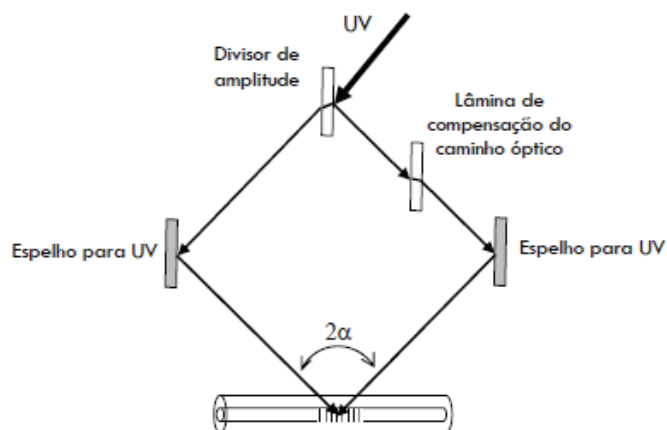
$$\Lambda = \frac{\lambda_{uv}}{2\sin\alpha}, \quad (2.44)$$

Onde λ_{uv} é o comprimento de onda do feixe UV, e α é metade do ângulo formado entre os dois feixes de radiação UV.

Na Figura 13, é possível observar o esquema prático descrito acima. Ainda segundo OLIVEIRA (2009), a luz incidente na fibra terá o seu λ_B definido pelo ângulo de 2α formado entre os feixes e o seu respectivo comprimento. Logo, pode-se obter a seguinte relação matemática (OTHONOS, 1997):

$$\lambda_B = \frac{N_{eff}\lambda_{uv}}{\sin\alpha}, \quad (2.45)$$

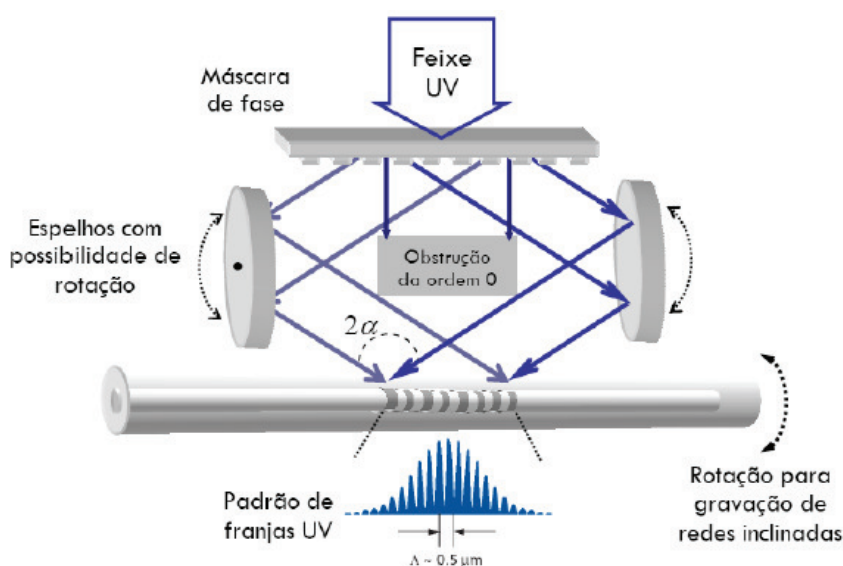
O n_{eff} representa o Índice de refração efetivo do modo guiado do feixe de radiação UV. Conforme apontado por OTHONOS (1997), MELO (2006) e MARQUES (2008), esta técnica apresenta desvantagens no aspecto prático, pois a interferência não está imune a eventuais vibrações ou até mesmo ações provocadas pela ventilação do ar, sendo necessário controles rigorosos para evitar perturbações.

Figura 13: Esquema de um interferômetro por divisão de amplitude para a gravação de redes de Bragg.

Fonte: NOGUEIRA (2005).

Interferômetro com máscara de fase

Neste procedimento, a máscara de fase é o elemento divisor dos feixes UV (ALBERTO, 2011), contudo ainda temos a combinação da interferometria (OLIVEIRA, 2009) e (PAIXÃO, 2016). Assim como ocorre no processo anterior, após a divisão dos feixes UV, esses são refletidos, porém apenas os de ordens -1 e +1 são transmitidos, sendo desprezados os demais. Em seguida, são refletidos pelo espelho para radiação UV e continuam seu fluxo para irradiação sobre o núcleo da fibra fotossensibilizada, iniciando o processo de gravação (SANTOS, 2008), (KASHYAP, 2010) e (AGRAWAL, 2001). A Figura 14, mostra a representação desse método.

Figura 14: Representação do método de gravação de redes de Bragg por interferômetro com máscara de fase.

Fonte: SANTOS (2008).

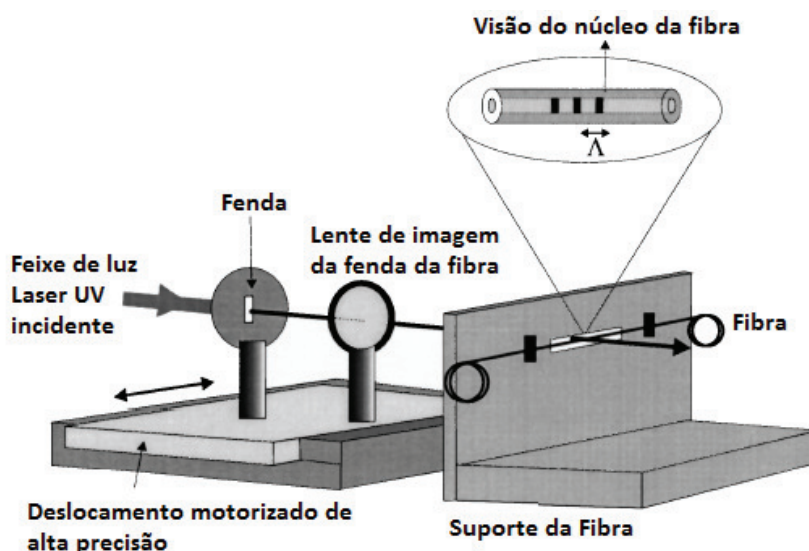
2.6.3 Gravação por ponto a ponto

O método ponto a ponto para fabricação das FBG's ocorre por meio da incidência do feixe de luz UV de forma individualizada na construção de cada ponto da grade, produzindo a alteração no núcleo da fibra fotossensível (VENGHAUS, 2006) e (ALBERTO, 2011). Portanto, quando um ponto é finalizado, realiza-se o deslocamento referente ao tamanho do período λ_B , reiniciando o procedimento de gravação.

A Figura 15 demonstra o esquema prático referente a essa metodologia, sendo possível verificar que trata-se de um procedimento em série, iniciando pelo feixe de luz UV, passando pela fenda, logo em seguida pela lente de imagem e finalmente ao núcleo da fibra através da venda no suporte desta.

Conforme descrito por OTHONOS (1997), a principal vantagem desse sistema é a facilidade em alterar o comprimento ou período da rede, por meio do distanciamento dado a cada passo. Contudo, existem pontos negativos relevantes, dentre eles pode-se mencionar a necessidade de controle de variáveis como: vibração, vento e quaisquer outras que possam vir a interferir na precisão do deslocamento translacional, que neste caso necessita ser de altíssima precisão (OTHONOS, 1997), (ANTUNES, 2007) e (SILVA, 2007).

Figura 15: Ilustração teórica do método Ponto a Ponto.



Fonte: OTHONOS (1997). (Adaptado)

2.7 Aplicações de Grades de Bragg

São inúmeras as aplicações mencionadas para esta solução tecnológica, dentre as quais destaca-se a finalidade de sensoriamento. Conforme estudo apresentado por (DONG *et al.*, 2011), é possível a medição de diversos parâmetros físicos, tais como: corrente, tensão, resistência, temperatura, pressão, vibração, ruído, dentre outros. Já (KALINOWSKI *et al.*, 2010), destacou as aplicações para o seguimento da biomedicina e biomecânica, mencionando diversas possibilidades de aplicações específicas a área de saúde, devido a alta precisão dos valores coletados e as reduzidas dimensões da sua estrutura.

Ainda segundo FIGUEIREDO (2009), VASILEV *et al.* (2005) e GAN *et al.* (2016), algumas características destacam as FBG's como ideais para aplicações em redes de telecomunicações e sensoriamento, dentre elas estão: imunidade a interferências electromagnéticas, dimensões e peso reduzidos, baixas perdas de transmissão e inserção, isolamento elétrico, sensibilidade elevada, baixo custo de implementação, além de possibilitar a monitorização remota.

Por fim, cita-se as possibilidades apontadas pelos renomados pesquisadores (HILL; MELTZ, 1997), os pioneiros desta tecnologia que elencaram as possibilidades de aplicação em redes de telecomunicações como filtros de banda de rejeição, elemento para compensação dos efeitos dispersivos, monitoramento da rede óptica, e, ainda como conversores, dispositivos de comutação e armazenamento óptico.

2.8 Bandgap Fotônico

O *Bandgap* Fotônico, também conhecido por *Stop Band*, pode ser traduzido como uma faixa de banda proibida, onde determinada gama de comprimento de onda não será propagado (AGRAWAL, 2001), (KNIGHT *et al.*, 1998) e (SILVA JR, 2011). Apesar do enorme êxito nas aplicações de telecomunicações obtido pelas fibras composta por sílica, existem algumas faixas onde este material apresenta limitações, principalmente em decorrência dos efeitos não lineares, pois estes podem aumentar as atenuações e limitar a potência do sinal transmitido (TEMELKURAN *et al.*, 2002), (PIRES, 2013) e (SILVA, 2008).

Logo, em decorrência do fato narrado, houve a necessidade de melhorar o meio condutor, sendo ampliado os estudos na tentativa de reduzir a incidência dessas grandezas, visando oportunizar novos horizontes para expansão e desenvolvimento de novas aplicações. Meramente a título de exemplificação, a fibra de cristal fotônico surgiu de forma muito

promissora para solucionar esta questão, devido ao seu alto índice de transparência e as diferentes configurações para o guiamento de onda (LITCHINITSER *et al.*, 2002), (PISCO; CUSANO; CUTOLO, 2012) e (ALBERTO, 2011).

Para uma melhor compreensão matemática sobre o tema deste tópico, será demonstrado inicialmente o caso linear da FBG, o qual trabalha-se com a CME no domínio da frequência e despreza-se o termo γ , relacionado aos efeitos não lineares. Isto possibilitará a obtenção da assimilação básica para casos de maior complexidade. Desta forma, aplica-se este conceito as Equações (2.28) e (2.29), obtendo a relação inicial (AGRAWAL, 2001).

$$\frac{\partial \tilde{A}_f}{\partial z} = i\delta \tilde{A}_f + i\kappa \tilde{A}_b, \quad (2.46)$$

$$\frac{\partial \tilde{A}_b}{\partial z} = -i\delta \tilde{A}_b - i\kappa \tilde{A}_f. \quad (2.47)$$

Levando em consideração o resultado do coeficiente $\delta(\omega)$, previamente demonstrado na Equação (2.30), chega-se a solução geral para as Equações lineares (2.46) e (2.47), respectivamente.

$$\tilde{A}_f = A_1 e^{iqz} + A_2 e^{-iqz}, \quad (2.48)$$

$$\tilde{A}_b = B_1 e^{iqz} + B_2 e^{-iqz}. \quad (2.49)$$

O termo q expressado nas Equações (2.48) e (2.49), deverá ser definido. Conforme descrito por (AGRAWAL, 2001), as variáveis A_1 , A_2 , B_1 , B_2 estão ligadas entre si, assumindo uma relação de interdependência, logo, quando são aplicadas nas Equações (2.46) e (2.47), obtém-se as suas respectivas relações para valores distintos de zero.

$$(q + \delta)B_1 = -\kappa A_1, \quad (2.50)$$

$$(q - \delta)B_2 = \kappa A_2, \quad (2.51)$$

$$(q - \delta)A_1 = \kappa B_1, \quad (2.52)$$

$$(q + \delta)A_2 = -\kappa B_2. \quad (2.53)$$

Prontamente, pode-se aferir destes resultados a relação de dispersão, sendo obtida através do resultado entre a multiplicação dos termos (2.50) por (2.52) ou (2.51) por (2.53), resultando na expressão (2.54).

$$q = \pm(\delta^2 - \kappa^2)^{\frac{1}{2}}, \quad (2.54)$$

Reescrevendo a equação em termos gerais de um coeficiente de reflexão efetivo,

denominado por $r(q)$, e utilizando as equações anteriores para eliminar os termos A_2 e B_1 , substituindo nas expressões (2.48) e (2.49), encontram-se as seguintes relações:

$$\tilde{A}_f = A_1 e^{iqz} + r(q) B_2 e^{-iqz}, \quad (2.55)$$

$$\tilde{A}_b = B_2 e^{-iqz} + r(q) A_1 e^{iqz}. \quad (2.56)$$

$$r(q) = \frac{q - \delta}{\kappa} = -\frac{\kappa}{q + \delta}. \quad (2.57)$$

Caso o coeficiente de dessintonia δ operando dentro das faixas $-\kappa < \delta < \kappa$, denota-se q sendo puramente fictício. Essa característica faz com que grande parte do sinal da onda propagada seja refletida pela FBG, não sendo comportada por esta. Logo, pode-se afirmar que a referida faixa de frequência representa a faixa de banda proibida, pois ao alcançar esses valores o sinal não será mais transmitido.

Para que seja possível melhorar esse entendimento sobre o espalhamento nos limites da faixa de proibição, deve-se analisar a efetiva propagação das ondas propagantes e contrapropagantes.

$$\beta_e = \beta_B \pm q, \quad (2.58)$$

Onde q poderá ser obtido por meio da equação 2.54, tendo este sujeição tácita a frequência do termo δ . Já a variável β_e demonstrará os efeitos dispersivos de uma FBG, mesmo que essa não tenha sido fabricada em um meio com tal peculiaridade. Isso significa que a FBG, independentemente de ser fabricada em um meio não-dispersivo, apresentará características dispersivas. Portanto, considerando essa prevalência da FBG e os respectivos efeitos de dispersão, pode-se expandir o termo β_e em uma série de Taylor.

$$\beta_e = \beta_0^g + (\omega - \omega_0) \beta_1^g + \frac{1}{2} (\omega - \omega_0)^2 \beta_2^g + \frac{1}{6} (\omega - \omega_0)^3 \beta_3^g + \dots \quad (2.59)$$

Onde tem-se β_m^g como o termo geral, sendo $(m)=0,1,2,3,\dots$, conforme desenvolvimento matemático. Ainda podendo denotar o termo principal como:

$$\beta_m^g = \frac{d^m q}{d\omega^m} \approx \left(\frac{1}{v_g} \right)^m \frac{d^m q}{d\delta^m}, \quad (2.60)$$

No qual o termo g representa o início do efeito dispersivo na FBG, a condição $\omega = \omega_0$ é aplicada nas derivadas e a variável v_g , por fim, esta relacionada a velocidade de grupo do sinal luminoso quando na ausência da FBG, logo, $\kappa = 0$, apesar deste termo ter sido desconsiderado na equação 2.60, pode-se obtê-lo inicialmente considerando o valor de $V_g = \frac{1}{\beta_1^g}$, aplicando este

ao primeiro termo da série.

$$V_G = \pm v_g \left[1 - \left(\frac{\kappa}{\delta} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (2.61)$$

A variação do sinal $\pm$ ocorrerá em virtude da classificação da onda, se esta for propagante ou contrapropagante. No que refere-se a variável $|\delta|$, o pulso propagado não será afetado pela FBG se este atender a condição $|\delta| \gg \kappa$, sendo transmitido como se não houvesse a grade de Bragg. Contudo, ao passo que o $|\delta|$ tende aos valores de κ , aproximando-se matematicamente, a velocidade de grupo é diretamente impactada, e será reduzida gradualmente a medida que o resultado seja $|\delta| = \kappa$, onde teremos a faixa de banda proibida.

Os termos da série, β_2^g e β_3^g , representam as dispersões de segunda e terceira ordem, respectivamente. Por intermédio da equação 2.60, obtém-se:

$$\beta_2^g = -\frac{\text{sgn}(\delta) \frac{\kappa^2}{v_g^2}}{(\delta^2 - \kappa^2)^{\frac{3}{2}}}, \quad \beta_3^g = \frac{3|\delta| \frac{\kappa^2}{v_g^3}}{(\delta^2 - \kappa^2)^{\frac{5}{2}}}. \quad (2.62)$$

O parâmetro β_2^g , dispersão de velocidade do grupo (GVD), dependerá dos valores do coeficiente de dessintonia δ , para determinar a sua condição de dispersão. Caso tenhamos δ representado por valores negativos, estaremos diante de um caso normalizado, contudo no cenário oposto, para valores positivos teremos a ocorrência de uma GVD atípica. Logo, depreende-se que a região espectral do pulso será determinante para que este seja transmitido. Ocorrerá uma transmissão parcial do sinal quando este incidir apenas de forma incompleta dentro da zona de *bandgap* fotônico. Agora, nos casos em que o sinal incidir unicamente na referida faixa de banda proibida, tem-se a reflexão total do pulso.

2.9 Biestabilidade Óptica

A biestabilidade óptica é um fenômeno não linear, que pode ser descrita como a exposição mais simples dos efeitos não-lineares (GIBBS, 1985). Este fenômeno foi demonstrado inicialmente pelos pesquisadores GIBBS; MCCALL; VENKATESANF, no ano de 1976, que por meio de um trabalho científico, demonstraram através de um interferômetro de Fabry-Perot, os diferentes ganhos e comportamentos da biestabilidade óptica em um meio puramente dispersivo.

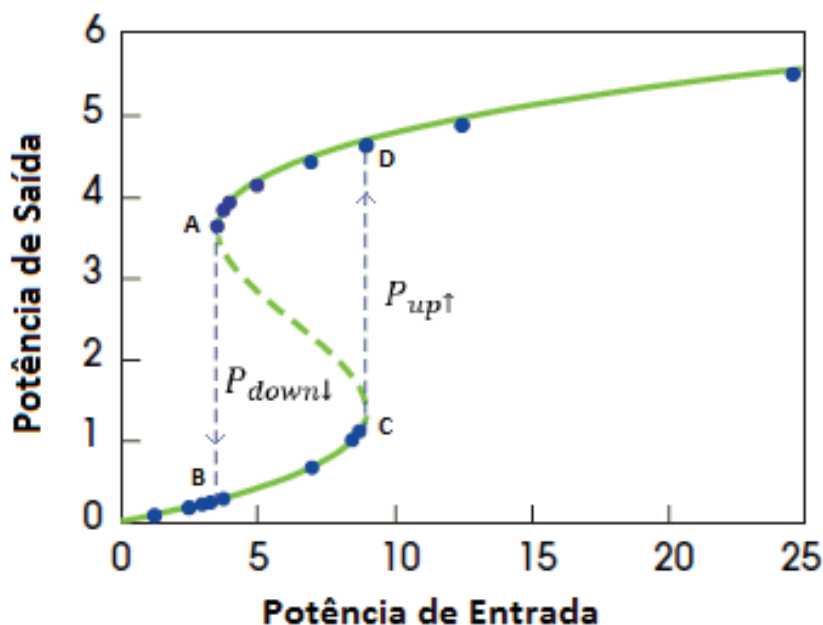
Conforme descrito por AGRAWAL (2001), podem ser utilizadas para criação de dispositivos de chaveamento e processamento óptico de alta eficiência. Ainda de acordo com JOANNOPOULOS *et al.* (2008), SONG & YUAN CHENG (1999) e JURISOVA,

MULLEROVA & KOSCOVA (2011), para que um sistema seja considerado biestável este deverá ter dois valores de potência de saída para o mesmo valor de potência de entrada, ou seja, as saídas possuem valores de entrada idênticos, e ainda pode-se afirmar que isto ocorre devido a transição de energia proveniente da luz emitida e o meio óptico não linear responsável pela transmissão (COTTA, 2008).

Para um melhor entendimento pode-se verificar o exemplo na Figura 16, cujo formato é uma curva que nos remete a forma de "S", e nas suas extremidades estão os pontos chamados de saltos de potência, sendo tracejado uma linha até o ponto correspondente ao mesmo sinal de entrada, caracterizando as diferentes intensidades de potência. Fato este que difere dos dispositivos lineares, pois nestes a potência de saída será sempre representada por uma função linear da potência de entrada. Conforme ilustrado na Figura 16, o caminho percorrido do ponto (A) ao ponto (B) representa o salto de potência P_{down} . Já o percurso realizado do ponto (C) ao ponto (D) nos dará o salto de potência P_{up} .

Segundo GIBBS (1985) e COELHO JR (2010), a não linearidade de um sistema por si só não poderá garantir que o mesmo seja biestável.

Figura 16: Gráfico de ilustração da Biestabilidade óptica.



Fonte: JOANNOPOULOS *et al.* (2008). (adaptado)

SHI (1995), por intermédio da equação do modo acoplado, demonstrou a eficiência de uma FBG uniforme em comparação a conversores não lineares por intermédio das curvas da biestabilidade óptica, sendo possível analisar a relação entre as potências de entrada e saída, bem como as respectivas curvas de refletividade.

ZHANG & SONG (1997) propuseram a utilização de um segmento de fibra óptica dopada com Érbio, contendo em ambas extremidades FBG, visando obter um dispositivo de biestabilidade óptica de baixa potência e alta velocidade.

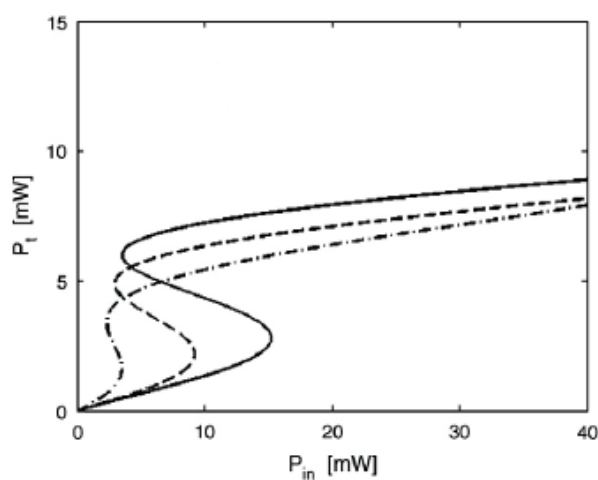
YOSIAA & PING (2007), por meio de simulações numéricas, comprovaram a existência de fenômenos de dupla biestabilidade óptica na transmissão de pulsos contínuos não lineares em FBG com deslocamento de fase, tendo como origem apenas uma única fonte de ressonância, em virtude das propriedades do calcogênio, que apresenta características não lineares. Sendo ainda demonstrada a possibilidade de aplicação da biestabilidade óptica em transistores.

PAKDEEVANICH & ADAMS (2000) realizou um estudo sobre as medidas de potências em um laser semiconductor para análise do comportamento da biestabilidade óptica dispersiva, para que fosse possível identificar as melhores zonas de atuação.

TIAN (2011) apresentou um estudo sobre a biestabilidade óptica em grades de Bragg não lineares, onde foram comprovadas as vantagens na utilização de *chirp* positivos e negativos nas FBG para obtenção de maiores amplitudes da faixa de comprimento de onda da biestabilidade óptica, sendo validado também novos limites para a comutação dos sinais.

ZANG (2012) demonstrou um novo modelo de biestabilidade óptica utilizando uma fibra dopado com Érbio desempenhando uma função de Fabry-Perot e nas suas extremidades duas FBG idênticas, sendo exposto a redução da potência de comutação limiar e a melhora no tempo de resposta do sistema na ordem de picosegundos. Um dos gráficos obtidos neste estudo é ilustrado na Figura 17.

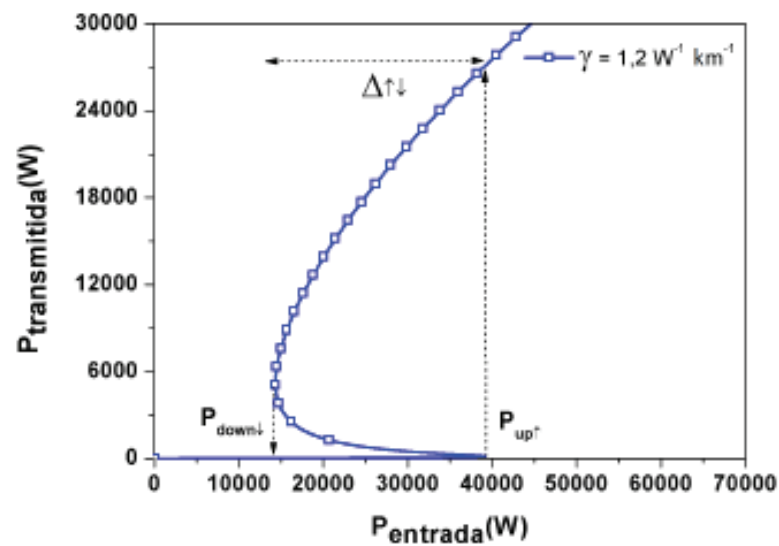
Figura 17: Gráfico de biestabilidade óptica com diferentes valores de *detuning*.



Fonte: ZANG (2012).

PINTO (2016) apresentou um estudo onde foram analisados os diferentes comportamentos da biestabilidade óptica em grades de Bragg com regime de não linearidade, sendo considerados os diversos perfis de crescimento e decrescimento desta variável, também ilustrando as suas respectivas curvas para potências de subida e descida, bem como os gráficos para os diversos modos de refletividade, visando comprovar as melhores soluções para chaveamento fotônico de alto rendimento, como pode-se visualizar na Figura 18.

Figura 18: Gráfico de ilustração da Biestabilidade óptica para uma FBG com coeficiente de não linearidade $\gamma = 1,2 \text{ W}^{-1} \text{ Km}^{-1}$.



Fonte: PINTO (2016).

METODOLOGIA

3.1 Metodologia

Nesta pesquisa, foram realizados estudos de várias literaturas relativas ao assunto FBG e aos seus temas correlatos, tendo sua fundamentação teórica sido estruturada com base em informações obtidas de materiais científicos, como livros, artigos, dissertações de Mestrado e teses de Doutorado, utilizados como sustentação para os conhecimentos necessários à realização de simulações por meio de *softwares*, coleta e análise dos dados. O Matlab (versão R2014a e licença 898894) foi o *software* utilizado para realizar os cálculos numéricos com base no método de Runge-Kutta de quarta ordem, sendo avaliado os resultados desta simulação para cada um dos diferentes cenários descritos nas subseções 3.1.1 e 3.1.2, deste trabalho.

3.1.1 Grade com assimetria longitudinal do parâmetro de não linearidade em fibra convencional utilizando pulsos na ordem de picossegundos

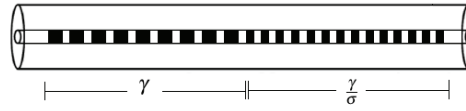
Na simulação deste tópico 3.1.1, considerou-se a criação de duas FBG's distintas, ambas sob a influência dos efeitos lineares e não lineares. Entretanto, devido a largura adotada para a meia altura do pulso no domínio do tempo, sendo parametrizada na ordem de picossegundos, mais precisamente $132,2 \times 10^{-12} ps$, serão considerados apenas efeitos lineares e os efeitos não lineares: SPM e XPM. A janela temporal foi ajustada na ordem de $50 \times 10^{-9} s$. As FBG's foram definidas com o comprimento total de 14 cm. Devido ao pequeno comprimento, desprezou-se o fator de atenuação, considerando $\alpha = 0$. Para que fosse possível trabalhar o parâmetro de não linearidade na mesma grade, realizou-se a divisão desta em duas partes iguais, contendo 7 cm cada, sendo atribuídos diferentes valores de não linearidade γ para cada segmento.

Na primeira FBG, ilustrada na Figura 19, determinou-se o valor da não linearidade γ para a primeira parcela da extensão longitudinal e o termo $\frac{\gamma}{\sigma}$ para a segunda metade, tendo como objetivo variar os valores do denominador σ de 1 a 10, e analisar o comportamento da biestabilidade óptica para as diferentes variações do índice de não linearidade em decorrência desta alteração do fator de divisão, sendo rodado o programa para cada alteração do valor de σ .

O índice de refração resultante da divisão $\frac{\gamma}{\sigma}$, será representado pela variável $\text{Psi}(\psi)$.

No que se refere ao valor do comprimento da onda, estabeleceu-se em 1550 nm . Adotou-se a potência inicial $P_0 = 10 \text{ } \mu\text{W}$ e potência máxima em $P_{\text{max}} = 2 \text{ kW}$, e ainda para que fosse possível obter maior precisão na verificação dos resultados, utilizou-se o passo da potência a cada 250 mW . O valor determinado para o índice de refração foi de $1,452$ e o parâmetro de acoplamento $\kappa = 500 \text{ m}^{-1}$. A dispersão de primeira ordem β_1 e segunda ordem β_2 foram configuradas com os valores $4,9 \times 10^{-12} \frac{\text{s}}{\text{m}}$ e $-21 \times 10^{-27} \frac{\text{s}^2}{\text{m}}$, respectivamente.

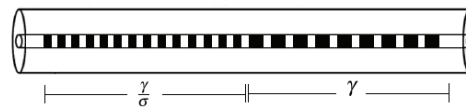
Figura 19: Grade aperiódica de Bragg composta pela primeira metade por um período γ e a segunda metade por $\frac{\gamma}{\sigma}$.



Fonte: o próprio autor.

Já para a segunda FBG, foram aplicadas a situação oposta, que se estabeleceu para a parte inicial a fração $\frac{\gamma}{\sigma}$, mantendo o mesmo objetivo de variar os respectivos valores de sigma entre os denominadores de 1 a 10, e analisar os distintos comportamentos da biestabilidade óptica para cada situação. Assim como proposto anteriormente, o índice de refração resultante da divisão $\frac{\gamma}{\sigma}$, será representado pela variável $\text{Psi}(\psi)$. Para a segunda metade do comprimento longitudinal, fixou-se o valor γ , podendo ser visualizada na Figura 20.

Figura 20: Grade aperiódica de Bragg composta pela primeira metade por um período $\frac{\gamma}{\sigma}$ e a segunda metade por γ .



Fonte: o próprio autor.

3.1.2 Grade com assimetria longitudinal do parâmetro de não linearidade considerando os efeitos de alta ordem

Na simulação deste tópico 3.1.2, foram utilizados ambos os cenários propostos nos tópicos 3.1.1, porém alterando a largura do comprimento de onda do pulso no domínio do tempo, que agora passou a ser na ordem de femtosegundos, mais especificamente de $132,2 \times 10^{-15} \text{ fs}$. Logo, devido a alteração deste fator, além dos efeitos não lineares SPM e XPM, foram

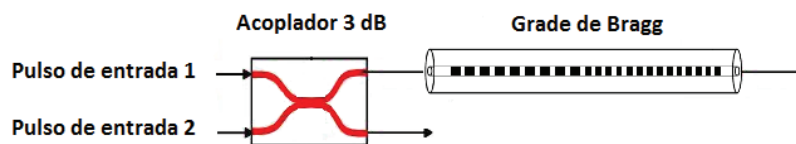
acrescentados os efeitos *self steepening*, espalhamento Raman, cujo valor do seu parâmetro ficou estabelecido em $3 \times 10^{-15} s$. A dispersão de primeira ordem β_1 , segunda ordem β_2 e terceira ordem β_3 foram configuradas com os valores $4,9 \times 10^{-12} \frac{s}{m}$, $-21 \times 10^{-27} \frac{s^2}{m}$ e $-0,1 \times 10^{-39} \frac{s^3}{m}$, respectivamente.

A janela temporal foi mantida em $50 \times 10^{-9} s$. O comprimento das FBG's permaneceram em 14 cm. Logo, como no experimento anterior, devido ao pequeno comprimento, desprezou-se o fator de atenuação, considerando $\alpha = 0$. No que se refere ao valor do comprimento da onda, estabeleceu-se em 1550 nm. Adotou-se a potência inicial $P_0 = 1 W$ e potência máxima em $P_{max} = 2 kW$. O passo de potência ficou ajustado a cada 1 W. O valor determinado para o índice de refração foi de 1,452 e o parâmetro de acoplamento $\kappa = 500 m^{-1}$. Conforme proposto nas Figuras 19 e 20, os valores de (σ) também foram alterados de 1 a 10, sendo validados para cada cenário através do Matlab (versão R2014a e licença 898894). Essas análises e resultados poderão ser melhor avaliados no capítulo 4.

3.1.3 Obtenção de portas lógicas

No que se refere à obtenção das portas lógicas de alta eficiência, foi adotado o procedimento ilustrado na Figura 21. Primeiramente, considerou-se a utilização de um acoplador de 3 dB, onde as potências dos pulsos inseridos nas entradas são somados. Na saída do acoplador essa somatória inicial é dividida pelo número de entradas, ou seja, nesse caso, por dois. De posse dessas informações, foram utilizados os valores dos saltos de potência obtidos nos gráficos da biestabilidade óptica. No qual, por meio de análises, foi possível identificar a necessidade de duplicação dos valores de potência de entrada registrados no eixo $P_{in}(W)$, objetivando compensar a divisão na saída do acoplador e consequentemente alcançar os valores imprescindíveis ao surgimento dos comportamentos de descida ($P_{down} \downarrow$) e subida ($P_{up} \uparrow$). Objetivando realizar o mapeamento dessas potências, foi trabalhada uma relação entre as potências registradas no eixo $P_{in}(W)$ e os seus respectivos resultados no eixo $P_{out}(W)$, conforme detalhado nos tópicos a seguir.

Figura 21: Estrutura lógica para obtenção das portas *And* e *Or*.



Fonte: o próprio autor.

RESULTADOS OBTIDOS NA SIMULAÇÃO

4.1 Resultados com largura de pulso na ordem de picosegundos

Neste tópico, foram utilizados os parâmetros apresentados na secção 3.1.1, onde se trabalha apenas com pulsos na ordem de picosegundos. Devido utilizar-se esta largura de comprimento de onda, não haverá a incidência dos efeitos de alta ordem.

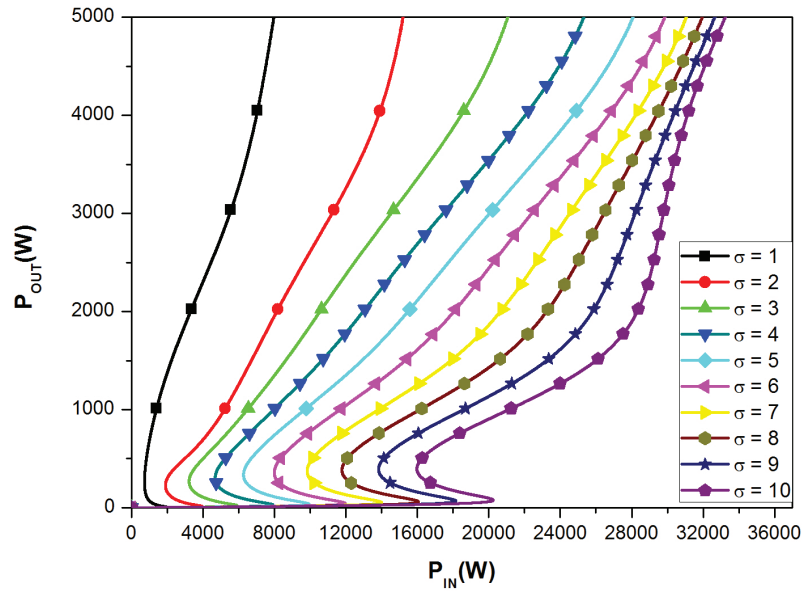
4.1.1 Análise dos resultados do perfil de Biestabilidade

Neste estudo, considerou-se o eixo $P_{out}(W)$, como referencial para obtenção das potências descida de ($P_{down} \downarrow$) e subida ($P_{up} \uparrow$). Já para avaliar o espaçamento entre essas potências foi adotado o eixo $P_{in}(W)$, onde é possível analisar o distanciamento entre essas variáveis.

Primeira parte da FBG com não linearidade igual a γ e a segunda metade igual a $\frac{\gamma}{\sigma}$

Para a primeira versão de FBG proposta, onde está a primeira parte do comprimento longitudinal fixada pelo parâmetro de não linearidade γ e a segunda metade pelo índice $\frac{\gamma}{\sigma}$, foram observadas a ocorrência de apenas uma curva de biestabilidade para cada valor de sigma σ . Essas curvas ficaram localizadas aproximadamente entre potências de saída 0 W e 100 W do eixo $P_{out}(W)$. Este comportamento pode ser verificado por meio da Figura 22.

Vale observar que ao diminuir a não linearidade na segunda metade da FBG as potências de descida ($P_{down} \downarrow$) são aumentadas, exceto quando utilizou-se ($\frac{\gamma}{2}$), onde ocorreu uma leve redução deste valor. O mesmo comportamento foi registrado para as potências de subida ($P_{up} \uparrow$), que ao passo que os valores de sigma σ foram aumentados e consequentemente reduziu-se a não linearidade, foi constatado um crescimento de cerca de 8 W a cada incremento neste parâmetro. De posse desta informação, visando a melhor análise dos dados, montou-se a Tabela 1, onde atribuiu-se os valores de $P_{up} \uparrow$ e $P_{down} \downarrow$ para cada valor de sigma σ .

Figura 22: Curvas da Biestabilidade óptica para o primeiro modelo de FBG, apresentada na Figura 19.

Fonte: o próprio autor.

Tabela 1: Valores de $P_{up}\uparrow$ e $P_{down}\downarrow$ para FBG com perfil assimétrico de não linearidade, sendo composta pela primeira metade por γ e a segunda metade por $\frac{\gamma}{\sigma}$.

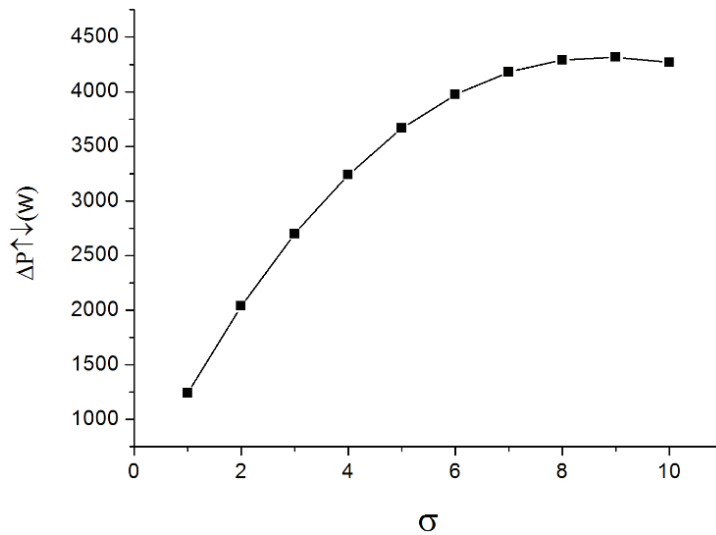
BIESTABILIDADE 1			
Sigma(σ)	Psi(ψ)	Pdown $\downarrow$ (w)	Pup $\uparrow$ (w)
1	1,452	262,07	7,08
2	0,726	226,65	15,17
3	0,484	267,13	22,26
4	0,363	303,55	29,59
5	0,290	334,92	37,43
6	0,242	356,68	45,02
7	0,207	372,36	52,86
8	0,181	383,49	60,71
9	0,161	391,59	68,80
10	0,145	396,14	77,15

Fonte: o próprio autor.

Logo, de posse dessas informações, chega-se a mais um importante parâmetro, o delta de potência ($\Delta P \uparrow \downarrow$), fator este que é calculado pela diferença entre as potências ($P_{up} \uparrow$) e ($P_{down} \downarrow$), porém se utiliza como referência o eixo $P_{in}(W)$, pois agora é necessário avaliar o distanciamento entre esses pontos. Este espaçamento é de extrema relevância para análise do nível de segurança ao utilizar portas lógicas, mais especificamente para realização de chaveamento óptico, pois quanto maior essa diferença, maior certeza há a respeito do nível lógico deste dispositivo.

Conforme é possível observar na Tabela 2, foram coletados os valores mencionados e posteriormente, realizou-se a operação matemática para obtenção dos seus respectivos deltas de potência, possibilitando traçar a curva $\Delta P \uparrow \downarrow (W)$ para a biestabilidade 1, apresentada no primeiro caso, tendo a sua representação demonstrada por meio da Figura 23.

Figura 23: Curva delta de potência obtida em FBG com perfil assimétrico de não linearidade, sendo composta pela primeira metade por um período γ e a segunda metade por $\frac{\gamma}{\sigma}$.



Fonte: o próprio autor.

Nota-se que a variação da potência retratada no gráfico pela variável $\Delta P \uparrow \downarrow (W)$ é incrementada conforme se reduz o parâmetro de não linearidade da segunda metade da FBG, ou seja, ao passo que se aumenta o valor de sigma σ , obtém-se maiores janelas de potência entre $P_{up} \uparrow$ e $P_{down} \downarrow$. Garantindo assim, maior segurança para realização de chaveamento óptico.

Ainda, o gráfico aponta que quando existe um perfil de não linearidade igual a γ ao longo de todo o comprimento longitudinal da FBG, isto é, considerando sigma $\sigma = 1$, os valores de gatilho de $P_{up} \uparrow$ e $P_{down} \downarrow$ são mais próximos. Neste caso, foi encontrado o valor de $\Delta P \uparrow \downarrow = 1.241,2464 W$. Já para a condição em que $\sigma = 10$, encontrou-se $\Delta P \uparrow \downarrow = 4.266,59 W$, sendo identificada, desta forma, uma faixa com 3.025,35 W de adicionais entre $P_{up} \uparrow$ e $P_{down} \downarrow$.

Tabela 2: Valores de $P_{up}\uparrow$ e $P_{down}\downarrow$ para FBG com perfil assimétrico de não linearidade, sendo composta pela primeira metade por γ e a segunda metade por $\frac{\gamma}{\sigma}$, tendo como referencial o eixo $P_{IN}(W)$.

BIESTABILIDADE 1 - DELTA DE POTÊNCIA				
Sigma(σ)	Psi(ψ)	Pdown $\downarrow$ (W)	Pup $\uparrow$ (W)	$\Delta P \uparrow\downarrow$ (W)
1	1,452	715,75	1.957,00	1.241,24
2	0,726	1.894,12	3.928,05	2.033,93
3	0,484	3.216,01	5.914,88	2.698,86
4	0,363	4.674,36	7.915,15	3.240,47
5	0,290	6.266,27	9.930,08	3.663,81
6	0,242	9.832,09	13.908,08	3.973,44
7	0,207	9.826,30	14.005,51	4.179,14
8	0,181	11.776,65	16.066,64	4.289,99
9	0,161	13.827,73	18.143,97	4.316,24
10	0,145	15.970,51	20.237,97	4.266,59

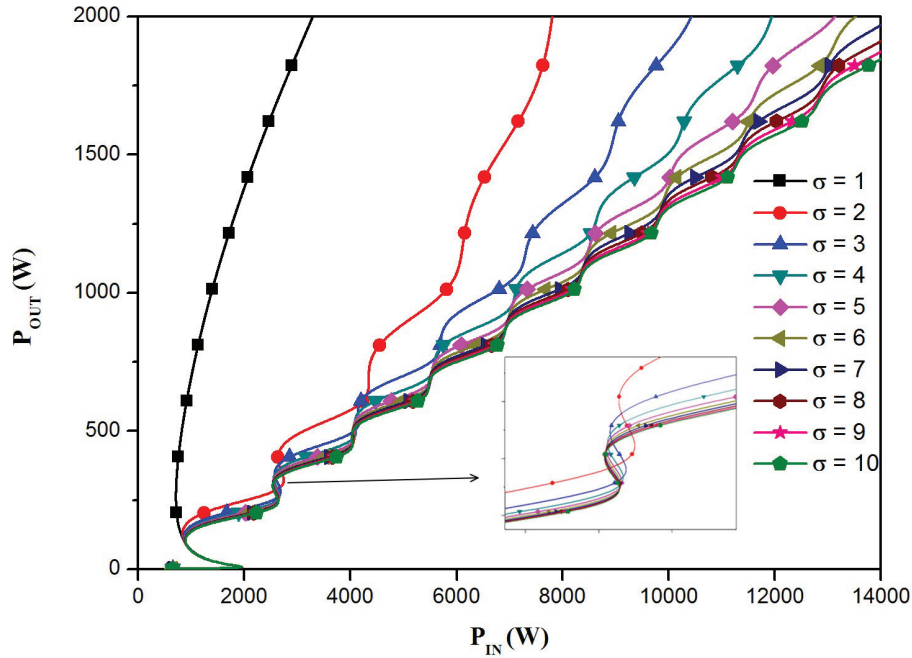
Fonte: o próprio autor.

Primeira parte da FBG com não linearidade igual a $\frac{\gamma}{\sigma}$ e a segunda metade igual a γ

Para a segunda versão de FBG proposta, onde se tem a primeira parte do comprimento longitudinal fixada pelo parâmetro de não linearidade $\frac{\gamma}{\sigma}$ e a segunda metade pelo índice γ , foram identificadas a existência de perfis de multiestabilidade óptica para todos os valores de sigma σ , exceto quando $\sigma = 1$, e consequentemente, existe o parâmetro γ para toda a extensão da FBG, tendo apenas uma curva de biestabilidade óptica. Este comportamento pode ser visualizado por intermédio da Figura 24, onde as curvas são destacadas em diferentes cores para a melhor compreensão.

Este tópico visa abordar somente as duas primeiras curvas. Para que seja possível se obter um melhor entendimento, a segunda curva foi ilustrada com destaque na Figura 24, e ainda representada de forma individual na Figura 25, onde foi ilustrada com maior aproximação.

No que se refere a primeira curva, nota-se que os valores de $P_{down} \downarrow$ reduzem a medida que os valores de sigma (σ) são incrementados. Desta forma, quando se utiliza o valor $\sigma = 1$, o valor de salto de descida fica aproximadamente 262 W. Utilizando $\sigma = 5$, obtém-se em torno de 108 W. Por fim, quando esta mesma FBG é submetida a um parâmetro $\sigma = 10$, logo, encontra-se

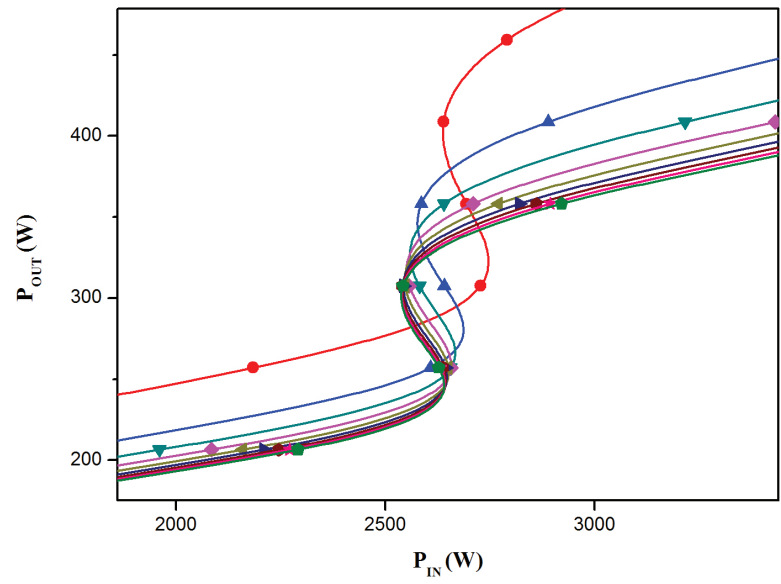
Figura 24: Curvas de Biestabilidade óptica para o segundo modelo de FBG, apresentado na Figura 20.

Fonte: o próprio autor.

$P_{down} \downarrow \cong 104$ W. Este mesmo valor foi encontrado para $\sigma = 9$. Em relação aos valores de $P_{up} \uparrow$, todos os casos apresentaram o mesmo valor como resultado, tendo como potência de subida cerca de 7 W.

Na segunda curva, o comportamento de $P_{down} \downarrow$ se repetiu, e a medida que os valores de sigma (σ) foram incrementados, o valor desta variável reduziu de forma gradativa. Conforme anteriormente relatado, no caso em que $\sigma = 1$, não se forma perfis de multiestabilidade. Logo, o maior valor para $P_{down} \downarrow$ é atribuído quando $\sigma = 2$, onde encontra-se o valor por volta de 401 W. Na condição $\sigma = 5$, o valor encontrado é de aproximadamente 316 W. Já quando se utiliza o valor máximo, $\sigma = 10$, o valor de salto de subida é alcançado aproximadamente a 300 W. Os valores para todos os cenários foram devidamente tabulados e podem ser visualizados na Tabela 3, tendo sido referenciados pelo eixo $P_{OUT}(W)$.

Figura 25: Imagem aproximada da segunda curva de biestabilidade apresentada na Figura 24.



Fonte: o próprio autor.

Tabela 3: Valores de $P_{up}\uparrow$ e $P_{down}\downarrow$ para FBG assimétrica composta pela primeira parte por um perfil de não linearidade $\frac{\gamma}{\sigma}$ e a segunda metade por γ , tendo como referência o eixo $P_{OUT}(W)$.

BIESTABILIDADE 2

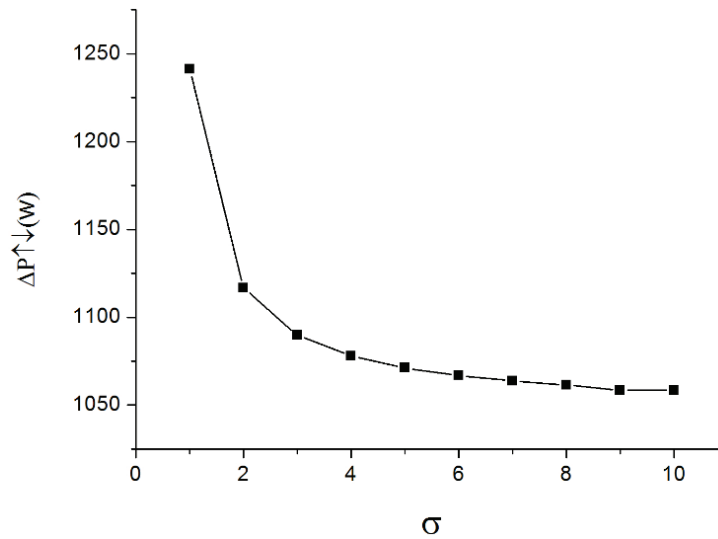
		Curva 1		Curva 2	
Sigma(σ)	Psi(ψ)	Pdown $\downarrow$ (W)	Pup $\uparrow$ (W)	Pdown $\downarrow$ (W)	Pup $\uparrow$ (W)
1	1,452	262,07	7,08	-	-
2	0,726	127,49	7,08	401,70	322,78
3	0,484	115,35	7,08	346,05	280,28
4	0,363	111,30	7,08	326,83	266,11
5	0,290	108,26	7,08	316,71	260,04
6	0,242	107,25	7,08	310,64	253,97
7	0,207	106,24	7,08	307,60	250,94
8	0,181	105,23	7,08	304,56	248,91
9	0,161	104,22	7,08	302,54	246,89
10	0,145	104,22	7,08	300,52	245,88

Fonte: o próprio autor.

Assim, como proposto no caso anterior, também foram coletados os valores de potência referenciados pelo eixo $P_{IN}(W)$, para que fosse possível a obtenção das curvas do delta de potência. O gráfico formado pela primeira e segunda curva da multiestabilidade, podem ser visualizados nas Figuras 26 e 27, respectivamente.

Observa-se na Figura 26, referente a primeira curva, que ao aplicar o valor de gamma (γ) sobre toda a extensão da FBG, obtém-se o maior distanciamento entre as faixa de potência de $P_{up}\uparrow$ e $P_{down}\downarrow$, chegando a um valor aproximado de 1240 W. Contudo, a medida que é reduzida a não linearidade na primeira parte da FBG, ocorre um decrescimento gradativo desta medida, até chegar ao parâmetro $\frac{\gamma}{10}$, onde encontrou-se um valor delta de potência com cerca de 1050 W.

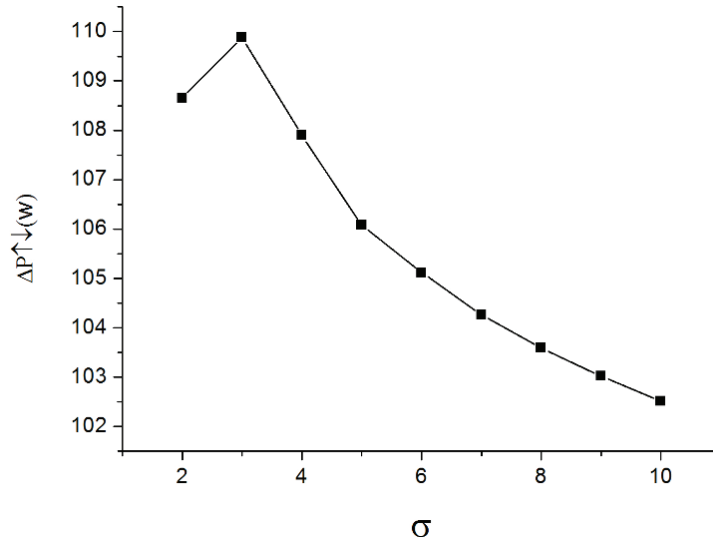
Figura 26: Curva delta de potência obtida na primeira curva da biestabilidade gerada em uma FBG com perfil assimétrico de não linearidade, sendo composta pela primeira metade por $\frac{\gamma}{\sigma}$ e a segunda metade por γ .



Fonte: o próprio autor.

No tocante aos dados de potência coletados na segunda curva, ilustrados na Figura 27, foi encontrado um menor espaçamento entre $P_{up}\uparrow$ e $P_{down}\downarrow$. Este fator impacta diretamente na segurança do chaveamento óptico, pois uma pequena variação de potência poderá ocasionar a comutação deste sinal. Como não houve uma segunda curva de biestabilidade para $\sigma = 1$, iniciou-se esta análise com $\sigma = 2$, onde se obteve cerca de 108 W de distanciamento entre $P_{up}\uparrow$ e $P_{down}\downarrow$. Posteriormente, foi registrado um crescimento utilizando-se $\sigma = 3$, no qual se obteve a maior variação, sendo verificada uma potência aproximada de 110 W. Após este valor, iniciou-se uma diminuição gradativa da potência, chegando ao menor valor da diferença, quando $\sigma = 10$, cuja potência registrada foi de apenas $\cong 102 W$.

Figura 27: Curva delta de potência obtida na segunda curva da biestabilidade gerada em uma FBG com perfil assimétrico de não linearidade, sendo composta pela primeira metade por $\frac{\gamma}{\sigma}$ e a segunda metade por γ .



Fonte: o próprio autor.

4.1.2 Proposta de obtenção de Portas Lógicas

De posse dos dados demonstrados no tópico 4.1.1, mais especificamente para o primeiro exemplo, onde há a parte inicial da FBG submetida ao perfil de não linearidade gama (γ) e a segunda metade a $\frac{\gamma}{\sigma}$, foram propostas a criação de portas lógicas para realização de chaveamento óptico. Para tal fim, analisou-se as faixas de potências que poderiam produzir portas lógicas E e OU, provenientes dos termos em inglês (*AND* e *OR*, respectivamente).

Para isto, considerou-se a utilização de um acoplador de 3 db, com duas entradas de potência, tendo em uma das saídas a FBG. Desta forma, a potência após o acoplador será sempre a soma dos valores de entrada divididos por dois, que neste caso representam a quantidade total de entradas. Logo, como passo inicial, foi validado a faixa que não gerava as portas lógicas supramencionadas, logo, percebe-se que esta limitação para todos os sigmas (σ) compreende-se entre os valores de potência de saída inferiores a $P_{up} \uparrow$, que podem ser consultados na Tabela 1.

Seguidamente, validou-se que a partir desses valores de $P_{up} \uparrow$ era obtida portas *AND*, sendo necessário identificar qual o limite de potência para permanência das características deste dispositivo lógico. Para isso, foi utilizado o eixo $P_{in}(W)$, para coleta do ponto limiar de potência e correlacionou este valor ao eixo $P_{out}(W)$, sendo observado que, ao exceder esta potência o dispositivo passa a ter características de uma porta *OR*. A Tabela 4 ilustra a tabulação desses valores, onde foi possível identificar a formação de portas *AND* e *OR* para os diversos sigmas

(σ) simulados, exceto quando $\sigma = 10$, cujo valor foi indefinido.

Observa-se, que para $\sigma = 1$, os limites da porta *AND*, iniciam em cerca de 7 W e permanecem até aproximadamente 2.268 W, e ao ultrapassar essa potência, a porta lógica passa a se comportar como uma *OR*. Já para $\sigma = 9$, os limites ocorrem entre aproximadamente 68 W e permanecem até cerca de 7,3 kW, conforme destacado na Tabela 1.

Tabela 4: Portas lógicas obtidas em FBG com perfil assimétrico de não linearidade, sendo composta pela primeira metade por γ e a segunda parte por $\frac{\gamma}{\sigma}$.

PORTAS LÓGICAS - BIESTABILIDADE 1			
Sigma	Não gera porta Lógica	Porta AND	Porta OR
1	$P_{out} < 7,08 \text{ W}$	$7,08 \text{ W} < P_{out} < 2.268,59 \text{ W}$	$P_{out} > 2.268,59 \text{ W}$
2	$P_{out} < 15,17 \text{ W}$	$15,17 \text{ W} < P_{out} < 1.906,34 \text{ W}$	$P_{out} > 1.906,34 \text{ W}$
3	$P_{out} < 22,26 \text{ W}$	$22,26 \text{ W} < P_{out} < 2.335,37 \text{ W}$	$P_{out} > 2.335,37 \text{ W}$
4	$P_{out} < 29,59 \text{ W}$	$29,59 \text{ W} < P_{out} < 2.653,60 \text{ W}$	$P_{out} > 2.653,60 \text{ W}$
5	$P_{out} < 37,43 \text{ W}$	$37,43 \text{ W} < P_{out} < 2.962,72 \text{ W}$	$P_{out} > 2.962,72 \text{ W}$
6	$P_{out} < 45,02 \text{ W}$	$45,02 \text{ W} < P_{out} < 3.347,99 \text{ W}$	$P_{out} > 3.347,99 \text{ W}$
7	$P_{out} < 52,86 \text{ W}$	$52,86 \text{ W} < P_{out} < 3.943,72 \text{ W}$	$P_{out} > 3.943,72 \text{ W}$
8	$P_{out} < 60,71 \text{ W}$	$60,71 \text{ W} < P_{out} < 5.033,49 \text{ W}$	$P_{out} > 5.033,49 \text{ W}$
9	$P_{out} < 68,80 \text{ W}$	$68,80 \text{ W} < P_{out} < 7.392,90 \text{ W}$	$P_{out} > 7.392,90 \text{ W}$
10	$P_{out} < 77,15 \text{ W}$	Valor Indefinido	Valor Indefinido

Fonte: o próprio autor.

4.2 Resultados com largura de pulso na ordem de femtossegundos

Neste t3pico, foram utilizados os parâmetros apresentados na secção 3.1.2, onde se trabalha apenas com pulsos na ordem de femtossegundos. Devido utilizar-se esta largura de comprimento de onda, haverá a incidência dos efeitos de alta ordem.

4.2.1 Análise dos resultados do perfil de Biestabilidade

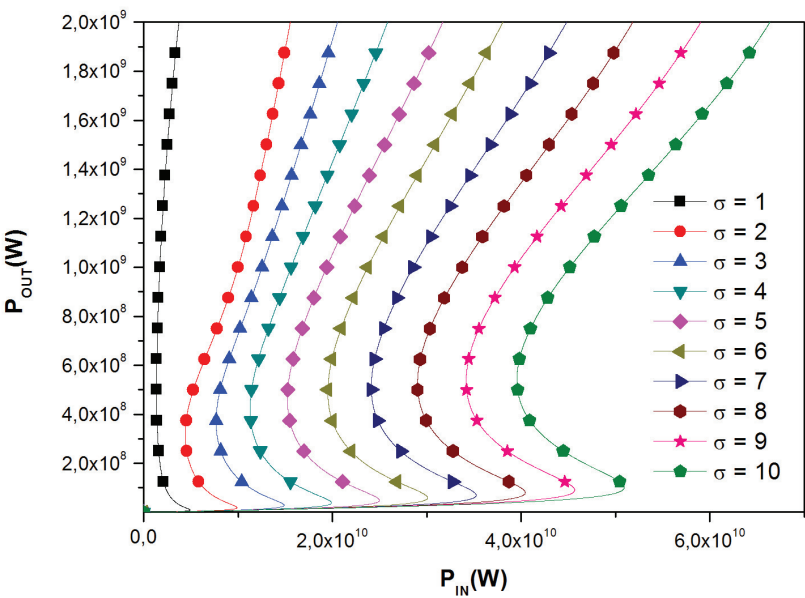
Neste análise, foi adotado o eixo $P_{out}(W)$, como referencial para obtenção das potências descida ($P_{down} \downarrow$) e subida ($P_{up} \uparrow$). Já para avaliar o espaçamento entre essas potências adotou-se o eixo $P_{in}(W)$, onde é possível analisar o distanciamento entre essas variáveis.

Primeira parte da FBG com não linearidade igual a (γ) e a segunda metade igual a $(\frac{\gamma}{\sigma})$

Assim como foi observado no t3pico 4.1.1, para a primeira vers3o de FBG, onde se tem a primeira parte do comprimento longitudinal fixada pelo parâmetro de não linearidade γ e a segunda metade pelo índice $\frac{\gamma}{\sigma}$, foi constatado a ocorrência de apenas uma curva de biestabilidade para cada valor de sigma (σ). Este comportamento pode ser verificado por meio da Figura 28, na qual é possível validar também que o pulso na ordem femtossegundos necessita de maiores faixas de potência, pois ao sofrer o estreitamento a sua área e energia são reduzidas, tendo que ser compensada pelo incremento da potência. Diferentemente do que ocorre quando utiliza-se pulsos na ordem de picosegundos que possuem maior área e energia, logo, exigir3o menor potência para sua propagação.

Observa-se que ao diminuir a não linearidade na segunda metade da FBG, as potências de descida ($P_{down} \downarrow$) tendem a criar um padrão de crescimento da potência, exceto para $\sigma = 1$ e $\sigma = 10$, onde foram encontrados os valores aproximados de 481 MW e 529 MW, respectivamente. O mesmo desempenho foi registrado para as potências de subida ($P_{up} \uparrow$), que ao passo que os valores de sigma (σ) foram aumentados e consequentemente reduziu a não linearidade, constatou um crescimento da potência para todos os cenários simulados. É possível visualizar este desempenho por interm3dio da Tabela 5, onde foram atribuídos os valores de $P_{up} \uparrow$ e $P_{down} \downarrow$ para cada valor de sigma (σ).

Figura 28: Curvas da Biestabilidade óptica com largura de pulso na ordem de femtosegundos para o primeiro modelo de FBG apresentado na figura 19.



Fonte: o próprio autor.

Tabela 5: Valores das curvas de potência da Biestabilidade, $P_{up} \uparrow$ e $P_{down} \downarrow$ para FBG assimétrica composta pela primeira metade por uma não linearidade γ e a segunda metade por $\frac{\gamma}{\sigma}$.

BIESTABILIDADE 1			
Sigma (σ)	Psi(ψ)	Pdown $\downarrow$ (MW)	Pup $\uparrow$ (MW)
1	1,452	481,34	9,74
2	0,726	312,04	19,46
3	0,484	367,15	29,14
4	0,363	418,78	39,44
5	0,290	459,37	49,45
6	0,242	477,99	59,86
7	0,207	501,74	70,07
8	0,181	509,69	80,40
9	0,161	531,84	91,36
10	0,145	529,00	101,79

Fonte: o próprio autor.

Os valores de potência $P_{Up} \uparrow$ e $P_{Down} \downarrow$, tendo como base o eixo $P_{IN}(W)$, foram devidamente tabulados na Tabela 6, para que fosse possível a obtenção dos valores referentes ao delta de potência ($\Delta P \uparrow \downarrow$), e subsequentemente elaborar a respectiva curva, que pode ser visualizada no gráfico ilustrado na Figura 29.

Nota-se que são obtidos os menores valores de $\Delta P \uparrow \downarrow$, quando sigma (σ) se aproxima de 1, ou seja, quando se mantém o valor da não linearidade na FBG mais próximo ao valor de γ . Logo, consequentemente, se tem um menor distanciamento entre $P_{Up} \uparrow$ e $P_{Down} \downarrow$. Ainda percebe-se, pela referida Tabela 6 a ocorrência de um aumento gradual desses valores, tanto para $P_{Up} \uparrow$ quanto para $P_{Down} \downarrow$. Contudo, ao analisar a curva deste, constata-se que entre os valores de sigma 7 a 10, a curva delta de potência tende a se estabilizar, sendo verificado menores variações, e inclusive registrando uma leve redução quando submetido ao último parâmetro do ensaio $\sigma = 10$, onde os valores de $P_{Down} \downarrow$ e $P_{Up} \uparrow$ foram de $3,95629942 \times 10^{10}$ e $5,09324291 \times 10^{10}$, respectivamente.

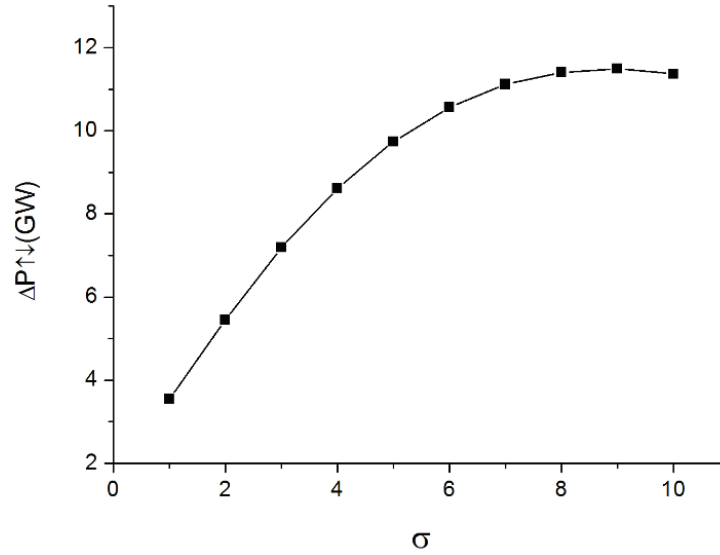
Tabela 6: Valores de $P_{up} \uparrow$, e $P_{down} \downarrow$ e $\Delta P \uparrow \downarrow$ para FBG com perfil assimétrico de não linearidade, sendo composta pela primeira metade por (γ) e a segunda metade por ($\frac{\gamma}{\sigma}$), tendo como referencial o eixo $P_{IN}(W)$.

BIESTABILIDADE 1 - DELTA DE POTÊNCIA				
Sigma(σ)	Psi(ψ)	Pdown $\downarrow$ (GW)	Pup $\uparrow$ (GW)	$\Delta P \uparrow \downarrow$ (GW)
1	1,452	1,38	4,92	3,53
2	0,726	4,42	9,87	5,45
3	0,484	7,67	14,86	7,18
4	0,363	11,28	19,90	8,61
5	0,290	15,23	24,97	9,74
6	0,242	19,51	30,08	10,56
7	0,207	24,11	35,26	11,11
8	0,181	29,02	40,42	11,39
9	0,161	34,16	45,65	11,49
10	0,145	39,56	50,93	11,36

Fonte: o próprio autor.

Imediatamente, se constata uma semelhança no comportamento da curva delta de potência demonstrada na Figura 29, com a curva apresentada no primeiro caso, tendo sido ilustrada na Figura 23, porém apresentando diferentes amplitudes de potência.

Figura 29: Curva delta de potência obtida na segunda curva da biestabilidade gerada em uma FBG com perfil assimétrico de não linearidade, sendo composta pela primeira metade por $\frac{\gamma}{\sigma}$ e a segunda metade por γ .



Fonte: o próprio autor.

Primeira parte da FBG com não linearidade igual a $\frac{\gamma}{\sigma}$ e a segunda metade igual a γ

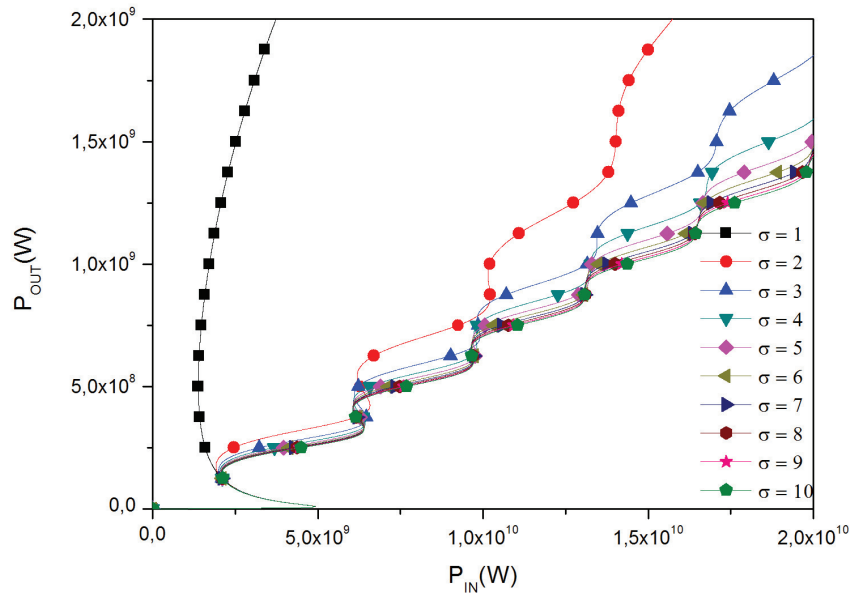
Para a segunda versão de FBG proposta, onde se tem a primeira parte do comprimento longitudinal fixada pelo parâmetro de não linearidade $\frac{\gamma}{\sigma}$ e a segunda metade pelo índice γ , foram identificadas a existência de perfis de multiestabilidade óptica para todos os valores de sigma (σ), exceto quando $\sigma = 1$, e consequentemente, se tem o parâmetro γ para toda a extensão da FBG, tendo formado apenas uma curva de biestabilidade óptica. Assim como tratado no tópico 4.1.1, esta análise focar-se-á somente nas duas primeiras curvas de biestabilidade. Este comportamento pode ser visualizado por intermédio da Figura 30, onde são ilustradas as curvas em diferentes cores para a melhor compreensão do estudo.

No tocante a primeira curva, percebe-se que os valores de $P_{down} \downarrow$ reduzem a medida que se aumenta os valores de sigma (σ). Desta forma, quando se utiliza o valor $\sigma = 1$, se obtém como valor de salto de descida aproximadamente 480 MW. Ajustando a variável para $\sigma = 5$, o valor de potência encontrado será em torno de 147 MW. Por fim, quando esta mesma FBG é submetida a $\sigma = 10$, logo, o valor de P_{down} será $\downarrow \cong 140$ MW, tendo apresentado uma redução de cerca de 1 MW, se comparado ao parâmetro anterior $\sigma = 9$.

No que se diz respeito a $P_{up} \uparrow$, todos os casos apresentaram valores semelhantes como resultado, tendo como potência de subida aproximadamente 96 MW, tendo como exceção $\sigma = 1$, que obteve o resultado de $\cong 97$ MW.

Na segunda curva, não houve caso possível para $\sigma = 1$, conforme anteriormente relatado, pois este não apresentou perfis de multiestabilidade. Ressalvando-se esta exceção, o comportamento de $P_{down} \downarrow$ se repetiu, e a medida que os valores de sigma (σ) foram incrementados, o valor desta variável reduziu-se de forma gradativa. Sendo encontrado o maior valor para $P_{down} \downarrow$ quando $\sigma = 2$, onde foi verificado cerca de 540 MW. Na condição $\sigma = 5$, o valor encontrado foi de aproximadamente 425 MW. Já quando submetida o valor máximo, $\sigma = 10$, o salto de subida é alcançado a aproximadamente 403 MW.

Figura 30: Curvas da Biestabilidade óptica com largura de pulso na ordem de femtossegundos para o segundo modelo de FBG apresentado na figura 20.



Fonte: o próprio autor.

Os valores para todos os cenários foram devidamente tabulados e podem ser visualizados na Tabela 7, tendo sido referenciados pelo eixo $P_{out}(W)$, para que fosse possível obter a amplitude das potências. Com base nessas informações, foram encontrados os dados correspondentes em relação ao eixo $P_{in}(W)$. De posse desses dados pode-se calcular as diferenças entre as potências $P_{up} \uparrow$ e $P_{down} \downarrow$ e encontrar os valores de $\Delta P \uparrow \downarrow$. Porém, devido as ordens de grandeza, não será demonstrado este resultado, deixando esta possibilidade para estudos futuros.

Tabela 7: Valores das curvas de potência da Biestabilidade, $P_{up}\uparrow$ e $P_{down}\downarrow$ para FBG assimétrica composta pela primeira metade por uma não linearidade $\frac{\gamma}{\sigma}$ e a segunda metade por γ , utilizando um pulso na ordem de femtossegundos.

BIESTABILIDADE 2					
		Curva 1		Curva 2	
Sigma(σ)	Psi(ψ)	Pdown $\downarrow$ (MW)	Pup $\uparrow$ (MW)	Pdown $\downarrow$ (MW)	Pup $\uparrow$ (MW)
1	1,452	480,73	9,76	-	-
2	0,726	173,15	9,66	540,41	424,55
3	0,484	153,09	9,65	464,65	369,96
4	0,363	149,76	9,65	437,68	351,48
5	0,290	147,25	9,63	425,39	341,39
6	0,242	143,87	9,62	417,62	336,04
7	0,207	143,97	9,62	412,41	332,32
8	0,181	143,08	9,62	408,73	328,91
9	0,161	141,49	9,63	405,57	326,69
10	0,145	140,99	9,64	403,17	327,32

Fonte: o próprio autor.

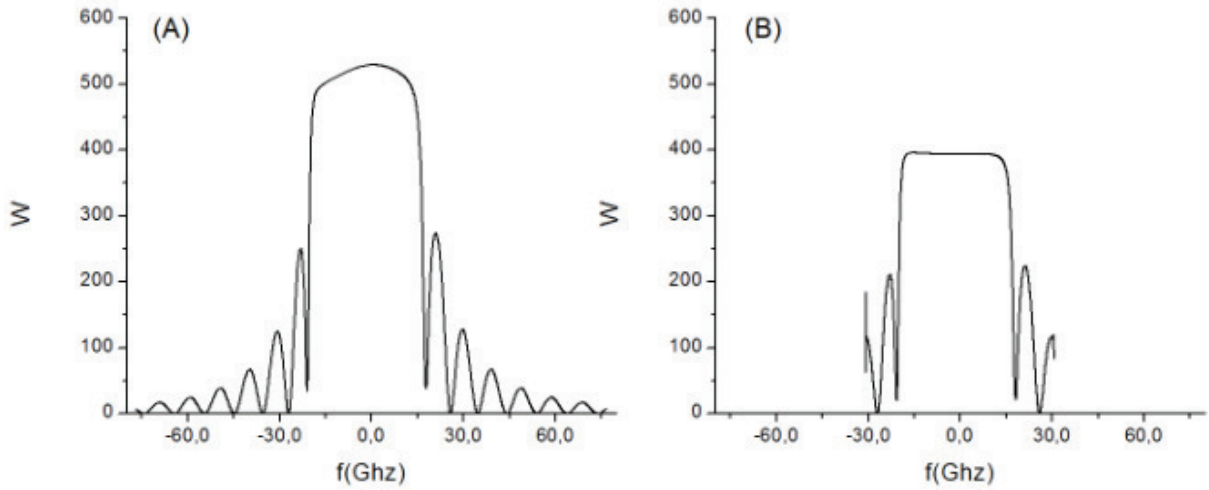
4.3 Análise dos Pulsos Refletidos

Objetivando-se comparar os efeitos incidentes para diferentes larguras de pulso em fibras ópticas e de modo consequente sobre a própria FBG, foram plotados para os cenários retratados nos tópicos anteriores os pulsos refletidos na ordem do comprimento de pico e femtossegundos. Para a melhor compreensão dividiu-se esta análise em dois tópicos, diferenciando-se pelos perfis de não linearidade.

Primeira parte da FBG com não linearidade igual a γ e a segunda metade igual a $\frac{\gamma}{\sigma}$

Para a primeira plotagem considerou-se o valor de $P_{down}\downarrow$ quando $\sigma = 10$, submetendo a FBG a uma potência de 396 W. Logo, constatou-se que o estreitamento do pulso na ordem de femtossegundos, faz com que o pulso refletido tenha maior largura se comparado ao de picosegundos, conforme ilustrado na Figura 31. Visando demonstrar a maior incidência desses efeitos aplicou-se uma potência de 0,4 MW, nesta mesma FBG, resultando no gráfico apresentado na Figura 32, na qual pode-se verificar a distorção gerada no sinal refletido.

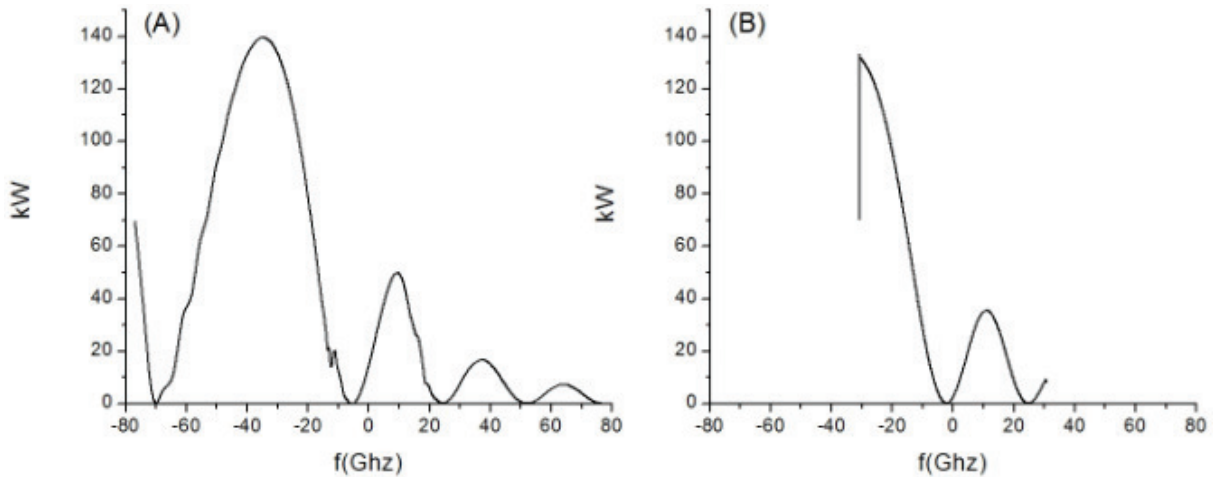
Figura 31: Refletividade do pulso para FBG composta pelo perfil de não linearidade na sua primeira metade por γ e a segunda parte por $\frac{\gamma}{\sigma}$, submetida a uma potência de 396 W e $\sigma = 10$. (A) Pulso em picosegundos e (B) Pulso em Femtossegundos.



Fonte: o próprio autor.

Conforme anteriormente ilustrado na Figura 31, o pulso transmitido na ordem de femtossegundos resultou em um pulso refletido com maior comprimento longitudinal.

Figura 32: Refletividade do pulso para FBG composta pelo perfil de não linearidade na sua primeira metade por γ e a segunda parte por $\frac{\gamma}{\sigma}$, submetida a uma potência de 0,4 MW e $\sigma = 10$. (A) Pulso em picosegundos e (B) Pulso em Femtossegundos.



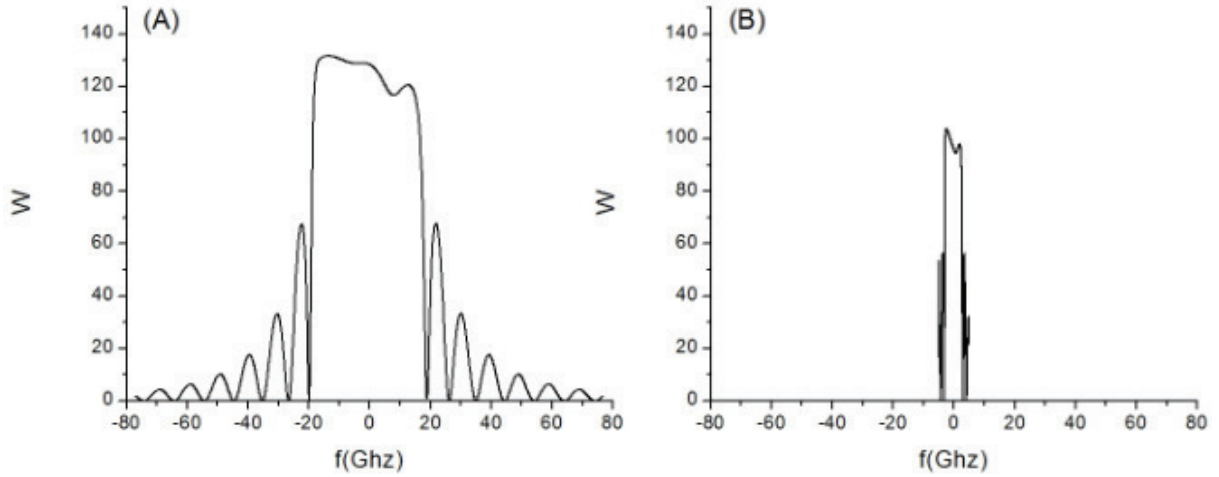
Fonte: o próprio autor.

Primeira parte da FBG com não linearidade igual a $\frac{\gamma}{\sigma}$ e a segunda metade igual a γ

Neste cenário, foram realizadas três simulações. Na primeira, foram aplicados o valor de 104 W em pico e femtossegundos, obtendo o pulso refletido na Figura 33, onde ocorre uma

distorções provenientes dos efeitos de alta ordem, bem como o estreitamento do pulso.

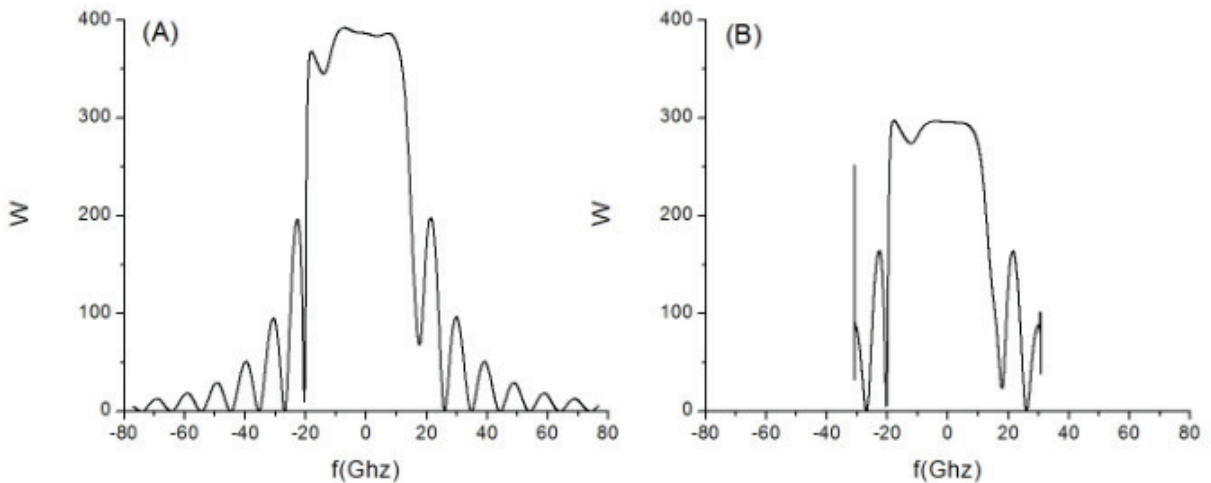
Figura 33: Refletividade do pulso para FBG composta pelo perfil de não linearidade na sua primeira metade por $\frac{\gamma}{\sigma}$ e a segunda parte por γ , submetida a uma potência de 104 W e $\sigma = 10$. (A) Pulso em picosegundos e (B) Pulso em femtossegundos.



Fonte: o próprio autor.

Para o segundo caso a potência foi aumentada para 300 W, e assim como o anterior não ocorreram grandes alterações no pulso refletido, podendo ser visualizado na Figura 34.

Figura 34: Refletividade do pulso para FBG composta pelo perfil de não linearidade na sua primeira metade por $\frac{\gamma}{\sigma}$ e a segunda parte por γ , submetida a uma potência de 300 W e $\sigma = 10$. (A) Pulso em picosegundos e (B) Pulso em femtossegundos.

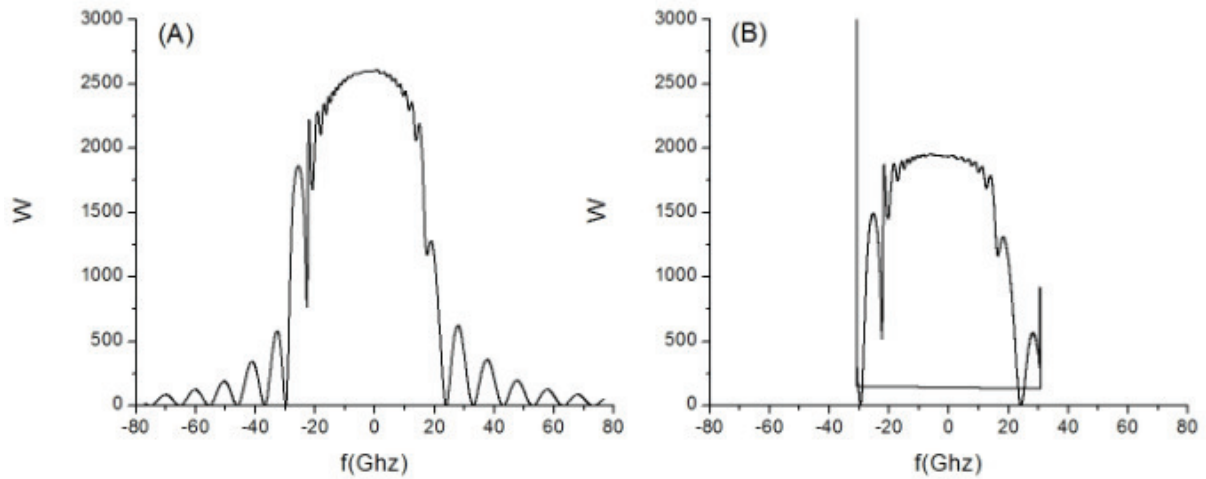


Fonte: o próprio autor.

Logo, foi procurada uma faixa de potência maior para que fosse possível analisar a incidência dos efeitos de alta ordem. Diante do exposto, foi aplicado a FBG uma potência na

ordem de 2 kW. O resultado desta simulação foi demonstrado na Figura 35. Na qual percebe-se que o pulso em picosegundos manteve as suas propriedades, mas o pulso em femtossegundos sofreu maiores distorções.

Figura 35: Refletividade do pulso para FBG composta pelo perfil de não linearidade na sua primeira metade por $\frac{\gamma}{\sigma}$ e a segunda parte por γ , submetida a uma potência de 2 kW e $\sigma = 10$. (A) Pulso em picosegundos e (B) Pulso em femtossegundos.



Fonte: o próprio autor.

CONCLUSÕES

Neste trabalho, foram apresentados os diferentes comportamentos das curvas de biestabilidade óptica em Grades de Bragg. Por meio de simulações através do software Matlab (versão R2014a e licença 898894), dividiu-se ao meio uma FBG com 14 cm de comprimento e foi atribuída a cada metade valores distintos de não linearidade. Tendo sido demonstrado as alterações de desempenho em decorrência dessas mudanças.

Foi observado na primeira FBG, cuja composição é formada pela primeira metade por γ e sua segunda parte por $\frac{\gamma}{\sigma}$, a obtenção de um gráfico com apenas uma única curva de biestabilidade. Vale ressaltar que o sigma σ sofreu variação de 1 a 10. Contudo, na situação oposta, outras curvas surgem, gerando um cenário de multiestabilidade óptica.

Os valores de $P_{up} \uparrow$ e $P_{Down} \downarrow$ foram coletados, e calculadas, as diferenças entre essas variáveis. Posteriormente, foi demonstrada as curvas do delta de potência, sendo possível observar os respectivos espaçamentos entre $P_{up} \uparrow$ e $P_{Down} \downarrow$. De posse desses dados foram sugeridas a obtenção de portas lógicas *AND* e *OR*, para chaveamento óptico.

Ainda foram utilizados pulsos na ordem de pico e femtossegundos, visando analisar a incidência dos efeitos lineares e não lineares sobre o pulso transmitido. Ao fim do experimento, os pulsos refletidos foram plotados e foi realizada a comparação entre os referidos pulsos. Sendo validado que, ao comprimir o pulso na ordem de femtossegundos esse sofre a incidência dos efeitos de alta ordem.

Ademais, após a análise dos distintos cenários, foi possível constatar que ao aplicar um pulso com potência de 2 kW, o sinal permaneceu com suas características iniciais apenas quando submetido à ordem de grandeza de picosegundos. Quando foi aplicado na ordem de femtossegundos, foi possível observar a ocorrência da distorção completa do sinal.

Após a ampla análise dos resultados alcançados por meio dos gráficos, tabelas, conclui-se, portanto, que a mudança nos parâmetros da não linearidade da fibra, juntamente com a largura do comprimento do pulso, afetam diretamente o desempenho da FBG.

5.1 Trabalhos Futuros

Em razão da evolução constante que permeia a área científica e tecnológica, é salutar compreender que os trabalhos científicos não podem ser considerados finalizados. Tendo em vista que é necessário o avanço na pesquisa do tema biestabilidade óptica.

Desta forma, impende destacar algumas proposições futuras:

- Dividir a FBG em três partes e atribuir distintos parâmetros de não linearidade a cada uma delas;
- Analisar as características de biestabilidade em FBG's com composição de metamateriais;
- Validar o desempenho das curvas de biestabilidade óptica em FBG's utilizando outros perfis de não-linearidade.
- Validar a obtenção de outros tipos de portas lógicas.

Referências Bibliográficas

- AGRAWAL, G. P. **Applications of nonlinear fiber optics**. [S.l.]: Academic Press, 2001.
- AGRAWAL, G. P. Nonlinear fiber optics: its history and recent progress [invited]. **J. Opt. Soc. Am. B**, v. 28, n. 12, 2011.
- AGRAWAL, G. P. **Sistemas de comunicação por fibra óptica / Govind P. Agrawal ; tradução José Rodolfo Souza**. 4. ed. [S.l.]: Elsevier, 2014. ISBN 978-85-352-6466-1.
- ALBERTO, N. J. **Sensores de Bragg para bioaplicações**. Tese (Doutorado) — Universidade de Aveiro, 2011.
- ALVES, J. F. A. **Monitorização de estruturas de engenharia baseada em redes de Bragg em fibra óptica**. Tese (Doutorado) — Universidade do Porto, 2007.
- AMADOR, A. J. V. **Distribuição de sinais UMTS sobre fibra óptica**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Aveiro, 2008.
- ANDERSON, D. Z.; MIZRAHI, V.; ERDOGAN, T.; WHITE, A. E. Production of in-fibre gratings using a diffractive optical element. **Electronics Letters**, v. 29, n. 6, 1993.
- ANTUNES, P.; VARUM, H.; ANDRÉ, P. Optical fbg sensors for static structural health monitoring. **Science Direct**, 2011.
- ANTUNES, P. F. C. **Análise dinâmica de estruturas com sensores de Bragg**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Aveiro, 2007.
- ATKINS, R. M. Photosensitivity in optical fibers. **Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting**, 1996.
- BARBOSA, C. L.; RABELO, R. C.; LISBÔA, O. Fabricação e caracterização de grades de bragg através do uso da técnica da máscara de fase. **Telecomunicações**, v. 3, n. 2, 2000.
- BASS, M.; STRYLAND, E. W. V. **Fiber optics handbook: fiber, devices, and systems for optical communications**. [S.l.]: McGraw-Hill New York, 2002.
- BENNION, I.; WILLIAMS, J. A. R.; ZHANG, L.; SUGDEN, K.; DORAN, N. J. Tutorial review uv-written in-fibre bragg gratings. **Optical and Quantum Electronics**, v. 28, 1995.
- BERTOLOTO, D. C. **Redes de fibra óptica Conexões locais em dimensões globais no Brasil**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Mato Grosso, 2012.
- BLACK, R. J.; GAGNON, L. **Optical Waveguide modes: polarization, coupling, and symmetry**. [S.l.]: MC Graw Hill, 2010. ISBN 978-0-07-162914-0.

- BOQUERA, M. C. E. **Comunicaciones ópticas: Conceptos esenciales y resolución de ejercicios**. [S.l.]: Díaz de Santos, S. A, 2005.
- BOTERO, G. A.; BARÓN, F. E.; CANO, C.; SOSA, O.; VARÓN, M. Optical sensing using fiber: bragg gratings fundamentals and applications. **Instrumentation & Measurement Magazine**, 2017.
- BRAMBILLA G.AND VALERIO, P. Enhanced photorefractivity in tin-doped silica optical fibers (review). **IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics**, v. 7, n. 3, 2001.
- CALDEIRA, M. A. B. **Projecto e implementação de FBGs para aplicações em telecomunicações**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Aveiro, 2010.
- CANNING, J.; SOMMER, K.; ENGLUND, M. Fibre gratings for high temperature sensor applications. **Measurement Science and Tecnology**, n. 12, 2001.
- CARVALHO, M. C. **Redes de Bragg em fibras ópticas poliméricas (FOP)**. Tese (Doutorado) — Instituto Militar de Engenharia (IME), 2010.
- CHEN, J.; LIU, B.; ZHANG, H. Review of fiber bragg grating sensor technology. **Front. Optoelectron**, v. 4, n. 2, 2011.
- CHRAPLYVY, A. R.; HENRY, P. S. Performance degradation due to stimulated raman scattering in wavelength-division-multiplexed optical-fibre system. **Electronics Letters**, v. 19, n. 16, 1983.
- COELHO, C. R. **Fibra Óptica na rede de acesso: tecnologias e soluções**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Aveiro, 2009.
- COELHO JR, A. G. **Estudo das características de transmissão e biestabilidade ópticas em acopladores de metamateriais com perfil de não linearidade decrescente**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Ceará, 2010.
- COTTA, E. A. **BI-Estabilidade óptica e condensação de Bose-Einstein de polaritons**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.
- CRISP, J. **Introduction to fiber optics**. 2. ed. [S.l.]: Newnes, 2001. ISBN 07506 50303.
- CUNHA, J. R. F. A. **Modelo teórico de sensores ópticos baseados em fibras com grade de Bragg**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Pará, 2007.
- DEMARTINI, F.; TOWNES, C. H.; GUSTAFSON, T. K.; KELLEY, P. L. Self-steepening of light pulses. **Physical Review**, v. 164, n. 2, 1967.
- DIAS, J. M. S. **Monitorização remota com sensores de fibra ótica**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Aveiro, 2016.
- DONG, X.; ZHANG, H.; LIU, B.; MIAO, Y. Tilted fiber bragg gratings: principle and sensing applications. **Photonic Sensors**, v. 1, n. 1, 2011.
- FIGUEIREDO, J. M. F. L. **Sensores de fibra óptica para uso avançado em compósitos poliméricos**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Aveiro, 2009.

- GAN, X.; WANG, Y.; ZHANG, F.; ZHAO, C.; JIANG, B.; FANG, L.; LI, D.; WU, H.; REN, Z.; ZHAO, J. Graphene-controlled fiber bragg grating and enabled optical bistability. **Optics Letters**, v. 41, n. 3, 2016.
- GHOSH, C.; ALFRED, Q. M.; GHOSH, B. Spectral characteristics of uniform fiber bragg grating with different grating length and refractive index variation. **International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering**, v. 3, 2015.
- GIBBS, H. M. **Optical bistability: controlling light with light**. [S.l.]: Academic Press, INC., 1985.
- GIBBS, H. M.; MCCALL, S. L.; VENKATESAN, T. N. C. Differential gain and bistability using a sodium-filled fabry-perot interferometer. **Physical Review Letters**, v. 36, n. 19, 1976.
- GRIFFITHS, D. J.; COLLEGE, R. **Introduction to electrodynamics**. [S.l.]: Prentice Hall Upper Saddle River, NJ, 1999.
- HIGUERA, J. M. L. **Advanced photonic topics**. [S.l.]: Santander: Servicio de publicaciones de la universidad de la Cantabria, 1997.
- HILL, K. O.; FUJII, Y.; JOHNSON, D. C.; KAWASAKI, B. S. Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection filter fabrication. **Applied Physics Letter**, v. 32, n. 10, 1978.
- HILL, K. O.; MALO, B.; BILODEAU, F.; JOHNSON, D. C.; ALBERT, J. Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by uv exposure through a phase mask. **Applied Physics Letters**, v. 62, n. 10, 1993.
- HILL, K. O.; MELTZ, G. Fiber bragg grating technology fundamentals and overview. **Applied Physics Letter**, v. 15, n. 8, 1997.
- HORIE, K.; USHIKI, H.; WINNIK, F. M. **Molecular photonics: fundamentals and practical aspects**. [S.l.]: Wiley-VCH, 2000. ISBN 3-527-30252-2.
- HUANG, S.; LEBLANC, M.; OHN, M. M.; MEASURES, R. M. Bragg intragrating structural sensing. **Applied Optics**, v. 34, n. 22, 1995.
- HUANG, W. P. Coupled-mode theory for optical waveguides: an overview. **Optical Society of America**, v. 11, n. 3, 1994.
- JOANNOPOULOS, J. D.; JOHNSON, S. G.; WINN, J. N.; MEADE, R. D. **Photonic crystals molding the flow of light**. 2. ed. [S.l.]: Princeton University Press, 2008.
- JURISOVA, E.; MULLEROVA, J.; KOSCOVA, M. Investigation of nonlinear chalcogenide fiber bragg gratings as a promising tool for all- optical switching. **Photonics, Devices, and Systems**, v. 8306, 2011.
- KALINOWSKI, H. J.; ABE, I.; OES, J. A. SIM RAMOS, A. Application of fibre bragg grating sensors in biomechanics. **Trends in Photonics**, 2010.
- KASHYAP, R. Photosensitive optical fibers: devices and applications. **Optical Fiber Technology**, v. 1, 1994.

- KASHYAP, R. **Fiber Bragg gratings**. 2. ed. [S.l.]: Academic Press, 2010. ISBN 978-0-12-372579-0.
- KEISER, G. **Optical fiber communications**. 2. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, Inc, 1991.
- KEISER, G. **Comunicações por fibras ópticas**. 4. ed. [S.l.]: AMGH Editora Ltda., 2014.
- KERSEY, A. D. A review of recent developments in fiber optic sensor technology. **Optical Fiber Technology**, v. 2, n. 36, 1996.
- KNIGHT, J. C.; BROENG, J.; BIRKS, T. A.; RUSSELL, P. St. J. Photonic band gap guidance in optical fibers. **Science**, v. 282, n. 5393, 1998.
- KUMBHAJ, S.; PAWAR, S.; SEN, P.; SEN, P. K. Stepwise optical phase shift in nonlinear fiber bragg grating. **Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials**, v. 22, n. 3, 2013.
- LEE, E. H.; KIM, K. H.; LEE, H. K. Nonlinear effects in optical fiber: advantages and disadvantages for high capacity all-optical communication application. **Optical and Quantum Electronics**, v. 34, 2002.
- LITCHINITSER, N. M.; ABEELUCK, A. K.; HEADLEY, C.; EGGLETON, B. J. Antiresonant reflecting photonic crystal optical waveguide. **Optics Letters**, v. 27, n. 18, 2002.
- LOPES, M. V. P. **Acopladores de cristais fotônicos e acesso múltiplo por divisão de código óptico (OCDMA) com pulsos ultracurtos em fibras de Bragg**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Ceará, 2012.
- LOPES, S. C. N. **Fibra óptica na rede de acesso: cenários de evolução**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Aveiro, 2011.
- LOUREIRO, A. L. C. D. **Determination of the strain distribution in the adhesive joints using fiber Bragg grating (FBG)**. Dissertação (Mestrado) — Universidade do Porto, 2011.
- MALO, B.; HILL, K. O.; BILODEAU, F.; JOHNSON, D. C.; ALBERT, J. Point-by-point fabrication of micro-bragg gratings in photosensitive fibre using single excimer pulse refractive index modification techniques. **Electronics Letters**, v. 29, n. 18, 1993.
- MAMYSHEV, P.V. All-optical data regeneration based on self-phase modulation effect. **Optical Communication**, 1998.
- MARQUES, C. A. F. **Gravação de redes de Bragg avançadas em fibra óptica**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Aveiro, 2008.
- MARQUES, C. A. F. **Componentes em fibra ótica para comunicações óticas e sensores**. Tese (Doutorado) — Universidade de Aveiro, 2013.
- MARTINS, E. J. F. S. B. **Application and characterization of graphene oxide coatings onto optical fibers for sensor development**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Aveiro, 2016.
- MASTRO, S. A. **Optomechanical behavior of embedded fiber Bragg grating strain sensors**. Tese (Doutorado) — Drexel University, 2005.

- MATOS, M. A. G. **Optimização de redes ópticas em operação**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Aveiro, 2007.
- MELO, M. A. R. **Implementation and development of a system for the fabrication of Bragg gratings with special characteristics**. Dissertação (Mestrado) — Universidade do Porto, 2006.
- MELTZ, G.; MOREY, W. W.; GLENN, W. H. Formation of bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method. **Optics Letters**, v. 14, n. 15, 1989.
- MIRANDA, T. D. L. **Análise de efeitos não lineares em fibras ópticas monomodo**. Dissertação (Mestrado) — Instituto Nacional de Telecomunicações, 2011.
- MITRA, P. P.; STARK, J. B. Nonlinear limits to the information capacity of optical fiber communications. **Nature**, v. 411, 2001.
- MOCHIZUKI, K. Optical fiber transmission systems using stimulated raman scattering: theory. **Journal of Lighwave Technology**, LT-3, n. 3, 1985.
- MOREIRA, F. M. **Desenvolvimento e caracterização de um sistema laser de cristal líquido colestérico acoplado à fibra óptica**. Tese (Doutorado) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2004.
- MUNIZ, R. M. R. **Fiber Bragg grating structures: applications in optical communications and sensor technology**. Tese (Doutorado) — Universidade do Porto, 2004.
- NOGUEIRA, R. N. **Redes de Bragg em fibra óptica**. Tese (Doutorado) — Universidade de Aveiro, 2005.
- O'DWYER, M. J.; YE, C.; JAMES, S. W.; TATAM, R. P. Thermal dependence of the strain response of optical fibre bragg gratings. **Measurement Science and Tecnology**, n. 15, 2004.
- OLIVEIRA, J. R.; MOURA, M. A.; HICKMANN, J. M.; GOMES, A. S. L. Self-steepening of optical pulses in dispersive media. **Optical Society of America B**, v. 9, n. 11, 1992.
- OLIVEIRA, R. P. **sensor monoponto de temperatura baseado em redes de Bragg gêmeas**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.
- OSUCH, T.; GASIOR, P.; MARKOWSKI, K.; JEDRZEJEWSKI, K. Development of fiber bragg gratings technology and their complex structures for sensing, telecommunications and microwave photonics applications. **Bulletin of the Polish Academy of Sciences**, v. 62, n. 4, 2014.
- OTHONOS, A. Fiber bragg gratings. **Scientific Instruments**, v. 68, n. 12, 1997.
- PAIXÃO, T. B. **Estabilidade térmica de redes de Bragg fabricadas por laser femtosegundo**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Aveiro, 2016.
- PAKDEEVANICH, P.; ADAMS, M.J. Switching powers for optical bistability in a semiconductor laser above and below threshold. **Optics Communications**, v. 176, 2000.
- PINTO, P. V. F. **Biestabilidade em grade de Bragg em fibra com diferentes perfis de não linearidade**. Dissertação (Mestrado) — Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, 2016.

- PIRES, L. C. C. **Caracterização das propriedades ópticas de fibras microestruturadas contendo cristais líquidos**. Dissertação (Mestrado) — Universidade do Porto, 2013.
- PISCO, M.; CUSANO, A.; CUTOLO, A. **Photonic bandgap structures novel technological platforms for physical, chemical and biological sensing**. [S.l.]: Bentham e-Books, 2012. ISBN 978-1-60805-507-4.
- RIBEIRO, J. A. J. Características da propagação em fibras Ópticas. **Revista Telecomunicações**, 1999.
- RUSSO, N. A.; NORIEGA, S. B.; DUCHOWICZ, R. Implementación de sistema óptico para grabado de redes de bragg en fibra óptica. **Información Tecnológica**, v. 22, 2011.
- SANTOS, A. V. G. **Implementação de FBGs para sistemas de comunicação em fibra óptica**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Aveiro, 2008.
- SHI, C. Optical bistability in reflective fiber gratings. **IEEE Journal of Quantum Electronics**, v. 31, n. 11, 1995.
- SILVA, A. L.; SODRE, A. C. Utilização de sensores baseados em fibras ópticas micro estruturadas e em redes de bragg. **Instituto nacional de telecomunicações (INATEL) - ISSN 2358-1913**, 2016.
- SILVA, A. O. **Modelagem de cristais fotônicos tridimensionais pelo método das diferenças finitas no domínio do tempo (FDTD)**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2008.
- SILVA JR, C. J. **Cristais fotônicos e luz lenta**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Alagoas, 2011.
- SILVA, S. F. O. **Fiber Bragg grating based in structures for optical sensing and filtering**. Dissertação (Mestrado) — Universidade do Porto, 2007.
- SMITH, R. G. Optical power handling capacity of low loss optical fibers as determined by stimulated raman and brillouin scattering. **Applied Optics**, v. 11, n. 11, 1972.
- SONG, O.; YUAN CHENG, Z. 1.55 μm wavelength operation of e_r^{3+} doped optical fiber bistability. **Wuhan University Journal of Natural Sciences**, v. 4, n. 4, 1999.
- STOLEN, R. H. Nonlinearity in fiber transmission. **Proceedings of the IEEE**, v. 68, n. 10, 1980.
- STOLEN, R. H.; LIN, C. Self-phase modulation in silica optical fibers. **The American Physical Society**, v. 17, n. 4, 1978.
- TEMELKURAN, B.; HART, S. D.; BENOIT, G.; JOANNOPOULOS, J. D.; FINK, Y. Wavelength-scalable hollow optical fibres with large photonic bandgaps for co2 laser transmission. **Nature**, v. 420, 2002.
- THYAGARAJAN, K. **Optical solitons: theoretical and experimental challenges**. [S.l.]: Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2002. ISBN 3-540-00155-7.
- THYAGARAJAN, k.; GHATAK, A. **Fiber optic essentials**. [S.l.]: John Wiley and Sons, 2007. ISBN 978-0-470-09742-7.

- TIAN, J. Investigation on the bistability of linearly chirped nonlinear bragg gratings. **Optik**, v. 122, 2011.
- TU, F.; LUO, J.; GUOA, J.; YANG, C.; QIAN, Q.; LIU, D. Research on the optical fibers photosensitivity influenced by the doping process. **Second International Conference on Smart Materials and Nanotechnology in Engineering**, v. 7493, 2009.
- VASILEV, S. A.; MEDVEDKOV, O. I.; KOROLEV, I. G.; BOZHKO, A. S.; KURKOV, A. S.; DIANOV, E. M. Fibre gratings and their applications. **Quantum Electronics**, v. 35, n. 12, 2005.
- VENGHAUS, H. **Wavelength filters in fibre optics**. [S.l.]: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. ISBN 978-3-540-31769-2.
- VIDAL, R. J. R. **Sistema de calibração de sensores de temperatura baseados em redes de Bragg em fibra óptica**. Dissertação (Mestrado) — Universidade do Porto, 2009.
- WIRTH, A. **Fibras óticas: teoria e prática**. [S.l.]: Alta books, 2002.
- YOSIAA, Y.; PING, S. Double optical bistability and its application in nonlinear chalcogenide-fiber bragg gratings. **Physica B**, v. 394, 2007.
- ZANG, Z. Numerical analysis of optical bistability based on fiber bragg grating cavity containing a high nonlinearity doped-fiber. **Optics Communications**, v. 285, 2012.
- ZHANG, A. P.; GAO, S.; YAN, G.; BAI, Y. Advances in optical fiber bragg grating sensor technologies. **Photonic Sensors**, v. 2, n. 1, 2012.
- ZHANG, Y.; SONG, Q. Optical fiber grating bistability. **Natural Sciences**, v. 2, n. 4, 1997.