

Fonte de Múltiplos Comprimentos
de Onda utilizando Óptica Não-
Linear, Amplificação e
Realimentação Ópticas

Suzanne Assis de Souza Melo

Fevereiro/2014

Melo, Suzanne Assis de Souza

M528f

Fonte de Múltiplos Comprimentos de Onda utilizando Óptica Não-Linear, Amplificação e Realimentação Ópticas. / Suzanne Assis de Souza Melo. – Santa Rita do Sapucaí, 2014.

100 p.

Orientador: Prof. Dr. Arismar Cerqueira Sodré Junior.

Dissertação de Mestrado – Engenharia de Telecomunicações – Instituto Nacional de Telecomunicações – INATEL.

Inclui bibliografia.

1. Mistura de Quatro Ondas Múltipla 2. Fibra Dopada a Érbio 3. Realimentação Óptica 4. Fibras Altamente Não-Lineares 5. Engenharia de Telecomunicações I. Sodré Junior, Arismar Cerqueira. II. Instituto Nacional de Telecomunicações – INATEL. III. Título.

CDU 621.39

**Fonte de Múltiplos Comprimentos de Onda
utilizando Óptica Não-Linear, Amplificação e
Realimentação Ópticas.**

SUZANNE ASSIS DE SOUZA MELO

Dissertação apresentada ao Instituto Nacional
de Telecomunicações, como parte dos
requisitos para obtenção do Título de Mestre
em Telecomunicações.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Arismar Cerqueira
Sodré Júnior

Santa Rita do Sapucaí
2014

FOLHA DE APROVAÇÃO

Dissertação defendida e aprovada em ____ / ____ / ____ , pela comissão julgadora:

Prof. Dr. Arismar Cerqueira Sodré Júnior
INATEL

Prof. Dr. Christiano José Santiago de Matos
MACKENZIE

Prof. Dr. José Antônio Justino Ribeiro
INATEL

Coordenador do Curso de Mestrado
Prof. Dr. José Marcos Camara Brito

*“It matters not what someone is born, but what they
grow to be.”*
– Albus Dumbledore

Agradecimentos

Agradeço em primeiro lugar à Deus, por me iluminar durante minha caminhada no decorrer deste trabalho, por não me deixar desistir nas horas difíceis e por permitir que eu concluísse este trabalho com êxito.

Aos meus pais Suzete e Moizés e meu irmão Yuri, pelo apoio em todos os momentos, pelo incentivo e palavras de conforto quando precisei, e por sempre acreditarem em mim. À vocês todo meu amor e meu muito obrigada!

Aos meus avós Ethel, Ivan, Geralda e João pela fé e amor inabaláveis em todos os momentos. Àqueles que já faleceram, minha eterna saudade e gratidão por todos os momentos maravilhosos que me proporcionaram. Amo vocês!

Aos meus tios, tias e familiares, obrigada por fazerem parte da minha trajetória e por me apoiarem sempre.

Aos meus amigos e companheiros de mestrado: Paty, Igor, Egidio, Luis, Maíra, Monique e todos aqueles que me ajudaram, me confortaram, e estiveram presente comigo (alguns mesmo de longe) nesta caminhada que muitas vezes não foi fácil. À Marcela por me ajudar a tornar meus dias em Campinas mais felizes. À vocês meu muito obrigada pelos momentos de alegrias, tristezas, comemorações e lutas. Levarei todos em meu coração.

Ao meu namorado Rafael Liao por estar sempre presente, pelo carinho, amor, apoio, incentivo e paciência que foram fundamentais para que

chegasse até aqui. Obrigada por tudo! Você é um dos grandes responsáveis por esta vitória.

Ao Instituto Nacional de Telecomunicações por me conceder a oportunidade de realizar o curso de Mestrado. À todos os professores que fizeram parte da minha formação, em especial ao meu orientador Dr. Arismar Cerqueira Sodré Jr., por me aconselhar, me ajudar a trilhar meu caminho e me ensinar a valorizar o trabalho fruto de muita dedicação, trabalho duro e persistência. Muito obrigada pelo apoio de sempre!

À todos os funcionários e comunidade Inatel pelo profissionalismo e por toda a ajuda prestada quando precisei.

À Fundação Instituto Nacional de Telecomunicações (Finatel) e ao Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações (CPqD) pelo apoio financeiro.

Índice

Lista de Figuras	xi
Lista de Abreviaturas e Siglas	xvi
Lista de Publicações	xviii
Resumo.....	xix
Abstract	xx
Capítulo 1	1
1. Introdução	1
1.1 Contextualização e Revisão Bibliográfica.....	1
1.2 Descrição da dissertação.....	15
Capítulo 2	16
2. Geração de múltiplas portadoras ópticas	16
2.1. Deslocamento por recirculação de frequência (RFS - <i>Recirculating Frequency Shifting</i>)	16
2.2. <i>Lasers</i> de Modos Acoplados (MLL - <i>Mode-locked Lasers</i>)	18
2.3. Geração de pente óptico baseado em <i>laser</i> contínuo e moduladores de fase em cascata.....	22
2.4. OFCG baseado em micro-ressonadores em anel.....	26
Capítulo 3	29
3. Mistura de Quatro Ondas	29
3.1. Análise Teórica.....	29

Capítulo 4	42
4. Nova técnica para geração de Fonte de Múltiplos Comprimentos de Onda.	
42	
4.1. Geração de pente óptico utilizando MFWM	42
4.1.1. Simulações Numéricas	43
4.1.2. Experimentos.....	48
4.2. MFWM aplicado à Fotônica de Microondas.....	58
Capítulo 5	70
5. Conclusões	70
Referências Bibliográficas	72

Lista de Figuras

Figura 1-1 Crescimento do tráfego de vídeo sobre IP. Extraído de [1].	2
Figura 1-2 – Pulsos com alta taxa de repetição gerados por um pente óptico de frequências.	3
Figura 1-3 – Espectro de saída do pente. Extraído de [25].	6
Figura 1-4 – Espectro de saída utilizando 1 km de HNLF. Extraído de [40].	7
Figura 1-5 – Espectro óptico de saída do esquemático proposto em [42] (a) simulação, (b) resultado experimental.	8
Figura 1-6 – Geração de pente óptico através compressão do pulso no domínio do tempo. Extraído de [50].	11
Figura 1-7 – Espectro do pente óptico baseado na técnica de compressão do pulso. Extraído de [50].	12
Figura 2-1 – Esquemático da técnica RFS. Extraído de [63].	17
Figura 2-2 – Pente gerado pela técnica RFS. Extraído de [64].	18
Figura 2-3 – Diagrama esquemático do setup experimental (I: isolador óptico, PD são fotodiodos, PH é um pinhole (orifício), L1 e L2 são lentes, M1 e M2 são espelhos de cavidade e PZT é um atuador pizoelétrico). Extraído de [69].	21
Figura 2-4 – Espectro transmitido pela cavidade para diferentes deslocamentos do ponto mágico. Extraído de [69].	21
Figura 2-5 – Esquemático de geração de pente óptico com moduladores de fase e intensidade em cascata. Extraído de [70].	23
Figura 2-6 – Espectros do pente na saída dos moduladores em cascata para (a) 7 GHz, (b) 10 GHz e (c) 17 GHz. Extraído de [70].	24
Figura 2-7 – Princípio da técnica baseada em compressão do pulso no domínio do tempo: (a) o modulador de fase induz um gorjeio na forma de onda no tempo e	

aumenta a potência de pico antes de entrar na HNLF, (b) uma função de transferência não-linear (NOLM) é usada para regenerar a forma de onda comprimida no tempo e alimentar o estágio não-linear de forma que elimina a ondulação no pente. Extraído de [72].	25
Figura 2-8 – Espectro do OFCG de saída medido para um espaçamento entre as linhas de 10 GHz. Extraído de [72].	25
Figura 2-9 – Princípio do ressonador em anel. Extraído de [76].	27
Figura 2-10 – Montagem experimental de um gerador de pente óptico baseado em micro-ressonador em anel. Extraído de [74].	28
Figura 2-11 – Pentes de frequência gerados por micro-ressonadores em anéis para diferentes espaçamentos e potências de entrada. Extraído de [74].	28
Figura 3-1 – Onda de bombeamento gerando bandas laterais.	32
Figura 3-2 – Ilustração do FWM não-degenerado.	36
Figura 3-3 – Ilustração do princípio de FWM degenerado.	37
Figura 3-4 – Eficiência do processo de FWM para 2 nm (linha azul) e 5 nm (linha preta) em função da frequência relativa de bombeio entre a frequência de dispersão zero da fibra e a onda de bombeamento.	39
Figura 3-5 – Comparação da eficiência de FWM em relação a frequência relativa de bombeio para 1 e 5 km de fibra óptica.	41
Figura 4-1 – Número de produtos de FWM em função da frequência de separação.	44
Figura 4-2 – (a) Configuração utilizando apenas a HNLF; (b) Configuração utilizando HNLF e realimentação e (c) Esquema proposto para gerar um pente óptico utilizando MFWM, utilizando HNLF, realimentação e EDF.	46
Figura 4-3 – Resultados numéricos: (a) comparação entre apenas HNLF (curva vermelha escura) e HNLF e realimentação (curva azul), (b) comparação entre HNLF e realimentação (curva azul) e a nova proposta, baseada em HNLF, realimentação e EDF (curva preta).	47
Figura 4-4 – Bancada experimental.	48
Figura 4-5 – (a) Diagrama em blocos da montagem e (b) pente original.	49
Figura 4-6 – Relação sinal-ruído óptica para os primeiros produtos de FWM para 60m de HNLF (curva preta com retângulos), 70m (curva vermelha com círculos) e	

90m (curva azul com triângulos): (a) produtos da esquerda e (b) produtos da direita.	50
Figura 4-7 – (a) caracterização de ganho da fibra dopada e érbio em função do comprimento para duas regiões de interesse: 1550 e 1560 nm; (b) Número de produtos de FWM gerados em função da potência de bombeio da EDF.....	52
Figura 4-8 – (a) Espectro de saída para configuração utilizando apenas HNLF e (b) HNLF e EDF.....	53
Figura 4-9 – Número de produtos gerados em função da razão do acoplador utilizada.....	54
Figura 4-10 – Espectro de saída para os seguintes casos: (a) apenas HNLF, (b) HNLF e realimentação e (c) HNLF, realimentação e EDF.....	56
Figura 4-11 – Expansão do pente óptico original para mais de 200 linhas ópticas. .	57
Figura 4-12 – Espectro típico do pente óptico de frequências utilizando fonte pulsada.....	58
Figura 4-13 – (a) Sistema proposto, (b) Sistema RoF convencional.	59
Figura 4-14 – Bancada experimental para o sistema de MFWM aplicado à fotônica de microondas.	60
Figura 4-15 – (a) Espectro típico de saída do analisador de espectro de RF, (b) resultado das simulações de ganho de RF em função do produto de MFWM analisado.....	62
Figura 4-16 – Gerador de sinais de onda senoidal utilizado nos experimentos.....	63
Figura 4-17 – (a) Espectro típico de saída do OSA após a HNLF, (b) analisador de sinais elétrico utilizado nas medições.	63
Figura 4-18 – Potência de RF recebida em função do espaçamento entre os bombeios de entrada.....	65
Figura 4-19 – BTS Master Tester utilizado para fazer medições de S_{21} , em que a porta 1 é a entrada de RF do modulador e a porta 2 é a saída do fotodetector.	66
Figura 4-20 – (a) Medida de S_{21} para a portadora e para o primeiro produto de FWM realizadas com o BTS Master Tester, (b) Ganho do primeiro produto de FWM em relação à portadora para a faixa de 400 MHz a 6 GHz.	68

Figura 4-21 – Ganho em dB do primeiro produto de FWM em relação à portadora óptica em função do parâmetro de tensão de polarização do modulador na frequência de 28 GHz. 69

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Sumário dos resultados experimentais	57
Tabela 2 – Resultado de ganho de RF para o primeiro e segundo produtos de FWM em 4 GHz (simulação e experimento).....	64
Tabela 3 - Resultado de ganho de RF para o primeiro e segundo produtos de FWM em 6 GHz (simulação e experimento).....	64

Lista de Abreviaturas e Siglas

ADC	<i>Analog-Digital Converter</i>
ASE	<i>Amplified Spontaneous Emission</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
CW	<i>Continuous Wave</i>
DAC	<i>Digital-Analog Converter</i>
DWDM	<i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i>
EDF	<i>Erbium-Doped Fiber</i>
EDFA	<i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i>
ESA	<i>Electrical Spectrum Analyzer</i>
FPC	<i>Fiber Polarization Controller</i>
FRS	<i>Free Spectral Range</i>
FWHM	<i>Full-Width Half Maximum</i>
FWM	<i>Four-Wave Mixing</i>
GVD	<i>Group Velocity Dispersion</i>
HNLF	<i>Highly Non-Linear Fiber</i>
IM	<i>Intensity Modulator</i>
IQ	<i>In-phase and Quadrature</i>
ITU	<i>International Telecommunications Union</i>

MA	Modulador de Amplitude
MFWM	<i>Multiple Four-Wave Mixing</i>
MLL	<i>Mode-Locked Laser</i>
MZM	<i>Mach-Zehnder Modulator</i>
OFCG	<i>Optical Frequency Comb Generator</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
OSA	<i>Optical Spectrum Analyzer</i>
OSNR	<i>Optical Signal-to-Noise Ratio</i>
PM	<i>Phase Modulator</i>
PMD	<i>Polarization Mode Dispersion</i>
PS	<i>Phase Shifter</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
RF	<i>Radio Frequency</i>
RFS	<i>Recirculating Frequency Shifting</i>
RoF	<i>Radio over Fiber</i>
SBS	<i>Stimulated Brillouin Scattering</i>
SPM	<i>Self-Phase Modulation</i>
SRS	<i>Stimulated Raman Scattering</i>
SSB-SC	<i>Single-Side Band Suppressed Carrier</i>
WDM	<i>Wavelength Division Multiplexing</i>
WSS	<i>Wavelength Selective Switching</i>
XPM	<i>Cross Phase Modulation</i>

Lista de Publicações

1. S. A. S. Melo, A. R. Nascimento Jr., Arismar Cerqueira S. Jr., L. H. H. Carvalho, D. M. Pataca, J. C. R. F. Oliveira, H. L. Fragnito, “Frequency Comb Expansion based on Optical Feedback, Highly Nonlinear and Erbium-doped Fibers”, *Optics Communications* **312**, 287-291 (2014).
2. S. A. S. Melo, A. R. Nascimento Jr., Arismar Cerqueira S. Jr., L. H. H. Carvalho, D. M. Pataca, J. C. R. F. Oliveira, “Optical frequency comb generated by means of enhanced multiple four-wave mixing”, *SPIE Photonics West*, California February 2014.
3. S. A. S. Melo, Arismar Cerqueira S. Jr., A. R. Nascimento Jr., L. H. H. Carvalho, R. Silva, J. C. R. F. Oliveira, “Optical Frequency Comb based on Multiple Four-Wave Mixing and Erbium-Doped Fiber”, In: *Proceedings of International Workshop on Telecommunications (IWT)*, 2013.
4. Suzanne A. S. Melo, S. JR., Arismar Cerqueira S. Jr., A. R. Nascimento Jr., L. H. H. Carvalho, R. Silva, J. C. R. F. Oliveira, “(Invited Paper) Optical Frequency Comb based on Multiple Four-Wave Mixing and Erbium-Doped Fiber”, *Revista de Telecomunicações* **15**(2), 43-47 (2013).
5. Arismar Cerqueira S. Jr., E. Raimundo-Neto, S. A. S. Melo, D. F. Noque, J. R. G. Rosa, R. M. Borges, “Research Activities on Microwave Photonics, Nonlinear Optics and Optical Communications from the Lab. WOCA from Inatel Areas”, in *WorkInnova- Denmark-South America Workshop on Photonics Technologies (WorkInnova)*, Campinas November 2013.

Resumo

Este trabalho tem por objetivo o desenvolvimento de fontes de múltiplos comprimentos de onda utilizando óptica não-linear, amplificação e realimentação ópticas. Para tal, almeja-se obter pentes ópticos de frequência por meio do aumento da eficiência do processo de Múltiplas Misturas de Quatro Ondas (MFWM – *Multiple Four-Wave Mixing*).

O trabalho baseou-se em estudos analíticos da eficiência do efeito não-linear de Múltiplas Misturas de Quatro Ondas, assim como em simulações numéricas utilizando o *software* VPI Transmission MakerTM e experimentos realizados nos laboratórios WOCA (*Wireless and Optical Convergent Access*) do Instituto Nacional de Telecomunicações (Inatel) e Lasor do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações (CPqD). Resultados numéricos e experimentais comprovam a eficiência de técnica proposta e a sua aplicabilidade em comunicações ópticas, fotônica de microondas e geração de pulsos ultracurtos.

Palavras-chave: Comunicações Ópticas, Fibras Altamente Não-Lineares, Fotônica de Microondas, Geração de Pulsos Ultracurtos, Mistura de Quatro-Ondas e Pente Óptico de Frequência.

Abstract

This work is focused on the development of multiwavelength sources using nonlinear optics, optical amplification and feedback. It is aimed to obtain optical frequency combs by increasing the efficiency of Multiple Four-Wave Mixing (MFWM) process.

The work is based on analytical studies of the MFWM efficiency, as well as in numerical simulations using the piece of software VPI Transmission MakerTM and experiments in the laboratories WOCA (Wireless and Optical Convergent Access) from the National Institute of Telecommunications (Inatel) and Lasor from Research and Development Center in Telecommunications (CPqD). Numerical and experimental results demonstrate the efficiency of the proposed technique and its applications in optical communications, microwave photonics and ultrashort pulses generation.

Keywords: Optical Communications, Highly Non-Linear Fibers, Microwave Photonics, Ultrashort Pulse Generation, Multiple Four-Wave Mixing and Optical Frequency Comb Generator.

Capítulo 1

1. Introdução

1.1 Contextualização e Revisão Bibliográfica

O crescente aumento da demanda por serviços que requerem altas taxas de dados cria a necessidade de se desenvolverem sistemas de altas capacidades para os núcleos de rede. Em 2017 o tráfego de IP global irá alcançar 1,4 zetabytes por ano, o que muitos chamam de Era Zetabyte. Nesse ano, serão gerados 120,6 exabytes por mês como mostrado na **Figura 1-1**, o que corresponde ao tráfego total do ano de 2008. De 2012 a 2017 a taxa de crescimento anual será de 23%, o que corresponde a um fator multiplicativo de três vezes no referido período [1]. Para que esta demanda por serviços seja satisfeita, os sistemas de telecomunicações devem ser mais robustos e suportar uma capacidade de dados cada vez maior, o que implica em avanços nos sistemas já existentes neste ano de 2014.

Para atender tal necessidade, novas técnicas têm sido alvo de estudos para o desenvolvimento de dispositivos que se adequem às novas tendências. Nesta linha, podemos destacar o desenvolvimento de *geradores de pentes ópticos de frequências* (OFCG – *Optical Frequency Comb Generator*). Os OFCGs são geradores ópticos de múltiplas portadoras coerentes que constituem a célula básica dos transmissores ópticos coerentes de multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM – *Wavelength Division Multiplexing*). Ele produz um espectro de frequências discretas, igualmente espaçadas entre si e, geralmente, com espaçamento ajustável.

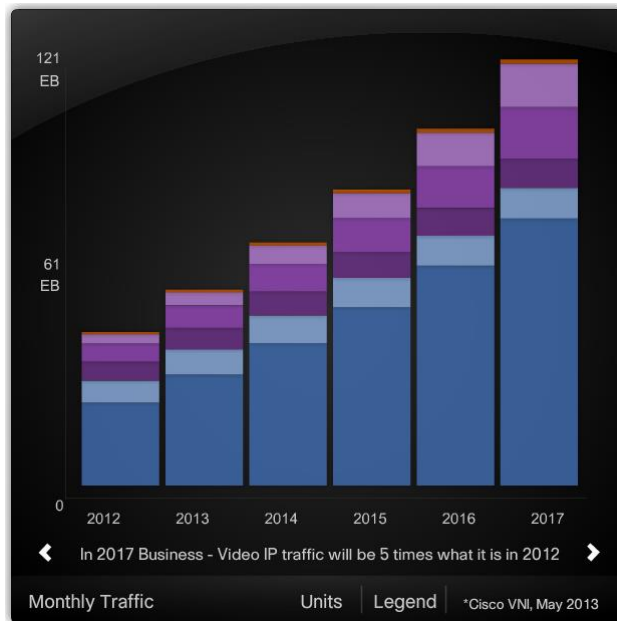


Figura 1-1 Crescimento do tráfego de vídeo sobre IP. Extraído de [1].

OFCGs são desejados para diversas aplicações. Podemos destacar uma variedade de trabalhos em diversas linhas de pesquisa, entre eles: Conversão de comprimento de onda [2][3][4][5]; transmissão de dados reais em alta velocidade em sistemas a fibra óptica [6]; multiplicação de frequência [7]; metrologia [8], fonte de múltiplos comprimentos de onda para sistemas DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) [9], geração de super-canal para sistemas de multiplexação por divisão de frequências ortogonais (OFDM – *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) [10], fontes de pulso com altas taxas de repetição [11], astrofísica [12], *multicasting* em redes ópticas passivas DWDM (DWDM-PON) [13], geração arbitrária de forma de onda óptica [14], monitoramento de dispersão e relação sinal-ruído óptica (OSNR – *Optical Signal-to-Noise Ratio*) [15], desenvolvimento de relógios atômicos ópticos [16][17], testes de possíveis variações de constantes fundamentais [18], óptica não-linear extrema [19], espectroscopia de banda larga, alta resolução e sensibilidade [20][21][22] e geração de altos-harmônico para geração de pulsos de attosegundos [23].

Para a geração de rajadas de pulsos com altas taxas de repetição, ou fonte de pulsos ultra-curtos o pente óptico de frequências deve possuir alto nível de coerência entre as linhas espectrais. Isto irá assegurar que a largura do pulso no domínio do

tempo seja muito pequena. A **Figura 1-2** apresenta o resultado da transformada inversa de Fourier de um OFCG simulado com alta coerência entre as linhas espectrais. Neste caso temos os pulsos no domínio do tempo com largura de 25 ps.

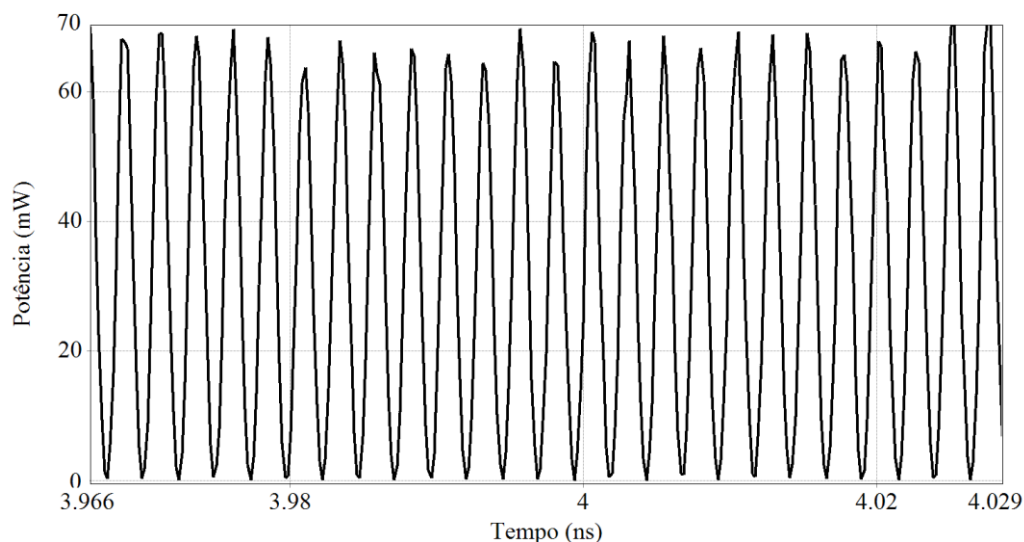


Figura 1-2 – Pulsos com alta taxa de repetição gerados por um pente óptico de frequências.

OFCGs podem ser produzidos de diversas maneiras. Uma das primeiras técnicas desenvolvidas foi por meio de *lasers* de modos travados (MLL – *Mode-locked Lasers*). Nesta técnica, é possível obter pentes ópticos estáveis, os quais são desejáveis para diversas aplicações. Porém, em altas taxas de repetição, esta técnica requer grande complexidade de construção e operação. Outro problema é que a separação entre as linhas espectrais do pente não pode ser mudada efetivamente devido à falta de possibilidade de reconfigurar e estabilizar a cavidade MLL ao mesmo tempo [24].

A maneira mais comum de se obter um OFCG é utilizando moduladores eletro-ópticos ressonantes [24][25][26][27][28]. O princípio baseia-se em tornar a cavidade óptica ressonante dos moduladores na entrada onde são aplicados os *lasers* de forma que bandas laterais surjam à medida que passam múltiplas vezes na cavidade [25]. Esta abordagem produz pentes com boa Relação Sinal-Ruído Óptica (OSNR – *Optical Signal-to-Noise Ratio*), mas geralmente não provê uma banda larga de linhas espectrais. Alternativamente, temos pentes gerados com micro-resonadores monolíticos com alto fator-Q [29]. Estes permitem a geração de pentes com

excelente eficiência, porém seu tamanho físico fixa o espaçamento das linhas e permite uma faixa de variação muito limitada.

Outra maneira de se produzir um pente de frequências óptico é pelo efeito de Múltipla Mistura de Quatro-Ondas (MFWM – *Multiple Four-Wave Mixing*), que tem sido demonstrado em muitas pesquisas [25][30][31]. Nesta técnica, dois ou mais *lasers* de bombeamento são aplicados em um sistema contendo uma fibra óptica altamente não-linear (HNLFF – *Highly Non-Linear Fiber*) e a saída apresentará um espectro com várias bandas laterais igualmente espaçadas advindas do batimento entre as frequências, através do processo de MFWM que ocorre na fibra. O intuito deste trabalho é utilizar fibras altamente não-lineares e produzir OFCGs através do efeito de MFWM para superar as limitações advindas de outras técnicas. O intuito é prover um pente com uma grande largura de faixa e frequências ópticas com espaçamento ajustável.

O MFWM como meio de gerar pentes ópticos de frequência tem sido demonstrado a partir dos anos de 1990. Inicialmente, podemos destacar o trabalho de Thompson e Roy (1991) [32] que começaram a investigar a dinâmica do processo de MFWM em uma fibra monomodo padrão. Foram descritas e apresentadas as modelagens das equações de propagação e amplitude para duas ondas de bombeamento e quatro ondas geradas por *Mistura de Quatro Ondas* (FWM – *Four-Wave Mixing*). Através da integração numérica dessas equações, foi possível mapear a troca de energia periódica, já que ocorrem nas frequências que dão origem a novos produtos de FWM, e caótica existente na propagação da luz pela fibra óptica. Depois, Millot (2001) [33] desenvolveu um modelo envolvendo bandas laterais de mais alta ordem e explorou a interação entre os bombeamentos aplicados e as bandas de alta ordem geradas. Trillo et al. (1994) [34] investigaram a dinâmica não-linear do processo de FWM com duas ondas de bombeamento aplicadas. Depois, podemos destacar o trabalho de Xu et al. (2009) [35]. Foi proposto um modelo teórico que investiga a troca de energia através de FWM entre um número arbitrário de ondas incidentes. O intuito era explorar o comportamento de FWM aplicado a *laser* de fibra dopada a érbio de múltiplos comprimentos de onda. Ao contrário do que se havia proposto até então, um importante trabalho foi publicado em 2010, em que múltiplos

processos de FWM podem co-existir independentemente dentro de fibras ópticas [36].

Kyo Inoue (1992) [37] apresentou um trabalho no qual foi investigado o processo de FWM na região de dispersão zero da fibra. Foi realizado um estudo teórico para fibras com comprimento de onda de dispersão zero uniforme e não-uniforme, dentro de uma região em que o declive de dispersão (*dispersion slope*) foi considerado aproximadamente linear. Esse trabalho foi de fundamental importância para entender o processo de eficiência de FWM e que o comportamento dos produtos quando temos uma fibra com comprimento de onda de dispersão zero não-uniforme não é simplesmente a soma de cada comprimento de onda de dispersão zero individual. Ao contrário, um padrão complexo aparece e a condição de casamento de fase para fibras não-uniformes não é completamente satisfeita, o que é o caso das fibras reais. Isto ocorre porque o processo de fabricação das fibras não é perfeito e leva a variações no índice de refração da fibra em cada segmento, e, conseqüentemente a variação do comprimento de onda de dispersão zero. Os resultados são bem úteis para estudo da influência de FWM em sistemas de transmissão multi-canal, como é o caso de sistemas DWDM.

Os primeiros trabalhos que reportam geração de pentes ópticos baseados em MFWM datam de 1997 e 1998 [30][31]. Em [25] foi demonstrado a expansão de um *laser* CW modulado externamente por um modulador eletroóptico em um pente de várias linhas espaçadas uniformemente no espectro. Um estudo de dispersão foi realizado e demonstrou-se que expansão do pente é favorecida trabalhando com dispersão positiva em relação ao comprimento de onda, ou seja, em regime de dispersão anômala. Também foram realizados estudos sobre engenharia de dispersão para favorecer o processo não-linear e assim, aumentar a eficiência de FWM. Como resultado, foi obtido um pente com 55 componentes de frequência ao longo de 1,1 THz com 20 GHz de espaçamento entre os modos. O pente foi caracterizado no domínio do tempo com taxa de repetição de 20 GHz e 2,7 ps de largura temporal no ponto de decaimento de 3 dB (FWHM – *Full Width Half Maximum*). Na **Figura 1-3** tem-se o espectro do pente na melhor configuração.

Outro importante estudo foi realizado por Song et al. (1999) [38]. Nele foi demonstrado teoricamente e experimentalmente que além do efeito não-linear de FWM, existem outros efeitos derivados da susceptibilidade de terceira ordem, como a automodulação de fase (SPM – *Self-Phase Modulation*) e a modulação de fase cruzada (XPM – *Cross-Phase Modulation*) que influenciam o processo de propagação da onda óptica na fibra e podem levar a erros de cálculo da eficiência do processo de FWM. Essa influência se torna ainda maior quando as potências de transmissão dos canais são altas e a dispersão na fibra ou o espaçamento entre os canais é pequeno. Uma outra forma de cálculo do fator de casamento de fase foi proposta levando em consideração tais efeitos e uma grande melhora na estimação da potência gerada de FWM foi alcançada.

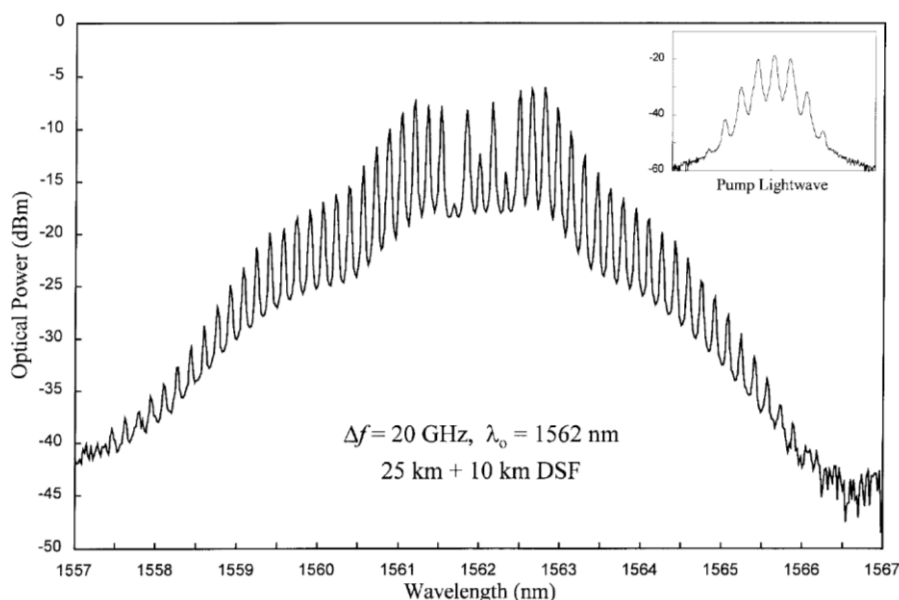


Figura 1-3 – Espectro de saída do pente. Extraído de [25].

Outro trabalho na mesma linha foi publicado por Jung et al. (2005) [39], e, neste caso uma nova condição de casamento de fase foi proposta, mas agora levando em consideração propriedades ópticas lineares e não-lineares, como comprimento de onda de dispersão zero da fibra (ZDW), declive de dispersão, e índice de refração não-linear. Foram feitos testes experimentais e numéricos com fibras de dispersão deslocada e dispersão deslocada não-nula para comprovar a validade do método proposto. Outra interessante propriedade comprovada foi que a eficiência de FWM pode ser alta, ou seja, a condição de casamento de fase pode ser satisfeita, mesmo

longe do ZDW da fibra. Isto ocorre quando o comprimento de onda de bombeio e o comprimento de onda da luz secundária forem colocadas muito próximas em um caso de FWM degenerado.

Consequente, temos a demonstração de um pente a partir de 1 km de HNLF proposto por Yam et al. (2002) [40]. Um único *laser* CW iGm que possui um espectro de saída com múltiplas frequências com pequeno espaçamento entre as linhas é aplicado em uma fibra não-linear. O comprimento de onda do *laser* é próximo ao comprimento de onda de dispersão zero da fibra (ZDW). O pequeno declive de dispersão permite uma forte interação não-linear ao longo da fibra óptica para produzir várias frequências ópticas. A **Figura 1-4** mostra o espectro de saída medido por um analisador de espectro óptico (OSA - *Optical Spectrum Analyzer*). Foi gerado um pente com mais de 200 canais espaçados de 0,21 nm em 10 dB de flutuação com uma largura de banda de 57 nm.

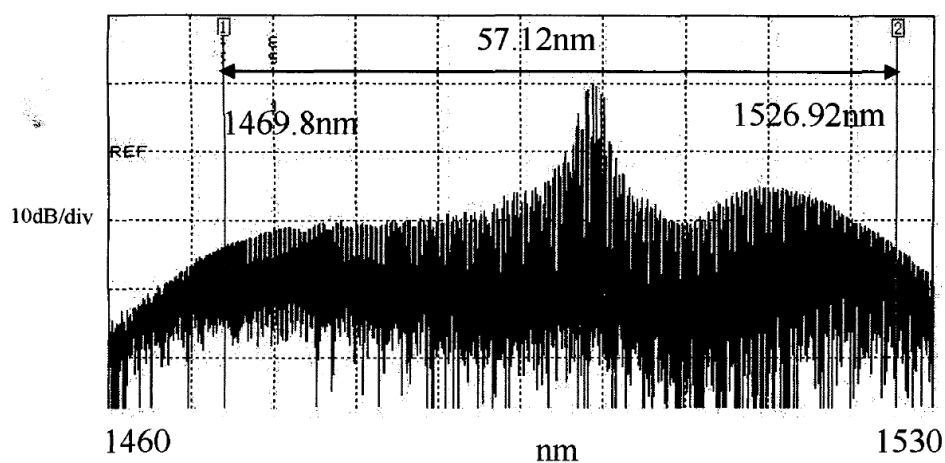


Figura 1-4 – Espectro de saída utilizando 1 km de HNLF. Extraído de [40].

Jean-Philippe Fève (2007) [41] publicou um trabalho teórico que investiga as interações de FWM que ocorrem na fibra óptica na presença de ganho. Foi demonstrado que o ganho proporciona geração construtiva dos sinais, favorecendo o processo de FWM, mesmo no caso de grande descasamento de fase. Isto significa que o processo pode ser bastante eficiente até em fibras monomodo padrão operando na região de dispersão normal.

Arismar Cerqueira S. Jr. et al. (2008) propuseram uma maneira eficiente de gerar produtos de MFWM de banda larga [42]. O esquemático proposto consiste de duas ondas de bombeio combinadas em um acoplador de 3 dB e sendo aplicadas em um modulador de amplitude. Depois, passam por um estágio de amplificação que consiste de dois amplificadores a fibra dopada a érbio (EDFA – *Erbium Doped Fiber Amplifier*) em cascata e, por fim, sua saída é aplicada a um pequeno trecho de HNLF. Também foram utilizados controladores de polarização para otimizar a eficiência de FWM na fibra HNLF. O resultado foi medido em um OSA com resolução de 0,01 nm. A **Figura 1-5** mostra o espectro de saída do esquemático respectivamente para o resultado numérico e experimental. Neste caso, pedaços muito curtos de fibra da ordem de 2 metros foram utilizados com três finalidades: reduzir a diferença de fase relativa entre as linhas espectrais em fibras não mantenedoras de polarização; evitar variações indesejáveis de ZDW; e preservar a condição de casamento de fase. Na melhor configuração foi obtida uma largura de banda de 300 nm contendo produtos de MFWM.

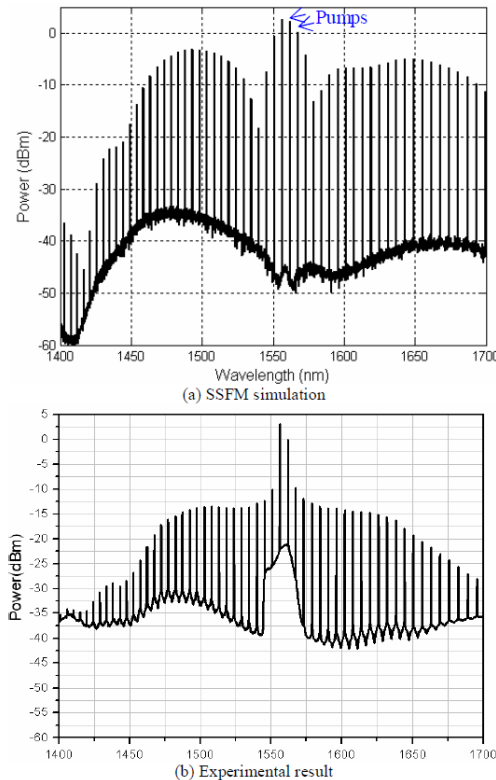


Figura 1-5 – Espectro óptico de saída do esquemático proposto em [42]: (a) simulação, (b) resultado experimental.

A geração de produtos de MFWM também pode ser maximizada com o uso de diversas fibras HNLF em conjunto ou CDPF (*comb-like dispersion profiled fiber*) que representam cadeias de segmentos alternados de fibras monomodo padrão e fibras com dispersão deslocada ou HNLFs. Esta ideia foi inicialmente proposta por Inoue (1994) [43] para obter uma faixa larga de conversão de comprimento de onda em uma fibra através de FWM. Subsequentemente, Marhic et al. (1999) [44] e Provino et al. (2003) [45] também propuseram técnicas para maximizar a performance de amplificadores paramétricos. Dependendo da aplicação desejada, parâmetros como Z_{DW} , declive de dispersão, e coeficiente não-linear devem ser escolhidos convenientemente para obter a faixa de frequência necessária, uniformidade e separação entre os produtos de FWM [42].

Em 2008 foi reportado um trabalho de geração de um pente para espectrometria astrofísica utilizando FWM em fibras HNLF de pequeno comprimento [8]. Tal comprimento tem como objetivo além de minimizar o ruído, evitar alargamento da largura de linha dos canais do pente e evitar espalhamento estimulado Brillouin (SBS – *Stimulated Brillouin Scattering*). A configuração proposta tem como objetivo gerar OFCG com frequências ópticas precisas com espaçamento exigido para aplicações astrofísicas. Neste caso, para garantir a estabilidade necessária, dois *lasers* são aplicados em uma fibra não-linear, porém o segundo *laser* (*laser* secundário) é amarrado em fase com o primeiro utilizando um oscilador estável como referência. O pente pode ser configurado de dezenas de gigahertz até 1 THz.

Posteriormente, Arismar Cerqueira S. Jr. et al. (2009) propuseram uma nova técnica baseada em três ondas de bombeio sendo aplicadas, no lugar de apenas duas como visto em trabalhos anteriores [46]. Os *lasers* CW são aplicados em um acoplador e modulados por um modulador de intensidade. Após este estágio, os bombeios passam por dois EDFAs em cascata e são finalmente lançados na HNLF. Um OSA é utilizado para medir os resultados obtidos com resolução de 0,01 nm. Com esta técnica foi possível obter a geração de 275 produtos de MFWM ao longo de 220 nm de banda óptica. Destes, 136 possuem OSNR acima de 10 dB. No trabalho também foram feitos experimentos com os bombeios espaçados desigualmente e foi realizada uma comparação com a técnica de dois bombeios,

mostrando a eficiência da técnica proposta. Boggio et al. (2009) [47] apresentaram uma técnica para geração de pentes ópticos abrangendo quase uma oitava utilizando FWM. A técnica se baseia em alternância de fibras monomodo padrão e fibras HNLF para gerenciar a dispersão com bombeio provindo de dois *lasers* modulados em amplitude externamente. A banda óptica atingida se estende ao longo de mais de 700 nm com OSNR acima de 30 dB. Do mesmo autor, foi publicado um outro artigo no qual foi explorado o uso de fibra dopada a érbio em conjunto com HNLF para obter um OFCG de banda larga com duas fontes de bombeio pulsadas. Como resultado temos um pente de frequências ópticas estendendo por mais de 350 nm, frequência de separação de 100 GHz e OSNR acima de 15 dB [48].

Com o objetivo de melhorar a técnica de múltiplo FWM, em questão de número de produtos de alta OSNR, surgiram alguns trabalhos propondo novos métodos para geração de OFCGs. Podemos citar o trabalho de Li et al. (2012) [49], que utilizaram realimentação óptica para favorecer o processo de MFWM. Experimentos e simulações comprovaram a eficiência do novo método proposto que consiste em aplicar a saída da HNLF com alguns produtos de FWM gerados de volta no início da fibra e, assim, o processo irá ocorrer novamente porém desta vez, com os novos produtos gerados como semente.

Até então, a maioria dos trabalhos publicados na literatura, com resultados significantes, utilizavam fontes pulsadas como entrada para as HNLFs. O objetivo da fonte pulsada é aumentar a potência de pico entregue à HNLF, e assim, favorecer o processo de FWM. Porém, é muito interessante eliminar a necessidade por fontes pulsadas e utilizar ondas contínuas, já que para transmissão de dados, por exemplo, seria inviável modulá-los com informação se a fonte de geração do OFCG for pulsada. Reconhecendo tal necessidade, Myslivets et al. (2012) [50] publicaram uma interessante técnica partindo de dois *lasers* CW e baixa potência para geração de pentes ópticos de banda larga e boa OSNR. Neste método as duas fontes de luz CW propagam ao longo da fibra não-linear agindo como ondas de bombeio paramétricas para ocorrência do processo de FWM, que depende da potência de entrada e do nível de casamento de fase existente entre as linhas espectrais ao longo da banda. Além da potência, a eficiência de FWM, que é diretamente proporcional a figura de mérito do misturador, também depende do comprimento de interação e do coeficiente de não-

linearidade da fibra. Para maximizar tal figura de mérito, pode-se aumentar a potência dos bombeios aplicada. Por outro lado, o uso de altas potências leva a geração de ruído de banda larga através do espalhamento de Raman e amplificação paramétrica de ruído. Além disso, o espalhamento de Brillouin também limita a potência máxima a ser aplicada na HNLF. Assim, o método proposto faz uso de fontes com bombeios de diodo convencionais que trabalham com baixa potência. O sistema consiste de um primeiro estágio não-linear, composto de uma HNLF que funciona como um elemento de indução de fase não-linear, ou seja, há um batimento entre os dois bombeios de entrada que geram algumas bandas laterais, porém limitadas. Neste estágio, a forma de onda no tempo experimenta um gorjeio positivo induzido pelas não-linearidades de Kerr. No próximo passo, a forma de onda com gorjeio é comprimida em um segmento curto de fibra monomodo padrão possuindo dispersão de segunda ordem β_2 negativa. Subsequentemente, a forma de onda comprimida entra em um segundo estágio não-linear com alta potência de pico, permitindo que o segundo misturador opere com uma maior figura de mérito. Consequentemente, a interação de FWM que ocorre no segundo estágio resulta em geração de produtos de mais alta ordem, como necessário para criação de pentes com grande largura de faixa. Nota-se que um gerenciamento de dispersão rigoroso deve ser realizado. Esta ideia está mostrada na **Figura 1-6**. Outros estágios não-lineares podem ser usados subsequentemente, o que, teoricamente aumentaria ainda mais o efeito de MFWM.

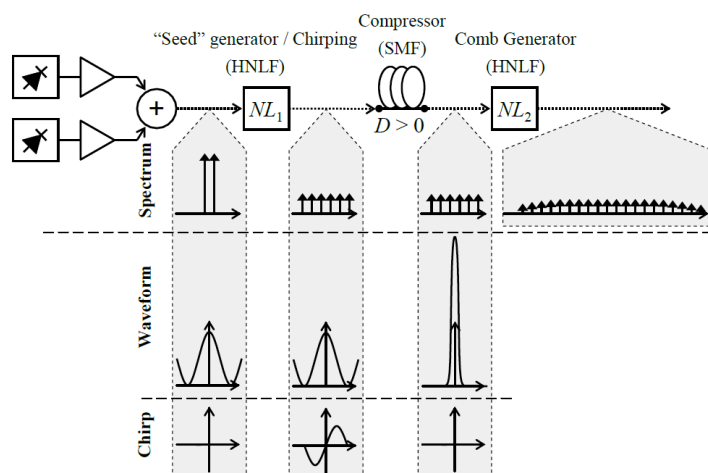


Figura 1-6 – Geração de pente óptico por meio da compressão temporal do pulso. Extraído de [50].

Na melhor configuração, foi obtido um pente com 150 nm de banda óptica espaçados de 1 nm com OSNR maior que 35 dB (**Figura 1-7**), e com *lasers* de bombeamento com potência de 500 mW apenas.

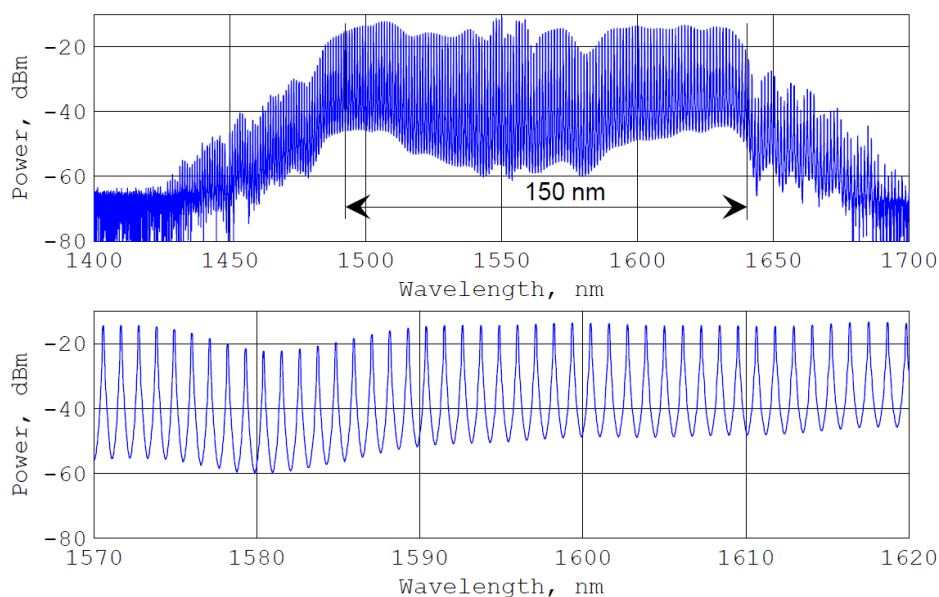


Figura 1-7 – Espectro do pente óptico baseado na técnica de compressão do pulso. Extraído de [50].

Além da alta largura de banda e OSNR desejada, duas outras características são de extrema importância para a obtenção de OFCGs: baixo ruído de fase entre as linhas espectrais e pouca flutuação entre os níveis de potência das linhas do pente, ou seja, é necessário que o pente seja plano. Nesta linha, podemos destacar os trabalhos de Weiner et al., que se dedicaram ao estudo para geração de OFCGs com pouquíssima flutuação entre os níveis das linhas espectrais. Em [51] foi demonstrado um esquema que utiliza as vantagens de um OFCG baseado em moduladores eletroópticos e fibras HNLF. Como resultado, tem-se um pente de 10 GHz com largura de banda de 1 THz, sendo que 750 GHz está dentro de uma flutuação máxima de 1 dB. Também foi provada a eficiência de compressão do pulso no tempo, que resultou em pulsos com 940 fs. Outro recente trabalho de Weiner et al. (2013) [52] também baseado em moduladores eletroópticos combinados com HNLFs possibilitou a geração de 365 linhas espectrais (3,64 THz) dentro de uma variação de potência de 3,5 dB com taxa de repetição de 10 GHz. O trabalho também estuda e demonstra um alto nível de coerência entre os modos espectrais do pente. Também

em [53][54] encontramos estudos sobre a caracterização do ruído de fase entre as linhas espectrais do pente óptico. Outro importante fator de qualidade que encontramos na literatura são trabalhos que medem a estabilidade dos OFCGs gerados, como em [55] e [56].

Para sumarizar, recentemente, Yang et al. (2013) [57], publicaram um artigo contendo a análise e comparação de diversas técnicas diferentes para geração de OFCs baseados em efeitos não-lineares em HNLFs. Características como comprimento de onda central, taxa de repetição e potência de entrada foram investigadas em detalhes. Resultados experimentais mostram que o número de linhas espectrais e a flutuação entre as mesmas podem ser melhorados utilizando MFWM e auto-modulação de fase em HNLFs.

Os OFCGs, como transmissores, são de extremo interesse para os sistemas com taxas superiores a 100 Gb/s por canal. Para que sistemas com taxas de transmissão ainda maiores, como 400 Gb/s e 1 Tb/s sejam possíveis, é também necessário o desenvolvimento de técnicas mais avançadas de modulação, multiplexação e recepção. Os desafios principais estão relacionados aos métodos de geração e recepção de novos formatos de modulação e multiplexação, às técnicas de aumento de banda e redução do ruído na amplificação óptica e à redução de ruídos e distorções presentes na transmissão e recepção, incluindo efeitos lineares e não-lineares provenientes da propagação na fibra óptica.

Por isto, outra técnica que tem sido de considerável interesse é o uso de multiplexação por divisão de frequências ortogonais (OFDM – *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) em sistemas ópticos. A técnica de OFDM em conjunto com a detecção coerente (comparado com a detecção direta), mostrou possuir melhor desempenho em sensibilidade do receptor, eficiência espectral e robustez contra dispersão por modo de polarização. Por outro lado, requer maior complexidade na construção de transmissores.

O uso de OFCGs são de extremo interesse para implementação da técnica OFDM. Como o OFDM faz uso de múltiplas subportadoras, ele pode utilizar as características do OFCG para utilizá-lo como transmissor. Geradores de pentes de

frequência são bem adequados para sistemas ópticos de alta capacidade com taxas superiores a 100 Gb/s.

Os sistemas DWDM são hoje responsáveis pela taxa comercial de 40 Gb/s trabalhando na grade de 50 GHz proposta pela União Internacional de Telecomunicações (ITU - *International Telecommunication Union*) [58], que possuem eficiência espectral de 1 b/s/Hz. Porém a demanda de tráfego exige que os sistemas ópticos de próxima geração utilizem redes de transmissão com taxas superiores a 100 Gb/s por canal. Para que isto ocorra, é necessário que a eficiência espectral seja, no mínimo, o dobro daquela que possibilita a transmissão de sinais a 40 Gb/s na grade DWDM de 50 GHz, ou seja, de 2 b/s/Hz para garantir que a ocupação espectral se encaixe na grade DWDM de um sinal óptico modulado a 100 Gb/s. Para aumentar a capacidade dos sistemas ópticos existem três formas tradicionais, que basicamente são: a instalação de fibras ópticas adicionais, que pode ser uma alternativa dispendiosa devido a gastos com obras civis e burocráticos; a segunda alternativa é aumentar o número de canais transmitidos. Com os sistemas WDM é possível explorar esse método com a vantagem de redução de custos, já que os dispositivos presentes na rede serão os mesmos utilizados com menor ou maior número de canais sendo utilizados. Para isso é necessário aumentar ao máximo a eficiência espectral do sistema através da redução do espaçamento entre canais. Por fim, uma terceira possibilidade está em aumentar a taxa de transmissão por canal. As taxas aumentaram consideravelmente nos últimos anos, de 2,5 Gb/s em 1990 a 40 Gb/s a nível comercial disponível a partir de 2002 [58][59], e caminha para 100 Gb/s. A vantagem desta alternativa está no uso do mesmo número de transmissores e receptores para transmitir um maior número de bits, porém os dispositivos presentes na rede de 40 Gb/s não estão preparados para operar com uma taxa muito maior. Isto porque o aumento da capacidade causa uma intensificação dos efeitos degradantes nos sinais que propagam nas fibras ópticas, como os efeitos não-lineares e os efeitos de dispersão, que se tornam cada vez mais críticos, tanto com o aumento da taxa, quanto a diminuição do espaçamento entre canais [60].

Com a finalidade de contornar tais problemas e tornar o sistema mais robusto, além de OFCGs estão sendo desenvolvidos outros dispositivos ópticos não-lineares.

Podemos citar Grades de Fibras, Amplificadores Não-Lineares, Interferômetros, dentre outros [61].

1.2 Descrição da dissertação

Neste trabalho será abordada uma nova técnica para geração de uma fonte de múltiplos comprimentos de onda baseado em um pente óptico de frequências. Foram realizadas análises analíticas, simulações e experimentos com a técnica de MFWM utilizando fibras altamente não-lineares para produzir um OFCG sintonizável, com banda larga e frequências ópticas precisas com espaçamento ajustável. O capítulo 2 trata das diversas técnicas para geração de OFCGs, como por exemplo, baseados em *lasers* de modo travado (MLL – *Mode-Locked Lasers*) e micro ressonadores em anel. Subsequente, temos um capítulo contendo a descrição teórica e analítica do efeito não-linear de mistura de quatro-ondas e MFWM.

O capítulo 4 irá mostrar os trabalhos experimentais realizados nos laboratórios WOCA (*Wireless and Optical Convergent Access*) do Inatel e Lasor do CPqD. Foram realizadas medidas que comprovam a eficiência de uma nova técnica proposta para expansão de um pente óptico de 20 portadoras para mais de 200 portadoras ópticas. Além disso, o capítulo 4 irá apresentar um exemplo de aplicação envolvendo o efeito de MFWM. A aplicação abordada trata da geração de ganho em enlaces de fotônica de microondas por meio do efeito não-linear mencionado. Foram realizadas simulações e experimentos a fim de comprovar a eficiência do processo. Por fim serão apresentadas as conclusões e trabalhos futuros.

Capítulo 2

2. Geração de múltiplas portadoras ópticas

Neste capítulo serão abordadas algumas técnicas de geração de pentes ópticos, que são: Deslocamento por recirculação de frequência (RFS - *Recirculating Frequency Shifting*), *Lasers* de modo travado (MLL – *Mode-Locked Lasers*), utilizando moduladores de fase em cascata e utilizando micro-resonadores em anel. Serão evidenciadas as vantagens e desvantagens de cada método para justificar a proposta deste trabalho, a qual baseia-se na geração de pente óptico utilizando o efeito não-linear de MFWM em fibras altamente não-lineares e dopadas com érbio.

2.1. Deslocamento por recirculação de frequência (RFS - *Recirculating Frequency Shifting*)

A técnica de deslocamento por recirculação de frequência é baseada na conversão de frequência produzida pela modulação de banda lateral única com portadora suprimida (SSB-SC – *Single Side Band Suppressed Carrier*). Destaca-se o grande número de portadoras geradas ao custo de uma maior complexidade de circuito comparada às outras técnicas descritas posteriormente [62].

O funcionamento deste circuito está demonstrado na **Figura 2-1** [63]. Um *laser* semente é aplicado em um anel óptico de recirculação, onde a forma de onda periódica do sinal utilizado para modular o sinal de entrada controla o deslocamento

de frequência. O esquemático é composto de um *laser* sintonizável, um acoplador óptico 50/50, um modulador óptico Mach-Zehnder (MZM) duplo IQ (em fase e quadratura) que irá controlar o deslocamento de frequência, dois EDFAs, um filtro seletivo em frequência (WSS - *Wavelength Selective Switching*) para limitar o número de portadoras recirculadas e o nível de ruído de emissão estimulada, e uma linha de atraso óptica com objetivo de ajustar o comprimento do anel.

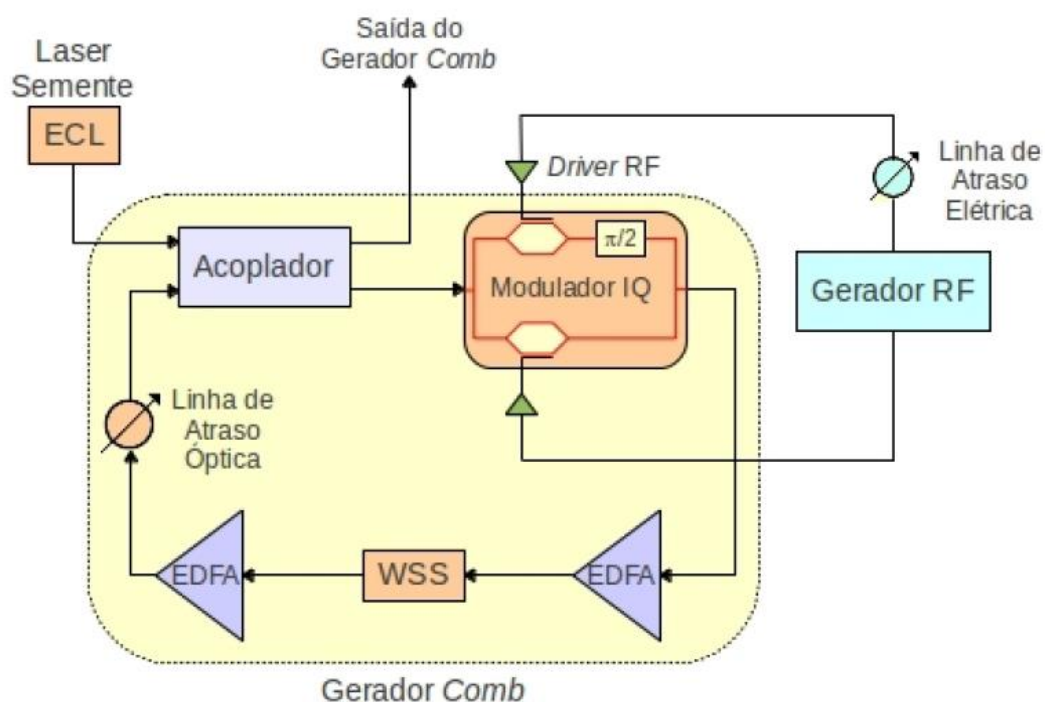


Figura 2-1 – Esquemático da técnica RFS. Extraído de [63].

O funcionamento da técnica RFS se baseia na seguinte descrição: um *laser* semente é aplicado em um dos braços do acoplador 50/50. Na saída do acoplador metade da potência é direcionada para o interior do anel de recirculação que irá gerar as bandas laterais, e a outra metade é acoplada a saída do OFCG a cada volta. O modulador IQ é alimentado por dois sinais de radiofrequência senoidais de mesma frequência controlados por um gerador de RF. Por meio do ajuste das polarizações DC do gerador de RF e do nível do sinal é possível fazer com que o sinal óptico seja controlado por uma modulação SSB-SC, já que podemos ter interferências destrutivas e construtivas no modulador MZM. A cada volta no anel de recirculação, as portadoras ópticas são deslocadas em frequência pelo valor aplicado ao sinal de RF que controla o modulador MZM. As portadoras serão geradas até que atinjam o

limite inferior e superior do filtro de passagem, e, portanto, o filtro delimitará o número de portadoras geradas. Um importante fator que é considerado para determinar a largura de banda do filtro é a mínima relação sinal-ruído óptica (OSNR – *Optical Signal-to-Noise Ratio*) que é a relação entre a potência do sinal e a potência do ruído que as portadoras ópticas devem atingir para manter uma dada taxa de erro de bit e qual tipo de modulação utilizada no sistema [64].

A **Figura 2-2** mostra um espectro típico de pente óptico gerado pela técnica RFS. Podemos verificar que há uma degradação de OSNR à medida que se desloca para a direita no eixo de comprimento de onda. Este fato é associado ao ruído de emissão espontânea (ASE – *Amplified Spontaneous Emission*) inserido pelos amplificadores que são necessários no circuito para garantir que haja ganho e, assim, permita a formação das múltiplas portadoras.

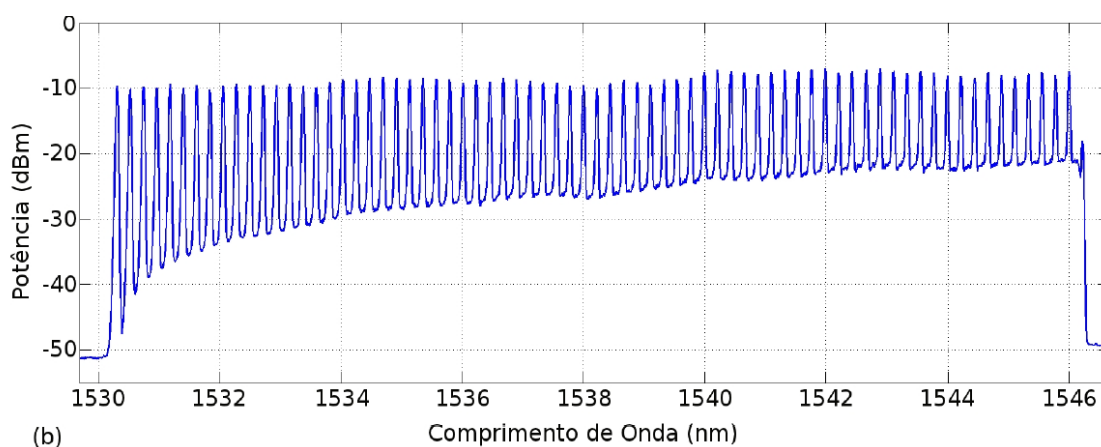


Figura 2-2 – Pente gerado pela técnica RFS. Extraído de [64].

2.2. Lasers de Modos Acoplados (MLL - *Mode-locked Lasers*)

A técnica de *mode-locking*, ou acoplamento de modos é aquela utilizada para gerar um trem de pulsos. Em *lasers* operando sem acoplamento entre os modos longitudinais há uma oscilação entre eles sem relação de fase. Portanto, a saída do laser será uma média estatística no tempo. Quando estes modos oscilantes são

forçados a manter uma fase constante um em relação ao outro, a saída terá uma variação bem definida em função do tempo [65].

Em *lasers* a fibra, os modos longitudinais podem ser acoplados de duas maneiras: ativamente, pela inserção na cavidade de um modulador de fase ou amplitude, ou passivamente, pela inserção de um absorvedor saturável. Para sistemas ópticos é necessário que os pulsos tenham alta qualidade, com alta taxa de repetição (superior a 1 GHz) e baixo *jitter*. Devido à qualidade dos pulsos gerados, os *lasers* de fibra acoplados ativamente são mais indicados para esta aplicação. Para alcançar o acoplamento de modos ativo, é geralmente utilizado um modulador eletro-óptico com alta velocidade dentro da cavidade. O comprimento da cavidade não ultrapassa alguns metros, devido ao limite de concentração de dopantes de Er^{3+} na fibra de sílica. Assim, o modulador deve estar ressonante com uma frequência harmônica da cavidade para obter-se uma alta taxa de repetição dos pulsos. Portanto, tomando como referência a frequência da cavidade, dada por:

$$v_c = \frac{c}{n.l} \quad (1)$$

onde c é a velocidade da luz no vácuo, n o índice de refração da fibra e l o comprimento da cavidade, a frequência de modulação será

$$v_m = N.v_c \quad (2)$$

onde os modos do *laser* serão acoplados no N -ésimo harmônico com N pulsos por volta na cavidade [66]. Ou seja, a cada N -ésimo pulsos entrando na largura de banda do ganho, um modo longitudinal é acoplado. Utilizando esta técnica, a duração do pulso é de poucos picossegundos tipicamente, pois *lasers* com acoplamento de modo ativo são limitados pela teoria de Kuizenga-Siegman [67].

No caso de acoplamento passivo de modos, um absorvedor saturável é utilizado possibilitando obter pulsos de subpicossegundos. Porém, devido à característica de geralmente operarem na harmônica fundamental da cavidade, provêm baixas taxas de repetição para aplicações em telecomunicações.

Uma técnica que vem sendo utilizada de forma a superar estes problemas, é o acoplamento de modos híbrido. Neste caso, utiliza-se os acoplamentos ativo e

passivo simultaneamente. Esta técnica tem sido utilizada para produzir pulsos mais curtos que 500 fs com taxa de repetição variando entre 2,5 GHz e 12 GHz [68].

Um exemplo de geração de pentes ópticos utilizando a técnica de MLL para geração de pentes ópticos de frequências pode ser encontrado em [69]. Um *laser* de safira travado em fase dopado com titânio, bombeado por um *laser* de argon, foi usado para gerar um trem de pulsos com uma determinada taxa de repetição. O efeito Kerr no cristal de safira é suficiente para manter um regime de modo travado estável de operação. Um único pulso ultra-curto é formado na cavidade do *laser* e produz um trem de pulsos similares na saída de acoplamento do espelho. No exemplo utilizado, o formato do espectro do *laser* é gaussiano. O espectro é plano, com algumas ligeiras modulações de banda larga, que são estáveis no tempo. O comprimento de onda central do *laser* é 860 nm. Um isolador é colocado após a fonte de *laser* para evitar realimentação da cavidade. Um divisor de feixe irá direcionar parte do raio para um fotodiodo associado com um osciloscópio para monitorar o trem de pulsos. Duas lentes e um orifício (*pinhole*) são utilizados para finalidade de casamento de modos. A cavidade é composta por um tubo de vidro e dois espelhos com medidas específicas de curvatura de raio e transmissividade. A saída do espelho se localiza em um atuador pizoelétrico cilíndrico que permite modular o comprimento da cavidade. O sinal transmitido usando a cavidade é enviado a um fotodiodo e um espectrógrafo.

As posições do orifício, lentes e cavidade são escolhidas de modo a obter casamento de modo transversal. É necessário alinhar e ajustar o comprimento da cavidade para encontrar o “ponto mágico” [69]. Este é o ponto em que o pente dos modos da cavidade e o pente dos modos do *laser* estão em perfeita ressonância. Modulando o comprimento da cavidade perto deste ponto (utilizando um atuador pizoelétrico) são observadas ressonâncias de transmissão estreitas. As intensas ressonâncias correspondem ao modo fundamental transversal da cavidade, enquanto ressonâncias mais fracas correspondem a modos transversais de mais alta ordem da cavidade. O comprimento da cavidade muda entre duas ressonâncias consecutivas e um ajuste fino é realizado para melhorar o alinhamento do feixe do *laser* para um melhor casamento do modo transversal. A **Figura 2-3** ilustra o esquemático, enquanto a **Figura 2-4** mostra o espectro de saída do OFCG [69].

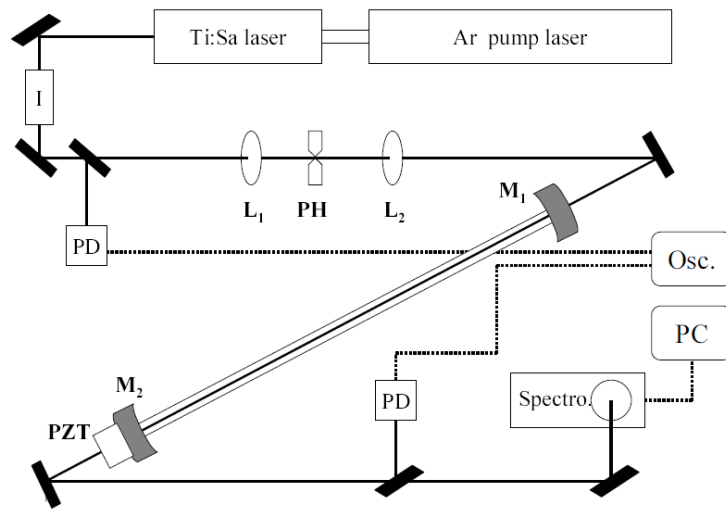


Figura 2-3 – Diagrama esquemático do setup experimental (*I*: isolador óptico, *PD* são fotodiodos, *PH* é um pinhole (orifício), *L1* e *L2* são lentes, *M1* e *M2* são espelhos de cavidade e *PZT* é um atuador pizoelétrico). Extraído de [69].

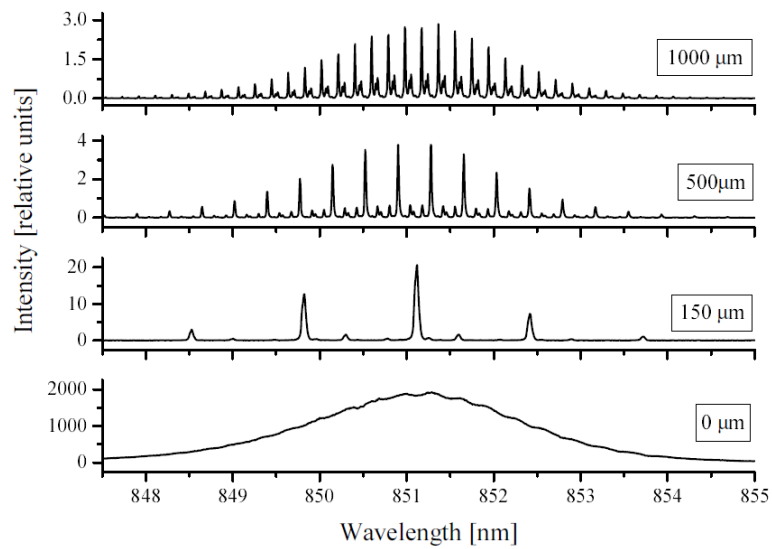


Figura 2-4 – Espectro transmitido pela cavidade para diferentes deslocamentos do ponto mágico. Extraído de [69].

2.3. Geração de pente óptico baseado em *laser* contínuo e moduladores de fase em cascata.

A maneira mais comum de gerar pentes ópticos de frequência para taxas de repetição na casa de MHz tem sido utilizando MLL passivos. O problema relacionado a esta técnica é que em altas taxas de repetição, a complexidade de projeto e operação se torna muito alta [70].

Uma maneira de contornar este problema é utilizar moduladores ópto-eletrônicos para frequências acima de 10 GHz. Uma maneira de produzir tais pentes consiste em cascatear moduladores eletroópticos de fase e intensidade que irão atuar em um *laser* contínuo (CW – *Continuous Wave*) de largura de linha estreita. Como vantagem desta técnica podemos destacar o fato de que a taxa de repetição e a frequência óptica central pode ser variada de forma contínua e completamente independente. A desvantagem é que a banda óptica alcançada é limitada devido à eficiência do efeito eletroóptico e da potência de RF que é entregue ao dispositivo. Uma maneira de alcançar uma banda mais larga com esta técnica seria integrá-la com dispositivos capazes de produzir efeitos não-lineares. Contudo, geralmente tais dispositivos necessitam de amplificadores ópticos de alta potência, o que acarreta a inserção de ruído de emissão espontânea que irá prejudicar o nivelamento entre as linhas do pente. Outra alternativa, seria utilizar um modulador eletroóptico de fase para aumentar a largura de faixa do OFCG o que, por outro lado iria eliminar a possibilidade de variar continuamente a taxa de repetição e a frequência central do *laser* CW e um esquema de estabilização da cavidade seria necessário [70].

A **Figura 2-5** apresenta um OFCG optoeletrônico baseado em uma cascata de moduladores de fase e amplitude. Uma fonte de *laser* de largura de linha estreita é aplicada a uma série de três moduladores de fase (PM – *Phase Modulator*) e um modulador optoeletrônico de intensidade (IM – *Intensity Modulator*), todos alimentados pelo mesmo sinal de RF. O papel do modulador de intensidade é produzir um trem de pulsos pseudo-quadrados. Os defasadores (PS – *Phase Shifters*) são usados para alinhar corretamente a borda da modulação de fase de cada PM com o pico do pulso de parte superior plana. Desta maneira, os pulsos esculpidos no *laser*

CW coincidirão com as regiões no tempo em que o gorjeio produzido pelo modulador de fase é aproximadamente linear, o que irá tornar o espectro mais plano. A largura de banda óptica do pente é proporcional ao índice de modulação introduzido pelos PMs em cascata. Na prática, pentes ópticos completamente planos são difíceis de ser alcançados com esta técnica devido ao formato do pulso, que temporalmente não é perfeitamente quadrado. A potência entregue, e, conseqüentemente, a potência do OFCG é limitada pelo *laser* de entrada. As linhas espectrais geradas do pente são baseadas no princípio de conversão de tempo-para-frequência [71], que apresentam estabilidade e baixo nível de flutuação.

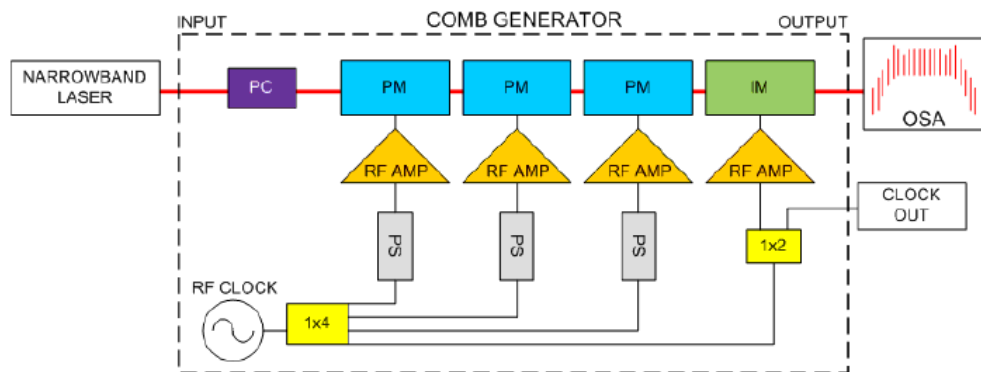


Figura 2-5 – Esquemático de geração de pente óptico com moduladores de fase e intensidade em cascata. Extraído de [70].

Com esta técnica é possível variar o espaçamento do OFCG, ou seja, sua taxa de repetição. Um espectro típico alcançado com esta técnica é mostrado na **Figura 2-6**. A sequência (a), (b) e (c) da **Figura 2-6** corresponde respectivamente às frequências de repetição de 7, 10 e 17 GHz.

Em [70] foi demonstrado um OFCG de frequência variável de 6 GHz a 18 GHz cobrindo uma larga faixa de frequência, contendo de 60 a 75 linhas espectrais dentro de um nível de variação de pico de 10 dB. Outra característica medida foi a largura de pulso no tempo, que em 12 GHz foi de 1 ps, demonstrando a alta coerência entre as linhas espectrais do OFCG final.

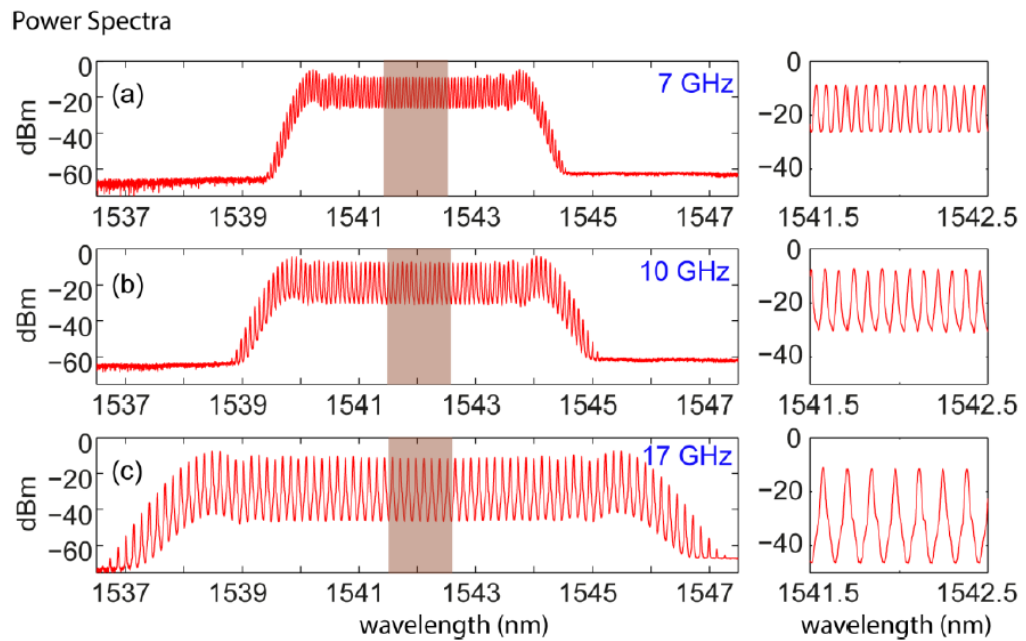


Figura 2-6 – Espectros do pente na saída dos moduladores em cascata para (a) 7 GHz, (b) 10 GHz e (c) 17 GHz. Extraído de [70].

Em [72], foi utilizado após a sequência de moduladores, uma fibra altamente não-linear para aumentar a banda óptica do pente, e o tornar mais plano. A **Figura 2-7** ilustra o princípio de funcionamento. Um único *laser* CW é utilizado para alimentar um modulador de amplitude seguido por um modulador de fase. Como já descrito, o modulador de amplitude irá criar um trem de pulsos com a finalidade de aumentar a potência da semente de entrada. Esta forma de onda passará por um gorjeio (*chirp*) causado por um modulador de fase, que irá permitir uma compressão temporal que a fibra monomodo padrão causará no pulso por meio do princípio da dispersão. Esta compressão resulta em uma onda com potência de pico duas ou mais vezes maior que a onda semente original. O processo não-linear é governado por três características principais: potência óptica injetada, comprimento de interação efetiva e não-linearidade do dispositivo. Assim, aumentando a potência de pico utilizando a compressão da forma de onda no tempo, estamos favorecendo o processo não-linear que ocorrerá na fibra altamente não-linear. O resultado desta técnica é a extensão da banda óptica do pente de frequências por meio do uso do estágio não-linear, mostrado na **Figura 2-8**.

Em [72], foi demonstrado a geração de um pente óptico com 1500 linhas espectrais ao longo de 120 nm de comprimento de onda dentro de uma variação de nível de 2 dB e relação sinal-ruído óptica de 40 dB.

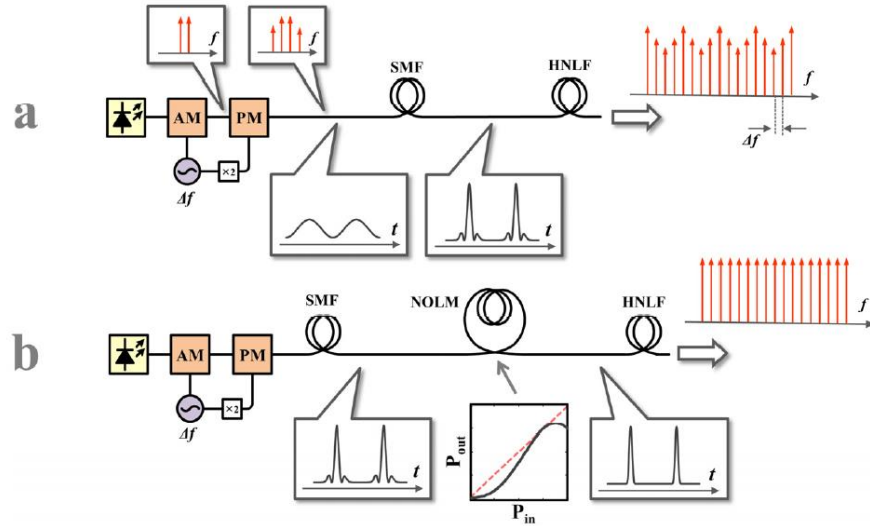


Figura 2-7 – Princípio da técnica baseada em compressão do pulso no domínio do tempo: (a) o modulador de fase induz um gorjeio na forma de onda no tempo e aumenta a potência de pico antes de entrar na HNLF, (b) uma função de transferência não-linear (NOLM) é usada para regenerar a forma de onda comprimida no tempo e alimentar o estágio não-linear de forma que elimina a ondulação no pente. Extraído de [72].

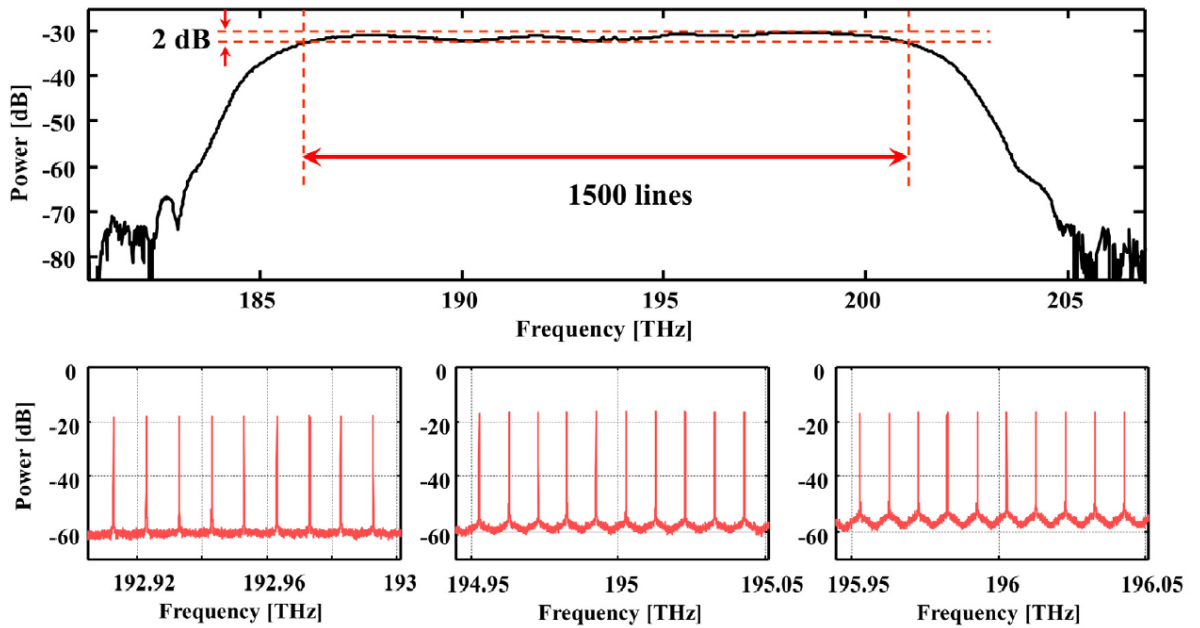


Figura 2-8 – Espectro do OFCG de saída medido para um espaçamento entre as linhas de 10 GHz. Extraído de [72].

2.4. OFCG baseado em micro-ressonadores em anel.

Como já mencionado, pentes de frequência ópticas baseados em MLL possuem boa estabilidade em questão de frequência óptica e taxa de repetição, porém comercialmente não alcançam taxas acima de 1 GHz aproximadamente. Para contornar este problema, surgiram os pentes baseados em modulação de fase eletroóptica em que com apenas um *laser* contínuo modulado em fase provê altas taxas de repetição, da ordem de algumas dezenas de gigahertz, porém não há estabilidade da frequência óptica [24][28][73][74][75]. Neste contexto, surgiu recentemente um método inovador para geração de pente de frequência óptico por meio de batimento não-linear de ondas em um micro-ressonador, conhecido como geração de pente Kerr. As vantagens deste método estão na sua simplicidade, pequenas dimensões e as altas taxas de repetição.

Os ressonadores em anel têm um papel fundamental no desenvolvimento da fotônica de silício, pois o silício permitiu uma grande redução das dimensões dos ressonadores em anel. Genericamente, um ressonador em anel consiste de um guia de onda óptico que possui uma realimentação, ou seja, um laço voltando para o início dele mesmo. A ressonância irá ocorrer quando o comprimento óptico percorrido do ressonador for exatamente um múltiplo inteiro de comprimentos de onda. A faixa espectral livre (FRS - *Free Spectral Range*) é o espaçamento entre as ressonâncias, já que ressonadores em anel suportam múltiplas ressonâncias. Tal espaçamento irá depender do comprimento do ressonador e, para muitas aplicações, é desejado que seja da ordem de vários nm, o que implica em um uso de pequenos anéis [76].

Tais micro-ressonadores em anel necessitam de uma conexão para o mundo exterior. O mecanismo mais comum de acoplamento é utilizar um acoplamento evanescente co-direcional entre o anel e um barramento de guia de ondas adjacente. Com um único ressonador em anel, o espectro de transmissão do barramento de guia de ondas irá mostrar alguns declives em torno das ressonâncias do anel, o que caracteriza o comportamento de um filtro que pode ser usado para aplicações em

comunicações ópticas, principalmente em redes WDM. Tais declives também podem encontrar aplicações para sensores, já que sua posição e formato são muito sensíveis a uma variedade de efeitos [76].

Em geral um ressonador em anel consiste de um guia de ondas óptico com realimentação e um mecanismo de acoplamento para acessar tal realimentação. Quando as ondas na realimentação atingem uma volta completa de deslocamento de fase igual a um múltiplo inteiro de 2π , a onda irá interferir construtivamente e a cavidade estará em ressonância. Na sua forma mais simples, um ressonador em anel é construído pela realimentação de uma saída acoplada de volta na sua entrada, o que é conhecido como filtro passa-tudo. Tal configuração pode ser visto na **Figura 2-9**.

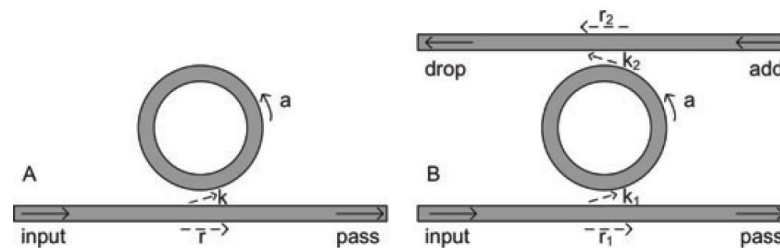


Figura 2-9 – Princípio do ressonador em anel. Extraído de [76].

Existem duas características muito importantes para definir as propriedades dos ressonadores em anel: a resolução (*finesse*) e o fator Q (fator de qualidade). A resolução é definida como a relação do FRS com a largura de ressonância no ponto de 3 dB, ou seja, é uma medida de quão estreita é a ressonância relativo seu espaçamento. Já o fator Q é uma medida de quão estreita é a ressonância relativa a sua frequência central. O significado físico desses dois parâmetros está relacionado com o número de voltas completas feitas pela energia no ressonador antes de ser perdida em perdas internas e no barramento de guia de ondas. As descrições matemáticas desses efeitos podem ser encontradas em várias publicações [77][78][79]. A resolução representa dentro de um fator de 2π o número de voltas completas feita pela luz no anel antes que sua energia seja reduzida para $1/e$ do seu valor inicial. O fator Q representa o número de oscilações do campo antes que a energia circulante caia a $1/e$ da sua energia inicial. Para definir o fator Q, o micro-

anel é excitado a certo nível e a taxa de decaimento da potência é considerada. Podemos inferir que as perdas na volta do anel bem como o acoplamento dos acopladores direcionais são fatores de perda que devem ser reduzidos para obter ressonâncias com alto fator Q. Assim, para aumentar o fator Q é de vital importância reduzir as perdas na cavidade. As perdas de propagação podem ser diminuídas com materiais de sílcio e processamento de alta qualidade [80]. A **Figura 2-10** mostra um diagrama esquemático para geração de OFCG. Um *laser* variável CW é aplicado em um amplificador óptico de fibra dopada a érbio. Após amplificação há um controlador de polarização (FPC – *Fiber Polarization Controller*) que é aplicado antes de um micro-ressonador em anel. O pente de frequências é gerado quando a luz ressoa na cavidade não-linear do anel. O espectro do pente final para diferentes comprimentos de onda está mostrado na **Figura 2-11**.

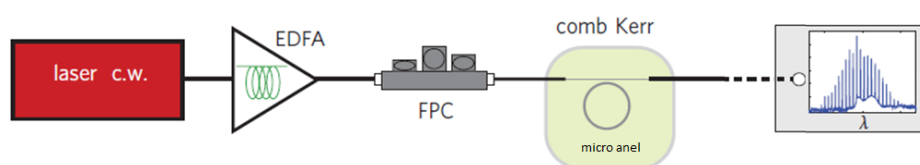


Figura 2-10 – Montagem experimental de um gerador de pente óptico baseado em micro-ressonador em anel. Extraído de [74].

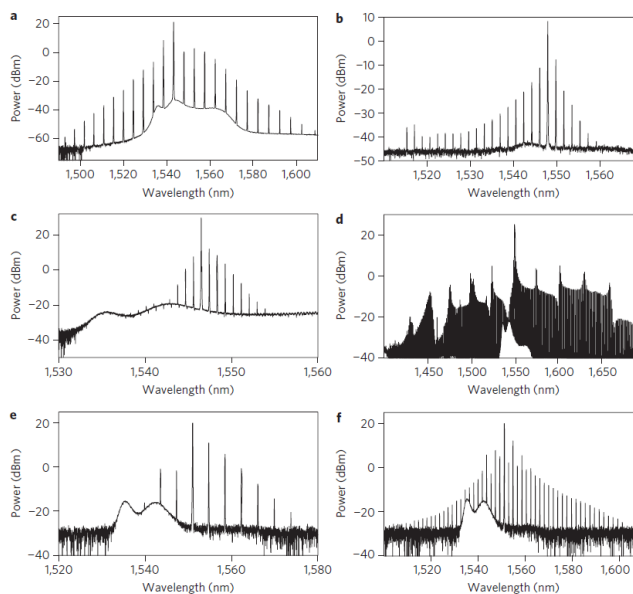


Figura 2-11 – Pentes de frequência gerados por micro-ressonadores em anéis para diferentes espaçamentos e potências de entrada. Extraído de [74].

Capítulo 3

3. Mistura de Quatro Ondas

3.1. Análise Teórica

Mistura de quatro ondas é um processo paramétrico não-linear de terceira ordem que envolve a interação entre quatro ondas em frequências diferentes ou não, no qual a energia e o vetor de onda devem ser conservados [81]. Em sistemas WDM, o processo de FWM pode ser um fator degradante, pois havendo canais de transmissão nas frequências $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N$, a dependência do índice de refração com a intensidade irá levar a deslocamentos de fase (processos de automodulação de fase e modulação de fase cruzada) e à criação de novas ondas em frequências tais como $2\omega_i - \omega_j$ e $\omega_i - \omega_j + \omega_k$ ($i, j \neq k$).

Em níveis quânticos, o processo de FWM se dá quando fótons de uma ou mais ondas são aniquilados e novos fótons são criados em diferentes frequências. Para exemplificar, se três ondas incidentes se propagam em ω_1, ω_2 e ω_3 e interagem entre si de modo que fótons de ω_1 e ω_2 são destruídos para gerar novos fótons em ω_3 e $\omega_1 + \omega_2 - \omega_3$. Quando novas ondas são geradas em frequências diferentes, elas também podem interagir entre si e com as ondas incidentes originais para produzir outras ondas em novas frequências tais como ω_4, ω_5 , etc. Os fótons que são criados em frequências que estão presentes no campo incidente original irão produzir ganho paramétrico. Esse fenômeno é conhecido como Múltiplo FWM e é a base para a criação de pentes ópticos baseados em fibras altamente não-lineares [42] que serão apresentados neste trabalho.

Os processos paramétricos de terceira ordem dependem da susceptibilidade $\chi^{(3)}$ e são responsáveis por fenômenos como geração de terceiro harmônico e amplificação paramétrica, além de FWM. Para analisar o processo de FWM, iremos considerar 4 ondas ópticas oscilando nas frequências ω_1 , ω_2 , ω_3 e ω_4 e polarizadas linearmente ao longo do mesmo eixo x. Podemos escrever o campo elétrico total como:

$$E = x \frac{1}{2} \sum_{j=1}^4 E_j \exp \left[i(\beta_j z - \omega_j t) \right] + c.c. \quad (1)$$

onde β_j é a constante de propagação na frequência ω_j ($j = 1, 2, 3, 4$) e vale:

$$\beta_j = n_j \omega_j / c \quad (2)$$

n_j é o índice de refração, c é a velocidade da luz no vácuo e todas as ondas se propagam na mesma direção z.

A polarização induzida na fibra óptica \vec{P} é constituída de duas partes, uma linear e uma não-linear respectivamente:

$$\vec{P}(\vec{r}, t) = \vec{P}_L(\vec{r}, t) + \vec{P}_{NL}(\vec{r}, t) \quad (3)$$

O campo elétrico se relaciona com as polarizações induzidas linear e não-linear de acordo com as seguintes equações se considerarmos apenas os efeitos não-lineares governados por $\chi^{(3)}$:

$$\vec{P}_L(\vec{r}, t) = \varepsilon_0 \int_{-\infty}^{\infty} \chi^{(1)}(t-t') \vec{E}(\vec{r}, t') dt' \quad (4)$$

$$\vec{P}_{NL}(\vec{r}, t) = \varepsilon_0 \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \chi^{(3)}(t-t_1, t-t_2, t-t_3) : \vec{E}(\vec{r}, t_1) \vec{E}(\vec{r}, t_2) \vec{E}(\vec{r}, t_3) dt_1 dt_2 dt_3 \quad (5)$$

Utilizando a aproximação de um meio homogêneo, podemos considerar que $\chi(\vec{r}, t) = \chi(t)$. Também deve-se considerar que estas relações são válidas para a aproximação de dipolo elétrico tal que a resposta do meio seja local. Se considerarmos que a resposta não-linear seja instantânea, tal que a dependência no

tempo de $\chi^{(3)}$ é dada pelo produto de três funções delta da forma $\delta(t-t_j)$ teremos significativas simplificações na equação. Esta consideração equivale a desconsiderar a contribuição das vibrações moleculares para a susceptibilidade de terceira ordem $\chi^{(3)}$ (o efeito Raman). Para fibras de sílica a resposta Raman ocorre numa escala de tempo de 60 a 70 fs e a consideração é aproximadamente válida para pulsos com larguras maiores que 1 ps. Portanto, a equação anterior pode ser escrita como:

$$P_{NL}(r,t) = \varepsilon_0 \chi^{(3)} : E(r,t)E(r,t)E(r,t) \quad (6)$$

Substituindo a Eq. (1) na Eq. (6), e expressando P_{NL} na mesma forma de \vec{E} , tem-se [81]:

$$\vec{P}_{NL} = \frac{1}{2} \hat{x} \sum_{j=1}^4 P_n \exp[j(\beta_j z - \omega_j t)] + c.c. \quad (7)$$

Esta equação contém termos responsáveis pelos fenômenos de SPM e XPM que não são interessantes na análise de FWM. Desta equação expandida podemos encontrar os termos responsáveis pela fase relativa entre o campo elétrico e a polarização induzida para cada onda analisada [81]. O processo de FWM só ocorrerá com intensidade se a fase relativa entre os termos praticamente desaparecer. Este requisito é conhecido como casamento de fase e depende fortemente da dispersão cromática.

Existem dois tipos de interação no processo de FWM. A primeira acontece quando três fótons transferem energia para um quarto fóton, tal que a frequência correspondente seja: $\omega_4 = \omega_1 + \omega_2 + \omega_3$. Neste caso, podemos ter geração de terceiro harmônico, quando $\omega_1 = \omega_2 = \omega_3$, ou conversão de frequência da onda em $2\omega_1 + \omega_3$, se $\omega_1 = \omega_2 \neq \omega_3$. Neste caso, os fótons das três frequências iniciais ω_1 , ω_2 e ω_3 são aniquilados para que um fóton em ω_4 seja criado. Geralmente é difícil satisfazer a condição de casamento de fase para que este processo ocorra com altas eficiências. O requisito para que ocorra casamento de fase é tal que:

$$\Delta\beta = -\beta_3 + \beta_4 - \beta_1 - \beta_2 = (-n_3\omega_3 + n_4\omega_4 - n_1\omega_1 - n_2\omega_2)/c = 0 \quad (8)$$

Para a condição em que $\omega_1 = \omega_2$, caso conhecido como parcialmente degenerado é relativamente simples satisfazer a condição de casamento de fase [81]. Uma onda de bombeamento em ω_1 gera duas bandas laterais simetricamente localizadas nas frequências ω_3 e ω_4 , com um deslocamento de frequência equivalente igual a:

$$\Omega_s = \omega_1 - \omega_3 = \omega_4 - \omega_1 \quad (9)$$

sendo que $\omega_3 < \omega_4$, como mostrado na **Figura 3-1**:

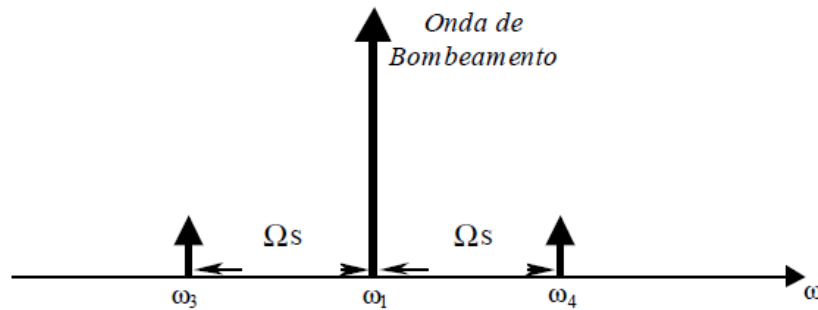


Figura 3-1 – Onda de bombeamento gerando bandas laterais.

As ondas ω_3 e ω_4 são conhecidas como bandas Stokes e anti-Stokes, respectivamente, ou como sinal e secundária, respectivamente. Neste caso, em que apenas uma onda de bombeamento é lançada na fibra óptica, há a geração de duas ondas em ω_3 e ω_4 a partir da interação com o ruído. Contudo, se uma onda de bombeamento for lançada em ω_1 e ao mesmo tempo uma outra onda mais fraca em ω_3 for inserida, o sinal é amplificado e, simultaneamente, uma nova onda em ω_4 é gerada. O ganho responsável por tal amplificação é conhecido como ganho paramétrico [81][82].

Para verificar a influência da dispersão cromática no casamento de fase, tomamos a série de Taylor para expandir a constante de propagação $\beta(\omega)$, de acordo com:

$$\beta(\omega) = \beta_0 + (\omega - \omega_0)\beta_1 + \frac{1}{2}(\omega - \omega_0)^2\beta_2 + \frac{1}{6}(\omega - \omega_0)^3\beta_3 + \dots, \quad (10)$$

onde,

$$\beta_n = \left[\frac{d^n \beta}{d\omega^n} \right]_{\omega=\omega_0} \quad (11)$$

Se considerarmos o fator de descasamento de fase $\Delta\beta$ em torno do comprimento de onda λ_k , e considerando que $\beta_n = n_n \omega_n / c$ iremos obter a seguinte expressão se expandirmos $\Delta\beta$ como em Eq. (10) e considerando até o termo de terceira ordem [83][38]:

$$\Delta\beta = \frac{2\pi\lambda_k^2}{c} \Delta f_{ik} \Delta f_{jk} \left[D(\lambda_k) + \frac{\lambda_k^2}{2c} (\Delta f_{ik} + \Delta f_{jk}) \left(\frac{dD(\lambda_k)}{d\lambda} \right) \right] \quad (12)$$

onde $D(\lambda_k)$ é a dispersão cromática da fibra no comprimento de onda λ_k e $dD(\lambda_k)/d\lambda$ é a derivada da dispersão designado por S_0 .

Para duas ondas incidentes ω_1 e ω_2 o descasamento de fase total é dado por [81]:

$$\Delta\beta_T = \Delta\beta + \gamma(P_1 + P_2) \quad (13)$$

Sendo P_1 e P_2 as potências associadas as duas ondas de bombeio incidentes para o caso γ é o coeficiente não-linear dado por:

$$\gamma = \frac{n_2 \omega_j}{c A_{eff}} \quad (14)$$

onde A_{eff} é a área efetiva do núcleo, c é a velocidade da luz no vácuo e n_2 é o índice de refração não-linear expresso em m^2/W .

A condição de casamento de fase total $\Delta\beta_T = 0$ possui três diferentes contribuições, que se devem à dispersão do material $\Delta\beta_M$, à dispersão do guia de onda $\Delta\beta_W$ e aos efeitos não-lineares $\Delta\beta_{NL}$, tal que: $\Delta\beta_T = \Delta\beta_M + \Delta\beta_W + \Delta\beta_{NL}$. No caso parcialmente degenerado, em que $\omega_1 = \omega_2$, temos as seguintes fórmulas para a obtenção de cada uma delas [81]:

$$\Delta\beta_M = [n_3 \omega_3 + n_4 \omega_4 - 2n_1 \omega_1] / c \quad (15)$$

$$\Delta\beta_W = [\Delta n_3 \omega_3 + \Delta n_4 \omega_4 - (\Delta n_1 + \Delta n_2) \omega_1] / c \quad (16)$$

$$\Delta\beta_{NL} = \gamma(P) \quad (17)$$

onde Δn_j é a mudança no índice de refração do material n_j devido ao guia de onda, P é a potência associada ao comprimento de onda de bombeamento, sendo $P=P_1+P_2$,

Como $\Delta\beta_T$ precisa ser zero para atingir casamento de fase, ao menos um dos termos $\Delta\beta_M$, $\Delta\beta_W$ ou $\Delta\beta_{NL}$ deve ser negativo. Se considerarmos as três parcelas do descasamento de fase total, a contribuição devido à dispersão do guia de onda $\Delta\beta_W$ é muito pequena comparada com a dispersão do material $\Delta\beta_M$, exceto se o comprimento de onda de operação for próximo do comprimento de onda de dispersão zero λ_0 . Neste caso as duas contribuições tornam-se comparáveis [81].

De acordo com [81] a contribuição devido ao material $\Delta\beta_M$ também pode ser expressa em função do deslocamento de frequência Ω_S , que representa a separação entre os canais e do coeficiente de dispersão de velocidade de grupo (GVD – *Group Velocity Dispersion*) β_2 no comprimento de onda de bombeio ω_1 . A partir da Eq. (12) e desprezando a contribuição devido a derivada da dispersão, temos:

$$\Delta\beta_M \approx \frac{2\pi\lambda^2}{c} \Delta f^2 D(\lambda) \quad (18)$$

A dispersão é obtida por meio de β_2 de acordo com [81]:

$$D = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 \quad (19)$$

Aplicando Eq. (19) em Eq. (18), chegamos a:

$$\Delta\beta_M = 4\pi^2 \Delta f^2 \beta_2 = \beta_2 \Omega_S^2 \quad (20)$$

A Eq. (16) só é válida se o comprimento de onda de bombeio não estiver muito próximo do comprimento de onda de dispersão zero da fibra (λ_0). Assim, em fibras monomodo padrão, se $\lambda_1 < \lambda_0$ tem-se β_2 positivo e, portanto, se opera no

regime de dispersão normal e se $\lambda_1 > \lambda_0$ tem-se β_2 negativo o que caracteriza regime de dispersão anômalo. Portanto, para se obter casamento de fase é conveniente trabalhar no regime de GVD anômala de maneira que $\Delta\beta_M$ seja negativo e possa cancelar as parcelas somadas $\Delta\beta_W$ e $\Delta\beta_{NL}$. Outras duas maneiras de se atingir o casamento de fase são: reduzir $\Delta\beta_M$ e $\Delta\beta_{NL}$ utilizando-se pequena separação entre canais e baixa potência.

O terceiro modo é operar próximo do comprimento de onda de dispersão zero de forma que $\Delta\beta_M$ aproximadamente cancele $\Delta\beta_W + \Delta\beta_{NL}$. Isto ocorre porque a contribuição $\Delta\beta_M$ torna-se bem pequena nas proximidades do comprimento de onda de dispersão zero da fibra e $\Delta\beta_W$, que depende do projeto da fibra, é geralmente positiva próximo do comprimento de onda de dispersão zero λ_0 [81]. Portanto, para uma faixa limitada de comprimentos de onda, pode-se atingir casamento de fase para valores específicos de deslocamentos de frequência Δf_S .

Para analisar a dependência do casamento de fase com o comprimento de onda de dispersão zero λ_0 da fibra, convém expandir a Eq. (8) novamente utilizando a série de Taylor. Se expandirmos a equação em torno de uma frequência f_0 que coincida com a frequência correspondente ao comprimento de onda de dispersão zero da fibra e utilizando até o termo de terceira ordem da série, teremos [38]:

$$\beta(f) = \beta(f_0) + (f - f_0) \frac{d\beta}{df}(f_0) + \frac{1}{2}(f - f_0)^2 \frac{d^2\beta}{df^2}(f_0) + \frac{1}{6}(f - f_0)^3 \frac{d^3\beta}{df^3}(f_0) \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \beta(f) = & \beta(f_0) + (f - f_0) \frac{d\beta}{df}(f_0) - (f - f_0)^2 \frac{\lambda^2 \pi}{c} D_c(f_0) + \\ & + (f - f_0)^3 \frac{\lambda^4 \pi}{3c^2} \left\{ \frac{2}{\lambda} D_c(f_0) + \frac{dD_c}{d\lambda}(f_0) \right\} \end{aligned} \quad (22)$$

onde f é a frequência de operação do *laser* e D_C a dispersão cromática. Podemos utilizar essa equação na faixa em que S_0 for constante.

Se f_0 for considerado a frequência correspondente ao comprimento de onda de dispersão zero da fibra λ_0 e, portanto, $D_C(f_0) = 0$. Iremos obter [38]:

$$\Delta\beta = -\frac{\lambda^4 \pi}{c^2} \frac{dD_c}{d\lambda} \left\{ (f_i - f_0) + (f_j - f_0) \right\} \cdot (f_i - f_k) (f_j - f_k) \quad (23)$$

Esta expressão é válida para o caso completamente não-degenerado, em que a relação $f_F = f_i + f_j - f_k$ é usada. Assim, teremos a seguinte situação ilustrada na **Figura 3-2**:

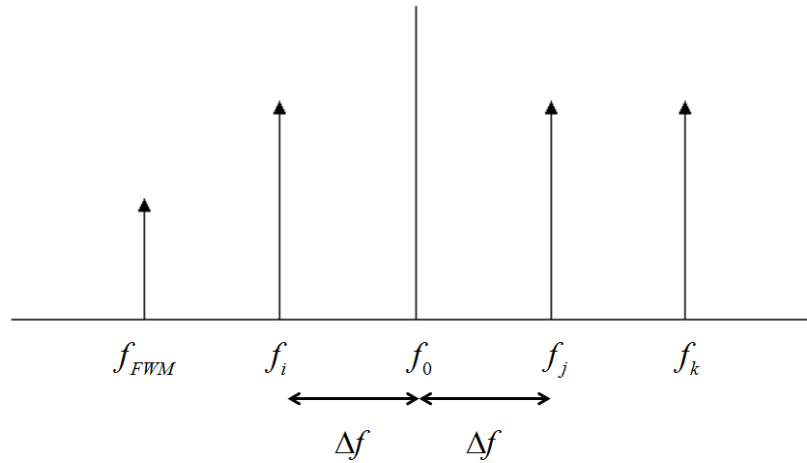


Figura 3-2 – Ilustração do FWM não-degenerado.

Quando duas das três ondas de entrada forem iguais, ou degeneradas com $f_i = f_j$, a Eq. (23) é reescrita da forma [38]:

$$\Delta\beta = -\frac{\lambda^4 \pi}{c^2} \frac{dD_c}{d\lambda} 2(f_i - f_k)^2 (f_i - f_0) \quad (24)$$

E representa o caso do esquemático da **Figura 3-3**:

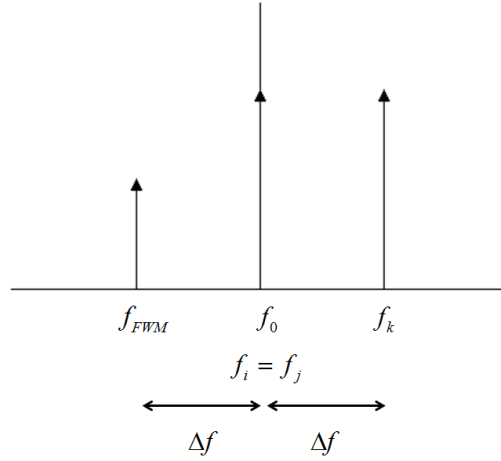


Figura 3-3 – Ilustração do princípio de FWM degenerado.

Para o caso completamente não-degenerado, podemos observar que a condição de casamento de fase será satisfeita quando as duas ondas de bombeamento forem posicionadas em torno do comprimento de onda de dispersão zero da fibra. Assim, $f_i - f_0 = -(f_j - f_0)$ e o descasamento de fase $\Delta\beta$ será zero. Já para o caso parcialmente degenerado, em que $f_i = f_j$, a condição de casamento de fase sempre será satisfeita quando f_i coincidir com o comprimento de onda de dispersão zero da fibra, ou seja, $f_i = f_0$ [37].

A eficiência do processo de FWM, designado por η , é definida pela relação entre a potência do sinal gerado com descasamento de fase e a potência do sinal gerado quando se tem casamento de fase perfeito.

$$\eta = \frac{P_{ijk}(L, \Delta\beta)}{P_{ijk}(L, \Delta\beta = 0)} \quad (25)$$

A potência da componente gerada por FWM é dada por [83][84]:

$$P_{ijk}(L) = \left(\frac{1024\pi^6}{n^4 \lambda^2 c^2} \right) \left(d_{ijk} \chi^{(3)} \right)^2 \frac{P_i P_j P_k}{A_{eff}^2} e^{-\alpha L} \left(\left| \frac{\exp(j\Delta\beta - \alpha)L - 1}{j\Delta\beta - \alpha} \right| \right)^2 \quad (26)$$

sendo L o comprimento da fibra, P_i , P_j e P_k as potências de entrada das ondas nas frequências f_i , f_j e f_k respectivamente. P_{ijk} é a potência da onda gerada por FWM na frequência $f_{ijk} = f_i + f_j - f_k$ e no comprimento de onda λ , n é o índice de refração do

núcleo, d_{ijk} é o fator de degenerescência, $\chi^{(3)}$ é a susceptibilidade de terceira ordem e α é o coeficiente de atenuação da fibra.

Um tratamento realizado por Song et al. em 1999 [38], para o descasamento de fase total que inclui o descasamento de fase linear dado pela Eq. (12) e a dependência de potência é escrito da forma:

$$\Delta\beta_T = \Delta\beta - \gamma(P_i + P_j - P_k) \left\{ \frac{1 - \exp(-\alpha L_{eff})}{\alpha L_{eff}} \right\} \quad (27)$$

em que L_{eff} é o comprimento efetivo da fibra, dado por [85][86][87]:

$$L_{eff} = \frac{(1 - e^{-\alpha L})}{\alpha} \quad (28)$$

$$\eta = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + (\Delta\beta)^2} \cdot \left(1 + \frac{4e^{-\alpha L} \sin^2(\frac{\Delta\beta \cdot L}{2})}{(1 - e^{-\alpha L})^2} \right) \quad (29)$$

Manipulando-se a Eq. (25) de acordo com as Eqs. (26) e (27), teremos a fórmula final da eficiência de FWM dado pela Eq. (29) que depende do comprimento da fibra L , da separação entre os canais, da dispersão da fibra e da derivada da dispersão, sendo que estes últimos três termos estão implícitos no fator de descasamento de fase $\Delta\beta$.

Podemos observar que a eficiência máxima ocorrerá quando o fator de descasamento de fase $\Delta\beta$ for igual a zero, resultando em uma eficiência de $\eta = 1$. O processo de FWM será reduzido quando houver presença de dispersão cromática D_c , incluída em $\Delta\beta$. O processo apenas não terá sua eficiência reduzida, se a não-linearidade compensar a dispersão cromática.

A **Figura 3-4** mostra o comportamento da eficiência em função da frequência relativa de bombeio entre f_i e f_0 , implícitas no fator de propagação descrito na Eq. (24) para o caso parcialmente degenerado. Ou seja, no ponto zero da frequência relativa de bombeamento do gráfico, teremos $f_i - f_0 = 0$.

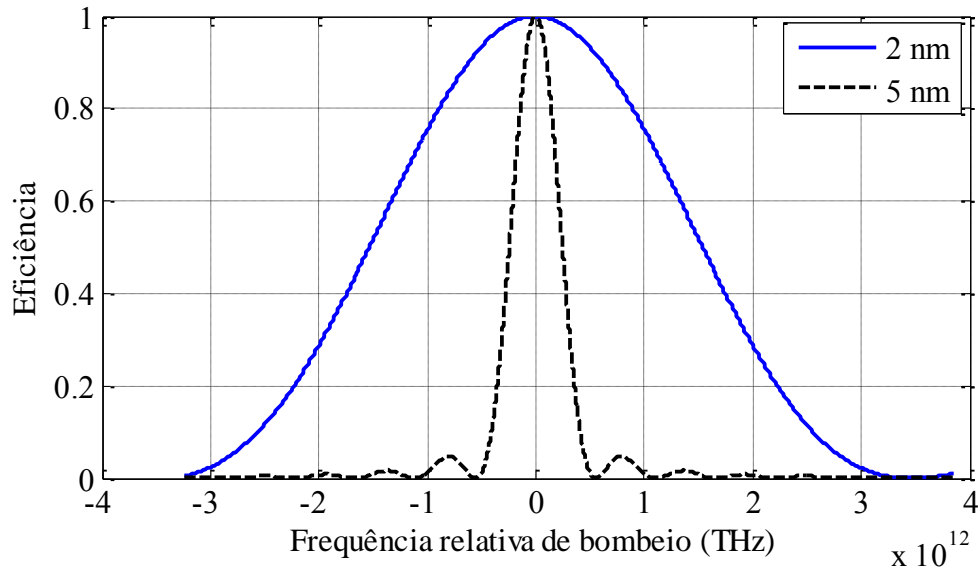


Figura 3-4 – Eficiência do processo de FWM para 2 nm (linha azul) e 5 nm (linha preta) em função da frequência relativa de bombeio entre a frequência de dispersão zero da fibra e a onda de bombeamento.

Os parâmetros utilizados foram tirados de uma fibra real altamente não-linear que será usada em experimentos deste trabalho: $\lambda_0 = 1560$ nm, $dD_c/d\lambda = 0,07$ ps/nm².km, $L = 1000$ m e $\alpha = 0,674$ dB/km. A curva azul contínua representa um espaçamento entre as duas ondas de bombeamento f_i e f_k presentes na Eq. (24) de 2 nm, e a curva preta tracejada representa um espaçamento entre f_i e f_k de 5 nm.

Analisando o comportamento do gráfico, podemos concluir que a medida que aumentamos o espaçamento entre as duas ondas de bombeio f_i e f_k diminui-se a faixa que resulta em uma boa eficiência de FWM. Ou seja, para 5 nm há um decaimento mais rápido da eficiência a medida que a frequência de bombeamento f_i se distancia da frequência de dispersão zero f_0 . Por isso, para se obter uma boa eficiência de FWM quando temos um maior espaçamento entre f_i e f_k deve-se posicionar a onda de bombeamento f_i mais próxima possível da frequência f_0 . Para fibras reais, o comprimento de onda de dispersão zero não é uniforme como assumido nos casos em que foram feitos os cálculos deste trabalho, ou seja, sem flutuações de valor mesmo dentro de vários gigahertz de banda ao longo de todo o comprimento da fibra. Isto resulta em um comportamento de FWM mais complexo e a condição de casamento de fase não pode ser completamente satisfeita, visto que o gráfico de eficiência

apresenta vários picos já que o comprimento de onda de dispersão zero da fibra varia dentro dos vários segmentos que a compõe. Como consequência, a eficiência η não atinge o valor máximo de 1 e não haverá casamento de fase perfeito [38].

Outra análise que deve ser considerada leva em conta o comprimento da fibra. Primeiro, deve-se introduzir o conceito de comprimento de coerência. Sabe-se que a potência da onda de FWM depende das potências das ondas que participam do processo e também dos fatores de descasamento de fase. Seu comportamento é oscilatório e varia de acordo com a função $\text{sinc}^2(x)$ [88]. Para o caso em que o argumento da função variar com múltiplos inteiros de π , a eficiência do processo de FWM será igual a zero. Assim, pode-se definir um padrão de comprimento, definido como comprimento de coerência L_{coh} , que é a distância que o campo eletromagnético na frequência f_{ijk} deve propagar na fibra antes que fique fora de fase por π radianos decorrente da polarização não-linear que o gerou [84][89][90], dado por:

$$L_{coh} = \frac{2\pi}{\Delta\beta_T} \quad (30)$$

onde $\Delta\beta_T$ é o máximo descasamento de fase que pode ser tolerado. Em geral, é difícil manter casamento de fase em longos comprimentos de fibra, como consequência de variações no diâmetro do núcleo. Portanto, o processo de FWM será significativo se $L < L_{coh}$ e, se o fator de descasamento for zero, o comprimento de coerência se torna infinito mostrando que haverá um processo de FWM eficiente ao longo de todo o comprimento da fibra.

A fim de analisar o comportamento do comprimento da fibra, foi traçado o gráfico de eficiência de FWM para os mesmos parâmetros da **Figura 3-4** porém com um comprimento de 5 km. Para isto foram utilizadas as Eqs. (24) e (29), de modo que duas frequências de bombeamento são injetadas na fibra em f_i e f_k e o espaçamento entre elas é de 2 nm.

A **Figura 3-5** nos mostra que para 1 km com um espaçamento entre os canais de 2 nm o decaimento da eficiência de FWM ocorre de forma mais lenta que para 5 km. Observando os gráficos, para 1 km o primeiro nulo da eficiência de FWM ocorre em 3 THz, enquanto que para 5 km este nulo ocorre bem antes, em aproximadamente

0,5 THz. Assim, podemos concluir que a medida que aumentamos o comprimento da fibra a eficiência do processo de FWM decai, portanto, é mais difícil alcançar o casamento de fase total.

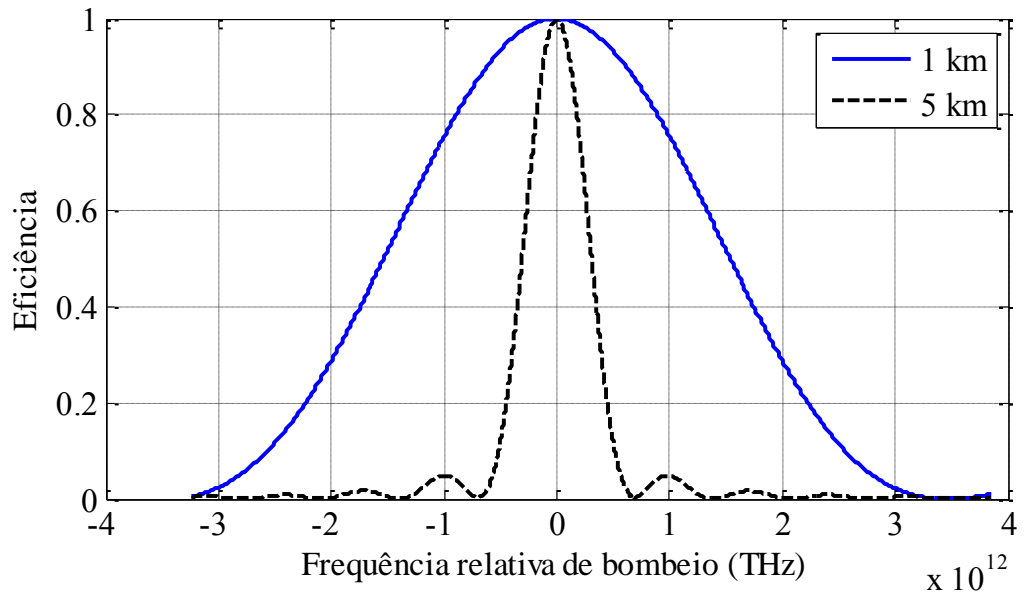


Figura 3-5 – Comparação da eficiência de FWM em relação a frequência relativa de bombeio para 1 e 5 km de fibra óptica.

Capítulo 4

4. Nova técnica para geração de Fonte de Múltiplos Comprimentos de Onda

Este capítulo apresenta os resultados numéricos e experimentais de duas propostas diferentes: A primeira envolve a geração de um pente óptico de frequências por meio de um novo sistema proposto envolvendo fibras altamente não-lineares, realimentação óptica e fibra dopada a érbio. A segunda proposta é um exemplo de aplicação de MFWM para fotônica de microondas, em que os produtos de FWM são usados para prover ganho de RF em enlaces de fotônica de microondas.

4.1. Geração de pente óptico utilizando MFWM

Neste trabalho serão apresentadas técnicas para investigar a geração de produtos de MFWM por fibras altamente não-lineares. Foram realizadas simulações e dos experimentos com a finalidade de avaliar o fenômeno físico responsável pela geração dos produtos de MFWM, que dependem diretamente da dispersão da fibra e de suas propriedades não-lineares.

Sabe-se que um alto coeficiente não-linear é obtido se houver uma grande diferença entre os índices de refração do núcleo e da casca devido a um alto confinamento óptico, se o diâmetro do núcleo for pequeno. Esta relação é dada pela Eq. (14) do Capítulo 3 desta dissertação, onde a área efetiva A_{eff} depende de parâmetros como a diferença entre os índices de refração do núcleo e da casca. Também pode-se diminuir o núcleo da fibra ou utilizar outro material para aumentar o coeficiente não-linear. Além disto, usam-se até alguns quilômetros de fibra para

aumentar a eficiência de conversão de FWM e, assim, aumentar a eficiência do processo não-linear [91]. Este trabalho propõe comprimentos menores, da ordem de algumas centenas de metros de fibras não-lineares com o objetivo de obter um processo de MFWM eficiente levando em consideração as seguintes características: birrefringência da fibra; flutuação da dispersão da velocidade de grupo e descasamento de fase $\Delta\beta L$.

A birrefringência da fibra altera o estado de polarização da luz devido à imperfeições na simetria cilíndrica da fibra, o que reflete diretamente na degradação da eficiência de FWM. Isto resulta no aumento da diferença entre os dois índices de refração dos modos ortogonais levando a degradação do estado de polarização das ondas incidentes na fibra óptica. Como a diferença de fase é proporcional ao comprimento da fibra, conseqüentemente temos que o uso de comprimentos menores de fibra óptica pode levar à redução da diferença de fase relativa entre as ondas de bombeio aplicadas na entrada da fibra.

Outra característica que implica na redução da eficiência do processo de FWM é a variação do comprimento de onda de dispersão zero da fibra, resultado do processo de fabricação da fibra. Como a condição de casamento de fase é determinada a cada segmento de fibra, grandes variações de λ_0 resultam em decaimento do processo de FWM. Assim, pode-se prever que utilizar segmentos menores de fibra óptica pode aumentar a eficiência do processo de FWM.

Por último, podemos destacar a vantagem de utilizar comprimentos menores de fibra óptica para manter o descasamento de fase $\Delta\beta L$ pequeno. A eficiência do processo pode ser melhorada se aumentarmos o comprimento da fibra, porém neste caso, para comprimentos de fibras maiores a amplificação do ruído de banda larga pode limitar severamente a eficiência de geração de produtos de MFWM, como demonstrado em [42].

4.1.1. Simulações Numéricas

Foram feitas diversas simulações utilizando o software VPI Transmission MakerTM buscando informações que permitissem aumentar a eficiência do efeito não-linear de MFWM e validar os experimentos realizados. O primeiro passo para

caracterizar o estudo deste trabalho é verificar a influência da frequência de separação entre as ondas de bombeamento no processo não-linear por meio de algumas simulações iniciais. A **Figura 4-1** apresenta um estudo qualitativo do número de produtos de FWM em função da frequência de separação entre duas ondas de bombeamento contínuas variando de 12,5 a 300 GHz. Podemos observar que para 12,5 GHz de separação entre as ondas apenas quatro produtos de FWM são obtidos, contrastando com os dez produtos obtidos quando a separação aumenta para 300 GHz. Os parâmetros da simulação são: *lasers* com potência de 0 dBm cada, a requência do primeiro *laser* foi mantida em 193,1 THz e o segundo variado acima deste valor de acordo com o espaçamento analisado. Foi utilizando um amplificador a fibra dopada a érbio com 18 dB de ganho. Os demais parâmetros da fibra são: comprimento de onda de dispersão zero $\lambda_0 = 1560$ nm; coeficiente não-linear $\gamma = 10$ W⁻¹km⁻¹; declive de dispersão (*dispersion slope*) $S_0 = 0,02$ ps/nm²/km e comprimento da fibra $L = 200$ m.

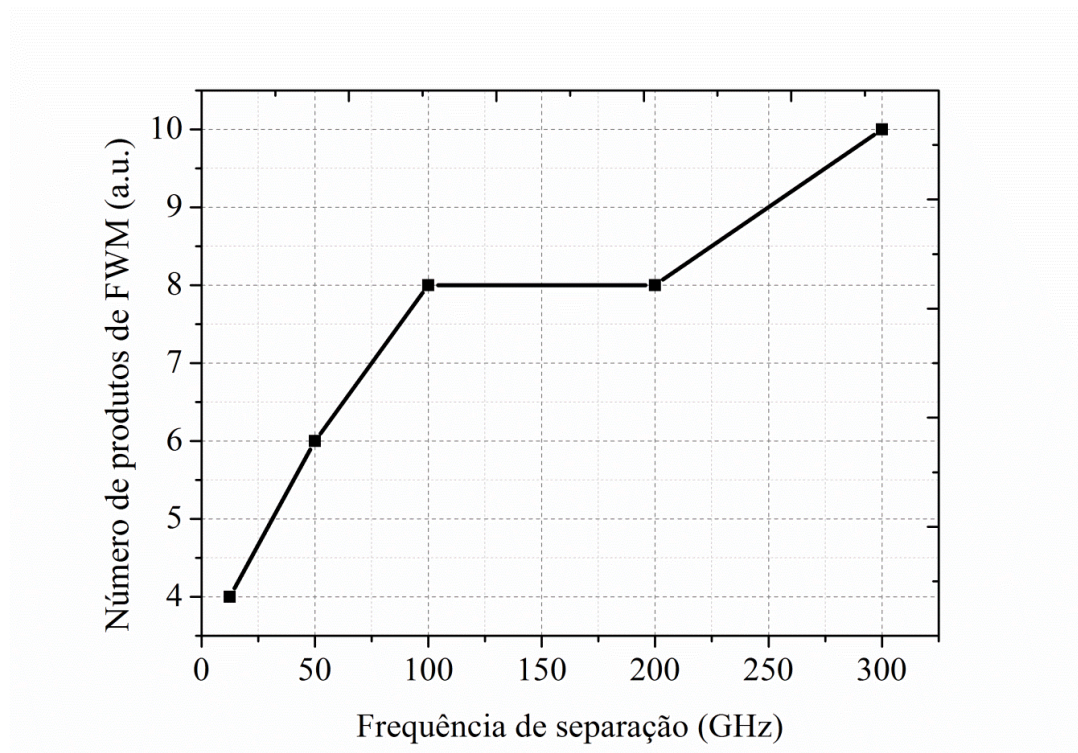


Figura 4-1 – Número de produtos de FWM em função da frequência de separação.

A **Figura 4-2** mostra a comparação das configurações utilizadas nas simulações. Em **(a)** temos o diagrama esquemático utilizando apenas HNLF; em **(b)**

temos o diagrama esquemático com HNLF e realimentação; e em (c) é mostrado o esquema proposto para geração de MFWM utilizando HNLF, realimentação e fibra dopada a érbio. Este esquema foi utilizado nas simulações. Dois *lasers* CW são usados como fonte de bombeamento para o processo de MFWM na HNLF e na fibra dopada a érbio (EDF – *Erbium Doped Fiber*). Uma onda (*laser*) de bombeamento co-propagante é utilizada para aumentar gradualmente a potência dos produtos de FWM. Para o sistema de realimentação foram utilizados acopladores ópticos e um isolador para atenuar possíveis ondas refletidas no sistema. O sistema de realimentação é utilizado para usar os produtos recém-gerados de FWM como sementes de entrada. Os resultados são visualizados utilizando um OSA, como mostrado no diagrama esquemático a seguir.

Os parâmetros utilizados nas simulações são: comprimento de onda dos *lasers* de 1551,71 e 1552,52 nm; potência óptica média de 20 dBm para cada *laser*; um EDFA com ganho de 15 dB; onda de bombeio para a EDF de 800 mW com comprimento de onda de 1480 nm. Os principais parâmetros da HNLF são: comprimento de onda de dispersão zero $\lambda_0 = 1552,52$ nm; coeficiente não-linear $\gamma=10$ W⁻¹km⁻¹; declive de dispersão (*dispersion slope*) $S_0 = 0,08$ ps/nm²/km; comprimento da fibra $L = 60$ m. Em todas as simulações foi considerado o efeito da ASE do amplificador óptico. Tipicamente, as simulações convergiram após 4 iterações.

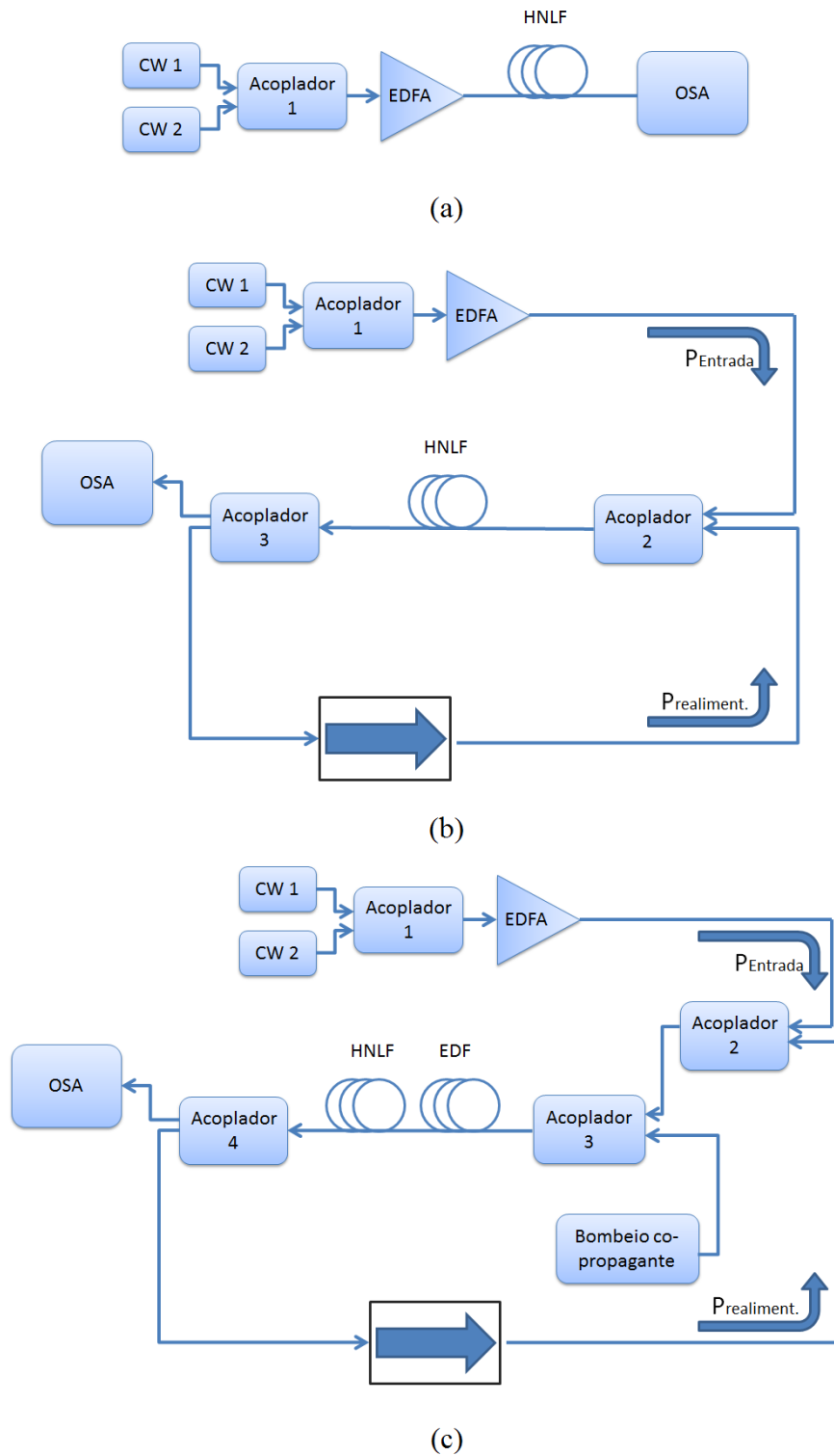


Figura 4-2 – (a) Configuração utilizando apenas a HNLF; (b) Configuração utilizando HNLF e realimentação e (c) Esquema proposto para gerar um pente óptico utilizando MFWM, utilizando HNLF, realimentação e EDF.

Diferentes configurações foram analisadas. Na primeira, analisou-se o efeito utilizando apenas a HNLf; na segunda foram considerados a realimentação e a HNLf e na terceira foi analisado o esquemático completo, com realimentação, HNLf e EDF. A **Figura 4-3** mostra os resultados das simulações para os três casos.

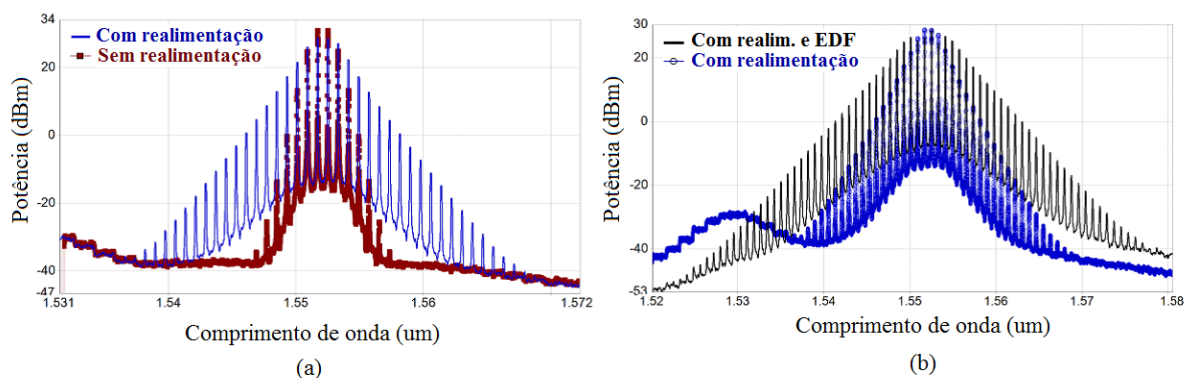


Figura 4-3 – Resultados numéricos: (a) comparação entre apenas HNLf (curva vermelha escura) e HNLf e realimentação (curva azul), (b) comparação entre HNLf e realimentação (curva azul) e a nova proposta, baseada em HNLf, realimentação e EDF (curva preta).

A **Figura 4-3 (a)** mostra a comparação entre os dois primeiros casos. A curva vermelha representa a análise apenas da HNLf e a curva azul representa o caso em que HNLf e realimentação foram utilizadas. Podemos observar que a realimentação representa uma melhora significativa no processo, aumentando substancialmente o número de produtos de FWM e sua OSNR.

A **Figura 4-3 (b)** mostra a comparação entre os dois últimos casos, em que a curva azul representa o caso em HNLf e realimentação e a curva preta representa o caso com HNLf, realimentação e EDF, ou seja, o esquema proposto. Podemos observar que a realimentação em conjunto com a EDF tem um papel fundamental na eficiência do processo de MFWM. Podemos destacar três fenômenos físicos principais responsáveis pelos resultados apresentados: a geração de produtos de MFWM baseado no uso da HNLf; crescimento gradual de suas potências utilizando uma onda de bombeamento co-propagante e uma EDF; e a utilização de parte da saída da HNLf como semente de entrada para o OFCG na entrada da EDF. Tais resultados têm como propósito validar nosso modelo experimental e ilustrar o potencial da proposta apresentada.

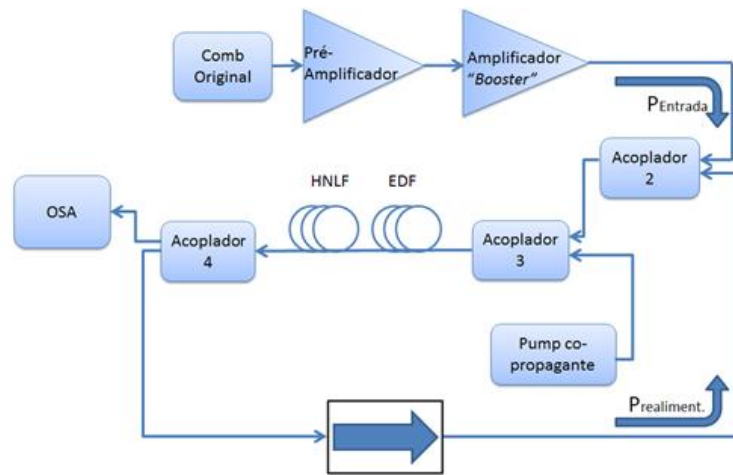
4.1.2.Experimentos

A bancada experimental para realização das medidas está mostrada na **Figura 4-4**. O diagrama em blocos da montagem experimental para geração da fonte óptica de múltiplos comprimentos de onda é mostrado na **Figura 4-5 (a)**. Ao invés de usar apenas dois *lasers* como fonte de bombeio, foi utilizado um pente óptico produzido pela técnica RFS [62], como mostrado na **Figura 4-5 (b)**.

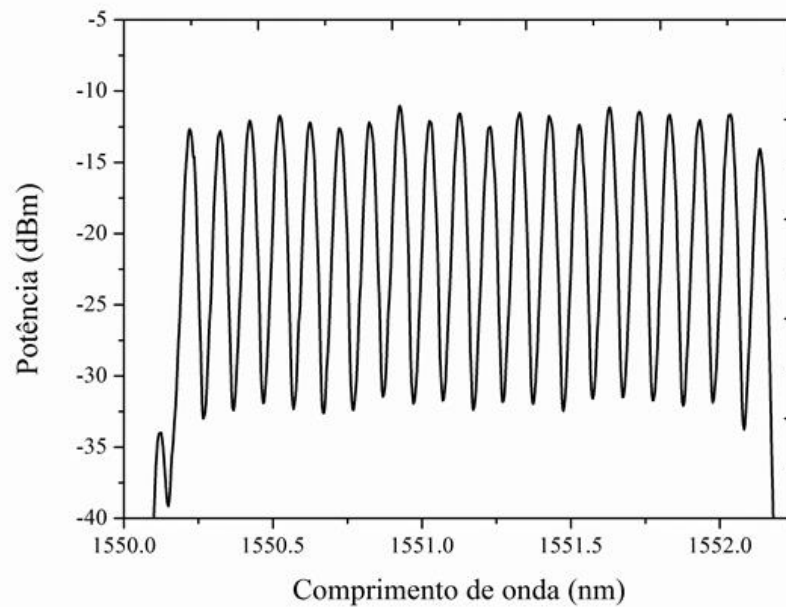


Figura 4-4 – Bancada experimental.

As principais vantagens de utilizar um pente ao invés dos dois *lasers* como fonte de entrada são: aumentar a eficiência do processo não-linear, desde que um pente espaçado em 12,5 GHz é facilmente obtido utilizando a técnica RFS, o que não acontece com a técnica baseada em HNLFs; iniciar o processo não-linear com um número maior de linhas; e possuir uma relação bem definida entre as linhas de frequência. O propósito deste trabalho é expandir o pente original para desenvolver uma fonte de múltiplos comprimentos de onda. Dois EDFAs foram aplicados para aumentar a potência óptica dos produtos na entrada. O primeiro é um pré-amplificador, enquanto o segundo é um intensificador (*booster*) com potência óptica máxima de saída de 33 dBm. A potência total do pente inicial é de 1 dBm, com um total de 20 subportadoras que vão de 1550,22 até 1552,13 nm com 12,5 GHz de espaçamento.



(a)

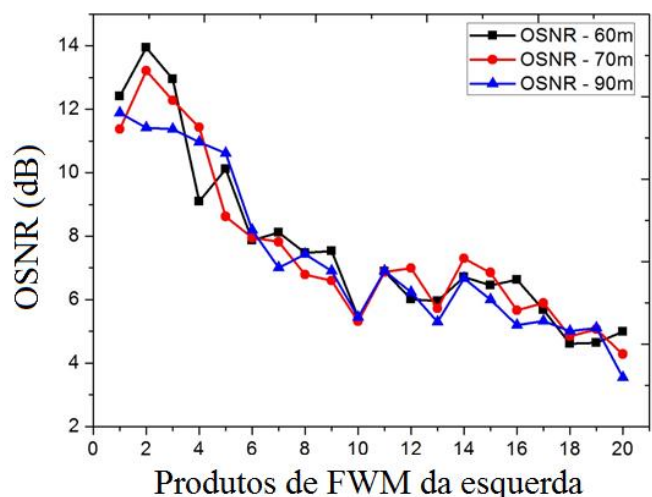


(b)

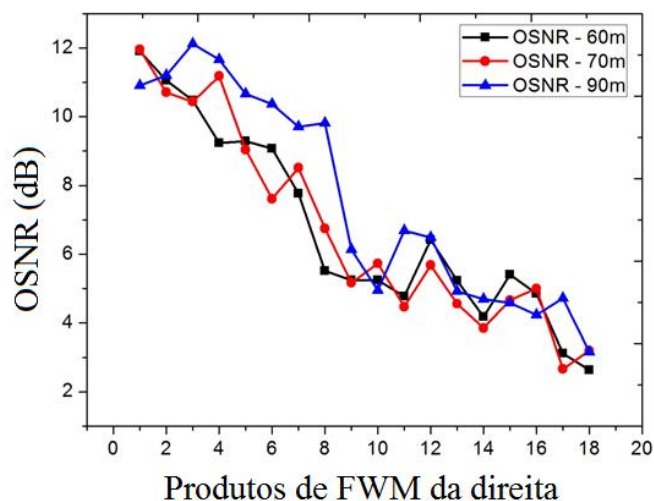
Figura 4-5 – (a) Diagrama em blocos da montagem e (b) pente original.

O primeiro passo foi caracterizar o sistema para poder analisar os produtos gerados por FWM. Para isto, uma investigação foi realizada para obter medidas confiáveis com relação aos parâmetros como: comprimento das fibras envolvidas, potência dos EDFAs e do bombeamento co-propagante da EDF, e melhor configuração dos controladores de polarização. Estes foram posicionados após o pente de frequências original e após o isolador óptico, já que as fibras não são

mantenedoras de polarização. O primeiro teste foi em relação ao comprimento da HNLf utilizada. O comprimento máximo de fibra disponível era de 90 metros. Por isto foram feitos experimentos, apenas com a HNLf, sem realimentação e sem amplificação, com 60, 70 e 90 metros. A **Figura 4-6** mostra o comportamento para cada caso.



(a)



(b)

Figura 4-6 – Relação sinal-ruído óptica para os primeiros produtos de FWM para 60m de HNLf (curva preta com retângulos), 70m (curva vermelha com círculos) e 90m (curva azul com triângulos): (a) produtos da esquerda e (b) produtos da direita.

A análise foi feita em relação a cada produto de FWM da esquerda e da direita (em relação as ondas de bombeamento) em função da OSNR correspondente a cada produto. Podemos ver que para os produtos da esquerda, o comprimento de 60

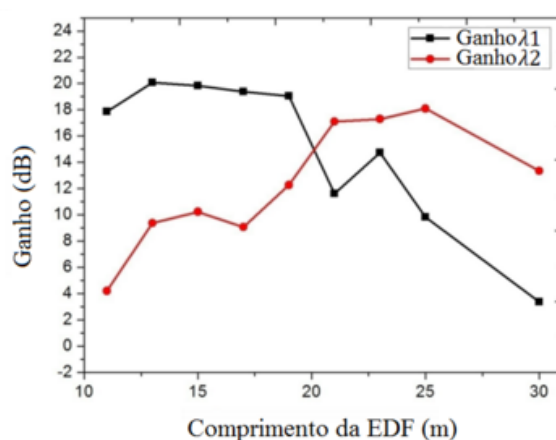
metros apresentou ligeiro melhor desempenho nos primeiros produtos analisados. Porém para os produtos da direita, o melhor desempenho foi obtido para 90 metros de fibra. Contudo, considerando um pequeno desvio da potência de pico e da OSNR das componentes geradas, podemos considerar que os resultados são bem próximos. Por causa de uma diferença ligeiramente melhor, escolhemos 90 metros de fibra para ser aplicada ao experimento. As outras características importantes da HNLF são: área efetiva $A_{eff} = 9 \mu\text{m}^2$; coeficiente não-linear $\gamma = 10 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ e comprimento de onda de dispersão zero $\lambda_0 = 1560 \text{ nm}$.

Outra análise importante são os parâmetros da fibra dopada a érbio. A **Figura 4-7 (a)** refere-se ao comprimento da fibra EDF. A curva preta com quadrados representa o ganho da fibra em função de diferentes comprimentos analisados, 10, 15, 20, 25 e 30 metros para 1550 nm. A curva vermelha marcada com círculos se refere ao ganho da mesma fibra para os mesmos comprimentos, porém para 1560 nm. A escolha desses dois comprimentos de onda está no fato que em 1550 nm está localizado o centro do pente inicial que será aplicado como fonte, e 1560 nm é o valor de comprimento de dispersão zero da HNLF. Por isso, precisamos ter um compromisso de ganho que atenda bem os dois valores de comprimento de onda analisados. Pelo gráfico, podemos notar que a região em que há maior ganho para os dois comprimentos de onda está em torno 23 metros, e, por esta razão, este foi o comprimento escolhido.

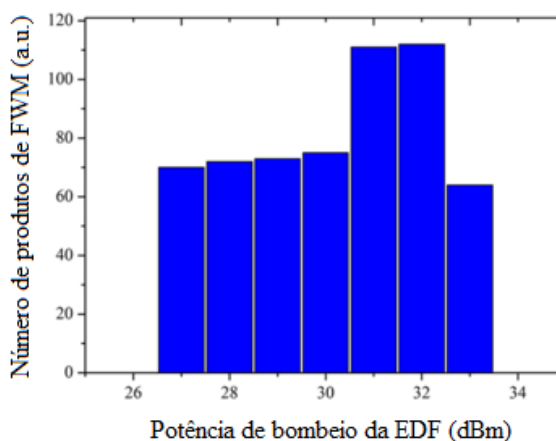
A **Figura 4-7 (b)** mostra a análise experimental do número de produtos de MFWM gerados em função da potência de bombeamento da EDF, realizada com 23 metros de comprimento. Podemos notar que para 31 e 32 dBm de potência de bombeamento estão os melhores resultados de número de produtos de FWM. Devido a uma leve diferença, a potência escolhida foi de 32 dBm. A fibra utilizada foi a DrakaElite_{TM} NanoElite-VPW-6 EDF com coeficiente não-linear $\gamma = 2,5 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$.

Para observar claramente a melhora que EDF e realimentação, juntas proporcionam, os testes foram realizados por partes. O primeiro teste foi feito apenas com a HNLF. E o segundo, sem considerar a realimentação. Assim, no setup teremos apenas a EDF com um bombeamento co-propagante seguida da HNLF. O espectro de saída para os dois casos, está mostrado na **Figura 4-8**. Os produtos gerados só

foram considerados se suas OSNR estiverem acima de 10 dB. Assim, no método tradicional (apenas HNLF), temos 14 novos produtos gerados por MFWM com boa relação sinal-ruído óptica. Para a técnica utilizando e fibra dopada a érbio, temos 30 produtos com a mesma OSNR totalizando 50 subportadoras para o OFCG. A OSNR média neste caso foi de 16,4 dB, enquanto que para o caso em que a potência de bombeio da EDF era de 27 dBm tínhamos 28 novos produtos de FWM com OSNR média de 15,8 dB.



(a)

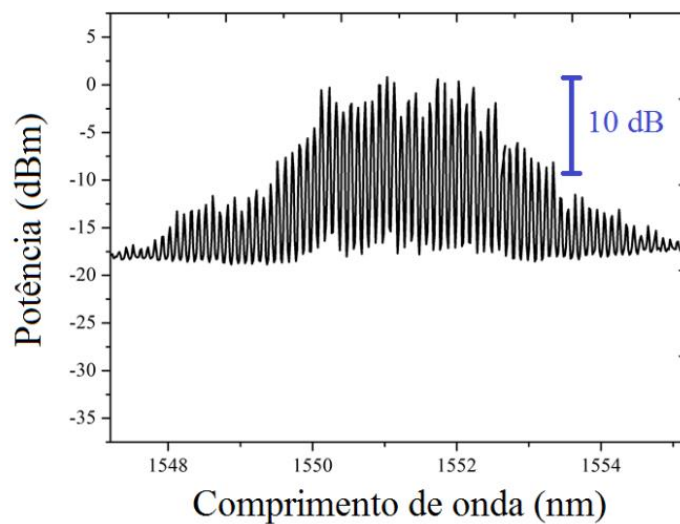


(b)

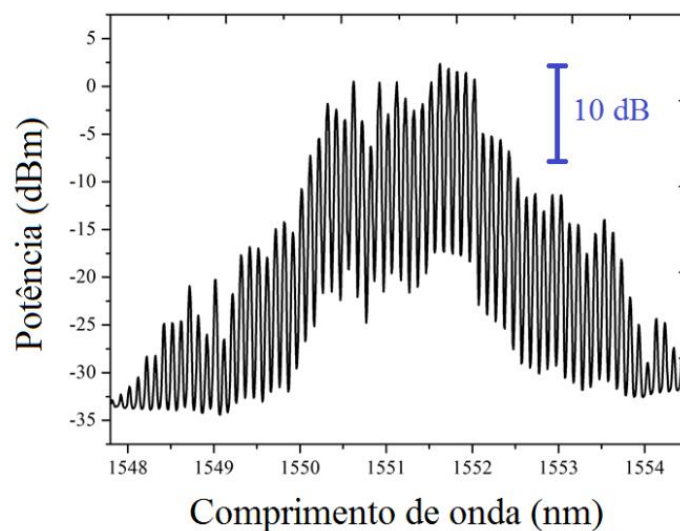
Figura 4-7 – (a) caracterização de ganho da fibra dopada e érbio em função do comprimento para duas regiões de interesse: 1550 e 1560 nm; (b) Número de produtos de FWM gerados em função da potência de bombeio da EDF.

Por estes resultados podemos concluir que acrescentando a fibra dopada a érbio já representa uma melhora significativa do número de produtos gerados por

MFWM e a correta escolha dos parâmetros envolvidos nas medidas podem levar a uma otimização desejada do sistema. A largura banda alcançada com esta técnica foi de três vezes a banda do pente original.



(a)



(b)

Figura 4-8 – (a) Espectro de saída para configuração utilizando apenas HNLF e (b) HNLF e EDF.

Outra característica analisada para os próximos experimentos foi a proporção que deverá ser utilizada nos acopladores. A **Figura 4-9** mostra o número de produtos gerados em função da proporção utilizada no acoplador. O acoplador em questão é o

aplicado na entrada da realimentação, ou seja, o acoplador 2 de acordo com a **Figura 4-5 (a)**. Podemos observar pelo gráfico que o acoplador que apresentou melhor resultado foi o acoplador 50/50, sendo que foram testados os acopladores com razões: 99/1, 70/30, 60/40 e 50/50. Neste último caso temos 40 produtos gerados por MFWM e a média da relação sinal-ruído dos produtos é de 15 dB, sendo que mais uma vez considera-se apenas os produtos com OSNR maior que 10 dB. As outras configurações, além de apresentarem um resultado inferior, também apresentaram flutuações das linhas espectrais.

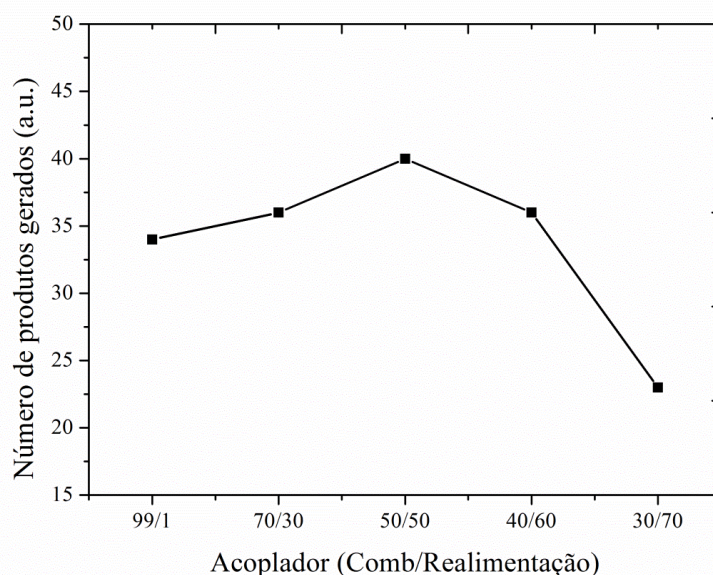


Figura 4-9 – Número de produtos gerados em função da razão do acoplador utilizada.

O próximo teste foi realizar medidas apenas com a realimentação, e com EDF e realimentação. Os testes iniciais são mostrados no espectro de saída representados na **Figura 4-10**. Como já visto, na técnica apenas com HNLF temos 14 produtos sendo gerados por FWM. Quando acrescentamos apenas a realimentação, mostrado na **Figura 4-10 (b)**, temos 16 novos produtos de MFWM com OSNR acima de 10 dB. Neste ponto, pode-se notar que a realimentação sozinha não representa um grande avanço em relação ao caso apenas com HNLF, aumentando apenas 2 produtos no pente óptico final.

A **Figura 4-10 (c)**, por outro lado, mostra o resultado obtido com o esquema proposto, ou seja, utilizando HNLF, EDF e realimentação. Para facilitar a análise e a

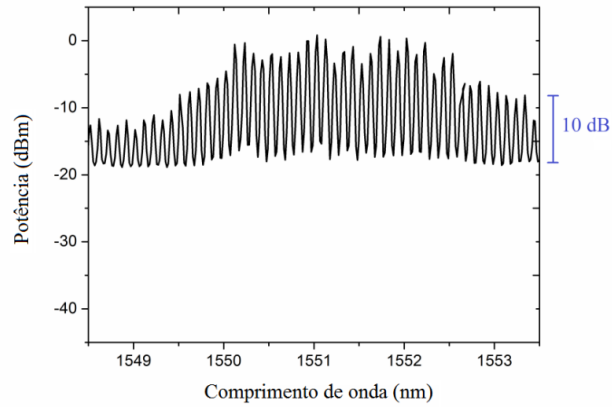
visualização dos resultados, limitamos a faixa do espectro de 1548,5 até 1553,5 nm. Podemos observar que a terceira configuração provê linhas do pente muito mais planas devido a significativa melhora da OSNR. O nivelamento dos produtos de FWM pode ser realizado posteriormente com a utilização de um WSS no espaçamento do pente óptico. Em relação à coerência das linhas espectrais, pode-se afirmar que uma condição que permite a coerência entre as linhas espectrais do pente é a conservação da energia e do momento, estabelecida pela condição de casamento de fase necessária para a geração dos produtos de MFWM. Operar no regime de dispersão normal da HNLF é outra condição que assegura um alto nível de coerência ao longo de toda a banda do OFC, que é demonstrado em [52].

A **Figura 4-11** mostra o espectro medido do melhor resultado obtido em laboratório utilizando a última técnica. O número de produtos de MFWM gerados foi superior a 200, e incluindo apenas aqueles com OSNR acima de 10 dB temos 132 produtos. Mesmo que todas as 132 subportadoras não estejam em um nível totalmente plano, existem 85 linhas espectrais com OSNR maior que 15 dB em uma faixa de flutuação de apenas 10 dB.

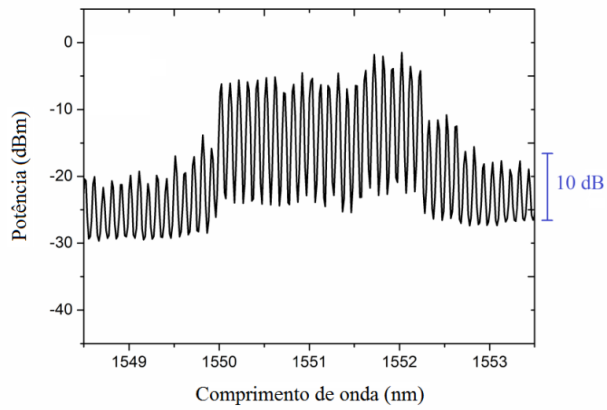
A **Tabela 1** mostra o resumo das técnicas utilizadas e o correspondente número de produtos gerados. Podemos assim, ter uma visualização mais clara dos resultados apresentados.

Além do estudo realizado com fontes de *laser* CW também foram feitos testes para geração de pentes ópticos com fontes pulsadas. Para ilustrar, a **Figura 4-12** nos mostra o espectro típico de saída capturado pelo OSA para a seguinte configuração: Um modulador de amplitude é utilizado após o acoplador com razão de 50%, que é alimentado com um gerador de pulsos quadrados com frequência de 100 KHz e largura do pulso de 50 ns. Neste caso está sendo utilizada apenas a HNLF, sem o uso de EDF e sem realimentação, com 2 metros de comprimento após o amplificador reforçador (*booster*) com 33 dBm de potência de saída. Ao contrário dos experimentos realizados com fonte contínua, nos quais foi utilizado um pente de frequências como fonte, neste teste foram utilizados apenas dois *lasers* CW modulados em amplitude. O resultado de MFWM é muito mais eficiente quando utilizamos a fonte modulada, ou seja, são gerados muito mais linhas espectrais com

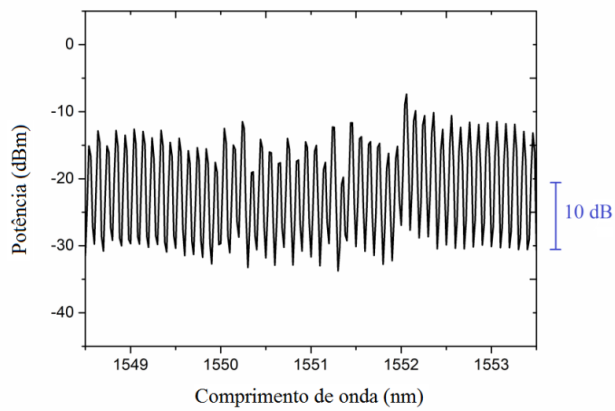
maior OSNR. Por outro lado, para algumas aplicações, como transmissão de dados reais utilizando o pente de frequências ópticas como fonte não é viável utilizar uma fonte modulada, e sim uma fonte contínua.



(a)



(b)



(c)

Figura 4-10 – *Espectro de saída para os seguintes casos: (a) apenas HNLF, (b) HNLF e realimentação e (c) HNLF, realimentação e EDF.*

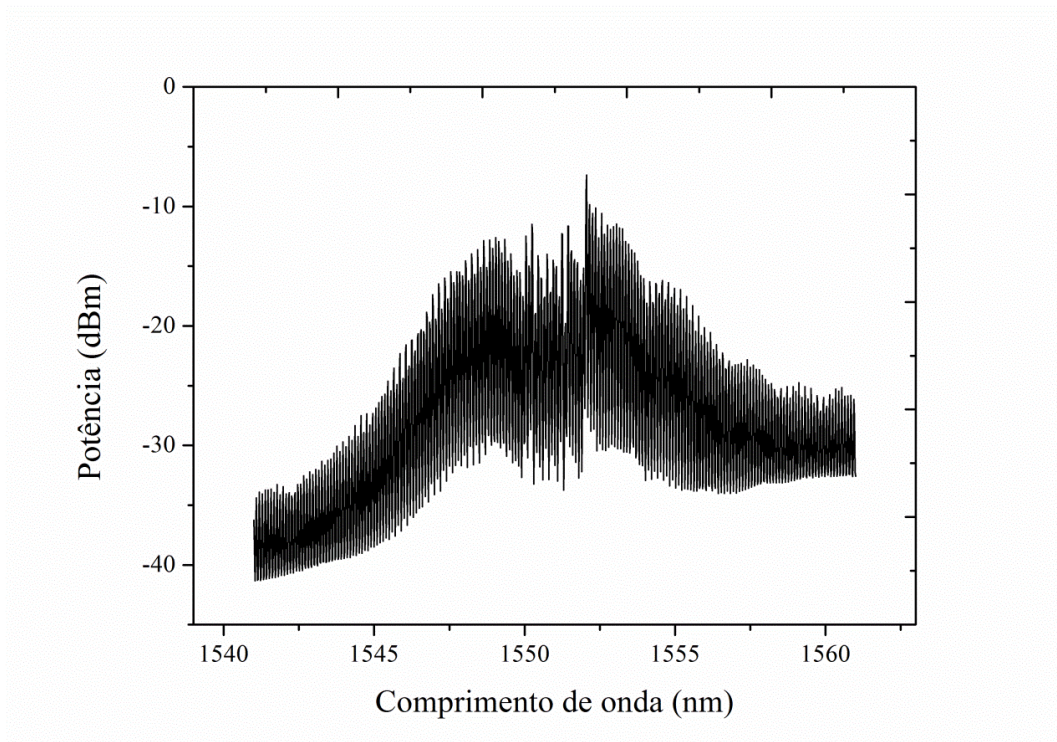







Figura 4-11 – Expansão do pente óptico original para mais de 200 linhas ópticas.

Tabela 1 – Sumário dos resultados experimentais

Técnica utilizada		Produtos com OSNR>10dB
Pente Original		20
Apenas HNLF		34
HNLF + Realimentação		36
HNLF + EDF		50
HNLF + EDF + Realimentação		132

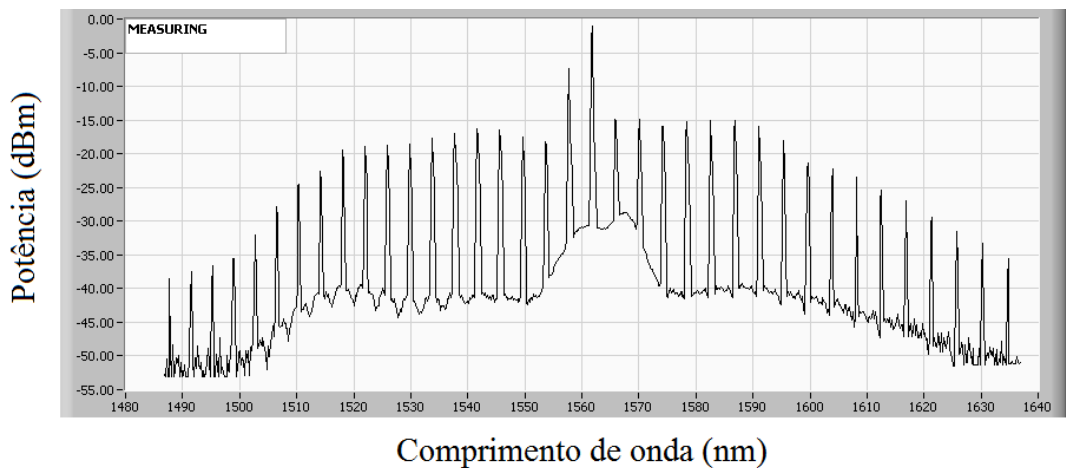


Figura 4-12 – Espectro típico do pente óptico de frequências utilizando fonte pulsada.

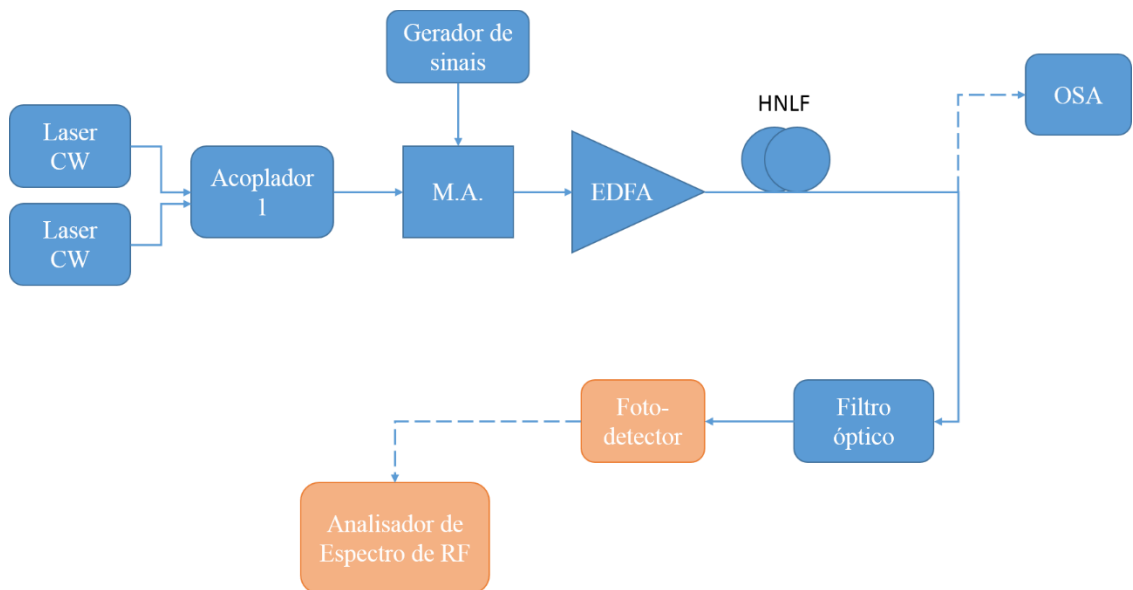
4.2. MFWM aplicado à Fotônica de Microondas.

Os sistemas rádio sobre fibra (RoF – *Radio over Fiber*) baseiam-se na transmissão do sinal de RF utilizando uma portadora óptica na faixa de centenas de terahertz [92]. Sistemas RoF possuem a característica de transmitir sinais de faixa larga em frequências de microondas ou milimétricas com baixíssima perda. Um aspecto limitante desta tecnologia é a capacidade de operação dentro da faixa de linearidade do sinal e da faixa dinâmica dos esquemas de modulação e detecção utilizados normalmente. Para contornar este problema, foram desenvolvidos métodos para aumentar a linearidade e eficiência dos moduladores ou a saturação dos fotodetectores. Além dessas técnicas, algumas pesquisas propuseram o uso de não-linearidades para melhorar as bandas laterais da modulação em relação a portadora óptica. Dentre as não-linearidades estudadas podemos citar o espalhamento estimulado Brillouin (SBS) [93][94] e a automodulação de fase (SPM) [95]. Utilizando SBS foi possível alcançar altos ganhos (até 40 dB), porém é severamente limitado na banda de operação. Já a SPM produziu ganhos menores, em torno de 8 dB, porém a complexidade de operação do sistema é muito alta devido a necessidade de variação do atraso.

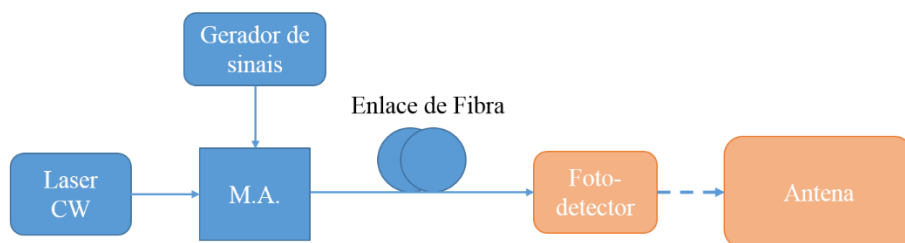
Em 2012, Wall e Foster propuseram utilizar o efeito não-linear de FWM parcialmente degenerado para conseguir ganho no enlace de microondas [96]. Foi

demonstrado um ganho constante de 9 dB ao longo de uma banda de 14 GHz para o primeiro produto de FWM.

O presente trabalho apresenta simulações e experimentos para investigar o comportamento da portadora de RF para o primeiro e segundo produtos de FWM com diferentes espaçamentos entre as ondas de bombeamento. Também foram realizados experimentos ao longo de uma banda de quase 6 GHz para comprovar a eficiência do método proposto ao longo de uma faixa larga de frequências.



(a)



(b)

Figura 4-13 – (a) Sistema proposto, (b) Sistema RoF convencional.

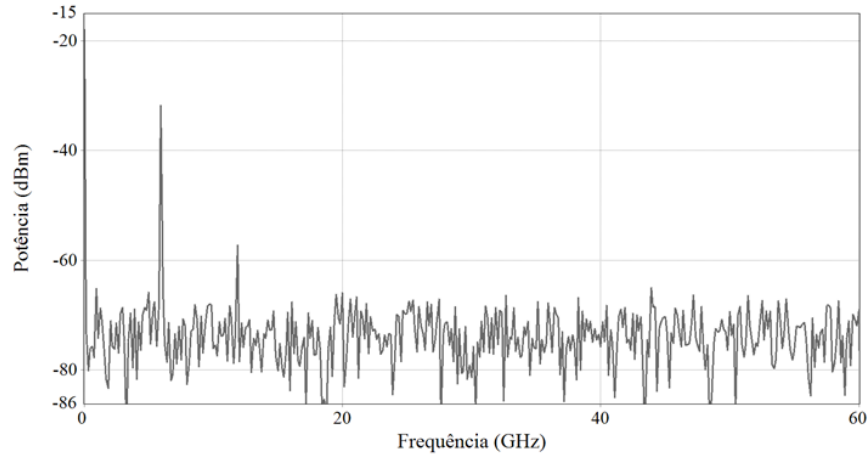
declive de dispersão $S_0 = 0,02 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$, e coeficiente não-linear $\gamma = 10 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$. A **Figura 4-15** (a) ilustra um espectro típico de simulação de saída do analisador de espectro elétrico, neste caso para um sinal de RF de 6 GHz. A **Figura 4-15** (b) mostra o resultado das simulações de ganho de RF para diferentes produtos de MFWM analisados.

As simulações foram realizadas utilizando o *software* VPI Transmission Maker™. Para a **Figura 4-15** (b) foram utilizados os seguintes parâmetros: comprimento de onda dos *lasers* λ_1 e λ_2 iguais a respectivamente 1541,5 e 1544,8 nm com potência de 0 dBm cada, frequência do sinal de RF em 28 GHz, amplitude em 1 a.u. e considerando a mesma potência óptica recebida após o filtro óptico. A potência de RF da portadora óptica em 1541,5 nm foi de -11,5 dBm e de -3,46 dBm para o primeiro produto de FWM, representando um ganho de 8 dB em relação a portadora óptica. Já o quarto produto de FWM apresentou um ganho de 11,22 dB em relação a portadora óptica, mostrando que a medida que se aumenta a ordem do produto de FWM o ganho de RF aumenta significativamente. Este fato foi observado em todas as simulações realizadas.

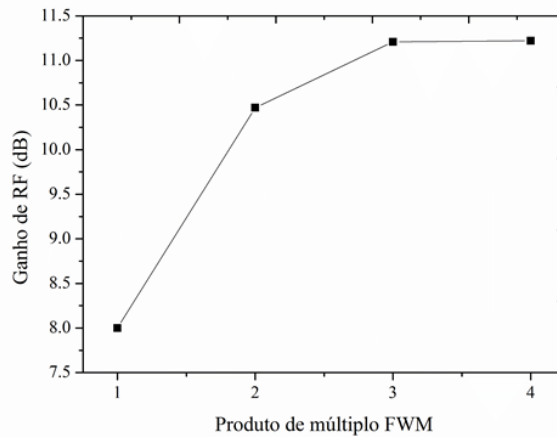
As simulações foram repetidas para 1, 14 e 38 GHz. Todas apresentaram valores muito próximos dos mostrados para 28 GHz. Utilizando a fórmula de Frizz para cálculo da atenuação no espaço livre, e calculando a potência recebida para uma situação hipotética em que uma antena irradie um sinal nas frequências apresentadas, se utilizarmos um produto de FWM que apresente um ganho de 11 dB em relação a portadora, teremos um aumento na distância alcançada de 28% para uma mesma potência de recepção para todas as frequências analisadas.

As simulações realizadas foram feitas com espaçamento de 3,3 nm. De acordo com os resultados obtidos temos que, à medida que aumentamos a distância entre as duas ondas de bombeamento de entrada, o que favoreceria o processo de MFWM como visto no capítulo 4.1, também precisaríamos aumentar significativamente a potência do EDFA para igualar a potência óptica recebida para os produtos. Este aumento indefinido da potência do EDFA causa acúmulo de ASE, e prejudica a OSNR dos produtos de FWM inviabilizando a medida de potência elétrica. O mesmo raciocínio ocorre para produtos de FWM de ordem mais alta.

Experimentalmente, foi possível apenas a medição de até o segundo produto de FWM, e em alguns casos apenas o primeiro.



(a)



(b)

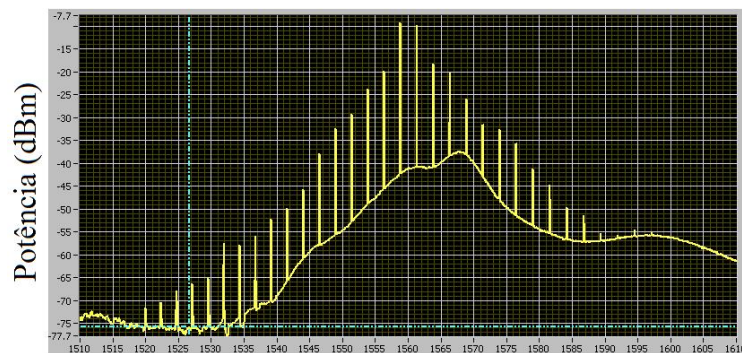
Figura 4-15 – (a) Espectro típico de saída do analisador de espectro de RF, (b) resultado das simulações de ganho de RF em função do produto de MFWM analisado.

Os primeiros experimentos foram realizados com os seguintes parâmetros: comprimento de onda λ_1 e λ_2 iguais a, respectivamente, 1556,3 e 1559,6 nm cada um com potência de 16 dBm, sinal do gerador de RF em 4 GHz, 14 dBm de potência e formato de onda senoidal, apresentado na **Figura 4-16**, tensão de polarização do modulador em 11,23 V, comprimento da fibra de 90 m e demais parâmetros da HNLFF iguais aos já apresentados neste capítulo. A tensão de alimentação, ou *drive* do modulador é de $V_\pi \leq 4$ V. O espaçamento de 3,3 nm foi escolhido, pois como já visto altos valores de espaçamento traz a necessidade de aumento da potência do

EDFA, causando acúmulo de ASE. A razão para não utilizar espaçamentos menores se deve a limitação de banda do filtro óptico. A **Figura 4-17** (a) mostra o espectro típico de saída do OSA após a HNFL para esta configuração, e em (b) temos o analisador de espectro elétrico utilizado na realização das medidas.



Figura 4-16 – Gerador de sinais de onda senoidal utilizado nos experimentos.



Comprimento de onda (nm)

(a)



(b)

Figura 4-17 – (a) Espectro típico de saída do OSA após a HNFL, (b) analisador de sinais elétrico utilizado nas medições.

A **Tabela 2** resume os resultados obtidos em simulação e na prática para esta configuração.

Tabela 2 – Resultado de ganho de RF para o primeiro e segundo produtos de FWM em 4 GHz (simulação e experimento).

	Potência de RF – (simulações)	Ganho de RF (simulações)	Potência de RF (experimentos)	Ganho de RF (experimentos)
Portadora	-64,19 dBm	-	-61,4 dBm	-
Primeiro produto de FWM	-53,73 dBm	10,46 dB	-50,5 dBm	10,9 dB
Segundo produto de FWM	-48,83 dBm	15,36 dB	-47,9 dBm	13,8 dB

Podemos notar que houve uma boa concordância entre os resultados simulados e os resultados experimentais em relação ao ganho de RF. Para o segundo produto de FWM foi alcançado um ganho na prática de 13,8 dB em relação à portadora. Pelos motivos já mencionados não foi possível medir produtos de FWM além do segundo.

Modificando o valor de tensão de polarização do modulador, e ajustando os controladores de polarização para o melhor caso, foram feitas novas medidas em 6GHz com o mesmo gerador de sinais senoidal. As condições como potência e espaçamento dos *lasers* e potência do sinal de RF foram mantidas as mesmas. A potência óptica de recepção neste caso é de – 4 dBm. Para esta configuração foram obtidos os valores sumarizados na **Tabela 3**.

Tabela 3 - Resultado de ganho de RF para o primeiro e segundo produtos de FWM em 6 GHz (simulação e experimento)

	Potência de RF – (simulações)	Ganho de RF (simulações)	Potência de RF (experimentos)	Ganho de RF (experimentos)
Portadora	-56,08 dBm	-	-55,9 dBm	-
Primeiro produto de FWM	-37,6 dBm	18,5 dB	-33,2 dBm	22,7 dB
Segundo produto de FWM	-36,69 dBm	19,4 dB	-33 dBm	22,9 dB

Podemos observar que o ganho do primeiro produto de FWM foi substancialmente maior que no caso anterior. Isso se deve ao fato de que o ganho de RF não está ligado somente à potência óptica recebida, mas também a outros parâmetros, como o controle de polarização da onda e o valor de tensão de polarização do modulador. Neste caso, o valor de tensão de polarização utilizado na medição da portadora óptica foi de -0,3 V, enquanto que para o primeiro e segundo produtos de FWM este valor foi de -1,4 V.

A próxima análise realizada foi verificar o ganho de RF em função da variação do espaçamento entre os dois bombeamentos. Neste caso, foi utilizado um gerador de sinais de onda quadrada para aumentar a eficiência do processo de FWM com os seguintes parâmetros: frequência de operação em 10 MHz, duração do pulso de 50 ns, e amplitude de 15 V. Para este experimento, foi mantida constante a potência de entrada em 0,76 W e verificou-se a potência de RF recebida. A **Figura 4-18** apresenta os resultados obtidos para o primeiro produto de FWM.

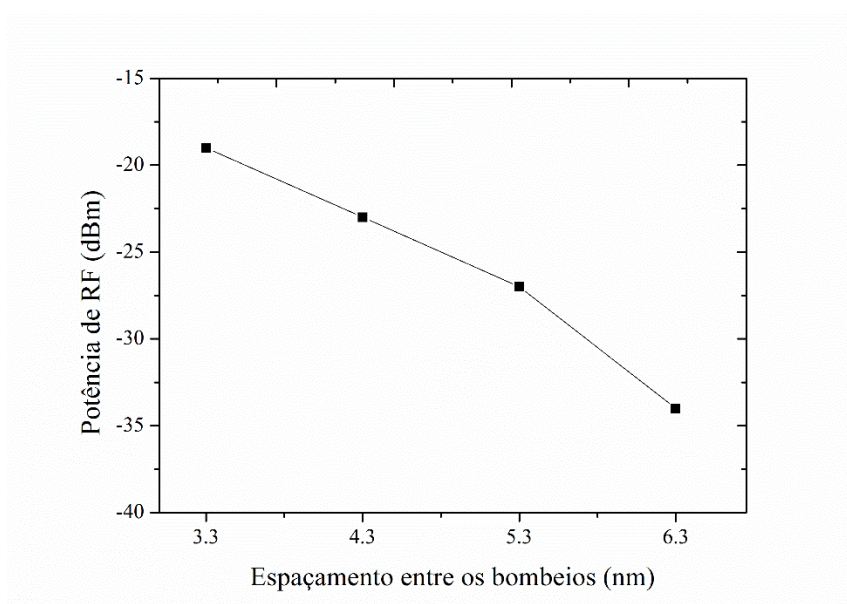


Figura 4-18 – Potência de RF recebida em função do espaçamento entre os bombeios de entrada.

Para espaçamentos maiores não foi possível realizar as medidas devido ao acúmulo de ASE do amplificador óptico. Isto causa degradação nos produtos de FWM à medida que se aumenta a separação entre os bombeamentos. Podemos perceber que a medida que aumenta o espaçamento entre as duas ondas de bombeamento de entrada há um decaimento na potência de RF recebida, o que

representa uma diminuição no ganho de RF. Observando o gráfico, podemos dizer que há uma queda aproximadamente linear em escala logarítmica entre 3,3 e 5,3 nm. De fato, de 3,3 para 4,3 nm há uma redução de 4 dB na potência de RF recebida, mesmo valor obtido de 4,3 para 5,3 nm. Já de 5,3 e 6,3 nm houve uma redução maior, de 7 dB na potência elétrica recebida.

Para verificar a validade dos resultados apresentados em uma grande faixa de frequências, foi utilizado para as próximas medições o BTS Master Tester MT822B da Anritsu, mostrado na **Figura 4-19**. Foi realizada a calibração do equipamento para a faixa de frequências de 400 MHz a 6 GHz.

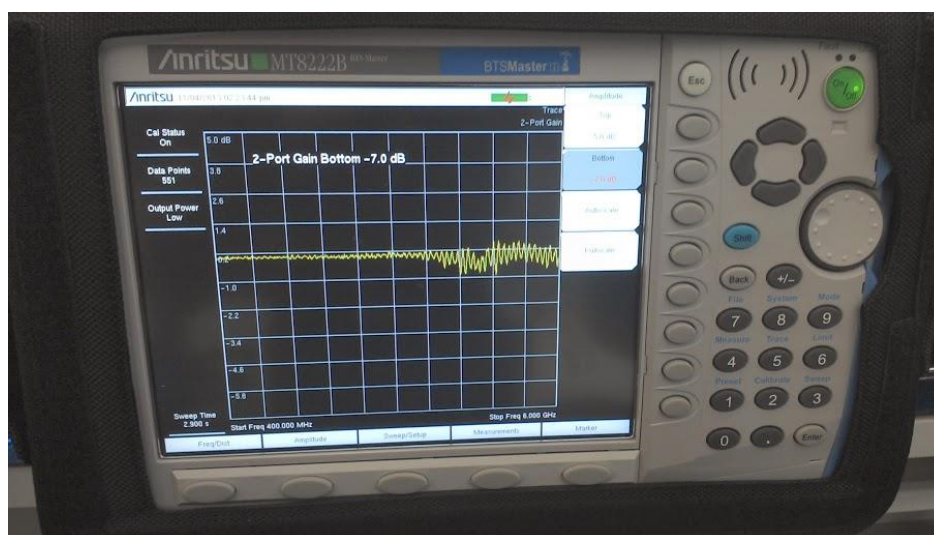


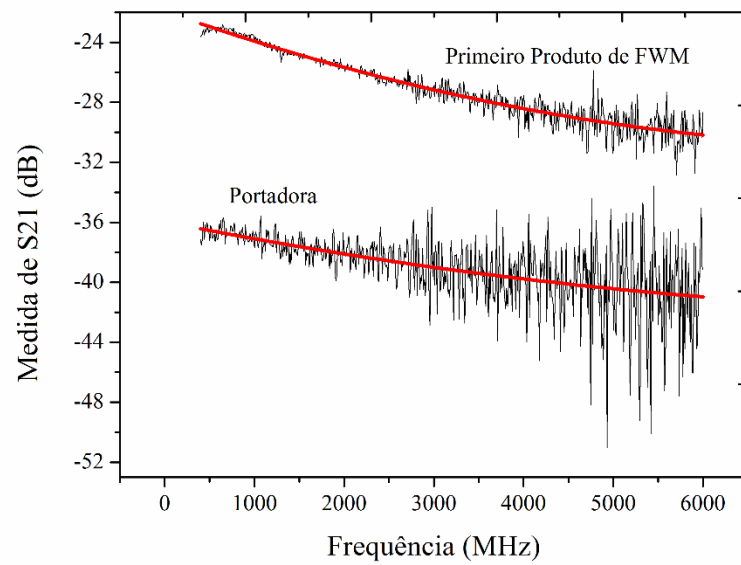
Figura 4-19 – BTS Master Tester utilizado para fazer medições de S_{21} , em que a porta 1 é a entrada de RF do modulador e a porta 2 é a saída do fotodetector.

Neste caso, foram utilizados os seguintes parâmetros: comprimento de onda dos bombeamentos λ_1 e λ_2 iguais a, respectivamente, 1556,3 e 1560,6 nm, ou seja, 4,3 nm de espaçamento. A potência de cada *laser* é de 16 dBm. O próprio BTS Master Tester trabalha como gerador de sinais e como analisador de espectro elétrico, ou seja, ele realiza uma medida de S_{21} (coeficiente de transmissão), em que a porta 1 representa a entrada de RF do modulador de amplitude e a porta 2 é a saída do fotodetector. Neste caso, estipulou-se a potência óptica recebida (após o filtro óptico) de -2,2 dBm. Os parâmetros de tensão de polarização do modulador e controladores de polarização foram ajustados para o melhor caso. Para esta configuração foi possível medir apenas até o primeiro produto de FWM.

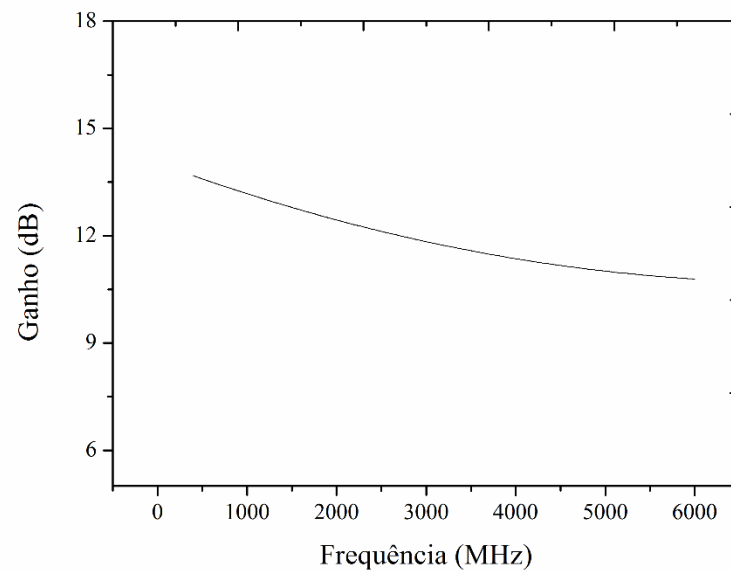
O primeiro produto de FWM está situado no comprimento de onda igual a 1562,9 nm, o que representa operar no regime de dispersão anômalo, com $D(\lambda) > 0$. A **Figura 4-20** mostra os resultados obtidos. Análises mostram que para a portadora óptica temos uma variação de 3,84 dB na faixa de frequências apresentada, e para o primeiro produto de FWM, temos uma variação de 7,4 dB. A curva de ganho, apresentada em (b), mostra que o ganho do primeiro produto em relação à portadora é aproximadamente linear em toda a faixa de frequências. O ganho apresentado para 400 MHz é de 13,6 dB, enquanto para 6 GHz este ganho cai para 10,7 dB. Isto representa uma variação de apenas 2,89 dB no ganho, mostrando que a análise é válida em uma faixa larga de frequências. Simulações já apresentadas comprovam que o ganho se estende por uma faixa ainda maior de frequências, que não puderam ser medidas na prática devido a falta dos equipamentos necessários para tal medição.

De acordo com medidas realizadas, foi constatado que o parâmetro de polarização do modulador influencia significativamente o valor de ganho do primeiro produto de FWM em relação à portadora óptica. Com a finalidade de analisar de maneira sistêmica o comportamento deste parâmetro em função da variação da tensão de polarização foram feitos experimentos na frequência de 28 GHz para a mesma configuração de sistema já apresentada e para o mesmo valor de potência óptica recebida para cada caso. A **Figura 4-21** mostra os resultados obtidos.

Quando a tensão de polarização do modulador está em 9 V temos o valor máximo da curva, que corresponde a 20,7 dB. Por outro lado, em 0 V de tensão de polarização temos o menor ganho apresentado, de 2,3 dB. Como já esperado, foi possível comprovar experimentalmente que o ponto de excursão de tensão de polarização do modulador afeta significativamente o resultado. Portanto, para atingir um valor máximo de ganho em uma determinada frequência, é necessário realizar um estudo sistêmico para cada caso separadamente.



(a)



(b)

Figura 4-20 – (a) Medida de S_{21} para a portadora e para o primeiro produto de FWM realizadas com o BTS Master Tester, (b) Ganho do primeiro produto de FWM em relação à portadora para a faixa de 400 MHz a 6 GHz.

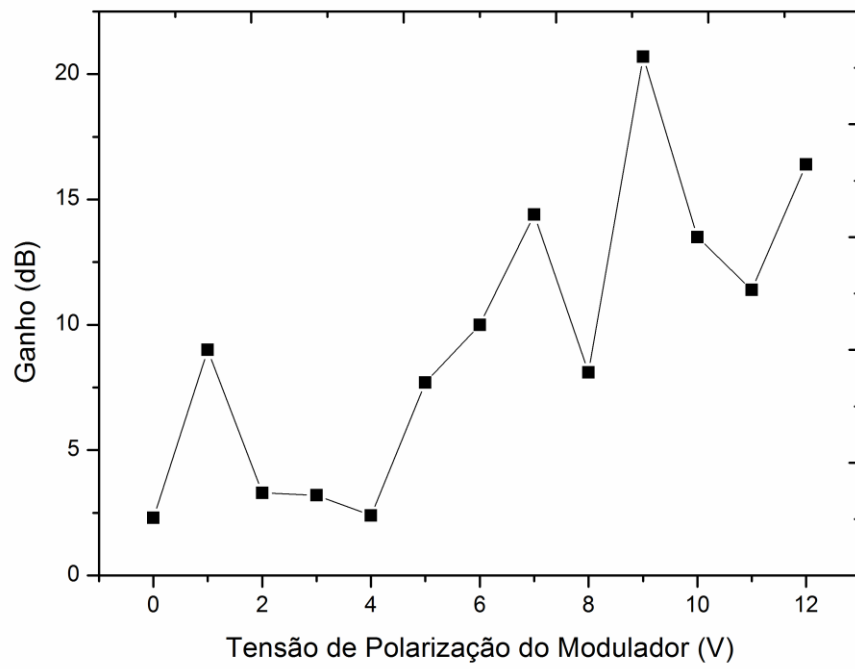


Figura 4-21 – Ganho em dB do primeiro produto de FWM em relação à portadora óptica em função do parâmetro de tensão de polarização do modulador na frequência de 28 GHz.

Capítulo 5

5. Conclusões

O trabalho baseou-se no estudo e desenvolvimento de fontes de múltiplos comprimentos de onda, baseados em pentes ópticos de frequência criados a partir do efeito MFWM. O principal objetivo do trabalho foi propor uma nova técnica para gerar pentes ópticos de frequências com linhas igualmente espaçadas no espectro com várias aplicações nos sistemas modernos de comunicações ópticas. No capítulo 1 foi realizada uma revisão bibliográfica, que abordou os principais trabalhos na área. Esta parte do trabalho foi muito relevante para conhecermos o estado da arte neste campo e permitir propormos um sistema ainda inédito na literatura. No capítulo 2 foram apresentadas outras técnicas para geração de pentes ópticos a fim de comparar os resultados obtidos por outros métodos e dos pentes obtidos pelo efeito não-linear de MFWM em fibras altamente não-lineares. O capítulo 3 apresentou um estudo teórico sobre FWM e as equações que regem o fenômeno, bem como as suas particularidades que foram importantes para o melhor entendimento e posterior estudo prático. O capítulo 4 destinou-se a apresentar os resultados obtidos. Os resultados numéricos e experimentais comprovaram a validade do método proposto. Conseguimos comprovar que utilizando fontes contínuas, fibras altamente não-lineares, fibras dopadas a érbio e um sistema de realimentação é possível expandir um pente de frequências com 20 portadoras ópticas para mais de 200 portadoras, sendo que 132 possuem OSNR acima de 10 dB e 85 estão dentro de uma flutuação máxima de 10 dB com OSNR de 15 dB. As simulações realizadas utilizando o VPI Transmission MakerTM validam os resultados experimentais.

Os pentes ópticos são de interesse para diversas áreas das comunicações ópticas, como os citados na Introdução. Uma potencial aplicação de grande interesse foi o uso de MFWM como meio para gerar ganho em enlaces ópticos analógicos de microondas. Utilizamos uma configuração experimental para testar a eficiência do método proposto e simulações para verificar a veracidade das informações obtidas. Como resultado, obtivemos um ganho na portadora de RF em 6 GHz de 22 dB experimentalmente analisando o primeiro produto de FWM em relação à portadora óptica. Outro importante resultado foi utilizando o BTS Master Tester, que demonstrou-se um ganho aproximadamente linear de 12 dB na média cobrindo uma faixa de frequências de 5,6 GHz. Este resultado é de fundamental importância, pois no estado da arte da literatura demonstrou-se um ganho máximo de 9 dB medidos em frequências específicas e não cobrindo uma larga faixa de frequências em uma única medida, como apresentado. Para verificar a influência de outros parâmetros do sistema, foram realizados experimentos em 28 GHz para analisar o ganho de RF do primeiro produto de FWM em relação à portadora óptica variando a tensão de polarização do modulador. Como resultado, foi observado um ganho de 20,7 dB quando a tensão de polarização se encontra em 9 V.

Podemos concluir que o trabalho contribuiu para o avanço das pesquisas ópticas nas áreas específicas de cada experimento. Com relação a trabalhos futuros há várias importantes questões a serem abordadas. Podemos citar como exemplo o estudo de estabilidade do pente óptico de frequências e um estudo mais aprofundado em relação a coerência entre as linhas espectrais do pente. Em relação ao ganho em enlaces de microondas, tem-se uma vasta possibilidade de estudos futuros. Podemos citar: estudos para verificar quais os parâmetros efetivamente influenciam na geração de ganho, e qual a influência de cada um; um estudo sistêmico e em uma faixa de frequências ainda maior, para verificar se há um limitante neste sentido; e a verificação da possibilidade de construir um amplificador para sistemas RoF com o objetivo de obter-se picocélulas para transmissões da ordem de Gb/s em sistemas sem fio.

Referências Bibliográficas

- [1] Cisco Systems, Inc., Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology 2012-2017, White Paper, 2013.
- [2] S. Gao et al, “Wavelength conversion of spectrum-sliced broadband amplified spontaneous emission light by hybrid four-wave mixing in highly nonlinear, dispersion-shifted fibers”, *Optics Express*, Vol. 14, No. 7, Apr. 2006, pp. 2873-2879.
- [3] F.C. Cruz et al, “Full nonlinear conversion of a 200 nm comb produced by multiple four-wave mixing in a highly nonlinear fiber”, *Proc. Conference on Lasers and Electro-Optics/International Quantum Electronics Conference*, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America), Baltimore, Maryland United States, 2009.
- [4] A. Camerlingo et al, “Multichannel Wavelength Conversion of 40Gbit/s NRZ DPSK Signals in a Highly Nonlinear Dispersion Flattened Lead Silicate Fibre”, *Proc. Advanced Photonics & Renewable Energy*, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America), Karlsruhe Germany, 2010.
- [5] B.P. Kuo et al, “Wavelength Multicasting via Frequency Comb Generation in a Bandwidth-Enhanced Fiber Optical Parametric Mixer”, *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 29, No. 23, Dec. 2011, pp. 3515-3522.
- [6] Y. Chen et al, “Experimental demonstration of 400 Gb/s optical PDM-OFDM superchannel multicasting by multiple-pump FWM in HNLF”, *Optics Express* Vol. 21, No. 8, Apr. 2013, pp. 9915-9922.
- [7] B. Vidal, “Photonic millimeter-wave frequency multiplication based on cascaded four-wave mixing and polarization pulling”, *Optics Letters* Vol. 37, No. 24, Dec. 2007, pp. 5055-5057.

- [8] F.C. Cruz, "Optical frequency combs generated by four-wave mixing in optical fibers for astrophysical spectrometer calibration and metrology", *Optics Express* Vol. 16, No. 17, Aug. 2008, pp. 13267-13275.
- [9] A.E.H. Oehler et al, "Broad multiwavelength source with 50 GHz channel spacing for wavelength division multiplexing applications in the telecom C band", *Optics Letters*, Vol. 33, No. 18, Sep. 2008, pp. 2158-2160.
- [10] L. Xiang et al, "1.12-Tb/s 32-QAM-OFDM superchannel with 8.6-b/s/Hz intrachannel spectral efficiency and space-division multiplexed transmission with 60-b/s/Hz aggregate spectral efficiency", *Optics Express*, Vol. 19, No. 26, Dec. 2011, pp. B958-B964.
- [11] S. Pitois et al, "Generation of 20-GHz picosecond pulse trains in the normal and anomalous dispersion regimes of optical fibers", *Optics Communications* Vol. 260, No. 1, Apr. 2006, pp. 301-306.
- [12] C.H. Li et al, "A laser frequency comb that enables radial velocity measurements with a precision of 1 cm s⁻¹", *Nature*, Vol. 452, Apr. 2008, pp. 610-612.
- [13] M.P. Fok and C. Shu, "Multipump Four-Wave Mixing in a Photonic Crystal Fiber for 6×10 Gb/s Wavelength Multicasting of DPSK Signals", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 19, No. 15, Aug. 2007, pp. 1166-1168.
- [14] S.T. Cundiff and A.M. Weiner, "Optical arbitrary waveform generation", *Nature Photonics*, Vol. 4, Oct. 2010, pp. 760-766.
- [15] T. Ng et al, "In-band OSNR and chromatic dispersion monitoring using a fibre optical parametric amplifier", *Optics Express* Vol. 13, No. 14, Jul. 2005, pp. 5542-5552.
- [16] W.H. Oskay et al, "Single-Atom Optical Clock with High Accuracy", *Physical Review Letters*, Vol. 97, No. 2, Jul. 2006, pp. 020801-020805.
- [17] D. Ludlow et al, "Sr Lattice Clock at 1 x 10⁻¹⁶ Fractional Uncertainty by Remote Optical Evaluation with a Ca Clock", *Science*, Vol. 319, No. 5871, Mar. 2008, pp. 1805-1808.
- [18] S.N. Lea, "Limits to time variation of fundamental constants from comparisons of atomic frequency standards", *Rep. Prog. Phys.*, Vol. 70, No. 9, Aug. 2007, pp. 1473-1523.

- [19] A. Baltuska et al, "Attosecond control of electronic processes by intense light fields", *Nature*, Vol. 421, Feb. 2003, pp. 611-615.
- [20] M.J. Thorpe et al, "Broadband Cavity Ringdown Spectroscopy for Sensitive and Rapid Molecular Detection", *Science*, Vol. 311, Mar. 2006, pp. 1595-1599.
- [21] S.A. Diddams, L. Hollberg, and V. Mbele, "Molecular fingerprinting with the resolved modes of a femtosecond laser frequency comb", *Nature*, Vol. 445, Feb. 2007, pp. 627-630.
- [22] A. Marian et al, "United Time-Frequency Spectroscopy for Dynamics and Global Structure", *Science*, Vol. 306, No. 5704, Dec. 2004, pp. 2063-2068.
- [23] E. Goulielmakis et al, "Attosecond Control and Measurement: Lightwave Electronics", *Science*, Vol. 317, No. 5839, Aug. 2007, pp. 769-775.
- [24] R. Wu et al, "Generation of very flat optical frequency combs from continuous-wave lasers using cascaded intensity and phase modulators driven by tailored radio frequency waveforms", *Optics Letters*, Vol. 35, No. 19, Oct. 2010, pp. 3234-3226.
- [25] G.A. Sefler and K. Kitayama, "Frequency Comb Generation by Four- Wave Mixing and the Role of Fiber Dispersion", *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 16, No. 9, Sep. 1998, pp. 1596-1605.
- [26] A.S. Bell et al, "Efficient optical frequency-comb generator," *Optics Letters*, Vol. 20, No. 12, Jun. 1995, pp. 1435-1437.
- [27] J. Ye et al, "Highly selective terahertz optical frequency comb generator," *Optics Letters*, Vol. 22, No. 5, Mar. 1997, pp. 301-303.
- [28] H. Murata et al, "Optical pulse generation by electrooptic-modulation method and its application to integrated ultrashort pulse generators", *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, Vol. 6, No. 6, Dec. 2000, pp. 1325-1331.
- [29] P. Del'Haye et al, "Optical frequency comb generation from a monolithic microresonator", *Nature*, Vol. 450, Dec. 2007, pp. 1214-1217.
- [30] K. Kitayama and Y. Awaji, "Optical pulse train generation with use of fiber-optic frequency comb generator and waveguide spectrum synthesizer," *Proc. Lasers and Electro-Optics*, Vol. 11, Baltimore, MD, USA, May 1997, pp. 135.

- [31] K. Kitayama, "Highly stabilized millimeter-wave generation by using fiber-optic frequency-tunable comb generator," *Journal Lightwave Technologies*, Vol. 15, No. 5, May 1997, pp. 883–893.
- [32] J.R. Thompson and R. Roy, "Nonlinear dynamics of multiple four-wave mixing processes in a single-mode fiber", *Physical Review A*, Vol. 43, No. 9, May 1991, pp. 4987-4996.
- [33] G. Millot, "Multiple four-wave mixing-induced modulational instability in highly birefringent fibers," *Optics Letters*, Vol. 26, No. 18, Sep. 2001, pp. 1391–1393.
- [34] S. Trillo, S. Wabnitz, and T.A.B. Kennedy, "Nonlinear dynamics of dual-frequency-pumped multiwave mixing in optical fibers," *Physical Review A*, Vol. 50, No. 2, Aug. 1994, pp. 1732–1747.
- [35] X. Xu et al, "Multiple Four-Wave-Mixing Processes and Their Application to Multiwavelength Erbium-Doped Fiber Lasers", *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 27, No. 14, Jul. 2009, pp. 2876-2885.
- [36] J. Schroder et al, "Interplay of four-wave mixing processes with a mixed coherent-incoherent pump", *Optics Express*, Vol. 18, No. 25, Dec. 2010, 25833-25838.
- [37] K. Inoue, "Four-Wave Mixing in an Optical Fiber in the Zero-Dispersion Wavelength Region", *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 10, No. 11, Nov. 1992, pp. 1553-1561.
- [38] S. Song et al, "Intensity-Dependent Phase-Matching Effects on Four-Wave Mixing in Optical Fibers", *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 17, No. 11, Nov. 1999, pp. 2285-2290.
- [39] S.J. Jung, J.Y. Lee, and D.Y. Kim, "Novel phase-matching condition for a four wave mixing experiment in an optical fiber", *Optics Express*, Vol. 14, No. 1, Jan. 2006, pp. 35-43.
- [40] S.S-H. Yam et al, "Frequency comb generation by CW laser diode", *Proc. Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2003*, Baltimore, MD, USA, pp. 429-430.
- [41] J-P. Fève, "Phase-matching and mitigation of four-wave mixing in fibers with positive gain", *Optics Express*, Vol. 15, No. 2, Jan. 2007, pp. 577-582.

- [42] Arismar Cerqueira S. Jr. et al, "Highly efficient generation of broadband cascaded four-wave mixing products", *Optics Express*, Vol. 16, No. 4, Feb. 2008, pp. 2816-2828.
- [43] K. Inoue, "Arrangement of fiber pieces for a wide wavelength conversion range by fiber four-wave mixing," *Optics Letters*, Vol. 19, No. 16, Aug. 1994, pp. 1189-1191.
- [44] M.E. Marhic et al, "High-nonlinearity fiber optical parametric amplifier with periodic dispersion compensation," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 17, No. 2, Feb. 1999, pp. 210-215.
- [45] L. Provino et al, "Broadband and flat parametric amplifiers using a multi-section dispersion-tailored nonlinear fiber arrangement," *JOSA B*, Vol. 20, No. 7, Jul. 2003, pp. 1532-1537.
- [46] Arismar Cerqueira S. Jr. et al, "Broadband cascaded four-wave mixing by using a three-pump technique in optical fibers", *Optics Communications*, Vol. 282, No. 22, Nov. 2009, pp. 4436-4439.
- [47] J.M.C. Boggio et al, "Nearly octave-spanning cascaded four-wave-mixing generation in dispersion optimized highly nonlinear fiber", *Proc. of Frontiers in Optics (FiO) 2009*, San Jose, Ca, USA.
- [48] J.M.C. Boggio et al, "Optical frequency comb generated by four-wave mixing in highly nonlinear fibers", *Proc. of Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2009*, Baltimore, MD, USA.
- [49] J. Li et al, "Enhancement of cascaded four-wave mixing via optical feedback", *Optics Express*, Vol. 20, No. 20, Sep. 2012, pp. 21940-21945.
- [50] E. Myslivets et al, "Generation of wideband frequency combs by continuous-wave seeding of multistage mixers with synthesized dispersion", *Optics Express*, Vol. 20, No. 3, Jan. 2012, pp. 3331-3344.
- [51] V.R. Supradeepa and A.M. Weiner, "Bandwidth scaling and spectral flatness enhancement of optical frequency combs from phase-modulated continuous-wave lasers using cascaded four-wave mixing", *Optics Letters*, Vol. 37, No. 15, Aug. 2012, pp. 3066-3068.
- [52] R. Wu, "Supercontinuum-based 10-GHz flat-topped optical frequency comb generation", *Optics Express*, Vol. 21, No. 5, Mar. 2013, pp. 6045-6052.

- [53] K. Kim et al, "Characterization of frequency noise on a broadband infrared frequency comb using optical heterodyne techniques", *Optics Express*, Vol. 15, No. 26, Dec. 2007, pp. 17715-17723.
- [54] Z. Tong et al, "Spectral linewidth preservation in parametric frequency combs seeded by dual pumps", *Optics Express*, Vol. 20, No. 16, Jul. 2012, pp. 17610-17619.
- [55] M.P. Fok and C. Shu, "Tunable dual-wavelength erbium-doped fiber laser stabilized by four-wave mixing in a 35-cm highly nonlinear bismuth-oxide fiber", *Optics Express*, Vol. 15, No. 10, May 2007, pp. 5925-5930.
- [56] N.A. Cholan et al, "Multi-wavelength generation by self-seeded four-wave mixing", *Optics Express*, Vol. 21, No. 5, Mar. 2013, pp. 6131-6138.
- [57] T. Yang et al, "Comparison analysis of optical frequency comb generation with nonlinear effects in highly nonlinear fibers", *Optics Express*, Vol. 21, No. 7, Apr. 2013, pp. 8508-8520.
- [58] P.J. Winzer e R-J. Essiambre, "Advanced optical modulation formats", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 94, No. 5, May 2006, pp. 952-985.
- [59] P.J. Winzer e R-J. Essiambre, *Advanced optical modulation formats, Optical Fiber Communications IV B*, Academic Press, 2008, pp. 23-93.
- [60] M-J. Li et al, *Specialty fibers for optical communications systems, Optical Fiber Communications IV A*, Academic Press, 2002, pp. 523-591.
- [61] G.P. Agrawal, *Applications of Nonlinear Fiber Optics*, 2nd edition, Academic Press, San Diego, California, 2001.
- [62] T. Kawanishi et al, "Optical frequency comb generator using optical fiber loops with single-sideband modulation" *IEICE Electronics Express*, Vol. 1, No. 8, Jul. 2004, pp. 217-221.
- [63] D.M. Pataca et al, "Transmission of a 1.12 Tb/s superchannel over 452 km fiber", *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, Vol. 12, No. 2, Dec. 2013, pp. 114-122.
- [64] F.D. Simões, D.M. Pataca and M.L. Rocha, "Design of a Comb Generator for High Capacity Coherent-WDM Systems", *Latin America Transactions, IEEE*, Vol. 10, No. 3, Apr. 2012, pp. 1690-1696.
- [65] W. Koechner, *Solid-State Laser Engineering*, Springer Series in Optical Sciences, 3rd ed, Germany: Springer-Verlag Berlin Helberg, 1992.

- [66] L.E. Nelson et al, "Ultrashort-pulse fiber ring lasers", *Applied Physics B*, Vol. 65, 1997, pp. 277-294.
- [67] D.J. Kuizenga and A.E. Seigman, "FM and AM mode-locking of the homogeneous laser. 1 – Theory", *IEEE J. Quantum Electron* 6, 1970, pp. 694-798.
- [68] E.S. Boncristiano, L.A.M. Saito and E.A. de Souza, "396 fs, 2.5-12 GHz Asynchronous Mode-Locking Erbium Fiber Laser" *Proc. of CLEO/QELS, 2007, Batimore, Maryland, USA.*
- [69] T. Gherman and D. Romanini, "Mode-locked cavity-enhanced absorption spectroscopy", *Optics Express*, Vol. 10, No. 19, Sep. 2002, pp. 1033-1042.
- [70] A.J. Metcalf et al, "Stand-Alone High-Power Broadly Tunable Optoelectronic Frequency Comb Generator", in *Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2013, Anaheim, Ca, United States*, pp. JW2A.15.
- [71] M. Fujiwara et al, "Optical carrier supply module using flattened optical multicarrier generation based on sinusoidal amplitude and phase hybrid modulation," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 21, No. 11, Nov. 2003, pp. 2705-2714.
- [72] V. Ataie et al, "Generation of 1500-tone, 120nm-wide Ultraflat Frequency Comb by Single CW Source", *Proc. of Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2013, Anaheim, Ca, United States*, pp. PDP5C.1.
- [73] M. Kouroggi, K. Nakagawa and M. Ohtsu, "Wide-span optical frequency comb generator for accurate optical frequency difference measurement", *IEEE J. Quantum Electron.*, Vol. 29, No. 10, Oct. 1993, pp. 2693–2701.
- [74] F. Ferdous et al, "Spectral line-by-line pulse shaping of on-chip microresonator frequency combs", *Nature Photonics* Vol. 5, Oct. 2011, pp. 770-776.
- [75] T. Yamamoto et al, "Spectrally flattened phaselocked multi-carrier light generator with phase modulators and chirped fibre Bragg grating", *Electronics Letters*, Vol. 43, No. 19, Sep. 2007, pp. 1040–1042.
- [76] W. Bogaerts et al, "Silicon microring resonators", *Laser Photonics Rev.*, Vol. 6, No. 1, Jan. 2012, pp. 47-73.

- [77] J. Heebner, R. Grover and T. Ibrahim, *Optical Microresonators: Theory, Fabrication and Applications*, 1st ed. Springer Series in Optical Sciences, London 2008.
- [78] B.E. Little et al, “Microring Resonator Channel Dropping Filters”, *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 15, No. 6, Jun. 1997, pp. 998–1005.
- [79] C. Manolatou et al, “Coupling of Modes Analysis of Resonant Channel Add–Drop Filters”, *IEEE J. Quantum Electron.*, Vol. 35, No. 9, Sep. 1999, pp. 1322–1331.
- [80] S. Selvaraja et al, “Fabrication of Photonic Wire and Crystal Circuits in Silicon-on-Insulator Using 193-nm Optical Lithography”, *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 27, No. 18, Sep. 2009, pp. 4076–4083.
- [81] G.P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, 2nd Ed., Academic Press Inc., 1995.
- [82] J.M.C. Boggio et al, “Spectrally flat and broadband double-pumped fiber optical parametric amplifiers”, *Optics Express*, Vol. 15, No. 9, Apr. 2007, pp. 5288-5309.
- [83] N. Shibata, R.P. Braun, R.G. Waarts, “Phase-Mismatch Dependence of Efficiency of Wave Generation Through Four-Wave Mixing in a Single- Mode Optical Fiber”, *IEEE J. Quantum Electron.*, Vol. 23, No. 7, Jul. 1987, pp. 1205-1210.
- [84] K.O. Hill et al., “CW three-wave mixing in single-mode optical fibers”, *J. Applied Physics*, Vol. 49, No. 10, Oct. 1978, pp. 5098-5106.
- [85] R. Ramaswami; K.N. Sivarajan, *Optical Networks: A Practical Perspective*. 2nd Ed., Academic Press, 2002, San Diego, USA.
- [86] G. Keiser, *Optical Fibers Communications*, 3rd Ed., McGraw-Hill 2000, USA.
- [87] J. Heccht, *Mitigating Nonlinear Effects is Essential to Long-Haul Transmission Systems*, *Laser Focus World*, May 2002.
- [88] I.A.S. Júnior, *Análise do efeito mistura de quatro ondas em fibras ópticas na janela de 1550 nm*, master’s thesis, Instituto Nacional de Telecomunicações, Santa Rita do Sapucaí, Brazil, 2003.
- [89] T.V. Higgins, *Nonlinear Optical Effects are Revolutionizing Electrooptics*, *Laser Focus World*, August 1994.

- [90] R.H. Stolen and J.E. Bjorkholm, "Parametric Amplification and Frequency Conversion in Optical Fibers", *IEEE J. Quantum Electron.*, Vol 18, No. 7, Jul. 1982, pp. 1062-1072.
- [91] O. Aso et al, "Broadband four-Wave Mixing generation in short optical fibers," *Electronic Letters*, Vol. 36, No. 8, Apr. 2000, pp. 709-711.
- [92] D.G. Lona et al, "Implementation and performance investigation of radio-over-fiber systems in wireless sensor networks", *Microwave and Optical Technology Letters (MOTL)*, Vol. 54, No. 12, Dec. 2012, pp. 2669-2675.
- [93] K.J. Williams and R.D. Esman, "Stimulated Brillouin Scattering for Improvement of Microwave Fibre-Optic Link Efficiency," *Electronics Letters*, Vol. 30, No. 23, Nov. 1994, pp. 1965-1966.
- [94] S. Tonda-Goldstein et al, "40 dB Dynamic Enhancement of Modulation Depth for Optically Carried Microwave Signals," *Electronics Letters*, Vol. 39, No. 10, May 2003, pp. 790-792.
- [95] M.R. Phillips and M.D. Regan, "Enhancement of Microwave Optical Link Gain by Self-Phase Modulation in a Fiber Interferometer," *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 20, No. 24, Dec. 2008, pp. 2174-2176.
- [96] W.S. Wall and M.A. Foster, "Ultra-Wideband Gain in Microwave Photonic Links using Four-Wave Mixing", *Proc. of Conference on Lasers and Electro-Optics CLEO*, 2012, San Jose, Ca, United States, pp. CTu3A.4.