



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE TELEINFORMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TELEINFORMÁTICA
MESTRADO ACADÊMICO EM ENGENHARIA DE TELEINFORMÁTICA

JOÃO PINTO DA FONSECA NETO

**SISTEMAS GERADORES DE SUPPORTADORAS ÓPTICAS EM LOOPS
PARALELOS AMPLIFICADOS COM MODULAÇÃO DE FASE**

FORTALEZA
2023

JOÃO PINTO DA FONSECA NETO

SISTEMAS GERADORES DE SUBPORTADORAS ÓPTICAS EM LOOPS PARALELOS
AMPLIFICADOS COM MODULAÇÃO DE FASE

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia de Teleinformática do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Teleinformática do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia de Teleinformática. Área de Concentração: Eletromagnetismo Aplicado

Orientador: Prof. Dr. João Batista Rosa Silva

FORTALEZA

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Universidade Federal do Ceará

Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

F744s Fonseca Neto, João Pinto da.

Sistemas Geradores de Subportadoras Ópticas em Loops Paralelos Amplificados com Modulação de Fase / João Pinto da Fonseca Neto. – 2023.

67 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Teleinformática, Fortaleza, 2023.

Orientação: Prof. Dr. João Batista Rosa Silva.

1. Gerador de Subportadoras Ópticas. 2. Modulador de Fase. 3. Ressonador Óptico. I. Título.

CDD 621.38

JOÃO PINTO DA FONSECA NETO

SISTEMAS GERADORES DE SUBPORTADORAS ÓPTICAS EM LOOPS PARALELOS
AMPLIFICADOS COM MODULAÇÃO DE FASE

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia de Teleinformática do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Teleinformática do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia de Teleinformática. Área de Concentração: Eletromagnetismo Aplicado

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. João Batista Rosa Silva (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Kleber Zuza Nobrega
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Leonardo Lorenzo Bravo Roger
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)

À minha família, por sua capacidade de acreditar em mim e investir em mim. Mãe, seu cuidado e dedicação foi que deram, em alguns momentos, a esperança para seguir. Pai, sua presença significou segurança e certeza de que não estou sozinho nessa caminhada.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, à minha família que sempre esteve comigo nessa jornada de altos e baixos. À minha filha, que é o meu combustível para viver. Se um dia você ler isso, saiba que tudo de melhor na minha vida é por sua causa.

Ao meu orientador e professor João Batista por todo o conhecimento e parceria na pesquisa desde a graduação.

Ao meu colega de pesquisa Danilo e ao professor Kleber Zuza por ajudar na automação do processo de capturar os dados no OptiSystem e MATLAB.

Aos meus colegas e professores do GIQ que sempre me receberam, me trataram bem e compartilharam conhecimentos.

Ao IFCE por disponibilizar o software OptiSystem para simulação dos sistemas propostos.

E à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de nível Superior - Brasil (CAPES), pelo financiamento da pesquisa de mestrado via bolsa de estudos.

“Quando a educação não é libertadora, o sonho
do oprimido é ser o opressor”

(Paulo Freire)

RESUMO

Neste trabalho são apresentados três novos sistemas geradores de subportadoras ópticas na banda C (1530 - 1565) nm. Esses sistemas são baseados em ressonadores ópticos amplificados em paralelo usando moduladores de fase. Os sistemas foram simulados computacionalmente através da ferramenta OptiSystem para um espaçamento espectral entre as raias de 10 GHz. O Sistema I gerou 135 raias com flatness de 1,9 dB e OSNR de 20 dB. Já o Sistema II gerou 53 raias com flatness menor que 1 dB e OSNR de 60 dB. E o último sistema proposto, Sistema III, conseguiu gerar 143 raias com flatness de 1,4 dB e OSNR de 60 dB.

Palavras-chave: Gerador de subportadoras ópticas. Modulador de fase. Ressonador óptico.

ABSTRACT

In this work, three new C-band (1530 - 1565) nm optical subcarrier generator systems are presented. These systems are based on parallel amplified optical resonators using phase modulators. The systems were computationally simulated using the OptiSystem tool for a 10 GHz spectral spacing between subcarriers. System I generated 135 subcarriers with flatness of 1.9 dB and OSNR of 20 dB. System II generated 53 subcarriers with flatness less than 1 dB and OSNR of 60 dB. And the last proposed system, System III, was able to generate 143 subcarriers with a flatness of 1.4 dB and OSNR of 60 dB.

Keywords: Optical subcarrier generator, Phase modulator, Optical resonator.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Confinamento de luz através de reflexão interna total em fibras SIF.	20
Figura 2 – Operação de um amplificador óptico genérico.	23
Figura 3 – Estrutura de EDFA com bombeio co-propagante.	25
Figura 4 – Diagrama dos níveis de energia para EDFA com bombeio em 980 nm.	25
Figura 5 – Perfil da ASE no espectro típico do EDFA.	26
Figura 6 – Acoplador óptico direcional 2x2.	28
Figura 7 – Modulador de fase eletro-óptico.	30
Figura 8 – Modulador de intensidade baseado no interferômetro de Mach-Zehnder. . . .	31
Figura 9 – Ressonador óptico em anel.	33
Figura 10 – Pente de frequências ópticas.	35
Figura 11 – Parâmetros de uma OFC.	36
Figura 12 – Campos gerados pelo MLL no domínio do tempo e da frequência.	37
Figura 13 – Sistema proposto por KAYES; ROCETTE <i>et al.</i> 2017.	38
Figura 14 – Sistema proposto por HMOOD <i>et al.</i> 2015.	39
Figura 15 – Sistema proposto por ZHANG; WU <i>et al.</i> 2018.	39
Figura 16 – Sistema proposto por DAS <i>et al.</i> 2020.	39
Figura 17 – Sistema proposto por QIU <i>et al.</i> 2022.	40
Figura 18 – Esquema para OFCG usando EOM.	40
Figura 19 – Sistema proposto por CHEN <i>et al.</i> 2013.	42
Figura 20 – Pente de frequências gerado por METCALF <i>et al.</i> 2013.	42
Figura 21 – Sistema proposto por YAMAMOTO <i>et al.</i> 2009.	42
Figura 22 – Sistema proposto por ZHANG <i>et al.</i> 2012.	43
Figura 23 – Esquema para OFCG usando ressonador óptico.	44
Figura 24 – Sistema proposto por COPPIN; HODGKINSON 1990.	45
Figura 25 – Sistema proposto por BENNETT <i>et al.</i> 1999.	46
Figura 26 – Sistema proposto por ZHANG <i>et al.</i> 2011.	47
Figura 27 – Sistema proposto por COSTA; SILVA 2018.	47
Figura 28 – Sistema proposto por SANTOS 2019.	48
Figura 29 – Primeiro sistema proposto (Sistema I) para geração de subportadoras ópticas. .	51
Figura 30 – Segundo sistema proposto (Sistema II) para geração de subportadoras ópticas. .	51
Figura 31 – Terceiro sistema proposto (Sistema III) para geração de subportadoras ópticas. .	52

Figura 32 – Pente óptico gerado pelo Sistema I.	53
Figura 33 – Pente óptico gerado pelo Sistema II.	54
Figura 34 – Pente óptico gerado pelo Sistema III.	54
Figura 35 – Diagrama do Sistema I no OptiSystem.	63
Figura 36 – Diagrama do Sistema II no OptiSystem,	64
Figura 37 – Diagrama do Sistema III no OptiSystem.	65
Figura 38 – QR <i>Code</i> para acesso ao tutorial OptiSystem.	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros usados na simulação numérica.	53
Tabela 2 – Resultados numéricos obtidos para os sistemas I, II e III.	55
Tabela 3 – Comparaçāo entre os sistemas geradores de subportadoras ópticas.	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>Dense Wavelength- Division Multiplexing</i>	DWDM
<i>Elastic Optical Networks</i>	EON
<i>Wavelength Division Multiplexing</i>	WDM
<i>Spectrum-Sliced Elastic Optical Path Network</i>	SLICE
<i>Optical Packet Switching</i>	OPS
<i>Optical Virtual Concatenation</i>	OVC
<i>Optical Frequency Comb Generation</i>	OFCG
<i>Radio Frequency</i>	RF
<i>Optical Frequency Comb</i>	OFC
<i>Optical Signal-to-Noise Ratio</i>	OSNR
<i>Free Spectral Range</i>	FSR
<i>Mode-Locked Laser</i>	MLL
<i>Step-Index Fibers</i>	SIF
<i>Graded-Index Fiber</i>	GIF
<i>Single Mode Fiber</i>	SMF
<i>Multi Mode Fiber</i>	MMF
<i>Light-Emitting Diodes</i>	LED
<i>Laser Diodo</i>	LD
<i>Optical-Electrical-Optical</i>	O-E-O
<i>Doped-Fiber Amplifiers</i>	DFA
<i>Semiconductor Optical Amplifiers</i>	SOA
<i>Raman Amplifiers</i>	RA
<i>Erbium-Doped Fiber Amplifiers</i>	EDFA
<i>Numerical Aperture</i>	NA
<i>Excited State Absorption</i>	ESA
<i>Amplified Spontaneous Emission</i>	ASE
<i>Noise Figure</i>	NF
<i>Signal-to-Noise Ratio</i>	SNR
<i>On-Off Keying</i>	OOK
<i>Electro-Optic Modulator</i>	EOM

<i>Electro-Absorption Modulator</i>	EAM
<i>Phase Modulator</i>	PM
<i>Intensity Modulator</i>	IM
<i>Mach-Zehnder Modulator</i>	MZM
<i>Continuous Wave</i>	CW
<i>Cross-Phase Modulation</i>	XPM
<i>Self-Phase Modulation</i>	SPM
<i>Four Wave Mixing</i>	FWM
<i>Highly Non-Linear Fibers</i>	HNLF
<i>Fiber Ring Cavities</i>	FRC
<i>Recirculating Frequency Shifting</i>	RFS
<i>Double Side Band</i>	DSB
<i>Single Side Band</i>	SSB
<i>Mach-Zehnder Interferometer</i>	MZI
<i>Optical Spectrum Analyzer</i>	OSA

LISTA DE SÍMBOLOS

n	índice de refração
λ	Comprimento de onda
ϕ	Angulo de incidência da luz
ϕ_c	Ângulo crítico
ΔT	Alargamento do pulso pela dispersão intermodal
Δ	Mudança fracionária de índice de refração na interface núcleo-casca
V	Frequência normalizada
a	Raio do núcleo
E	Estado de energia
G	Ganho
SNR_{IN}	Relação sinal ruído na entrada
SNR_{OUT}	Relação sinal ruído na saída
h	Constante de Planck
ν	Frequência do sinal
$\Delta\nu$	Largura de banda óptica
P_{ASE}	Média ASE
α	Fator de acoplamento
$\phi_1(t)$	Variação de fase na onda
$V_{RF}(t)$	Tensão aplicada ao eletrodo
V_π	Tensão necessária para criar um deslocamento de fase de π
d	Distância entre os eletrodos
r_{33}	Coeficiente eletro-óptico para uma mudança no índice de refração
E_{out}	Campo elétrico na saída
E_{in}	Campo elétrico na entrada
A	amplitude do sinal
ω_c	Frequência angular

W Comprimento do acoplador

β Constante de propagação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1	Introdução	20
2.2	Fibra ópticas	20
2.3	Transmissores ópticos	21
2.4	Amplificadores ópticos	22
2.4.1	<i>Amplificador de fibra dopada com erbium (EDFA)</i>	24
2.5	Acopladores ópticos	27
2.6	Moduladores ópticos	28
2.6.1	<i>Modulação direta</i>	29
2.6.2	<i>Modulação externa</i>	29
2.7	Ressonadores ópticos	32
3	SISTEMAS DE GERAÇÃO DE PENTE DE SUBPORTADORAS ÓPTICAS	34
3.1	Introdução	34
3.2	Pente de subportadoras ópticas	34
3.3	Parâmetros do pente de subportadoras ópticas	35
3.4	Técnicas de OFCG baseado em MZM's e HNLF	37
3.5	Técnicas de OFCG baseado em EOM's	40
3.6	Técnicas de OFCG baseado em ressonadores em anel	43
3.6.1	<i>Análise teórica da OFCG baseado em ressonadores em anel</i>	46
4	SISTEMAS GERADORES DE SUBPORTADORAS ÓPTICAS PROPOSTOS	50
4.1	Introdução	50
4.2	Sistemas propostos	50
4.3	Metodologia e resultados	52
4.4	Comparativo	55
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	58
	REFERÊNCIAS	59
	APÊNDICES	63

	APÊNDICE A-DIAGRAMA DOS SISTEMAS NO OPTISYSTEM	63
	APÊNDICE B-ARTIGOS PUBLICADOS	66
B.1	Artigo Publicado em Periódicos com Qualis A4 (Quadriênio 2017-2020) em Engenharias IV	66
B.2	Artigos Completos em Anais sem Qualis de Área (Nacionais)	66
	APÊNDICE C-ACESSO A VÍDEO TUTORIAL	67

1 INTRODUÇÃO

Devido a crescente expansão de redes ópticas DWDM (*Dense Wavelength-Division Multiplexing*), essas redes necessitam de sistemas mais robustos pra suprir essa demanda de banda larga maior, tanto no meio cooperativo quanto no público, devido ao aumento do uso de *smartphones* e serviços de multimídia. Nesse processo de crescimento, nem sempre os meios físicos podem ser mudados e é um desafio para os engenheiros e operadores dessas redes se adaptarem as infraestruturas já existentes (WINZER *et al.*, 2018). Nesse contexto, os parâmetros de flexibilidade, escalabilidade e eficiência são requisitos para redes ópticas futuras. Assim, as redes ópticas elásticas EON (*Elastic Optical Networks*) são um potencial candidato para isso, pois esse tipo de rede usa o espectro mais eficientemente do que redes baseadas em DWDM (CHATTERJEE *et al.*, 2015).

As redes WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) tem alocação fixa, ou seja, não podem rearranjar as bandas não ocupadas. Esse impedimento não acontece para redes EON, já que a alocação das portadoras são separadas apenas por uma banda segurança. Uma técnica usada para melhorar a banda efetiva é chamada de SLICE (*Spectrum-Sliced Elastic Optical Path Network*) (JINNO *et al.*, 2009) e outras várias abordagens tem sido apresentadas para transportar informação tanto em sub- e super-comprimento de onda. Dentre essas abordagens temos, por exemplo, OPS (*Optical Packet Switching*) (YOO, 2006) e OVC (*Optical Virtual Concatenation*) (TOMIZAWA *et al.*, 2005).

Existem vários subsistemas em uma rede EON. Dentre eles está o *transponder* flexível que tem como uma de suas funções alterar o número de subportadoras ópticas para diferentes capacidades (CHATTERJEE *et al.*, 2015). Outro subsistema de uma rede EON é o responsável pela geração de subportadoras ópticas. Com vários *lasers*, podemos gerar várias subportadoras. Porém, do ponto de vista econômico, esse arranjo não é viável pois precisaríamos de um laser para cada subportadora gerada. Além disso, esse tipo de solução não gera subportadoras igualmente espaçadas no domínio da frequência. Dessa forma, uma solução viável e eficiente para esse problema seria a geração de subportadoras através de técnicas de geração de pentes de subportadoras ópticas OFCG (*Optical Frequency Comb Generation*).

Existem várias técnicas de OFCG na literatura. As aplicações são variadas e vão desde comunicações ópticas até astronomia (STEINMETZ *et al.*, 2008), relógios ópticos (CHOU *et al.*, 2010), espectroscopia molecular (HOLZWARTH *et al.*, 2000), fotônica RF (*Radio Frequency*) (SUPRADEEPA *et al.*, 2012), por exemplo. Uma OFC (*Optical Frequency Comb*)

pode ser definida como uma série de picos (linhas ou raias) espectrais discretos espaçados igualmente (pente) (IMRAN *et al.*, 2018). Os parâmetros usados para se definir uma OFC vai depender do tipo de aplicação (TORRES-COMPANY; WEINER, 2014). Entre vários parâmetros, os usados nessa dissertação foram a planicidade espectral (*flatness*), relação sinal ruído óptico OSNR (*Optical Signal-to-Noise Ratio*), faixa espectral livre FSR (*Free Spectral Range*) e número de raias geradas.

Dentre as várias técnicas e configurações usadas, podemos gerar um pente de subportadoras ópticas usando laser de modo travado MLL (*Mode-Locked Laser*) (DIDDAMS, 2010). Através de efeitos não lineares os sistemas são capazes de gerar subportadoras (KAYES; ROCHETTE, 2017). Usando moduladores eletro-ópticos também se pode gerar subportadoras (HMOOD *et al.*, 2015; CHEN *et al.*, 2013; METCALF *et al.*, 2013; YAMAMOTO *et al.*, 2009; ZHANG *et al.*, 2012). Também podemos gerar uma OFC através de ressonadores ópticos sozinhos ou com moduladores eletro-ópticos em cascata no anel (HO; KAHN, 1993; BENNETT *et al.*, 1999; ZHANG *et al.*, 2011; COSTA; SILVA, 2018; SANTOS, 2019).

Essa dissertação apresenta três novos sistemas para geração de subportadoras ópticas baseado em ressonadores ópticos em paralelo acoplados a moduladores de fase em série com um amplificador óptico. Os resultados são obtidos através de uma simulação computacional usando o software *OptiSystem*.

Esse trabalho está dividido em cinco capítulos. O Capítulo 2 apresenta os conhecimentos básicos de cada componente do sistema responsável por gerar subportadoras ópticas. No Capítulo 3 se discute sobre definição de uma OFC e técnicas usadas para gerar as subportadoras ópticas. No Capítulo 4 são apresentados os três sistemas propostos, a metodologia usada e os resultados computacionais obtidos. Além disso, é feita uma comparação entre os sistemas propostos e alguns sistemas existentes na literatura. Finalmente, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões e trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

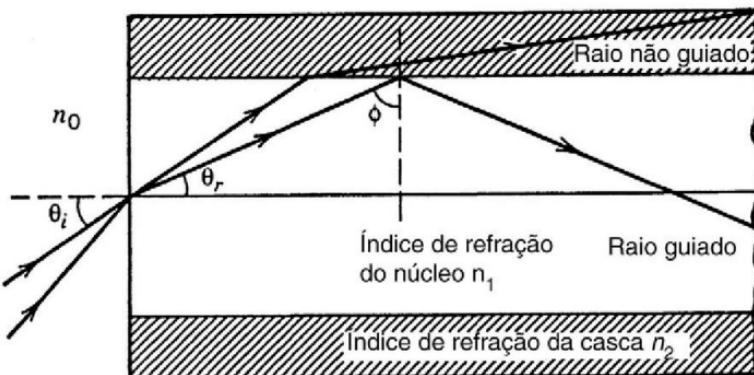
2.1 Introdução

Nesse capítulo são descritos os componentes usados nos sistemas propostos nessa dissertação. Uma breve discussão é feita sobre o fundamento e funcionamento de cada um deles. Começamos com fibras ópticas e transmissores ópticos. Depois abordamos sobre amplificadores ópticos, acopladores ópticos e moduladores, respectivamente.

2.2 Fibra ópticas

As fibras ópticas são feitas, geralmente, de sílica no núcleo com um índice de refração n_1 e envolvidas com uma casca com índice de refração n_2 de tal modo que, para que ocorra o fenômeno de reflexão interna total, responsável pelo guiamento da onda luminosa na fibra, o índice de refração do núcleo tem que ser maior do que na casca ($n_1 > n_2$). Podemos classificar as fibras como fibras de índice degrau SIF (*Step-Index Fibers*) ou como fibras de índice gradual GIF (*Graded-Index Fiber*). As SIF tem seu índice de refração constante no núcleo enquanto que as fibras GIF tem esse índice de refração decaendo quando vai se aproximando da casca. Fibras GIF conseguem se comunicar com taxa de bits bem maiores que fibras SIF. Podemos fazer uma análise geométrica aproximada quando o raio do núcleo a for muito maior que o comprimento de onda λ da onda luminosa. Do contrário, temos que usar a teoria de propagação de onda, como em fibras monomodo.

Figura 1 – Confinamento de luz através de reflexão interna total em fibras SIF.



Fonte: Adaptado de (AGRAWAL, 2002)

A Fig. 1 nos mostra que a refração só acontece com ângulos de incidência ϕ tal que $\sin \phi < n_2/n_1$. O ângulo crítico é o ângulo no qual, para todo raio incidente $\phi > \phi_c$, ele

permanecerá confinado dentro do núcleo da fibra havendo, assim, a reflexão interna total. Deste modo, definimos o angulo crítico como (AGRAWAL, 2002):

$$\sin \phi = \frac{n_2}{n_1}. \quad (2.1)$$

Fibras monomodo, SMF (*Single Mode Fiber*), tem o diâmetro do núcleo bem pequeno e só permitem um único modo de propagação (HE_{11}). Entretanto, fibras multimodo, MMF (*Multi Mode Fiber*), permitem vários modos se propagando. A quantidade de modos guiados aumenta com o aumento do angulo crítico na interface e, também, com menor valor de Δ ($\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$), porém nem todos os modos propagados na fibra são úteis para telecomunicações. Uma maneira de determinar os modos possíveis e úteis é dado pela frequência normalizada (JUSTINO-RIBEIRO, 1999):

$$v = \frac{2\pi a}{\lambda_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad (2.2)$$

ou seja, para determinar se uma fibra é SMF ou MMF devemos analisar parâmetros como comprimento do guia de onda, raio do núcleo, abertura numérica e índice de refração. A frequência normalizada reúne todos esses parâmetros. Por exemplo, para que uma fibra seja monomodo a seguinte condição deve ser satisfeita: $v < 2,405$.

2.3 Transmissores ópticos

Dentre algumas, há 2 tipos de fontes luminosas que são mais usadas em projetos de comunicação via fibra óptica: LED (*Light-Emitting Diodes*) e LD (*Laser Diodo*). Suas estruturas são feitas de uma heterojunção de materiais semicondutores, no qual eles tem intervalos de banda de energia diferentes (*bandgap*). A junção desses semicondutores é do tipo *pn* e é conhecida como região ativa ou de recombinação. Uma das principais importâncias desses dois tipos de dispositivos é que a potência óptica, na saída, pode ser modulada diretamente pela simples variação da corrente na entrada. Além disso, eles tem uma alta eficiência e seus tamanhos são adequados para com as fibras ópticas, entre outras aplicações.

A maior diferença entre esses dois tipos de fontes ópticas é que a saída óptica do LED ser incoerente, enquanto no LD é coerente, devido ao LED não possuir uma cavidade ressonante em sua estrutura (KEISER, 2010; KEISER, 2003). Nos sistemas apresentados nessa

dissertação foram usados fontes ópticas do tipo LD que tem a sua energia produzida através de uma cavidade ressonante. Como decorrência disso, a energia óptica que sai do LD tem uma coerência temporal e espacial, ou seja, sua energia é aproximadamente monocromática (o campo só existem em um único comprimento de onda) e o feixe de luz na saída da cavidade é bem estreito (direcional) (KEISER, 2010).

Na maioria dos casos, LEDs são usados em fibras multimodo pois é onde sua potência óptica incoerente pode ser acoplada de modo eficiente (KEISER, 2010). Já os LDs podem ter sua potência óptica coerente acoplada tanto em fibras monomodo quanto multimodo. As fontes do tipo LED são menos complexos do que os LD, no que diz respeito ao seu circuito de acionamento, porque esses circuitos não precisam de estabilização óptica ou térmica. Além disso, são menos caros para serem fabricados. Para eles serem usados em redes ópticas, sua estrutura deve seguir alguns parâmetros como: alta radiação na saída, alta eficiência quântica e um tempo de resposta de emissão rápido (KEISER, 2010).

Existem *lasers* de vários tamanhos e formatos e o meio usado pode ser líquido, gás ou um semicondutor, por exemplo. O diodo *lasers* emite luz através do processo de emissão estimulada, ou seja, é uma emissão de luz coerente. Seu feixe luminoso na saída é bem estreito comparado ao LED e isso permite uma alta eficiência de acoplagem para fibras monomodo e operar com altas taxas de bits (~ 10 Gb/s) (AGRAWAL, 2002).

O *laser* é um tipo de oscilador em frequência óptica que emprega algum tipo de realimentação positiva que serve para estabilizar sua operação. Isso é alcançado por meio de uma cavidade ressonante. Essas cavidades são, geralmente, fechadas por refletores ópticos nas duas extremidades fabricados com camadas de material dielétrico para, assim, alcançar a refletividade desejada. Um dos refletores tem uma reflexão parcial enquanto o outro tem a refletividade próxima de 100 %. Os outros lados da cavidade não são usados nesse processo de alimentação positiva e, geralmente, não são refletores. Esse tipo de cavidade é conhecida como cavidade de *Fabry-Perot* (AMAZONAS, 2005).

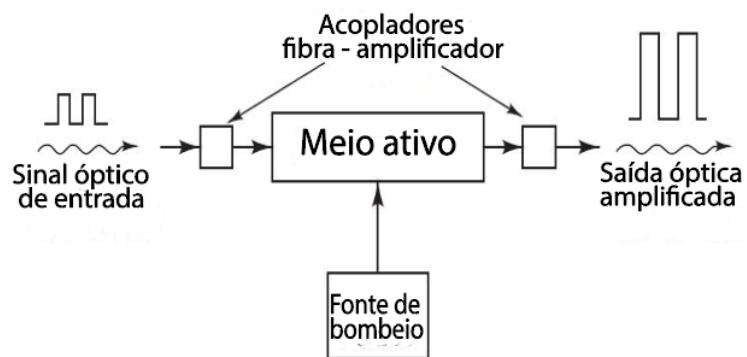
2.4 Amplificadores ópticos

Um dos principais limitantes, no que diz respeito a distância do enlace de fibras ópticas, são as perdas da potência do sinal óptico que podem ser através de mecanismos de absorção e espalhamento da própria fibra (ÇOKRAK; ALTUNCU, 2008). Dito isto, uma etapa importante, em sistemas de comunicação óptica, é a amplificação dos sinais. A amplificação

tradicional usa repetidores para amplificar o sinal. Esses repetidores, porém, amplificam o sinal no domínio elétrico, dessa maneira, o sinal óptico tem que sofrer uma conversão O-E-O (*Optical-Electrical-Optical*). Esse tipo de amplificação funciona bem em taxas de transmissão moderadas com uma única portadora. Quando usamos múltiplos comprimentos de onda, simultaneamente, há um problema de atraso nessa amplificação. A alternativa para esse problema seria fazer a amplificação diretamente no domínio óptico. Os amplificadores ópticos foram criados na década de 1980 mas só foram implementados comercialmente na década de 1990. Os mecanismos de amplificação óptica mais comuns são: amplificador de fibra dopada DFA (*Doped-Fiber Amplifiers*), amplificador óptico a semicondutor SOA (*Semiconductor Optical Amplifiers*) e amplificador de Raman RA (*Raman Amplifiers*). A amplificação do sinal aumenta o nível de energia da luz incidente de duas formas: processo de transferência de potência e emissão estimulada. O primeiro processo é usado em RAs, enquanto que o segundo processo é usado em SOAs e DFAs. Vamos focar nos amplificadores do tipo SOA e DFA, especialmente em DFAs, que são aplicados em sistemas propostos nessa dissertação.

Tanto SOA quanto DFA usam o método de criação de inversão de população para gerar a emissão espontânea. A fonte de bombeio fornece energia para o meio ativo semelhante ao diodo *laser*, exceto pelo fato de não ter um mecanismo de ressonância (*feedback*). Essa energia faz com que os elétrons ganhem energia fazendo com que haja uma inversão de população nessa área. O sinal de entrada "ativa" esses elétrons fazendo com que eles decaiam para um estado de energia mais baixo, desse modo, iniciando o processo de emissão espontânea. A emissão desse fóton, através do processo de emissão espontânea, é do mesmo nível de energia que os elétrons estão antes de decair para o estado fundamental fazendo, assim, a amplificação do sinal (KEISER, 2010; AGRAWAL, 2002). Esse método é mostrado na Fig. 2.

Figura 2 – Operação de um amplificador óptico genérico.



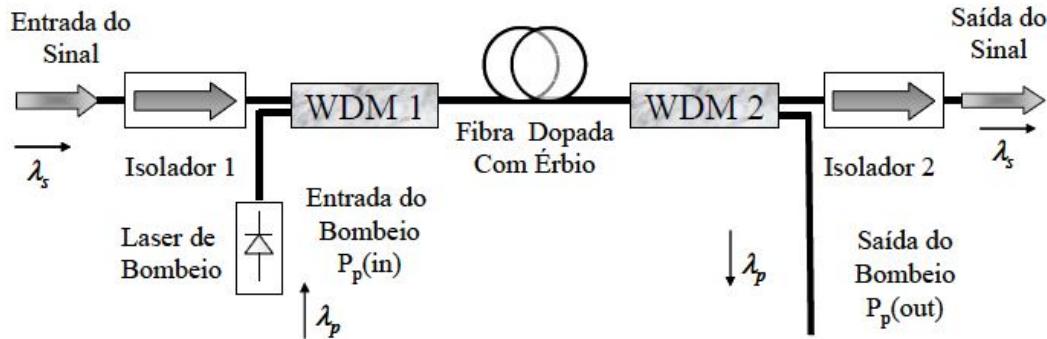
Fonte: Adaptado de (KEISER, 2010)

Os SOAs trabalham tanto na banda O (1310 nm), quanto na banda C (1550 nm). Em comparação com DFAs, os SOAs consomem menos energia, usam menos componentes e seu substrato é o mesmo usado em outros dispositivos ópticos. Já os DFAs trabalham em várias bandas dependendo do elemento usado na dopagem do material. Isso é uma característica atrativa pois se consegue fazer o bombeio em vários comprimentos de onda diferentes. Outra vantagem é a pequena perda de acoplamento. DFAs, também, são transparentes tanto para a taxa de bits e formato do sinal, ou seja, o ganho é constante para sinais modulados acima de alguns kiloHertz. Assim, o sinal não sofre *crosstalk* e distorção intermodular entre os diferentes canais, ou seja, a combinação dos sinais propagantes, na banda C (1530 nm \sim 1540 nm), quando são inseridos de modo simultâneo no amplificador (MILLO *et al.*, 2003).

2.4.1 *Amplificador de fibra dopada com erbium (EDFA)*

Quando a fibra de sílica é dopada com íons de *erbium* (Er^{3+}), ela pode operar em um alcance amplo na banda C (1550 nm). Nessa janela, a atenuação da fibra de sílica é mínima e é ideal para sistemas de comunicações ópticas operando nesses comprimentos de onda (KALER, 2011; ÇOKRAK; ALTUNCU, 2008). EDFA (*Erbium-Doped Fiber Amplifiers*)s são formados por acopladores ópticos conhecidos como WDM, que são responsáveis por combinar os sinais que entram na fibra (meio ativo), *lasers* de bombeio, isoladores ópticos unidirecionais e acopladores de polarização para combinarem as fontes de bombeio com o filtro óptico passa banda para reduzir o ruído fora da janela de amplificação (ÇOKRAK; ALTUNCU, 2008). O perfil de ganho depende de alguns fatores como abertura numérica NA (*Numerical Aperture*), perdas de acoplamento da fibra, concentração de érbio, índice de refração, etc (OLIVEIRA, 2004). Os comprimentos de onda mais efetivos para usarmos uma fonte de energia de bombeio são em 980 nm e 1480 nm. O bombeio em 1480 nm é menos afetado pela absorção de estado excitado ESA (*Excited State Absorption*), o que resulta em várias transições para níveis de energia superiores, o que afeta a absorção desse bombeio na fibra (BEBAWI *et al.*, 2018). Já o bombeio em 980 nm possui uma figura de ruído menor que em 1480 nm, portanto é usada, principalmente, em processos de pre amplificação. Existem 3 formas de fazer esse bombeio: bombeio direto (co-propagante), inverso e bi direcional. O bombeio direto tem uma figura de ruído menor do que o bombeio inverso (KEISER, 2010; DESURVIRE, 1994; ÇOKRAK; ALTUNCU, 2008) e por isso usamos nos sistemas propostos nessa dissertação, assim como o bombeio em 980 nm. A estrutura de um EDFA é mostrada na Fig. 3.

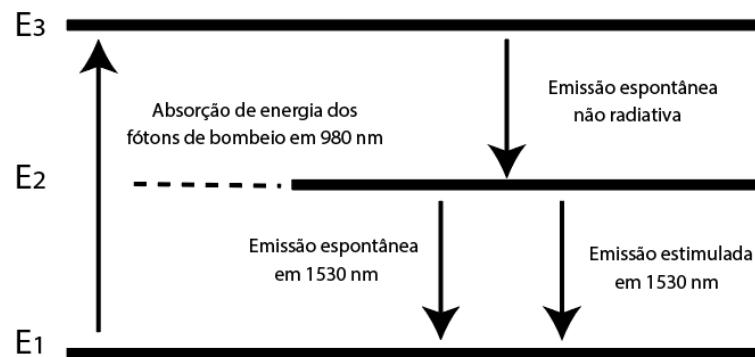
Figura 3 – Estrutura de EDFA com bombeio co-propagante.



Fonte: (MARTIN, 2007)

Para o bombeio em 1480 nm, o diagrama de níveis de energia se resume a dois níveis, já para o bombeio em 980 nm são três níveis de energia (ÇOKRAK; ALTUNCU, 2008). O esquema da Fig. 4 mostra os níveis de energia do íons de érbio dopado na fibra de sílica para o bombeio em 980 nm. Os níveis são conhecidos como estado fundamental, metaestável e estado de bombeio para o nível de energia mais alto. Quando a região ativa do EDFA recebe energia do bombeio, os átomos no estado de energia E_1 absorvem essa energia dos fótons de bombeio e passam para o nível E_3 de energia, assim, fazendo com que o sistema saia do equilíbrio. Porém, o sistema tende ao equilíbrio, assim, os átomos excitados voltam ao estado fundamental perdendo essa energia ganha. Todavia, ele não decai diretamente para E_1 . Ele decai, primeiro, para o nível metaestável E_2 em um processo de emissão espontânea não radiativa. Quando a população de portadores do nível E_2 supera o do nível E_1 ocorre a inversão de população. Já o decaimento dos portadores do estado de energia E_2 para E_1 é radiativa, ou seja, pode ocorrer perda energia através do processo de emissão estimulada ou espontânea na faixa de 1530 nm. Quando o sinal chega na entrada do amplificador, ele estimula a emissão de fótons coerentes, assim, fazendo a amplificação do sinal (MARTIN, 2007).

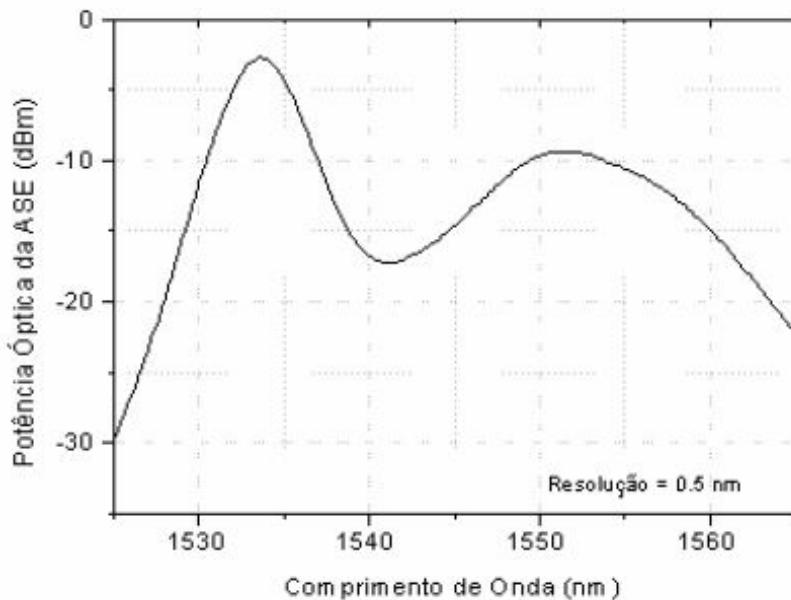
Figura 4 – Diagrama dos níveis de energia para EDFA com bombeio em 980 nm.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Algumas vezes, os portadores decaem espontaneamente para o estado fundamental emitindo fótons indesejados. Esses fótons podem provocar a emissão espontânea na fibra dopada e o aparecimento de outros fótons, dessa forma, a amplificação não acontece somente no sinal de entrada mas também ocorrem nesses fótons produzidos pela emissão espontânea. Esses fótons indesejáveis são conhecidos como emissão espontânea amplificada ASE (*Amplified Spontaneous Emission*) e são considerados ruído. ASE é a principal fonte de ruído para sistemas que usam EDFA. Vale ressaltar que, além da emissão, os íons de érbio podem absorver fótons do sinal. Dessa forma, a fibra dopada deve ter um comprimento satisfatório tal que o processo de absorção seja menor do que o processo de emissão. A Fig. 5 mostra que, o perfil da ASE em todos os comprimentos de onda contidos nessa janela que o EDFA é capaz de amplificar, é irregular para esses diferentes comprimentos de onda. Esse perfil pode ser tomado como perfil de ganho e, de certa forma, nos mostra que o ganho do EDFA é intrinsecamente ligado ao comprimento de onda do sinal de entrada. Uma maneira de mitigar essa irregularidade seria utilizar outros elementos dopantes além do érbio, como germânio e alumínio (OLIVEIRA, 2004).

Figura 5 – Perfil da ASE no espectro típico do EDFA.



Fonte: (OLIVEIRA, 2004)

O ganho do EDFA depende de alguns fatores citados como comprimento da fibra dopada, ganho do *laser* de bombeio, concentração dos elementos dopantes na fibra, potência do

sinal de entrada, etc. O ganho em dB é dado por (OLIVEIRA, 2004):

$$G(\text{dB}) = 10 \times \log\left(\frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}}\right), \quad (2.3)$$

onde P_{in} (mW) é a potência do sinal de entrada e P_{out} (mW) a potência na saída do EDFA. Outro fator importante a se considerar é a figura de ruído do amplificador óptico NF (*Noise Figure*). Ela é responsável por medir a degradação da SNR (*Signal-to-Noise Ratio*) de um sinal após passar pelo amplificador. Ela é definida pela razão entre a SNR na entrada do amplificador pela SNR na saída do amplificador (KEISER, 2003):

$$NF = F = \frac{SNR_{\text{IN}}}{SNR_{\text{OUT}}}. \quad (2.4)$$

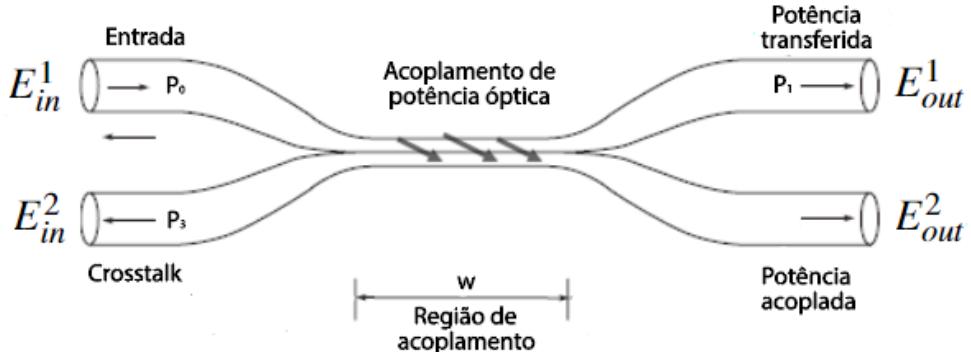
2.5 Acopladores ópticos

Uma das principais aplicações dos acopladores ópticos é dividir ou combinar sinais ópticos. Por exemplo, podemos arranjar o acoplador de certo modo que uma parte da potência óptica do sinal seja direcionado para monitoramento. Podemos usar acopladores nos processos de filtro, por exemplo, poderíamos fazer com que um sinal óptico na entrada se divida, de modo que quase toda potência óptica atuando em 1550 nm chegue em uma porta de saída e quase toda potência óptica atuando em 1310 nm chegue na outra porta de saída. Podemos dividir os acopladores em direcionais e em estrela. Os acopladores direcionais são os principais componentes usados na construção de dispositivos como interferômetros de Mach-Zehnder e ressonadores em anel.

Para um acoplador direcional 2×2 , como visto na Fig. 6, temos que uma fração α da potência na entrada P_0 chega na saída P_1 e a potência restante $1-\alpha$ chega na outra porta da saída P_2 . De modo análogo, a potência $1-\alpha$ da outra porta de entrada se divide e parte da potência chega a porta da saída P_1 e o restante na porta da saída P_2 . Para um acoplador que a potência da entrada é distribuída igualmente entre as duas saídas, o fator de acoplamento tem o valor de $\alpha = 0,5$ e é conhecido como acoplador 2×2 de 3 dB. Outro fator que pode aumentar ou diminuir a potência óptica pra cada saída é o comprimento W , visto na Fig. 6, ou a distância entre os núcleos das fibras (RAMASWAMI, 2010).

O fator de acoplamento α é função do comprimento do guia de onda, do índice de refração do núcleo, do substrato usado e da distância entre os guias de onda. Observando a Fig.

Figura 6 – Acoplador óptico direcional 2x2.



Fonte: Adaptado de (KEISER, 2003)

6, α é dado por (KEISER, 2003):

$$\alpha = \frac{P_2}{P_1 + P_2} \times 100\%. \quad (2.5)$$

Devemos observar que a eq. 2.5 é para uma situação ideal, ou seja, sem perdas. Na prática, uma fração da potência óptica é perdida quando atravessa o acoplador.

Quando dois guias de onda são idênticos, o sinal luminoso que atravessa o primeiro guia se acopla perfeitamente com o segundo guia de onda no acoplador. Logo após, o sinal luminoso volta para o primeiro guia de onda de forma periódica. A teoria dos modos acoplados nos mostra que os campos elétricos nas saídas do acoplador podem ser expressos através dos campos elétricos nas entradas da seguinte forma (RAMASWAMI, 2010):

$$\begin{pmatrix} E_{out}^1(f) \\ E_{out}^2(f) \end{pmatrix} = e^{-jw\beta} \begin{pmatrix} \cos(\alpha w) & j \sin(\alpha w) \\ j \sin(\alpha w) & \cos(\alpha w) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{in}^1(f) \\ E_{in}^2(f) \end{pmatrix}, \quad (2.6)$$

onde w é o comprimento do acoplador, β é a constante de propagação nos guias de onda usados no acoplador e α é o fator de acoplamento. Vale ressaltar que, para um acoplador direcional 2x2 de 3 dB, o argumento αw deve ser satisfeito de modo que $\alpha w = (2K + 1)\pi/4$ onde $K \geq 0$.

2.6 Moduladores ópticos

A modulação é o processo no qual adicionamos o sinal que contém a informação à onda luminosa (portadora óptica). Podemos ter modulação na frequência, na fase e na amplitude. Esse processo de modulação é dividido entre duas categorias: modulação direta e modulação

externa. A estrutura mais simples e usada nesses dois processos de modulação é a OOK (*On-Off Keying*). Basicamente, a OOK funciona com o processo de ligar e desligar a luz através de uma corrente elétrica, de tal maneira que o bit de informação assume valores de 1 ou 0.

2.6.1 Modulação direta

A modulação direta é bem mais simples e menos dispendiosa que a modulação externa, pois só precisa da própria luz gerada pelo *laser* ou LED. Na modulação direta, o processo acontece no próprio *laser* ou LED. Nem todos os *lasers* podem ser modulados diretamente. Essa é a grande vantagem dos *lasers* baseados em semicondutores. No processo de modulação, se assumir um limiar (*threshold*) tal que a potência óptica bem acima desse limiar indica o bit 1 e abaixo ou levemente acima desse limiar indica o bit 0, por exemplo.

O sinal luminoso, no final do processo de modulação direta, tem seu pulso alargado. Esse fenômeno, conhecido como *chirp*, acontece devido a variação da frequência da portadora com o tempo. Esse alargamento do pulso transmitido é uma desvantagem de utilizar a modulação direta. Uma técnica usada para diminuir o chirp é elevar a potência óptica para o bit 0 sempre acima do seu limiar, dessa maneira fazendo o *laser* atuar sempre acima do seu limiar. A desvantagem dessa técnica é que reduz a taxa de extinção (*extinction ratio*), que é a razão entre a potência óptica na saída para bits 1 e para bits 0. Essa redução degrada a performance do sistema (RAMASWAMI, 2010).

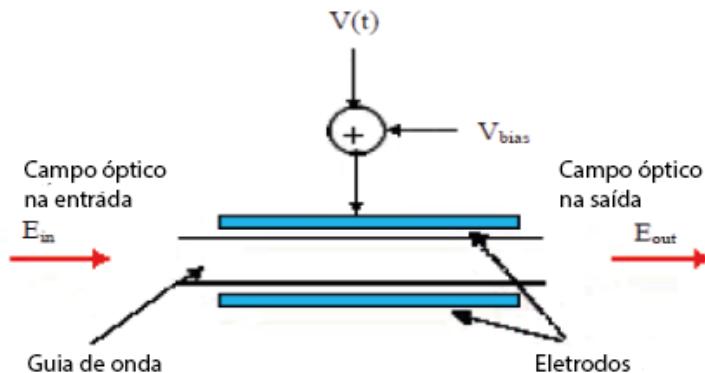
2.6.2 Modulação externa

Quando a modulação é externa, os *lasers* trabalham em regime estacionário pois a modulação acontece depois da saída do *laser*. Esse tipo de modulação tem melhor desempenho para larguras de banda maiores, mas tem complexidade e custos mais elevados. Existem dois tipos de moduladores externos: moduladores eletro-ópticos EOM (*Electro-Optic Modulator*) e moduladores de eletro absorção EAM (*Electro-Absorption Modulator*). O EAM se baseia em condutores de arsenato de gálio (GaAs) ou fosfeto de índio (InP), enquanto que o EOM se baseia em polímeros polarizados e cristais (LiNbO_3). É importante impedir que a potência óptica seja refletida de volta para a cavidade e essas reflexões são eliminadas pelas camadas dielétricas anti-refletoras nas portas do modulador. É interessante observar que, embora os moduladores eletro-ópticos possam atuar em uma grande faixa do espectro eletromagnético, as camadas anti-refletoras são diretamente dependente dos comprimentos de onda que atravessam o

modulador, assim, limitando sua faixa de funcionamento.

Componentes eletro-ópticos usam materiais em que a velocidade de propagação (e índice de refração) podem ser controlados através de um campo elétrico. Com esse tipo de aplicação, podemos construir um modulador de fase PM (*Phase Modulator*) e um modulador de intensidade IM (*Intensity Modulator*). O PM é construído acoplando o guia de onda em um material eletro-óptico como mostrado na Fig. 7. Geralmente, o material usado na construção é o Niobato de Lítio (LiNbO_3). Aplica-se uma tensão $V(t)$ em um dos eletrodos enquanto que o outro eletrodo é aterrado. Essa tensão aplicada gera um campo elétrico, que por sua vez, provoca alteração no índice de refração do guia (CHUANG, 1995; AMAZONAS, 2005; CARMO, 2017; KEISER, 2010).

Figura 7 – Modulador de fase eletro-óptico.



Fonte: Adaptado de (BINH, 2009)

A variação de fase (índice de modulação) na onda dada pelo dispositivo é (BINH, 2009):

$$\phi_1(t) = \pi \times \frac{V_{RF}(t)}{V_\pi}, \quad (2.7)$$

onde $V_{RF}(t)$ é a tensão aplicada ao eletrodo e V_π é a tensão necessária para criar um deslocamento de fase de π e é definida como (HO, 2005):

$$V_\pi = \frac{d\lambda_c}{n_r^3 r_{33} L}, \quad (2.8)$$

onde λ_c é o comprimento de onda da portadora, d é a distância entre os eletrodos e r_{33} é o coeficiente eletro-óptico para uma mudança no índice de refração n_r . O campo na saída E_{out} é

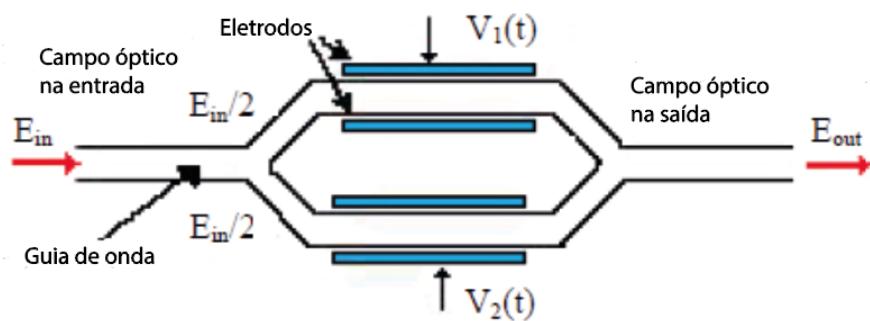
(BINH, 2009):

$$E_{out} = E_{in} e^{j\phi_1(t)}. \quad (2.9)$$

Podemos empregar os moduladores de fase de diversas formas. Uma delas é a que resulta em um modulador de intensidade. O princípio básico de operação de um modulador de intensidade é a interferência entre dois sinais luminosos. A estrutura mais simples é composta de dois moduladores de fase em paralelo baseado no interferômetro de Mach-Zehnder como mostra a Fig. 8. Esse tipo de arranjo também é conhecido como modulador de Mach-Zehnder MZM (*Mach-Zehnder Modulator*).

O sinal luminoso CW (*Continuous Wave*) E_{in} se divide em dois sinais de mesma potência no divisor de potência (*splitter*) de 3 dB e cada um percorre um caminho diferente. No guia de onda superior, uma tensão $V_1(t)$ é aplicada e o campo elétrico gerado muda a fase do sinal luminoso. No percurso inferior, a tensão $V_2(t)$ é aplicada e a modulação de fase acontece de forma análoga ao percurso superior. Após isso, os dois sinais são recombinados na saída de forma construtiva, produzindo um sinal luminoso correspondente ao bit 1. Ou são recombinados de forma destrutiva, com ausência do sinal luminoso na saída representando o bit 0 (CHUANG, 1995; CARMO, 2017; KEISER, 2010; BINH, 2009).

Figura 8 – Modulador de intensidade baseado no interferômetro de Mach-Zehnder.



Fonte: Adaptado de (BINH, 2009)

O sinal luminoso na entrada pode ser expresso por (AGRAWAL, 2002):

$$E_{in}(t) = A e^{-j\omega_c t}, \quad (2.10)$$

onde A é a amplitude do sinal e ω_c sua frequência angular. O sinal na saída então é dado por

(AGRAWAL, 2002):

$$E_{out}(t) = \frac{A}{2}e^{-j(\omega_c t + \phi_1)} + \frac{A}{2}e^{-j(\omega_c t + \phi_2)} = \frac{A}{2}e^{-j\omega_c t}e^{-j(\frac{\phi_1 + \phi_2}{2})}[e^{-j(\frac{\phi_1 - \phi_2}{2})} + e^{j(\frac{\phi_1 - \phi_2}{2})}], \quad (2.11)$$

onde ϕ_1 e ϕ_2 são as fases adicionadas no percurso superior e inferior, respectivamente. Fazendo algumas manipulações:

$$E_{out}(t) = \frac{A}{2}e^{-j\omega_c t}e^{-j(\frac{\phi_1 + \phi_2}{2})}[e^{-j(\frac{\phi_1 - \phi_2}{2})} + e^{j(\frac{\phi_1 - \phi_2}{2})}] = \frac{A}{2}e^{-j\omega_c t}e^{-j(\frac{\phi_1 + \phi_2}{2})}\cos\left(\frac{\phi_1 - \phi_2}{2}\right). \quad (2.12)$$

Podemos encontrar o campo E_{out} na saída do MZM em função do campo na entrada substituindo eq. 2.10 em eq. 2.12:

$$E_{out}(t) = \frac{E_{in}(t)}{2}e^{-j(\frac{\phi_1 + \phi_2}{2})}\cos\left(\frac{\phi_1 - \phi_2}{2}\right). \quad (2.13)$$

2.7 Ressonadores ópticos

Um ressonador óptico genérico é apresentado na Figura 9. As relações para entrada e saída, no estado estacionário, são dadas pelas equações abaixo (OKAMOTO, 2006):

$$A = (1 - \gamma)^{1/2}[A_0\cos(kl) - jB_0\sin(kl)], \quad (2.14)$$

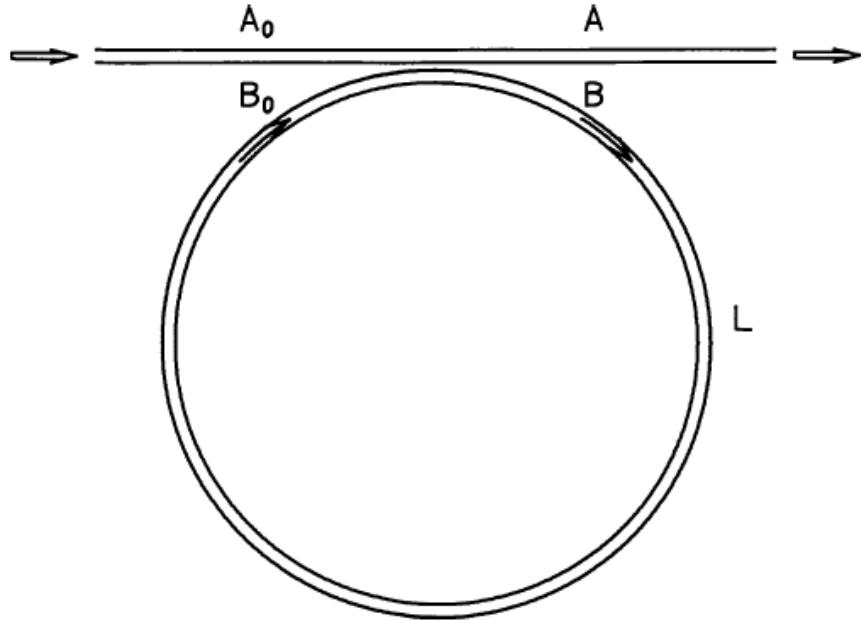
$$B = (1 - \gamma)^{1/2}[-jA_0\sin(kl) + B_0\cos(kl)], \quad (2.15)$$

onde k é o coeficiente de acoplamento dos modos do acoplador, l é o comprimento do acoplador e γ é o coeficiente de perdas de inserção. A Eq. 2.14 e a Eq. 2.15 assumem a mesma constante de propagação β .

Se representarmos B_0 em função do coeficiente de atenuação ρ , a expressão é dada por (OKAMOTO, 2006):

$$B_0 = B\exp\left(-\frac{\rho}{2}L - j\beta L\right). \quad (2.16)$$

Figura 9 – Ressonador óptico em anel.



Fonte: Adaptado de (OKAMOTO, 2006)

Fazendo uma manipulação algébrica usando as equações acima, encontramos a equação de transmitância do ressonador óptico em anel (OKAMOTO, 2006):

$$\frac{A}{A_0} = (1 - \gamma)^{1/2} \left(\frac{\cos(kl) - (1 - \gamma)^{1/2} \exp(-\frac{\rho}{2}L - j\beta L)}{1 - (1 - \gamma)^{1/2} \cos(kl) \exp(-\frac{\rho}{2}L - j\beta L)} \right). \quad (2.17)$$

3 SISTEMAS DE GERAÇÃO DE PENTE DE SUBPORTADORAS ÓPTICAS

3.1 Introdução

Existem várias técnicas para geração de subportadoras ópticas como *laser* de modo travado, MLL (*Mode-Locked Laser*) (DIDDAMS, 2010). Algumas delas tem aplicações diretas em comunicações ópticas como, por exemplo, baseadas em moduladores eletro-ópticos (EOM), nas não linearidades em guias de onda, LD's com ganho variável GSL (*Gain Switched Lasers*) (ROSADO *et al.*, 2018; ROSADO *et al.*, 2019) e ressonadores em anel (HO; KAHN, 1993; COPPIN; HODGKINSON, 1990; BENNETT *et al.*, 1999; ZHANG *et al.*, 2011; COSTA; SILVA, 2018; SANTOS, 2019). Nessa dissertação, vamos nos aprofundar apenas de moduladores EOM de fase e ressonadores em anel que fazem parte dos sistemas propostos. Na Seção 3.1 é feito uma breve descrição como é o formato de um pente óptico, na Seção 3.2 é descrito os parâmetros para se caracterizar uma OFC e nas seções seguintes são descritas múltiplas técnicas de OFCG.

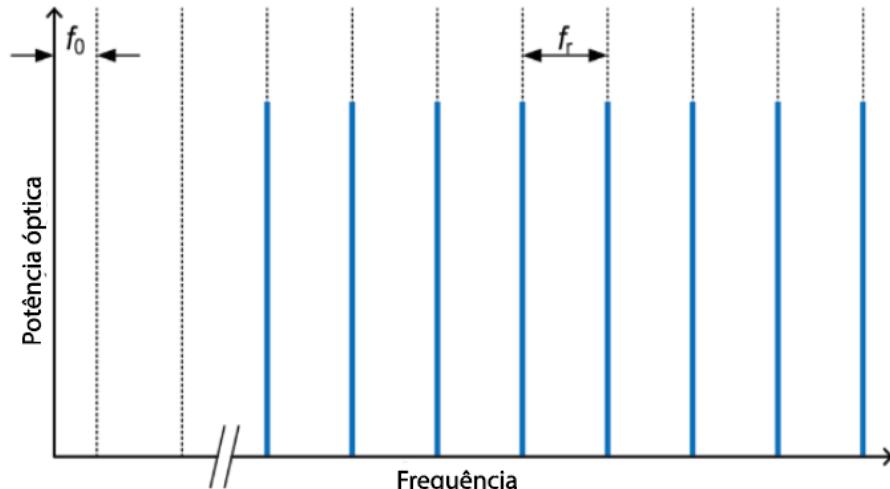
3.2 Pente de subportadoras ópticas

Com vários LDs se pode gerar várias subportadoras (raias ou picos) porém, do ponto de vista econômico, não é viável pois teríamos que ter um LD para cada raia gerada. Outro problema é o fato dos LDs não gerarem as raias igualmente espaçadas no domínio da frequência. Portanto, uma solução para geração de subportadoras de modo eficiente é através de técnicas de geração de pentes de subportadoras ópticas (OFCG).

Já existem pesquisas sobre pentes de subportadoras ópticas (OFC) desde a década de 1970. Hoje em dia, OFC's tem aplicações em várias áreas como em comunicações ópticas, relógios ópticos (CHOU *et al.*, 2010), astronomia (STEINMETZ *et al.*, 2008), espectroscopia molecular (HOLZWARTH *et al.*, 2000), fotônica RF (SUPRADEEPA *et al.*, 2012), etc. Podemos definir uma OFC como uma série de picos espectrais discretos espaçados igualmente como mostra a Fig. 10. Há vários parâmetros que podem ser usados para definir uma OFC, porém a escolha deles vai depender da aplicação (TORRES-COMPANY; WEINER, 2014). Dentre eles, temos: faixa espectral livre FSR (*Free Spectral Range*), planicidade espectral (*flatness*), ruído de fase, relação sinal ruído OSNR (*Optical Signal-to-Noise Ratio*), etc (IMRAN *et al.*, 2018; PFEIFLE, 2017).

Podemos encontrar todas as frequências das raias geradas f_m em função de dois

Figura 10 – Pente de frequências ópticas.



Fonte: Adaptado de (PFEIFLE, 2017)

parâmetros: a frequência FSR f_r e a frequência de *offset* f_0 . A relação entre esses parâmetros é dada por (PFEIFLE, 2017):

$$f_m = f_0 + mf_r, \quad (3.1)$$

onde m é um número inteiro. A frequência de *offset* f_0 faz as subportadas se deslocarem de zero a partir dela. A origem dela depende da técnica de OFCG usada de tal modo que, para OFC's geradas através de modulação em torno de uma frequência central f_c , que é a frequência da portadora, f_0 depende dessa frequência central. No caso dessa dissertação, $f_0 = f_c$.

3.3 Parâmetros do pente de subportadoras ópticas

Alguns parâmetros são usados para caracterizar uma OFC como dito no início desse capítulo. Para os sistemas apresentados nessa dissertação, os parâmetros usados são o *flatness*, a FSR e a OSNR. O *flatness* indica o quanto planas estão as raias geradas, ou seja, qual a diferença de potência óptica média entre o pico mais alto e o mais baixo. Podemos observar isso na Fig. 11, em verde. São tomadas 8 raias onde seu *flatness* é em torno de 3 dB. Se assumíssemos mais raias do pente, certamente o *flatness* aumentaria pois a diferença da potência óptica entre a raias mais alta e mais baixa é maior.

A faixa espectral livre (FSR) é mostrada na Fig. 11 em vermelho. Ela nos diz a distância entre duas subportadoras adjacentes. Para telecomunicações, a FSR varia entre 10 e 100 GHz ($\lambda = 30$ mm e $\lambda = 3$ mm, respectivamente). Para uma FSR muito pequena, é difícil

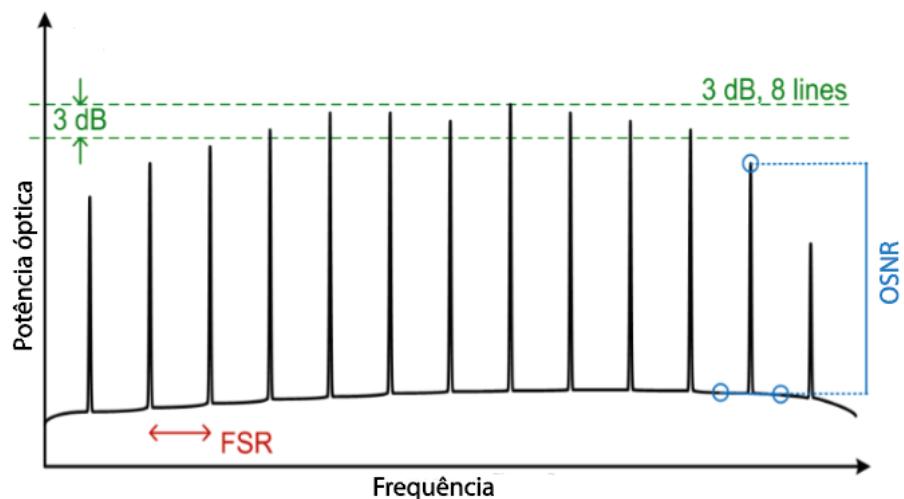
separar as raias individualmente para a modulação. Já para FSR grande, aquela vantagem de usar OFC ao invés de vários LD's diminui pelo fato que, somente usando uma taxa de símbolos muito grande teríamos uma alta eficiência espectral. É importante ter uma FSR sintonizável para ajudar na demodulação dos filtros passa-banda de tal modo que não se precise desenvolver vários pentes (PFEIFLE, 2017).

Quanto maior o *flatness* do pente óptico, mais existe diferença entre as potências P_m de cada raia. Isso não é adequado para uma OFC gerada para telecomunicações. Devido as perdas no percurso e a sensibilidade do receptor, uma potência alta em cada raia é necessária. Além disso, quanto menor a potência, mais amplificadores serão usados no sistema. Esses amplificadores degradam a OSNR através de uma grande inserção de ASE. A relação entre a potência de cada raia P_m e o ruído N_m é dado por:

$$OSNR = \frac{P_m}{N_m}, \quad (3.2)$$

onde m é o índice de cada subportadora. A potência P_m é medida em uma largura de banda maior que a largura de linha da portadora, enquanto que o ruído N_m é estimado por meio de uma interpolação entre a densidade espectral de potência do ruído no meio das subportadoras adjacentes (PFEIFLE, 2017) como mostra, em azul, a Fig. 11.

Figura 11 – Parâmetros de uma OFC.

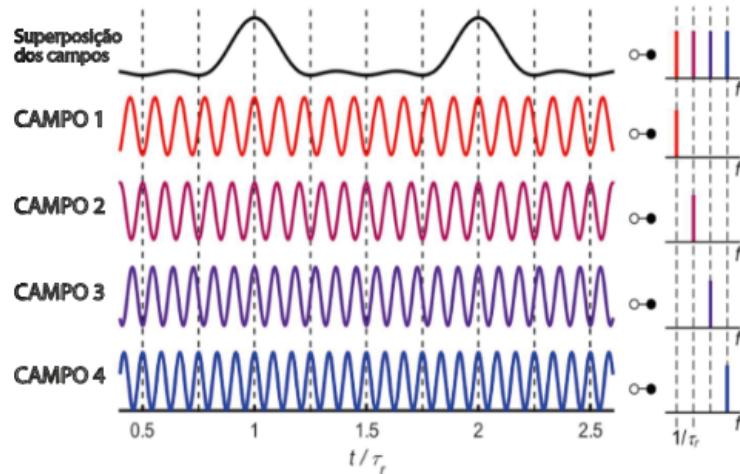


Fonte: Adaptado de (PFEIFLE, 2017)

3.4 Técnicas de OFCG baseado em MZM's e HNLF

A técnica MLL foi desenvolvida primeiramente para medições de frequências absolutas com alta precisão. A FSR desse tipo de arranjo é na ordem dos MHz (poucos MHz a 1 GHz) (WENG *et al.*, 2018) e tem uma potência óptica alta na saída. Basicamente, um MLL é um LD que emite vários modos longitudinais. Esse modos são travados de tal forma que a superposição dos campos com diferentes frequências equidistantes formam um trem de impulsos periódico no domínio do tempo (PFEIFLE, 2017; DIDDAMS, 2010). A Fig. 12 mostra, na esquerda, quatro modos longitudinais no domínio do tempo e na direita seu espectro formando um pente de subportadoras.

Figura 12 – Campos gerados pelo MLL no domínio do tempo e da frequência.



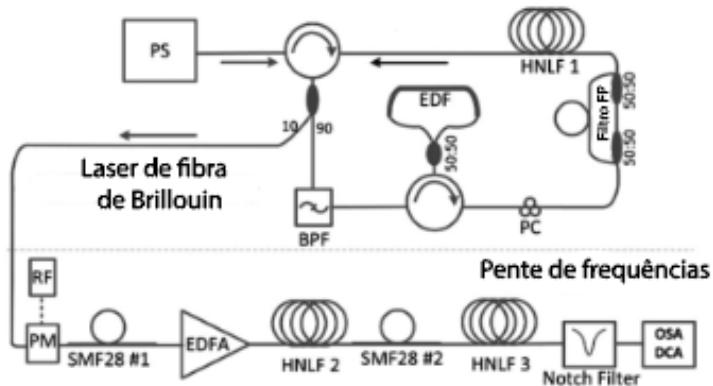
Fonte: Adaptado de (DIDDAMS, 2010)

Para obter esses travamentos dos modos podem ser usadas duas técnicas: modo travado passivo ou modo travado ativo. O ativo tem como base modular as perdas da cavidade na frequência que corresponde a FSR da cavidade, enquanto que a passiva as perdas das cavidades são moduladas pelo seu próprio pulso. Dessa maneira, as perdas que o pulso sofre são maiores nas laterais do que no pico (PFEIFLE, 2017).

Os efeitos não lineares também ajudam a produzir e alargar pentes ópticos como modulação cruzada de fase XPM (*Cross-Phase Modulation*), auto-modulação de fase SPM (*Self-Phase Modulation*) e mistura de quatro ondas FWM (*Four Wave Mixing*). Em SHARMA *et al.* 2021 (SHARMA *et al.*, 2021) conseguiu gerar 55 raias com *flatness* de 3 dB usando fibra altamente não-linear HNLF (*Highly Non-Linear Fibers*) e FWM. Já em KAYES; ROCHELLE *et al.* 2017 (KAYES; ROCHELLE, 2017) conseguiram gerar impressionantes 550 raias ultra

estreitas com largura de linha entre 1,5-3 kHz na banda C. Eles usaram um *laser* de Brillouin, modulador de fase, compressão de pulso e efeito não linear FWM através de HNLF. O aparato usado pode ser visto na Fig. 13.

Figura 13 – Sistema proposto por KAYES; ROCHELLE et al. 2017.



Fonte: Adaptado de (KAYES; ROCHELLE, 2017)

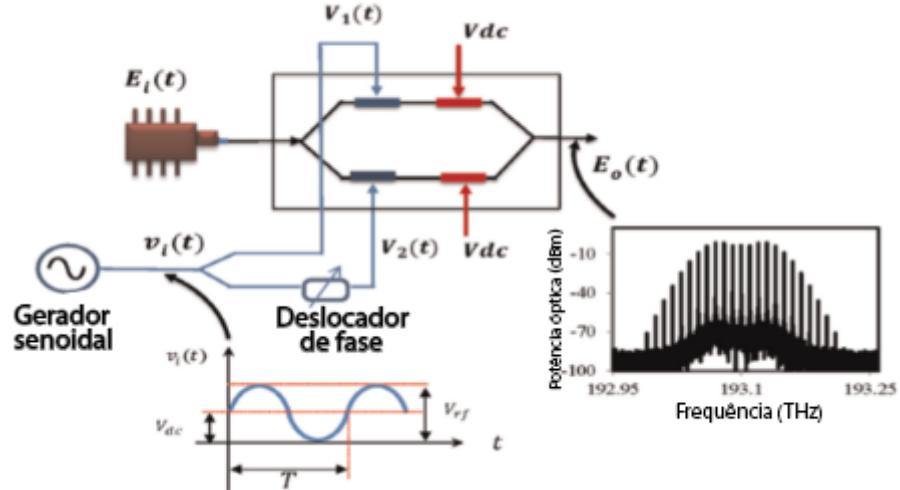
Também se pode gerar pentes ópticos usando moduladores de Mach-Zehnder MZM (*Mach-Zehnder Modulator*). A configuração é composta por dois moduladores de fase em paralelo resultando numa modulação de intensidade (IM) semelhante a Fig. 8. Os PM's sobre a estrutura podem ter um guiamento duplo (*dual drive MZM*) ou guiamento único (*single drive MZM*). Em HMOOD et al. 2015 (HMOOD et al., 2015) conseguiram gerar 51 raias usando dois MZM's em cascata como mostra a Fig. 14. O primeiro é guiado por um oscilador senoidal enquanto que o segundo é guiado por uma réplica atrasada dessa mesma onda senoidal. Além disso, a FSR é ajustável variando de 5 a 40 GHz.

Já ZHANG; WU et al. 2018 (ZHANG; WU, 2018) geraram 72 raias com *flatness* menor que 1 dB e FSR de 4 GHz usando 2 MZM's em paralelo alimentando 2 IM em série como pode ser visto na Fig. 15.

DAS et al. 2020 (DAS et al., 2020) conseguiu gerar 54 raias com *flatness* menor do que 1 dB e OSNR de 40 dB. O esquema usa um *laser* CW alimentando dois MZM's em série em paralelo com outro *laser* CW alimentando outros 2 MZM's como mostra a Fig. 16.

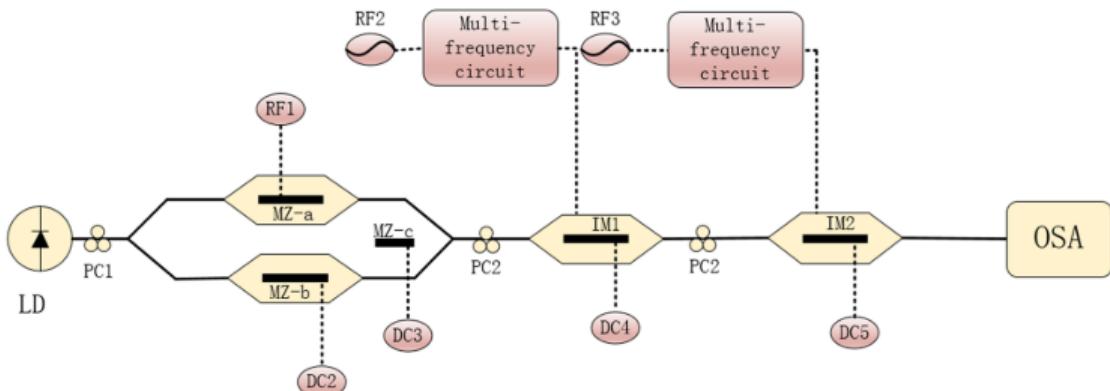
Recentemente, QIU et al. 2022 (QIU et al., 2022) conseguiu gerar, experimentalmente, 25 raias com *flatness* menor do que 1 dB. O sistema usado conta com um oscilador externo que funciona como sinal de referência para dois PLL's que, por sua vez, alimentam dois estágios em série de MZM's como mostrado na Fig. 17.

Figura 14 – Sistema proposto por HMOOD *et al.* 2015.



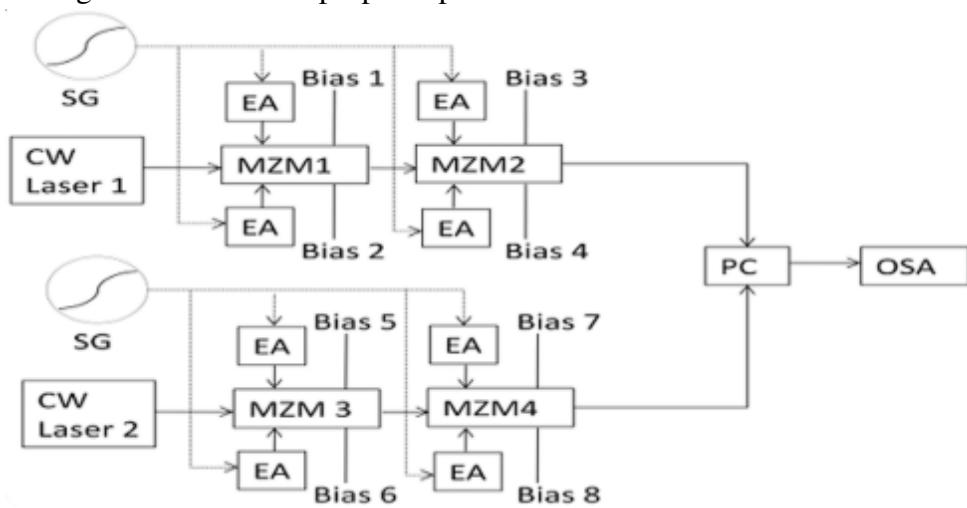
Fonte: Adaptado de (HMOOD *et al.*, 2015)

Figura 15 – Sistema proposto por ZHANG; WU *et al.* 2018.



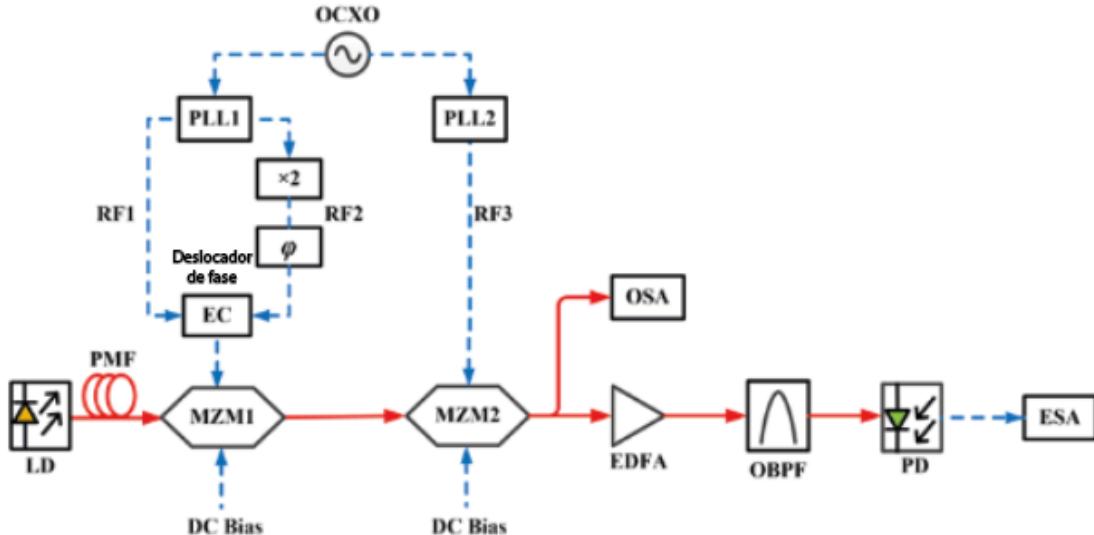
Fonte: (ZHANG; WU, 2018)

Figura 16 – Sistema proposto por DAS *et al.* 2020.



Fonte: (DAS *et al.*, 2020)

Figura 17 – Sistema proposto por QIU *et al.* 2022.

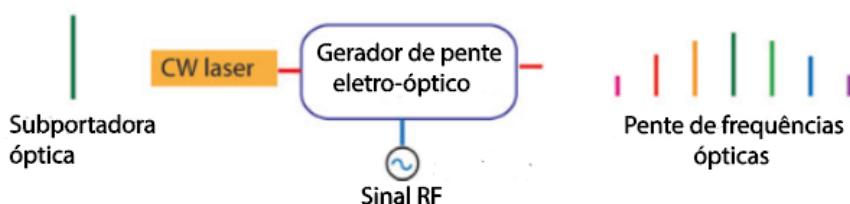


Fonte: Adaptado de (QIU *et al.*, 2022)

3.5 Técnicas de OFCG baseado em EOM's

A maioria das técnicas usadas para OFCG são baseadas em diferentes configurações de EOM's e o esquema básico é apresentado na Fig. 18. Eles são divididos em dois grupos: pentes gerados através de um ou vários moduladores em cascata ou pentes de cavidade acoplada. Como descrito na Seção 2.6.2, o sinal CW pode ser modulado tanto na fase, na intensidade, polarização ou uma combinação entre eles, porém PM's (moduladores de fase) se destacam por terem menor perda de inserção, tamanho menor e uma OSNR elevada em comparação aos outros.

Figura 18 – Esquema para OFCG usando EOM.



Fonte: Adaptado de (TORRES-COMPANY; WEINER, 2014)

Um dos parâmetros para definir uma OFC é o *flatness* do pente, mas não é tão simples para OFCG baseado em EOM por causa das não linearidades. Além disso, a distribuição da potência entre as raias não é uniforme. Isso acontece porque a intensidade de cada modo lateral criado pelo EOM é governado pelas funções de Bessel e são altamente dependentes da ordem das harmônicas (TORRES-COMPANY; WEINER, 2014).

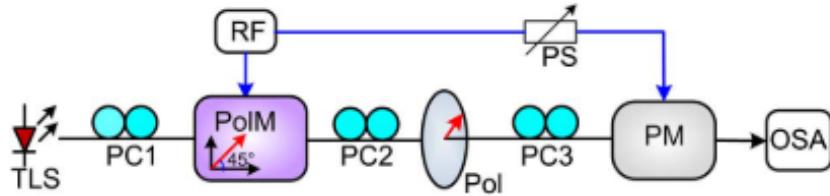
Nessa dissertação, o foco será para moduladores EOM de fase. O sinal RF, que guia o modulador, é responsável pela criação das raias nas bandas laterais do sinal da portadora. Geralmente esse sinal é senoidal mas também pode ser dente de serra (*saw wave*) (LOWERY, 2005) ou onda quadrada (*square wave*) (SHEN *et al.*, 2019). Podemos mudar a FSR entre as subportadoras apenas variando a frequência de operação do sinal RF que guia o modulador, porém ela é limitada pela largura de banda elétrica do modulador. Podemos, também, mudar de local, no espectro, toda a banda ocupada pelo pente apenas mudando a frequência da portadora gerada pelo LD. Outra vantagem de OFC gerada por PM's é um *flatness* bem pequeno e que a maioria das técnicas usadas podem ser adaptadas para fotônica integrada. Dessa forma, essa técnica para geração de subportadoras é bem flexível e, por isso, bastante interessante para redes elásticas EON. Algumas desvantagens como perda de inserção e desvio de polarização eram um problema para aplicações em telecomunicações, porém, com avanços no oscilador RF temos um baixo ruído nas altas frequências, além de um V_π pequeno (TORRES-COMPANY; WEINER, 2014).

O índice de modulação ϕ_1 define, de modo geral, a largura de banda do pente. Como vimos na eq. 2.7, o índice de modulação depende do V_π que, por sua vez, depende das propriedades do material e estrutura do modulador. Dessa forma, podemos maximizar o índice de modulação projetando moduladores com capacidade de lidar com alta potência do sinal RF e diminuindo o valor de V_π (IMRAN *et al.*, 2018). O número de raias geradas podem ser aumentados usando mais PM's em cascata ou criando ressonadores ópticos com PM no *loop*.

Em CHEN *et al.* 2013 (CHEN *et al.*, 2013) conseguiram gerar, experimentalmente, cerca de 19 raias com *flatness* de 2,1 dB usando um aparato bem simples como mostrado na Fig. 19. Eles usaram um modulador de polaridade na entrada cascataeado com um modulador de fase. Em METCALF *et al.* 2013 (METCALF *et al.*, 2013) conseguiram gerar entre 60 e 75 raias combinando um baixo V_π , sustentação de alta potência tanto do sinal RF, quanto o sinal óptico e baixas perdas de propagação. Além disso, ele é amplamente sintonizável. Esse tipo de OFC é adequada tanto para fotônica integrada quanto para comunicações ópticas. O aparato usado constitui de três PM's e um modulador de intensidade IM (*Intensity Modulator*) em cascata e o pente de frequências gerado por ele pode ser visto na Fig. 20.

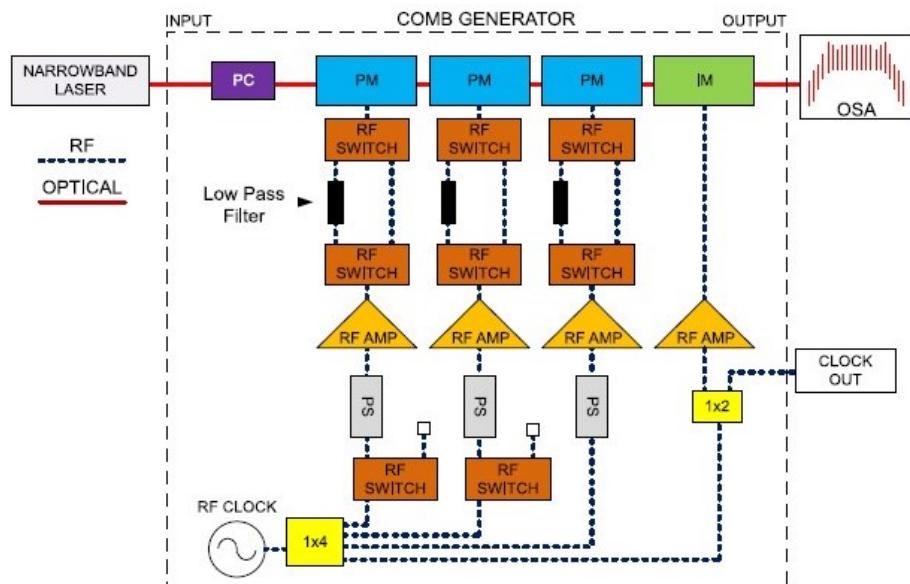
Em YAMAMOTO *et al.* 2009 (YAMAMOTO *et al.*, 2009) conseguiram gerar 61 raias espaçadas por 25 GHz. O sistema usa uma grade de Bragg como meio dispersivo ao invés de usar fibra dispersiva normal e dois moduladores cascataeados com índice de modulação de

Figura 19 – Sistema proposto por CHEN *et al.* 2013.



Fonte: Adaptado de (CHEN *et al.*, 2013)

Figura 20 – Pente de frequências gerado por METCALF *et al.* 2013.



Fonte: Adaptado de (METCALF *et al.*, 2013)

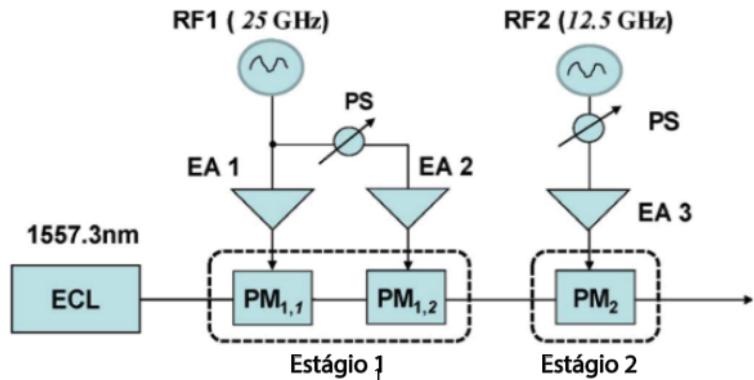
$\pi/4$ como mostra a Fig. 21. Já ZHANG *et al.* 2012 (ZHANG *et al.*, 2012) conseguiram gerar 53 subportadoras com FSR de 12,5 GHz e OSNR de 40 dB. O aparato usado é mostrado na Fig. 22 onde foram usados 2 estágios de moduladores de fase. O primeiro foi alimentado por um sinal RF senoidal de 25 GHz enquanto que o segundo estágio foi alimentado por 12,5 GHz.

Figura 21 – Sistema proposto por YAMAMOTO *et al.* 2009.



Fonte: Adaptado de (YAMAMOTO *et al.*, 2009)

Figura 22 – Sistema proposto por ZHANG *et al.* 2012.



Fonte: Adaptado de (ZHANG *et al.*, 2012)

3.6 Técnicas de OFCG baseado em ressonadores em anel

Ressonadores ópticos baseado em fibras tem o funcionamento semelhante aos ressonadores do *laser*, onde a principal diferença entre eles são os componentes dentro da cavidade ressonante e da geometria usada no meio ativo. Existem dois tipos de pentes gerados por cavidades acopladas (*Coupled Cavity Combs*). Moduladores de Fabry-Perot tem como princípio o uso de um PM dentro da cavidade, conduzido por uma frequência correspondente ao comprimento da cavidade. A FSR gerada é regularmente espaçada mas é limitada na precisão pois o comprimento do ressonador não é preciso (HO; KAHN, 1993). Esse tipo de geração de subportadoras não é adequado para comunicações ópticas, o que nos leva para o segundo tipo de pentes gerados por cavidades acopladas: cavidades de anel de fibra FRC (*Fiber Ring Cavities*) com moduladores eletro-ópticos. No caso dessa dissertação, o foco será para FRC contendo PM's. Usando esse tipo de técnica, podemos suprir a largura de banda limitada do uso apenas de PM's, assim, aumentando o número de raias geradas (IMRAN *et al.*, 2018).

A OFCG baseada em ressonadores ópticos consiste em o sinal luminoso fazendo sucessivas passagens pelo PM acoplado no anel (HO; KAHN, 1993). O sinal CW gerado pelo LD circula pelo *loop* e é modulado pelo PM. Dessa primeira circulação pelo *loop* são geradas bandas laterais formando um pente com algumas raias. Na recirculação pelo *loop*, as raias já criadas podem criar suas próprias bandas laterais. Dessa maneira, depois de várias passagens pelo PM, o pente de frequências se alarga. O estado estacionário da OFC é alcançado em menos de um microsegundo (SANTOS, 2019). Essas mudanças de frequências dada pela recirculação das bandas laterais pelo *loop* é uma técnica de OFCG conhecida como deslocamento de frequência por recirculação RFS (*Recirculating Frequency Shifting*). Para gerar o máximo de raias, a frequência de modulação do PM deve ser um harmônico da frequência de ida e volta

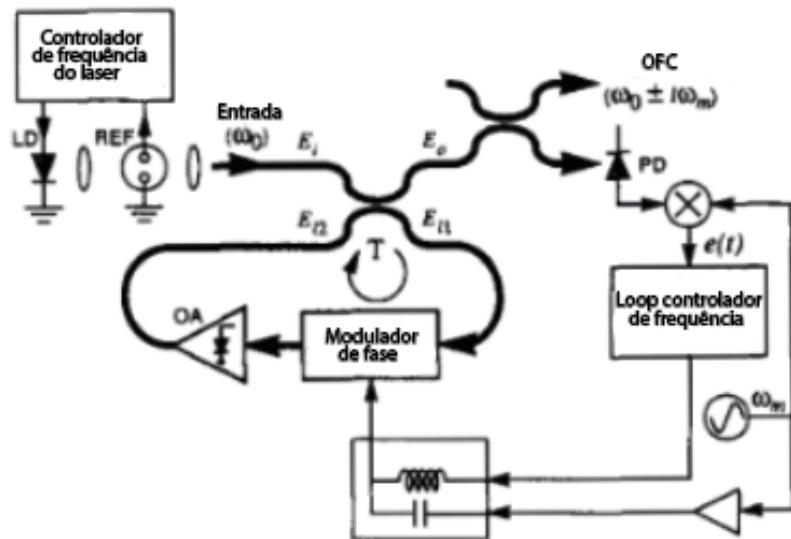
(*round-trip*) do *loop* (BENNETT *et al.*, 1999). O tempo de recirculação da onda dentro do *loop* está relacionada a RFS. A condição para um deslocamento de frequência de 2π depois de uma volta no *loop* é dada por (TER-MIKIRTYCHEV, 2019):

$$v = 1/T = M \frac{c_0}{nL}, \quad (3.3)$$

onde M é um número inteiro, c_0 é a velocidade da luz dentro do guia (fibra), n é o índice de refração da fibra e L o comprimento do *loop*.

O aparato básico para OFCG é dado pelo LD, com largura de linha estreita, alimentando o *loop* composto por um acoplador de 3 dB, um amplificador óptico, um filtro passa banda e um controle de polarização como mostra a Fig. 23. Esse tipo de esquema pode ser dividido em duas categorias principais: deslocamento de frequência de banda lateral dupla DSB (*Double Side Band*) e deslocamento de frequência em banda lateral única SSB (*Single Side Band*) (TIAN *et al.*, 2011).

Figura 23 – Esquema para OFCG usando ressonador óptico.



Fonte: (HO; KAHN, 1993)

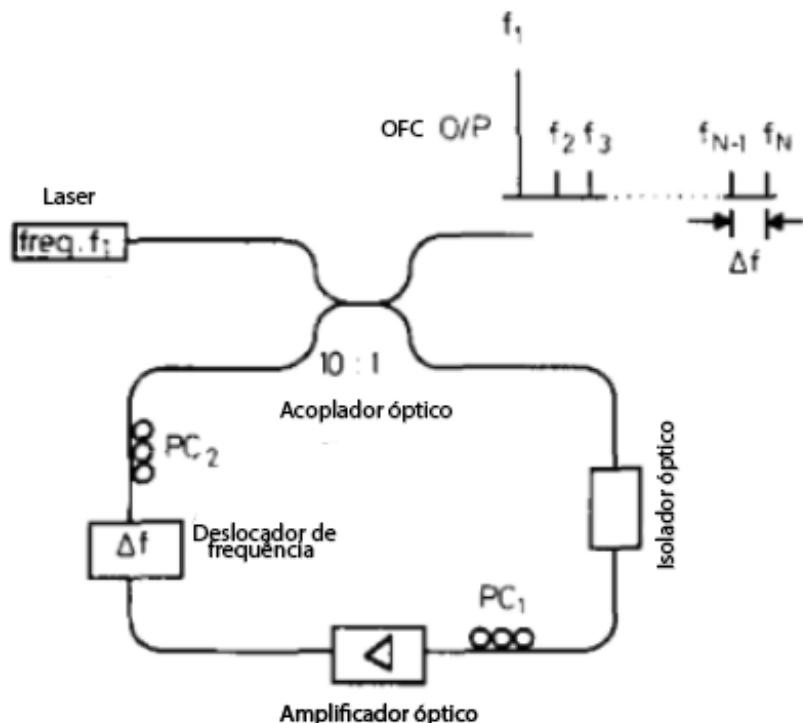
O número de raias aumenta com o uso do anel de fibra contendo um PM agindo como um ressonador através das sucessivas passagens do sinal luminoso pelo modulador. Mais moduladores em cascata podem aumentar a largura do pente. Em HO; KAHN *et al.* 1993 (HO; KAHN, 1993), onde nos baseamos para desenvolver nossos sistemas, propuseram esse esquema de geração de subportadoras baseado em RFS de banda lateral dupla, como visto na Fig. 23.

Esse tipo de esquema usa, geralmente, moduladores de fase dentro do anel de fibra. Ele gera o pente de subportadoras através do deslocamento de frequência do sinal CW do *laser* para banda lateral superior, quanto da banda lateral inferior. Outra característica desse tipo de esquema é a largura de banda ocupada pela OFC pode ser limitado tanto pela dispersão quanto por descasamento de fases (SHEN *et al.*, 2007). Essa limitação não é afetada pelo sinal senoidal aplicado no PM, ou seja, se aumentarmos a FSR entre as raias através do aumento da frequência do sinal senoidal que alimenta o PM, não teríamos o pente mais largo. Pelo contrário, perderíamos algumas raias geradas.

O EDFA no anel serve para compensar as perdas de potência do sinal por cada volta completa que ele faz no anel pois é um fator limitante (COPPIN; HODGKINSON, 1990). Porém, outro fator limitante no número de raias geradas pela técnica de RFS é dada pelo acúmulo de ruído gerado pelo amplificador. O *flatness* nesse tipo de técnica é pior, comparado a sistemas baseados em SSB. Isso acontece pela queda da amplitude das raias em cada volta que o pente faz no anel (IMRAN *et al.*, 2018).

Usando apenas o ressonador em anel, COPPIN; HODGKINSON *et al.* 1990 (COPPIN; HODGKINSON, 1990) conseguiram gerar pentes de frequência óptica pela primeira vez. Foram gerados pelo menos 25 raias e o aparado usado é apresentado na Fig. 24.

Figura 24 – Sistema proposto por COPPIN; HODGKINSON 1990.

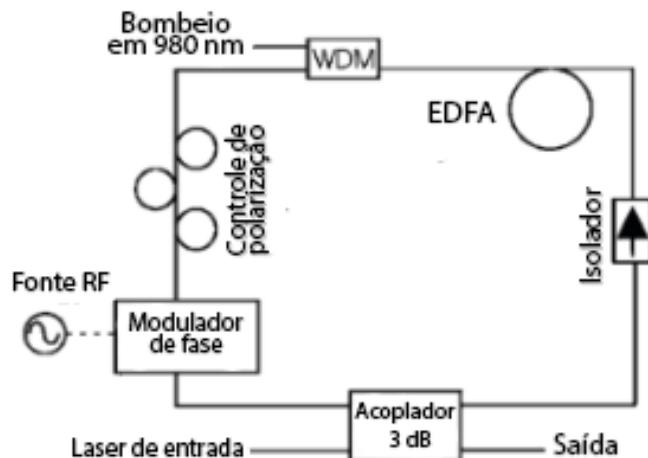


Fonte: Adaptado de (COPPIN; HODGKINSON, 1990)

Em BENNETT *et al.* 1999 (BENNETT *et al.*, 1999), conseguiram gerar 103 raias espaçadas por 18 GHz centradas em 1529 nm, com OSNR de 40 dB usando um ressonador contendo um PM que pode ser visto na Fig. 25. Já em ZHANG *et al.* 2011 (ZHANG *et al.*, 2011), conseguiram gerar 178 raias usando RFS com dois ressonadores com um PM em cada laço como pode ser visto na Fig. 26. A FSR entre cada raia é de 26 GHz com *flatness* menor que 3 dB e OSNR em torno de 20 dB.

Além das técnicas já citadas, também podemos gerar subportadoras ópticas usando ressonadores com MZM acoplado ou baseados em MZI (*Mach-Zehnder Interferometer*). Em COSTA; SILVA *et al.* 2018 (COSTA; SILVA, 2018), conseguiram gerar entre 61 raias com FSR de 10 GHz, *flatness* de 12 dB e OSNR de 30 dB. Esse sistema baseado em MZI e PM é mostrado na Fig. 27. Já em SANTOS *et al.* 2019 (SANTOS, 2019) conseguiu gerar, experimentalmente, cerca de 30 raias com FSR de 20 GHz usando ressonador em anel operando com um MZM e amplificado por SOA. O aparato usado pode ser visto na Fig. 28.

Figura 25 – Sistema proposto por BENNETT *et al.* 1999.

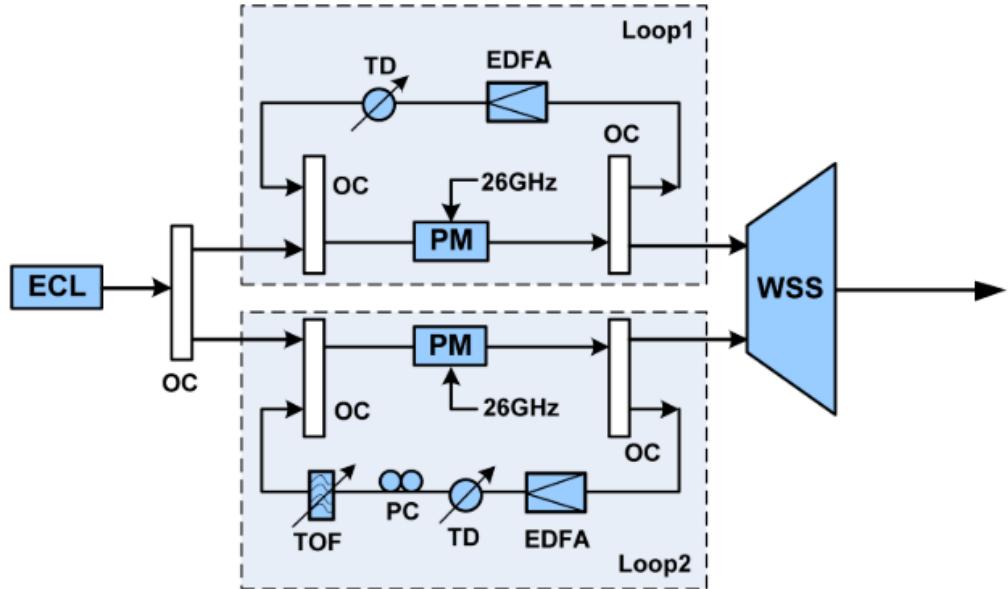


Fonte: Adaptado de (BENNETT *et al.*, 1999)

3.6.1 Análise teórica da OFCG baseado em ressonadores em anel

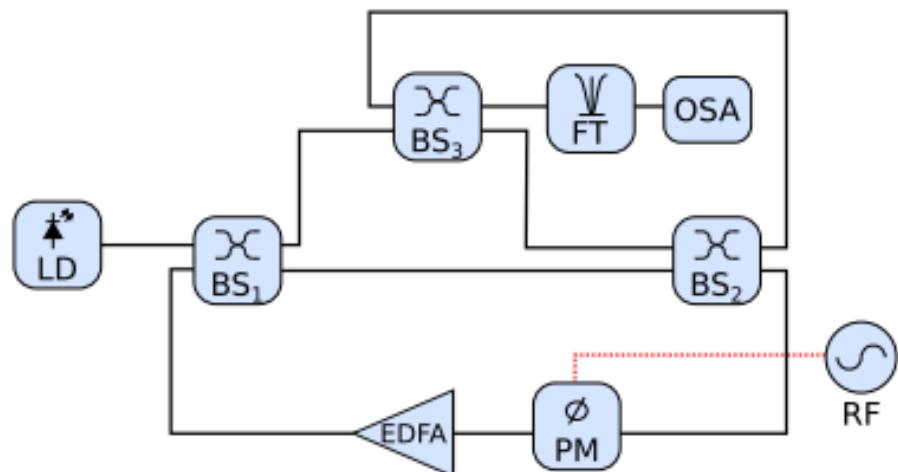
Para ressonadores em anel, o casamento dos modos é necessário tanto para ter menos perdas de potência, quanto estabilidade. Devemos observar que o atraso T , devido a volta no *loop*, deve satisfazer duas condições para ter uma máxima eficiência. As condições dizem respeito a

Figura 26 – Sistema proposto por ZHANG *et al.* 2011.



Fonte: Adaptado de (ZHANG *et al.*, 2011)

Figura 27 – Sistema proposto por COSTA; SILVA 2018.



Fonte: (COSTA; SILVA, 2018)

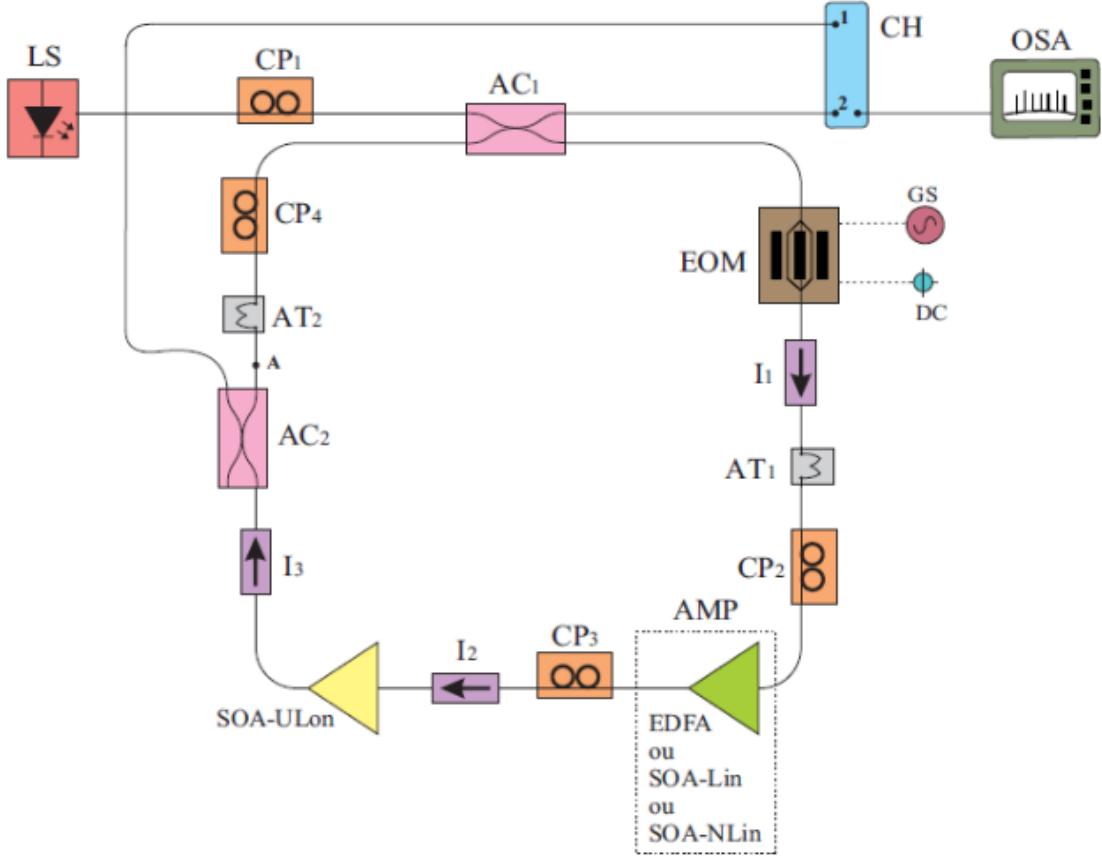
frequência de modulação e a frequência do *laser*. A primeira é dada por (HO; KAHN, 1993):

$$\omega_m T = 2p\pi, \quad (3.4)$$

onde ω_m é a frequência angular de modulação e p é um número inteiro. Desse modo, a frequência de ressonância deve ser uma sub-harmônica inteira da frequência de modulação. A segunda condição é dada por (HO; KAHN, 1993):

$$\omega_C T = 2q\pi, \quad (3.5)$$

Figura 28 – Sistema proposto por SANTOS 2019.



Fonte: (SANTOS, 2019)

onde ω_C é a frequência angular relacionada a frequência da portadora (LD) e q é um número inteiro. Aqui, a frequência de ressonância deve ser uma sub-harmônica inteira da frequência da portadora.

Observando a Fig. 23 podemos descrever o campo elétrico na entrada como $E_I(t) = E_I e^{-j\omega_C t}$. Assim a saída no braço superior do acoplador, em um instante t , é dada por (HO; KAHN, 1993):

$$E_O(t) = \sqrt{1 - \gamma} \left(\sqrt{1 - K} E_I(t) + \sqrt{k} E_{l2}(t) e^{-j\pi/2} \right), \quad (3.6)$$

onde K é o fator de acoplamento do acoplador e γ é o coeficiente de perdas do acoplador. O campo elétrico nas outras duas portas do acoplador são dadas por (HO; KAHN, 1993):

$$E_{l1}(t) = \sqrt{1 - \gamma} \left(\sqrt{K} E_I(t) e^{-j\pi/2} + \sqrt{1 - k} E_{l2}(t) \right), \quad (3.7)$$

$$E_{l2}(t) = \sqrt{\alpha} e^{-j\phi_1 \sin(\omega_m t)} E_{l1}(t - T), \quad (3.8)$$

onde ϕ_1 é o deslocamento de fase dado pelo modulador e α é o coeficiente de potência de transmissão. Depois de algumas manipulações algébricas podemos achar o campo na saída do acoplador depois de N (tendendo ao infinito) voltas pelo *loop* (HO; KAHN, 1993):

$$E_O(t) = \sqrt{(1-\gamma)(1-K)} E_I(t) - \sqrt{(1-\gamma)K} \frac{\rho e^{-j\beta \sin(\omega_m t)}}{1 - \rho e^{-j\beta \sin(\omega_m t)}} E_I(t), \quad (3.9)$$

onde $\rho = r e^{j\omega_C T}$ e o ganho total de uma volta no *loop* $r = \sqrt{\alpha(1-\gamma)(1-K)}$.

4 SISTEMAS GERADORES DE SUBPORTADORAS ÓPTICAS PROPOSTOS

4.1 Introdução

Nesse trabalho, apresentamos três sistemas para geração de subportadoras ópticas baseados em resonadores em anel em paralelo com modulação de fase. Os sistemas propostos se baseiam no sistema gerador de harmônicas de um sinal RF senoidal proposto por (OLIVEIRA *et al.*, 2015) que são constituídos de *loops* usando acopladores ópticos balanceados cascataeados em paralelo e moduladores de fase. O funcionamento dos sistemas é baseado em resonadores em anel com modulação de fase similar ao sistema proposto por (HO; KAHN, 1993), que pode ser visto na Fig. 23. Sistemas usando resonadores em série baseados em moduladores de fase são demonstrados em (NOGUEIRA *et al.*, 2021).

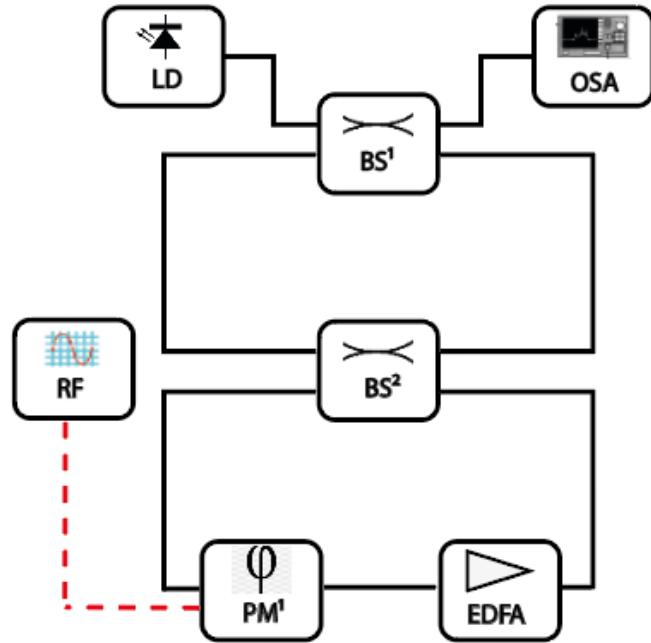
4.2 Sistemas propostos

O Sistema I é apresentado na Fig. 29. O LD é ligado diretamente em uma das portas de entrada do primeiro acoplador (BS^1). Devido BS^1 e BS^2 serem acopladores balanceados, o sinal luminoso é dividido em dois sinais com a mesma potência óptica. Metade da potência desse sinal passa pelo analisador de espectro óptico OSA (*Optical Spectrum Analyzer*) para visualização das subportadoras geradas pelo sistema, enquanto que a metade restante entra no primeiro *loop*. As portas restantes são conectadas ao segundo acoplador (BS^2) que por sua vez tem as portas restantes interconectadas através de um modulador de fase PM^1 em série com um EDFA. O PM é guiado por um gerador de sinal RF senoidal. Cada interconexão entre o BS^1 e o BS^2 acontece por meio de uma fibra monomodo de 20 cm com perdas de 0,2 dB/km e o *loop* envolvendo BS^2 -PM-EDFA tem o comprimento total de 40 cm. Dessa maneira, o sinal gerado pelo LD seguirá o sentido horário no primeiro *loop*, enquanto percorre o sentido anti horário no segundo *loop*. Nesse percurso o sinal sofre múltiplas modulações, amplificação e interferência antes de ser detectado pelo OSA.

O Sistema II é apresentado na Fig. 30. Esse sistema é semelhante ao Sistema I e difere apenas pela posição do EDFA. O amplificador óptico foi transferido para o primeiro *loop*. As interconexões entre os acopladores são feitas de fibra monomodo com mesmos valores do Sistema I. Além disso, o sinal se propaga pela direção análoga ao primeiro sistema.

O Sistema III difere do Sistema II por uma adição de um modulador de fase no

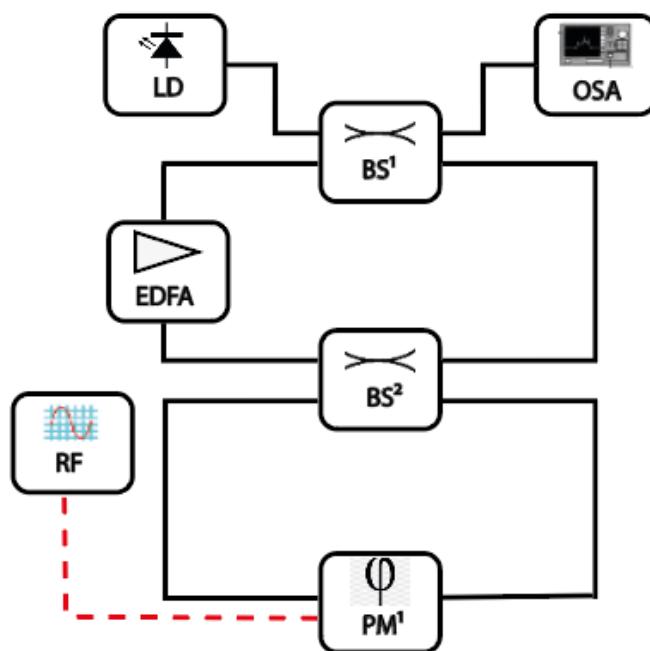
Figura 29 – Primeiro sistema proposto (Sistema I) para geração de subportadoras ópticas.



Fonte: Criado pelo Autor.

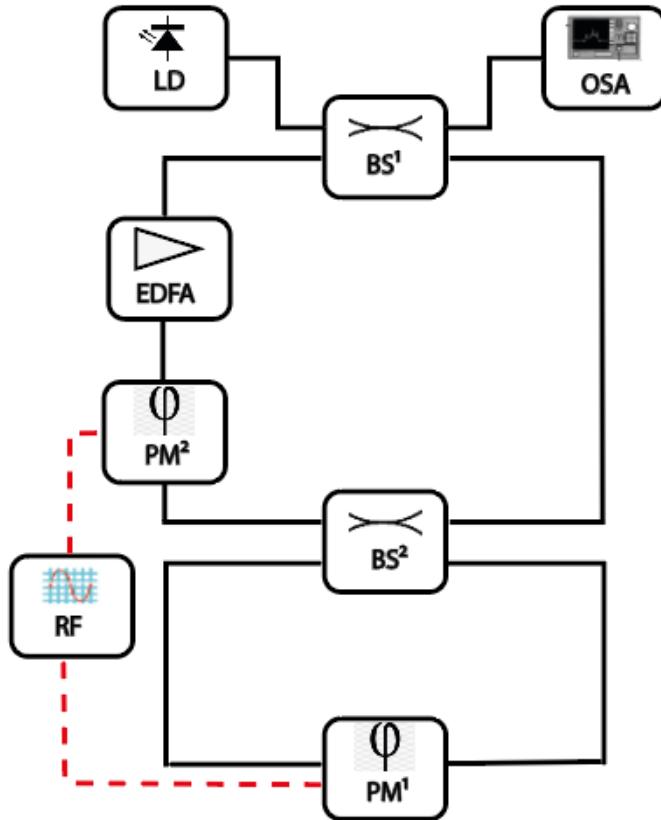
primeiro *loop* antes do EDFA como mostra a Fig. 31. Os dois moduladores de fase (PM^1 & PM^2) desse sistema são guiados pelo mesmo gerador de sinal RF. As interconexões entre os componentes e a direção de propagação do sinal luminoso é análogo aos outros dois sistemas.

Figura 30 – Segundo sistema proposto (Sistema II) para geração de subportadoras ópticas.



Fonte: Criado pelo Autor.

Figura 31 – Terceiro sistema proposto (Sistema III) para geração de subportadoras ópticas.



Fonte: Criado pelo Autor.

4.3 Metodologia e resultados

Os três sistemas propostos foram simulados numericamente usando o software *OptiSystem*. Os três sistemas são apresentados na interface do *OptiSystem* no apêndice A. No apêndice C está disponível um *QRcode* e um *link* para acesso a um vídeo tutorial sobre como simular os sistemas propostos nessa dissertação no *OptiSystem*. Para cada sistema foram realizadas 700 iterações e capturada as últimas 300 amostras, no OSA, do nível de potência (dBm) do sinal em função do comprimento de onda (nm).

Na Tabela 1 podemos ver os parâmetros usados para cada sistema com mais detalhes. Para o Sistema I foi usado um EDFA com potência de bombeio direta de 15 mW e comprimento de 3 metros. Já para os Sistemas II e III foram usados 20 mW de potência de bombeio e 3 metros de comprimento. O sinal RF gerado para guiar o PM tem a frequência de 10 GHz, os acopladores usados são de 3 dB e o LD tem a potência de 0 dBm atuando em 193,1 THz com largura de linha de 100 KHz para os 3 sistemas propostos.

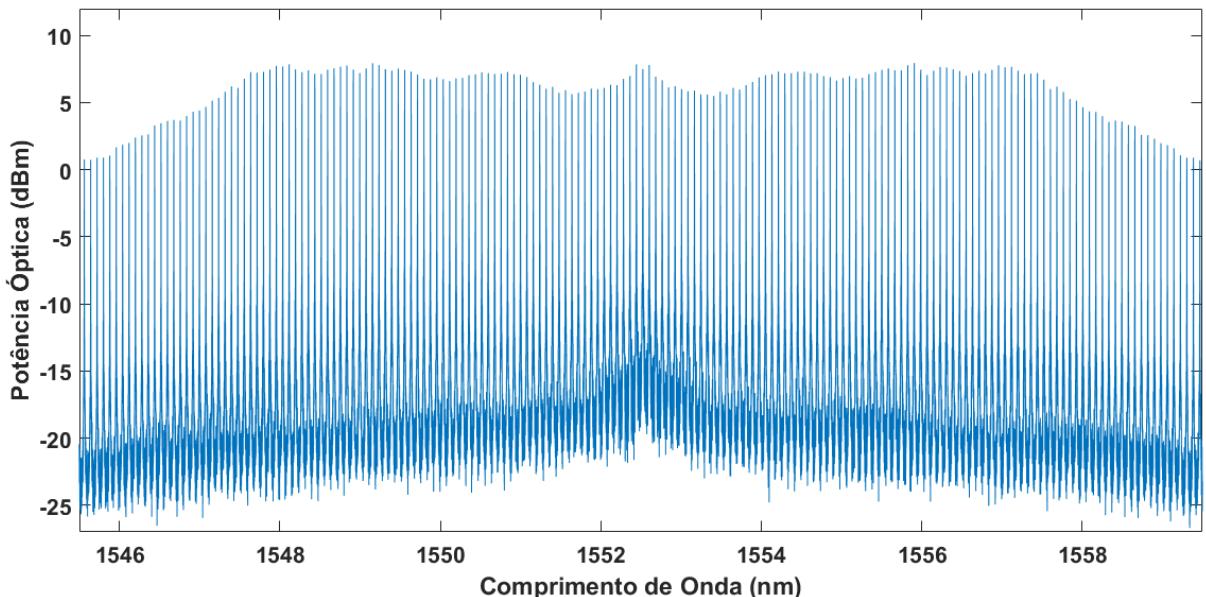
Os requisitos escolhidos para qualificação dos sistemas foi o número de subportado-

Tabela 1 – Parâmetros usados na simulação numérica.

Componentes	Parâmetros
Laser (LD)	Potência óptica: 0 dBm Frequência: 193.1 THz Largura de Linha: 100 kHz
Acoplador óptico (BS)	Coeficiente de acoplamento: 0.5
Modulador de fase (PM)	RF: 10 GHz
EDFA Sistema I	Ganho direto: 15 mW Comprimento: 3 m
EDFA Sistema II	Potência de bombeio direta: 20 mW Comprimento: 3 m
EDFA Sistema III	Potência de bombeio direta: 20 mW Comprimento: 3 m
Fibra monomodo (SMF)	Atenuação: 0.2 dB/km

ras geradas, *flatness* menor que 2 dB e OSNR maior que 20 dB. As Fig. 32, 33 e 34 mostram, respectivamente, a potência óptica média em função do comprimento de onda de cada um dos três sistemas. O ruído amplificado pelo EDFA se encontra na base das Fig. 32, 33 e 34, em azul mais escuro. Tanto para o ruído, quanto para o *flatness* foram feitos uma média da potência óptica. A OSNR foi definida como a diferença entre a média do ruído e a média da potência na saída, em cada um dos três sistemas.

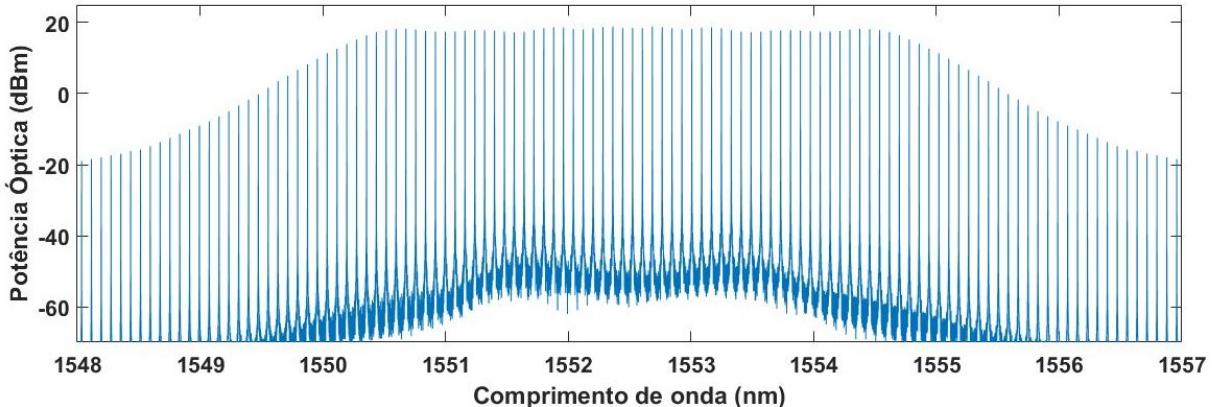
Figura 32 – Pente óptico gerado pelo Sistema I.



Fonte: Criado pelo Autor.

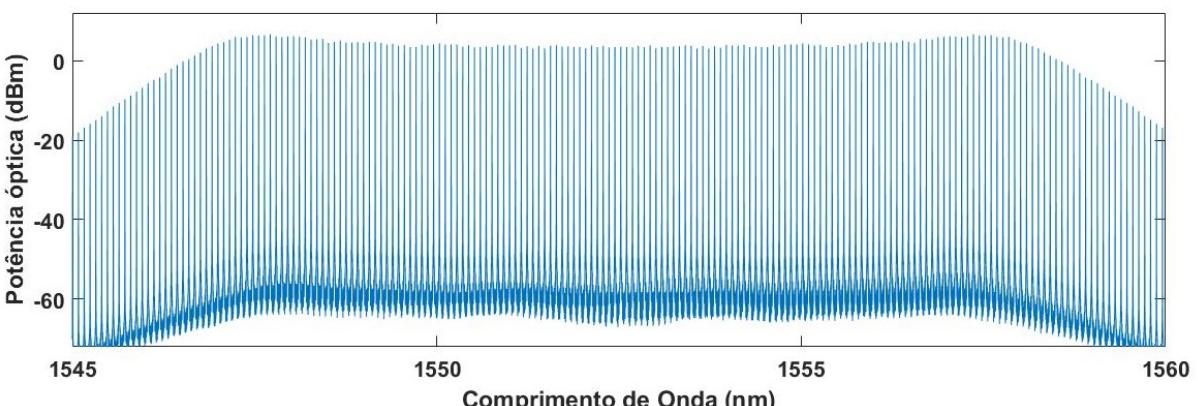
O Sistema I foi capaz de gerar 135 raias com potência de 5 dBm espaçadas por uma FSR de 10 GHz, *flatness* de 1,9 dB e OSNR de 20 dB. O Sistema II conseguiu gerar 53 raias com potência de saída de 17 dBm, *flatness* menor que 1 dB e OSNR de 60 dB. Já para o Sistema

Figura 33 – Pente óptico gerado pelo Sistema II.



Fonte: Criado pelo Autor.

Figura 34 – Pente óptico gerado pelo Sistema III.



Fonte: Criado pelo Autor.

III, ele conseguiu gerar 143 subportadoras com potência média na saída de 3 dBm, *flatness* de 1,4 dB e OSNR de 60 dB. Os resultados obtidos para os sistemas propostos são apresentados na Tabela 2.

Entre os sistemas propostos, o que conseguiu gerar mais raias foi o Sistema III. O Sistema I gerou 8 a menos que o Sistema III, porém a OSNR do Sistema I é muito pequena, em torno de 20 dB, enquanto a OSNR dos outros sistemas (II e III) foram em torno de 60 dB. O Sistema II, embora seja similar ao Sistema I, conseguiu gerar menos da metade de raias que ele. Em compensação, conseguiu o *flatness* menor entre os três sistemas propostos e tem OSNR três vezes maior que o Sistema I. A localização do EDFA no *loop* influí diretamente na OSNR do pente gerado. Por um lado, consegue se gerar mais raias e por outro, diminui a OSNR. O Sistema III é o mais complexo dos três sistemas propostos pois tem um modulador de fase em cada anel. Com a adição desse PM adicional e localização adequada do EDFA, esse sistema conseguiu ter um bom número de subportadoras geradas, com *flatness* pequeno e OSNR alta. Assim, o Sistema III é o sistema proposto que melhor atendeu os requisitos escolhidos para qualificar os sistemas.

Tabela 2 – Resultados numéricos obtidos para os sistemas I, II e III.

	Potência Óptica (dBm)	Subportadoras	flatness (dB)	OSNR (dB)
Sistema I	5	135	1,9	20
Sistema II	17	53	< 1	60
Sistema III	3	143	1,4	60

4.4 Comparativo

A Tabela 3 mostra um comparativo dos resultados obtidos dos sistemas propostos com alguns resultados de sistemas conhecidos na literatura. Todos os sete primeiros sistemas usam ressonadores em anel baseado em moduladores eletro-ópticos, enquanto os quatro últimos usam técnicas variadas de geração de subportadoras ópticas já citadas anteriormente. Tanto (BENNETT *et al.*, 1999), (ZHANG *et al.*, 2011) e (COSTA; SILVA, 2018) usam moduladores de fase e EDFA no *loop*, enquanto que (SANTOS, 2019) usa MZM e SOA.

Dentre esses quatro sistemas escolhidos da literatura para comparação de resultados, o sistema elaborado por (ZHANG *et al.*, 2011) conseguiu gerar mais raias, porém foi o que alcançou menor OSNR. Outra desvantagem do sistema proposto por (ZHANG *et al.*, 2011) é que ele usou uma fonte luminosa com a maior potência de entrada entre todos os sistemas apresentados na Tabela 3, o que é ruim do ponto de vista financeiro pois precisa de um *laser* com alta potência. O sistema apresentado por (SANTOS, 2019), embora tenha um aparato simples, só conseguiu gerar 30 raias com potência de entrada alta. Já o aparato apresentado por (COSTA; SILVA, 2018) é um pouco mais complexo do que o apresentado por (SANTOS, 2019), porém gerou o dobro de raias com OSNR melhor e potência de entrada em 0 dBm. A desvantagem desse sistema é falta de planicidade dos picos, ou seja, um *flatness* alto. O sistema apresentado por (BENNETT *et al.*, 1999) é o que tem a estrutura mais simples dos quatro sistemas apresentados na Tabela 3 para comparação. Apesar disso, conseguiu gerar 103 raias usando uma potência de entrada baixa e a OSNR mais alta entre os quatro sistemas usados para comparação.

Agora, fazendo uma comparação direta entre os sistemas propostos nessa dissertação e os sistemas apresentados por (BENNETT *et al.*, 1999; ZHANG *et al.*, 2011; SANTOS, 2019; COSTA; SILVA, 2018), podemos verificar que o sistema apresentado por (ZHANG *et al.*, 2011) conseguiu gerar 35 raias a mais do que o Sistema III, porém o custo disso foi um aparato um pouco mais complexo, além de uma potência de entrada bem mais alta. Outro fator importante é que a OSNR do Sistema III é 40 dB maior e o *flatness* é metade do que o sistema apresentado por (ZHANG *et al.*, 2011). A OSNR do Sistema II e III são as mais altas dos sete sistemas (60

dB), enquanto o *flatness* do Sistema II é o menor (< 1 dB).

Tabela 3 – Comparação entre os sistemas geradores de subportadoras ópticas.

OFCG	Potência de entrada	Subportadoras	Banda de guarda (FSR)	flatness	OSNR	ANO	Aparato
Sistema I	0 dBm	135	10 GHz	1,9 dB	20 dB	2021	RFS, PM, EDFA
Sistema II	0 dBm	53	10 GHz	< 1 dB	60 dB	2021	RFS, PM, EDFA
Sistema III	0 dBm	143	10 GHz	1,4 dB	60 dB	2021	RFS, PM, EDFA
(BENNETT <i>et al.</i> , 1999)	0 dBm	103	18 GHz	-	40 dB	1999	RFS, PM, EDFA
(ZHANG <i>et al.</i> , 2011)	1.4 dBm	178	26 GHz	3 dB	20 dB	2011	2 RFS, 2 PM, EDFA
(SANTOS, 2019)	1.1 dBm	30	20 GHz	-	-	2019	RFS, MZM, SOA
(COSTA; SILVA, 2018)	0 dBm	61	10 GHz	12 dB	30 dB	2018	MZI, PM, RFS

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Diante da grande demanda de banda em redes ópticas, esse trabalho apresentou e simulou, numericamente, três sistemas para geração de subportadoras ópticas usando ressonadores em paralelo baseados em moduladores de fase. O Sistema I gerou 135 raias com *flatness* menor do que 2 dB e OSNR de 20 dB. Já o Sistema II conseguiu gerar 53 raias com *flatness* menor que 1 dB e OSNR de 60 dB. Enquanto o Sistema III gerou 143 raias com *flatness* menor que 1,5 dB e OSNR de 60 dB.

Dessa forma, dependendo da aplicação, os sistemas proposto nesse trabalho podem atender tanto a altos valores de OSNR, valores baixos de *flatness* e grande número de subportadoras geradas. A complexidade entre os três sistemas apresentados muda muito pouco. Os sistemas I e II apresentam diferença na localização do EDFA no loop para gerar mais raias, assim, abrindo mão da OSNR alta. A diferença entre os sistemas I e II em relação ao Sistema III é na adição de um segundo PM para, assim, conseguir gerar uma quantidade alta de raias sem abrir mão da OSNR alta.

Como trabalhos futuros, podemos realizar testes com valores diferentes para o coeficiente de acoplamento dos acopladores com valores diferentes de 0,5. Além disso, podemos fazer uma análise analítica dos campos na saída para cada sistema, assim, podendo otimizar os resultados encontrados neste trabalho. Podemos fazer uma adaptação dos sistemas para fotônica integrada e por fim, simular os sistemas de forma experimental para verificar se os resultados experimentais convergem com os resultados numéricos.

REFERÊNCIAS

- AGRAWAL, G. P. **Fiber-Optic Communication Systems 3th edition.** [S. l.]: John Wiley Sons, Inc., 2002. ISBN 0-471-21571-6.
- AMAZONAS, J. d. A. **Projeto de sistemas de comunicações ópticas.** [S. l.]: Manole Ltda, 2005. ISBN 978-85-204-3853-4.
- BEBAWI, J.; KANDAS, I.; EL-OSAIRY, M.; ALY, M. **A Comprehensive Study on EDFA Characteristics: Temperature Impact.** [S. l.: s. n.], 2018. v. 8. 1640 p.
- BENNETT, S.; CAI, B.; BURR, E.; GOUGH, O.; SEEDS, A. **1.8-THz bandwidth, zero-frequency error, tunable optical comb generator for DWDM applications.** [S. l.: s. n.], 1999. v. 11. 551-553 p.
- BINH, L. **MATLAB Simulink Simulation Platform for Photonic Transmission Systems.** [S. l.: s. n.], 2009. v. 2. 97-117 p.
- CARMO, R. M. C. d. **Sistemas de Comunicações Óticas em Espaço Livre explorando Formatos de Modulação Avançados.** Dissertação (Mestrado) – ACEEC, AFA, Campinas, 2017.
- CHATTERJEE, B. C.; SARMA, N.; OKI, E. **Routing and Spectrum Allocation in Elastic Optical Networks: A Tutorial.** [S. l.: s. n.], 2015. v. 17. 1776-1800 p.
- CHEN, C.; HE, C.; ZHU, D.; GUO, R.; ZHANG, F.; PAN, S. **Generation of a flat optical frequency comb based on a cascaded polarization modulator and phase modulator.** [S. l.: s. n.], 2013. v. 38. 3137-3139 p.
- CHOU, C. W.; HUME, D. B.; ROSENBAND, T.; WINELAND, D. J. **Optical Clocks and Relativity.** [S. l.: s. n.], 2010. v. 329. 1630-1633 p.
- CHUANG, s. **Physics of optoelectronic devices.** [S. l.]: John Wiley Sons, Inc., 1995. ISBN 0-471-10939-8.
- COPPIN, P.; HODGKINSON, T. G. **Novel optical frequency comb synthesis using optical feedback.** [S. l.: s. n.], 1990. v. 26. 28-30 p.
- COSTA, L.; SILVA, J. B. **Sistemas Geradores de Subportadoras Ópticas Baseados em MZI com Modulador de Fase.** [S. l.: s. n.], 2018.
- DAS, B.; MALLICK, K.; MANDAL, P.; DUTTA, B.; BARMAN, C.; PATRA, A. S. **Flat optical frequency comb generation employing cascaded dual-drive Mach-Zehnder modulators.** [S. l.: s. n.], 2020. v. 17. 103152 p. ISSN 2211-3797.
- DESURVIRE, E. **Erbium-doped fiber amplifiers: principles and Applications.** [S. l.]: John Wiley sons, Inc., 1994. ISBN 0-471-26434-2.
- DIDDAMS, S. **The evolving optical frequency comb.** [S. l.: s. n.], 2010. v. 27. B51-B62 p.
- HMOOD, J. K.; EMAMI, S.; NOORDIN, K.; AHMAD, H.; HARUN, S. W.; SHALABY, H. **Optical frequency comb generation based on chirping of Mach-Zehnder Modulators.** [S. l.: s. n.], 2015. v. 344.

- HO, K.-P. **Phase-Modulated Optical Communication Systems.** [S. l.]: Springer Science+business Media. Inc., 2005. ISBN 0-387-24392-5.
- HO, K.-P.; KAHN, J. **Optical frequency comb generator using phase modulation in amplified circulating loop.** [S. l.: s. n.], 1993. v. 5. 721-725 p.
- HOLZWARTH, R.; UDEM, T.; HÄNSCH, T. W.; KNIGHT, J. C.; WADSWORTH, W. J.; RUSSELL, P. S. **J. Optical Frequency Synthesizer for Precision Spectroscopy.** [S. l.]: American Physical Society, 2000. v. 85. 2264–2267 p.
- IMRAN, M.; ANANDARAJAH, P. M.; KASZUBOWSKA-ANANDARAJAH, A.; SAMBO, N.; POTÍ, L. **A Survey of Optical Carrier Generation Techniques for Terabit Capacity Elastic Optical Networks.** [S. l.: s. n.], 2018. v. 20. 211-263 p.
- JINNO, M.; TAKARA, H.; KOZICKI, B.; TSUKISHIMA, Y.; SONE, Y.; MATSUOKA, S. **Spectrum-efficient and scalable elastic optical path network: architecture, benefits, and enabling technologies.** [S. l.: s. n.], 2009. v. 47. 66-73 p.
- JUSTINO-RIBEIRO, J. **Características da Propagação em Fibras Ópticas.** [S. l.: s. n.], 1999.
- KALER, R. K. R. **Gain and Noise figure performance of erbium doped fiber amplifiers (EDFAs) and Compact EDFAs.** [S. l.: s. n.], 2011. v. 122. 440-443 p. ISSN 0030-4026.
- KAYES, M. I.; ROCHELLE, M. **Optical frequency comb generation with ultra-narrow spectral lines.** [S. l.]: OSA, 2017. v. 42. 2718–2721 p.
- KEISER, G. **Optical Communications Essentials.** [S. l.]: McGraw-Hill Companies, 2003. ISBN 0-07-141204-2.
- KEISER, G. **Optical Fiber Communications 4th edition.** [S. l.]: McGraw-Hill Companies, 2010. ISBN 978-0-07-338071-1.
- LOWERY, A. **Performance predictions and topology improvements for optical heterodyne comb generators.** [S. l.: s. n.], 2005. v. 23. 2371-2379 p.
- MARTIN, A. A. **Modelagem Estática e Dinâmica do Amplificador a Fibra Dopada com Érbio para Sistemas WDM.** Dissertação (Mestrado) – FEEC, UNICAMP, Campinas, 2007.
- METCALF, A. J.; TORRES-COMPANY, V.; LEAIRD, D. E.; WEINER, A. M. **High-Power Broadly Tunable Electrooptic Frequency Comb Generator.** [S. l.: s. n.], 2013. v. 19. 231-236 p.
- MILO, S.; SOUZA, R.; SILVA, M.; CONFORTI, E.; BORDONALLI, A. **An EDFA theoretical analysis considering different configurations and pumping wavelengths.** [S. l.: s. n.], 2003. v. 1. 105-110 vol.1 p.
- NOGUEIRA, J. D. d. S.; FONSECA, J. P. d.; SILVA, J. B. R. **Generator Systems for Optical Subcarriers Based on Ring Resonator in Series and Parallel with Phase Modulation.** [S. l.: s. n.], 2021. v. 20. 621-628 p.
- OKAMOTO, K. **Fundamentals of Optical Waveguides.** Second edition. [S. l.]: Academic Press, 2006. ISBN 978-0-12-525096-2.

OLIVEIRA, J. C. R. F. d. **Projeto de EDFAs com controle automatico de ganho totalmente óptico para aplicações em redes WDM**. Dissertação (Mestrado) – FEEC, UNICAMP, Campinas, 2004.

OLIVEIRA, S. T. de; MOURA, A. S.; SILVA, J. B. R. **Optical setups to generate harmonic RF signals using dual optical loop and phase modulation**. [S. l.: s. n.], 2015. 1-4 p.

PFEIFLE, J. **Terabit-Rate Transmission Using Optical Frequency Comb Sources**. [S. l.: s. n.], 2017.

QIU, J.; JIN, X.; YANG, L.; XU, Y.; WEI, B. **Generation of a 25-line flattened optical frequency comb and its coherent beating properties**. OSA, 2022. v. 61. 3871–3876 p. Disponível em: <http://opg.optica.org/ao/abstract.cfm?URI=ao-61-13-3871>.

RAMASWAMI, K. N. S. G. H. S. R. **Optical networks : a practical perspective**. [S. l.]: Morgan Kaufmann publications, 2010. ISBN 978-0-12-374092-2.

ROSADO, A.; PEREZ-SERRANO, A.; TIJERO, J.; VALLE, A.; PESQUERA, L.; ESQUIVIAS, I. **Experimental study of optical frequency comb generation in gain-switched semiconductor lasers**. [S. l.: s. n.], 2018. v. 108. 542 p.

ROSADO, A.; PÉREZ-SERRANO, A.; TIJERO, J. M. G.; GUTIERREZ, A. V.; PESQUERA, L.; ESQUIVIAS, I. **Numerical and Experimental Analysis of Optical Frequency Comb Generation in Gain-Switched Semiconductor Lasers**. [S. l.: s. n.], 2019. v. 55. 1-12 p.

SANTOS, M. L. M. d. **Gerador de pente óptico de frequências baseado em laço de recirculação com amplificador óptico a semicondutor**. Dissertação (Mestrado) – FEEC, UNICAMP, Campinas, 2019.

SHARMA, V.; SINGH, S.; LOVKESH; ANASHKINA, E. A.; ANDRIANOV, A. V. **Demonstration of optical frequency comb generation using four-wave mixing in highly nonlinear fiber**. [S. n.], 2021. v. 241. 166948 p. ISSN 0030-4026. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030402621006434>.

SHEN, J.; WU, S.; LI, D. **Ultra-flat optical frequency comb generation based on phase modulation with simple digital driving signal**. [S. n.], 2019. v. 198. 163254 p. ISSN 0030-4026. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030402619311520>.

SHEN, P.; GOMES, N. J.; DAVIES, P. A.; HUGGARD, P. G.; ELLISON, B. N. **Analysis and Demonstration of a Fast Tunable Fiber-Ring-Based Optical Frequency Comb Generator**. [S. l.: s. n.], 2007. v. 25. 3257-3264 p.

STEINMETZ, T.; WILKEN, T.; ARAUJO-HAUCK, C.; HOLZWARTH, R.; HäNSCH, T. W.; PASQUINI, L.; MANESCAU, A.; D'ODORICO, S.; MURPHY, M. T.; KENTISCHER, T.; SCHMIDT, W.; UDEM, T. **Laser Frequency Combs for Astronomical Observations**. [S. l.: s. n.], 2008. v. 321. 1335-1337 p.

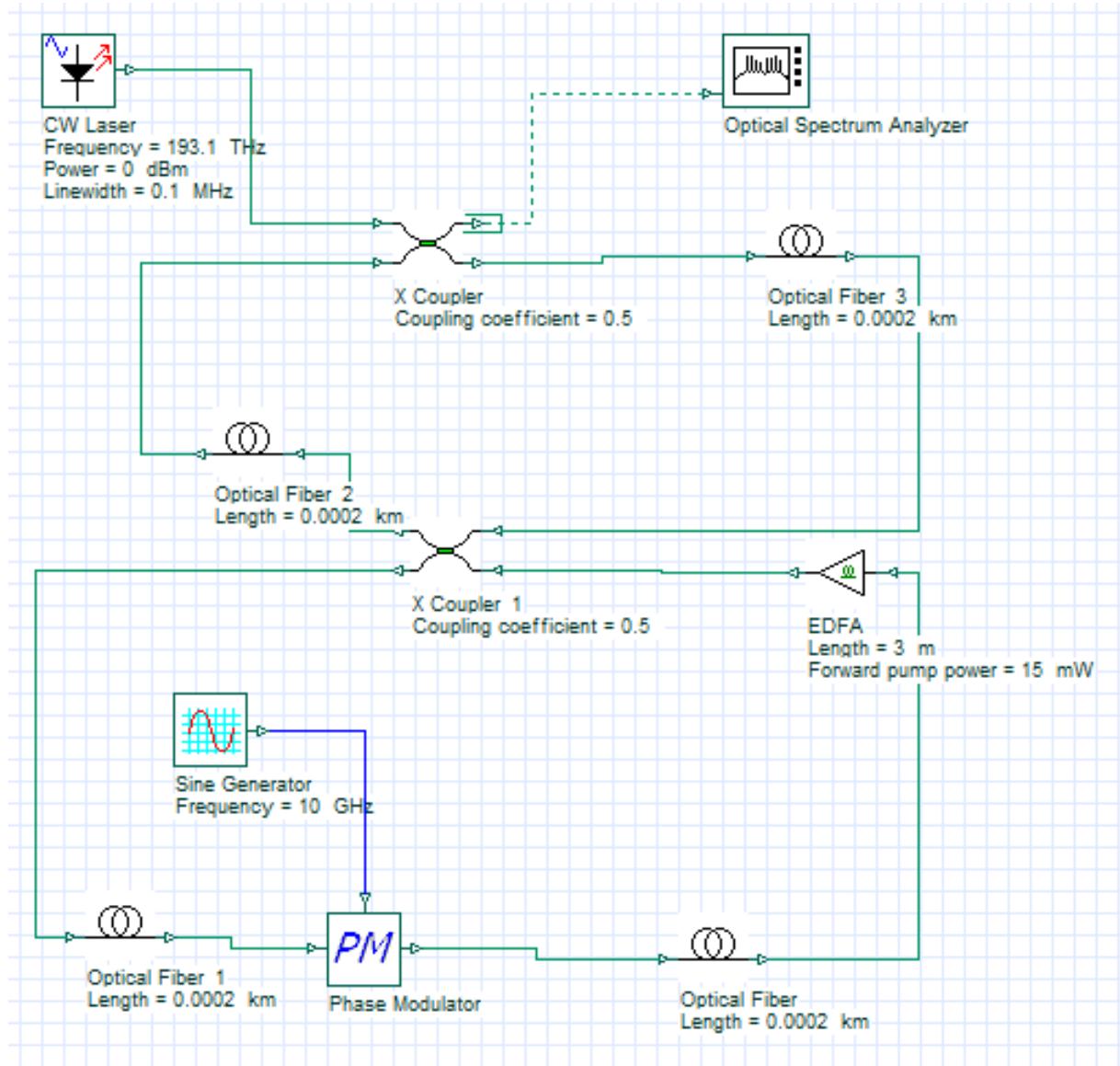
SUPRADEEPA, V. R.; LONG, C.; WU, R.; FERDOUS, F.; HAMIDI, E.; LEAIRD, D.; WEINER, A. **Comb-based radiofrequency photonic filters with rapid tunability and high selectivity**. [S. l.: s. n.], 2012. v. 6. 186-194 p.

TER-MIKIRTYCHEV, V. **Fundamentals of Fiber Lasers and Fiber Amplifiers**. [S. l.: s. n.], 2019. ISBN 978-3-030-33889-3.

- TIAN, F.; ZHANG, X.; LI, J.; XI, L. **Generation of 50 Stable Frequency-Locked Optical Carriers for Tb/s Multicarrier Optical Transmission Using a Recirculating Frequency Shifter.** [S. l.: s. n.], 2011. v. 29. 1085-1091 p.
- TOMIZAWA, M.; YAMAWAKU, J.; TAKIGAWA, Y.; KOGA, M.; MIYAMOTO, Y.; MORIOKA, T.; HAGIMOTO, K. **Terabit LAN with optical virtual concatenation for Grid applications with super-computers.** [S. l.: s. n.], 2005. v. 4. 3 pp. Vol. 4- p.
- TORRES-COMPANY, V.; WEINER, A. M. **Optical frequency comb technology for ultra-broadband radio-frequency photonics.** [S. l.: s. n.], 2014. v. 8. 368-393 p.
- WENG, H.-Z.; HUANG, Y.-Z.; MA, X.-W.; YANG, Y.-D.; XIAO, J.-L.; HAN, J.-Y.; LIAO, M.-L. **Optical Frequency Comb Generation in Highly Nonlinear Fiber With Dual-Mode Square Microlasers.** [S. l.: s. n.], 2018. v. 10. 1-9 p.
- WINZER, P. J.; NEILSON, D. T.; CHRAPLYVY, A. R. **Fiber-optic transmission and networking: the previous 20 and the next 20 years.** [S. l.]: OSA, 2018. v. 26. 24190–24239 p.
- YAMAMOTO, T.; KOMUKAI, T.; SUZUKI, K.; TAKADA, A. **Multicarrier Light Source With Flattened Spectrum Using Phase Modulators and Dispersion Medium.** [S. l.: s. n.], 2009. v. 27. 4297-4305 p.
- YOO, S. J. B. **Optical Packet and Burst Switching Technologies for the Future Photonic Internet.** [S. l.: s. n.], 2006. v. 24. 4468-4492 p.
- ZHANG, J.; YU, J.; DONG, Z.; SHAO, Y.; CHI, N. **Generation of full C-band coherent and frequency-lock multi-carriers by using recirculating frequency shifter loops based on phase modulator with external injection.** OSA, 2011. v. 19. 26370–26381 p. Disponível em: <http://www.osapublishing.org/oe/abstract.cfm?URI=oe-19-27-26370>.
- ZHANG, J.; YU, J.; TAO, L.; FANG, Y.; WANG, Y.; SHAO, Y.; CHI, N. **Generation of Coherent and Frequency-Lock Optical Subcarriers by Cascading Phase Modulators Driven by Sinusoidal Sources.** [S. l.: s. n.], 2012. v. 30. 3911-3917 p.
- ZHANG, T.; WU, S. **Optical Frequency Comb Generation Based on Dual-Parallel Mach—Zehnder Modulator and Intensity Modulator with RF Frequency Multiplication Circuit.** Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2018. v. 36. 256–262 p. ISSN 1387-974X.
- ÇOKRAK, A.; ALTUNCU, A. **Gain and noise figure performance of erbium doped fiber amplifiers (EDFA).** [S. l.: s. n.], 2008. v. 4. 1111-1122 p.

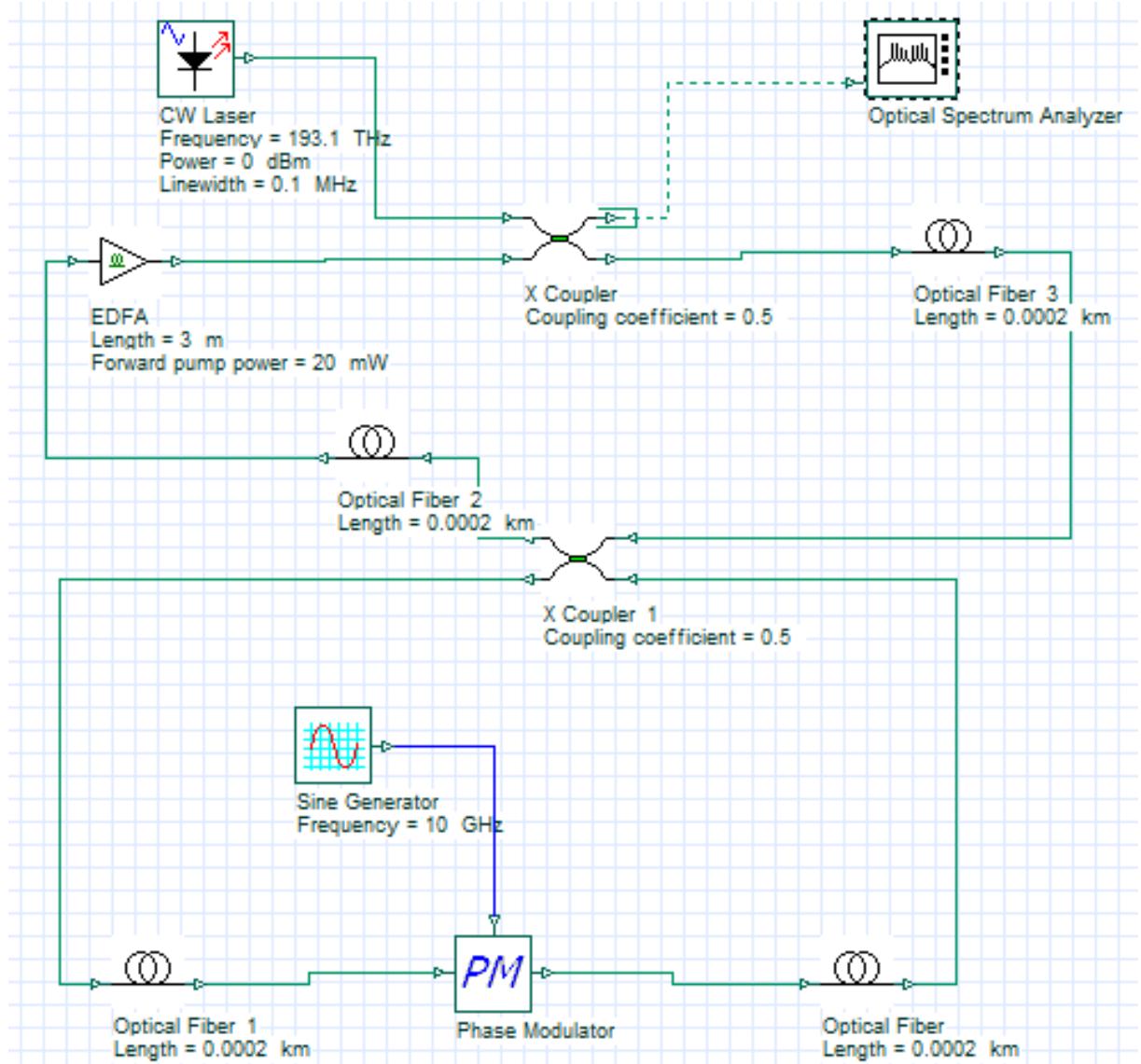
APÊNDICE A – DIAGRAMA DOS SISTEMAS NO OPTISYSTEM

Figura 35 – Diagrama do Sistema I no OptiSystem.



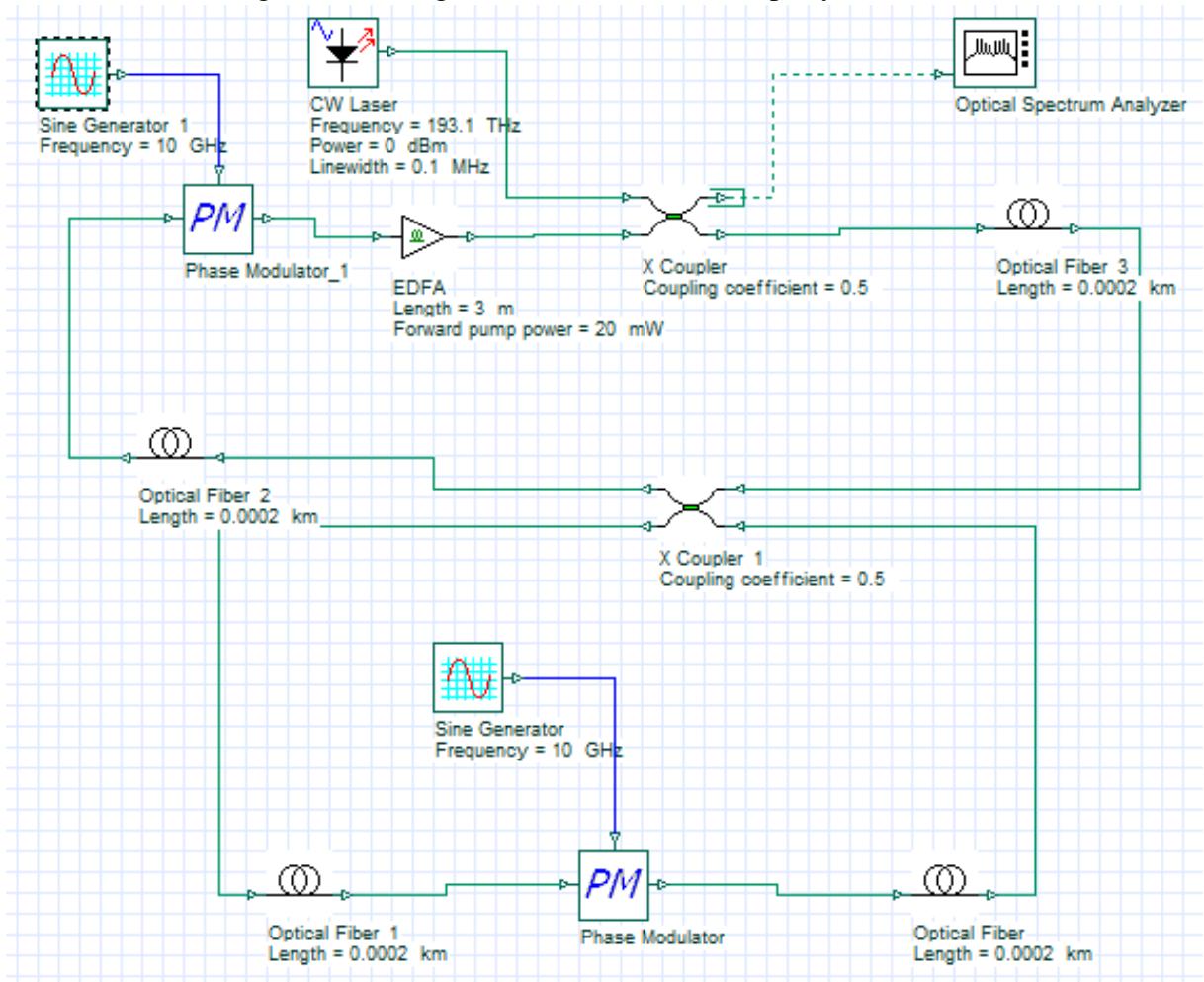
Fonte: Criado pelo autor

Figura 36 – Diagrama do Sistema II no OptiSystem,



Fonte: Criado pelo autor

Figura 37 – Diagrama do Sistema III no OptiSystem.



Fonte: Criado pelo autor

APÊNDICE B – ARTIGOS PUBLICADOS

B.1 Artigo Publicado em Periódicos com Qualis A4 (Quadriênio 2017-2020) em Engenharias IV

- NOGUEIRA, JOSÉ DANILO DA SILVA ; FONSECA NETO, JOÃO PINTO DA ; SILVA, JOÃO BATISTA ROSA . *Generator Systems for Optical Subcarriers Based on Ring Resonator in Series and Parallel with Phase Modulation*. JOURNAL OF MICROWAVES, OPTOELECTRONICS AND ELECTROMAGNETIC APPLICATIONS, v. 20, p. 621-628, 2021. <https://doi.org/10.1590/2179-10742021v20i3254755>

B.2 Artigos Completos em Anais sem Qualis de Área (Nacionais)

- FONSECA NETO, J. P. ; NOGUEIRA, J. D. S. ; SILVA, J. B. R.. *Geração de Subportadoras Ópticas usando Loops em Paralelo e Modulação de Fase*. In: 19o SBMO (Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica) e o 14o CBMag (Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo), MOMAG 2020, pág. 71.
- NOGUEIRA, J. D. S.; FONSECA NETO, J. P.; SILVA, J. B. R.. *Geração de Subportadoras Ópticas em Loops em Série e Modulação de Fase*. In: 19o SBMO (Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica) e o 14o CBMag (Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo), MOMAG 2020, pág. 67.

APÊNDICE C – ACESSO A VÍDEO TUTORIAL

Na Figura 38, temos um QR *Code* que direcionará o leitor a um vídeo tutorial de como simular os sistemas propostos nessa dissertação. Além disso, um pouco mais abaixo, temos um link com o mesmo intuito do QR *Code*.

Figura 38 – QR *Code* para acesso ao tutorial OptiSystem.



Fonte: Criado pelo autor

Link para acesso: <https://youtu.be/oobqxWyUZgk>