



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

**JOSÉ DANILO DA SILVA NOGUEIRA**

**SISTEMAS GERADORES DE SUBPORTADORAS ÓPTICAS COM LOOPS**  
**AMPLIFICADOS E MODULAÇÃO DE FASE EM SÉRIE**

**FORTALEZA**

**2021**

JOSÉ DANILO DA SILVA NOGUEIRA

SISTEMAS GERADORES DE SUBPORTADORAS ÓPTICAS COM LOOPS  
AMPLIFICADOS E MODULAÇÃO DE FASE EM SÉRIE

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

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

N712s Nogueira, José Danilo da Silva.  
Sistemas Geradores de Subportadoras Ópticas com Loops Amplificados e Modulação de Fase em Série /  
José Danilo da Silva Nogueira. – 2021.  
50 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia de Teleinformática, Fortaleza, 2021.  
Orientação: Prof. Dr. João Batista Rosa Silva.

1. Geração de subportadoras. 2. Modulador de fase. 3. Loop óptico. I. Título.

CDD 621.38

---

JOSÉ DANILO DA SILVA NOGUEIRA

SISTEMAS GERADORES DE SUBPORTADORAS ÓPTICAS COM LOOPS  
AMPLIFICADOS E MODULAÇÃO DE FASE EM SÉRIE

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: 30 de junho de 2021

BANCA EXAMINADORA

---

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

---

Prof. Dr. Rubens Viana Ramos  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

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

---

Prof. Dr. Glendo de Freitas Guimarães  
Instituto Federal do Ceará (IFCE)

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. João Batista pela oportunidade e a orientação do meu mestrado. Ao Prof. Dr. Rubens Viana pelas contribuições. Aos colegas do Grupo de Informação Quântica (GIQ) pela colaboração, a minha esposa pelo companheirismo e aos meus filhos minha inspiração. A todos os professores que direta e indiretamente, participaram e contribuíram no desenvolvimento deste trabalho. Ao Instituto Federal do Ceará (IFCE) por disponibilizar a ferramenta computacional *Optisystem*<sup>®</sup> para simulação dos sistemas propostos. Por fim agradeço à Universidade Federal do Ceará, unidade campus Russas-Ce, por conceder a liberação para pesquisa de mestrado via afastamento parcial.

## RESUMO

Este trabalho apresenta três novos sistemas para geração de subportadoras ópticas baseados em laços ópticos amplificados com modulação de fase em série na banda C e com espaçamento espectral de 10 GHz entre subportadoras. Os sistemas foram simulados numericamente e foram capazes de gerar até 146 subportadoras com *flatness* máxima de 8.4 dB e uma OSNR mínima de 43 dB. O primeiro sistema possui apenas um laço óptico amplificado e um modulador de fase, capaz de gerar 96 a 146 subportadoras ópticas com o *flatness* variando entre 2.4 e 6.2 dB, respectivamente. O segundo sistema, que consiste em dois laços ópticos em série com modulação em fase em ambos e amplificação apenas no primeiro laço óptico, produz 101 subportadoras com um *flatness* de 2.0 dB. Já o terceiro sistema, dois laços ópticos amplificados em série com modulação de fase em ambos os laços, gera 100 subportadoras com *flatness* de 1.7 dB. Todos os sistemas foram comparados com os sistemas disponíveis na literatura e apresentaram vantagens, quanto à complexidade de hardware óptico como ao número de subportadoras geradas, e podem ser aplicados em redes ópticas baseadas em DWDM.

**Palavras-chave:** Geração de subportadoras. modulador de fase. loop óptico.

## ABSTRACT

This work presents three new systems for the generation of optical subcarriers based on amplified optical loops with phase modulation in series in the C band and with spectral spacing of 10 GHz between subcarriers. The systems were numerically simulated and were able to generate up to 146 subcarriers with maximum flatness of 8.4 dB and a minimum OSNR of 43 dB. The first system has only one amplified loop and one phase modulator and is able to generate 96 to 146 optical subcarriers with flatness ranging from 2.4 to 6.2 dB, respectively. The second system, which consists of two loops in series with phase modulation in both and amplification only in the first loop, produces 101 subcarriers with a flatness of 2.0 dB. The third system, two loops amplified in series with phase modulation in both loops, generates 100 subcarriers with flatness of 1.7 dB. All systems were compared with the systems available in the literature and presented advantages regarding the complexity of optical hardware as to the number of subcarriers generated, and can be applied in DWDM-based optical networks.

**Keywords:** Subcarrier generator. phase modulator. optical loop.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura e confinamento da luz por reflexão interna total em fibras ópticas. . . . .	16
Figura 2 – Modos de propagação na fibra óptica: (a) multimodo e (b) monomodo. . . . .	17
Figura 3 – Estrutura de um interferômetro de Mach-Zehnder (MZI) de LiNbO <sub>3</sub> como modulador de fase. . . . .	18
Figura 4 – Acoplador óptico direcional de quatro portas. . . . .	19
Figura 5 – Emissão estimulada e absorção em um sistema com dois níveis de energias. . . . .	20
Figura 6 – Estrutura de um amplificador de fibra dopada com érbio. . . . .	21
Figura 7 – Modelo de um ressonador óptico em anel. . . . .	22
Figura 8 – Esquemático proposto em (HO; KAHN, 1993). . . . .	24
Figura 9 – Sistema proposto em (ZHANG <i>et al.</i> , 2011). . . . .	25
Figura 10 – Gráfico das raias geradas em (ZHANG <i>et al.</i> , 2011). . . . .	26
Figura 11 – Esquemático proposto em (COSTA; SILVA, 2018). . . . .	26
Figura 12 – Gráfico das raias geradas em (COSTA; SILVA, 2018). . . . .	27
Figura 13 – Esquemático proposto em (SANTOS <i>et al.</i> , 2019). . . . .	27
Figura 14 – Gráfico das raias geradas em (SANTOS <i>et al.</i> , 2019). . . . .	28
Figura 15 – Sistema 1: sistema OFC baseado em um laço de recirculação óptico amplificado com modulação de fase. . . . .	29
Figura 16 – Sistema 2: sistema OFC baseado em dois laços de recirculação óptico em série com modulação de fase e amplificação simples. . . . .	30
Figura 17 – Sistema 3: sistema OFC baseado em dois laços de recirculação óptico amplificados em série com dupla modulação de fase. . . . .	30
Figura 18 – Exemplo Esquemático do Sistema 1 no <i>OptiSystem</i> <sup>®</sup> . . . . .	31
Figura 19 – Requisitos de desempenho dos sistemas propostos. . . . .	32
Figura 20 – Potência de saída média versus comprimento de onda do Sistema 1: OFC de 96 e 141 subportadoras com <i>flatness</i> de 2.4 e 3.4 dB e OSNR de 50 e 48 dB para potência média de saída de referência de 0 e -2 dBm, respectivamente. . . . .	34
Figura 21 – Potência de saída média versus comprimento de onda do Sistema 2: OFC de 101 subportadoras com <i>flatness</i> de 2.0 dB e OSNR de 54 dB para potência média de saída de referência de -1 dBm. . . . .	35



Figura 22 – Potência de saída média versus comprimento de onda do Sistema 3: OFC de 100 subportadoras com <i>flatness</i> de 1.7 dB e OSNR de 53 dB para potência média de saída de referência de 13 dBm. . . . .	35
Figura 23 – Apresentação da Interface inicial do <i>software</i> . . . . .	40
Figura 24 – Apresentação dos visualizadores do <i>software</i> . . . . .	41
Figura 25 – Exemplo esquemático do Sistema 1 no <i>software</i> . . . . .	45
Figura 26 – Exemplo esquemático do Sistema 2 no <i>software</i> . . . . .	45
Figura 27 – Exemplo esquemático do Sistema 3 no <i>software</i> . . . . .	45
Figura 28 – Leitura, após 10 iterações, do Sistema 1 no OSA. . . . .	46
Figura 29 – Leitura, após 100 iterações, do Sistema 1 no OSA. . . . .	46
Figura 30 – Leitura, após 240 iterações, do Sistema 1 no OSA. . . . .	47
Figura 31 – Leitura, após 200 iterações, do Sistema 3 no OSA. . . . .	47

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros utilizados na simulação. . . . .	32
Tabela 2 – Comparativo entre sistemas ópticos. . . . .	36
Tabela 3 – Comparativo entre os sistemas propostos . . . . .	48
Tabela 4 – Resultados do Sistema 1 . . . . .	48
Tabela 5 – Resultados do Sistema 2 . . . . .	49
Tabela 6 – Resultados do Sistema 3 . . . . .	49

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

WDM	Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda
OFC	Pente de Frequências Ópticas
SOA	Amplificador Óptico a Semicondutor
SMF	Fibra Monomodo
BS	Acoplador Óptico
LD	Diodo Laser
EDFA	Amplificador de Fibra Dopada com Érbio
ORR	Ressonador Óptico em Anel
OSA	Analisador de Espectro Óptico
MZM	Modulador Mach-Zehnder
LED	Diodo Emissor de Luz
RA	Amplificadores Raman
RF	Rádio Frequência
ECL	Laser de Cavidade Externa
OSNR	Relação Sinal-Ruído Óptica

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO</b> . . . . .	13
2	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> . . . . .	15
2.1	<b>Introdução</b> . . . . .	15
2.2	<b>Dispositivos e componentes de sistemas ópticos</b> . . . . .	15
2.2.1	<i>Fibra óptica</i> . . . . .	15
2.2.2	<i>Moduladores ópticos</i> . . . . .	17
2.2.3	<i>Acoplador óptico</i> . . . . .	18
2.2.4	<i>Diodo laser</i> . . . . .	19
2.2.5	<i>Amplificador de fibra dopado com érbio</i> . . . . .	20
2.2.6	<i>Ressonador em anel</i> . . . . .	21
2.3	<b>Técnicas de geração de subportadoras</b> . . . . .	23
2.3.1	<i>Geração de subportadoras baseado em laços de recirculação de fibra óptica</i> . . . . .	24
3	<b>SISTEMAS GERADORES DE SUBPORTADORAS ÓPTICAS</b> . . . . .	29
3.1	<b>Introdução</b> . . . . .	29
3.2	<b>Sistemas geradores de OFC propostos</b> . . . . .	29
3.3	<b>Metodologia</b> . . . . .	30
3.4	<b>Requisitos de desempenho</b> . . . . .	32
4	<b>RESULTADOS</b> . . . . .	34
4.1	<b>Introdução</b> . . . . .	34
4.2	<b>Sistema 1: sistema OFC baseado em um laço de recirculação óptico amplificado com modulação de fase</b> . . . . .	34
4.3	<b>Sistema 2: sistema OFC baseado em dois laços de recirculação óptico em série com modulação de fase e amplificação simples</b> . . . . .	34
4.4	<b>Sistema 3: sistema OFC baseado em dois laços de recirculação óptico amplificados em série com dupla modulação de fase</b> . . . . .	35
4.5	<b>Comparativo</b> . . . . .	35
5	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b> . . . . .	37
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	38
	<b>APÊNDICES</b> . . . . .	40
	<b>APÊNDICE A – SOFTWARE SIMULADOR</b> . . . . .	40

<b>APÊNDICE B</b> –SISTEMAS PROPOSTOS - EXEMPLOS DE DIAGRAMAS ESQUEMÁTICOS GERADOS NO <i>SOFTWARE</i> .	45
<b>APÊNDICE C</b> –AMOSTRAS DAS SIMULAÇÕES DOS SISTEMAS PROPOSTOS NO <i>SOFTWARE</i> . . . . .	46
<b>APÊNDICE D</b> –APRESENTA TABELAS QUE MOSTRAM OS NÚMEROS DE RAIAS, A OSNR, A <i>FLATNESS</i> E A POTÊNCIA ÓPTICA DAS RAIAS PRODUZIDAS PELOS SISTEMAS PROPOSTOS NAS SIMULAÇÕES.	48
<b>ANEXOS</b> . . . . .	48
<b>ANEXO A</b> –ARTIGOS PUBLICADOS . . . . .	50

## 1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por largura de banda dos últimos anos principalmente em ambientes corporativos, aliada ao aumento do número de computadores pessoais, smartphones, tablets e celulares com acesso a rede mundial de computadores (Internet - *global computer network*), consumindo serviços de multimídia como *WhatsApp*<sup>®</sup>, *Google Meet*<sup>®</sup>, *YouTube*<sup>®</sup>, *Netflix*<sup>®</sup>, aliado ao armazenamento em nuvens (por exemplo: *Google Drive*<sup>®</sup>), tem sobrecarregado as redes de comunicações ópticas. Uma solução proposta para resolução desse problema é melhorar o uso da banda disponível.

As redes de Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda (WDM) possuem uma limitação em relação a alocação fixa de banda, não permitindo usar a banda não ocupada. As redes ópticas elásticas (EON - *elastic optical network*) permitem melhores aproveitamentos destes espectros fazendo uso de *slots* que possibilitam a alocação quase que contínua, separadas apenas pelo que (JINNO *et al.*, 2009) define como banda de guarda.

Formam as EONs vários subsistemas, sendo que um deles, o *transponder* apresenta grande flexibilidade entre outras funções, além de possibilitar alterar o número de subportadoras no intuito de atender a diferentes capacidades. Segundo (IMRAN *et al.*, 2018) as subportadoras são geradas por um conjunto de *lasers* que trabalham de forma independentes, no entanto, o uso desta solução sofre com espaçamento de frequência variável. (IMRAN *et al.*, 2018) mostrou ainda outra solução como o uso de combos (pentes) de frequência óptica (OFC - *optical frequency combs*) para geração das subportadoras.

Um Pente de Frequências Ópticas (OFC) pode ser definido como uma série de linhas espectrais discretas igualmente espaçadas, que mantém conformidade espectral em toda largura de banda do sinal, sendo que a maior parte das técnicas utilizadas para geração de OFCs utilizam moduladores eletro-ópticos. Especificamente, o sinal gerado por um laser trabalhando em regime contínuo é modulado por um, ou mais moduladores de fase, de amplitude ou em polarização, sendo aceito também suas combinações.

A referência (IMRAN *et al.*, 2018) propõe alguns sistemas utilizando laços ópticos com moduladores para aumentar o número de raias geradas. Tipicamente moduladores de fase cascadeados com moduladores em intensidade podem ser utilizados para geração de subportadoras. Em (METCALF *et al.*, 2013) três moduladores cascadeados, dois de fase e um de intensidade, foram utilizados para gerar 65 raias com flutuação de potência (*flatness*) de 10 dB e espaçamento entre raias de 10 GHz.

A geração de subportadoras podem ser alcançadas pelo uso de moduladores em laços ópticos amplificados cascadeado com modulação de fase. Essa técnica de geração de OFC foi apresentada em (HO; KAHN, 1993). Métodos não-lineares podem ser usados em laços ópticos de recirculação (anéis), explorando as propriedades de fibras especiais, bem como outros meios não-lineares como amplificadores ópticos de semicondutor - Amplificador Óptico a Semicondutor (SOA) e/ou com fibras dopadas de érbio (EDFA).

Portanto, este trabalho propõe três novos sistemas geradores de subportadoras ópticas utilizando laços ópticos amplificados em série com moduladores de fase baseados (HO; KAHN, 1993). Esta dissertação foi estruturada em cinco capítulos. No Capítulo 2 são descritos brevemente: os dispositivos ópticos que compõe os sistemas propostos; algumas técnicas de geração de subportadoras, destacando a técnica baseada em laço óptico de recirculação. No Capítulo 3, são descritos os três sistemas propostos para geração de subportadoras, a metodologia utilizada para simulação destes e os parâmetros usados para qualificar o desempenho dos sistemas. No Capítulo 4, os resultados obtidos pelos sistemas propostos serão analisados e comparados com os sistemas OFC existentes na literatura. E por fim, as conclusões e trabalhos futuros serão apresentados no Capítulo 5.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Introdução

Para um melhor entendimento e clareza dos sistemas propostos faz-se necessário conhecer algumas das técnicas de geração de subportadoras, principalmente as que utilizam laços de recirculação, baseados em um ressonador em anel de fibra óptica, além de conhecer os dispositivos que as compõem e que servirão de suporte para este trabalho.

Neste Capítulo são apresentados os principais dispositivos e componentes utilizados nos sistemas propostos, algumas das técnicas de geração de subportadoras ópticas, destacando a técnica baseada em laço óptico de recirculação.

### 2.2 Dispositivos e componentes de sistemas ópticos

Neste trabalho, os sistemas propostos são constituídos de Fibra Monomodo (SMF), Moduladores Ópticos (PM), Acoplador Óptico (BS), Diodo Laser (LD) e Amplificador de Fibra Dopada com Érbio (EDFA) além de serem baseados em um Ressonador Óptico em Anel (ORR). Para análise e leitura das raias foi utilizado um Analisador de Espectro Óptico (OSA). Esta Secção apresenta uma descrição dos dispositivos e componentes que compõem os sistemas propostos e arquiteturas disponíveis na literatura.

#### 2.2.1 Fibra óptica

Um cabo de fibra óptica, como mostra a Figura 1 é desenvolvido sobre uma estrutura de vidro ou plástico e guia sinais na forma de luz por reflexão interna total (FOROUZAN, 2007). A fibra óptica é flexível mecanicamente e não quebra quando é encurvada suavemente, sendo usada para guiar um feixe de luz através de caminhos sinuosos sem interferências do meio externo (REZENDE, 2004).

Nota-se na Figura 1 que a fibra óptica é constituída basicamente de duas partes: um núcleo com índice de refração  $n_1$ , e uma casca com índice de refração  $n_2$ . Uma vez que  $n_2 < n_1$  é uma condição necessária para garantir que ocorra reflexão interna total na interface núcleo-casca de tal maneira que, nessa interface, a refração é possível somente para ângulos de incidência  $\phi$



tais que  $\text{sen}(\phi) < n_2/n_1$ . Para ângulos maiores do que um *ângulo crítico* ( $\phi_c$ ), definido por

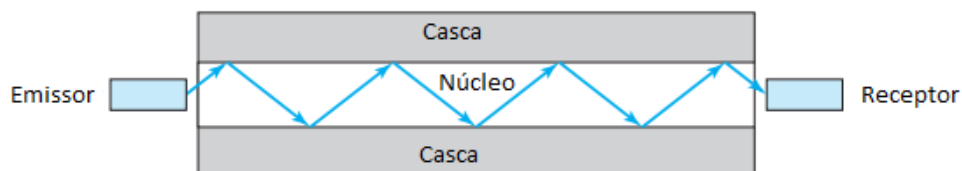
$$\text{sen}(\phi_c) = \frac{n_2}{n_1}, \quad (2.1)$$

o raio sofre reflexão interna total na interface núcleo-casca (AGRAWAL, 2010). Este ângulo é conhecido como *ângulo crítico* ( $\phi_c$ ) (ANTONIO; RIBEIRO, 1999). Portanto, se o primeiro meio (núcleo) for envolvido por outro de menor índice de refração, estabelece-se uma estrutura capaz de guiar a onda eletromagnética através de um processo de múltiplas reflexões sucessivas (ANTONIO; RIBEIRO, 1999).

Atualmente, quanto ao número de modos guiados, há dois tipos de fibras usadas para transmissão: multimodo e monomodo. Na Figura 2 (a), as fibras multimodo permitem mais de um modo de propagação, enquanto as fibras monomodo, na Figura 2 (b), permitem o guiamento apenas do modo fundamental. O principal problema em fibras multimodo é o rápido alargamento dos pulsos (a uma taxa típica de 10 ns/km), devido às diferentes velocidades associadas aos diversos modos de propagação na fibra óptica, por isso, a maioria dos sistemas de comunicação óptica utiliza fibras ópticas monomodo (AGRAWAL, 2010).

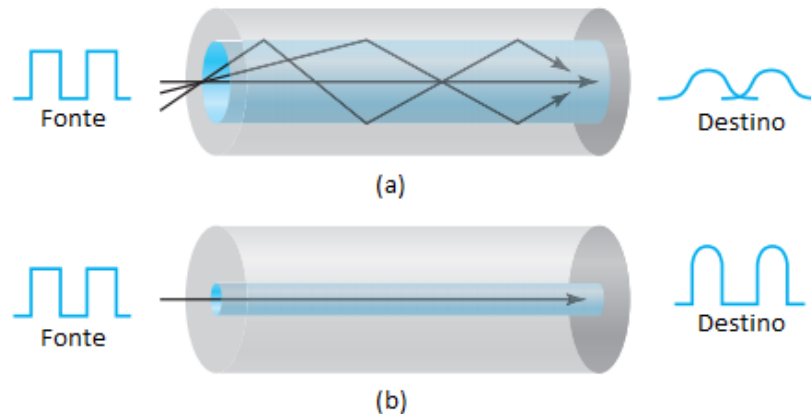
A fibra óptica é encontrada em backbones de redes de longas distâncias (monomodo) como em redes de curtas distâncias (multimodo) por apresentar excelente relação entre largura de banda e custo. Como vantagens, em relação ao cabo metálico (par trançado ou coaxial) é citado a largura de banda mais ampla e conseqüentemente suporta maiores velocidades de transferência de dados. Atualmente, as taxas de dados e a utilização da largura de banda através da fibra óptica não são limitados pelo meio de transmissão, mas sim, pelas tecnologias de geração e recepção de sinais disponíveis. Ainda como vantagens temos a menor atenuação do sinal e imunidade à interferência eletromagnética (FOROUZAN, 2007).

Figura 1 – Estrutura e confinamento da luz por reflexão interna total em fibras ópticas.



Fonte: (FOROUZAN, 2007)

Figura 2 – Modos de propagação na fibra óptica: (a) multimodo e (b) monomodo.



Fonte: (FOROUZAN, 2007)

### 2.2.2 Moduladores ópticos

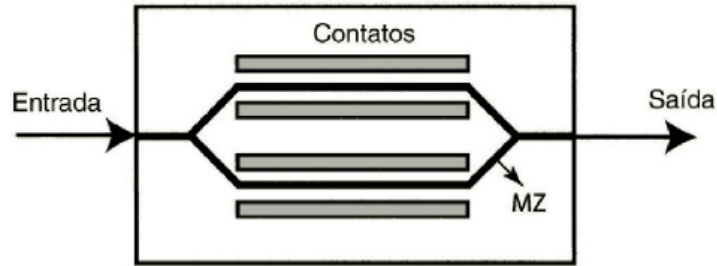
Os moduladores são produzidos com capacidade de realizar a modulação de uma portadora óptica por um sinal que contenha informações, chamado sinal modulante. Para estes dispositivos, se deseja alta velocidade, uma baixa perda de inserção, uma ampla largura de banda, uma alta razão de extinção e que não introduza as indesejáveis frequências de gorjeio no sinal.

O processo de modulação é capaz de alterar um dos parâmetros de uma onda senoidal adequando o sinal com o meio que será transmitido. Esta onda que transporta a informação é denominada portadora, o sinal que altera a propriedade desta portadora é denominado modulante (IEZEKIEL, 2009).

Os moduladores de fase, por exemplo são produzidos fazendo a incorporação de um guia de onda óptico à um substrato eletro-óptico. Realizando a aplicação de uma tensão a um eletrodo disposto em paralelo no guia de onda, aterrando-se um segundo eletrodo, cria-se um campo elétrico externo entre os eletrodos, isso provoca uma variação linear no índice de refração do guia de onda, alterando-se portanto a velocidade de propagação do sinal óptico. Então aplicando-se um campo elétrico adequadamente, é possível modular a fase do campo elétrico da portadora óptica de entrada, sem que seja feita nenhuma alteração na sua polarização, muito menos na sua intensidade. Sua estrutura básica é formada por eletrodos, guia de onda e substrato de niobato de lítio ( $\text{LiNbO}_3$ ), um cristal que é comumente utilizado na confecção de moduladores. Seu funcionamento está baseado na propriedade do  $\text{LiNbO}_3$  de alterar o índice de refração de acordo com o campo elétrico aplicado em sua estrutura e como consequência, alterar a fase da onda guiada (AGRAWAL, 2010).

A Figura 3 mostra, esquematicamente, uma configuração comum que usa um in-

Figura 3 – Estrutura de um interferômetro de Mach-Zehnder (MZI) de LiNbO<sub>3</sub> como modulador de fase.



Fonte: (AGRAWAL, 2010)

terferômetro de Mach-Zehnder (MZI) de LiNbO<sub>3</sub> para converter uma defasagem induzida por tensão em modulação de fase do sinal de entrada. O campo de entrada  $A_i$  é dividido em duas partes iguais e novamente recombinadas depois de diferentes defasagens serem impostas nelas por aplicação de tensões nos dois guias de onda que formam os braços de um Modulador Mach-Zehnder (MZM). Essas defasagens são expressas na forma  $\phi_j(t) = \pi V_j(t)/V_\pi$ , sendo  $V_j$  a tensão aplicada no  $j$ -ésimo braço ( $j = 1, 2$ ) e  $V_\pi$  a tensão necessária à produção de uma defasagem  $\pi$  (3 a 5 V). O campo na saída do MZM é  $A_o = (e^{j\phi_1} + e^{j\phi_2})/2$  e a função de transferência do modulador é

$$t_m = A_o/A_i = \cos\left(\frac{\phi_1 - \phi_2}{2}\right) e^{j\frac{\phi_1 + \phi_2}{2}}. \quad (2.2)$$

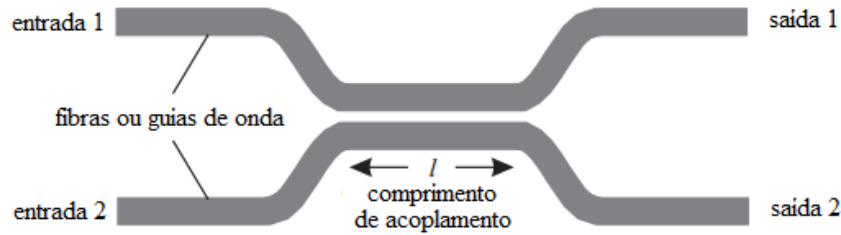
Em (2.2), se  $\phi_1 = \phi_2$ , o dispositivo mostrado na Figura 3 funciona como puro modulador de fase (AGRAWAL, 2010).

### 2.2.3 Acoplador óptico

Um acoplador direcional ou divisor de feixes (BS), é usado para combinar e dividir sinais em uma rede óptica. Um acoplador 2x2, por exemplo, consiste em duas portas de entrada e duas portas de saída, como é mostrado na Figura 4. Os acopladores mais comumente usados são feitos pela fusão de duas fibras juntas ao meio, são chamados de acopladores de fibra fundida (RAMASWAMI *et al.*, 2010).

Os acopladores também podem ser fabricados usando guias de onda em óptica integrada. Um acoplador 2x2, mostrado na Figura 4, uma fração,  $\cos^2(\kappa l)$ , da potência de entrada da porta 1 é transmitida para a saída 1 e o restante da potência da entrada 1,  $1 - \cos^2(\kappa l) = \sin^2(\kappa l)$ , é acoplada na porta de saída 2. Da mesma forma, uma fração da potência de entrada da porta 2,  $\sin^2(\kappa l)$ , é distribuída para a saída 1 e a potência restante,  $1 - \sin^2(\kappa l) = \cos^2(\kappa l)$

Figura 4 – Acoplador óptico direcional de quatro portas.



Fonte: (RAMASWAMI *et al.*, 2010)

para a saída 2. O parâmetro que define essa distribuição é denominado de razão de acoplamento ou índice de acoplamento (RAMASWAMI *et al.*, 2010).

Segundo (RAMASWAMI *et al.*, 2010) o campo elétrico na saída do acoplador  $E_0$  pode ser definido como uma função do campo elétrico de entrada  $E_i$ , do comprimento de fibra fundida  $l$ , da constante de propagação ( $\beta$ ) e do coeficiente de acoplamento por

$$\begin{bmatrix} E_{01}(f) \\ E_{02}(f) \end{bmatrix} = \exp^{-i\beta l} \begin{bmatrix} \cos(kl) & i\text{sen}(kl) \\ i\text{sen}(kl) & \cos(kl) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{i1}(f) \\ E_{i2}(f) \end{bmatrix}. \quad (2.3)$$

O acoplador pode ser projetado para ser seletivo no comprimento de onda ou independente do comprimento de onda em uma ampla faixa útil. Um acoplador é um dispositivo versátil e tem muitas aplicações em uma rede óptica, a aplicação mais simples é combinar ou dividir sinais na rede. Por exemplo, um acoplador pode ser usado para distribuir um sinal de entrada igualmente entre duas portas de saída, neste caso o comprimento do acoplamento é ajustado de forma que metade da potência de cada entrada aparece em cada saída, ou seja,  $\cos^2(\kappa l) = \text{sen}^2(\kappa l) = 1/2$  (RAMASWAMI *et al.*, 2010).

#### 2.2.4 Diodo laser

A radiação produzida por uma fonte tradicional de luz, como as lâmpadas incandescentes e fluorescentes ou por um Diodo Emissor de Luz (LED), é composta por fótons emitidos espontaneamente por átomos ou moléculas independentes no processo de emissão espontânea. Um sistema quântico passa de um certo nível de energia para outro de menor energia devido a flutuações aleatórias, em consequência, a fase do campo resultante varia aleatoriamente no espaço e no tempo, fazendo com que a radiação seja incoerente. Outro tipo de radiação é aquela produzida por um laser, nome adotado em português, para o dispositivo de amplificação por

emissão estimulada de radiação (do inglês *light amplification by stimulated emission of radiation*) (REZENDE, 2004).

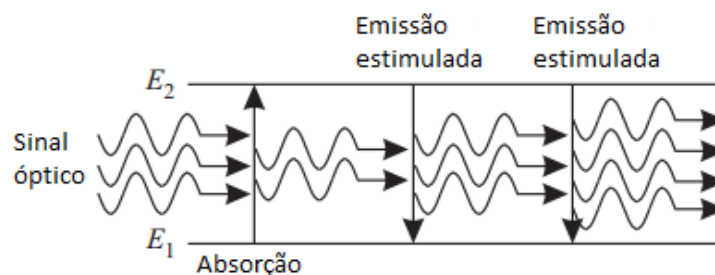
A radiação emitida por um laser resulta das emissões de átomos ou moléculas induzidas e estimuladas por um campo eletromagnético. Neste processo as fases dos campos dos fótons emitidos são correlacionadas e em consequência a radiação é coerente. Além de coerente, a radiação do laser é altamente monocromática, isto é, tem frequências numa estreita faixa do espectro. A intensidade depende do tipo de laser e da magnitude da excitação, podendo variar numa ampla faixa de valores. O desenvolvimento do laser de semicondutor operando à temperatura ambiente, feito no final da década de 1960 possibilitou uma revolução em comunicações ópticas (REZENDE, 2004).

### 2.2.5 Amplificador de fibra dopado com érbio

Em um amplificador óptico (EDFA, Amplificadores Raman (RA) e SOA) não precisa converter a luz em sinal elétrico para amplificá-la, ou seja, a luz é amplificada diretamente no domínio óptico, através de um processo de iteração fotônica, sendo gerado um sinal de frequência mais alta, chamada de onda de bombeamento e parte dessa onda se transfere para o sinal que está sendo transmitido, com isso, ocorre a possibilidade de construir enlaces de fibra óptica com centenas de quilômetros (km) de extensão sem a necessidade de regeneração do sinal (AGRAWAL, 2010).

Em alguns amplificadores considerados por este trabalho, o fenômeno físico chave por trás da amplificação do sinal é a emissão estimulada de radiação por átomos na presença de um campo eletromagnético, conforme mostrado na Figura 5.

Figura 5 – Emissão estimulada e absorção em um sistema com dois níveis de energias.

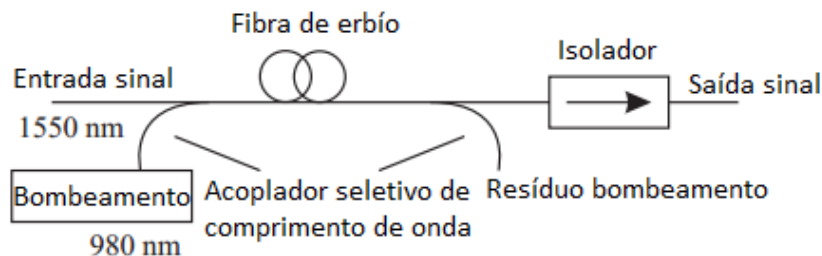


Fonte: (RAMASWAMI *et al.*, 2010)

A Figura 6 exibe a configuração básica de um EDFA que é formado por um laser de bombeamento, um acoplador de sinal para o sinal de bombeamento, isoladores e um pedaço de

fibra dopada com érbio. O isolador permite a passagem do sinal em um sentido e possui alta atenuação no sentido contrário, esse dispositivo é usado para reduzir a propagação do sinal de bombeamento pelo sistema, o érbio é um elemento químico pertencente ao grupo das terras raras que emite radiação luminosa na banda C de telecomunicações (THYAGARAJAN; GHATAK, 2007). Para que o processo de amplificação aconteça os íons de érbio devem ser excitados através de alguma fonte, para isso são utilizados os lasers de bombeamento, o comprimento de onda do laser de bombeamento depende do espectro de absorção do érbio, os comprimentos mais utilizados são 980 nm e 1480 nm (THYAGARAJAN; GHATAK, 2007).

Figura 6 – Estrutura de um amplificador de fibra dopada com érbio.



Fonte: (RAMASWAMI *et al.*, 2010)

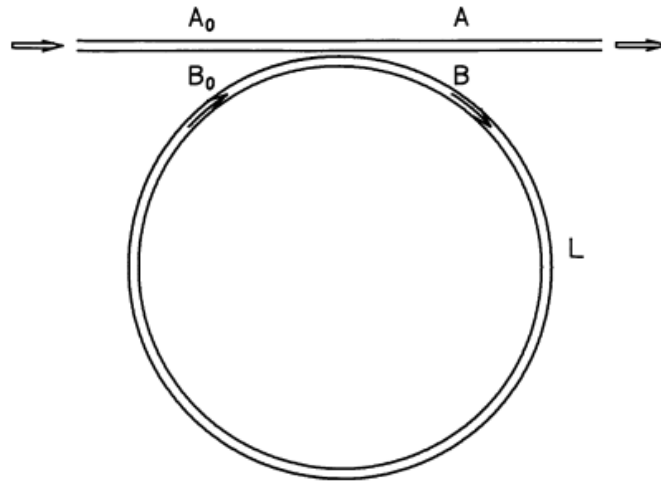
### 2.2.6 Ressonador em anel

Basicamente, como mostra a Figura 7, um ressonador óptico em anel (ORR - *Optical Ring Resonator*) é formado conectando-se uma das portas de saída de um acoplador 2X2, a uma das portas de entrada. Se o acoplador direcional tem uma constante de acoplamento em torno de 0,5 por exemplo, a luz confinada no anel passará da porta ( $B_0$ ) para a porta ( $B$ ) e continuará circulando. Similarmente, a luz introduzida na porta de entrada ( $A_0$ ) passará principalmente para a porta ( $A$ ).

Este tipo de dispositivo pode ser desenvolvido em uma variedade de tamanhos, com o comprimento do anel variando de metros a micrometros, podendo ser integrado em material semicondutor como defendido por (VAN T. A. IBRAHIM; HO., 2002) ou desenvolvido com fibra óptica convencional como apresentado em (HELBNER V. WONG; JACKSON., 2004), permitindo o estudo de suas propriedades de uma maneira sistemática. Com isso os ressonadores em anel têm-se destacado como dispositivos muito úteis em sistemas de comunicações ópticas.

Mais recentemente, muitas outras aplicações têm sido demonstradas utilizando ressonadores em anel, dentre elas pode-se destacar lasers (LIU; BOWERS., 2002) e (GAVRIE-

Figura 7 – Modelo de um ressonador óptico em anel.



Fonte: (OKAMOTO, 2006)

LIDES; MALOMED., 2004), dispositivos de chaveamento (VAN T. A. IBRAHIM; HO., 2002) e (DJORDJEV; DAPKUS., 2002), moduladores (GHEORMA; OSGOOD, 2002) e (RABIEI W. H. STEIER; DALTON., 2002), biosensores (BOYD; HEEBNER., 2001) e (BLAIR; CHEN., 2001), e conversores analógico-digital (GONCHARENKO A. K. ESMAN; PILIPOVICH., 2006).

Em (OKAMOTO, 2006) são apresentadas as relações de entrada e saída de um ressonador em anel óptico, mostrado na Figura 7, no estado estacionário sendo expressas por

$$A = (1 - \gamma)^{1/2} [A_0 \cos(\kappa L) - jB_0 \sin(\kappa L)], \quad (2.4)$$

e

$$B = (1 - \gamma)^{1/2} [-jA_0 \sin(\kappa L) + B_0 \cos(\kappa L)], \quad (2.5)$$

sendo  $\kappa$  o coeficiente do modo de acoplamento,  $L$  é o comprimento do acoplador e  $\gamma$  é o coeficiente de perda do acoplador. Nas Equações (2.4) e (2.5), assumimos que os guias de ondas de entrada e saída do ressonador têm a mesma constante de propagação  $\beta$ , a atenuação de intensidade do coeficiente do guia de onda do anel é  $B_0$  e expresso por

$$B_0 = B e^{-\left(\frac{\rho}{2} + j\beta\right)L}, \quad (2.6)$$

onde  $\rho$  é a perda de propagação. Assim a transmitância de amplitude do ressonador em anel óptico é então dada, a partir das Equações (2.4), (2.5) e (2.6), por

$$T = \frac{A}{A_0} = (1 - \gamma)^{1/2} \left[ \frac{\cos(\kappa L) - (1 - \gamma)^{1/2} e^{-\left(\frac{\rho}{2} + j\beta\right)L}}{1 - (1 - \gamma)^{1/2} \cos(\kappa L) e^{-\left(\frac{\rho}{2} + j\beta\right)L}} \right]. \quad (2.7)$$

O efeito de loop no ressonador também pode ser aprimorado com o uso de propriedades não-lineares de fibras especiais, como fibra altamente não linear e fibra de compensação de dispersão, ou outros meios não-lineares, como o amplificador óptico de semiconductor (SOA) ou amplificador de fibra dopada de érbio (EDFA), para aumentar o número de linhas (raias) no loop. Nesse caso, a mistura de quatro ondas (FWM) é o principal efeito não-linear desse processo (JINNO *et al.*, 2009).

### 2.3 Técnicas de geração de subportadoras

Existem diversas técnicas possíveis para gerar subportadoras, tais como, laser de modos travados, moduladores eletro-ópticos e cavidades ópticas.

Técnica como a do laser de modos travados tem como pré-requisito a estabilidade de alimentação e temperatura. Na técnica de geração baseada em moduladores eletro-ópticos, o modulador utilizado altera a amplitude, a fase ou a polarização de um sinal (portadora óptica) gerado por um diodo laser que trabalha em regime ininterrupto, sendo possível acrescentar mais moduladores ou circuitos ópticos em busca de conseguir um número maior de subportadoras. A geração das subportadoras pelos moduladores é feita de acordo com a frequência fornecida pelo gerador de rádio frequência, assim a frequência das subportadoras podem ser determinadas, fazendo a alteração diretamente no gerador de Rádio Frequência (RF).

Um sistema que se baseia em cavidade óptica se utiliza de um modulador eletro-óptico inserido no laço óptico buscando alcançar o que se define como estado ressonante. Essas técnicas vem ganhando mais interesse devido ao grande desenvolvimento alcançado pelos moduladores, principalmente em relação a potência, também ao desenvolvimento dos geradores de rádio frequências com baixíssimo ruído e com maior capacidade de alcançar altas frequências (COMPANY *et al.*, 2014). Ainda em relação aos moduladores, (IMRAN *et al.*, 2018) afirma que a intensidade das raias geradas pelos moduladores são regidas pelas funções de Bessel e pela ordem das raias, sendo que as raias de menor ordem, próximas a frequência central da portadora, possuem maior potência, enquanto as raias de maior ordem, distantes da frequência central, possuem menor potência.

Uma técnica de geração de subportadoras ópticas é a baseada em moduladores de Mach-Zehnder (MZM) e foi usado no sistema proposto em (HMOOD *et al.*, 2015) e foi capaz de gerar 51 raias. Moduladores de fase e de intensidade combinados podem ser usados para geração



OFC como em (METCALF *et al.*, 2013) que demonstrou um sistema que pode gerar de 60 a 73 raias de acordo com a frequência de modulação.

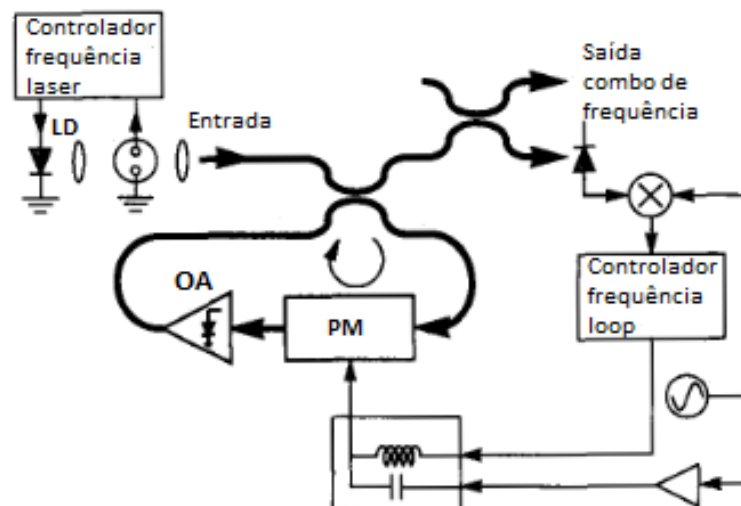
Esse trabalho usa a técnica baseada em laço de recirculação óptica que emprega um ressonador óptico em anel, conforme descrito na Secção 2.2.6, para geração de OFC, por isso, na Secção seguinte descreverá alguns sistemas baseados nessa técnica e os quais serão comparados com os sistemas propostos.

### 2.3.1 Geração de subportadoras baseado em laços de recirculação de fibra óptica

Esta técnica usa um modulador de fase (PM) para gerar bandas laterais no sinal óptico fornecido por uma fonte de laser (LD) de referência e foi proposta em (HO; KAHN, 1993). Cada vez que o sinal óptico passa pelo modulador, cria um combo de frequência composto de algumas raias. Assim, com várias passagens pelo modulador, as bandas laterais criam suas próprias raias e fazem com que o combo de frequências se alargue até que o sistema alcance seu estado estacionário.

A Figura 8 mostra o esquema desenvolvido em (HO; KAHN, 1993), neste é utilizado um modulador de fase (PM) acionado por um sinal de RF senoidal e um amplificador óptico (OA) colocado dentro de um loop de fibra óptica, de modo que a modulação é aprimorada por várias passagens pelo loop.

Figura 8 – Esquemático proposto em (HO; KAHN, 1993).



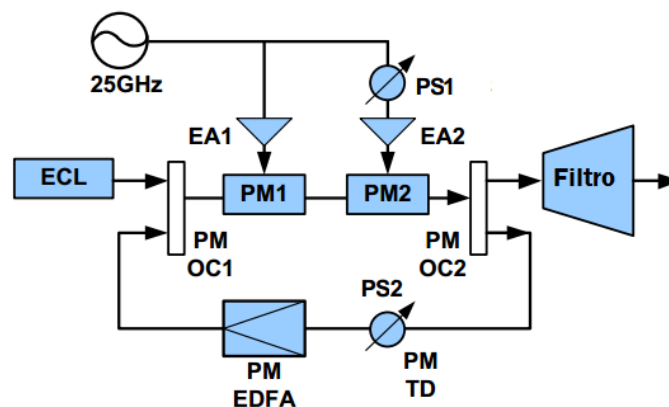
Fonte: (HO; KAHN, 1993).

Ainda em (HO; KAHN, 1993), segundo a análise feita, sugere que se pode obter centenas de frequências, espaçadas em intervalos regulares de GHz, com espaçamento de

frequência controlado por um oscilador de rádio frequência de precisão. Além disso, se a entrada do loop for derivada de um laser bloqueado em uma frequência absoluta de referência, então, cada uma das frequências de saída pode ter uma precisão absoluta que se aproxima daquela da entrada.

A Figura 9 mostra o sistema desenvolvido em (ZHANG *et al.*, 2011), onde o sinal gerado por um Laser de Cavidade Externa (ECL) é modulado por dois moduladores de fase (PM1 e PM2) em série, metade do sinal é filtrada e detectada enquanto a outra metade é amplificada e reinserida no sistema. Os dois moduladores foram cascadeados para aumentar o índice de modulação e dessa forma obter mais raias, além disso o autor utilizou divisores de feixes (OC1 e OC2), deslocadores de fase (PS1 e PS2), um EDFA, amplificadores elétricos (EA1 e EA2), tempo de atraso (TD), filtro e mantenedores de polarização. A Figura 10 mostra as 113 raias obtidas experimentalmente por (ZHANG *et al.*, 2011) a flutuação de potência (*flatness*) do sistema foi de 5 dB e a OSNR de 26 dB, o autor utilizou um EDFA com ganho de 21.5 dB e um ECL com 14.5 dBm de potência e 100 KHz de largura de linha.

Figura 9 – Sistema proposto em (ZHANG *et al.*, 2011).

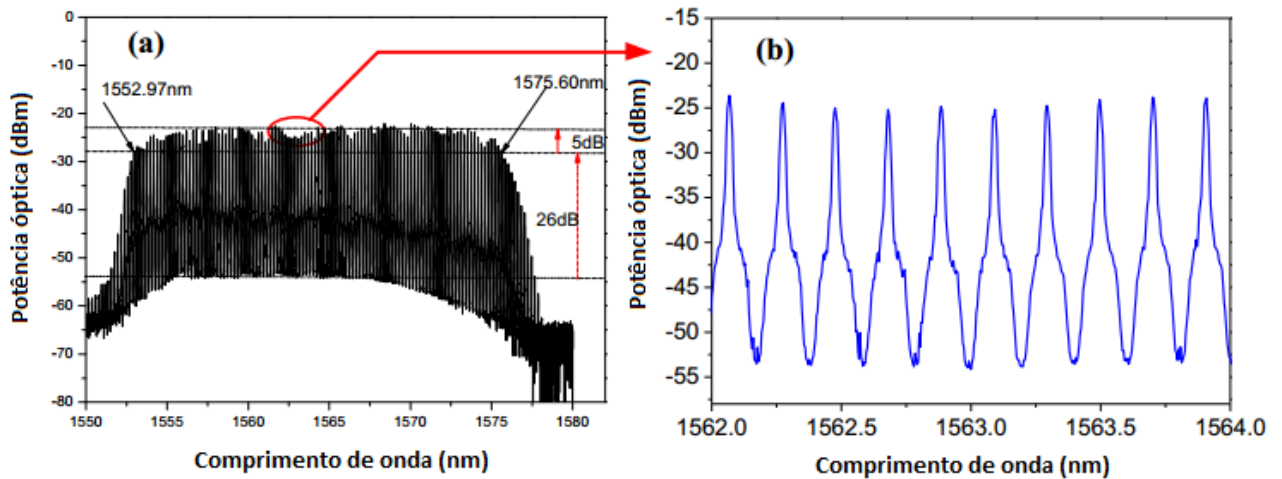


Fonte: (ZHANG *et al.*, 2011).

Em (COSTA; SILVA, 2018), como mostrado na Figura 11 é utilizado modulação de fase e realimentação óptica através de um loop amplificado, baseados no interferômetro de Mach-Zehnder assimétrico. Nesse sistema o sinal gerado por LD é dividido em dois no BS<sub>1</sub>, o sinal que segue no braço inferior direito é modulado por PM a uma frequência de 10 GHz, o sinal que segue pelo braço superior direito não sofre alteração, ambos sinais são superpostos e novamente divididos no BS<sub>2</sub>. O sinal que sai pelo braço superior direito do BS<sub>2</sub> é lido pelo OSA, enquanto o sinal que sai pelo braço inferior direito do BS<sub>2</sub> é modulado, amplificado e introduzido no braço inferior esquerdo do BS<sub>1</sub>. Para formar um gerador de subportadoras

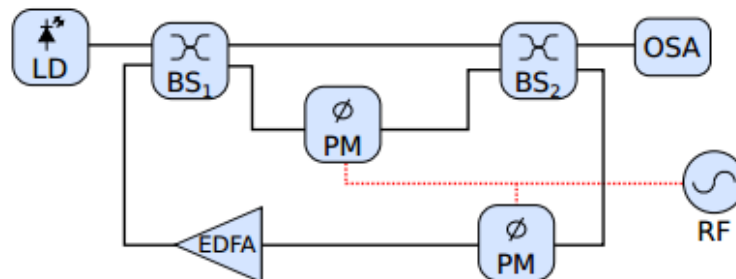
baseada em MZI com dupla modulação de fase e realimentação, foi utilizado dois PMs inseridos no laço de recirculação, ambos moduladores são alimentados em fase pelo mesmo gerador de RF. O sistema proposto em (COSTA; SILVA, 2018) gerou 93 raias com flutuação de potência de 14.5 dB e OSNR de 20 dB, como foi apresentado na Figura 12.

Figura 10 – Gráfico das raias geradas em (ZHANG *et al.*, 2011).



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

Figura 11 – Esquemático proposto em (COSTA; SILVA, 2018).

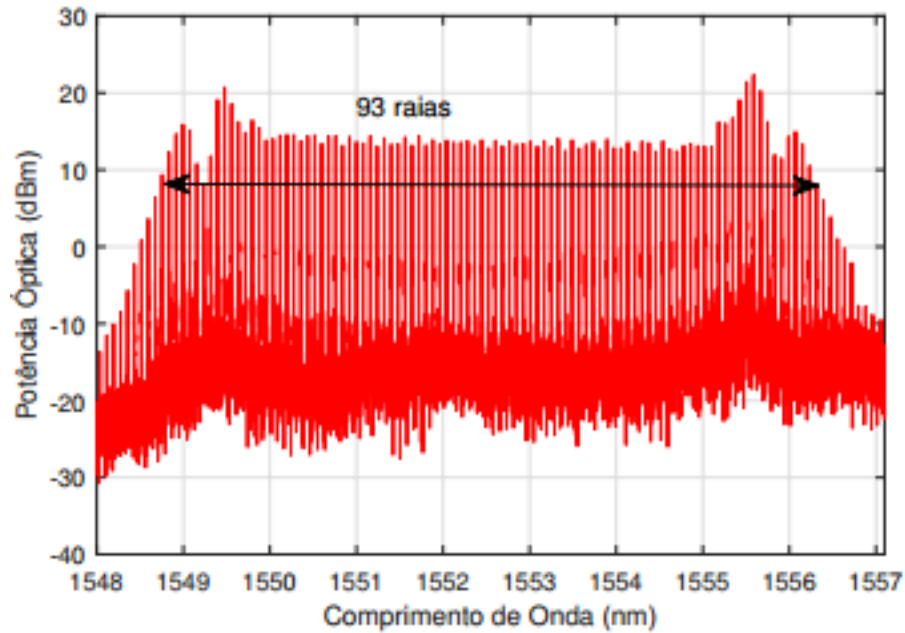


Fonte: (COSTA; SILVA, 2018).

Em (SANTOS *et al.*, 2019) um SOA foi utilizado experimentalmente e foi capaz de gerar 30 raias, espaçadas de 20 GHz. A Figura 13 mostra o aparato óptico utilizado em (SANTOS *et al.*, 2019), implementado com laser semente (LS), acoplador direcional (Coupler), controlador de polarização (PC), gerador de sinal de RF (GS), modulador de intensidade do tipo Mach-Zehnder (MZM), fonte de tensão de corrente contínua (DC), isolador (I), amplificador óptico (AMP), atenuador (AT), analisador de espectro óptico (OSA), chave óptica (Optical Switch).

A Figura 14 exibe as mais de 30 raias obtidas experimentalmente por (SANTOS *et al.*, 2019). Quando analisado com o loop aberto e fechado, neste caso os autores utilizaram

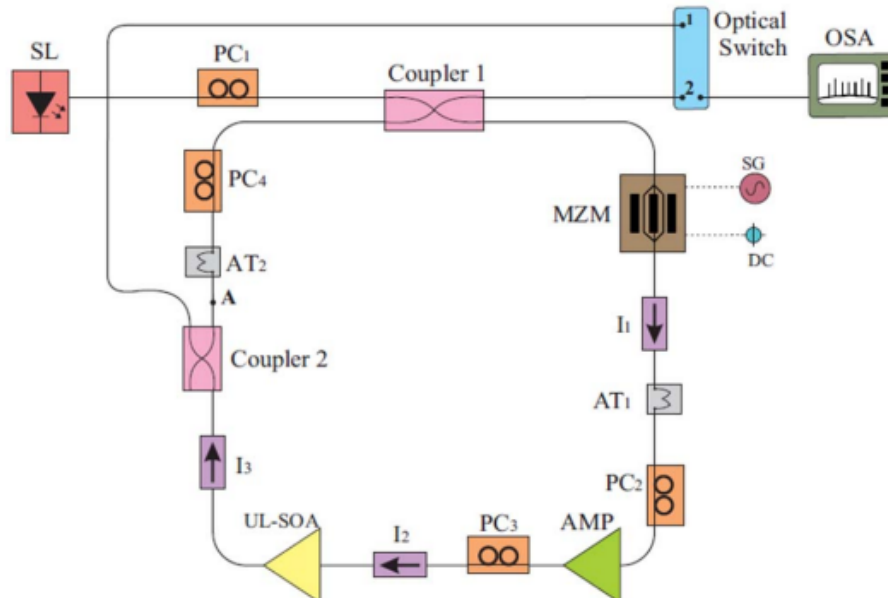
Figura 12 – Gráfico das raias geradas em (COSTA; SILVA, 2018).



Fonte: (COSTA; SILVA, 2018).

amplificador óptico a semicondutor ( SOA - *semiconductor optical amplifiers*) como meio não linear com uma onda de bombeamento (pump) de 240 mW de potência e espaçamento entre linhas em torno de 20 GHz operando com moduladores de Mach-Zehnder.

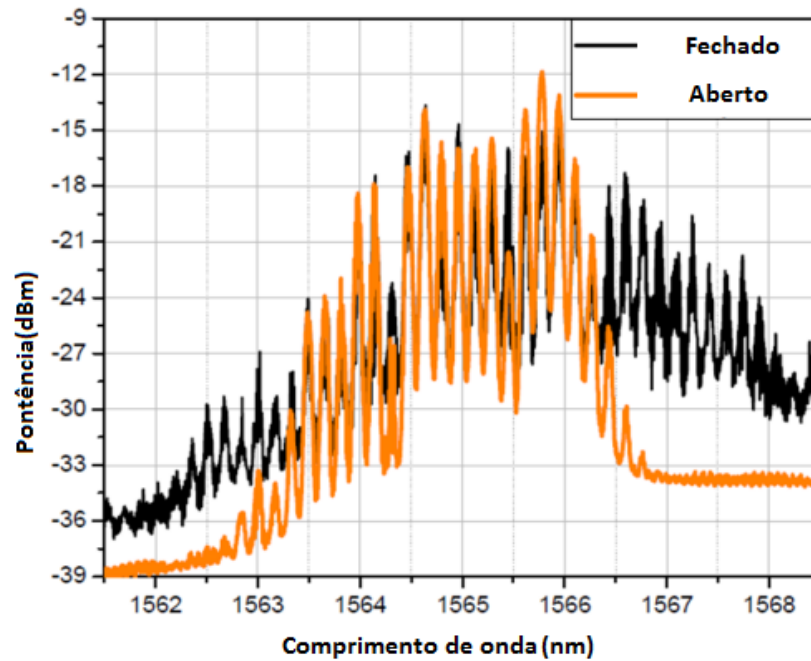
Figura 13 – Esquemático proposto em (SANTOS *et al.*, 2019).



Fonte: (SANTOS *et al.*, 2019).

Esta técnica também utiliza um esquema em formato de anel, baseado no princípio dos ressonadores ópticos, formado por fibra óptica, sendo que, em geral, um modulador óptico gera bandas laterais no sinal CW gerado por um diodo laser (LD - *laser diode*), com o número

Figura 14 – Gráfico das raias geradas em (SANTOS *et al.*, 2019).



Fonte: (SANTOS *et al.*, 2019)

de linhas do pente crescendo a cada ciclo de realimentação, até que uma condição de equilíbrio e/ou saturação se estabeleça. Para aumentar ainda mais o número de harmônicas em relação à portadora do laser semente que serve como fonte para o sistema, o laço de recirculação pode também fazer uso de propriedades não lineares de fibras especiais, como a fibra altamente não linear (HNLF – highly non-linear fiber) e a fibra compensadora de dispersão (DCF – dispersion compensating fiber), ou outros meios não lineares, como os amplificadores ópticos a semicondutor (SOA – *semiconductor optical amplifier*) como proposto por (SANTOS *et al.*, 2019).

### 3 SISTEMAS GERADORES DE SUBPORTADORAS ÓPTICAS

#### 3.1 Introdução

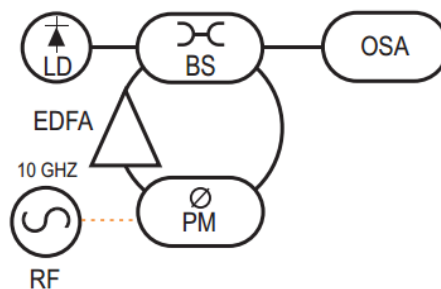
Neste Capítulo será apresentada a estrutura e o funcionamento dos três sistemas propostos baseados em (HO; KAHN, 1993). Estes sistemas que usam laços de recirculação óptica (loops) amplificados em série com modulação de fase e são capazes de gerar OFC que podem ser usados em redes ópticas elásticas (EON) que têm se mostradas candidatas promissoras devido ao uso mais eficiente do espectro do que as redes ópticas baseadas em DWDM.

O sistema OFC (Sistema I) proposto que é similar ao sistema apresentado em (HO; KAHN, 1993), também será utilizado como sistema de referência em comparação aos sistemas propostos e existentes na literatura quanto aos seguintes parâmetros de desempenho: número de subportadoras geradas, *flatness* e ONSR.

#### 3.2 Sistemas geradores de OFC propostos

O primeiro sistema proposto (Sistema 1), mostrado na Figura 15, utiliza um divisor de feixe (BS - *beam splitter*) de quatro portas balanceado, sendo as duas portas inferiores interconectadas através de uma fibra óptica monomodo (glsSMF) com um amplificador de fibra dopada com érbio (EDFA) cascadeado com um modulador de fase (PM - *phase modulation*), formando assim um laço óptico amplificado e modulado em fase.

Figura 15 – Sistema 1: sistema OFC baseado em um laço de recirculação óptico amplificado com modulação de fase.



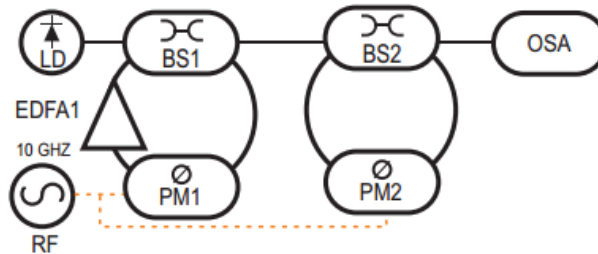
Fonte: elaborado pelo autor.

Na Figura 15, o sinal CW emitido por um diodo laser (LD - *laser diode*) é dividido em dois no BS, metade do sinal óptico é detectado pelo analisador de espectro óptico (OSA) e a outra metade é introduzido no laço óptico, sendo amplificado por um EDFA e modulado em fase com um sinal de RF senoidal de 10 GHz no PM, e é novamente introduzido no BS e sofre

interferência com sinal CW emitido pelo LD, repetindo infinitamente o processo devido o laço óptico.

O segundo sistema proposto (Sistema 2), mostrado na Figura 16, consiste de dois laços ópticos com modulação de fase em série e com amplificação óptica somente no primeiro laço óptico. Ambos PM's são alimentados pela mesma fonte RF. O funcionamento do segundo laço óptico é semelhante ao do Sistema 1, exceto a amplificação e o sinal que alimenta o segundo laço óptico é o sinal resultante do primeiro laço óptico, e a porta de saída superior do BS2 é conectada ao OSA.

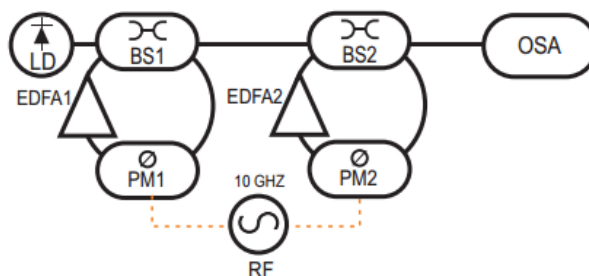
Figura 16 – Sistema 2: sistema OFC baseado em dois laços de recirculação óptico em série com modulação de fase e amplificação simples.



Fonte: elaborado pelo autor.

Já o terceiro sistema proposto (Sistema 3), mostrado na Figura 17, difere do Sistema 2 por apresentar um segundo EDFA (EDFA2) no segundo laço (loop) que é configurado com os mesmos parâmetros do primeiro (EDFA1). O funcionamento do Sistema 3 é semelhante ao do Sistema 2.

Figura 17 – Sistema 3: sistema OFC baseado em dois laços de recirculação óptico amplificados em série com dupla modulação de fase.



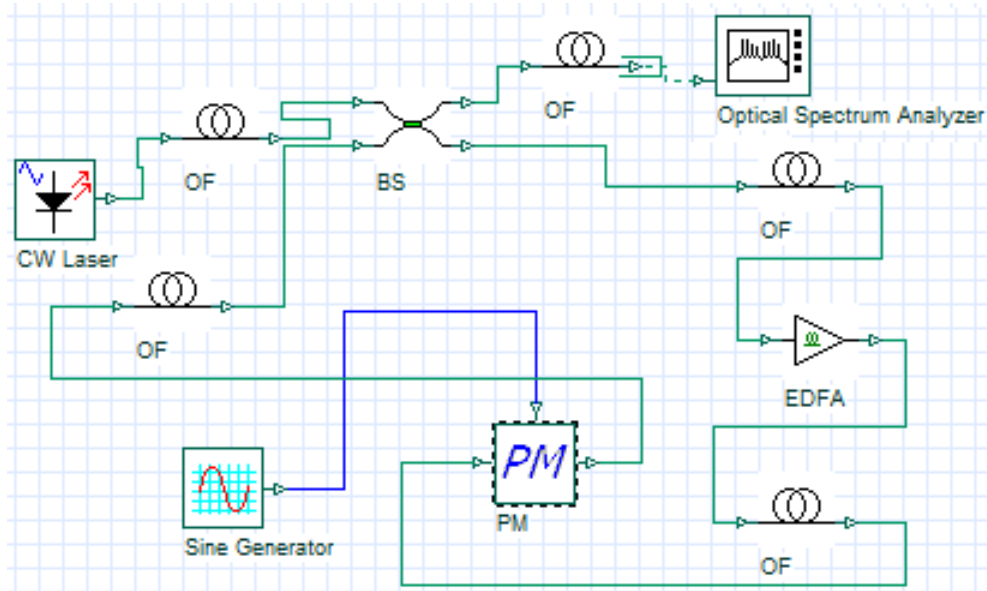
Fonte: elaborado pelo autor.

### 3.3 Metodologia

O software comercial utilizado para simulação dos sistemas propostos foi o *software OptiSystem*<sup>®</sup>, que possui uma vasta biblioteca de componentes ópticos e elétricos, podendo ser

utilizado para diversos tipos de simulação na área de comunicações ópticas. A descrição deste *software* é apresentada no Apêndice A. Um exemplo esquemático do Sistema 1 no *software* é mostrado na Figura 18 e onde é possível identificar cada dispositivo usado. No Apêndice B são apresentados exemplos de *layouts* dos sistemas propostos criados no *OptiSystem*<sup>®</sup>.

Figura 18 – Exemplo Esquemático do Sistema 1 no *OptiSystem*<sup>®</sup>.



Fonte: elaborado pelo autor.

O software foi pré-configurado para uma amostragem de 65536 pontos por iteração e foram realizadas 600 iterações e a partir destas obteve-se a potência média por comprimento de onda das últimas 200 iterações para cada sistema. A Tabela 1 exibe os parâmetros dos componentes utilizados na simulação de cada sistema proposto. Os sistemas foram projetados para serem implementados usando dispositivos ópticos de bancada, discretos. Para isso, o Sistema 1 foi simulado com fibra de 30 cm para interconectar cada dispositivo óptico, enquanto os Sistemas 2 e 3 usaram fibras de 45 cm cada.

Considerando o Sistema 1, pois tem a menor complexidade de hardware óptico em comparação com os outros sistemas propostos, é possível modelar matematicamente o campo elétrico de saída  $E_0$  emitido pelo LD usando a expansão Jacobi-Anger, que nos dá a forma das harmônicas das subportadoras (ZHANG *et al.*, 2012), como mostrado abaixo:

$$E_{out}(t) = E_0 e^{j2\pi f_c t} e^{j\pi R \sin 2\pi f_s t} = E_0 \sum_{n=1}^{\infty} \gamma^n J_n(\pi R) e^{j2\pi(f_c + n f_s)t}, \quad (3.1)$$

onde  $J_n(\pi R)$  é uma função de Bessel de primeira espécie de ordem  $n$ ,  $R$  é a taxa do sinal de RF



para meia onda,  $f_c$  frequência da portadora, frequência de amostragem  $f_s$  do RF e  $\gamma$  é o ganho introduzido pelo EDFA.

Tabela 1 – Parâmetros utilizados na simulação.

Identificação do Componente	Parâmetros	Valores	Unidade
Laser	Potência óptica	0	dBm
	Frequência	193.1	THz
	Largura de feixe	10	MHz
Modulador de fase	Frequência	10	GHz
	Acoplador óptico	Coefficiente de acoplamento	0,5
Fibra monomodo	Comprimento	30 e 45	cm
	Atenuação	0.2	dB/km
	EDFA	Potência da pump	10
	Comprimento	3	m
	Comprimento de onda	980	nm

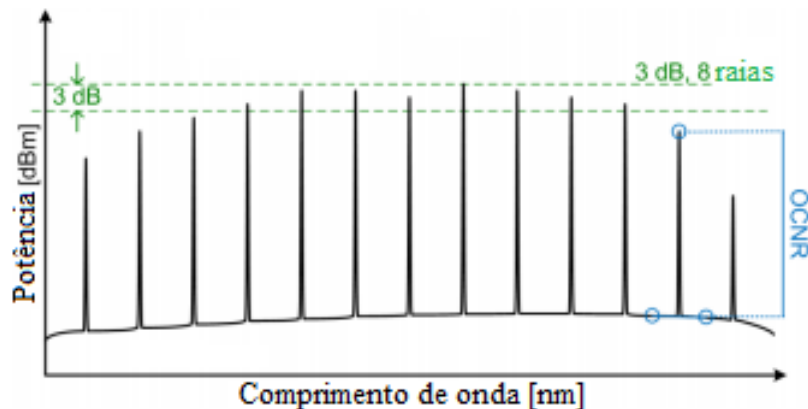
Fonte: elaborado pelo autor (2021).

O Apêndice B apresenta os esquemáticos e resultados de algumas amostras das simulações dos Sistemas 1, 2 e 3 que foram obtidas através do *software*.

### 3.4 Requisitos de desempenho

Foram considerados os seguintes requisitos para qualificação quanto ao desempenho dos sistemas propostos: número de raias geradas, *flatness* médio máximo de 10 dB e OSNR/OCNR médio de, no mínimo, de 30 dB. Esses parâmetros serão usados para comparar o desempenho dos sistemas propostos com os apresentados na literatura. E os resultados obtidos numericamente de cada sistema proposto será apresentado conforme mostrado na Figura 19: potência média de saída [dBm] por comprimento de onda [nm].

Figura 19 – Requisitos de desempenho dos sistemas propostos.



Fonte: (PFEIFLE, 2017)

Os sistemas propostos foram desenvolvidos com o objetivo de gerar o maior número de raias possíveis, todavia o número de raias não é o bastante para definir a qualidade do sistema, pois há aplicações que prioriza a *flatness* ao número de raias geradas, esta representa a flutuação de potência das raias geradas, portanto, quanto menor a variação de potência entre os picos de potência das raias melhor o *flatness*. Já a relação sinal-ruído óptica (Relação Sinal-Ruído Óptica (OSNR)) ou relação portadora-ruído óptica (OCNR) é um requisito que faz menção a diferença de potência entre os picos e o nível de ruído de cada raia.

## 4 RESULTADOS

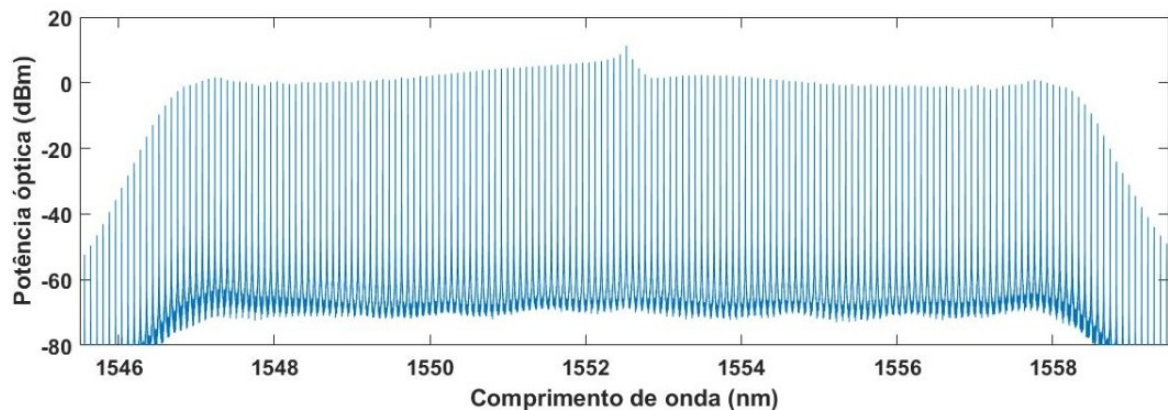
### 4.1 Introdução

Nesse Capítulo os resultados obtidos por cada sistema proposto são apresentados, analisados e comparados com os sistemas baseados em laços de recirculação existentes na literatura.

### 4.2 Sistema 1: sistema OFC baseado em um laço de recirculação óptico amplificado com modulação de fase

A Figura 20 mostra o comportamento da potência média das subportadoras geradas (raias) por comprimento de onda obtido na saída do Sistema 1. Foram geradas 123 raias com *flatness* média de potência de 2.8 dB e OSNR de 49 dB para uma potência de referência de saída de -1 dBm. As raias são espaçadas de 10 GHz obtendo uma largura de banda total em torno de 1.2 THz.

Figura 20 – Potência de saída média versus comprimento de onda do Sistema 1: OFC de 96 e 141 subportadoras com *flatness* de 2.4 e 3.4 dB e OSNR de 50 e 48 dB para potência média de saída de referência de 0 e -2 dBm, respectivamente.

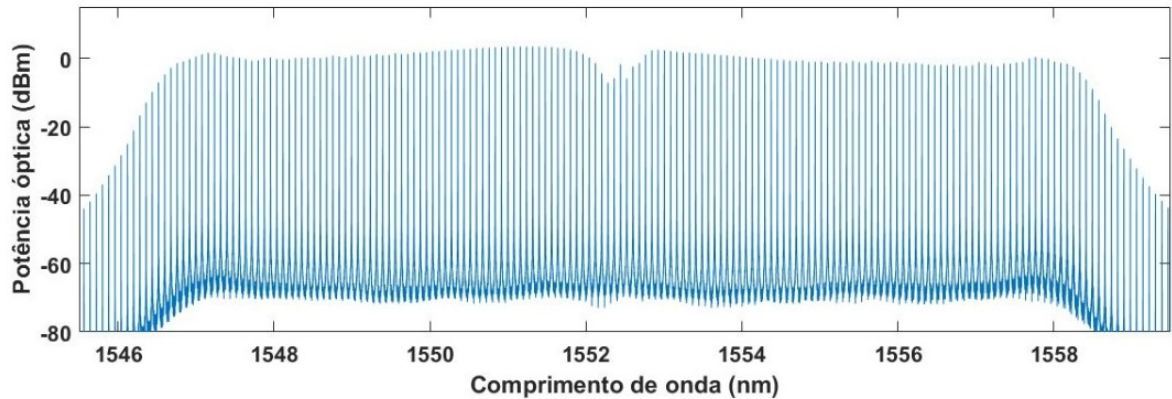


Fonte: elaborado pelo autor (2021).

### 4.3 Sistema 2: sistema OFC baseado em dois laços de recirculação óptico em série com modulação de fase e amplificação simples

A Figura 21 apresenta as raias geradas pelo Sistema 2. Foram geradas 101 raias, com *flatness* de 2,0 dB e OSNR de 54 dB para uma potência de saída de referência também de -1 dBm, com uma largura de banda total em torno de 1 THz.

Figura 21 – Potência de saída média versus comprimento de onda do Sistema 2: OFC de 101 subportadoras com *flatness* de 2.0 dB e OSNR de 54 dB para potência média de saída de referência de -1 dBm.

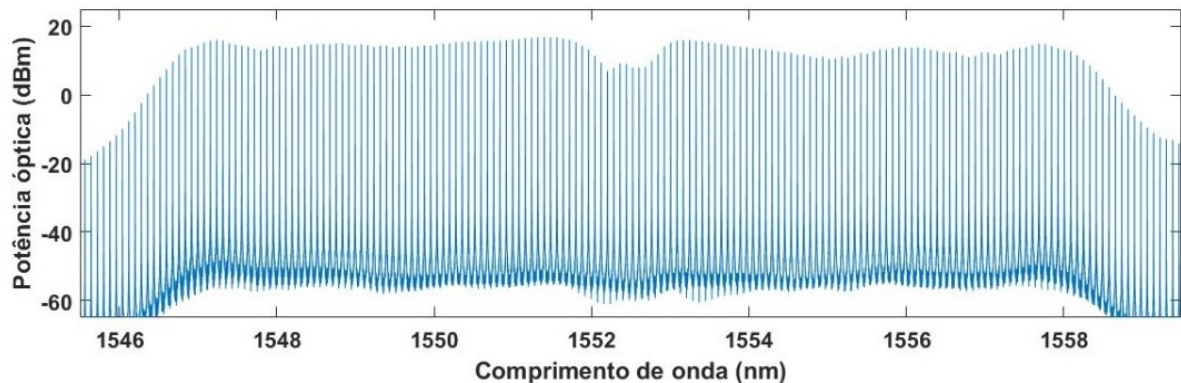


Fonte: elaborado pelo autor (2021).

#### 4.4 Sistema 3: sistema OFC baseado em dois laços de recirculação óptico amplificados em série com dupla modulação de fase

Na Figura 22, o Sistema 3 foi capaz de gerar 100 raias com flutuação média de potência de 1.7 dB e OSNR de 53 dB, as raias são espaçadas de 10 GHz, obtendo uma largura de banda total em torno de 1 THz.

Figura 22 – Potência de saída média versus comprimento de onda do Sistema 3: OFC de 100 subportadoras com *flatness* de 1.7 dB e OSNR de 53 dB para potência média de saída de referência de 13 dBm.



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

#### 4.5 Comparativo

O Sistema 1 é o sistema que tem a menor complexidade quando ao hardware óptico dos três sistemas analisados e obteve o maior número de raias geradas com uma *flatness* inferior

a 3 dB. Entretanto, o Sistema 3, que tem a maior complexidade óptica, apresentou melhor OSNR médio em comparação aos demais sistemas propostos.

O Sistema 3 se utiliza de um EDFA a mais que o Sistema 2, portanto disponibiliza suas raias com uma potência óptica maior, em torno de 13 dBm, como mostrado na Figura 22, contra -1 dBm da potência óptica das raias dos Sistemas 1 e 2.

A Tabela 2 mostra um quadro comparativo entre os sistemas propostos e os sistemas existentes na literatura que utilizam laço de recirculação quanto ao número de subportadoras geradas, *flatness* e OSNR médios. Nota-se na Tabela 2 que o Sistema 1 apresentou, numericamente, melhor desempenho entre os sistemas comparados quanto ao número de raias geradas, enquanto o Sistema 3 se destaca pela melhor *flatness* e o Sistema 2 pela maior OSNR. Em princípio, o Sistema 1 tem menor complexidade de hardware e custo em comparação com todos os outros sistemas.

Tabela 2 – Comparativo entre sistemas ópticos.

Sistemas geradores	Potência entrada	Número de raias	Espaçamento	<i>Flatness</i>	OSNR
1	0 dBm	123	10 GHz	2.8 dB	49 dB
2	0 dBm	101	10 GHz	2.0 dB	54 dB
3	0 dBm	100	10 GHz	1.7 dB	53 dB
ref (ZHANG <i>et al.</i> , 2011)	14.5 dBm	113	25 GHz	5 dB	26 dB
ref (COSTA; SILVA, 2018)	0 dBm	93	10 GHz	14.5 dB	20 dB
ref (SANTOS <i>et al.</i> , 2019)	11 dBm	30	20 GHz	-	-

Fonte: elaborado pelo autor (2021).

As características ideais de um sistema de geração de subportadoras dependem da aplicação, enquanto uma aplicação pode requerer um menor número de raias com uma flutuação média de potência baixa, outra pode requerer uma maior quantidade de raias sem altos requisitos de *flatness*.

Mais informações sobre o desempenho dos três sistemas propostos para outros limites de potência de saída são apresentados no Apêndice D.

## 5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foram propostos e analisados numericamente três sistemas para a geração de subportadoras ópticas baseadas em laços ópticos de recirculação amplificado em série com modulação de fase para banda C em comunicações ópticas. Os sistemas propostos podem obter dezenas de subportadoras, espaçadas em intervalos regulares de 10 GHz, com espaçamento de frequências controlado por um oscilador de radio-frequência de precisão.

Os três sistemas propostos foram capazes de gerar mais de 100 subportadoras com *flatness* inferior a 3 dB e OSNR superior a 40 dB. Todos os sistemas usaram um laser de 0 dBm e amplificador com uma onda de bombeio de 10 mW. O Sistema 1 se destacou pela simplicidade quanto ao aparato óptico em comparação aos demais sistemas propostos. Em comparação com outros sistemas existentes na literatura, os três sistemas propostos apresentaram as seguintes vantagens: menor complexidade de hardware óptico para implementação, mais subportadoras geradas e alto OSNR.

Como atividades e trabalhos futuros podemos citar:

- análise dos sistemas propostos com índice de acoplamento diferente de 0.5;
- análise com diferentes valores de RF;
- modelagem para fotônica integrada em silício.

## REFERÊNCIAS

- AGRAWAL. **Fiber-Optic Communication Systems: physics and effects**. [S. l.]: Wiley, 2010.
- ANTONIO, J.; RIBEIRO, J. J. Características da propagação em fibras Ópticas. 01 1999.
- BLAIR, S.; CHEN., Y. Resonant-enhanced evanescent-wave fluorescence biosensing with cylindrical optical cavities. **Appl. Opt.**, n. 40, p. 570–582, 2001.
- BOYD, R. W.; HEEBNER., J. E. Sensitive disk-resonator photonic biosensor. **Appl. Opt.**, n. 40, p. 5742–57471, 2001.
- COMPANY, T.; WEINER, V. .; ANDREW. Optical frequency comb technology for ultra-broadband radio-frequency photonics. **Laser Photonics Reviews**, v. 8, p. 368–393, 2014.
- COSTA, L. P. de S.; SILVA, J. B. R. Sistemas geradores de subportadoras Ópticas baseados em mzi com modulador de fase. **Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais**, Campina Grande, PB., v. 1, n. 36, p. 868–870, 2018.
- DJORDJEV, S. J. C. K.; DAPKUS., P. D. ertically coupled inp microdisk switching devices with electroabsorptive active regions. **IEEE Photon. Technol.**, n. 14, p. 1115–1117, 2002.
- FOROUZAN, B. A. **Data Communications and Networking**. [S. l.]: Avenue of the Americas, New York, 2007.
- GAVRIELIDES, A.; MALOMED., B. A. Stable regime of pulse generation in fiber rings with modulated dispersion and nonlinear outcoupling. **Opt. Commun.**, n. 241, p. 51–60, 2004.
- GHEORMA, I. L.; OSGOOD, R. M. Fundamental limitations of optical resonator based high-speed e o modulators. **IEEE Photon. Technol.**, n. 14, p. 795–797, 2002.
- GONCHARENKO A. K. ESMAN, V. K. K. I. A.; PILIPOVICH., V. A. Optical broadband analog-digital conversion on the base of microring resonator. **Opt. Commun.**, n. 257, p. 54–61, 2006.
- HELBNER V. WONG, A. S. R. W. B. J. E.; JACKSON., D. J. Optical transmission characteristics of fiber ring resonators. **IEEE J. Quantum Eletron.**, n. 40, p. 726–730, 2004.
- HMOOD, J. K.; EMAMI, S. D.; NOORDIN, K. A.; AHMAD, H.; HARUN, S. W.; SHALABY, H. M. Optical frequency comb generation based on chirping of Mach–Zehnder modulators. **Optics Communications**, v. 344, p. 139–146, 2015.
- HO, K.-P.; KAHN, J. M. Optical frequency comb generator using phase modulation in amplified circulating loop. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 5, n. 6, p. 721–725, 1993.
- IEZEKIEL, S. **Microwave photonics:: devices and applications**. [S. l.]: John Wiley Sons, 2009.
- IMRAN, M.; ANANDARAJAH, P. M.; KASZUBOWSKA-ANANDARAJAH, A.; N., S.; POTI, L. A survey of optical carrier generation techniques for terabit capacity elastic optical networks. **IEEE Communications Surveys Tutorials**, v. 20, p. 211–263, 2018.
- 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. **IEEE communications magazine**, v. 47, p. n° 11, 2009.

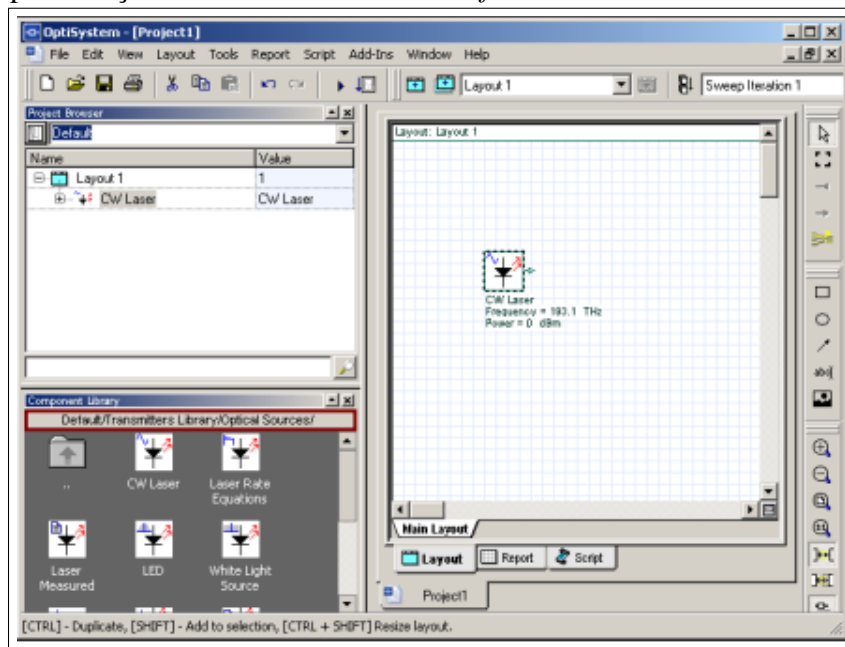
- LIU, A. S. B.; BOWERS., J. E. Wide tunable double ring resonator coupled lasers. **IEEE Photon. Technol.**, n. 14, p. 600–602, 2002.
- METCALF, A. J.; TORRES-COMPANY, V.; LEAIRD, D. E.; WEINER, A. M. High-power broadly tunable electro optic frequency comb generator. **IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics**, v. 19, p. 231–236, 2013.
- OKAMOTO, K. **Fundamentals of Optical Waveguides**. [S. l.]: Okamoto Laboratory Ltd, Japan, 2006.
- OPTIWAVE. Optiwave systems inc. **Home page**. Disponível em <https://optiwave.com>, 2021.
- PFEIFLE, J. **Terabit-Rate Transmission Using Optical Frequency Comb Sources**. [S. l.]: KIT Scientific Publishing, 2017. v. 20.
- RABIEI W. H. STEIER, C. Z. P.; DALTON., L. R. Polymer micro-ring filters and modulators. **J. Lightwave technol.**, n. 20, p. 1968–1975, 2002.
- RAMASWAMI, R.; SIVARAJAN, K. N.; SASAKI, G. H. **Optical networks: A practical perspective**. [S. l.]: Elsevier inc, 2010.
- REZENDE, S. M. **Materiais e dispositivos eletronicos**. [S. l.]: Editora da física, São Paulo, 2004.
- SANTOS, M. L. M. dos; HUANCACHOQUE, L.; PEREIRA, A. I. N. B.; NASCIMENTO, D. V. G.; BORDONALLI, A. C. Optical frequency comb generation using ultralong soa and different amplification methods in mzm-based optical fiber loops. In: **SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC) | 978-1-7281-3099-6/19/31.00©2019IEEE**. [S. l. : s. n.], 2019.
- THYAGARAJAN; GHATAK. **Classical Electrodynamics**. [S. l.]: Wiley, New York, 2007.
- VAN T. A. IBRAHIM, K. R. P. P. A. F. G. J. R. G. J. G. V.; HO., P.-T. All-optical nonlinear switching in gaas-algaas microring resonators. **IEEE Photon. Technol.**, n. 14, p. 331–333, 2002.
- ZHANG, J.; CHI, N.; YU, J.; SHAO, Y.; ZHU, J.; HUANG, B.; TAO, L. Generation of coherent and frequency-lock multi-carriers using cascaded phase modulators and recirculating frequency shifter for Tb/s optical communication. **OPTICS EXPRESS**, v. 19, p. 12891–12902, 2011.
- 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. **Lightwave Technology, IEEE**, v. 30, p. 3911–3917, 2012.



## APÊNDICE A – SOFTWARE SIMULADOR

O software *OptiSystem*<sup>®</sup> é uma ferramenta computacional da empresa *Optiwave Systems Inc.* utilizado nesse trabalho para realizar as simulações dos sistemas propostos. Segundo a empresa, o *software* atende às necessidades de cientistas de pesquisa, engenheiros de telecomunicações ópticas, integradores de sistema, alunos e uma grande variedade de outros usuários. Atende principalmente à demanda do mercado de fotônica, em evolução, com uma ferramenta de *design* de sistemas ópticos bastante completa. O simulador permite que os usuários planejem, testem e simulem no domínio do tempo e da frequência, projetos de redes óticas incluindo DWDM, transmissão de modo único e modo múltiplo, rádio sobre fibra (RoF), amplificadores EDFA e SOA, processamento de sinais elétricos e digitais totalmente ópticos, projetos de subsistemas de transmissores e receptores, formatos de modulação, análise de desempenho de sistemas através do diagrama de olho, fator  $Q$ , BER, potência do sinal, OSNR, estados de polarização e diagramas de constelação (OPTIWAVE, 2021). A Figura 23 apresenta um exemplo da interface inicial do *software* simulador.

Figura 23 – Apresentação da Interface inicial do *software*.



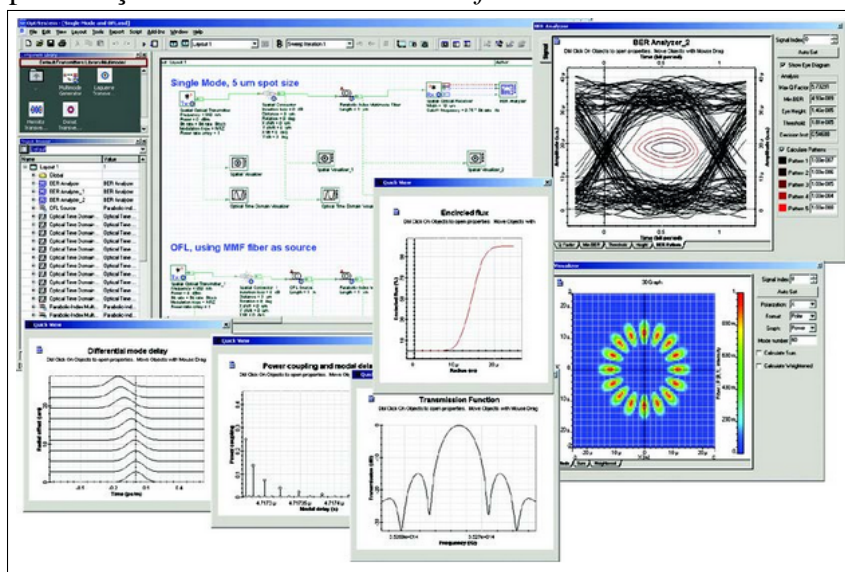
Fonte: (OPTIWAVE, 2021)

A biblioteca de componentes inclui centenas de componentes que permitem inserir parâmetros que podem ser medidos a partir de dispositivos. Integrando-se a equipamentos de teste e medição de diferentes fornecedores. Os usuários podem incorporar novos componentes com base em subsistemas e bibliotecas definidas pelo próprio usuário ou utilizar co-simulação

com uma ferramenta de terceiros, como MATLAB ou SPICE. O simulador permite também empregar as ferramentas de softwares da própria empresa fabricante, específicas para óptica integrada e para fibra óptica no nível de componentes e circuitos. Além de lidar com formatos de sinais mistos para sinais ópticos e elétricos na biblioteca de componentes e calcular sinais usando os algoritmos apropriados relacionados à precisão e eficiência da simulação. Para prever o desempenho do sistema, o *software* simulador calcula parâmetros como BER e Q-Factor usando análise numérica ou técnicas semi-analíticas para sistemas limitados por interferência entre símbolos e ruído (OPTIWAVE, 2021).

A Figura 24 apresenta as ferramentas de visualização que produzem sinal chirp, diagramas de olho, estado de polarização, diagramas de constelação entre outros. Também estão incluídas ferramentas de análise WDM que listam a potência do sinal, ganho, figura de ruído, e OSNR por canal.

Figura 24 – Apresentação dos visualizadores do *software*.



Fonte: (OPTIWAVE, 2021)

Através da interface de simulação, podem ser selecionadas portas de componentes para salvar os dados e conectar monitores após o término da simulação, isso permite que o usuário processe os dados após a simulação sem recalculá-los. Pode-se conectar um número arbitrário de visualizadores ao monitor na mesma porta. Além de fornecer modelos em diferentes níveis de abstração, incluindo os sistemas, subsistemas e níveis de componentes. O *software* simulador apresenta uma definição hierárquica de componentes e sistemas, isso permite que a simulação seja tão detalhada o quanto a precisão desejada. Pode-se ainda inserir expressões aritméticas para os parâmetros e criar parâmetros de forma global que podem ser compartilhados

entre componentes e subsistemas usando a linguagem *VB Script* padrão. O *script* também pode manipular e controlar o *software*, incluindo cálculos, criação de layout e pós-processamento. Uma interface do *software* controla a simulação, determinando a ordem de execução dos módulos dos componentes de acordo com o modelo de fluxo de dados selecionado. Uma página de relatório totalmente personalizável permite exibir qualquer conjunto de parâmetros e resultados disponíveis no desenho do projeto. Os relatórios produzidos são organizados em planilhas redimensionáveis e móveis, textos, gráficos 2D e 3D. Também incluem exportação de HTML e modelos com layouts de relatório pré-formatados. Além de fornecer uma Tabela de análise de custos do sistema que está sendo projetado, que pode ser organizada por sistema, layout ou componente e os dados de custo podem ser exportados para outros aplicativos ou planilhas (OPTIWAVE, 2021).

Podem ser criados muitos projetos usando o mesmo arquivo, o que permite criar e modificar projetos de forma rápida e eficiente. Cada arquivo de projeto pode conter várias versões de desenhos. As versões do projeto são calculadas e modificadas de forma independente, mas os resultados dos cálculos podem ser combinados em diferentes versões, permitindo a comparação dos projetos.

Assim o software oferece um completo conjunto de comunicação óptica e desenhos de projetos fotônicos para engenheiros de projetos ópticos e os principais recursos incluem:

- Uma biblioteca de transmissores que contém uma ampla seleção de fontes ópticas, pulso de sinal elétrico e óptico, moduladores ópticos, moduladores e codificadores elétricos e geradores de sinal multimodo. Os projetistas podem escolher entre modelos avançados baseados em física ou baseados em medição (empíricos) para modelar o comportamento estático e dinâmico de lasers semicondutores. Os modelos físicos incluem equações de taxa de laser multimodo 1D e 2D, proporcionando aos projetistas a capacidade de alternar entre modelos de taxa de laser em massa e o método de matriz de linha de transmissão.

- Uma biblioteca contém todos os blocos de construção necessários para modelar com precisão os subsistemas do receptor de comunicação óptica. Os componentes incluem regeneradores, equalizadores eletrônicos, detectores de limiar, circuitos de decisão para modulação, foto-detectores, demoduladores (frequência, amplitude de fase), decodificadores e conjuntos de ferramentas de processamento de sinal digital para sistemas coerentes de polarização única e dupla. Altamente parametrizado, os modelos de fibra óptica podem ser usados para caracterizar a propagação de sinal de modo único e multimodo, incluindo linear (dispersão), estocástica, e

deficiências não lineares (modulação de fase própria, e modulação de fase cruzada). Usando os componentes de fibra óptica bidirecional, é possível modelar e medir os efeitos de espalhamento.

- Um conjunto abrangente de modelos de amplificadores ópticos dinâmicos e de estado estacionário é fornecido, incluindo modelos avançados de fibra dopada para design detalhado de amplificador de fibra física; EDFA e EDFA caixa preta (espectro de ganho, medições de figura de ruído) para projeto de sistemas de rede WDM; modelos Raman dinâmicos e de média potência; e modelos de amplificador óptico de semiconductor 1D / 2D (equação de taxa concentrada, onda viajante). Amplificadores de domínio elétrico também são fornecidos para projetos de receptores (transimpedância, controle automático de ganho e aplicações de amplificação de limitação).

- As ferramentas de projeto de rede incluem modelos ideais e não ideais para switches ópticos, multiplexadores, demultiplexadores, guias de onda de matriz, conectores de fibra e emuladores.

- Uma variedade de filtros elétricos e ópticos são fornecidos para simulação de projetos de subsistemas e sistemas, incluindo funções de filtro padrão, filtros digitais, filtros periódicos, filtros reflexivos, filtros medidos e acústico-óptico.

- Uma ampla seleção de componentes passivos óticos e elétricos pode ser usada para construir uma variedade de projetos de componentes e subsistemas. Os dispositivos ópticos incluem atenuadores, acopladores, divisores e combinadores, controladores de polarização, refletores, torneiras, isoladores e circuladores. Dispositivos elétricos incluem acopladores híbridos de 180 e 90 graus, Bloqueadores, divisores e combinadores de energia, e linhas de transmissão RF. Modelos também são fornecidos para permitir que os projetistas usem dados medidos para caracterizar funções de transferência de dispositivos, incluindo matrizes de espalhamento de pequenos sinais e a matriz de Jones.

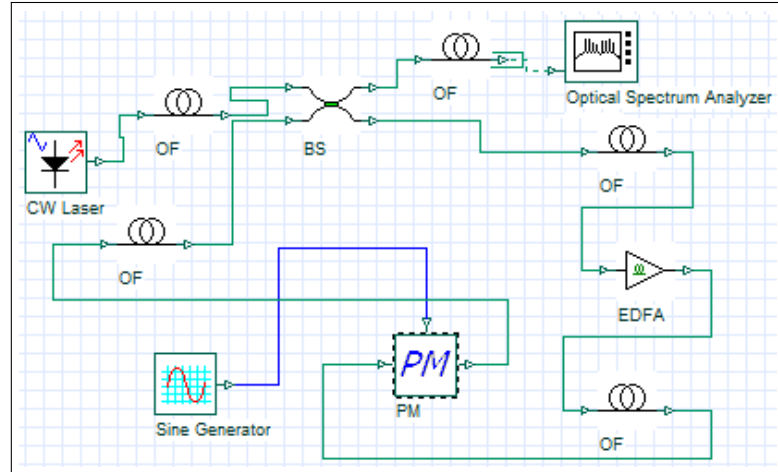
- Ferramentas de processamento de sinal são fornecidas para manipulação óptica, sinais elétricos e binários. Funções e operações incluem geradores de polarização, ganho, adição e subtração de sinal, normalizadores, diferenciadores e integradores elétricos, conversores serial-paralelo e paralelo-serial e operadores lógicos elétricos / binários.

- O *software* tem componentes especializados que podem modelar canais ópticos de espaço livre (características da antena, propagação atmosférica) e a análise espacial do acoplamento de sinal multimodo entre dispositivos (geradores multimodo, conectores espaciais, lentes finas, visualizadores espaciais) (OPTIWAVE, 2021).

Atualmente o *software* estar na versão 17.1 e a empresa lançou uma atualização, que estar em avaliação, para uma nova versão 18.0 do *OptiSystem*<sup>®</sup>.

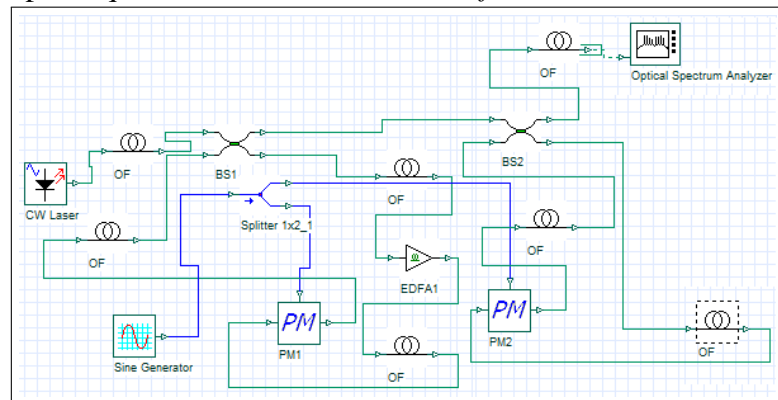
**APÊNDICE B – SISTEMAS PROPOSTOS - EXEMPLOS DE DIAGRAMAS  
ESQUEMÁTICOS GERADOS NO SOFTWARE.**

Figura 25 – Exemplo esquemático do Sistema 1 no *software*.



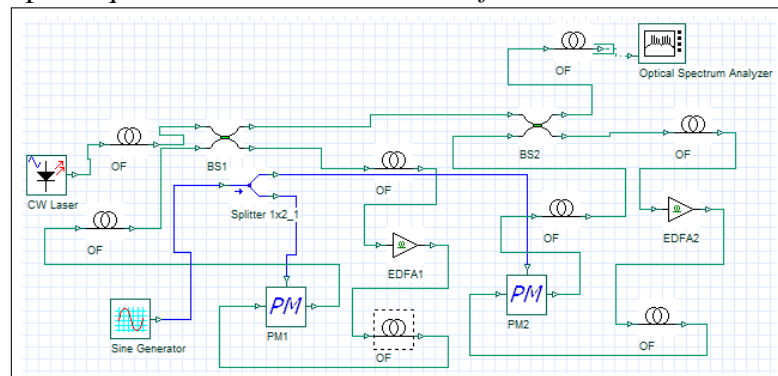
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 26 – Exemplo esquemático do Sistema 2 no *software*.



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

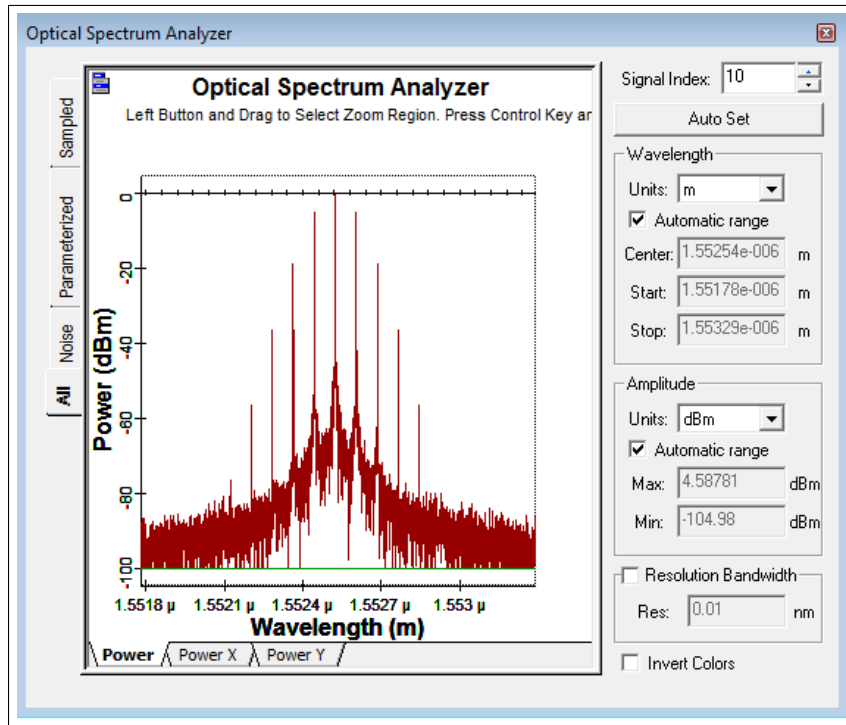
Figura 27 – Exemplo esquemático do Sistema 3 no *software*.



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

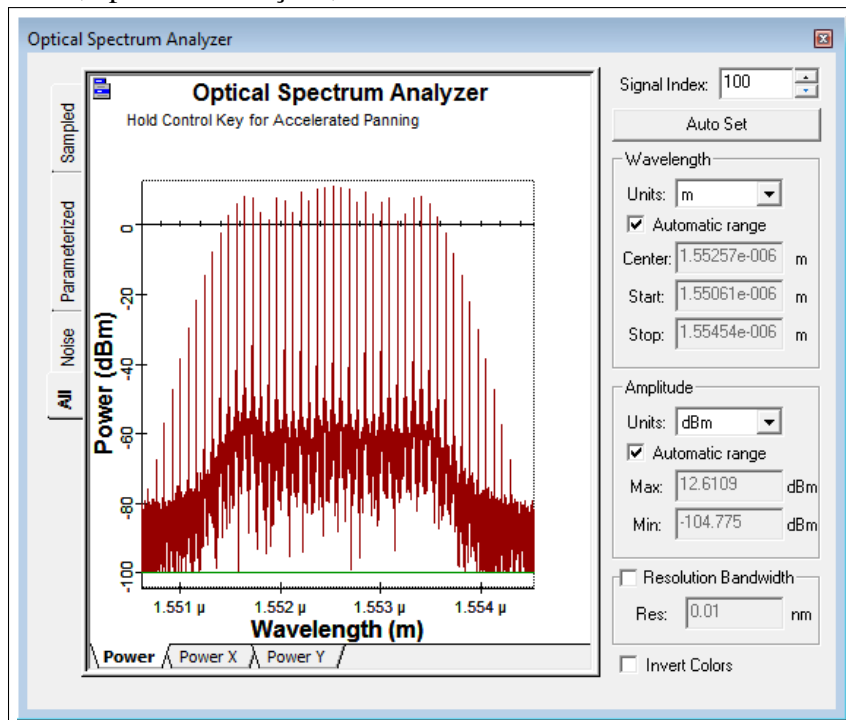
## APÊNDICE C – AMOSTRAS DAS SIMULAÇÕES DOS SISTEMAS PROPOSTOS NO SOFTWARE.

Figura 28 – Leitura, após 10 iterações, do Sistema 1 no OSA.



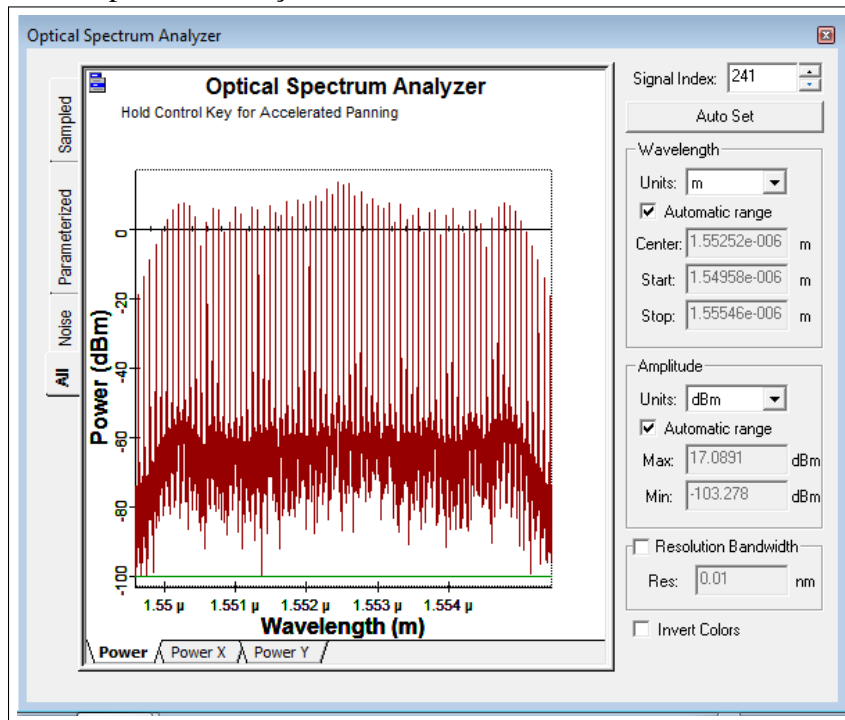
Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Figura 29 – Leitura, após 100 iterações, do Sistema 1 no OSA.



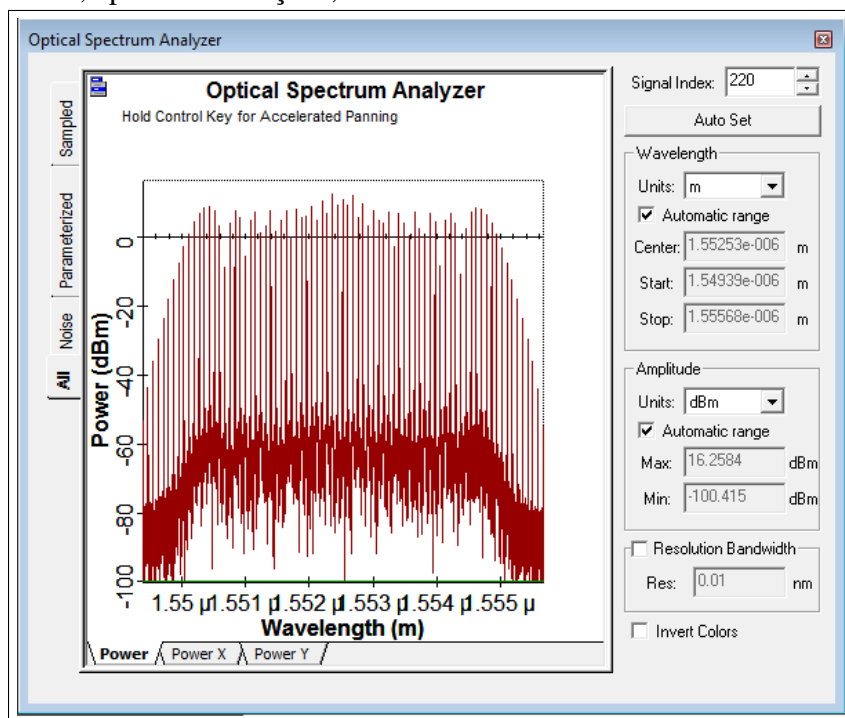
Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Figura 30 – Leitura, após 240 iterações, do Sistema 1 no OSA.



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Figura 31 – Leitura, após 200 iterações, do Sistema 3 no OSA.



Fonte: elaborado pelo autor (2021).



**APÊNDICE D – APRESENTA TABELAS QUE MOSTRAM OS NÚMEROS DE RAIAS, A OSNR, A *FLATNESS* E A POTÊNCIA ÓPTICA DAS RAIAS PRODUZIDAS PELOS SISTEMAS PROPOSTOS NAS SIMULAÇÕES.**

Tabela 3 – Comparativo entre os sistemas propostos

Sistema	Potência	N <sup>o</sup> de raias	<i>Flatness</i>	OSNR
1	-1 dBm	123	2.8 dB	49 dB
1	-2 dBm	141	3.4 dB	48 dB
2	-1 dBm	101	2.0 dB	59 dB
2	-5 dBm	144	5.2 dB	55 dB
3	13 dBm	100	1.7 dB	53 dB
3	5 dBm	149	8.4 dB	45 dB

Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Nota: Esses foram os dados utilizados no comparativo dos resultados.

Anotações: nas tabelas 4, 5 e 6 são apresentados os dados individuais de cada sistema

Tabela 4 – Resultados do Sistema 1

Potência	N <sup>o</sup> de raias	<i>Flatness</i>	OSNR
5 dBm	16	1.5 dB	55 dB
4 dBm	24	1.8 dB	54 dB
3 dBm	30	2.4 dB	53 dB
2 dBm	44	2.4 dB	52 dB
1 dBm	65	2.4 dB	51 dB
0 dBm	96	2.4 dB	50 dB
-1 dBm	123	2.8 dB	49 dB
-2 dBm	141	3.4 dB	48 dB
-3 dBm	144	4.3 dB	47 dB
-4 dBm	144	5.3 dB	46 dB
-5 dBm	146	6.2 dB	45 dB
-6 dBm	146	7.2 dB	44 dB
-7 dBm	148	8.1 dB	43 dB

Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Nota: Dados da simulação do Sistema 1 em diversos níveis de potência.

Anotações: Alguns valores de *flatness* com arredondamentos.

Tabela 5 – Resultados do Sistema 2

Potência	N <sup>a</sup> de raias	<i>Flatness</i>	OSNR
3 dBm	13	0.2 dB	63 dB
2 dBm	28	0.8 dB	62 dB
1 dBm	49	1.2 dB	61 dB
0 dBm	78	1.5 dB	60 dB
-1 dBm	101	2.0 dB	59 dB
-2 dBm	132	2.4 dB	58 dB
-3 dBm	141	3.3 dB	57 dB
-4 dBm	141	4.3 dB	56 dB
-5 dBm	144	5.2 dB	55 dB
-6 dBm	146	6.1 dB	54 dB
-7 dBm	147	7.0 dB	53 dB
-8 dBm	149	7.9 dB	52 dB

Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Nota: Dados da simulação do Sistema 2 em diversos níveis de potência.

Anotações: São apresentados os dados da simulação dos sistemas discretos.

Tabela 6 – Resultados do Sistema 3

Potência	N <sup>a</sup> de raias	<i>Flatness</i>	OSNR
13 dBm	100	1.7 dB	53 dB
12 dBm	114	2.4 dB	52 dB
11 dBm	130	3.0 dB	51 dB
10 dBm	135	3.9 dB	50 dB
9 dBm	140	4.7 dB	49 dB
8 dBm	143	5.6 dB	48 dB
7 dBm	-	- dB	- dB
6 dBm	-	- dB	- dB
5 dBm	149	8.4 dB	45 dB

Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Nota: Dados da simulação do Sistema 3 em diversos níveis de potência.

Anotações: Não foi possível aferir os dados para os níveis de potência em 6 e 7 dBm.

**ANEXO A – ARTIGOS PUBLICADOS**

**NOGUEIRA, José Danilo da Silva; FONSECA, João P. Neto; J. B. R. SILVA.** *Geração de Subportadoras Ópticas em Loops em Série e Modulação de Fase*. Publicado nos anais do 19<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica (SBMO), 14<sup>o</sup> Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo (SBMag), Niterói-RJ, Brasil, 8 a 12 de novembro de 2020, em formato virtual. [Acessado em 6 de Outubro de 2021] , pp. 67-70. Disponível em: <https://www.sbmo.org.br/evento/55/momag-2020>. Epub 29 de Janeiro de 2021. <https://drive.google.com/file/d/1awjFbTcPKIOPFysm7B4sbeM2LxB-AcKG/view?ts=602fbb6b>.

**NOGUEIRA, José Danilo da Silva, FONSECA, João Pinto da and 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 [online]. 2021, v. 20, n. 3 [Accessed 6 October 2021] , pp. 621-628. Available from: <https://doi.org/10.1590/2179-10742021v20i3254755>. E pub 29 Sept 2021. ISSN 2179-1074. <https://doi.org/10.1590/2179-10742021v20i3254755>.