



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

LUIS PAULO DE SOUSA COSTA

**SISTEMAS PARA GERAÇÃO DE SUBPORTADORAS ÓPTICAS BASEADOS EM
MZI COM MODULAÇÃO DE FASE**

FORTALEZA

2018

LUIS PAULO DE SOUSA COSTA

SISTEMAS PARA GERAÇÃO DE SUBPORTADORAS ÓPTICAS BASEADOS EM MZI
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

2018

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)

- C873s Costa, Luis Paulo de Sousa.
Sistemas Para Geração de Subportadoras Ópticas Baseados em MZI com Modulação de Fase / Luis Paulo de Sousa Costa. – 2018.
53 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Teleinformática, Fortaleza, 2018.
Orientação: Prof. Dr. João Batista Rosa Silva.
1. Geração de subportadoras. 2. Interferômetro de Mach-Zehnder. 3. Modulador de fase. I. Título.
CDD 621.38
-

LUIS PAULO DE SOUSA COSTA

SISTEMAS PARA GERAÇÃO DE SUBPORTADORAS ÓPTICAS BASEADOS EM MZI
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: 26 de julho de 2018.

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Dr. Fábio Alencar Mendonça
Instituto Federal do Ceará (IFCE)

Prof. Dr. Kléber Zuza Nóbrega
Instituto Federal do Maranhão (IFMA)

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

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. João Batista pela disponibilidade e orientação do meu mestrado.

Ao Prof. Dr. Rubens Viana pelas cobranças e incentivo.

Aos colegas do Grupo de Informação Quântica (GIQ) pelo companheirismo e colaboração.

Ao Instituto Federal do Ceará (IFCE) por disponibilizar a sua ferramenta computacional *Optisystem*.

A todas as pessoas que direta, ou indiretamente, contribuíram no desenvolvimento deste trabalho.

Por fim agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo financiamento da pesquisa de mestrado via bolsa de estudos.

RESUMO

Neste trabalho são propostas e analisadas numericamente quatro arquiteturas ópticas para geração de subportadoras baseados em interferômetro de Mach-Zehnder com realimentação e modulação de fase. Os dois primeiros sistemas possuem apenas um modulador de fase e conseguem gerar 47 e 61 subportadoras ópticas, com flutuação de potência de aproximadamente 7 e 12 dB, respectivamente. O primeiro sistema destaca-se ainda por apresentar 23 subportadoras com *flatness* de apenas 1,5 dB. Para alcançar um número maior de subportadoras um modulador é acrescentado no terceiro e quarto sistema, com isso o terceiro sistema produz 97 subportadoras com *flatness* de 7 dB, enquanto o quarto sistema gera 105 subportadoras com *flatness* de 13 dB. Os sistemas propostos foram pensados para fotônica integrada, contudo, simulações numéricas mostraram que estes também são viáveis em sistemas ópticos discretos. Todos os sistemas foram comparados com arquiteturas disponíveis na literatura, as vantagens e desvantagens dos sistemas serão discutidas no decorrer do trabalho, os sistemas podem ser aplicados em Rádio sobre Fibra e Redes Ópticas Elásticas.

Palavras-chave: Geração de subportadoras. Interferômetro de Mach-Zehnder. Modulador de fase.

ABSTRACT

In this work, four optical architectures are proposed and numerically analyzed for the generation of subcarriers based on Mach-Zehnder interferometer with feedback and phase modulation. The first two systems have only one phase modulator and can generate 47 and 61 optical subcarriers, with power fluctuations of approximately 7 and 12 dB, respectively. The first system still stands out because it has 23 subcarriers with flatness of only 1,5 dB. To achieve a greater number of subcarriers a second modulator is added in the third and fourth systems, so the third system produces 97 subcarriers with flatness of 7 dB, while the fourth system generates 105 subcarriers with flatness of 13 dB. The proposed systems were designed for integrated photonics, however, numerical simulations have shown that these are also feasible in discrete optical systems. All systems were compared with architectures available in the literature, the advantages and disadvantages of the systems will be discussed in the course of the work, the systems can be applied in Radio on Fiber and Elastic Optical Networks.

Keywords: Mach-Zehnder interferometer. Phase modulator. Subcarrier generation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Reflexão interna total na fibra.	15
Figura 2 – Absorção, emissão espontânea e emissão estimulada.	17
Figura 3 – Estrutura básica de um laser.	18
Figura 4 – Estrutura de um modulador de fase.	19
Figura 5 – Acoplador óptico de quatro portas.	21
Figura 6 – Estrutura básica do EDFA.	22
Figura 7 – Princípio funcionamento do EDFA.	23
Figura 8 – MZI de quatro portas.	23
Figura 9 – Geração de subportadoras baseado em MZMs cascadeados.	25
Figura 10 – Raias geradas por (HMOOD <i>et al.</i> , 2015).	26
Figura 11 – Geração de subportadoras baseado em PMs cascadeados.	27
Figura 12 – Raias geradas por (ZHANG <i>et al.</i> , 2012).	27
Figura 13 – Sistema proposto por (YAMAMOTO <i>et al.</i> , 2009).	28
Figura 14 – Raias geradas por (YAMAMOTO <i>et al.</i> , 2009).	29
Figura 15 – Sistema proposto por (METCALF <i>et al.</i> , 2013).	29
Figura 16 – Raias geradas por (METCALF <i>et al.</i> , 2013).	30
Figura 17 – Sistema proposto por (ZHANG <i>et al.</i> , 2011).	31
Figura 18 – Raias geradas por (ZHANG <i>et al.</i> , 2011).	31
Figura 19 – Parâmetros de qualidade das raias geradas pelos sistemas.	32
Figura 20 – Sistema 1: Geração de subportadoras baseada em MZI com modulação de fase e realimentação.	33
Figura 21 – Sistema 2: Geração de subportadoras baseada em MZI com modulação de fase e dupla realimentação.	34
Figura 22 – Sistema 3: Geração de subportadoras baseada em MZI com dupla modulação de fase e realimentação.	35
Figura 23 – Sistema 4: Geração de subportadoras baseada em MZI com dupla modulação de fase e dupla realimentação.	36
Figura 24 – Sistema 1 montado no <i>Optisystem</i>	36
Figura 25 – Leitura de uma iteração do Sistema 1 no OSA.	38
Figura 26 – Potência óptica por comprimento de onda do Sistema 1 com enlace de fibra de 3 mm.	39

Figura 27 – Raias de menor ordem do Sistema 1.	40
Figura 28 – Potência óptica por comprimento de onda do Sistema 2 com enlace de fibra de 4,5 mm.	40
Figura 29 – Potência óptica por comprimento de onda do Sistema 3 com enlace de fibra de 3 mm.	42
Figura 30 – Potência óptica por comprimento de onda do Sistema 4 com enlace de fibra de 4,5 mm.	43
Figura 31 – Potência óptica por comprimento de onda do Sistema 1 com enlace de fibra de 30 cm.	44
Figura 32 – Potência óptica por comprimento de onda do Sistema 2 com enlace de fibra de 45 cm.	45
Figura 33 – Potência óptica por comprimento de onda do Sistema 3 com enlace de fibra de 30 cm.	46
Figura 34 – Potência óptica por comprimento de onda do Sistema 4 com enlace de fibra de 45 cm.	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros utilizados na simulação.	37
Tabela 2 – Comparativo entre Sistemas 1 e 2.	41
Tabela 3 – Comparativo entre Sistemas 3 e 4.	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASE	Emissão Espontânea Amplificada
BS	Acoplador óptico
CW	Regime contínuo
EA	Amplificador elétrico
ECL	Laser de Cavidade Externa
EDFA	Amplificador de Fibra Dopada com Érbio
EON	Redes Ópticas Elásticas
FT	Filtro Gaussiano Invertido
IM	Modulador de Intensidade
LD	Diodo Laser
LED	Diodo Emissor de Luz
MMF	Fibra Multimodo
MZI	Interferômetro de Mach-Zehnder
MZM	Modulador Mach-Zehnder
OSA	Analisador de Espectro Óptico
OSNR	Relação Sinal-Ruído Óptica
PM	Modulador de Fase
PS	Deslocador de Fase
QoS	Qualidade de Serviço
RF	Rádio Frequência
SMF	Fibra Monomodo
WDM	Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	Introdução	15
2.2	Componentes dos sistemas	15
2.2.1	<i>Fibra óptica</i>	15
2.2.2	<i>Diodo laser</i>	16
2.2.3	<i>Modulação de fase</i>	18
2.2.4	<i>Acoplador óptico</i>	20
2.2.5	<i>Amplificador de fibra dopada com érbio</i>	21
2.2.6	<i>Interferômetro de Mach-Zehnder</i>	23
2.3	Técnicas de geração de subportadoras	24
2.3.1	<i>Geração de subportadoras baseada em MZM</i>	24
2.3.2	<i>Geração de subportadoras baseada em PM</i>	26
2.3.3	<i>Geração de subportadoras baseada em PM e IM</i>	29
2.3.4	<i>Geração de subportadoras baseada em cavidades ópticas</i>	30
2.4	Parâmetros de qualidade	32
3	SISTEMAS GERADORES DE SUBPORTADORAS	33
3.1	Introdução	33
3.2	Sistema 1: Geração de subportadoras baseada em MZI com modulação de fase e realimentação.	33
3.3	Sistema 2: Geração de subportadoras baseada em MZI com modulação de fase e dupla realimentação.	34
3.4	Sistema 3: Geração de subportadoras baseada em MZI com dupla modulação de fase e realimentação.	35
3.5	Sistema 4: Geração de subportadoras baseada em MZI com dupla modulação de fase e dupla realimentação.	35
3.6	Metodologia	36
4	RESULTADOS	39
4.1	Introdução	39
4.2	Análise comparativa dos sistemas milimétricos	39

4.3	Análise dos sistemas propostos para componentes discretos	43
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	47
	REFERÊNCIAS	48
	ANEXOS	48
	ANEXO A – Artigo Publicado	49

1 INTRODUÇÃO

É consenso que o crescente tráfego de vídeo na rede, gerado por serviços como *Netflix* e *YouTube*, aliado ao armazenamento em nuvem tem gerado um tráfego nas redes de comunicações ópticas que requer alta Qualidade de Serviço (QoS) dos provedores de internet. Dentre as diversas soluções propostas para esse problema podemos citar: aumento da taxa de transmissão de *transponders* WDM e o uso de Redes Ópticas Elásticas (EON).

Os *transponders* atuais trabalham com taxas de dados fixas de 10 Gb/s, 40 Gb/s e 100 Gb/s. Uma solução seria aumentar as taxas para 400 Gb/s e 1 Tb/s para dispor de mais largura de banda e melhorar a experiência do usuário que consome serviços de multimídia. Contudo, quanto maior o tamanho do *slot* de transmissão maior a possibilidade de desperdício, para transmitir 500 Gb em uma rede WDM seria necessário utilizar uma taxa de 1 Tb/s, deixando metade do *slot* em desuso. Redes Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda (WDM) possuem alocação fixa que não permite a utilização do espectro que não está sendo utilizado. Outra solução proposta na literatura é o uso de redes EON, estas são baseadas em pequenos *slots* que podem ser agrupados para obter um tamanho variável e permitem melhor alocação do sinal, reduzindo o tamanho da banda que não está sendo utilizada (IMRAN *et al.*, 2018; JINNO *et al.*, 2009).

Um dos blocos fundamentais de uma EON é um sistema responsável por gerar subportadoras ópticas. O gerador de subportadoras pode ser desenvolvido utilizando um vetor de lasers com comprimentos de ondas diferentes, solução simples, porém, onerosa e que requer maior controle no espaçamento entre subportadoras (raias). Outra possível solução é utilizar um laser ligado a um circuito óptico capaz de gerar um conjunto de raias ópticas igualmente espaçadas, para obtenção das subportadoras (IMRAN *et al.*, 2018).

Moduladores eletro-ópticos são amplamente empregados na geração de subportadoras, para isso o sinal gerado por um laser é modulado em polarização, fase ou amplitude, podendo ser empregados um, ou mais, moduladores e circuitos ressonantes para aumentar o número de raias geradas. Em (METCALF *et al.*, 2013) três Modulador de Fase (PM) são acionados de forma individual e sequencial, juntamente com um modulado de amplitude, para alcançar um número de raias que varia de 60 a 73 de acordo com a frequência utilizada. Moduladores *Mach-Zehnder* podem ser empregados na geração de subportadoras, em (HMOOD *et al.*, 2015) dois Modulador *Mach-Zehnder* (MZM) são cascadeados para gerar até 51 raias de acordo com o fator de *chirp* e *delay* entre os moduladores. Diferente dos MZMs os PMs não requerem

controle de polarização e possuem tamanho reduzido, vantagens para sua utilização em geração de subportadoras. (YAMAMOTO *et al.*, 2009) utiliza dois PMs com um meio dispersivo entre estes para gerar 61 raias, enquanto (ZHANG *et al.*, 2012) utiliza três PMs cascadeados, em dois estágios, para gerar 53 raias.

Nesta dissertação são propostos quatro sistemas para geração de subportadoras ópticas, os sistemas são baseados em Interferômetro de Mach-Zehnder (MZI) com realimentação utilizando um ou dois PM para a geração de subportadoras, para isso foram realizadas simulações computacionais que serão discutidas ao longo do trabalho juntamente com os resultados obtidos.

Esta dissertação foi estruturada em cinco capítulos. No Capítulo 2 são descritos aspectos conceituais referentes aos componentes que compõe os sistemas e algumas técnicas de geração de subportadoras que nortearam este trabalho. No Capítulo 3 são descritos os quatro sistemas propostos para geração de subportadoras e a metodologia utilizada para simulação destes. No Capítulo 4 os resultados obtidos pelos sistemas propostos serão analisados e comparados com arquiteturas existentes na literatura, por fim, as conclusões e trabalhos futuros serão apresentados no Capítulo 5.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Introdução

Para um bom entendimento dos sistemas propostos se faz necessário conhecer os dispositivos que os compõe e algumas das técnicas de geração de subportadoras que nortearam o trabalho. Neste capítulo serão apresentados os principais componentes utilizados nos sistemas, algumas técnicas de geração de subportadoras ópticas e os parâmetros utilizados para medição da qualidade das raias geradas pelos sistemas.

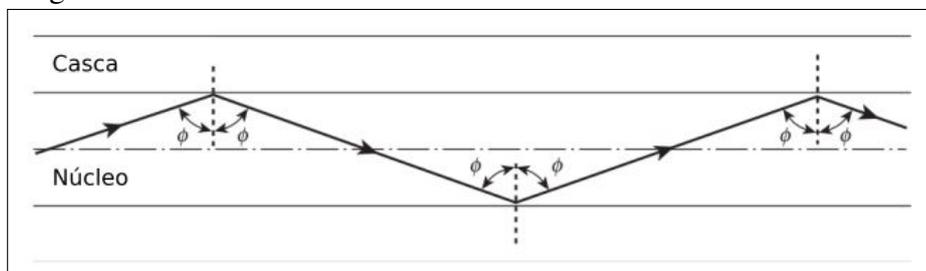
2.2 Componentes dos sistemas

Todos os sistemas propostos são constituídos de PM, Acoplador óptico (BS), Diodo Laser (LD) e Amplificador de Fibra Dopada com Érbio (EDFA). Para leitura das raias foi utilizado um Analisador de Espectro Óptico (OSA). Esta secção apresenta uma descrição dos componentes que compõe os sistemas.

2.2.1 Fibra óptica

A fibra óptica é um meio de transmissão dielétrico fundamental para as comunicações ópticas. Ela é constituída de núcleo e casca cilíndricos que permitem a condução da luz, por meio da reflexão interna total. A Figura 1 exibe um raio sendo guiado dentro de uma fibra por meio da reflexão interna total.

Figura 1 – Reflexão interna total na fibra.



Fonte: (SENIOR; JAMRO, 2009)

As fibras podem ser classificadas em Fibra Monomodo (SMF) ou Fibra Multimodo (MMF), na primeira o núcleo da fibra possui um diâmetro em torno de 8 a 10 μm , e transporta apenas o modo fundamental. As fibras MMF possuem um diâmetro maior, cerca de 50 a 85 μm , e permitem que o campo eletromagnético do sinal se distribua em mais direções, ou seja, possui

mais modos de propagação. Cada modo de propagação se propaga por um caminho diferente dentro da fibra, por consequência um sinal composto por vários modos sofre atrasos variados, efeito chamado dispersão intermodal, causando alargamento temporal do sinal.

Mesmo sendo um guia altamente utilizado a fibra apresenta alguns problemas como atenuação e dispersão. A atenuação está ligada à curvaturas, que causam alteração do ângulo de reflexão interna total, a absorção da potência luminosa pelo material, relacionado a presença e impurezas na fibra, e ao espalhamento, causado por pequenas imperfeições no processo de fabricação. A atenuação promove a perda de potência luminosa do sinal guiado.

A dispersão provoca um alargamento temporal do sinal, impedindo um melhor aproveitamento da banda de transmissão. Os principais tipos de dispersão são a intermodal e a cromática. O primeiro tipo acontece em fibra do tipo MMF, em que o sinal se propaga por múltiplos caminhos e chega com velocidades diferentes no receptor. A dispersão cromática acontece em ambos os tipos de fibra, contudo, por ser pequena frente a dispersão intermodal é dada mais importância nas fibras SMF, este tipo de dispersão acontece porque o sinal luminoso é composto por frequências diferentes que enxergam índices de refração diferentes e consequentemente velocidades diferentes.

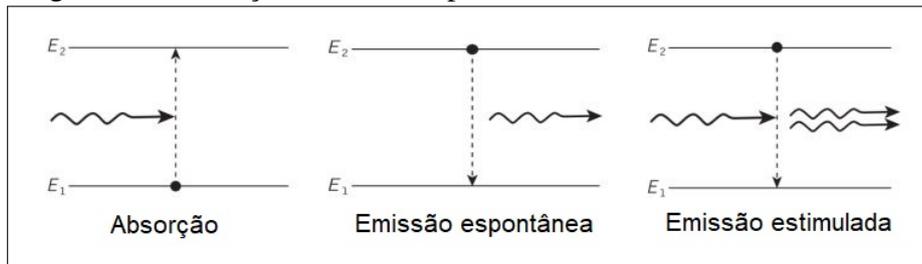
2.2.2 *Diodo laser*

A palavra laser é um acrônimo *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* que significa luz amplificada por emissão estimulada de radiação. A estrutura básica de um diodo laser semiconductor é formada pela junção de um material com concentração de elétrons, um material ativo e um material com concentração de lacunas, integrada a uma cavidade ressonante.

A Figura 2 exibe o processo de absorção de energia e as emissões espontânea e estimulada, na qual E_1 representa o nível de energia fundamental, E_2 um nível de energia excitado e entre estes há a banda proibida, onde não é permitido a permanência do elétron. Ao receber energia suficiente o elétron salta da banda de menor energia para a banda de maior energia, o elétron tende a retornar para o nível de menor energia, mas para isso deve devolver a energia recebida para o meio. Quando o elétron retorna para a banda de menor energia naturalmente, essa transição é chamada emissão espontânea. Quando o elétron é estimulado por uma radiação externa a liberar energia e retornar para um nível de menor energia, a transição é chamada emissão estimulada. Na emissão espontânea o elétron libera energia na forma de um fóton com

direção e fase aleatórias, ao passo que na emissão estimulada o fóton emitido possui a mesma fase e sentido que a radiação incidente. O Diodo Emissor de Luz (LED) é uma fonte de luz baseado no princípio da emissão espontânea, já o LD é uma fonte de luz baseado na emissão estimulada (AZADEH, 2009).

Figura 2 – Absorção, emissão espontânea e emissão estimulada.

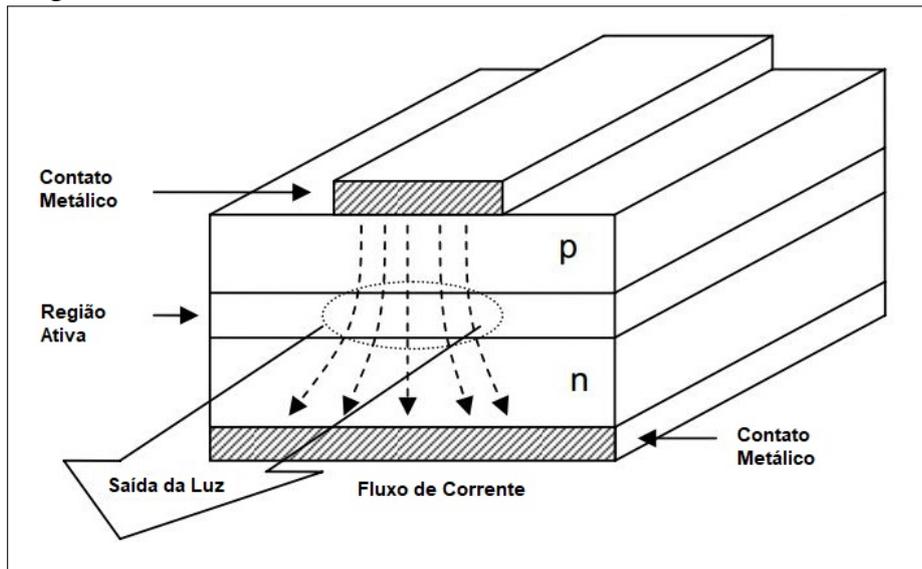


Fonte: (SENIOR; JAMRO, 2009)

Um requisito fundamental para funcionamento do laser é a inversão de população entre os níveis de energia envolvidos na emissão estimulada, ou seja, os elétrons estariam em uma banda de energia diferente em caso de equilíbrio térmico. É possível utilizar três bandas de energia para alcançar a inversão de população, a injeção de portadores estimula os elétrons a saírem do seu nível fundamental para o nível E_3 , o elétron tende a permanecer poucos instantes no nível E_3 e cair espontaneamente para o nível E_2 , o tempo de vida no nível E_2 deve ser longo para que o elétron possa interagir com um fóton. Dessa forma há mais elétrons no nível de energia E_2 que no estado fundamental (AZADEH, 2009).

A Figura 3 apresenta a estrutura de um laser, a injeção de portadores por corrente elétrica faz com que haja uma inversão de população, há muitos elétrons em um nível mais alto de energia, para favorecer a emissão estimulada, as faces do cristal são clivadas, funcionando como semi-espelhos, que confinam parte dos fótons e aumentam a probabilidade de colisão, dessa forma é gerada uma luz potente e de largura de linha estreita.

Figura 3 – Estrutura básica de um laser.



Fonte: (AZADEH, 2009)

O campo elétrico normalizado gerado por um laser CW pode ser definido por (SEIMETZ, 2009):

$$E_{cw}(t) = \sqrt{P_s + \delta P(t)} \exp^{j(\omega_s t + \varphi_s + \varphi_{ns}(t))} e_s. \quad (2.1)$$

Onde P_s representa a amplitude do campo, ω_s a frequência, φ_s a fase inicial, e_s a polarização da portadora. $\delta P(t)$ e φ_{ns} representam a flutuação de intensidade e a flutuação de fase causados pela emissão espontânea.

2.2.3 Modulação de fase

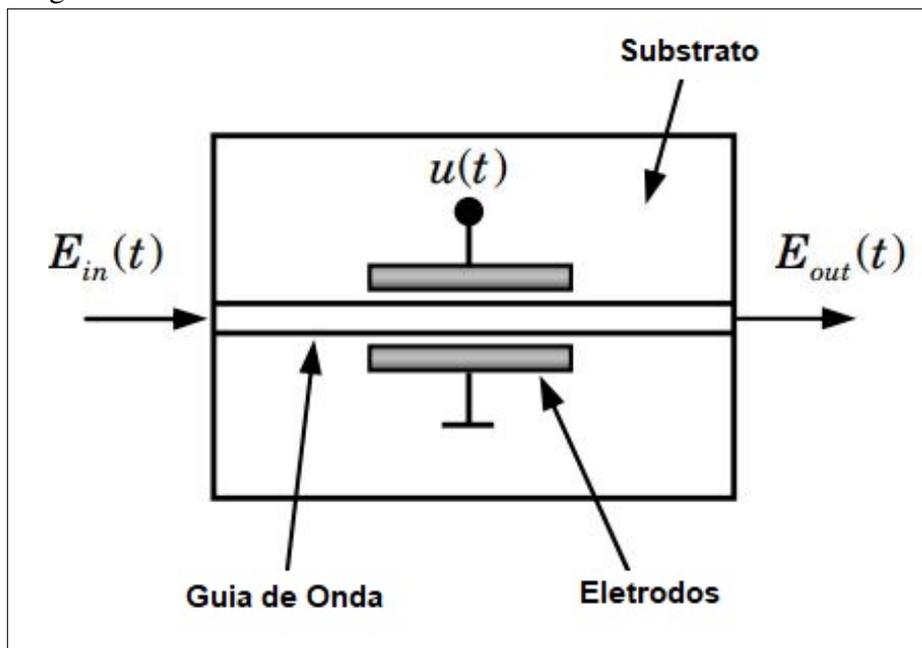
A modulação analógica consiste em alterar um dos parâmetros de uma onda senoidal, com o objetivo de adequar o sinal com o meio de transmissão. A onda que leva a informação é chamada de portadora, o sinal que altera a propriedade da portadora é chamado de modulante.

Um LD pode usar modulação direta ou externa, na modulação direta o sinal de Rádio Frequência (RF) é introduzido diretamente no LD alterando a intensidade da corrente que alimenta o LD, uma técnica simples e barata, usada até hoje. Contudo, há limitação da frequência que pode ser utilizada para modular o LD, tipicamente valores até 30 GHz, pois oscilações maiores impedem que o LD chegue a seu estágio estacionário, com isso o LD passa a inserir maior flutuação sobre a frequência central, aumentando a largura do espectro significativamente (IEZEKIEL, 2009).

Na modulação externa o laser opera em regime contínuo, seu sinal luminoso é modulado por um dispositivo externo, eliminando o alargamento produzido pela modulação direta e aumentando o custo por necessitar de mais um dispositivo. Apesar de aumentar o custo o modulador externo se mostra necessário para uso de frequências superiores a 30 GHz e melhor controle da portadora óptica. A modulação externa pode ser em fase, intensidade ou polarização (IEZEKIEL, 2009).

A Figura 4 mostra a estrutura básica de um PM, ele é formado por eletrodos, guia de onda e substrato de niobato de lítio (LiNbO_3), cristal comumente empregado na confecção de moduladores. O funcionamento é baseado na propriedade do LiNbO_3 de alterar seu índice de refração de acordo com o campo elétrico aplicado em sua estrutura e por consequência alterar a fase da onda guiada (AGRAWAL, 2010).

Figura 4 – Estrutura de um modulador de fase.



Fonte: (SEIMETZ, 2009)

A variação de fase do sinal $\varphi_{PM}(t)$ está relacionada com o tamanho do eletrodo (l_{el}), com a mudança do índice de refração efetivo ($\Delta n_{eff}(t)$) e com o comprimento de onda da luz guiada (λ). Considerando apenas o efeito eletro-óptico a variação do índice de refração do modulador pode ser considerada linearmente dependente da aplicação de um campo elétrico $u(t)$ (SEIMETZ, 2009), dada por:

$$\varphi_{PM}(t) = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n_{eff}(t) l_{el} \sim u(t). \quad (2.2)$$

O campo elétrico na saída do modulador de fase pode ser definido como

$$E_{out}(t) = E_0 \exp(j\pi \frac{V_d}{V_\pi}), \quad (2.3)$$

onde V_d representa o sinal modulante e V_π a tensão de meia onda do PM. Considerando o sinal de entrada no modulador contínuo $E_{in} = E_0 \exp(j2\pi f_c t)$ e o sinal do gerador de RF descrito por $V_d = RV_\pi \sin(2\pi f_s t)$, temos:

$$E_{out}(t) = E_0 \exp(j2\pi f_c t) \exp(j\pi R \sin(2\pi f_s t)). \quad (2.4)$$

Em que f_c é a frequência da portadora, f_s é a frequência do gerador de RF e R é o índice de modulação. Aplicando a expansão de Jacobi-Anger o sinal de saída do modulador pode ser expresso como

$$E_{out} = E_0 \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(\pi R) \exp[j2\pi(f_c + n f_s)], \quad (2.5)$$

onde $J_n(\pi R)$ é uma função de Bessel de primeira espécie de ordem n . Observa-se em (2.5) que o sinal gerado possui raias com frequência $f_c + n f_s$, com $n = \pm 1, \pm 2, \dots$. Devido a limitação de potência, a medida que as raias se afastam da frequência da portadora a potência diminui (ZHANG *et al.*, 2012).

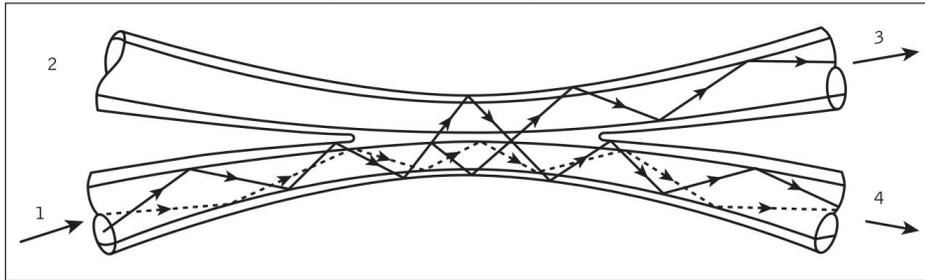
2.2.4 Acoplador óptico

Em muitos sistemas é necessário dividir ou superpor sinais óptico, o acoplador óptico é um dispositivo passivo utilizado para este propósito, altamente empregado em sistemas de comunicações óptica, pode ser construído fundindo paralelamente o núcleo de duas fibras e pode ter três ou mais portas. A Figura 5 mostra um dispositivo de quatro portas, construído a partir da fusão de duas fibras, o diâmetro da secção transversal das fibras é reduzido depois aumentado de forma gradual para que o parte da energia que se propaga por um dos braços passe para o outro braço (RIBEIRO, 2009).

O campo elétrico na saída do acoplador (E_o) pode ser definido como uma função do campo elétrico de entrada (E_i), do comprimento de fibra fundida (l), da constante de propagação (β) e do coeficiente de acoplamento (RAMASWAMI *et al.*, 2009) dado por:

$$\begin{bmatrix} E_{o1}(f) \\ E_{o2}(f) \end{bmatrix} = \exp^{-i\beta l} \begin{bmatrix} \cos(kl) & i\sin(kl) \\ i\sin(kl) & \cos(kl) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{i1}(f) \\ E_{i2}(f) \end{bmatrix}. \quad (2.6)$$

Figura 5 – Acoplador óptico de quatro portas.



Fonte: (SENIOR; JAMRO, 2009)

A quantidade de energia transferida de uma fibra para a outra está relacionada com a superposição dos campos dos modos no núcleo, o comprimento da região fundida e do raio do núcleo das fibras, essa razão de divisão de potência pode ser descrita pela razão de acoplamento, dado por (THYAGARAJAN; GHATAK, 2007):

$$R(dB) = 10 \log \frac{P_4}{P_3 + P_4}. \quad (2.7)$$

Onde P_3 e P_4 são as potências medidas nas saídas do acoplador. Outra forma utilizada para descrever a quantidade de potência que será transferida de um braço para outro é usar uma razão para determinar esse parâmetro, 90:10 por exemplo, onde o primeiro número representa a proporção da potência do sinal que passará para o outro braço, enquanto o segundo número representa a porção que seguirá no mesmo braço.

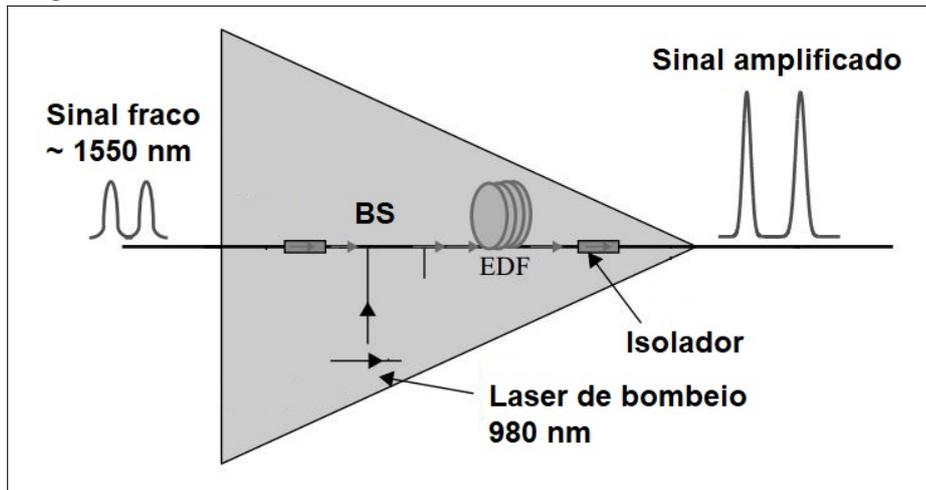
2.2.5 Amplificador de fibra dopada com érbio

Os amplificadores ópticos foram essenciais no para o avanço das comunicações ópticas, antes destes eram utilizados regeneradores, onde o sinal óptico era convertido para o domínio elétrico, regenerado e convertido para o domínio óptico. Os regeneradores eram caros e complexos devido a eletrônica envolvida na sua confecção. Um amplificador óptico eleva a potência do sinal óptico permitindo que este se propague por uma distância maior, compensando as atenuações adquiridas pelo sinal, sem a necessidade da mudança de domínio óptico-elétrico.

A Figura 6 exhibe a configuração básica de um EDFA é formada por um laser de bombeio, um BS para acoplar o sinal de bombeio, 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 bombeio pelo sistema, o érbio é um elemento químico pertencente ao grupo dos terras raras que emite radiação luminosa na janela 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 bombeio, o comprimento de onda do laser de bombeio depende do espectro de absorção do érbio, os comprimentos mais utilizados são 980 nm e 1480 nm (THYAGARAJAN; GHATAK, 2007).

Figura 6 – Estrutura básica do EDFA.



Fonte: (THYAGARAJAN; GHATAK, 2007)

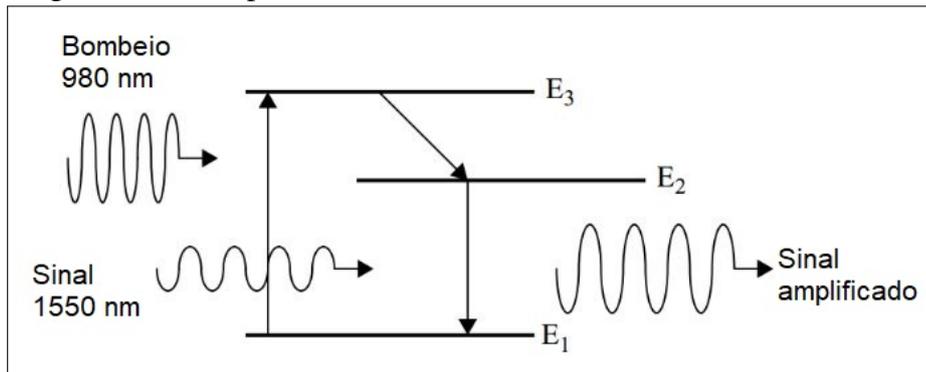
A Figura 7 exhibe o mecanismo de amplificação do sinal, o bombeio de 980 nm possui três níveis de energia, o fundamental (E_1), o metaestável (E_2) e o de bombeio (E_3). Ao ser atingido pela radiação de bombeio os elétrons saltam do nível E_1 para o nível E_3 , contudo a tendência é buscar o equilíbrio e voltar para o nível fundamental, dessa forma a maioria dos elétrons decai espontaneamente para o nível E_2 e por ser um nível metaestável tendem a permanecer nele por um tempo relativamente longo. Neste nível o elétron pode interagir com um fóton do sinal, amplificando o sinal desejado. Para que o sinal possa ser amplificado a quantidade de portadores no nível E_2 deve ser superior ao nível E_1 , o que caracteriza a inversão de população (THYAGARAJAN; GHATAK, 2007).

A desvantagem do uso do EDFA está relacionada com a emissão espontânea que pode estimular a amplificação de sinais indesejados gerando Emissão Espontânea Amplificada (ASE), contudo, utilizar o EDFA como amplificador de potência, próximo ao laser e com sinal de entrada na faixa de 0 dBm faz com que o amplificador opere em regime de saturação com valor de ganho e ASE reduzido (THYAGARAJAN; GHATAK, 2007).

O ganho do EDFA é definido por uma relação entre a potência de entrada (P_{in}) e saída (P_{out}) do sinal (THYAGARAJAN; GHATAK, 2007):

$$G(dB) \cong 10 \log \frac{P_{out}}{P_{in}}. \quad (2.8)$$

Figura 7 – Princípio funcionamento do EDFA.



Fonte: (THYAGARAJAN; GHATAK, 2007)

Esse valor depende da concentração de íons de érbio na fibra, da potência do laser de bombeio e do tamanho da fibra dopada, estando tipicamente entre 20 e 30 dB.

2.2.6 Interferômetro de Mach-Zehnder

Um interferômetro de Mach-Zehnder pode ser construído a partir da junção de dois acopladores em série, o primeiro acoplador divide o sinal entre os braços, enquanto o segundo acoplador faz a superposição dos sinais, a intensidade do sinal de saída varia de acordo com a diferença de fase entre os dois sinais. Quando duas ondas se sobrepõem, e a amplitude da onda resultante é maior do que a amplitude das ondas que a compõem temos uma interferência construtiva, se a amplitude da onda resultante for menor do que, ao menos, uma das ondas que a constitui teremos uma interferência destrutiva. A Figura 8 mostra a estrutura de um MZI (AGRAWAL, 2010).

Figura 8 – MZI de quatro portas.



Fonte: (RAMASWAMI *et al.*, 2009)

A função de transferência potência para uma entrada com variação de comprimento

ΔL em um dos braços do MZI pode ser descrita por (RAMASWAMI *et al.*, 2009):

$$\begin{bmatrix} T_{11}(f) \\ T_{12}(f) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin^2(\beta\Delta L/2) \\ \cos^2(\beta\Delta L/2) \end{bmatrix}. \quad (2.9)$$

Onde β é a constante de propagação, T_{11} e T_{12} representam a potência óptica transferida da entrada 1 para as saídas 1 e 2, respectivamente.

2.3 Técnicas de geração de subportadoras

É possível gerar subportadoras a partir de várias técnicas como *mode lock laser*, cavidades ópticas e moduladores eletro-ópticos. O uso de *mode lock laser* requer altos requisitos de estabilidade de alimentação e temperatura. Um sistema baseado em cavidade óptica utiliza um modulador eletro-óptico dentro de um laço para alcançar um estado ressonante.

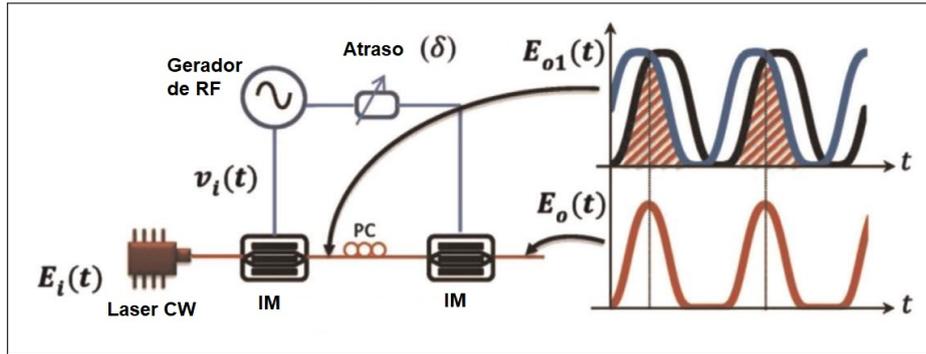
Na geração baseada em moduladores eletro-óptico, um modulador altera a amplitude, fase ou polarização, de uma portadora óptica gerada por um LD que opera em regime contínuo. Também é possível utilizar mais moduladores ou circuitos ópticos para alcançar um número maior de subportadoras. Os moduladores geram as subportadoras de acordo com a frequência do gerador de RF, alterando a frequência do gerador a frequência das subportadoras também será alterada. Devido ao desenvolvimento de moduladores com maior potência, e geradores de RF com baixo ruído e que alcançam maiores frequências, essas técnicas vem gerando maior interesse (TORRES-COMPANY; WEINER, 2014).

A intensidade das raias geradas pelo modulador é regida pelas funções de Bessel e pela ordem da raia, as raias de menor ordem, que ficam próximo a frequência da portadora, possuem maior a potência, enquanto as raias de maior ordem, que ficam mais distante da portadora, possuem menor a potência (IMRAN *et al.*, 2018).

2.3.1 Geração de subportadoras baseada em MZM

A Figura 9 apresenta o sistema proposto por (HMOOD *et al.*, 2015), onde dois MZM são cascateados e alimentados por um gerador de RF com *delay* entre o primeiro e o segundo MZM.

Figura 9 – Geração de subportadoras baseado em MZMs cascateados.



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

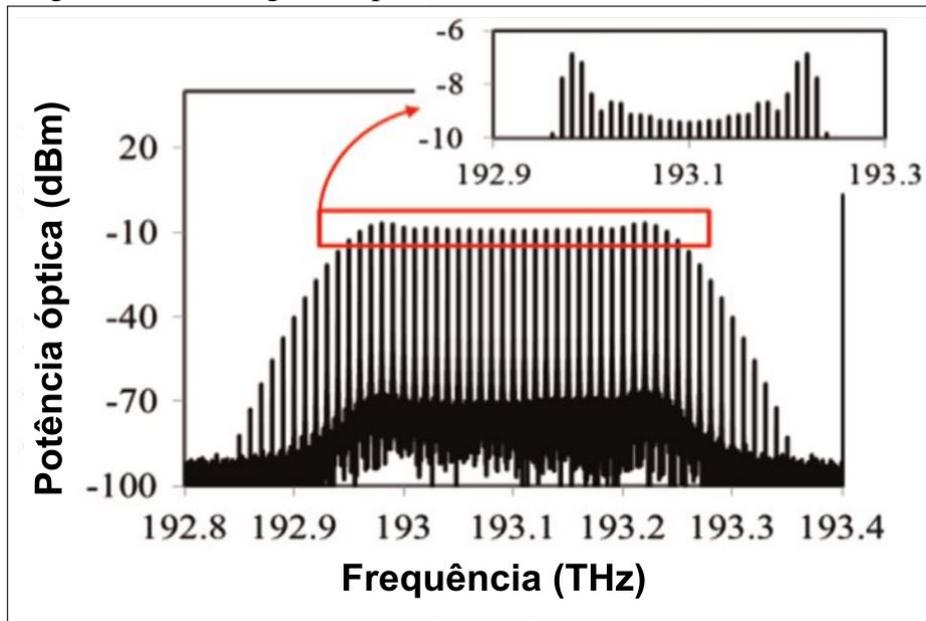
O *delay* é utilizado para reduzir o *flatness* das raias geradas. As raias geradas pelo sistema podem ser descritas por:

$$E_0(t) = \frac{E_i(t) \exp(j2A_1)}{4} \left[\sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(A_1) \exp(jn\omega_r t) - j \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n\left(A_1 - \frac{\pi}{2}\right) \exp(jn\omega_r t) \right] \times \left[\sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(A_1) \exp(jn\omega_r(t - \delta)) - j \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n\left(A_1 - \frac{\pi}{2}\right) \exp(jn\omega_r(t - \delta)) \right]. \quad (2.10)$$

Onde $A_1 = \frac{\pi(1+\alpha)}{2V_\pi} V_{dc}$, α é o fator de *chirp*, V_π é a tensão necessária para produzir um defasamento de π , V_{dc} é a tensão contínua aplicada sobre o MZM, δ é o *delay*, J_n é uma função de Bessel de ordem n e $E_i(t)$ é o campo gerado pelo laser.

Várias simulações foram feitas para verificar o efeito da variação de δ e α na geração de raias. (HMOOD *et al.*, 2015) chegou a conclusão que aumentar o fator de *chirp* aumenta o número de raias e a flutuação de potência, enquanto que o número de raias é inversamente proporcional ao *delay*. A Figura 10 apresenta um dos resultados obtidos pelo autor, usando um LD de 10 dBm e dois MZM cascateados foram geradas 51 raias.

Figura 10 – Raias geradas por (HMOOD *et al.*, 2015).



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

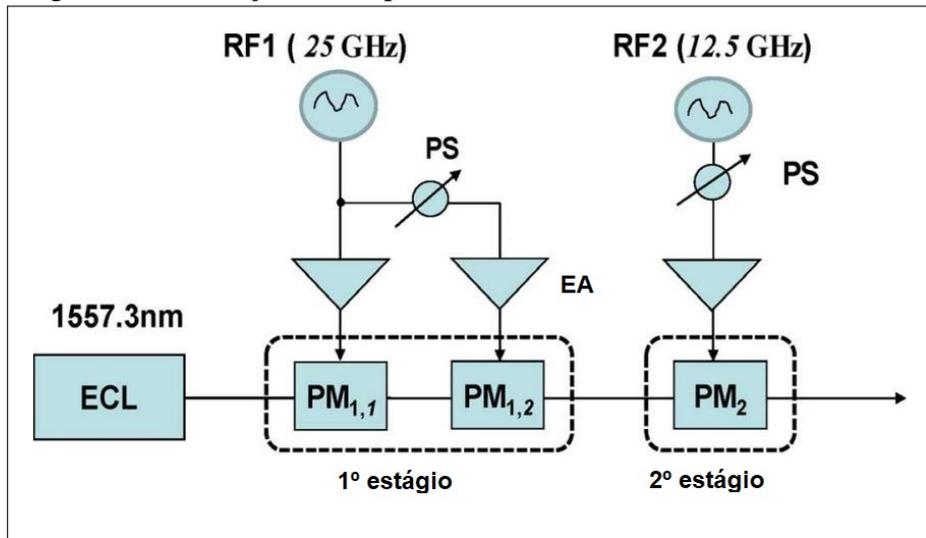
2.3.2 Geração de subportadoras baseada em PM

Algumas subportadoras podem ser geradas utilizando apenas um PM, contudo, o número de subportadoras geradas será pequeno e a *flatness* será pobre, daí a necessidade de se utilizar mais moduladores ou circuitos ópticos. Uma das vantagens do PM frente ao MZM é que o primeiro não requer controle de polarização, condição que provê simplicidade para o sistema de geração de subportadoras.

A Figura 11 mostra o esquema proposto por (ZHANG *et al.*, 2012) onde a portadora gerada por um Laser de Cavidade Externa (ECL) passa primeiro por um estágio de geração de subportadoras e posteriormente por um estágio de duplicação destas. O primeiro estágio possui um alto índice de modulação para gerar uma maior distribuição de potência e conseqüentemente mais raias. A diferença de fase introduzida no primeiro estágio por Deslocador de Fase (PS) é utilizada para gerar superposição das raias e como resultado do segundo estágio temos a duplicação destas, de acordo com o ajuste do índice de modulação de PM_2 .

O princípio de geração do sistema é baseado em modulações sucessivas e na transferência de energia das raias geradas no primeiro estágio, o autor investigou a variação dos índices de modulação dos dois estágios e concluiu que a *flatness* era dependente principalmente do índice de modulação do segundo estágio.

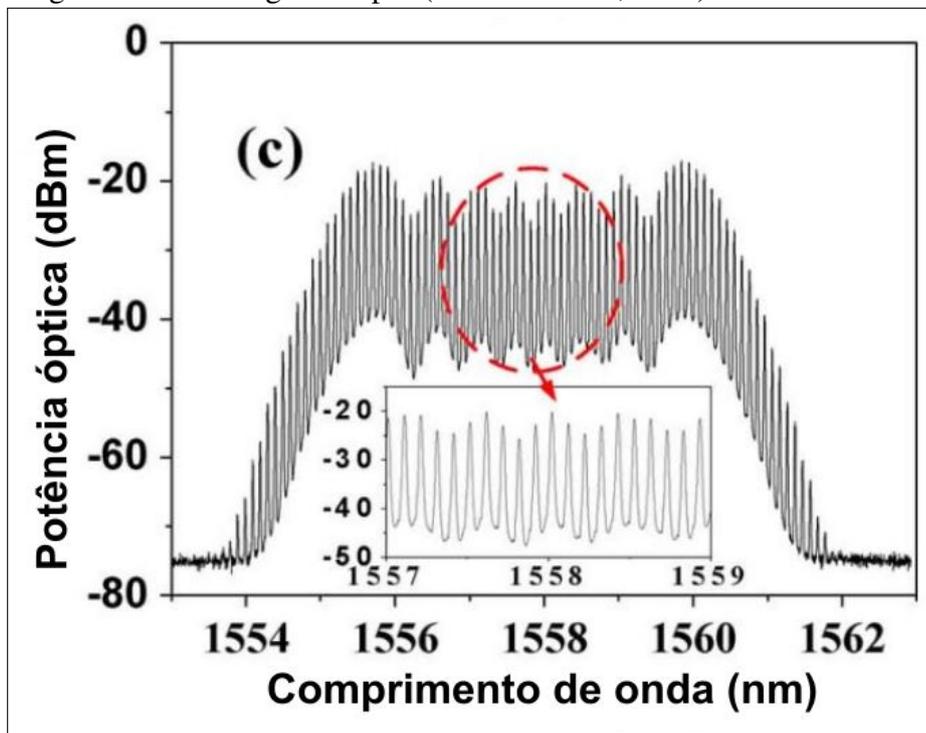
Figura 11 – Geração de subportadoras baseado em PMs cascateados.



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

O autor ressalta que é importante fazer um ajuste na fase do sinal que alimenta PM_2 , sem esse ajuste a flutuação de potência pode ser deteriorada, invés de melhorada, o autor conseguiu uma melhora de 20 dB com o ajuste de fase do gerador de RF. Na Figura 12 é possível observar o resultado obtido pelo autor, 53 raias com espaçamento de 12,5 GHz e *flatness* de aproximadamente 10 dB, para isto foi utilizado um ECL de 14 dBm e largura de linha de 1 MHz.

Figura 12 – Raias geradas por (ZHANG *et al.*, 2012).



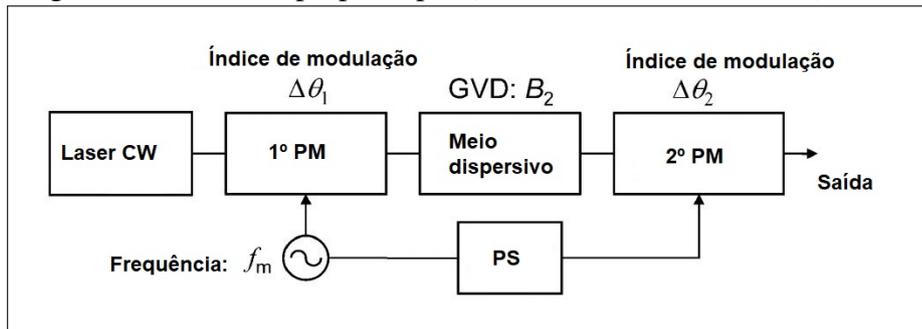
Fonte: (ZHANG *et al.*, 2012)

Um estudo analítico onde um PM, um meio dispersivo e um segundo PM são dispostos em série para gerar subportadoras foi feito por (YAMAMOTO *et al.*, 2009), a Figura 13 mostra um diagrama esquemático do aparato utilizado pelo autor, o valor do campo elétrico após o segundo PM é dado por:

$$E_{out} = E_0 \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} [J_n(\Delta\theta_1) J_{k-n}(\Delta\theta_2) \times \exp(i(\phi_n + \phi_{dif} - \omega_k t))]. \quad (2.11)$$

Onde J_n e J_{k-n} são funções de Bessel, $\Delta\theta_1$ e $\Delta\theta_2$ são os índices de modulação de PM₁ e PM₂, $\phi_n = 2\pi^2 n^2 f_m^2 B_2$ é a mudança de fase causada pela dispersão, $\phi_{dif} = 2\pi(k-n)f_m t_{dif}$ retrata a variação de fase de cada raia gerada pela diferença no tempo de modulação, $\omega_k = \omega_0 + 2\pi k f_m$ é a frequência angular da k-ésima raia geradas por PM₂, B_2 é a velocidade de dispersão de grupo do meio dispersivo, f_m é frequência de modulação e t_{dif} é a diferença de tempo relativo entre PM₁ e PM₂.

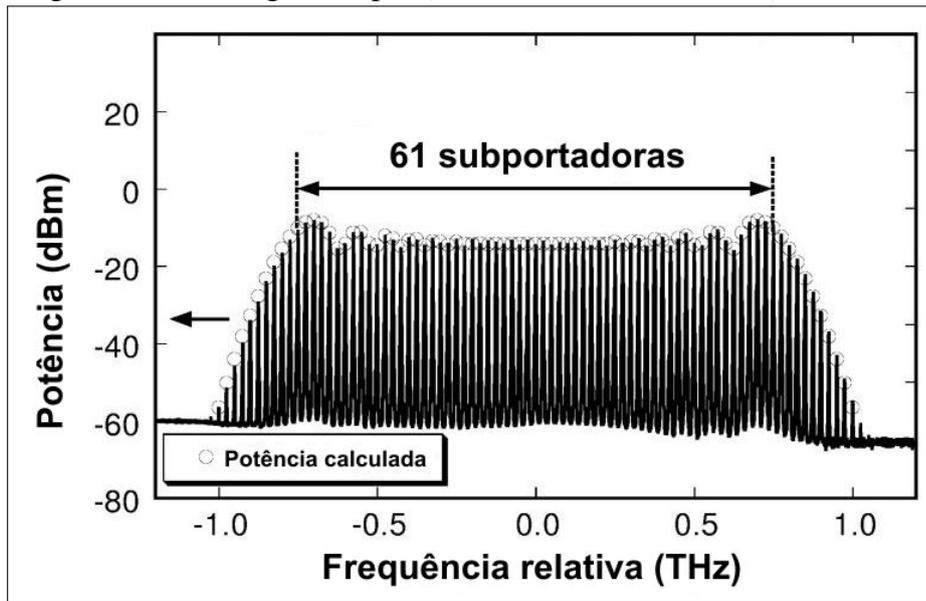
Figura 13 – Sistema proposto por (YAMAMOTO *et al.*, 2009).



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

(YAMAMOTO *et al.*, 2009) também implementou o circuito da Figura 13 o sinal gerado pelo laser foi amplificado para 20 dBm e filtrado por um filtro óptico de largura de banda de 1 nm antes de ser inserido no primeiro PM, para aumentar o fator de modulação do segundo PM foram utilizados dois moduladores em série, uma grade de Bragg foi utilizada como meio dispersivo. O autor observou que a *flatness* do sistema melhorar com a redução do índice de modulação do segundo modulador, enquanto o índice de modulação que apresenta melhor *flatness* do primeiro modulador é $\pi/4$. A Figura 14 mostra o resultado do experimento onde foram geradas 61 raias, espaçadas de 25 GHz e com *flatness* inferior a 8 dB.

Figura 14 – Raias geradas por (YAMAMOTO *et al.*, 2009).

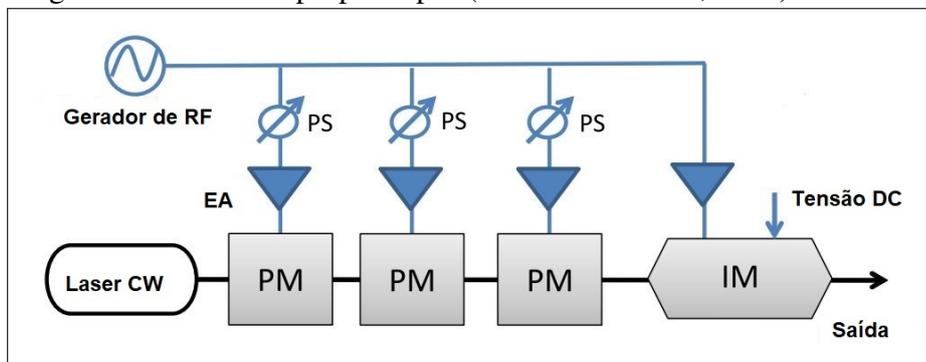


Fonte: (YAMAMOTO *et al.*, 2009)

2.3.3 Geração de subportadoras baseada em PM e IM

Moduladores de fase e de intensidade podem ser usados em conjunto para alcançar um número maior de raias, em (METCALF *et al.*, 2013) três PMs foram cascateados juntamente com um Modulador de Intensidade (IM) e um laser com largura de linha estreita (10 KHz), para formar um sistema que pode gerar de 60 a 73 raias de acordo com a frequência de modulação. Na arquitetura desenvolvida pelo autor são usados deslocadores de fase RF para prover um alinhamento correto das raias geradas pelos moduladores de fase com as raias geradas pelo modulador de amplitude e Amplificador elétrico (EA). Para isso cada PM é acionado individualmente e de forma sequencial juntamente com o IM.

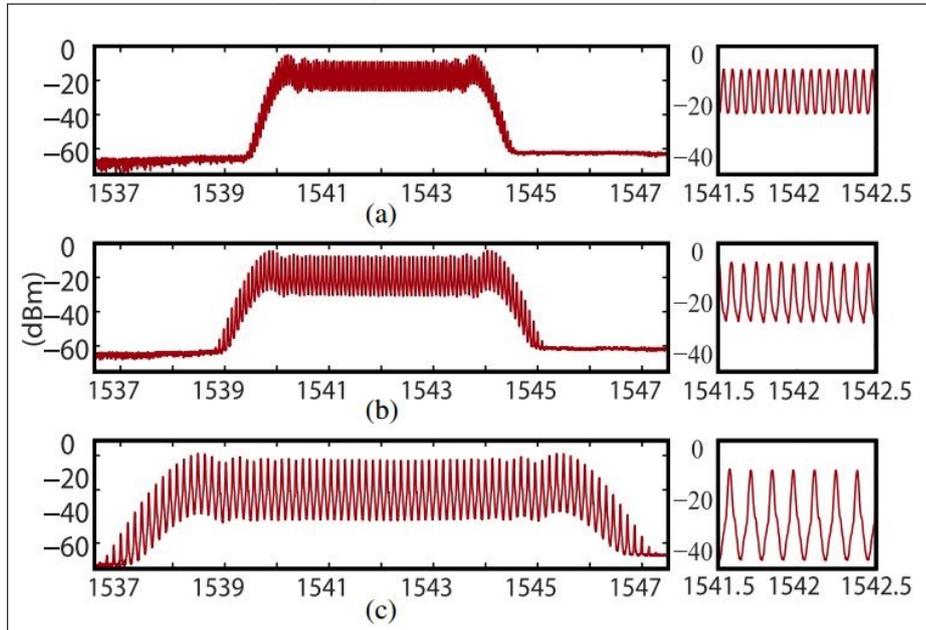
Figura 15 – Sistema proposto por (METCALF *et al.*, 2013).



Fonte: (IMRAN *et al.*, 2018)

A Figura 16 mostra as raias geradas pelo sistema, variando a frequência de modulação de 6 a 18 GHz é possível obter de 60 a 73 raias, onde quanto maior for a frequência menor será o número de raias geradas.

Figura 16 – Raias geradas por (METCALF *et al.*, 2013).

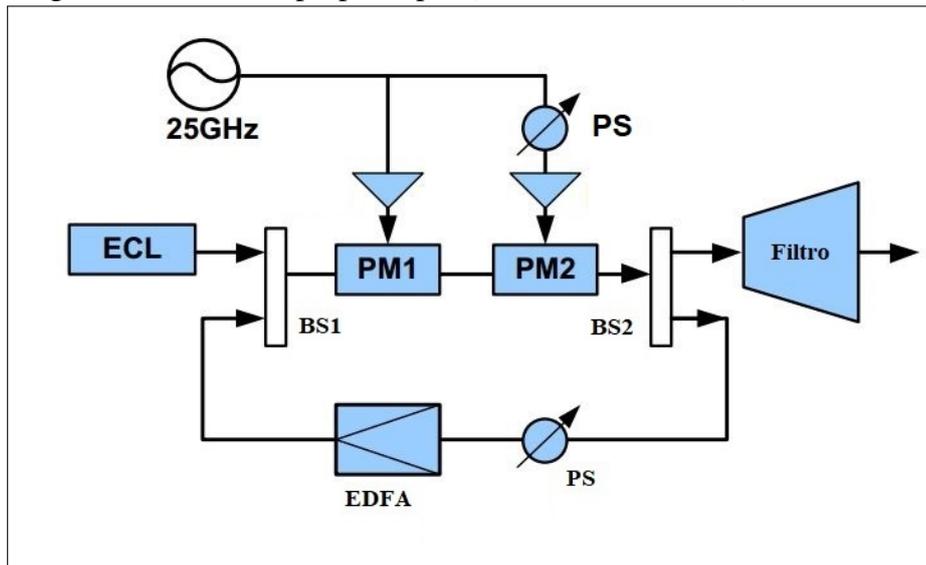


Fonte: (METCALF *et al.*, 2013)

2.3.4 Geração de subportadoras baseada em cavidades ópticas

Um laço óptico pode ser inserido em um circuito para geração de subportadoras, em (ZHANG *et al.*, 2011) o sinal gerado por um LD é modulado por dois PMs 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 divisor de feixe, deslocador de fase e EDFA mantenedores de polarização. A Figura 17 mostra o sistema desenvolvido.

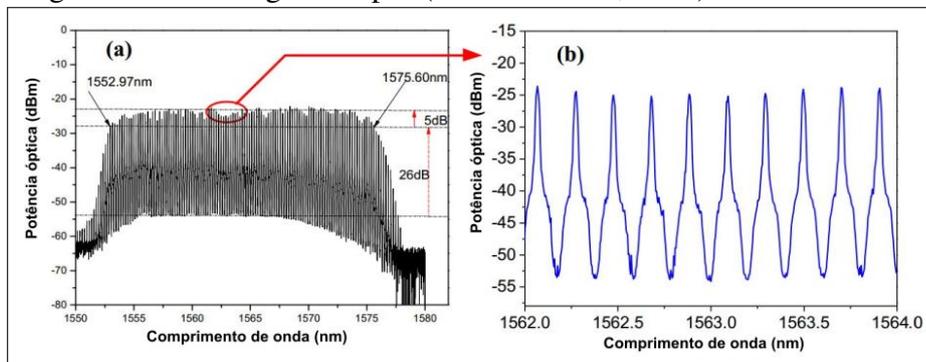
Figura 17 – Sistema proposto por (ZHANG *et al.*, 2011).



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

A Figura 18 exibe as 113 raias obtidas experimentalmente por (ZHANG *et al.*, 2011) a flutuação potência do sistema foi de 5 dB e o 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 18 – Raias geradas por (ZHANG *et al.*, 2011).

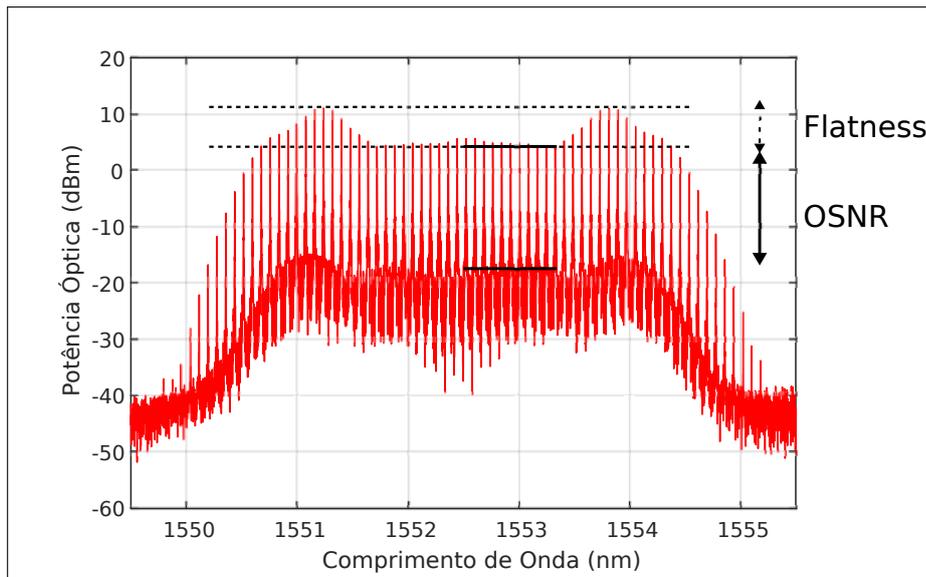


Fonte: (ZHANG *et al.*, 2011)

2.4 Parâmetros de qualidade

A Figura 19 apresenta os três parâmetros utilizados para medição de qualidade das raias geradas pelos sistemas, são eles: número de raias, *flatness* e Relação Sinal-Ruído Óptica (OSNR). No geral é esperado que o sistema gere o maior número de raias possíveis, entretanto esse número de raias não é o suficiente para definir a qualidade do sistema. Há aplicações que privilegiam o *flatness* ao número de raias geradas, este representa a planicidade das raias, logo quanto menor a variação de potência entre os picos de potência das raias melhor o *flatness*. Já o OSNR é um parâmetro que faz menção a diferencia de potência entre o pico e o ruído das raias. Em um contexto genérico destacam-se mais os parâmetros: número de raias e *flatness*. Contudo, o valor dado a cada parâmetro pode variar de uma aplicação para outra.

Figura 19 – Parâmetros de qualidade das raias geradas pelos sistemas.



Fonte: o autor.

3 SISTEMAS GERADORES DE SUBPORTADORAS

3.1 Introdução

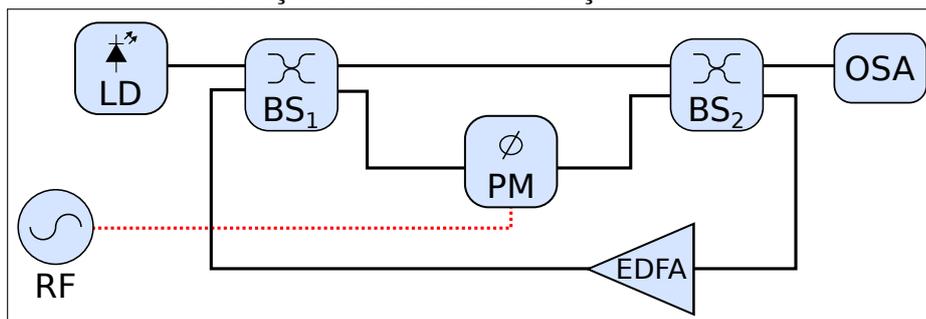
Neste capítulo será apresentada a estrutura e funcionamento dos quatro sistemas propostos por esta dissertação, estes foram baseados em MZI com realimentação óptica e modulação de fase, os dois primeiros utilizam de um PM, enquanto os demais utilizam dois PM. Os sistemas foram simulados com dimensões milimétricas, com foco em fotônica integrada, e com dimensões maiores para experimentos em bancadas, os resultados serão analisados no Capítulo 4.

3.2 Sistema 1: Geração de subportadoras baseada em MZI com modulação de fase e realimentação.

O primeiro sistema proposto, Sistema 1, exibido na Figura 20, utiliza dois BS com quatro portas cada, para formar um MZI assimétrico. Os braços 3 e 4 do BS₁ se ligam aos braços 1 e 2 do BS₂, no enlace inferior é colocado um PM. O braço 1 do BS₁ recebe o sinal Regime contínuo (CW) gerado por LD, o braço 3 do BS₂ é ligado a um OSA para leitura das raias geradas pelo sistema, os braços 2 e 4 do BS₁ e BS₂ se conectam a um EDFA e formam um laço óptico de realimentação.

No sistema o sinal gerado por LD é dividido em dois no BS₁, o sinal que segue no braço inferior é modulado por PM a uma frequência de 10 GHz, o sinal que segue pelo braço superior não sofre alteração, ambos sinais são superpostos e novamente divididos no BS₂. O sinal que sai pela porta 3 do BS₂ é lido pelo OSA, enquanto o sinal que sai pela porta 4 de BS₂ é amplificado e introduzido na porta 1 do BS₁.

Figura 20 – Sistema 1: Geração de subportadoras baseada em MZI com modulação de fase e realimentação.



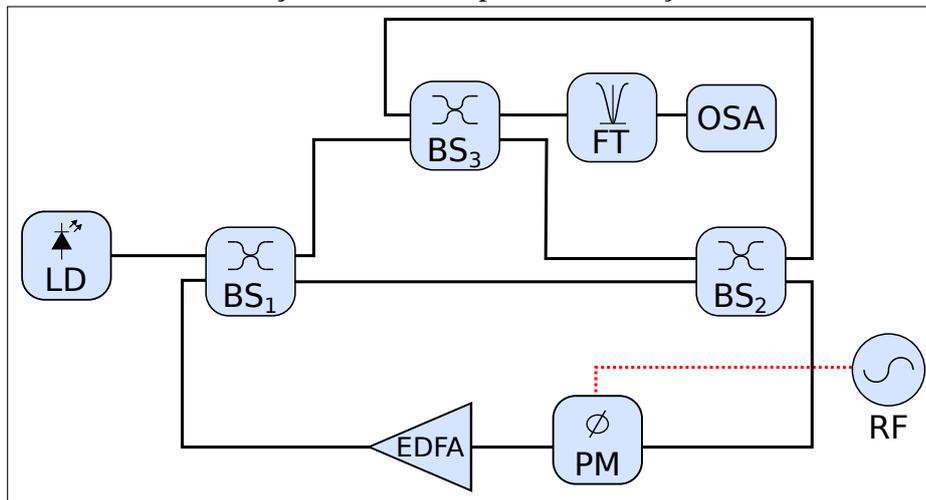
Fonte: o autor.

3.3 Sistema 2: Geração de subportadoras baseada em MZI com modulação de fase e dupla realimentação.

O segundo sistema proposto, Sistema 2, mostrado na Figura 21, conta com um BS e um Filtro Gaussiano Invertido (FT) a mais que o sistema 1. Semelhante ao Sistema 1, duas portas do MZI são utilizadas para formar um laço óptico, que neste caso, contém um PM e um EDFA. Uma das portas do MZI é ligada ao LD enquanto a outra é acoplada em BS₃. BS₃ superpõe o sinal proveniente do braço superior de BS₁ e BS₂, e fornece saída para o OSA. Antes de ser lido no OSA o sinal passa por um FT para atenuar a portadora e assim melhorar a flutuação de potência.

No sistema o sinal gerado por LD é dividido em dois no BS₁, o sinal que segue no braço inferior não sofre alteração, enquanto o sinal que segue pelo braço superior é acoplado em BS₃, da porta 4 de deste o sinal é introduzido na porta 2 do BS₂. O sinal que sai pela porta 4 de BS₂ é modulado por PM a uma frequência de 10 GHz e amplificado antes de ser inserido em BS₁, o sinal que segue pelo braço 3 do BS₂ é acoplado em BS₃ e da porta 3 deste o sinal é filtrado e lido pelo OSA.

Figura 21 – Sistema 2: Geração de subportadoras baseada em MZI com modulação de fase e dupla realimentação.

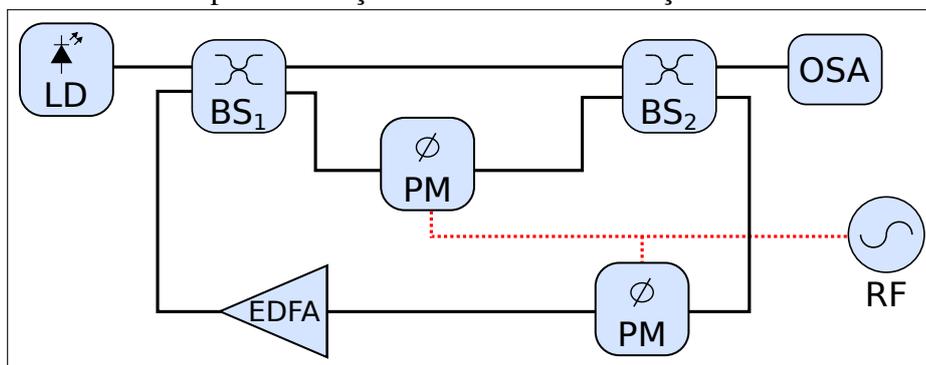


Fonte: o autor.

3.4 Sistema 3: Geração de subportadoras baseada em MZI com dupla modulação de fase e realimentação.

A Figura 22 apresenta o terceiro sistema proposto, Sistema 3, que é baseado no Sistema 1. Para aumentar o número de raias geradas foi utilizado um PM a mais que no Sistema 1, inserido no laço de realimentação, ambos moduladores são alimentados em fase pelo gerador de RF. Nos Sistemas 1 e 3 todos os componentes são interligados com SMF de 3 mm.

Figura 22 – Sistema 3: Geração de subportadoras baseada em MZI com dupla modulação de fase e realimentação.

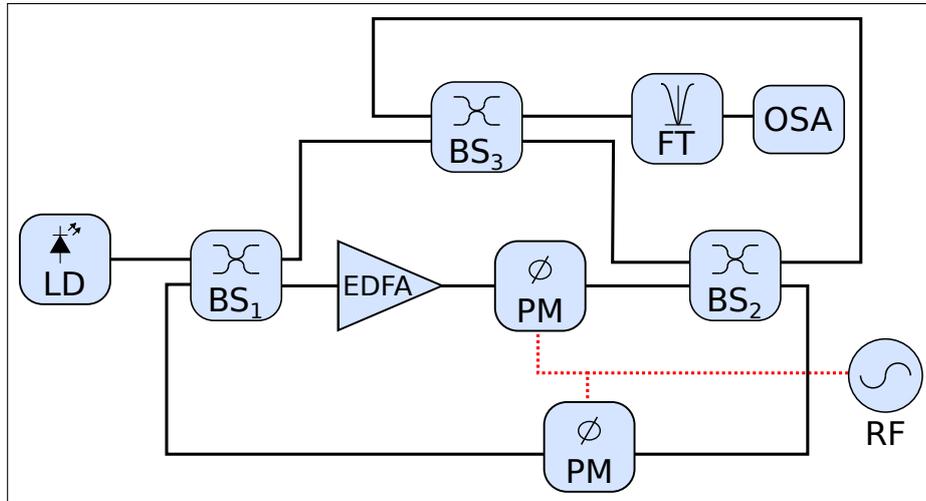


Fonte: o autor.

3.5 Sistema 4: Geração de subportadoras baseada em MZI com dupla modulação de fase e dupla realimentação.

A Figura 23 exibe o quarto sistema proposto, Sistema 4, baseado no Sistema 2, difere do mesmo por possuir um PM a mais, localizado no braço inferior do MZI, o EDFA agora estar localizado antes desse segundo PM. Ambos moduladores são alimentados em fase pelo o mesmo gerador de RF. A mudança de posição do EDFA foi necessária para alcançar um número maior de raias. Nos Sistemas 2 e 4 todos os componentes são interligados com SMF de 4,5 mm.

Figura 23 – Sistema 4: Geração de subportadoras baseada em MZI com dupla modulação de fase e dupla realimentação.

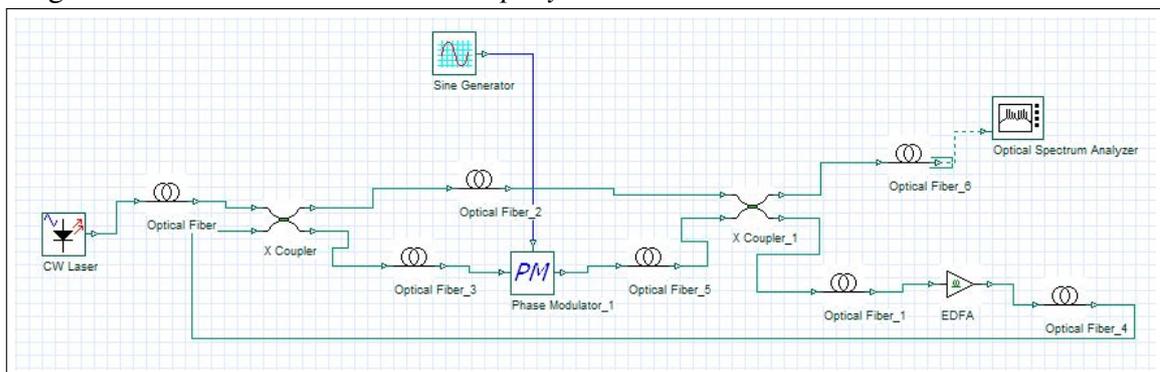


Fonte: o autor.

3.6 Metodologia

O *software* comercial utilizado para simulação foi o *Optisystem*, que possui uma vasta biblioteca de componentes ópticos e elétricos, podendo ser utilizado para diversos tipos de simulação na área de comunicações ópticas. A Figura 24 exibe o *layout* do Sistema 1 implementado no *software*, nela é possível observar que o laser se encontra a esquerda do circuito, enquanto o OSA se encontra do lado direito, todos os componentes são interligados por enlaces de fibra e o PM é acionado por um gerador de RF.

Figura 24 – Sistema 1 montado no *Optisystem*.



Fonte: o autor.

Para prover maior precisão na leitura das curvas a taxa de *bit rate* foi alterada para 16 GBits/s, com uma amostragem de 8192 pontos por curva lida pelo OSA, dessa forma o equipamento reduz a varredura em comprimentos de onda não alcançáveis pelas raias e melhora a precisão na faixa do sinal desejado. A Tabela 1 exhibe os parâmetros dos componentes utilizados nas simulações, nessa é possível observar a variação dos tamanhos da fibra e do ganho do EDFA para os sistemas com milimétricos e discretos. Entre parênteses os valores utilizados nos sistemas discretos.

Tabela 1 – Parâmetros utilizados na simulação.

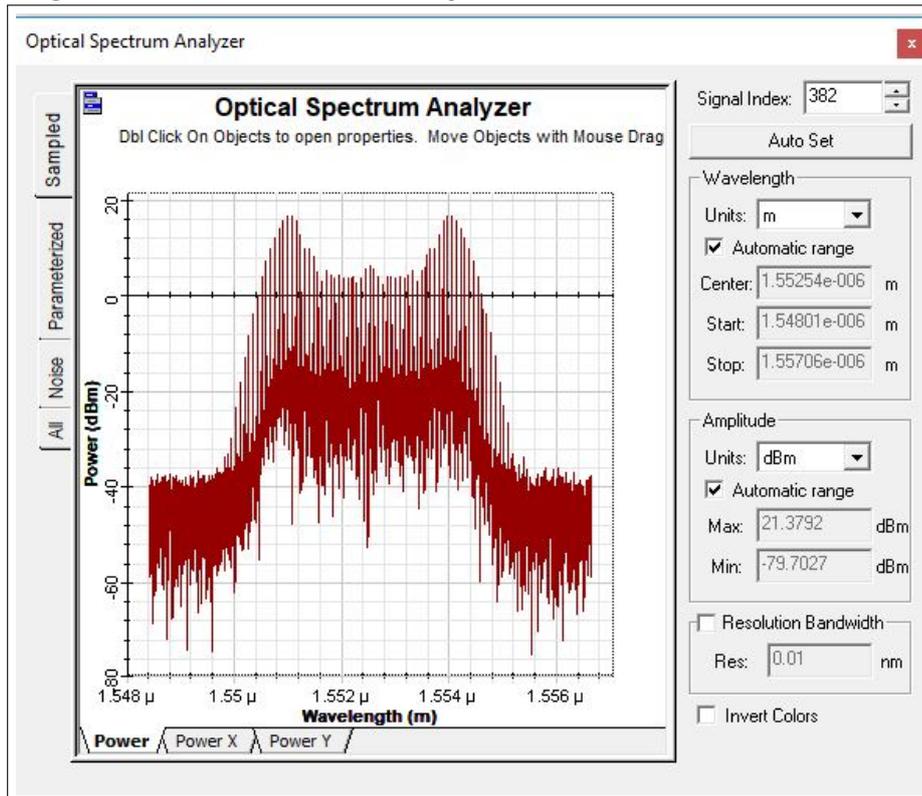
Componente	Parâmetro
Laser	Potência óptica: 0 dBm
	Frequência: 193,1 THz
	Largura de feixe: 10 MHz
Modulador de fase	Frequência: 10 GHz
Acoplador óptico	Coefficiente de acoplamento: 0,5
Fibra	3 e 4,5 mm (30 e 45 cm)
EDFA	Ganho: 1,5 dB (17,5 e 3 dB)

Fonte: o autor.

No *software* cada iteração representa um instante capturado pelos equipamentos de medição. Como os sistemas possuem laços ópticos mais iterações devem ser feitas para considerar o sinal proveniente dos laços. Em cada iteração o sinal óptico é capturado pelo OSA e amostrado em uma curva de potência óptica por comprimento de onda. Em equipamentos de medição como OSA e osciloscópio o sinal exibido para o usuário é uma composição de vários valores lidos em um intervalo de amostragem.

Para aumentar a fidelidade dos sistemas foram geradas 400 iterações e a partir destas obteve-se a potência média por comprimento de onda. A Figura 25 exibe uma iteração do Sistema 1 lida pelo OSA, nesta é possível observar a curva de potência óptica por comprimento de onda e os parâmetros utilizados para modificar a visualização do sinal. Os resultados gerados por esse e pelo demais sistemas serão discutidos no Capítulo 4.

Figura 25 – Leitura de uma iteração do Sistema 1 no OSA.



Fonte: o autor.

4 RESULTADOS

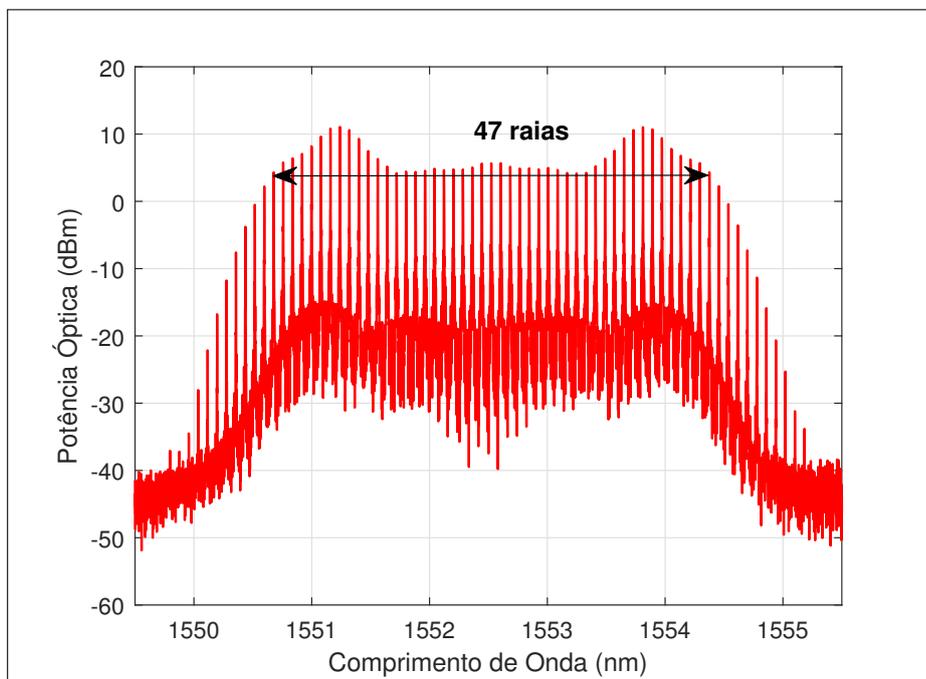
4.1 Introdução

Nesse capítulo serão discutidos os resultados obtidos pelos sistemas propostos nesta dissertação, estes serão apresentados por meio de gráficos e comparativos com outros sistemas existentes na literatura. Inicialmente serão apresentados os resultados obtidos pelos sistemas com dimensões milimétricas, utilizando um e dois PM. Em seguida, serão apresentados os resultados obtidos pelos sistemas discretos. Os parâmetros utilizados na simulação estão descritos na Tabela 1.

4.2 Análise comparativa dos sistemas milimétricos

A Figura 26 exibe as raias geradas pelo Sistema 1. Foram geradas 47 raias com *flatness* de 6,9 dB e OSNR de 20 dB. As raias são espaçadas de 10 GHz obtendo uma largura de banda total de 460 GHz.

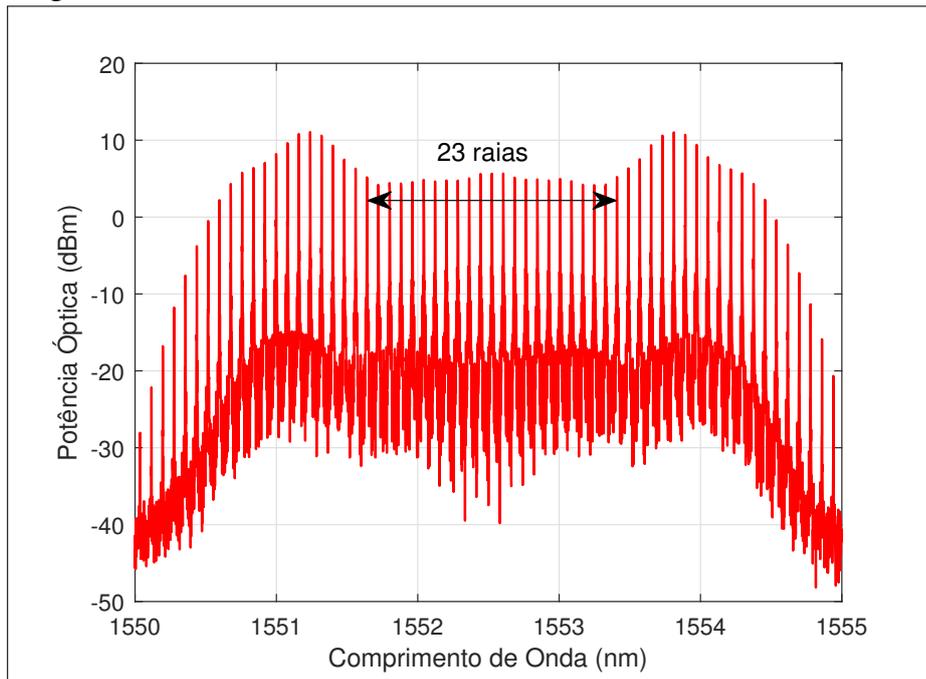
Figura 26 – Potência óptica por comprimento de onda do Sistema 1 com enlace de fibra de 3 mm.



Fonte: o autor.

Destaca-se no Sistema 1, as 23 raias de menor ordem, que possuem flutuação de potência de apenas 1,5 dB, como pode ser observado na Figura 27.

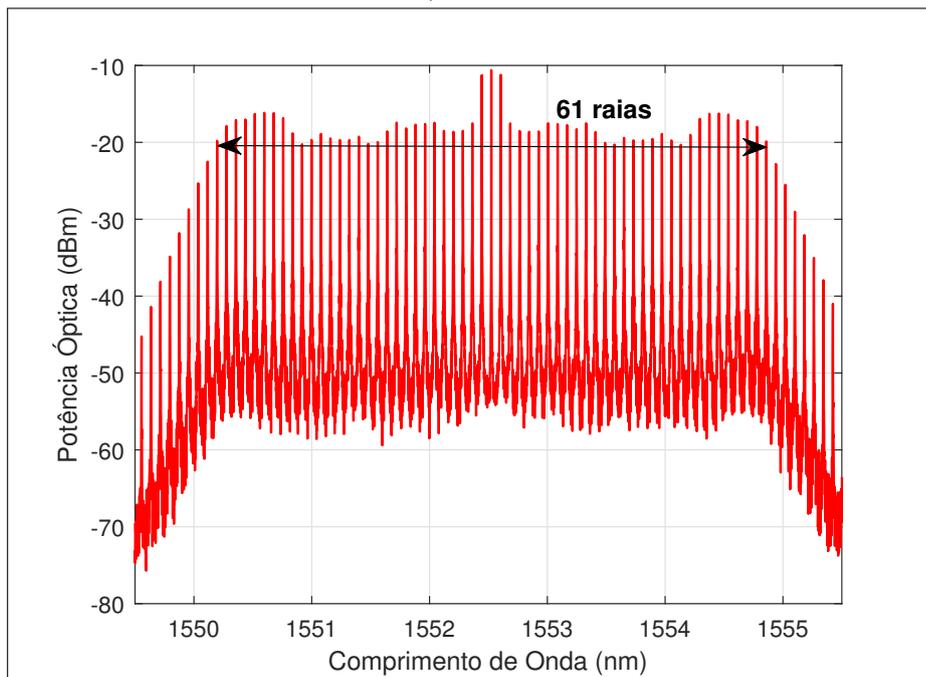
Figura 27 – Raias de menor ordem do Sistema 1.



Fonte: o autor.

A Figura 28 apresenta as raias geradas pelo Sistema 2. Foram geradas 61 raias com *flatness* de 12,2 dB e OSNR de 30 dB. As raias são espaçadas de 10 GHz obtendo uma largura de banda total de 600 GHz.

Figura 28 – Potência óptica por comprimento de onda do Sistema 2 com enlace de fibra de 4,5 mm.



Fonte: o autor.

O Sistema 1 possui menos componentes e dispõe de raias com maior potência quando comparado as raias obtidas pelo Sistema 2, contudo, gera menos raias e possui um OSNR menor. Para alcançar um número maior de raias o Sistema 2 requer um BS e um FT a mais que o Sistema 1. É possível utilizar apenas um BS e gerar a mesma quantidade de raias no Sistema 2, no entanto, a flutuação de potência seria comprometida e aumentaria para 22 dB. O Sistema 1 disponibiliza suas raias com uma potência óptica em torno de 5 dBm, enquanto o Sistema 2 tem suas raias acessíveis na faixa de -20 dBm.

A Tabela 2 mostra um comparativo entre os valores obtidos pelos sistemas com um modulador e duas arquiteturas disponíveis na literatura. O sistema utilizado em (YAMAMOTO *et al.*, 2009) gera o mesmo número de raias que o Sistema 2, contudo, apresenta maior complexidade pois além de utilizar dois PMs, utiliza um laser de 9 dBm, enquanto os sistemas propostos utilizam lasers de 0 dBm. O aparato óptico utilizado em (ZHANG *et al.*, 2012) apresenta maior quantidade de raias que o Sistema 1, no entanto, além do *flatness* inferior usa três PMs e um laser de 14 dBm para alcançar esse resultado, tornando o sistema oneroso.

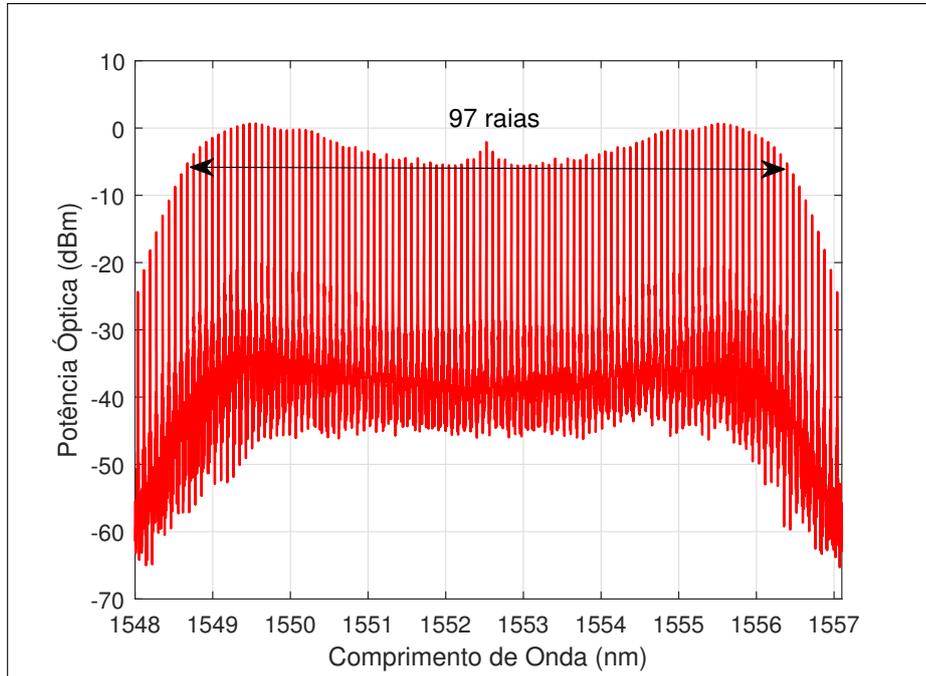
Tabela 2 – Comparativo entre Sistemas 1 e 2.

Sistema	Número de raias	<i>Flatness</i>	OSNR
1	47	7 dB	20 dB
2	61	12 dB	30 dB
ref (YAMAMOTO <i>et al.</i> , 2009)	61	8 dB	61 dB
ref (ZHANG <i>et al.</i> , 2012)	53	10 dB	40 dB

Fonte: o autor.

As Figuras 29 e 30 apresentam as raias geradas pelos Sistemas 3 e 4, utilizar dois PM deixa o sistema mais dispendioso, contudo, é possível obter maior número de raias comparado aos Sistemas 1 e 2. O Sistema 4 teve um aumento superior a 70 % quando comparado ao Sistema 2, enquanto o Sistema 3 chegou a ultrapassar o dobro de raias geradas pelo Sistema 1.

Figura 29 – Potência óptica por comprimento de onda do Sistema 3 com enlace de fibra de 3 mm.



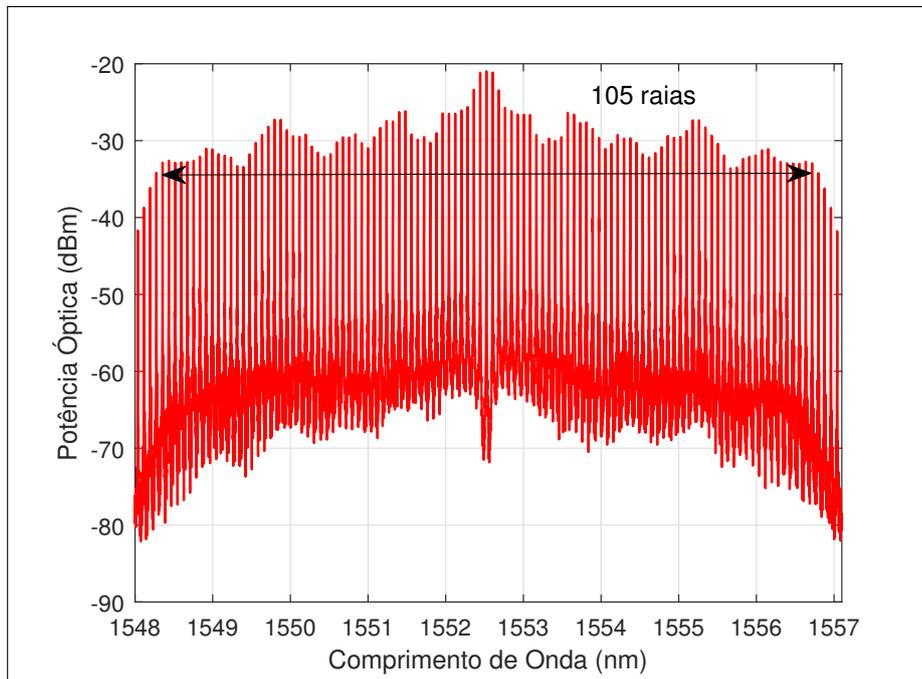
Fonte: o autor.

O Sistema 3 gerou 97 raias com flutuação de potência de 6,2 dB e OSNR de 30 dB. Enquanto o Sistema 4 gerou 105 raias com *flatness* de 12,6 dB e OSNR de 25 dB. Ambos os sistemas tem as raias espaçadas de 10 GHz obtendo uma largura de banda total de 960 GHz e 1,04 THz respectivamente.

O Sistema 3 possui menos componentes que o Sistema 4 e tem como vantagens oferecer melhor *flatness* e melhor OSNR quando comparado ao Sistema 4. O Sistema 4 se utiliza de um FT e um BS a mais que o Sistema 3 para alcançar um número maior de raias, contudo possui *flatness* e OSNR inferior ao Sistema 3. Enquanto o Sistema 3 disponibiliza suas raias com uma potência óptica próxima de -5 dBm, o Sistema 4 tem suas raias acessíveis na faixa de -35 dBm.

A Tabela 3 mostra um comparativo entre os valores obtidos pelos sistemas com dois moduladores e uma arquitetura existente na literatura. O sistema utilizado em (ZHANG *et al.*, 2011) gera um número de raias ligeiramente superior ao Sistema 4 e tem uma flutuação de potência um pouco melhor que a do Sistema 1, no entanto, possui OSNR inferior a ambos os sistemas. Para alcançar esse resultado o sistema utiliza fibra e componentes mantenedores de polarização e amplificadores de sinal de RF o que deixa o sistema mais oneroso.

Figura 30 – Potência óptica por comprimento de onda do Sistema 4 com enlace de fibra de 4,5 mm.



Fonte: o autor.

Tabela 3 – Comparativo entre Sistemas 3 e 4.

Sistema	Número de raias	<i>Flatness</i>	OSNR
3	97	7 dB	30 dB
4	105	13 dB	25 dB
ref (ZHANG <i>et al.</i> , 2011)	113	5 dB	26 dB

Fonte: o autor.

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 de potência pequena, outra pode requer uma maior quantidade de raias sem altos requisitos de *flatness*. O Sistema 1 possui maior simplicidade quando comparado ao Sistema 2, gerando uma menor quantidade de raias, porém, dispõe de maior potência e melhor flutuação de potência do que este. De forma análoga, o Sistema 3 gera menos raias e as tem disponível em uma potência maior, quando comparado ao Sistema 4. Os Sistemas 2 e 4, por sua vez, geram mais raias quando comparado aos Sistemas 1 e 3.

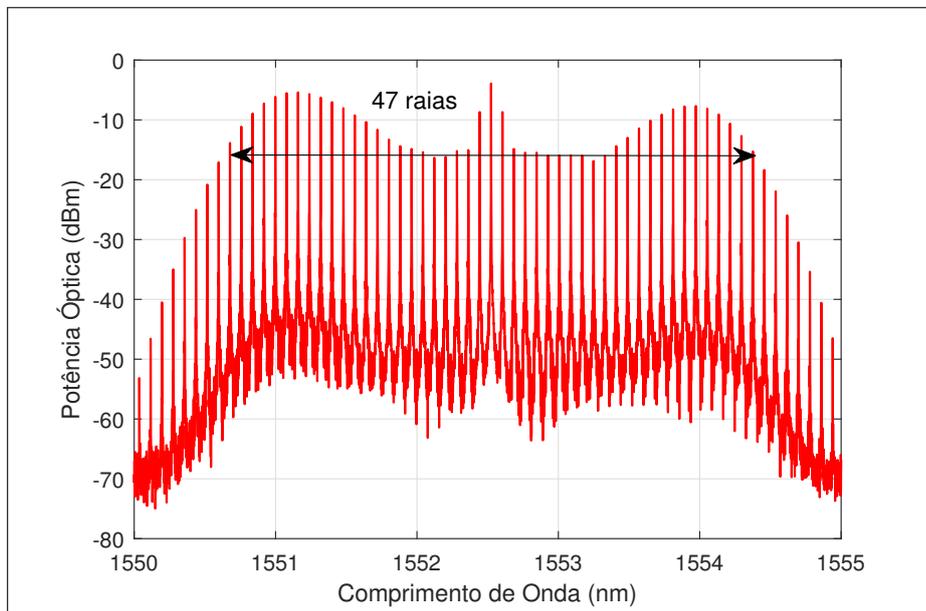
4.3 Análise dos sistemas propostos para componentes discretos

Os sistemas propostos e analisados foram dimensionados para serem integrados fonicamente, por isso as dimensões milimétricas. Entretanto, os mesmo foram analisados em dimensões maiores para serem implementados usando dispositivos ópticos de bancada, discretos.

Para isso, os Sistemas 1 e 3 foram simulados com enlaces de 30 cm e os Sistemas 2 e 4 com enlaces de 45 cm. Para obter os resultados descritos nas Figuras 31, 32, 33 e 34 fez-se necessário alterar o ganho do EDFA, com isso os Sistemas 1, 2 e 3 passaram a ter ganho de 17,5 dB, ao passo que o Sistema 4 passou a ter ganho de 3 dB.

A Figura 31 exibe as raias geradas pelo Sistema 1, 47 raias com *flatness* de 13 dB e OSNR de 30 dB. Comparando os resultados obtidos do mesmo sistema, com dimensões milimétricas, é possível notar que a quantidade de raias permanece a mesma, há ganho no OSNR e decaimento na flutuação de potência.

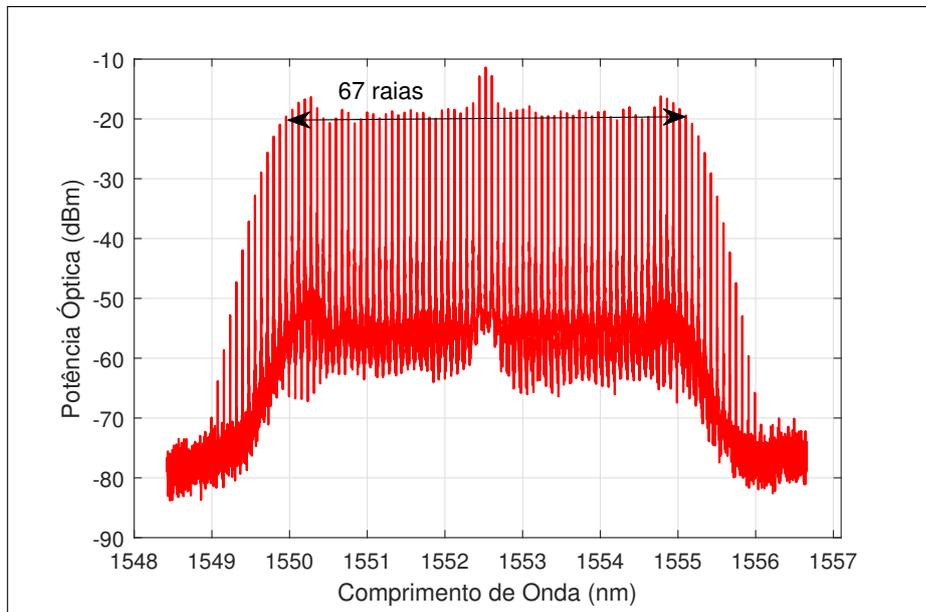
Figura 31 – Potência óptica por comprimento de onda do Sistema 1 com enlace de fibra de 30 cm.



Fonte: o autor.

A Figura 32 apresenta as raias geradas pelo Sistema 2, esse sistema gerou uma quantidade superior de raias com melhor *flatness* e o mesmo OSNR do sistema com dimensões reduzidas, ao todo foram 67 raias com flutuação de potência de 9,5 dB e OSNR de 30 dB.

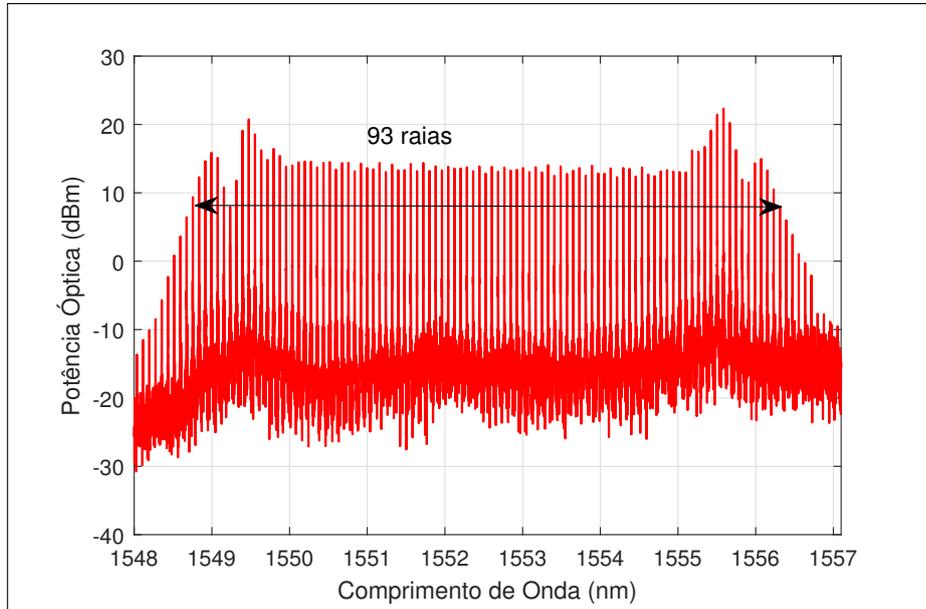
Figura 32 – Potência óptica por comprimento de onda do Sistema 2 com enlace de fibra de 45 cm.



Fonte: o autor.

A Figura 33 exibe as raias geradas pelo Sistema 3, ao todo foram 93 raias com *flatness* de 14,5 dB e OSNR de 20 dB. Contrapondo os resultados do mesmo sistema, com dimensões milimétricas, é possível observar que houve uma redução na quantidade de raias, declínio do *flatness* que passou de 7 para 14,5 dB e piora no OSNR. Entretanto, quando se considera apenas as 65 raias centrais é possível observar uma flutuação de potência de apenas 2,3 dB.

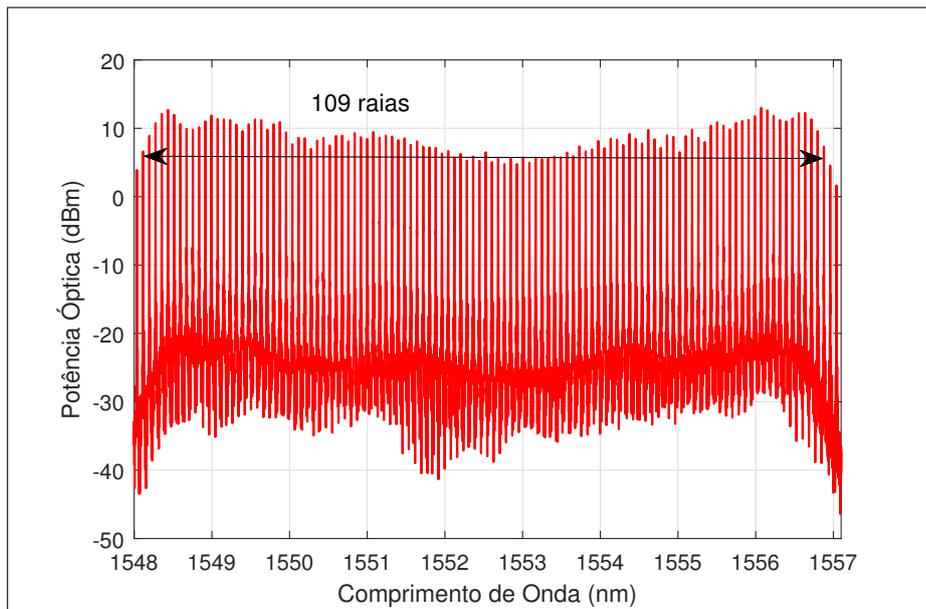
Figura 33 – Potência óptica por comprimento de onda do Sistema 3 com enlace de fibra de 30 cm.



Fonte: o autor.

A Figura 34 apresenta as raias geradas pelo Sistema 4, esse sistema obteve um número de raias superior, quando comparado ao mesmo sistema com dimensões reduzidas, com melhor *flatness* e OSNR superior. O sistema produziu 109 raias com flutuação de potência de 8,5 dB e OSNR de 30 dB.

Figura 34 – Potência óptica por comprimento de onda do Sistema 4 com enlace de fibra de 45 cm.



Fonte: o autor.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Uma solução amplamente empregada para geração de subportadoras é o uso de moduladores eletro-óptico modulando o sinal gerado por um laser em regime constante, o modulador cria várias raias em torno da frequência do laser, para alcançar um número maior de raias é comum o uso de mais moduladores e/ou circuitos ópticos.

Este trabalho apresentou quatro sistemas para geração de subportadoras ópticas que utilizam modulador de fase e circuito óptico baseado em MZI. O primeiro sistema proposto gera 47 raias com *flatness* de 7 dB e OSNR de 20 dB, o segundo sistema gera 61 raias com *flatness* de 12 dB e OSNR de 30 dB. Para alcançar um número maior de raias nos demais sistemas foi adicionado um PM a mais em cada, dessa forma o Sistema 3 gerou 97 raias com *flatness* de 7 dB e OSNR de 30 dB e o Sistema 4 gerou 105 raias com *flatness* de 13 dB e OSNR de 25 dB.

Os sistemas foram pensados para fotônica integrada, porém, podem ser implementados utilizando componentes ópticos discretos com fibras de 30 e 45 cm. O Sistema 1 apresentou o mesmo número de raias que a versão integrada, o Sistema 2 apresentou um número de raias superior em aproximadamente 10%, enquanto os Sistema 3 e 4 obtiveram uma redução de aproximadamente 4% em comparação a versão integrada.

Vale salientar que o Sistema 1 apresentou 23 raias com flutuação de potência de apenas 1,5 dB. Todos os sistemas foram comparados com arquiteturas existentes na literatura apresentando vantagens e desvantagens já discutidas, os sistemas podem ser utilizados em redes WDM, EON, RoF.

Como propostas de trabalho futuro podemos citar:

- Otimização dos sistemas propostos;
- Modelamento analítico;
- Implementação experimental dos sistemas.

REFERÊNCIAS

- AGRAWAL, G. P. **Fiber-Optic Communication Systems**. 4. ed. [S.l.]: Wiley, 2010.
- AZADEH, M. **Fiber optics engineering**. [S.l.]: Springer, 2009.
- 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**, Elsevier, v. 344, p. 139–146, 2015.
- IEZEKIEL, S. **Microwave photonics: devices and applications**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2009.
- IMRAN, M.; ANANDARAJAH, P. M.; KASZUBOWSKA-ANANDARAJAH, A.; SAMBO, N.; POTI, L. A survey of optical carrier generation techniques for terabit capacity elastic optical networks. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, IEEE, v. 20, n. 1, 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**, IEEE, v. 47, n. 11, p. 66–73, 2009.
- METCALF, A. J.; TORRES-COMPANY, V.; LEAIRD, D. E.; WEINER, A. M. High-power broadly tunable electrooptic frequency comb generator. **IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics**, IEEE, v. 19, n. 6, p. 231–236, 2013.
- RAMASWAMI, R.; SIVARAJAN, K.; SASAKI, G. **Optical networks: a practical perspective**. [S.l.]: Morgan Kaufmann, 2009.
- RIBEIRO, J. A. J. **Comunicações ópticas**. [S.l.]: Érica, 2009.
- SEIMETZ, M. **High-order modulation for optical fiber transmission**. [S.l.]: Springer, 2009.
- SENIOR, J. M.; JAMRO, M. Y. **Optical fiber communications: principles and practice**. [S.l.]: Pearson Education, 2009.
- THYAGARAJAN, K.; GHATAK, A. **Fiber optic essentials**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2007.
- TORRES-COMPANY, V.; WEINER, A. M. Optical frequency comb technology for ultra-broadband radio-frequency photonics. **Laser & Photonics Reviews**, Wiley Online Library, v. 8, n. 3, p. 368–393, 2014.
- YAMAMOTO, T.; KOMUKAI, T.; SUZUKI, K.; TAKADA, A. Multicarrier light source with flattened spectrum using phase modulators and dispersion medium. **Journal of Lightwave Technology**, IEEE, v. 27, n. 19, p. 4297–4305, 2009.
- 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**, Optical Society of America, v. 19, n. 14, 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. **Journal of Lightwave Technology**, IEEE, v. 30, n. 24, p. 3911–3917, 2012.

ANEXO A – ARTIGO PUBLICADO

COSTA, L. P. de S.; SILVA, J. B. R. Sistemas Geradores de Subportadoras Ópticas Baseados em MZI com Modulador de Fase. In: Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais, 36., p. 868-870, 2018, Campina Grande, PB.

Sistemas Geradores de Subportadoras Ópticas Baseados em MZI com Modulador de Fase

Luis Paulo de Sousa Costa e João Batista Rosa Silva

Resumo—Neste trabalho são propostos dois sistemas para geração de subportadoras ópticas baseados em MZI com realimentação óptica e modulação de fase capazes de gerar 47 e 61 raias com espaçamento de 10 GHz. O primeiro Sistema possui *flatness* menor que 7 dB e OSNR de 20 dB, enquanto o segundo possui *flatness* de aproximadamente 12 dB e OSNR de 30 dB.

Palavras-Chave—Geração de subportadoras, modulador de fase, interferômetro de Mach-Zehnder, amplificador óptico.

Abstract—In this work two systems for the generation of optical subcarriers based on MZI with optical feedback and phase modulation capable of generating 47 and 61 lines with 10 GHz spacing are proposed. The first system has *flatness* less than 7 dB and OSNR of 20 dB while the second has approximately 12 dB *flatness* and 30 dB OSNR.

Keywords—Subcarrier generation, phase modulator, Mach-Zehnder interferometer, optical amplifier.

I. INTRODUÇÃO

A demanda por largura de banda vem crescendo tanto em ambientes domésticos quanto em corporativos. O aumento do número de *smartphones* e *tablets* aliado ao consumo de serviços de multimídia tem sobrecarregado as redes de comunicações ópticas. Uma das soluções propostas para esse problema é melhorar o uso da banda disponível. As redes WDM (*wavelength division multiplexing*) possuem alocação fixa que não permite o uso da banda não ocupada. Redes ópticas elásticas (EON - *elastic optical network*) permitem um melhor aproveitamento do espectro fazendo uso de *slots* que possibilitam a alocação praticamente contínua, separada apenas por uma banda de guarda [1].

Dentro das EONs há vários subsistemas, um deles é um *transponder* flexível que, dentre outras funções, deve permitir alterar seu número de subportadoras para atender a diferentes capacidades. As subportadoras podem ser geradas por um conjunto de lasers independentes, porém, essa solução sofre com espaçamento de frequência variável [2]. Outra solução é o uso de pentes de frequência óptica (OFC - *optical frequency combs*) para geração das subportadoras [2], [3].

Um OFC pode ser caracterizado como um conjunto regular de raias ópticas, com mesmo espaçamento, que mantém conformidade espectral em toda largura de banda do sinal. A maior parte das técnicas utilizadas para gerar um OFC utiliza moduladores eletro-ópticos. Tipicamente, o sinal gerado por um laser operando em regime contínuo é modulado por um, ou mais moduladores, em amplitude, fase, polarização ou uma

combinação destas. Alguns sistemas também utilizam laços ópticos com moduladores para aumentar o número de raias geradas [2].

Moduladores de fase cascadeados com moduladores em intensidade podem ser utilizados para geração de subportadoras. Em Metcalf *et al.* [4] três moduladores de fase e um de intensidade, cascadeados, foram utilizados para gerar 65 raias com *flatness* de 10 dB e espaçamento entre raias de 10 GHz.

A geração de subportadoras pode ser alcançada pelo uso de moduladores Mach-Zehnder (MZM - *Mach-Zehnder modulator*). Em Hmood *et al.* [5] dois MZM são cascadeados para gerar 51 raias, sendo que desdas 27 possuem flutuação de potência menor que 1 dB.

Moduladores de fase (PM - *phase modulator*) também podem ser usados para produção de subportadoras, como vantagem, possuem tamanho reduzido e não necessitam de controle de polarização. Em Yamamoto *et al.* [6] um PM é utilizado para gerar 29 raias, espaçadas de 10 GHz com *flatness* de 5 dB. Em Yamamoto *et al.* [7] uma Grade de Bragg é usada como meio dispersivo entre dois PMs para gerar 61 raias, espaçados de 25 GHz e com flutuação de 8 dB. Em Zhang *et al.* [8] três PMs são cascadeados para gerar 53 raias, espaçados de 12,5 GHz e com *flatness* de 10 dB.

Este trabalho apresenta dois sistemas para geração de subportadoras ópticas baseado no interferômetro de Mach-Zehnder (MZI - *Mach-Zehnder interferometer*) com realimentação óptica e modulação de fase. Este artigo foi estruturado em quatro seções. Na Seção II é descrita a arquitetura utilizada para geração de subportadoras. Na Seção III serão apresentados os resultados obtidos e, posteriormente, as conclusões na Seção IV.

II. SISTEMAS ÓPTICOS

Os sistemas propostos neste trabalho utilizam como base MZI assimétrico. O primeiro Sistema proposto (Sistema 1), mostrado na Fig. 1(a), tem duas portas do MZI interconectadas por um amplificador de fibra dopada com érbio (EDFA - *amplifier erbium doped fiber*), formando um laço óptico de realimentação, e no braço inferior do MZI é colocado um PM. O sinal gerado por um diodo laser (LD - *laser diode*) é dividido em dois no divisor de feixe 1 (BS₁ - *beam splitter*), o sinal que segue no braço inferior é modulado pelo PM com um sinal de rádio de frequência (RF) senoidal de 10 GHz, e ambos sinais são recombinados e divididos no BS₂. Parte do sinal em BS₂ é medido por um analisador de espectro óptico (OSA - *optical spectrum analyzer*) e a outra parte é reintroduzida no sistema pelo laço óptico amplificado.

Luis Paulo de Sousa Costa e João Batista Rosa Silva, Departamento de Engenharia de Teleinformática (DETI), Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza-CE, Brasil, E-mails: scluispaulo@gmail.com, joabrs@ufc.br.

Já o segundo Sistema proposto (Sistema 2) mostrado na Fig. 1(b), possui um BS e um filtro gaussiano invertido (FT) a mais que o Sistema 1. O BS₃ superpõe o sinal vindo do braço superior de BS₁ e BS₂, e provê saída para o OSA e BS₂. Neste sistema o sinal que sai do braço inferior de BS₂ é modulado e amplificado antes de ser acoplado em BS₁. Um FT é utilizado antes do OSA para atenuar a portadora e com isso melhorar a flutuação de potência.

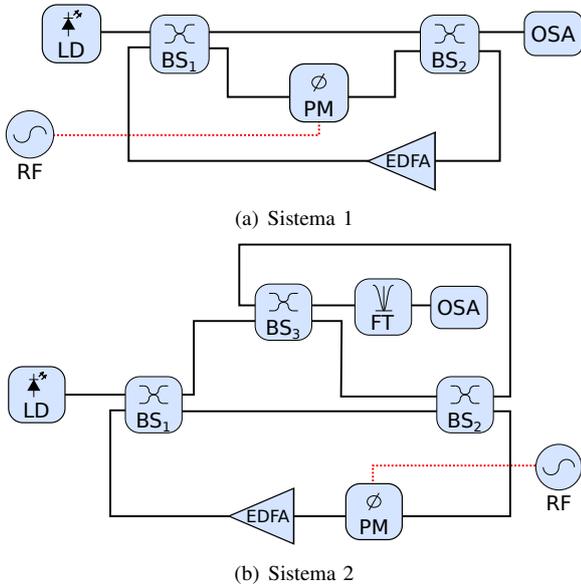


Fig. 1. Esquemas propostos para geração de subportadoras (LD: laser, BS: divisor de feixe, PM: modulador de fase, EDFA: amplificador de fibra dopada com érbio, OSA: analisador de espectro óptico, RF: gerador de rádio de frequência).

A Tabela I exibe os parâmetros utilizados na simulação. No Sistema 1 todos os componentes são interligados com fibras de 3 mm de comprimento, enquanto no Sistema 2 são interligados com fibras de 4,5 mm.

TABELA I
PARÂMETROS UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO.

Componente	Parâmetro
Laser	Potência óptica: 0 dBm
	Frequência: 193,1 THz
Modulador de fase	Frequência: 10 GHz
Divisor de feixe	Coefficiente de acop.: 0,5
EDFA	ganho: 20 dB

O campo elétrico das raias geradas pela modulação de fase pode ser descrito segundo a expansão de Jacobi-Anger [8], dada por:

$$E_{out} = E_0 \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(\pi R) \exp[j2\pi(f_c + n f_s)]. \quad (1)$$

Onde $J_n(\pi R)$ é uma função de Bessel de ordem n , f_c é a frequência da portadora e f_s é a frequência do gerador de RF. Observa-se em (1) que o sinal gerado possui raias com frequência $f_c + n f_s$, com $n = \pm 1, \pm 2, \dots$. Devido a limitação de potência, a medida que as raias se afastam da frequência da portadora a potência diminui.

III. RESULTADOS

Os sistemas propostos foram simulados numericamente utilizando o *Optisystem*. No *software* cada iteração representa um instante capturado pelos equipamentos de medição. Como os sistemas possuem laços de realimentação mais iterações devem ser realizadas para levar em conta o sinal de realimentação dos laços.

Em cada iteração o sinal óptico é capturado pelo OSA e amostrado em uma curva de potência óptica por comprimento de onda. Para se aproximar de sistemas reais, onde os equipamentos de medição fazem uma média dos valores instantâneos, foram geradas 400 iterações e a partir destas obteve-se a potência média por comprimento de onda. Os gráficos da potência óptica por comprimento de onda obtidas a partir dos Sistema 1 e são apresentados nas Fig. 2 e 3 respectivamente.

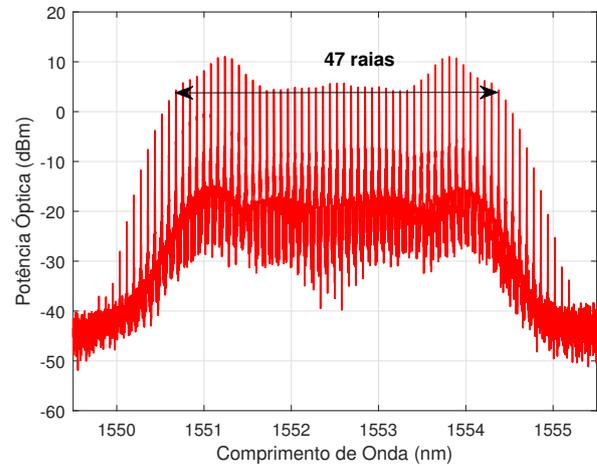


Fig. 2. Potência óptica por comprimento de onda do Sistema 1.

A Fig. 2 mostra as 47 raias geradas pelo Sistema 1, com espaçamento de 10 GHz, obtendo uma largura de banda total de 460 GHz. A flutuação entre as potências das raias é de 7 dB e a relação sinal-ruído óptica (OSNR - *optical signal to noise ratio*) é de 20 dB.

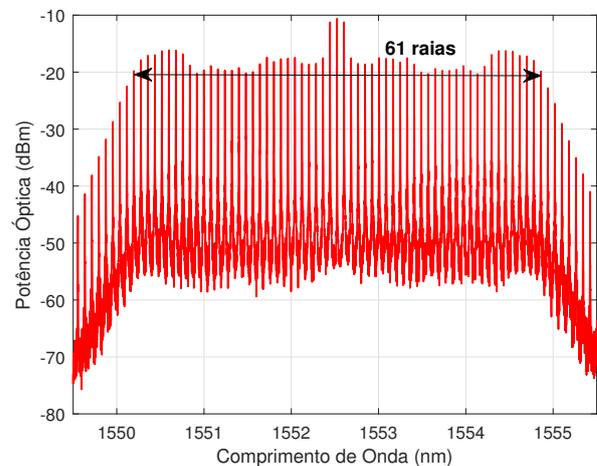


Fig. 3. Potência óptica por comprimento de onda do Sistema 2.

A Fig. 3 exibe os raios gerados pelo Sistema 2 que possui um *flatness* de 12 dB, e OSNR de 30 dB, observa-se também que foram geradas 61 raias, com espaçamento entre raias de 10 GHz e largura de banda total do sinal de 600 GHz.

O Sistema 1 apresenta maior simplicidade e maior potência nas raias obtidas que o Sistema 2, contudo, gera menos raias e possui um OSNR inferior. Para gerar mais raias o Sistema 2 requer um BS e um FT a mais que o Sistema 1, com isso produz 61 raias com um OSNR de 30 dB. O Sistema 2 poderia utilizar apenas um BS a mais que o Sistema 1, no entanto, seu *flatness* seria comprometido e subiria para 22 dB. O Sistema 1 disponibiliza suas raias com uma potência óptica em torno de 5 dBm, enquanto o Sistema 2 tem suas raias acessíveis na faixa de -20 dBm.

A Tabela II mostra um comparativo entre os valores obtidos pelos sistemas e algumas arquiteturas disponíveis na literatura. Os Sistemas 1, 2 e [6] utilizam apenas um PM, entretanto, os Sistema 1 e 2 apresentam maior número de raias. Já o sistema utilizado em [7] tem o mesmo desempenho quanto ao número de raias que o Sistema 2, contudo, apresenta maior complexidade pois utiliza dois PMs e um LD mais potente (9 dBm) do que utilizado nos sistemas propostos (0 dBm). O aparato óptico utilizado em [8] apresenta melhor OSNR que os sistemas propostos, toda via, possui maior complexidade pois usa três PMs e um LD de 14 dBm. Vale ressaltar que o espectro central do Sistema 1 possui 23 raias com *flatness* de apenas 1,5 dB.

TABELA II
COMPARATIVO ENTRE SISTEMAS.

Sistema	No raias	Espaçamento	Flatness	OSNR
1	47	10 GHz	7 dB	20 dB
2	61	10 GHz	12 dB	30 dB
ref [6]	29	10 GHz	5 dB	-
ref [7]	61	25 GHz	8 dB	61 dB
ref [8]	53	12,5 GHz	10 dB	40 dB

Os sistemas propostos foram pensados para fotônica integrada, contudo, é possível utilizar fibras com tamanho de 30 e 45 cm para os Sistemas 1 e 2, para isso o ganho do EDFA deve ser ajustado para 17,5 dB. Dessa forma o primeiro sistema continua gerando a mesma quantidade de raias com um *flatness* de 13 dB, enquanto o segundo sistema passa a gerar 67 raias com o *flatness* de 9,5 dB.

IV. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram propostos dois sistemas que utilizam MZI com realimentação óptica e modulação de fase para geração subportadoras na faixa de 1550 nm. O primeiro sistema proposto gerou 47 raias com uma potência média de 5 dBm, enquanto o segundo sistema proposto gerou 61 raias com uma potência média de -20 dBm com um laser de 0 dBm e amplificador de 20 dB. O primeiro sistema possui melhor *flatness*, 7 dB contra 12 dB do segundo, enquanto o segundo possui melhor OSNR, 30 dB contra 20 dB do primeiro. O Sistema 1 apresentou destacou-se por apresentar 23 raias com flutuação de potência de apenas 1,5 dB. Vale ressaltar que

os sistemas foram pensados para fotônica integrada, porém, podem ser implementados utilizando componentes ópticos discretos com fibras de 30 e 45 cm para os Sistemas 1 e 2, respectivamente, com o Sistema 2 apresentando um número de raias superior em aproximadamente 10% em comparação a versão integrada. Ambos os sistemas tem sua vantagem e podem ser utilizados em redes WDM, EON, rádio sobre fibra (RoF).

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi suportado pelas agências brasileira CAPES e CNPq (via projeto No. 458867/2014-4).

REFERÊNCIAS

- [1] M. Jinno, H. Takara, B. Kozicki, Y. Tsukishima, Y. Sone, and S. Matsuoka, "Spectrum-efficient and scalable elastic optical path network: architecture, benefits, and enabling technologies," *IEEE communications magazine*, vol. 47, no. 11, 2009.
- [2] M. Imran, P. M. Anandarajah, A. Kaszubowska-Anandarajah, N. Sambo, and L. Poti, "A survey of optical carrier generation techniques for terabit capacity elastic optical networks," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017.
- [3] I. Tomkos, S. Azodolmolky, J. Solé-Pareta, D. Careglio, and E. Palkopoulou, "A tutorial on the flexible optical networking paradigm: State of the art, trends, and research challenges," *Proceedings of the IEEE*, vol. 102, no. 9, pp. 1317–1337, 2014.
- [4] A. J. Metcalf, V. Torres-Company, D. E. Leaird, and A. M. Weiner, "High-power broadly tunable electrooptic frequency comb generator," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 19, no. 6, pp. 231–236, 2013.
- [5] J. K. Hmood, S. D. Emami, K. A. Noordin, H. Ahmad, S. W. Harun, and H. M. Shalaby, "Optical frequency comb generation based on chirping of mach-zehnder modulators," *Optics Communications*, vol. 344, pp. 139–146, 2015.
- [6] M. Yamamoto, Y. Tanaka, T. Shioda, T. Kurokawa, and K. Higuma, "Optical frequency comb generation using dual frequency optical phase modulation," in *Integrated Photonics Research and Applications*, p. ITuF5, Optical Society of America, 2005.
- [7] T. Yamamoto, T. Komukai, K. Suzuki, and A. Takada, "Multicarrier light source with flattened spectrum using phase modulators and dispersion medium," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 27, no. 19, pp. 4297–4305, 2009.
- [8] J. Zhang, J. Yu, L. Tao, Y. Fang, Y. Wang, Y. Shao, and N. Chi, "Generation of coherent and frequency-lock optical subcarriers by cascading phase modulators driven by sinusoidal sources," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 30, no. 24, pp. 3911–3917, 2012.