

Pablo Rafael Neves Marciano

Estudo da Técnica RFS para geração de Múltiplos Comprimentos de Onda Ópticos

Brasil

Dezembro,2016

Pablo Rafael Neves Marciano

Estudo da Técnica RFS para geração de Múltiplos Comprimentos de Onda Ópticos

Parte manuscrita da Proposta de Projeto de Graduação do Pablo Rafael Neves Marciano, apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para conclusão do curso de Engenharia Elétrica.

Universidade Federal do Espírito Santo – UFES

Faculdade de Engenharia Elétrica

Graduação

Orientador: Marcelo Eduardo Vieira Segatto

Coorientador: Diogo Vieira Nogueira Coelho

Brasil

Dezembro, 2016

Pablo Rafael Neves Marciano

Estudo da Técnica RFS para geração de Múltiplos Comprimentos de Onda Ópticos/
Pablo Rafael Neves Marciano. – Brasil, Dezembro,2016-
55 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Marcelo Eduardo Vieira Segatto

Acadêmico – Universidade Federal do Espírito Santo – UFES
Faculdade de Engenharia Elétrica
Graduação, Dezembro,2016.

1. Geração de Multi Portadoras Óticas. 2. *Mach Zehnder Modulator*. 2. OFDM. I.
Orientador. II. Universidade Federal do Espírito Santo. III. Departamento de Engenharia
Elétrica. IV. Engenheiro

*Este trabalho é dedicado primeiramente a deus,
que me deu energia e que colocou as pessoas certas no meu caminho
e agradeço a todos que me ajudaram nessa estrada.*

AGRADECIMENTOS

Os agradecimentos principais são direcionados à meu orientador Marcelo Segatto que com muita paciência me guio no caminho para desbravar e entender os dispositivos com os quais me tornei familiar mas, que ele já conhecia de longa data. Agradeço aos meus amigos do laboratório (Labtél e CPID) que me ajudaram discutindo e argumentando sobre os processos de modelagem e simulação. Agradeço a minha família pelo apoio e entendimento de muitas noites viradas e ânimos elevados. Também ao meu irmão que me auxiliou na revisão do texto. Agradeço principalmente a Deus que me deu força e motivação durante o andamento desse projeto, quando tudo o que eu mais queria era desistir. Obrigado a todos pelo apoio, dedicação e paciência. Também agradeço a todos aqueles que contribuíram para que a produção de trabalhos acadêmicos conforme as normas ABNT com L^AT_EX fosse possível. E aos pesquisadores que vieram antes de mim e começaram a assentar essa estrada de pesquisa e desenvolvimento.

Agradecimentos especiais são direcionados ao Centro de Pesquisa em Engenharia Elétrica ¹ da Universidade de Federal do Espírito Santo (UFES).

¹ <<http://www.ufes.com.br/>>

*“Não vos amoldeis às estruturas deste mundo,
mas transformai-vos pela renovação da mente,
a fim de distinguir qual é a vontade de Deus:
o que é bom, o que Lhe é agradável, o que é perfeito.
(Bíblia Sagrada, Romanos 12, 2)*

RESUMO

Este projeto estuda a técnica "Deslocamento de Frequência por recirculação- RFS (*Recirculating Frequency Shifting*), que busca a geração de multi portadoras ópticas para uma melhor e mais eficiente forma de utilização de um canal de transmissão. É uma técnica importante devido à crescente demanda mundial de fluxo de dados, tanto no âmbito industrial quando no âmbito residencial o que leva muitos a pesquisarem e desenvolverem métodos mais eficientes de comunicação. Logo, objetiva-se estudar as melhorias que essa técnica traz para atender a crescente demanda de dados que circulam no mundo. Esse projeto estuda as características da geração de pente de portadoras. Como um método para aumentar a densidade de dados transmitidos. Com esse projetos foi possível concluir como o modelador óptico (*Mach-Zehnder Modulator*) funciona e as características principais que definem sua região ideal de polarização.

Palavras-chave: *Recirculating frequency shifting*, OFDM, circuitos ópticos.

ABSTRACT

This project study a tecnic Recirculating Fequency shifting (RFS). That aims the generation of multiple optical carriers for enhance and improve the ways of ussing a communications channel. As a result of the World wide data flow growing demand, as in the industrial sector as in the residêncial sector. Which brings people to research and develop more efficient methods of communications. Thus, it's goal is to study enhancements that its tecnic would bring to better approach the soaring data and communication demand in the world. This work study the characteristics of the generation of optical comb carriers, as a method of increase the data transmission density. With this project we could conclude how the MZM works and it's main characteristics that defines the optimal) operational points.

key-words: *recirculating frequency shifting*. OFDM. Optical Circuits.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Exemplo de Multiplexação por Divisão no Tempo	19
Figura 2 – Exemplo: Banda de passagem de filtro passivo	20
Figura 3 – Exemplo: Multiplexação por divisão de Frequências	21
Figura 4 – Amostragem de um sinal	22
Figura 5 – Comparação entre FDM com o OFDM	23
Figura 6 – Modelo RFS proposto.	24
Figura 7 – Exemplo de um Mach-Zehnder	25
Figura 8 – Comportamento de um Mach-Zehnder	25
Figura 9 – Banda passante do Filtro utilizado	27
Figura 10 – Um modelo de MZM proposto por J. M. B. Oliveira	30
Figura 11 – Um modelo de MZM proposto por Arnaldo Paterline Togneri	31
Figura 12 – Deslocamento na frequência causado pelo termo exponencial	35
Figura 13 – Deslocamento na frequência causado pelo termo cosseno	36
Figura 14 – Variação do defasamento entre os sinais de entrada no MZM	37
Figura 15 – Variação da amplitude da senoide gerada através da soma e diferença entre os sinais de entrada	37
Figura 16 – Senoides resultantes	38
Figura 17 – Sinais que serão efetivamente utilizado	40
Figura 18 – Variação do angulo do termo exponencial	40
Figura 19 – Variação da Amplitude do cosseno com variação do V_{bias}	41
Figura 20 – Pente de portadora ópticas criadas	42
Figura 21 – Diferença entre portadoras de 0.36 db	43
Figura 22 – Sinal de Dados para modulação das portadoras no MZM	44
Figura 23 – Espectro do pente óptico antes e depois da modulação	44
Figura 24 – Comparação dos diagramas de olhos normalizados	45
Figura 25 – Mudança da abertura do diagrama de olho com variação de θ	46
Figura 26 – Mudança da abertura do diagrama de olho com variação de Polarização	47
Figura 27 – Distorções no Diagrama de Olho	48
Figura 28 – Atraso do sinal devido ao comprimento da fibra	49
Figura 29 – Mudança na abertura do diagrama de olho devido ao comprimento da fibra	50

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – A previsão da Cisco VNI — Contexto Histórico da Internet	13
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AOFFT	<i>All Optics Fast Fourier Transform</i>
BB	<i>Back to Back</i>
COMB	Pente de portadoras ópticas
CW	<i>Continuos Wave</i>
DSB	<i>Double Side Band</i>
FDM	<i>Frequency Division Multiplesing</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
MZM	<i>Mach Zehnder Modulator</i>
OF	<i>Optical Filter</i>
OFDM	<i>Ortogonal Frequency Division Multiplexin</i>
ONU	<i>Optical Network Unity</i>
RFS	<i>Recirculating Frequency Shift</i>
SSB	<i>Single Side Band</i>
TDM	<i>Time Division Multiplexing</i>
Vbias	Tensão de polarização
Vpi	<i>Tensão característica do MZM</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

ω_n	Frequência em radianos do sinal modulante
ω_c	Frequência em radianos do sinal de entrada
$\Delta\phi$	Sinal modulante que é aplicado a um braço do MZM
ϕ	Sinal modulante que é aplicado a um braço do MZM
E_{out}	Sinal de saída do MZM
E_{in}	Sinal de entrada do MZM
V_π	Tensão característica do MZM
$v(t)$	Componente senoidal do sinal modulante
i	Indicie que indica a qual braço pertence o sinal
t	Variável que indica tempo
α	Variável arbitrária
β	Variável arbitrária
A	Variável arbitrária
B	Variável arbitrária
π	Contante aproximadamente 3,14
f_c	Frequência central do sinal modulante
P_0	Potência base de saída do MZM

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Motivação do Trabalho	13
1.2	Objetivo	14
1.3	Estrutura do Trabalho	15
2	METODOLOGIA	16
2.1	Embasamento Teórico	16
2.2	Modelagem	16
2.3	Análise	16
3	EMBASAMENTO TEÓRICO	18
3.1	Conceitos Básicos em Telecomunicações	18
3.2	Modulação OFDM	22
3.3	Geração de Múltipla Portadoras	23
3.4	Deslocamento de Frequência por Re-Circulação RFS	24
3.5	O Modulador <i>Mach-Zehnder</i>	25
3.6	O Laser CW	26
3.7	Acopladores de 3 db	26
3.8	Filtro Ativo Passa Banda	26
3.9	Amplificador Ideal	27
4	MODELAGEM DO SISTEMA	28
4.1	Laser CW	28
4.2	Acopladores	28
4.3	Amplificador Ideal	29
4.4	Filtro Gaussiano	29
4.5	Modulador Mach Zehnder	29
5	ANALISE DE RESULTADOS	34
5.1	Entendendo o Princípio do Mach-Zehnder	34
5.2	Entendendo o Modelo do MZM	36
5.3	Definindo Parametros do MZM	39
5.4	Geração do Pente Óptico	42
5.5	Transmissão e Recepção de Dados	43
6	CONCLUSÃO	51

REFERÊNCIAS 53

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação do Trabalho

Não pode-se negar o poder da informação, pois cotidiano das pessoas depende do que elas sabem, do que lhes é apresentado, do que elas buscam para si, etc. De fato, pode-se ter acesso a informações como clima, trânsito, política, avisos e entretenimento, tudo ao mesmo instante com apenas um toque. Logo fica claro como o rápido acesso a ela faz-se necessário, pois a conclusão de negócios, o funcionamento de órgãos sociais e econômicos e mesmo a ação de governos dependem da rápida circulação de informações atualmente. De fato, o próprio funcionamento do mundo contemporâneo depende disso. Portanto para garantir itens básicos como a segurança, bem estar, lazer e para manutenção da sociedade vê-se a importância do acesso a informação.

Devido à grande facilidade para disseminar informações, fato marcante da terceira revolução industrial, houve um desenvolvimento tecnológico expressivo o qual resultou na facilidade de intercâmbio de informações. Este fenômeno não é visto somente no âmbito pessoal, mas também em ambientes industriais, onde há a necessidade de meios de comunicação rápidos e confiáveis muito em função da automatização dos processos. Também vale destacar a crescente demanda por aplicações multimídia (vídeo conferência, P2P, IPTV, etc) em todo o mundo, tendo como consequência o aumento da quantidade de informações a serem transportadas pelas redes de telecomunicação como vê-se no quadro 1 (CISCO, 2015).

Quadro 1 – A previsão da Cisco VNI — Contexto Histórico da Internet

Ano	Trafico Global na Internet
1992	100 GB por dia
1997	100 GB por hora
2002	100 GBps
2007	2000 GBps
2014	16,144 GBps
2019	51,794GBps

Fonte: Cisco, 2015

Fica claro o ciclo de desenvolvimento onde a tecnologia cresce para atender uma necessidade que ela mesmo criou. Isso levanta o questionamento de até que ponto o desenvolvimento tecnológico é sustentável e quais são seus limites. Logo, percebe-se a necessidade de avanços em novas áreas de pesquisa, as quais busquem maneiras e/ou tecnologias que possam superar as limitações que se aproximam. Como por exemplo, a tecnologia 5G, para

aumentar taxa de transmissão em *links* de satélites (NORDRUM, 2016; RAPPAPORT et al., 2013).

Pode-se citar outras técnicas de modulação como sistema de detecção coerente, a geração de multi-portadoras para aumentar a eficiência na transmissão de dados e outros (NUNES et al., 2014) (SUNG et al., 2015), tendo basicamente duas linhas de pesquisa, uma para o desenvolvimento de novas tecnologias e outra no teste de novas metodologias (FONTAINE et al., 2008).

Uma famosa frase do poeta e filósofo George Santayana diz (SANTAYANA, 2016), para conhecer nosso futuro devemos conhecer nosso passado. Analisando essa premissa por um espectro científico, podemos dizer que pesquisas e projetos já realizados norteiam pesquisas e projetos futuros. Existem diversos estudos que buscam metodologias mais eficientes como, por exemplo, a geração de multi-portadoras, as quais vêm sendo muito trabalhadas na literatura (SUNG et al., 2015). Estas possuem o intuito de aumentar a eficiência do uso do canal, seja vencendo deficiências existentes. Evitando nulos no espectro do canal, ou por aumentar da densidade de dados transmitidos como feito na modulação OFDM (*Orthogonal Frequency Division Modulation*). Aqui vê-se então a importância de se estudar um método para a geração de multi-portadoras.

Nesse trabalho será feito um estudo da geração de multi-portadoras a partir de um único *laser* através de um anel óptico sendo o componente principal um modulador Mach-Zehnder (MZM - *Mach-Zehnder-Modulator*) (LAWETZ et al., 1997). Este possibilita gerar novas portadoras com uma relação de espaçamento entre elas de acordo com a frequência do sinal modulante. Ainda dependendo da configuração de operação do MZM podem ser geradas portadoras na forma *Double-Side-Band* (DSB), onde tem-se, teoricamente, frequências negativas e positivas sendo geradas. Ou ainda a configuração *Single-Side-Band* (SSB) onde somente frequências negativas ou positivas são geradas. Ou seja, dispõe-se uma grande flexibilidade de ajuste e configurações para geração de multi-portadoras.

1.2 Objetivo

Será abordado a construção do anel óptico e a análise de sua resposta para geração de multi-portadoras ópticas. Sendo esse resultado alcançado após a construção de um modelo do anel que será simulado para a obtenção das características base para sua construção. Pelas simulações também será possível obter uma expectativa do comportamento desse modelo. Por fim, testes laboratoriais serão realizados para validar a simulação.

1.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho encontra-se dividido em seis partes distintas.

Primeiramente é feita uma introdução sobre o projeto e os fatos que motivam a realização do mesmo. Essa apresentação é feita mostrando um pouco do panorama mundial e como o meio científico vem abordando essa área.

Em segundo lugar, será apresentado a metodologia na qual esse projeto foi desenvolvido. Mostra-se o plano de ação e as etapas necessárias para a conclusão do mesmo em tempo hábil.

Em terceiro lugar, tem-se o embasamento teórico, onde grande parte da teoria necessária para o entendimento e realização desse projeto é apresentada, buscando auxiliar o leitor na compreensão dos temas aqui trabalhados.

Seguindo em quarto vem a modelagem do sistema, em que, o modelo teórico dos dispositivos serão levantados. Através da modelagem matemática e das devidas aproximações teóricas, busca-se referenciar o ambiente laboratorial para o computacional, tendo a preocupação de retratar a realidade o melhor possível. Assim pode-se ter uma previsão dos resultados esperados em laboratório baseando-se nas simulações.

Em quinto serão apresentados os resultados e as análises realizadas. Essa etapa é essencial para a conclusão do projeto, pois o trabalho de retirar informações dos diversos dados que são gerados requer entendimento físico, teórico e prático do modelo testado. Sendo que neste ponto onde a modelagem feita será confrontada com a teoria. Realiza-se correções quando necessárias e mudanças no modelo se pertinentes.

Por fim, apresentar-se-á a conclusão dos resultados obtidos e as conclusões proveniente das análises feitas. Da mesma forma verificando se os objetivos inicialmente proposto foram atingidos. Finalizando, serão feitas sugestões para o aperfeiçoamento desse projeto e propostas para trabalhos futuros.

2 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento desse projeto foram necessárias três etapas distintas: embasamento teórico, modelagem e análise nesta sequência para garantir o entendimento de cada passo dado.

Também é de fundamental importância encontros semanais com o orientador do projeto, nos quais busca-se discutir o andamento da pesquisa. Nelas será discutido o desenvolvimento do projeto, o que está impedindo o avanço e quais os próximos passos a serem tomados.

2.1 Embasamento Teórico

Nessa etapa preocupou-se com o estudo e entendimento dos componentes e teorias possivelmente aplicáveis, de forma a construir um embasamento teórico confiável. Facilitando assim o processo de avaliar as etapas que forem sendo cumpridas, possibilitando análises críticas assim como uma maior precisão e acuidade para os resultados inicialmente coletados.

Como conclusão desse estudo e levantamento bibliográfico, objetivou-se definir um modelo inicial do processo de geração de multi-portadoras. Este servirá de base para o desenvolvimento do código que irá ser responsável pela simulação do modelo.

2.2 Modelagem

Após a compreensão da teoria base da RFS deu-se início à implementação do código na plataforma *MATLAB* para simular o modelo proposto.

Nesse processo foi feita a implementação das características básicas dos dispositivos utilizados na construção do anel óptico. O modelo, o qual foi obtido através das equações adquiridas, é traduzido para um programa que tratará da simulação do processo como um todo.

2.3 Análise

Nesse momento a base adquirida durante o embasamento teórico será confrontada com os resultados obtidos na modelagem, objetivando verificar a validade do modelo em estudo. Possibilitando assim sua utilização para avaliar o desempenho do sistema na geração do pente óptico e discutindo possíveis configurações para o sistema RFS e suas características.

É importante ressaltar que nenhuma dessas etapas é independente das outras. De fato, a medida que o modelo for sendo desenvolvido, novas pesquisas serão feitas e as mesmas adicionadas à base teórica desse modelo quando pertinente. Além disso, erros ou valores fora do normal servirão como evidenciadores de falhas na modelagem, o que resultará em mais pesquisas e correções no modelo proposto.

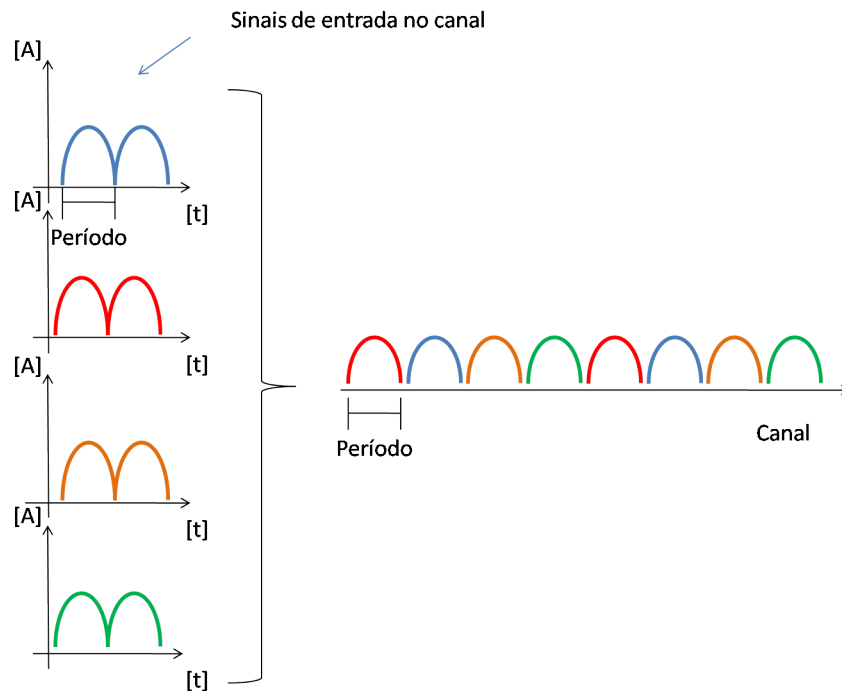
3 EMBASAMENTO TEÓRICO

Portanto, busca-se com esse trabalho contribuir para o meio acadêmico devendo inicialmente ter conhecimento de trabalhos já desenvolvidos nessa área. Ou seja, estaremos aprendendo com o passado, para que este trabalho fosse desenvolvido com clareza e evitando pedras de tropeço já indicada por essas pesquisas. Logo teremos uma boa base teórica para esse projeto.

3.1 Conceitos Básicos em Telecomunicações

O ser humano não é capaz de detectar rápidas variações do ambiente a sua volta ([KENT, 2010](#)). Como exemplo a visão com que uma variação de 16 quadros por segundo (16 Hz) a ilusão do movimento já é percebida. Tal característica é utilizado no meios de comunicação para se reduzir a quantidades de dados que é necessária ser transmitida. Logo, não é necessário transmitir cada instante de uma filmagem, basta transmitir 24 partes dessa imagem (taxa comumente usada na industria). Logo, o tempo entre essas imagens pode ser utilizado para transmitir outras informações. Isso nos leva ao conceito de multiplexação por divisão de tempo (TDM *Time Division Multiplexing*), que vem para otimizar a utilização do meio de comunicação ([ROUSE, 2005b](#)). Que consiste em dividir um dado no tempo sem comprometer o entendimento da informação transmitida e intercalando outras informações no tempo vago, como visto na Figura 1 na qual os sinais são intercalados no canal. Dessa forma o meio sempre estará sendo ocupado por alguma informação.

Figura 1 – Exemplo de Multiplexação por Divisão no Tempo

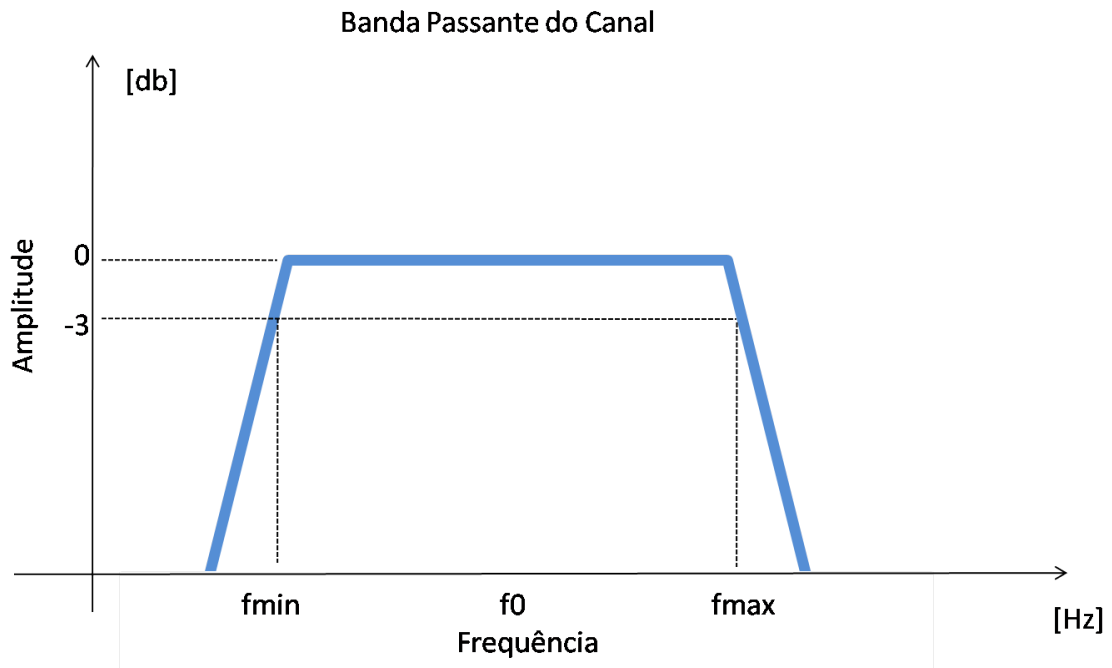


Fonte: O autor.

Nossa percepção também é limitada pela frequência do evento, como é espectro de luz visível numa faixa de 380 THz a 700 THz (HADHAZY, 2015), ou o espectro audível numa faixa de 3 Hz a 20 kHz (BBC, 2014). De fato nossa visão e audição não são capazes de perceber nada além dessas faixas. Em adição, o meio por onde esses fenômenos se propagam afeta diretamente sua intensidade, a qual diminuir drasticamente o sinal dependendo de sua frequência (JUNIPER, 20016). Ou seja, o meio atenua o sinal.

Pode-se concluir que nesse caso o canal está agindo como um filtro sobre o sinal, o que nos traz o conceito de banda passante, já que existe uma faixa de frequências na qual um filtro exerce pouca ou quase nenhuma influência, conforme ilustra a Figura 2. Filtros são utilizados para separar algo específico de um conjunto maior, sendo que, ele atenua todos os sinais que estão fora da sua banda passante. Assim age um canal filtrando os sinais que nele trafegam (JUNIPER, 20016).

Figura 2 – Exemplo: Banda de passagem de filtro passivo

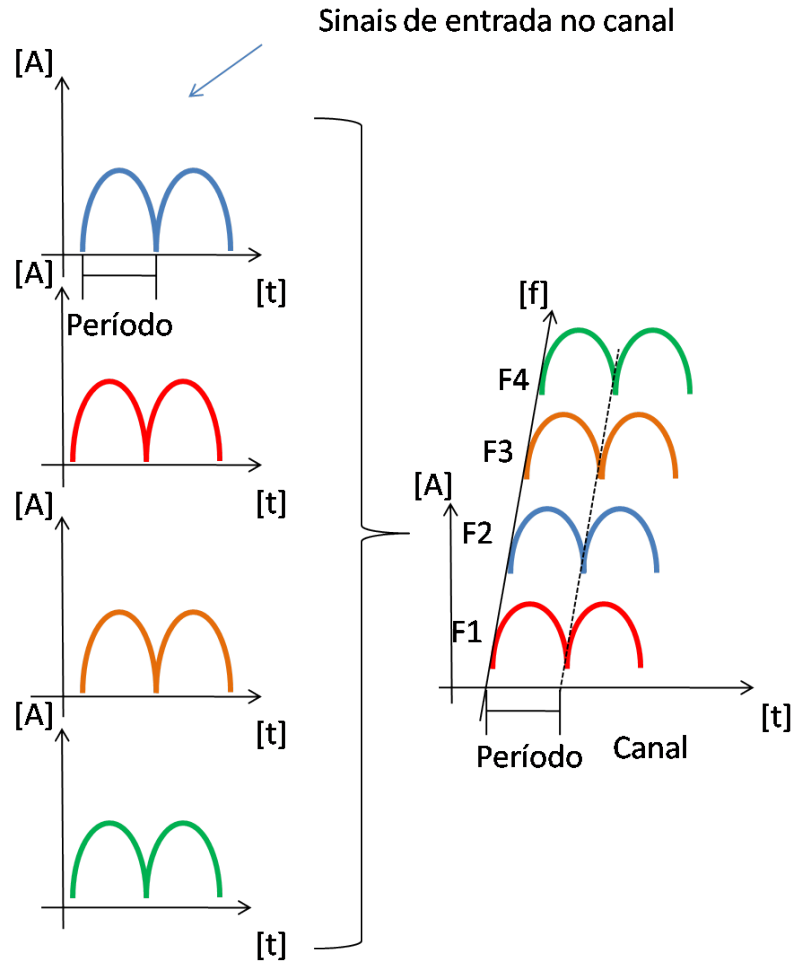


Fonte: O autor.

Logo, uma informação deve ser condicionada a um sinal adequado para o canal de comunicação escolhido. Associa-se então o sinal de dado a um sinal apropriado ao canal denominado portadora alterando-a. Ou seja, a portadora é modulada de acordo com a informação do sinal (sinal modulante).

Contudo portadoras ocupam um porção pequena da banda passante do canal. Logo para melhor eficiência do uso do canal utiliza-se a técnica multiplexação por divisão de frequências (FDM *Frequency Division Multiplexing*) conforme ilustra a Figura 33. Nela, portadoras são alocadas dentro da banda passante para transmissão de dados (ROUSE, 2005a). Logo, associa-se que o TDM e o FDM são apenas dois exemplos de técnicas utilizadas para aumentar a eficiência do canal.

Figura 3 – Exemplo: Multiplexação por divisão de Frequências

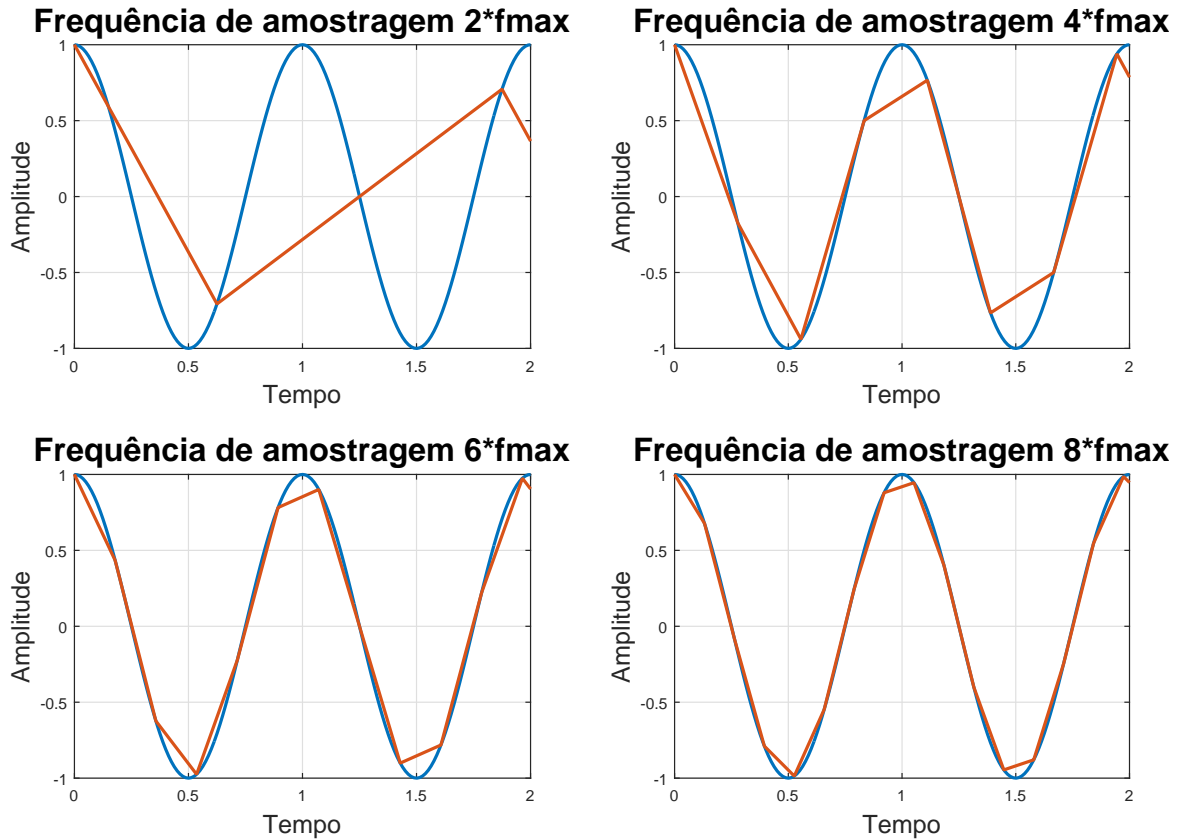


Fonte: O autor.

Primeiramente, o teorema da amostragem de Nyquist (LATHI, 2007a). Diz que um sinal pode ser reconstruído a partir de suas amostras (Figura 4) desde que cada amostra seja retirada minimamente numa taxa igual a 2 vezes a frequência máxima presente no sinal original. Por isso, quanto maior é a taxa de amostragem com maior exatidão pode-se representar o sinal. De fato, se observa-se a Figura 4 pode-se perceber que as regiões mais lineares são bem representadas. Contudo as outras áreas ficam distorcidas pois não há pontos suficientes para representá-las. Logo, essa deformação na onda indicaria presença de componentes harmônicos de alta frequência. Logo, quanto maior a taxa de amostragem menor a confusão de que existem componentes de alta frequência que compõem o sinal.

O segundo princípio é a representação de Fourier para sinais. O físico Fourier demonstrou que qualquer sinal periódico pode ser representado por infinitas senóides e/ou co-senóides de frequência múltipla do sinal fundamental (LATHI, 2007b). Existem outras formas de representação para essa série matemática, mas nesse trabalho abordar-se-á a série complexa de Fourier, pois as ondas representadas aqui são de natureza complexa, conforme descrita

Figura 4 – Amostragem de um sinal



Fonte: O autor.

em 3.1.

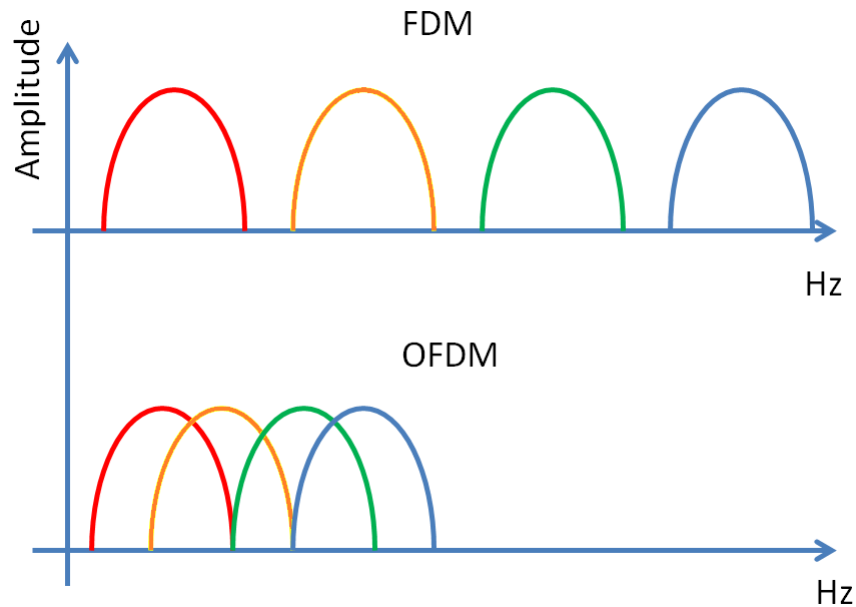
$$x(t) = \sum_{-\infty}^{+\infty} D_n e^{j\omega_0 kt} \quad (3.1)$$

3.2 Modulação OFDM

Atualmente têm-se dado bastante importância à utilização eficiente do canal de comunicação. Anteriormente dividia-se a banda passante em sub bandas, e em cada banda, um sinal era transmitido. Mas essas bandas eram espaçadas, ou seja, havia partes da banda do canal que não eram usadas. A modulação OFDM é uma forma de utilização com maior eficiência da banda do canal (LANGTON, 2013). Essa é uma técnica de multiplexação por divisão de frequência, com a diferença principal de que as subportadoras são ortogonais entre si, em que cada portadora possui uma frequência múltipla inteira da fundamental, o que lembra muito a serie de Fourier descrita anteriormente. Logo têm-se a facilidade de recepção do sinal coma utilização da transformada rápida de Fourier (FFT - *Fast Fourier Transform*). Em outras palavras, uma vez que as portadoras geradas são múltiplas de uma frequência fundamental (ortogonais) elas podem ser multiplexadas e de-multiplexadas

através de processos matemáticos (LANGTON, 2013). Com o OFDM foi possível aumentar a eficiência como ilustrado na Figura 5.

Figura 5 – Comparação entre FDM com o OFDM



Fonte: O autor.

3.3 Geração de Múltipla Portadoras

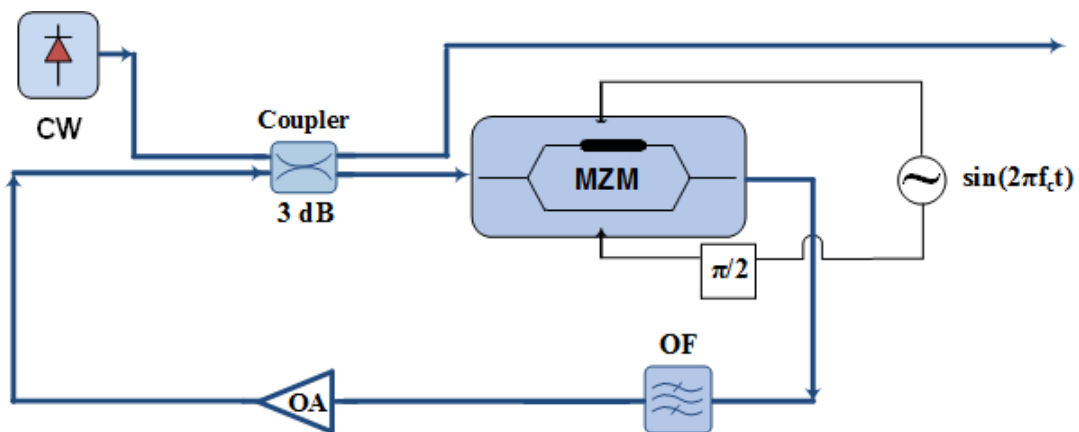
A demanda atual de dados, requer urgência em estabelecer novas metodologias para melhor utilização da banda passante. A forma como múltiplas portadoras são geradas é um tópico bastante discutido no meio científico (ZHANG et al., 2012). Em sistemas ópticos, cada portadora seria um comprimento de onda dentro da banda de passagem do canal. Utilizar fontes independentes para gerar cada comprimento de onda torna o processo dispendioso e complexo, pois deve-se controlar a temperatura e a corrente em cada fonte laser, de forma a se manter uma uniformidade entre as portadoras.

Atuais pesquisas descrevem formas de gerar diversos comprimentos de onda a partir de uma única fonte (LEI et al., 2015), em que cria-se um conjunto de multi-portadoras menos sensíveis a mudanças de temperatura e corrente, pois qualquer mudança que a fonte sofrer todos as portadoras mudarão da mesma forma.

3.4 Deslocamento de Frequência por Re-Circulação RFS

O modelo consiste em um laser contínuo (*CW-Continuous Wave*) que gera a portadora inicial, seguido de um acoplador que une o sinal proveniente do anel óptico. Metade da potência desse sinal é transmitido, enquanto a outra metade (sinal CW acrescido do sinal proveniente do anel óptico) modula o MZM (*Mach-Zehnder Modulator*). O MZM é mesmo polarizado por uma tensão de polarização e um sinal senoidal (com frequência f_c arbitraria). O sinal que entra no anel óptico é inicialmente amplificado por um amplificador (*OA-Optical Amplifier*). Tal dispositivo foi implementado como sendo parcialmente ideal, pois adiciona ruído. Em sequência, um filtro óptico (*OF-Optical Filter*) tem como função definir o número máximo de portadoras a serem geradas. E por fim esse sinal modulado, amplificado e filtrado volta ao acoplador 3 db que o re-adiciona com CW de entrada. Esse sinal composto é então dividido em dois sinais de igual potência onde uma parte voltará ao anel óptico e a outra transmitida. O sinal transmitido irá até um cliente ou conjunto de clientes que são denominados ONU (*Optical Network Unity*). (LI et al., 2010),(LEI et al., 2014),(KANNO et al., 2012),(SIMÕES; PATACA; ROCHA, 2012).

Figura 6 – Modelo RFS proposto.

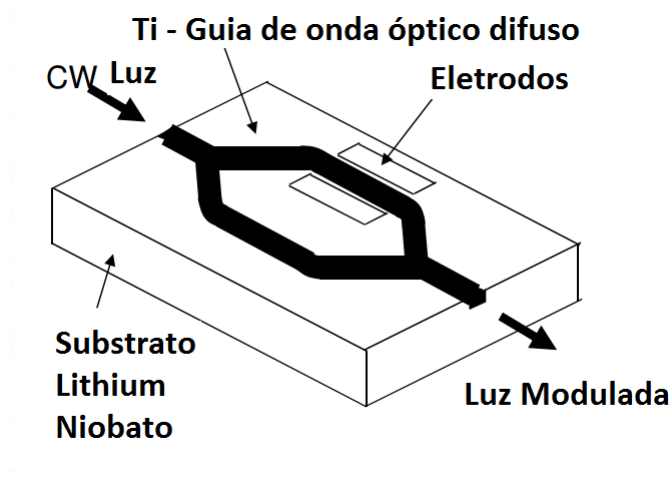


Fonte: O autor.

3.5 O Modulador *Mach-Zehnder*

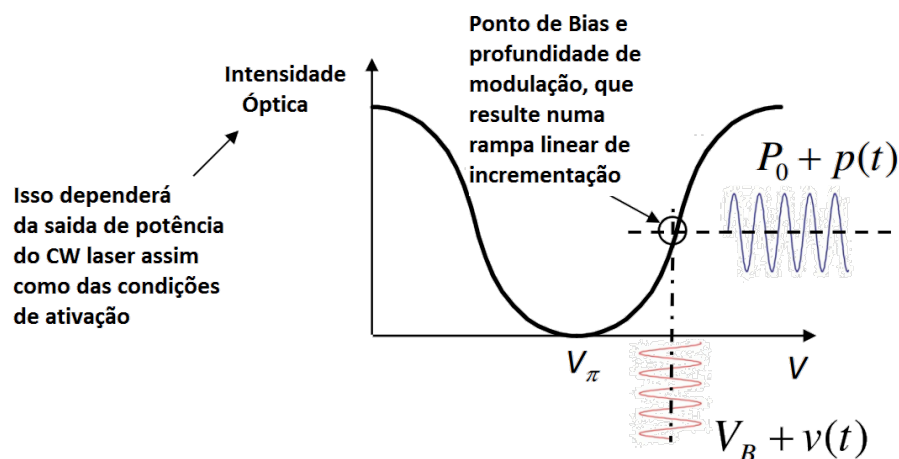
Neste trabalho utiliza-se componentes ópticos em sua maioria. Sendo o principal o modulador *Mach-Zehnder-Modulator* como mostrado na Figura 7 (IEZEKIEL, 2015). Nele vemos que consiste basicamente de um material cujo o índice de refração varia proporcionalmente com a uma diferença de potencial aplicado como mostrado na Figura 8. Ou seja, dependendo como é polarizado o sinal que passa por ele é atrasado.

Figura 7 – Exemplo de um Mach-Zehnder



Fonte: Stravos Iezekiel, 2015
Editado pelo autor.

Figura 8 – Comportamento de um Mach-Zehnder



Fonte: Stravos Iezekiel, 2015
Editado pelo autor.

Podemos comparar esse modulo com uma janela, em que dia, quando há luz solar, esse passa diretamente pela janela. Equivalentemente o MZM permite que o sinal do laser CW passe quando há uma tensão de polarização. Contudo, há uma persiana que pode-se abrir ou fechar, controlando assim o fluxo luminoso que passa através da janela. O mesmo ocorre para a tensão $v(t)$ (Figura 8), de forma variando a tensão de polarização varia-se também a potência de saída do sinal óptico.

Neste trabalho o MZM possui uma configuração para funcionar como modulador de banda única com portadora suprimida (SSB-SC - *Single Side Band with Suppressed Carrier*). Nessa configuração a tensão de polarização e o sinal são aplicados em um eletrodo do MZM. A transformada de Hilbert é utilizada para gerar tal sinal.

3.6 O Laser CW

Em sua essência trata-se de um dispositivo óptico responsável por gerar a portadora inicial. Por exemplo, um laser CW (*Continuous Wave*) emite um feixe luminoso (a portadora) com comprimento de onda na faixa de nano metros. Ou seja, tais portadoras são geradas na ordem de terahertz. Porém, no modelo proposto, o sinal do laser é modelado com sendo de módulo unitário e com frequência normalizada pelo comprimento de onda.

3.7 Acopladores de 3 db

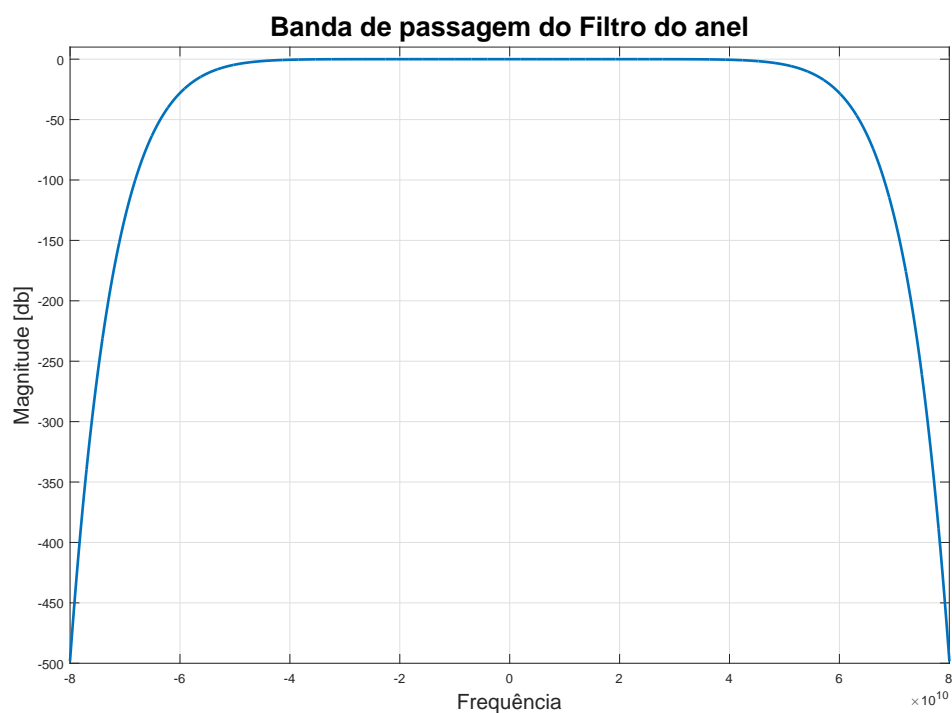
Nesse trabalho faz-se necessário a utilização de um acoplador de 3 db sendo responsável para unir o sinal que vem do anel e o sinal do laser CW.

Sabendo que quando uma onda se propaga ela sofre atenuação devido ao meio e também em toda mudança de meio ocorre reflexão e transmissão da onda os acopladores atualmente utilizados são construídos para possuírem uma impedância muito próxima a da fibra. Como resultado reduz-se bastante a refração e reflexão da onda. Portanto, optou-se por adotar acopladores ideais (sem índice de reflexão e sem perda), pois os não ideais contribuem somente com ruídos no sinal.

3.8 Filtro Ativo Passa Banda

Também para simplificação foi utilizado um filtro Super-Gaussiano, que tem a característica de acentuada queda na frequência de corte e não adiciona nenhum atraso de fase. Serve simplesmente para limitar o número de portadoras geradas por esse processo, conforme mostra a Figura 9.

Figura 9 – Banda passante do Filtro utilizado



Fonte: O autor.

3.9 Amplificador Ideal

Com o intuito de compensar as perdas que o sinal sofre devido modulação realizada pelo MZM e a atenuação no filtro, um ganho deve ser adicionado ao sinal para evitar sua extinção. Logo adicionou-se um amplificador ideal onde desvios de fase, saturação e outros fatores não são levados em conta. Mas para ser um pouco mais realista também foi adicionado um ruído branco ao sinal amplificado.

4 MODELAGEM DO SISTEMA

É o objetivo desse trabalho o estudo do princípio de geração de multi portadoras através do RFS. Assim buscou-se simplificar fatores que não contribuiriam de forma significativa para esse estudo.

4.1 Laser CW

Devido ao fato de que o modelo será estudado em banda base, ou seja, a portadora em terahertz será trazida para a origem, o laser *CW* terá frequência zero e amplitude constante. Esse modelo é simplesmente um vetor. Seu tamanho é relativo ao tempo total de simulação e sua amplitude é unitária, como pode ser visto na equação (4.1).

$$E = 1 \quad \forall t \in \{-\infty, +\infty\} \quad (4.1)$$

Onde E é o campo de saída do laser *CW* e t o tempo.

Adotando o modelo (4.1) não apenas simplifica-se o projeto, mas também o viabiliza. Fazendo uma simples análise do tamanho do vetor de amostras para simulação, representando tal frequência em terahertz, seria necessária uma capacidade de memória além da disponível.

4.2 Acopladores

Os acopladores são considerados ideais, logo eles não modificam o sinal. O primeiro acoplador é representado por um somador, pois ele adiciona a resposta do anel à portadora em banda base, e o segundo acoplador é representado por uma divisão por dois, pois uma metade do sinal entra no anel e a outra é transmitida, como pode ser visto na equação 4.2.

$$E_{out_i} = \frac{E_{in_1} + E_{in_2}}{2}, \quad i = 1, 2, \quad (4.2)$$

onde E_{out} representa o sinal de saída do acoplador e o índice i indica o número de saída (duas no total), sendo E_{in_1} e E_{in_2} os sinais de entrada no acoplador.

4.3 Amplificador Ideal

Similarmente aos acopladores, este componente foi representado por uma constante que é multiplicada aos sinal depois deles serem modulados, filtrados. Um ruído gaussiano brando é adicionado ao sinal, como pode ser visto na equação (4.3).

$$E_{out} = K.E_{in} + WNB, \quad (4.3)$$

onde E_{out} é a saída do amplificador, sendo E_{in} os sinais de entrada, K o ganho e WNB o ruído (*White Noise Background*) do amplificador.

4.4 Filtro Gaussiano

Também foi modelado como um filtro ideal, sua banda passante definida centralizada na origem e sua largura de banda limitando a geração de portadoras. Esse filtro possui uma atenuação bem acentuada, sem oscilações e com defasamento zero, como pode ser visto na equação (4.4).

$$H = e^{\frac{-2.m.(f-fc)}{f0}}, \quad (4.4)$$

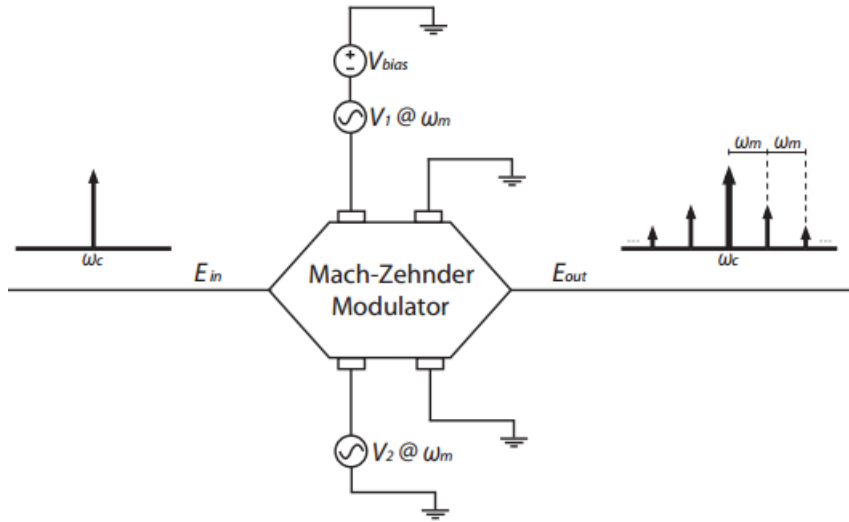
onde H é a expressão do filtro, f é a frequência inicial, fc é a frequência central, $f0$ é a largura de banda do sinal e m é a inclinação do filtro, definido por (4.5).

$$f0 = \frac{f_{FWM}}{2 \cdot \log(1 + \sqrt{2})}, \quad (4.5)$$

4.5 Modulador Mach Zehnder

O modelo do MZM foi obtido a partir da comparação de duas equações que descrevem o comportamento deste dispositivo. A equação (4.8) adotada por J. M. B. Oliveira, H. M. Salgado e M. R. D. Rodrigues (OLIVEIRA; SALGADO; RODRIGUES, 2005) baseada no modelo da Figura 10 foi comparada com a equação (4.9) adotada pelo então Mestrando Arnaldo Paterline Togneri (TOGNERI, 2005) baseada no modelo da figura 11.

Figura 10 – Um modelo de MZM proposto por J. M. B. Oliveira



Fonte: J. M. B. Oliveira, 2005
Editado pelo autor.

Para um o sinal de entrada dado por:

$$E_{in} = e^{-j\omega_c t}, \quad (4.6)$$

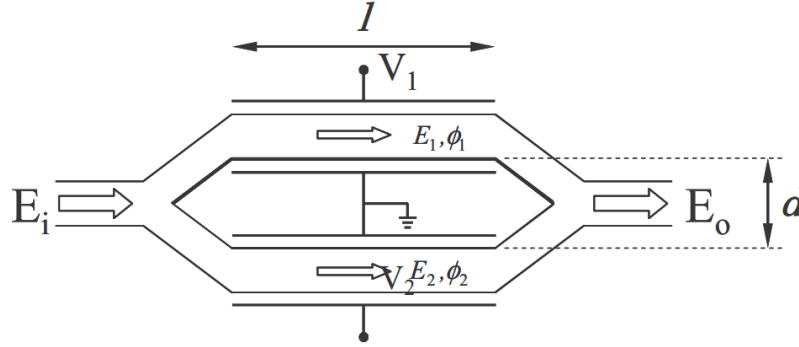
Onde o sinal de entrada é dado por (4.7):

$$\Delta\phi_i(t) = \frac{\pi}{V_\pi} \cdot v_i(t) \quad , i = 1, 2, \quad (4.7)$$

têm-se que

$$E_{OUT}(t) = \frac{1}{2} \cdot e^{j\omega_c t} \left[e^{j\Delta\phi_1(t)} + e^{j\Delta\phi_2(t)} \right] \quad (4.8)$$

Figura 11 – Um modelo de MZM proposto por Arnaldo Paterline Togneri



Fonte: Arnaldo Paterline Togneri , 2005
Editado pelo autor.

Igualmente,

$$E_0(t) = L \cdot \frac{A}{2} \cdot [e^{-j \cdot (\omega_c \cdot t \cdot \phi_1)} + e^{-j \cdot (\omega_c \cdot t \cdot \phi_2)}] \quad (4.9)$$

Onde:

$E_{out}(t)$ é a saída do MZM, E_{in} é o sinal de entrada, ω_c é a frequência em radianos, $\Delta\phi(t) = \phi$ é o sinal de entrada nos braços do MZM, V_π é a tensão característica do MZM, $v(t)$ é o sinal responsável pela modulação de E_{in} , i é o índice que indica qual braço aquele sinal pertence, t é a variável de tempo.

Pode-se perceber que ambas equações são bem parecidas. Com apenas algumas manipulações é possível igualá-las, com a diferença de que a equação (4.9) leva em conta uma amplitude inicial e o comprimento de um eletrodo, enquanto que a equação (4.8) considera essa relação igual a 1 (um). Outra diferença é o sinal negativo na exponencial do defasamento o qual indica a direção em que o sinal de entrada será deslocado. Por este motivo tomou-se como base a equação (4.8) para caracterizar o MZM.

A partir da notação de Euler, podem-se reescrever os defasamentos adicionados ao sinal de entrada na forma de cossenos e senos como mostra a equação (4.10).

$$E_{OUT}(t) = \frac{1}{2} \cdot e^{j \cdot \omega_c \cdot t} \left\{ \cos[\Delta\phi_1(t)] + j \cdot \text{sen}[\Delta\phi_1(t)] + \cos[\Delta\phi_2(t)] + j \cdot \text{sen}[\Delta\phi_2(t)] \right\} \quad (4.10)$$

Da trigonometria sabe-se que:

$$\cos(\alpha + \beta) = \cos(\alpha).\cos(\beta) - \sin(\alpha).\sin(\beta) \quad (4.11)$$

$$\cos(\alpha - \beta) = \cos(\alpha).\cos(\beta) + \sin(\alpha).\sin(\beta) \quad (4.12)$$

Ou seja:

$$\cos(\alpha + \beta) + \cos(\alpha - \beta) = 2.\cos(\alpha).\cos(\beta). \quad (4.13)$$

Seja

$$\alpha + \beta = A \quad (4.14)$$

também

$$\alpha - \beta = B \quad (4.15)$$

portanto

$$\alpha = \frac{A + B}{2} \quad (4.16)$$

também

$$\beta = \frac{A - B}{2} \quad (4.17)$$

Logo, substituindo (4.14) e (4.15) antes da igualdade em (4.13) e substituindo (4.16) e (4.17) depois da igualdade tem-se que

$$\cos(A) + \cos(B) = 2.\cos\left(\frac{A + B}{2}\right).\cos\left(\frac{A - B}{2}\right). \quad (4.18)$$

Similarmente

$$\sin(A) + \sin(B) = 2.\sin\left(\frac{A + B}{2}\right).\cos\left(\frac{A - B}{2}\right) \quad (4.19)$$

Logo supondo que $A = \Delta\phi_1(t)$ e que $B = \Delta\phi_2(t)$ pode-se reescrever a equação (4.10). Assim chega-se a equação (4.20) fazendo:

$$E_{OUT}(t) = \frac{1}{2}.e^{j.w_c.t} \left\{ 2.\cos\left[\frac{\Delta\phi_1(t) + \Delta\phi_2(t)}{2}\right].\cos\left[\frac{\Delta\phi_1(t) - \Delta\phi_2(t)}{2}\right] + j.2.\sin\left[\frac{\Delta\phi_1(t) + \Delta\phi_2(t)}{2}\right].\cos\left[\frac{\Delta\phi_1(t) - \Delta\phi_2(t)}{2}\right] \right\} \quad (4.20)$$

Rearranjando a equação, chega-se a equação (4.21).

$$E_{OUT}(t) = Ein.cos \left[\frac{\Delta\phi_1(t) - \Delta\phi_2(t)}{2} \right] \cdot \left\{ \left[\cos\left(\frac{\Delta\phi_1(t) + \Delta\phi_2(t)}{2}\right) \right] + j.sen \left[\frac{\Delta\phi_1(t) + \Delta\phi_2(t)}{2} \right] \right\}, \quad (4.21)$$

ou ainda

$$E_{OUT}(t) = Ein.cos \left[\frac{\Delta\phi_1(t) - \Delta\phi_2(t)}{2} \right] .e^{j.\left[\frac{\Delta\phi_1(t) + \Delta\phi_2(t)}{2}\right]} \quad (4.22)$$

Através desse resultado implementou-se a equação (4.22) no *Matlab*. Os dados característicos do MZM foram tirados da literatura, de forma que os parâmetros que desejavam-se mudar eram a tensão de polarização do dispositivo e o defasamento entre os sinais aplicados em ambos eletrodo do MZM.

5 ANÁLISE DE RESULTADOS

Os resultados aqui apresentados vêm para explicar o funcionamento do Mach Zehnder e como o processo de geração de multi-portadoras ocorre, buscando sempre a melhor configuração para esse sistema.

5.1 Entendendo o Princípio do Mach-Zehnder

Pode-se perceber que na equação (4.22) há três parcelas distintas, dois termos exponenciais e um cosseno. O termo exponencial refere-se à onda de entrada ($e^{j\omega_c t}$), ou seja, tem-se uma representação clássica de Euler onde uma onda possui uma componente real e outra imaginária. Essa parcela, quando circular pelo anel óptico, realiza uma adição positiva ou negativa, dependendo da resposta do anel.

O termo exponencial está relacionado também ao deslocamento em frequência da onda de entrada como também ao parâmetro de variação da frequência com o tempo (*Chirp*) do MZM. Quando uma luz sofre modulação por intensidade e ocorre um deslocamento em sua fase, origina-se desse processo o efeito de variação da frequência com o tempo (*Chirp*) (DEVAUX; SOREL; KERDILES, 1993). Este efeito causa uma variação da frequência ao longo do tempo. Essa é uma característica que muda de acordo com tipo e a configuração do MZM (LAWETZ et al., 1997). Os efeitos desse parâmetro não serão abordados nesse trabalho, mas sim o efeito de deslocamento causado por essa exponencial.

Seja um simples exemplo onde $x(t)$ é um sinal complexo a ser representada que possui somente uma componente de frequência. Esse sinal é multiplicado pelo termo exponencial, daí tem-se que:

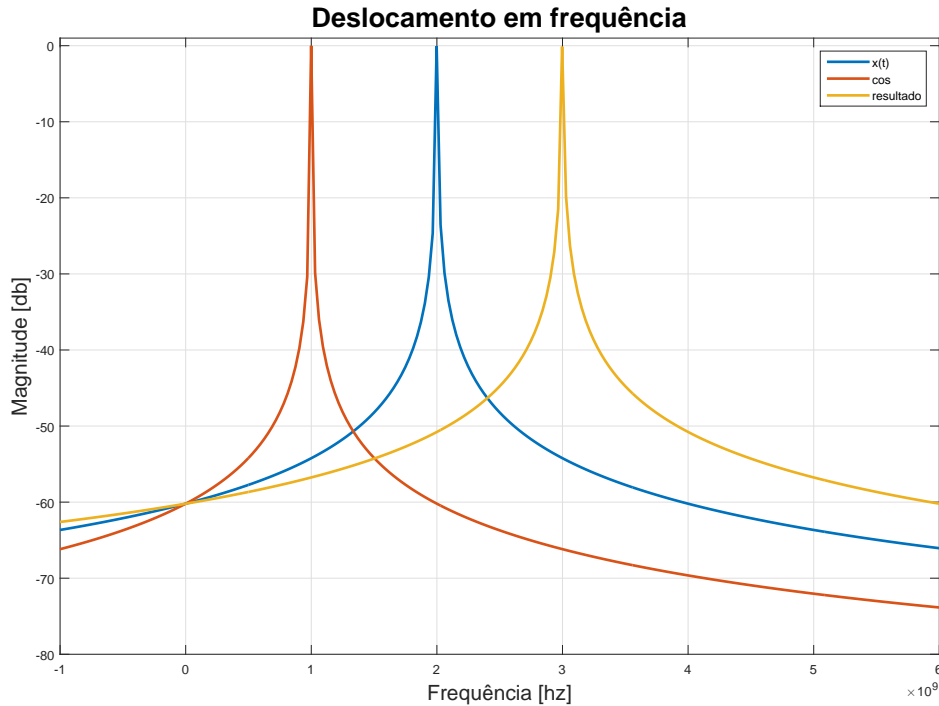
$$x(t) = e^{j\omega_n t} \quad (5.1)$$

seja

$$y(t) = x(t).e^{j\omega_0 t} = e^{j(\omega_n t + \omega_0 t)}. \quad (5.2)$$

Para melhor exemplificar observe a Figura 12 que mostra o espectro do sinal $x(t)$, em azul, o qual é composto por $e^{j\omega_n \cdot t}$ multiplicado pela exponencial $e^{j\omega_0 t}$, em laranja, resultando no sinal em amarelo, no domínio da frequência, sendo $\omega_n = 2 \cdot \omega_0$:

Figura 12 – Deslocamento na frequência causado pelo termo exponencial



Fonte: O autor.

Assim como a multiplicação por uma exponencial complexa significa deslocar o sinal em uma direção, multiplicar por um cosseno significa deslocar o sinal de forma simétrica. Esse efeito é causado pela cossenoide da equação (4.20).

Pode-se observar esse fato analisando a notação de Euler para o cosseno dado é (5.3).

$$\cos(\omega_0 t) = \frac{e^{j\omega_0 t} + e^{-j\omega_0 t}}{2}. \quad (5.3)$$

Logo, seguindo o exemplo anterior onde queria-se saber o espectro de $x(t)$, sendo,

$$y(t) = x(t) \cdot \cos(\omega_0 t) = e^{j\omega_n t} \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot e^{j\omega_0 t} + \frac{1}{2} \cdot e^{-j\omega_0 t} \right] \quad (5.4)$$

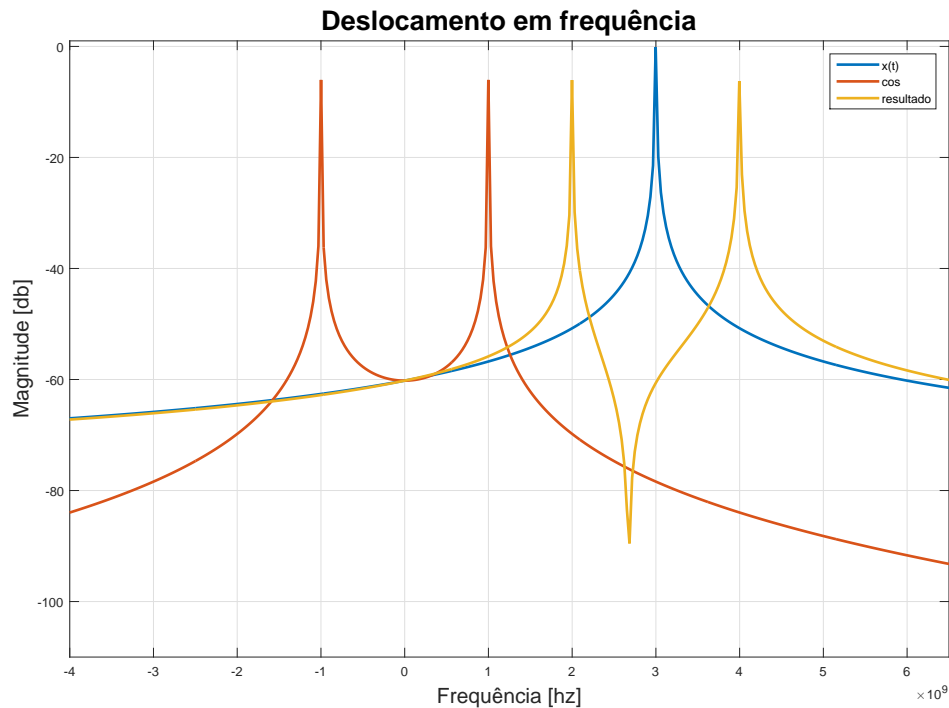
ou seja,

$$y(t) = \frac{1}{2} \cdot e^{j(\omega_n + \omega_0)t} + \frac{1}{2} \cdot e^{j(\omega_n - \omega_0)t} \quad (5.5)$$

Esse resultado é exemplificado na Figura 13. Pode-se ver que o sinal $x(t)$, após a multiplicação com o cosseno, em laranja, foi deslocado para mais ou menos ω_0 que é a frequência

que está definida no cosseno, em amarelo. Pode-se observar também uma diminuição na amplitude do resultado, em amarelo, em relação ao sinal original, em azul. Essa queda foi de 3 db o que representa uma diminuição de metade da potência original. Logo, cada uma das frequências em amarelo possui metade da potência do sinal original.

Figura 13 – Deslocamento na frequência causado pelo termo cosseno



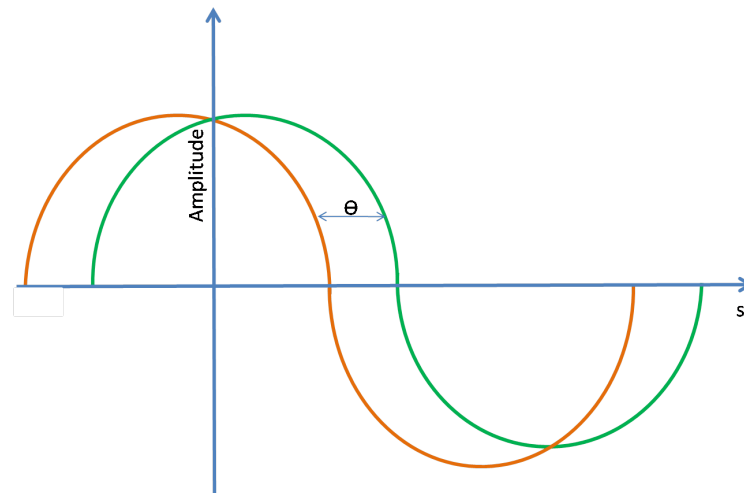
Fonte: O autor.

5.2 Entendendo o Modelo do MZM

Neste momento deve-se observar que na equação (4.20) não há uma única frequência ω_0 , mas a média da soma (e diferença) pontual entre duas senoídes: $\frac{\Delta\phi_1 + \Delta\phi_2}{2}$ e $(\frac{\Delta\phi_1 - \Delta\phi_2}{2})$, lembrando que $\Delta\phi_i$ é definido pela equação (4.7).

Assim sendo, buscou-se entender a natureza desse sinal. Observou-se que, tanto o resultado da soma quanto da diferença serão uma outra senoíde. Suas amplitudes, entretanto, terão variações limitadas para defasamentos entre 0° e 180° de graus, como pode ser observado na Figura 14.

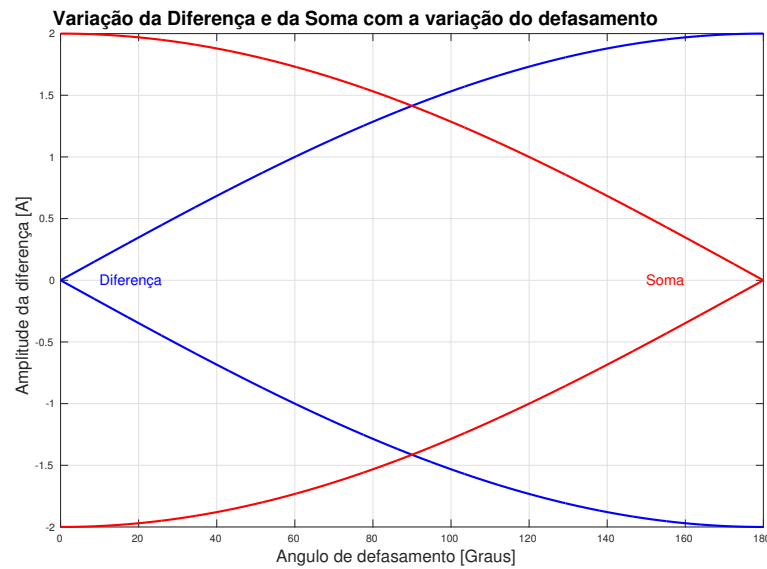
Figura 14 – Variação do defasamento entre os sinais de entrada no MZM



Fonte: O autor.

Como pode-se ver na Figura 15, a amplitude do sinal vai de -2 a 2 tanto na diferença quanto na soma. Contudo, para a soma, em vermelho, a amplitude decresce com o aumento da defasagem, enquanto que para a diferença a amplitude cresce, como pode ser visto na Figura 15.

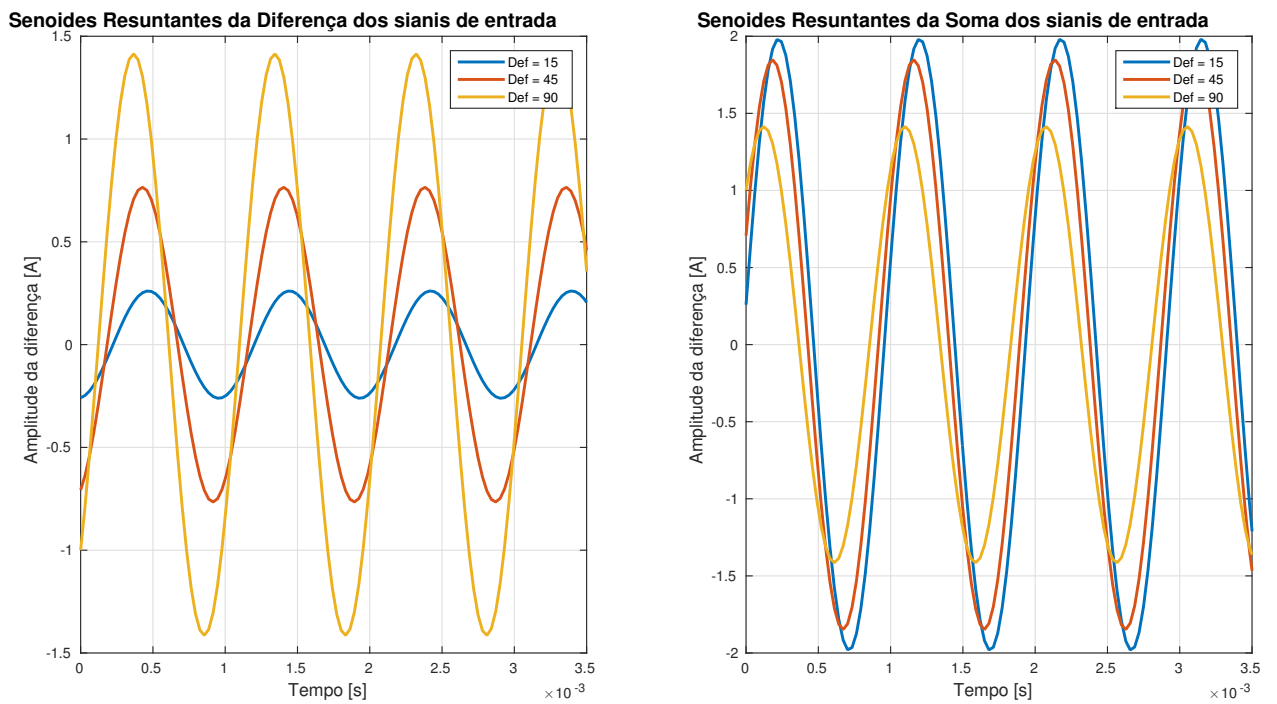
Figura 15 – Variação da amplitude da senoide gerada através da soma e diferença entre os sinais de entrada



Fonte: O autor.

Ou seja, assim que o defasamento aumenta entre os sinais, eles resultam em um terceiro sinal senoidal. Para exemplificar, observe o resultado da diferença e soma para três defasamentos distintos mostrados na Figura 16. Vê-se três senoides com amplitudes diferentes, mas de mesma frequência, sendo que os defasamentos são 15° , 45° e 90° graus para os sinais em azul, laranja e amarelo respectivamente. Como pode-se perceber, os resultados da diferença tendem a crescer enquanto que na soma os mesmos diminuem, como ilustrado pela Figura 15.

Figura 16 – Senoides resultantes



Fonte: O autor.

5.3 Definindo Parametros do MZM

Para esses testes do MZM, percebe-se que o termo exponencial terá amplitude 1 e, além de provocar um deslocamento de frequência, também causará uma variação de fase do sinal de entrada. Já a cossenoide, além de fazer um deslocamento simétrico, provocará uma diminuição na intensidade do sinal. Esses resultados ficam mais claros quando se observa a mudança no espectro de frequências do sinal de entrada sobre o efeito individual do cosseno e da exponencial.

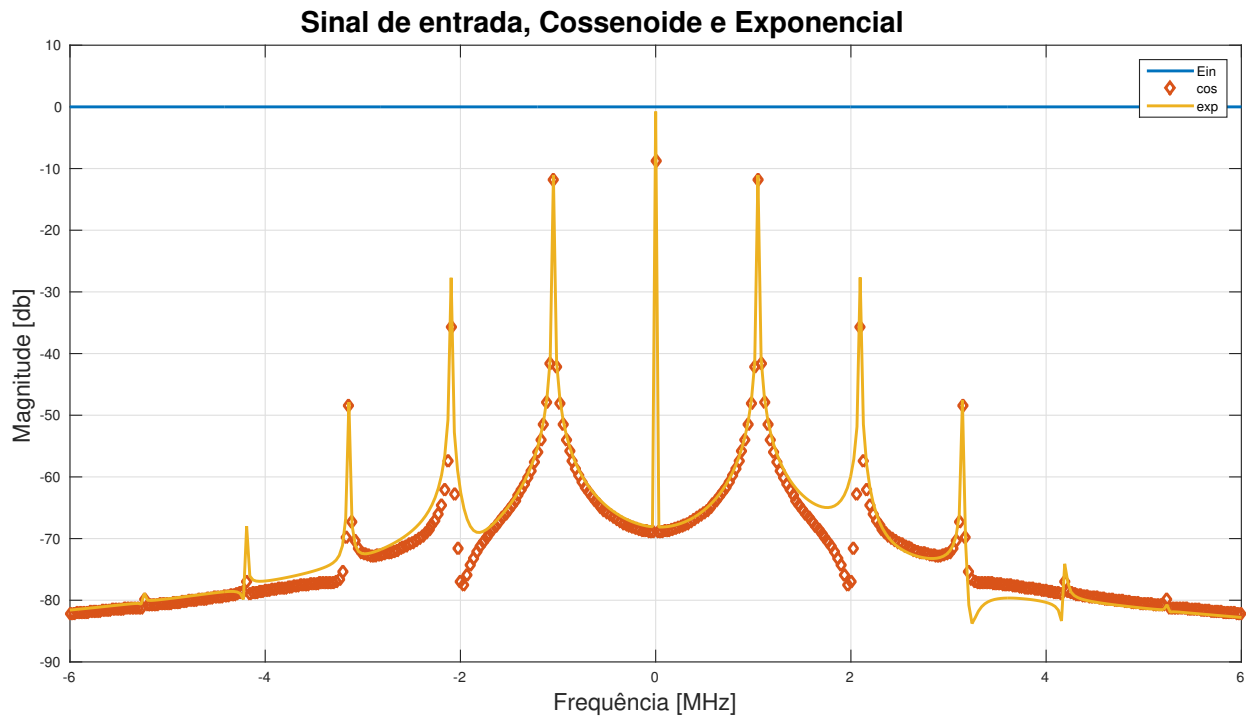
Logo, seja o sinal de entrada constante e centrado na frequência base. Também sejam $\Delta\phi_1 = \frac{\pi}{V_\pi} \text{sen}(\omega t)$ e $\Delta\phi_2 = \frac{\pi}{V_\pi} \text{sen}(\omega t + \theta) + V_{bias}$, com $V_{bias} = V_p i = 3,8V$ e $\omega = 2\pi fc$ assim como $\theta = G^\circ$, variáveis a serem alteradas (frequência e defasagem) para avaliação.

Pode-se observar como o MZM afeta o sinal de entrada na Figura 17. Quando o *laser*, em azul, é multiplicado pelo cosseno, em laranja, nota-se que o ele passa a ter duas componentes de frequência simétricas, em amarelo, sendo este deslocamento igual à frequência fc . Entretanto, quando o *laser* é multiplicado pela exponencial, em vermelho, observa-se somente um deslocamento para a direita, frequência positiva Figura 17, sendo que este deslocamento também é igual à frequência fc . Pode-se então estimar que, na repetição desse processo, o *laser* será separado em enésimas outras frequências espaçadas entre si de fc , todos à direita do eixo das abcissas, sendo esse o resultado esperado das simulações. Deve-se observar ainda que esses sinais não são tão limpos como aqueles utilizados nos exemplos das Figura 12 e 13. Todavia os efeitos devem ser semelhantes.

Neste momento, torna-se mais fácil analisar os efeitos que os parametros de polarização e defasagem entre os sinais de entrada causam no MZM. Começando pelo termo exponencial da equação (4.22), sabe-se que este termo não afetará a amplitude do sinal diretamente e que ele causará um deslocamento para direita ou esquerda, dependendo se seu argumento é positivo ou negativo. Mas, por este termo introduzir um defasamento ao sinal, ocorrerá um efeito construtivo ou destrutivo, semelhante ao que ocorreu na explicação anterior com a soma das senoides defasadas. Logo, para minimizar o efeito da exponencial na amplitude, buscou-se uma relação de defasagem entre os sinais de entrada em que a defasagem resultante fosse próxima de zero. Na Figura 18 pode-se observar como o defasamento muda segundo a diferença de fases dos sinais de entrada. Relembrando que a polarização não influencia esse termo e que o V_π é um valor constante característico do MZM. Pode-se perceber que, de fato, o módulo em azul, não varia, mas seu argumento muda consideravelmente.

Analisando a cossenoide, viu-se anteriormente que ela afeta diretamente a amplitude do sinal e pode assumir valores entre -1 e +1. Essa variação será definida pela relação entre

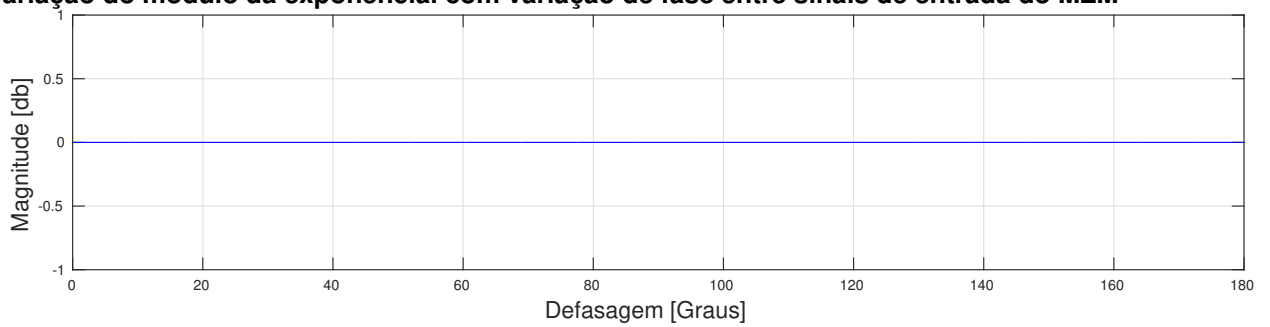
Figura 17 – Sinais que serão efetivamente utilizado



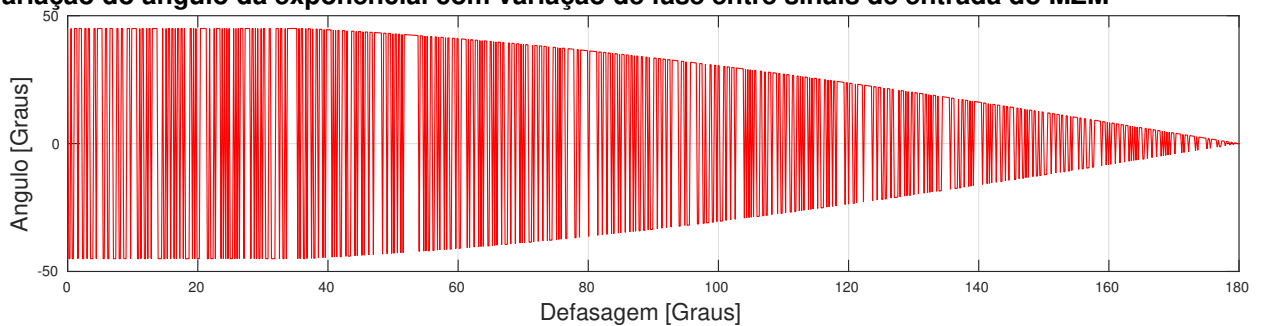
Fonte: O autor.

Figura 18 – Variação do angulo do termo exponencial

Varição do modulo da exponencial com variação de fase entre sinais de entrada do MZM



Varição do angulo da exponencial com variação de fase entre sinais de entrada do MZM



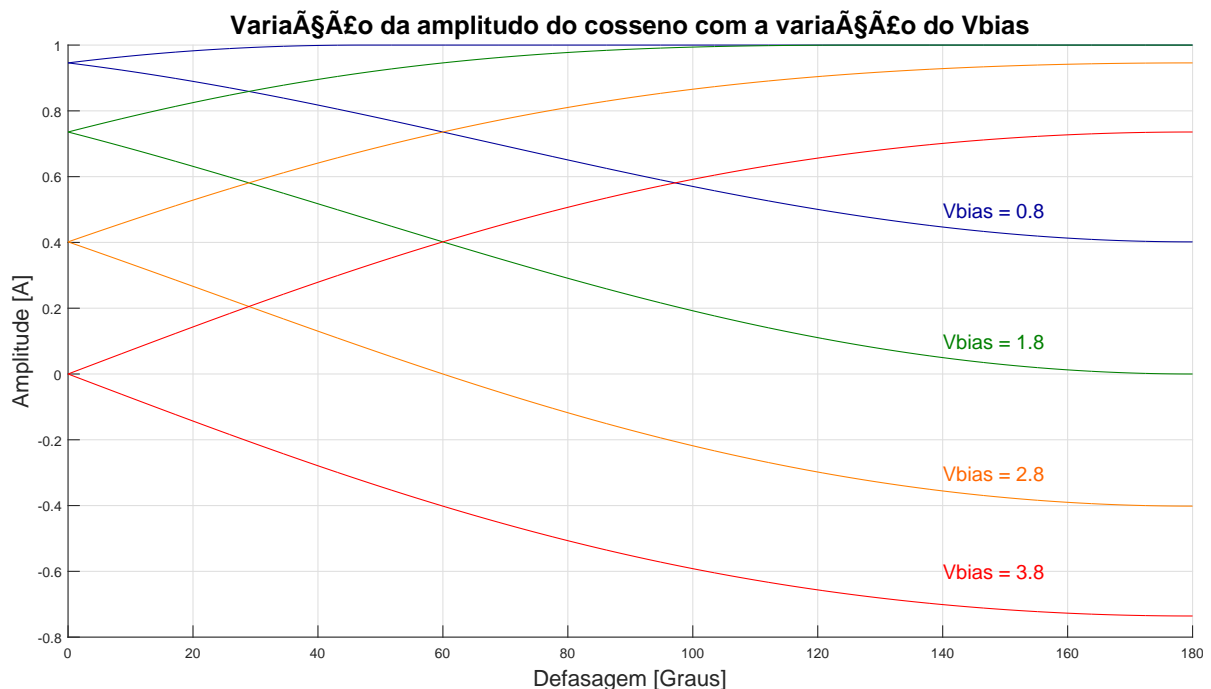
Fonte: O autor.

polarização e θ . Pela Figura 8 vê-se que a região de operação do MZM é $V_{bias} + v(t)$ resultando na saída $P_0 + p(t)$ para $v(t)$ a diferença das senoides e $p(t)$ o resultado da

cossenoide.

Deve-se observar que o defasamento entre os sinais de entrada definem a amplitude da cossenoide, como pode ser observado na Figura 19. Para maior eficiência na modulação do sinal de entrada deve-se escolher o valor de θ tal que este proporcione uma maior variação de amplitude. Contudo, também deseja-se manter o MZM polarizado em uma região que seja a mais linear possível, onde a cossenoide assumira valores entre 0 e +1. Pela análise da resposta desse termo (Figura 19) com variações da polarização, nota-se que o melhor ponto encontrado seria a posição onde a polarização é aproximadamente 2,386 volts e θ 90° graus. Nesta posição obteve-se o melhor balanço entre amplitude e linearidade do MZM.

Figura 19 – Variação da Amplitude do cosseno com variação do Vbias



Fonte: O autor.

Por fim, percebe-se que o termo exponencial evidencia o fato de que, quanto maior for o valor de θ (defasamento entre os sinais de entrada) melhor será o efeito para a fase. Contudo, com o aumento de θ , menor é a parcela imaginária, pois a função seno tende a zero quando θ tende a 180° graus, sendo a simetria o que garante o deslocamento unilateral do sinal de entrada. Logo, θ deve ser o menor possível, mas longe de seu valor máximo. Da mesma forma, vê-se que, para o elemento cossenoidal, deseja-se uma maior variação em sua amplitude a fim de melhorar sua eficiência de modulação. Contudo, esse valor deve ser mantido entre 0 e 1, garantindo que o MZM esteja polarizado numa zona linear.

Esse fato pode ser corrigido pela polarização até um certo limite. Logo, deve ser feita uma combinação tal que a amplitude da função cosseno seja a maior possível entre 0 e 1. Para

ambos os casos observa-se que o melhor valor de θ é 90° graus. Sendo que a polarização deve ser ajustado de acordo com a característica construtiva do MZM, ou seja, de acordo com o V_π característico. Para o modelo em estudo definiu-se polarização como sendo 2,39 volts.

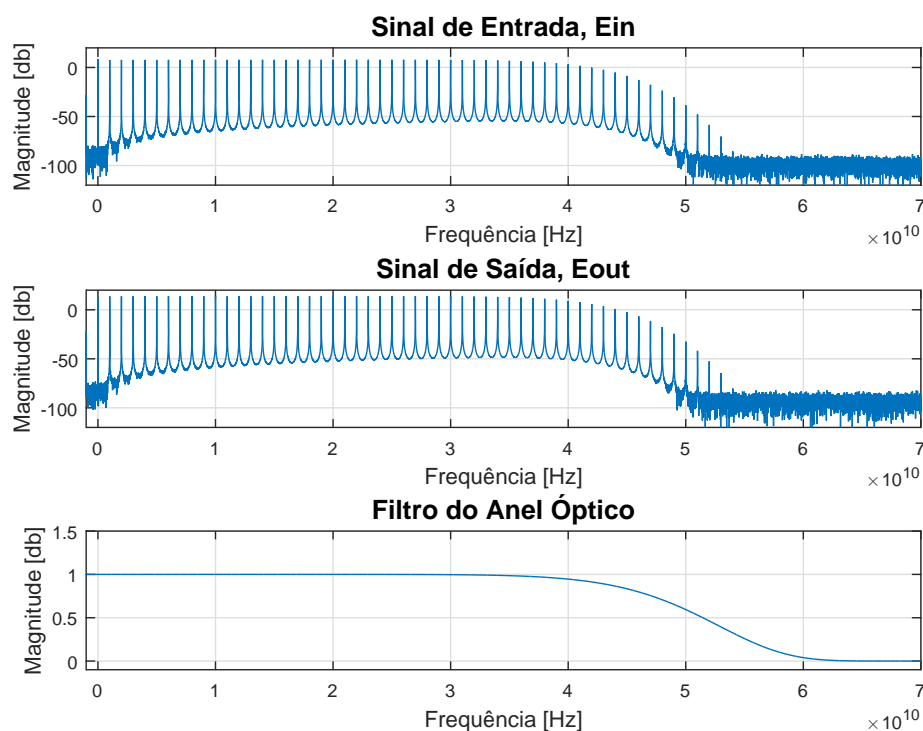
5.4 Geração do Pente Óptico

Uma vez que tenha-se encontrado o ponto de operação do MZM deve-se construir um anel que gere as multi-portadoras ópticas. Por limitações técnicas como tamanho disponível de memória, as simulações foram feitas somente para um pente com 15 portadoras ópticas. Considerando o teorema da amostragem anteriormente apresentado, percebe-se que se o número de pontos necessários para representar o sinal for muito grande, haverá um estouro de memória.

Por este motivo construiu-se o RFS de forma a ter somente 30 portadoras espaçadas de 1 GHz. A máxima frequência adotada foi de 32 GHz. Além disso, considerou-se uma taxa de amostragem 8 (oito) vezes maior que a frequência máxima do sinal modulado.

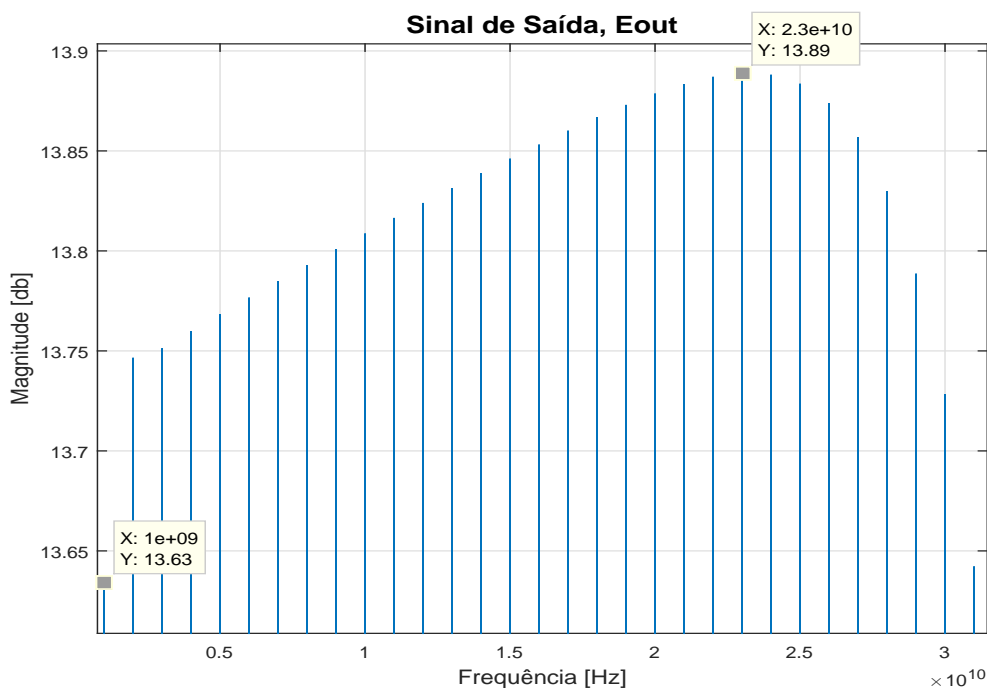
Pela Figura 20 pode-se perceber mais do que trinta portadoras. Mas, de fato, só serão levadas em conta as portadoras cujas diferenças de pico não ultrapassam 0,5 db, no espectro de frequências como mostrado na Figura 21.

Figura 20 – Pente de portadora ópticas criadas



Fonte: O autor.

Figura 21 – Diferença entre portadoras de 0.36 db



Fonte: O autor.

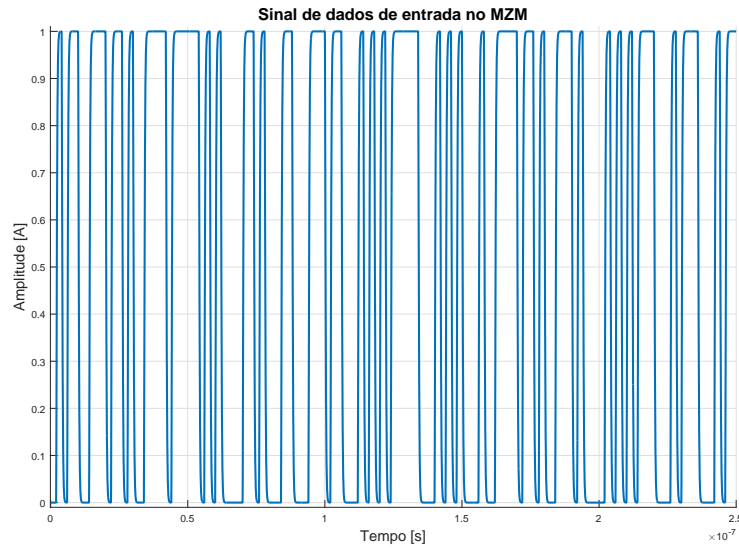
Este não é o número máximo de portadoras que podem ser geradas, mas foi o número máximo escolhido devido às limitações técnicas. Também por outros limitantes, neste trabalho todas as 30 (trinta) portadoras serão moduladas simultaneamente. Na prática, elas precisariam ser separadas para que cada portadora possa ser associada a um ou mais usuários. Na recepção, cada portadora deveria ser separada das demais e destinadas corretamente. Todavia, seria necessário um processo AOFFT (*All Optics Fast Fourier Transform*) (CHEN; CHEN; XIE, 2009), (SRINIVASAN; PRINCE, 2016) o qual não será abordado neste trabalho. Portanto, a modulação e demodulação serão feitas em todas as portadoras simultaneamente.

5.5 Transmissão e Recepção de Dados

Assim, após a geração do pente de portadoras ópticas (COMB), realiza-se a modulação por outro MZM. No entanto, agora este modulador terá uma polarização totalmente diferente. Haverá somente um sinal de entrada representando uma sequência de onda quadrada, como pode ser visto na Figura 22, carregando uma sequência aleatória de bits que representarão os dados a serem transmitidos.

Finalmente, o sinal transmitido é recebido por um fotodiodo para recuperação dos dados. A transmissão do sinal pode ocorrer numa fibra ou a recepção deste pelo fotodiodo (*back to back*). Essa é uma simulação prática do comportamento do sinal ao longo de um canal.

Figura 22 – Sinal de Dados para modulação das portadoras no MZM

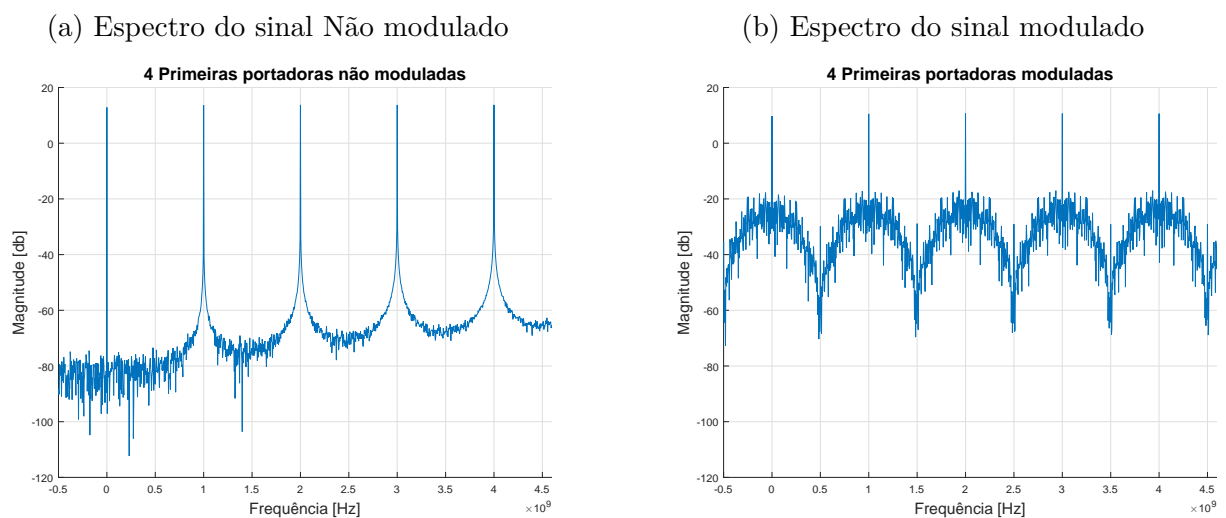


Fonte: O autor.

Contudo, para fins de testes e comparações, a topologia *back to back* pode ser adotada, onde o sinal transmitido é logo recebido sem passar por nenhum canal.

Pode-se também analisar as mudanças no espectro das portadoras antes (Figura 23a) e depois (Figura 23b) da configuração (*back to back*), como pode ser visto na Figura 23. Na Figura 23 deve-se ignorar o sinal em 0 Hz, pois esse sinal é referente à portadora central que não é transmitida na prática.

Figura 23 – Espectro do pente óptico antes e depois da modulação

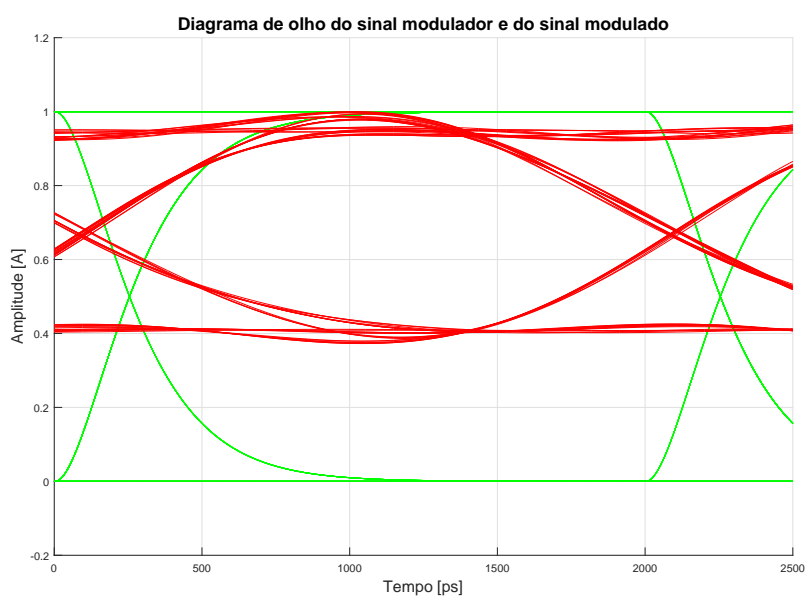


Fonte: O autor.

Uma comparação que também pode ser feita é comparar o diagrama de olho do sinal modulador (vide Figura 22) com o sinal recebido logo após a modulação, Figura 24. Nessa

comparação, os diagramas foram normalizados, pois o que se buscava era comparar a mudança no formato do mesmo. O diagrama do sinal modulante é bem limpo e constante sendo sua abertura igual a 1, ou seja, este é um sinal bem definido. Já para o sinal imediatamente recebido percebe-se uma certa inclinação, além do fato de que ele perdeu a nitidez do sinal original. Isso demonstra um atraso de fase (a inclinação) além de uma degradação do sinal em amplitude. Essas características trazem dificuldades consideráveis para a recuperação do sinal, uma vez que a abertura do diagrama de olho é menor que um.

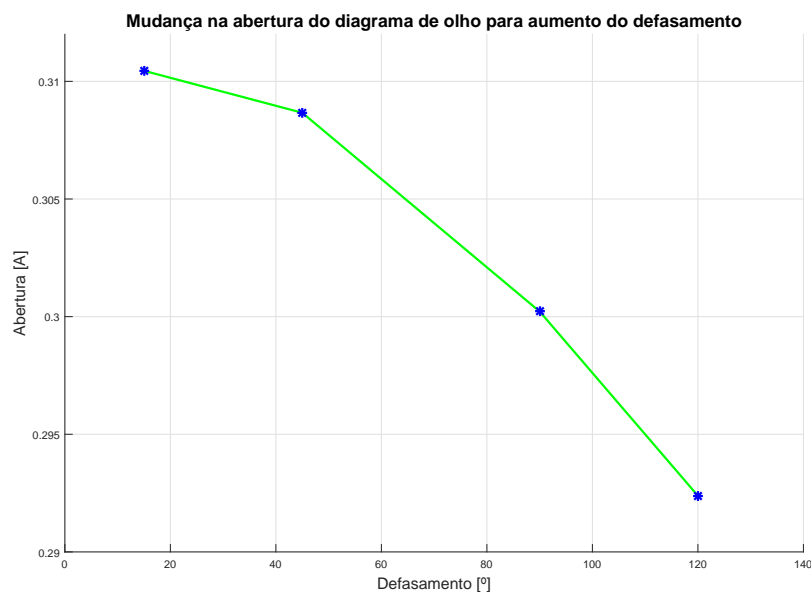
Figura 24 – Comparação dos diagramas de olhos normalizados



Fonte: O autor.

Durante os testes percebeu-se que, variando o defasamento θ entre os sinais elétricos responsáveis pela geração das portadoras, a abertura do diagrama de olho diminuía, como pode ser visto na Figura 25. Esse teste foi feito para uma polarização ideal (2,39 [V]) e os ângulos de defasamento foram 15°, 45°, 90° e 120° graus. Logo, poderia-se concluir que quanto menor o ângulo de defasamento entre os sinais melhor será a recepção. Mas, como visto anteriormente, o esforço do amplificador é maior para ângulos menores, o que pode levar a efeitos não lineares dos dispositivos. Tais comportamentos não serão aqui abordados.

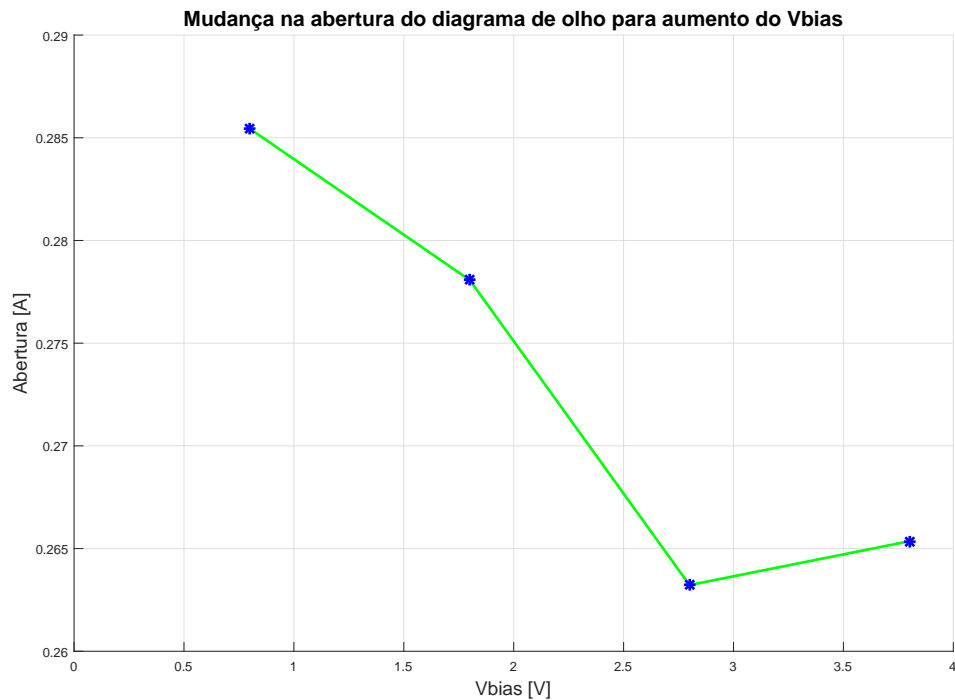
Figura 25 – Mudança da abertura do diagrama de olho com variação de θ



Fonte: O autor.

Também observou-se um comportamento semelhante para a variação da tensão de polarização, como ilustra a Figura 26. Esses testes foram feitos para o defasamento ideal ($\theta = 90^\circ$) e uma tensão de polarização de 0,8, 1,8, 2,8 e 3,8 volts. Nota-se que também houve um decaimento da abertura no diagrama de olho. Poder-se-ia concluir que quanto menor a polarização melhor seria a situação. Contudo, também foi mencionado anteriormente que a polarização é fundamental para determinar o ponto de operação do MZM, de forma que buscou-se sempre trabalhar numa região de maior linearidade. Logo, deve-se analisar como essas não linearidades do MZM afetam o sinal.

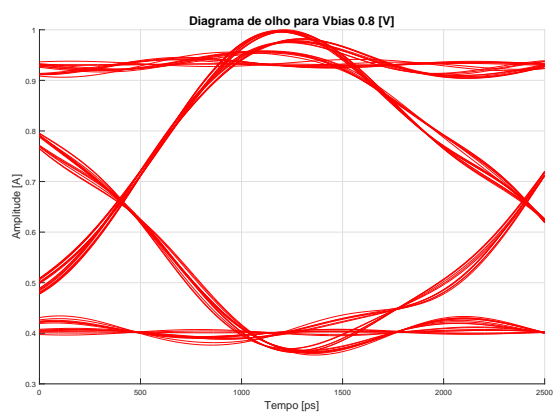
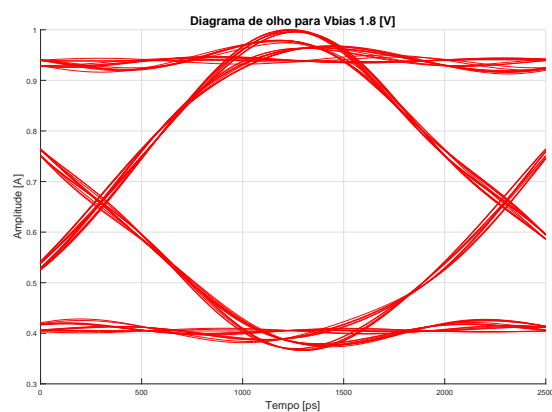
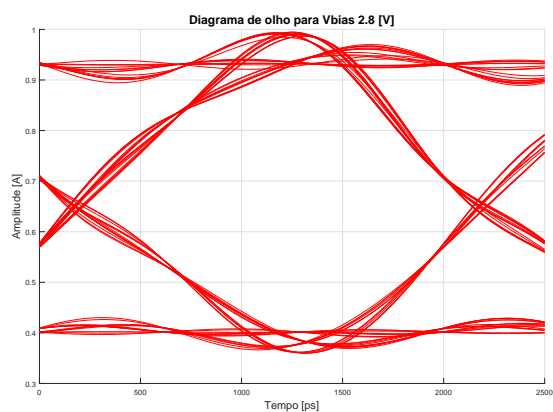
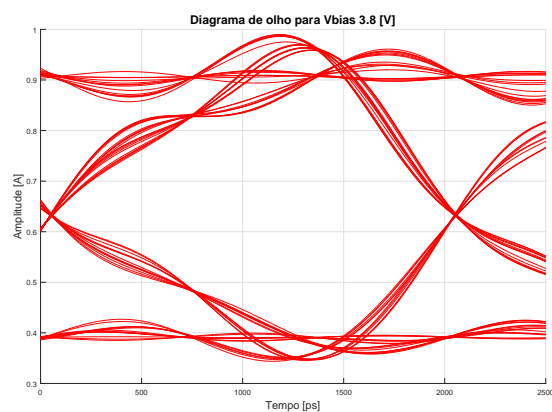
Figura 26 – Mudança da abertura do diagrama de olho com variação de Polarização



Fonte: O autor.

De fato, quando analisa-se o diagrama de olho do sinal recebido na topologia *Back to Back*, nota-se as distorções dos sinais devido à operação fora da região linear do MZM, o que pode ser visto na Figura 27. Vê-se que, apesar de apresentar uma maior abertura do diagrama de olho do MZM polarizado em 0,8 [V], o sinal foi distorcido. O que também ocorreu mais visivelmente para polarizações em proximidades de V_{π} com 2,8 e 3,8 volts. Por fim, um valor ideal para o Vbias estaria entre 1,8 e 2,8 volts. Relembrando que essa polarização é específica para esse MZM. Cada dispositivo MZM possui parâmetros característicos diferentes.

Figura 27 – Distorções no Diagrama de Olho

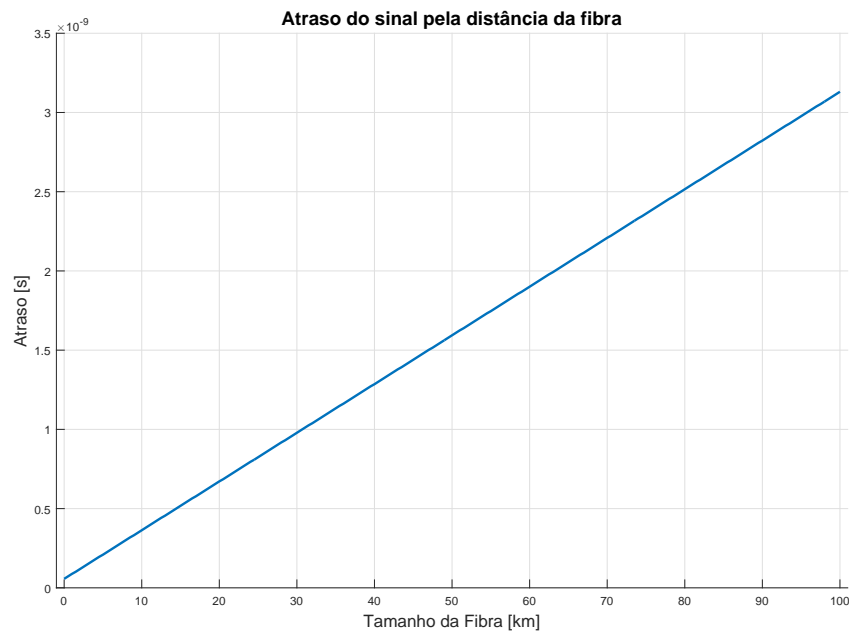
(a) Diagrama de olho para $V_{bias} = 0.8$ V(b) Diagrama de olho para $V_{bias} = 1.8$ V(c) Diagrama de olho para $V_{bias} = 2.8$ V(d) Diagrama de olho para $V_{bias} = 3.8$ V

Fonte: O autor.

Verificada a melhor polarização do MZM, o próximo passo é adicionar a fibra óptica. O modelo da fibra aqui utilizado foi do tipo mono-modo com 0,2 db de atenuação por quilômetro dela não foram considerados seus efeitos não lineares.

Uma primeira análise feita para verificar o atraso causado pela fibra pode ser vista na Figura 28. É lógico dizer que, quanto maior for o comprimento do enlace mais tempo levará para o sinal atravessá-lo. Na Figura 28, variou-se o tamanho da fibra de 0,5 [km] à 100 [km] e observou-se uma variação de atraso indo de 10% de $1/fc$ para o menor comprimento de fibra até um atraso de 310% de $1/fc$ para o maior comprimento. Em simulação esse é um detalhe importante, pois caso os vetores da simulação não levem em conta estes atrasos, os últimos pontos serão deslocados para o início do vetor, podendo causar problemas decorrentes da má interpretação dos resultados, caso este que não ocorreria em laboratório.

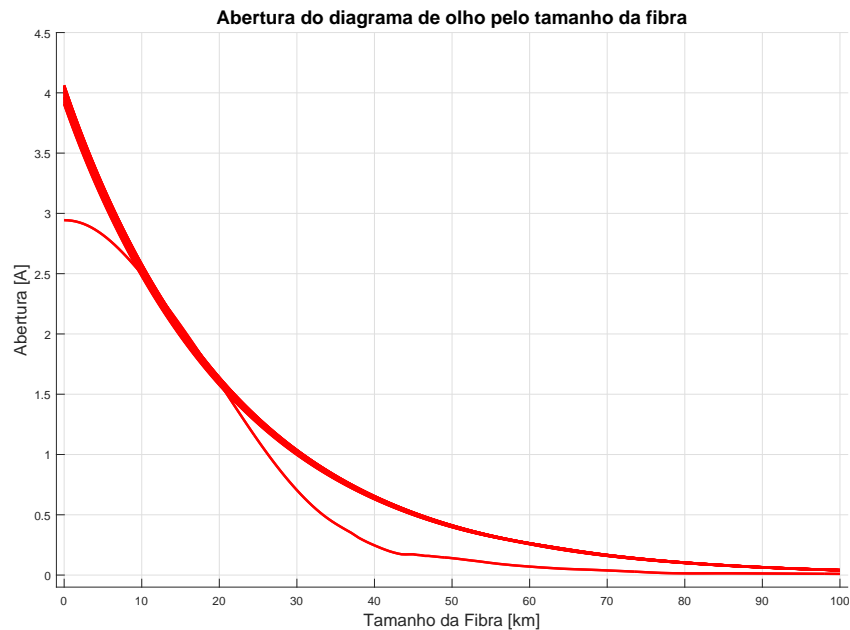
Figura 28 – Atraso do sinal devido ao comprimento da fibra



Fonte: O autor.

Por fim, mediu-se também a mudança no digrama de olho causado pelo aumento do tamanho da fibra 29. Nesse gráfico, deve-se observar que as 30 portadora foram analisadas e aparecem no gráfico em ordem decrescente. A primeira portadora é a curva mais externa do gráfico (mais acima e a direita das demais) e a trigésima portadora é a curva mais interna do gráfico (mais abaixo e a esquerda das demais).

Figura 29 – Mudança na abertura do diagrama de olho devido ao comprimento da fibra



Fonte: O autor.

Aqui, pode-se notar que, quanto mais afastada a portadora estiver da frequência base menor será a abertura de seu respectivo diagrama de olho. Todavia essa mudança é geralmente muito pequena de uma portadora para outra. Contudo pode-se perceber um decaimento significativo da abertura do diagrama de olho para um aumento do comprimento da fibra. O que já era esperado, pois uma característica comum dessas fibras é causar um decaimento de 0,2 db por quilômetro. Uma atenuação do sinal implica em menor abertura do diagrama de olho.

6 CONCLUSÃO

Através deste projeto foi possível perceber a importância da comunicação para a sociedade atual, e de como as tecnologias envolvidas precisam evoluir para garanti-la de forma eficiente. Logo, pesquisas devem ser conduzidas e novas tecnologias testadas a fim de que barreiras existentes atualmente sejam quebradas. Em adição a isso, deve-se pontuar que os indivíduos em todo o mundo dependem cada vez mais dos meios de comunicação em seu cotidiano, dependência esta que vai muito além de meramente transmitir sinais de voz ou de vídeo, mas também se relaciona a necessidades de mercado e industriais como, por exemplo, o controle e automatização de plantas inteiras.

Desta forma, a importância em pesquisas e desenvolvimento de novas tecnologias e métodos para aumentar a eficiência dos meios de comunicação fica patente. A técnica de geração de multi-portadoras apresentada nesse trabalho exemplifica esse caso. Nela, utiliza-se um modulador Mach-Zehnder associado a um anel óptico. Tal associação com um *laser* CW resulta no deslocamento em frequência do mesmo. Como esses sinais são alimentados em anel, o processo de deslocamento ocorre a todo tempo. Assim várias portadoras são geradas, denominando esse processo de RFS (deslocamento de frequência por recirculação).

A técnica RFS se mostrou-se promissora para aumentar a eficiência de transmissão de dados num canal óptico, pois através usado num MZM pode-se gerar portadoras espaçadas arbitrariamente de f_c que é a frequência do sinal elétrico que entra nos eletrodos do MZM. Logo, elas podem ser alocadas de forma ortogonal, o que aumenta a densidade de bits pelo espectro disponível e facilita uma possível recepção. Ressalta-se a eficiência espectral realizadas totalmente no domínio óptico.

Percebe-se que a eficiência do método RFS depende muito da polarização ideal do MZM, sendo que essa configuração pode mudar para dispositivos diferentes. Entendeu-se o porquê de definir o defasamento entre os sinais modulantes do MZM em 90° , e as vantagens e penalidades existentes caso isso não ocorra. Também concluiu-se que a melhor polarização seria de 2,386 volts para $V_\pi = 90^\circ$, garantindo assim a operação do dispositivo na área mais linear possível. Finalmente, foi feita a análise dos efeitos lineares que ocorrem no sinal após este passar pela fibra óptica. Viu-se que há um atraso normal do sinal e que sua amplitude é atenuada.

Assim, concluiu-se que o método RFS aqui apresentado traz benefícios aumentando a eficiência na transmissão da informação. Contudo, ainda há muito a ser feito e pesquisado.

Melhorias neste trabalho podem ser feitas para que se aproxime mais da realidade. Realizar uma análise dos efeitos não lineares inerentes dos dispositivos ópticos, e da fibra, bem como variação da frequência (*Chirp*) do MZM, pode ser trabalhado futuramente. Adicionar outras formas de modulação e mapeamento de dados, que também corroborem para o aumento da eficiência do sistema, de igual forma, podem ser citados como exemplos. Outra sugestão de projeto futuro seria incorporar a técnica OFDM totalmente óptica, a fim de tentar superar as limitações existentes no processamento de sinais em altas frequências.

REFERÊNCIAS

- BBC. *Sound and light*. 2014. Web page BBC. Disponível em: <<http://www.bbc.co.uk/schools/gcsebitesize/science/aqa/waves/soundandlightrev1.shtml>>. Acesso em: 30 Novembro 2016. Citado na página 19.
- CHEN, H.; CHEN, M.; XIE, S. All-optical sampling orthogonal frequency-division multiplexing scheme for high-speed transmission system. *Lightwave Technology, Journal of, IEEE*, v. 27, n. 21, p. 4848–4854, 2009. Citado na página 43.
- CISCO. *The zettabyte era: Trends and analysis*. 2015. Cisco Web Page. Disponível em: <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/VNI_Hyperconnectivity_WP.html>. Acesso em: 15 Jun 2016. Citado na página 13.
- DEVAUX, F.; SOREL, Y.; KERDILES, J. Simple measurement of fiber dispersion and of chirp parameter of intensity modulated light emitter. *Journal of Lightwave Technology, Institute of Electrical and Electronics Engineers*, v. 11, n. 12, p. 1937–1940, 1993. Citado na página 34.
- FONTAINE, N. K. et al. Characterization of dual-electrode mach-zehnder modulator based optical frequency comb generator in two regimes. In: *Proc. 21st Annual Meeting IEEE LEOS*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 186–187. Citado na página 14.
- HADHAZY, A. *What are the limits of human vision*. 2015. Web page BBC. Disponível em: <<http://www.bbc.com/future/story/20150727-what-are-the-limits-of-human-vision>>. Acesso em: 30 Novembro 2016. Citado na página 19.
- IEZEKIEL, S. *Electrical-to-optical conversion: modulators*. 2015. Página Web da Universidade. Disponível em: <<http://www.ece.ucy.ac.cy/courses/ece645/lectures.html>>. Acesso em: 20 Maio 2016. Citado na página 25.
- JUNIPER. *Understanding Fiber-Optic Cable Signal Loss, Attenuation, and Dispersion*. 20016. Web page Juniper. Disponível em: <http://www.juniper.net/techpubs/en_US/release-independent/junos/topics/concept/fiber-optic-cable-signal-loss-attenuation-dispersion-understanding.html>. Acesso em: 30 Novembro 2016. Citado na página 19.
- KANNO, A. et al. 16-gbaud qpsk radio transmission using optical frequency comb with recirculating frequency shifter for 300-ghz rof signal. In: *2012 IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics, MWP 2012*. [S.l.: s.n.], 2012. Citado na página 24.
- KENT, J. L. Limits of human perception. In: _____. *Psychedelic Information Theory: Shamanism in the Age of Reason*. Seattle, WA 98122: PIT Press, 2010. p. 40. Citado na página 18.
- LANGTON, C. *Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) Tutorial*. 2013. Web page ComplexToReal. Disponível em: <<http://complextoreal.com/tutorials/tutorial-22-orthogonal-frequency-division-multiplex-ofdm-dmt/#.Vz8My76Hg-8>>. Acesso em: 20 Maio 2016. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.

- LATHI, B. Amostragem: A ponte entre o contínuo e discreto. In: _____. *Sinais e Sistemas Lineares*. Av. Jenrônimo de Ornelas, 670 - Santana: Bookman, 2007. p. 678–723. Citado na página 21.
- LATHI, B. Análise de sinais no tempo contínuo: A transformada de fourier. In: _____. *Sinais e Sistemas Lineares*. Av. Jenrônimo de Ornelas, 670 - Santana: Bookman, 2007. p. 599–668. Citado na página 21.
- LAWETZ, C. et al. Modulation characteristics of semiconductor mach-zehnder optical modulators. *Journal of lightwave technology*, IEEE, v. 15, n. 4, p. 697–703, 1997. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 34.
- LEI, C. et al. Recirculating frequency shifting based wideband optical frequency comb generation by phase coherence control. *IEEE Photonics Journal*, IEEE, v. 7, n. 1, p. 1–7, 2015. Citado na página 23.
- LEI, C. et al. Temporally controlled wideband optical frequency comb generation based on recirculating frequency shifting. In: IEEE. *Microwave Photonics (MWP) and the 2014 9th Asia-Pacific Microwave Photonics Conference (APMP), 2014 International Topical Meeting on*. [S.l.], 2014. p. 272–275. Citado na página 24.
- LI, J. et al. Analysis of the stability of recirculating frequency shifter used as a multi-tone wideband light source for tb/s multi-carrier optical transmission. In: *European Conference and Exhibition on Optical Communication, Turin*. [S.l.: s.n.], 2010. v. 19. Citado na página 24.
- NORDRUM, A. *5 Myths About 5G*. 2016. IEEE Spectrum. Disponível em: <<http://spectrum.ieee.org/tech-talk/telecom/wireless/5-myths-about-5g>>. Acesso em: 30 Novembro 2016. Citado na página 14.
- NUNES, R. B. et al. An experimental assessment of the bsofdm-pon architecture. In: IEEE. *Optical Network Design and Modeling, 2014 International Conference on*. [S.l.], 2014. p. 228–233. Citado na página 14.
- OLIVEIRA, J.; SALGADO, H.; RODRIGUES, M. Large signal analysis of mach-zehnder modulator intensity response in a linear dispersive fiber. 2005. Disponível em: <<http://www.ee.ucl.ac.uk/lcs/previous/LCS2006/26.pdf>>. Acesso em: 30 Novembro 2016. Citado na página 29.
- RAPPAPORT, T. S. et al. Millimeter wave mobile communications for 5g cellular: It will work! *IEEE access*, IEEE, v. 1, p. 335–349, 2013. Citado na página 14.
- ROUSE, M. *frequency-division multiplexing (FDM)*. 2005. Web page Teach-Target. Disponível em: <<http://searchnetworking.techtarget.com/definition/frequency-division-multiplexing>>. Acesso em: 30 Novembro 2016. Citado na página 20.
- ROUSE, M. *time-division multiplexing (TDM)*. 2005. Web page TeachTarget. Disponível em: <<http://whatis.techtarget.com/definition/time-division-multiplexing-TDM>>. Acesso em: 30 Novembro 2016. Citado na página 18.
- SANTAYANA, G. *George Santayana > Quotes > Quotable Quote*. 2016. Quots. Disponível em: <<http://www.goodreads.com/quotes/748444-to-know-your-future-you-must-know-your-past>>. Acesso em: 30 Novembro 2016. Citado na página 14.

- SIMÕES, F. D.; PATACA, D. M.; ROCHA, M. L. Design of a comb generator for high capacity coherent-wdm systems. *Latin America Transactions, IEEE (Revista IEEE America Latina)*, IEEE, v. 10, n. 3, p. 1690–1696, 2012. Citado na página 24.
- SRINIVASAN, G. S.; PRINCE, S. All optical ofdm transmission system based future optical broadband networks. In: IEEE. *Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET), International Conference on*. [S.l.], 2016. p. 1154–1158. Citado na página 43.
- SUNG, J. et al. Optical filter analyses for demultiplexing all-optical ofdm transmission systems. *Optical and Quantum Electronics*, Springer, v. 47, n. 8, p. 2781–2792, 2015. Citado na página 14.
- TOGNERI, A. P. *Análise de Sistemas de Multiplexação por Subportadora: Scm*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória - Espírito Santo, mar. 2005. Citado na página 29.
- ZHANG, J. et al. Stable optical frequency-locked multicarriers generation by double recirculating frequency shifter loops for tb/s communication. *Journal of Lightwave Technology*, IEEE, v. 30, n. 24, p. 3938–3945, 2012. Citado na página 23.