

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO



FELIPE ANTONIO MOREIRA SILVA

USO DA FOTÔNICA INTEGRADA PARA
DESENVOLVIMENTO DE TRANSMISSORES
ÓPTICOS COM MÚLTIPLAS PORTADORAS

VITÓRIA-ES

DEZEMBRO/2023

Felipe Antonio Moreira Silva

USO DA FOTÔNICA INTEGRADA PARA DESENVOLVIMENTO DE TRANSMISSORES ÓPTICOS COM MÚLTIPLAS PORTADORAS

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno Felipe Antonio Moreira Silva, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Vitória-ES

Dezembro/2023

Felipe Antonio Moreira Silva

USO DA FOTÔNICA INTEGRADA PARA DESENVOLVIMENTO DE TRANSMISSORES ÓPTICOS COM MÚLTIPLAS PORTADORAS

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno Felipe Antonio Moreira Silva, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovado em 12 de Dezembro de 2023.

COMISSÃO EXAMINADORA:



Documento assinado digitalmente
PABLO RAFAEL NEVES MARCIANO
Data: 20/12/2023 20:24:22-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Msc. Pablo Rafael Neves Marciano
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

**Prof. Dr. Marcelo Eduardo Vieira
Segatto**
Universidade Federal do Espírito Santo
Coorientador

Prof. Dra. Maria José Pontes
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

**Prof. Dr. Carlos Eduardo Schmidt
Castellani**
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

Vitória-ES

Dezembro/2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

PROTOCOLO DE ASSINATURA



O documento acima foi assinado digitalmente com senha eletrônica através do Protocolo Web, conforme Portaria UFES nº 1.269 de 30/08/2018, por
MARCELO EDUARDO VIEIRA SEGATTO - SIAPE 1172919
Departamento de Engenharia Elétrica - DEE/CT
Em 20/12/2023 às 07:38

Para verificar as assinaturas e visualizar o documento original acesse o link:
<https://api.lepisma.ufes.br/arquivos-assinados/860214?tipoArquivo=O>

À Deus, aos meus familiares e amigos pelo apoio.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, expresso meu profundo agradecimento a Deus por ter abençoado minha vida ao longo desses anos e por ter colocado pessoas extraordinárias em meu caminho.

Aos meus pais, Almiro e Érika, por seu apoio incondicional, dedicação, e por serem minha principal fonte de inspiração, incentivo e orgulho.

À minha irmã, Lavínya, agradeço por sempre me dar auxílio e suporte nos momentos em que precisei.

À minha namorada, Eduarda, por estar ao meu lado. Sou grato por sua compreensão, apoio constante e incentivo durante meus estudos, sempre me encorajando a alcançar novas conquistas.

Ao meu orientador, Pablo Marciano, e ao coorientador/professor Marcelo Segatto, expresso minha gratidão por despertarem meu interesse por este fascinante tema e por todo o apoio, orientação e dedicação fornecidos durante a elaboração deste trabalho.

Gostaria de agradecer a todos meus amigos de graduação. Em especial, Mateus Souza, Matheus Penido, Enzo Perin, Pietro Benincá, Kaique Barcellos e Arthur Macedo.

Aos membros do Labtel e do CPID, agradeço pelo suporte e pela disponibilidade no uso dos laboratórios e dispositivos.

À banca examinadora, meu agradecimento pela aceitação do convite e pelo tempo dedicado à leitura e avaliação deste trabalho.

Sou grato à Universidade Federal do Espírito Santo pela oportunidade de formação acadêmica.

Por fim, expresso minha sincera gratidão à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Espírito Santo (FAPES) pelo apoio financeiro concedido, fundamental para a realização deste trabalho.

A todos vocês, minha eterna gratidão.

RESUMO

Devido ao aumento considerável da demanda de dados por diversas aplicações e do número de dispositivos integrados comunicando entre si como visto em sistemas baseado no *Internet of Things* (IoT), fez-se necessário o surgimento de novas tecnologias que impulsionem os sistemas de telecomunicações. Com esse estímulo de cortar gastos sem perder as grandes taxas de dados provenientes das fibras, a fotônica integrada surge com a proposta de ser uma forma de simultaneamente aumentar a taxa e reduzir os custos por meio de projetos de sistemas com tamanhos reduzidos. Além disso, ao combinar o circuito óptico integrado com o processo de geração de múltiplas portadoras, o benefício se torna ainda mais atraente, uma vez que se espera ser possível observar resultados satisfatórios no processo de transmissão de dados. Este projeto de graduação, portanto, apresenta um estudo e uma simulação prática de uma fonte óptica capaz de gerar pentes de frequências ópticas (OFC) através da técnica de deslocamento de frequência por re-circulação (RFS) implementado em fotônica integrada com substrato de silício e, após a geração, realizar uma transmissão utilizando-as. A avaliação de desempenho da transmissão foi realizada por meio da taxa de erro de bit (BER) e do diagrama de olho. Como resultado, foi obtido uma implementação simulada de um circuito integrado fotônico (PIC), uma transmissão óptica com múltiplas portadoras com geração integrada e, por fim, a validação do sistema por meio de metodologias consolidadas na telecomunicação, sendo a abertura do diagrama de olho e análise da quantidade de bits transmitidos.

Palavras-chave: Fotônica Integrada; Pentes de Frequências Ópticas; Deslocamento de Frequência por Re-circulação; Transmissor; Comunicação Óptica.

ABSTRACT

Due to a considerable increase in data demand across various applications and the proliferation of interconnected devices as seen in Internet of Things (IoT) systems, there has been a necessity for the emergence of new technologies to drive telecommunications systems. With the incentive to cut costs without compromising the high data rates provided by fibers, integrated photonics arises with the proposal of simultaneously increasing rates and reducing costs through small-sized system designs. Moreover, by combining integrated optical circuitry with the process of generating multiple carriers, the benefit becomes even more appealing, as satisfactory results in data transmission are expected. Therefore, this graduation project presents a study and practical simulation of an optical source capable of generating optical frequency combs (OFC) through the recirculating frequency shift (RFS) technique implemented in integrated photonics using silicon substrates. Following generation, these combs are used for transmission. The transmission performance evaluation was conducted through bit error rate (BER) and eye diagram analysis. As a result, a simulated implementation of a photonic integrated circuit (PIC) was achieved, along with optical transmission with integrated multi-carrier generation. Finally, the system's validation was performed using established telecommunication methodologies, including eye diagram opening and analysis of the number of transmitted bits.

Keywords: Integrated Photonics; Optical Frequency Combs; Recirculating Frequency Shifting; Transmitter; Optical Communication.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Crescimento global de usuários da internet entre os anos de 2018-2023.	14
Figura 2 – Crescimento global de dispositivos móveis e conexões entre os anos de 2018-2023.	15
Figura 3 – Geometria genérica de um acoplador óptico com guias de ondas paralelos.	20
Figura 4 – Diferenças entre a construção <i>Rib</i> e <i>Strip</i> nos guias de ondas em fotônica integrada em silício.	21
Figura 5 – Geometria e tipos de configurações do componente óptico <i>Y-branch</i> . . .	24
Figura 6 – Modelo de um interferômetro de Mach-Zehnder.	25
Figura 7 – Modelo de um deslocador de fase termo-óptico em fotônica integrada em silício.	28
Figura 8 – Funcionamento de um amplificador óptico genérico.	29
Figura 9 – Banda passante do filtro passa-faixa.	30
Figura 10 – Representação de um pente de frequência óptico.	31
Figura 11 – Representação de um sistema óptico WDM tradicional.	32
Figura 12 – Representação de um sistema óptico WDM utilizando OFC.	33
Figura 13 – Representação de um sistema RFS utilizado para geração de OFCs. . .	34
Figura 14 – Modelo genérico de um transmissor óptico.	35
Figura 15 – Modulação por chaveamento de amplitude OOK.	36
Figura 16 – Diagrama da simulação analítica.	39
Figura 17 – Diagrama da modelagem numérica.	39
Figura 18 – Aspectos construtivos dos guias de onda integrado da biblioteca SiEPIC EBeam.	40
Figura 19 – Modelo do sistema de transmissão com multi-portadoras ópticas. . . .	41
Figura 20 – Geração das múltiplas portadoras através do método analítico apresentado na Figura 16.	44
Figura 21 – Variação do espectro do sinal de saída analítico com 20 iterações. . . .	45
Figura 22 – Variação do espectro do sinal de saída analítico com 60 iterações. . . .	46
Figura 23 – Variação do espectro do sinal de saída analítico com 80 iterações. . . .	46
Figura 24 – Processo de linearização das portadoras através para 20 iterações no método analítico.	47
Figura 25 – Processo de linearização das portadoras através para 80 iterações no método analítico.	48
Figura 26 – Modelagem do acoplador 2x2 com dois <i>Y-Branchns</i> integrado em silício para a simulação.	49
Figura 27 – Modelagem do MZM integrado em silício para a simulação.	49

Figura 28 – Modelagem do chip integrado em silício que realiza a geração de multi-portadoras para a simulação.	50
Figura 29 – Modelagem da simulação da Figura 17 de forma integrada em silício. . .	51
Figura 30 – Geração das multi-portadoras através do método numérico apresentado na Figura 17.	52
Figura 31 – Variação do espectro do sinal de saída simulado com 20 iterações. . . .	53
Figura 32 – Variação do espectro do sinal de saída simulado com 60 iterações. . . .	53
Figura 33 – Variação do espectro do sinal de saída simulado com 80 iterações. . . .	54
Figura 34 – Processo de linearização das portadoras através para 20 iterações no método numérico.	55
Figura 35 – Processo de linearização das portadoras através para 80 iterações no método numérico.	55
Figura 36 – Simulação no <i>Ansys Lumerical</i> do sistema de transmissão de dados da Figura 19.	56
Figura 37 – Espectro dos sinais filtrados resultante da simulação da Figura 36. . . .	58
Figura 38 – Performance da transmissão com portadora em 1550,4047 nm através da correlação.	59
Figura 39 – Performance da transmissão com portadora em 1550,4047 nm através do diagrama de olho.	59
Figura 40 – Diagrama de olho da transmissão com portadora em 1550,4047 nm para diferentes distâncias.	60
Figura 41 – Performance da transmissão com portadora em 1550,0002 nm através da correlação.	61
Figura 42 – Performance da transmissão com portadora em 1550,0002 nm através do diagrama de olho.	61
Figura 43 – Diagrama de olho da transmissão com portadora em 1550,0002 nm para diferentes distâncias.	62
Figura 44 – Performance da transmissão com portadora em 1549,6161 nm através da correlação.	63
Figura 45 – Performance da transmissão com portadora em 1549,6161 nm através do diagrama de olho.	63
Figura 46 – Diagrama de olho da transmissão com portadora em 1549,6161 nm para diferentes distâncias.	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros de entrada da simulação.	57
Tabela 2 – Escolha das portadoras para análise de desempenho na transmissão de dados.	57
Tabela 3 – Performance da transmissão com portadora em 1550,4047 nm para diferentes distâncias.	60
Tabela 4 – Performance da transmissão com portadora em 1550,0002 nm para diferentes distâncias.	62
Tabela 5 – Performance da transmissão com portadora em 1549,6161 nm para diferentes distâncias.	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

5G	Quinta Geração da Telecomunicação
ASK	<i>Amplitude Shift Keying</i>
B2B	<i>Back-To-Back</i>
BBB	<i>Basic Building Blocks</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
CMOS	<i>Complementary Metal–Oxide–Semiconductor</i>
CPID	Centro de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação
CW	<i>Continuous Wave</i>
DFA	<i>Doped Fiber Amplifier</i>
DWDM	<i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i>
EDFA	<i>Erbium-Doped Fiber Amplifier</i>
FDTD	<i>Finite-Difference Time-Domain</i>
GC	<i>Grating Coupler</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
ITU-T	<i>Telecommunication Standardization Sector of ITU</i>
Labtél	Laboratório de Telecomunicações
MZI	Interferômetro de Mach-Zehnder
MZM	Modulador de Mach-Zehnder
MZM-SD	Modulador de Mach-Zehnder <i>Single Drive</i>
MZM-DD	Modulador de Mach-Zehnder <i>Dual Drive</i>
OFC	<i>Optical Frequency Comb</i>
OOK	<i>On-Off-Keying</i>

OSA	Analisador de Espectro Óptico
OSNR	<i>Optical Signal-to-Noise Ratio</i>
PIC	<i>Photonic Integrated Circuit</i>
RF	Radiofrequência
RFS	<i>Recirculating Frequency Shifting</i>
SOA	<i>Semiconductor Optical Amplifiers</i>
TOPS	<i>Thermo-Optic Phase Shifter</i>
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
WDM	<i>Wavelength-Division Multiplexing</i>

SUMÁRIO

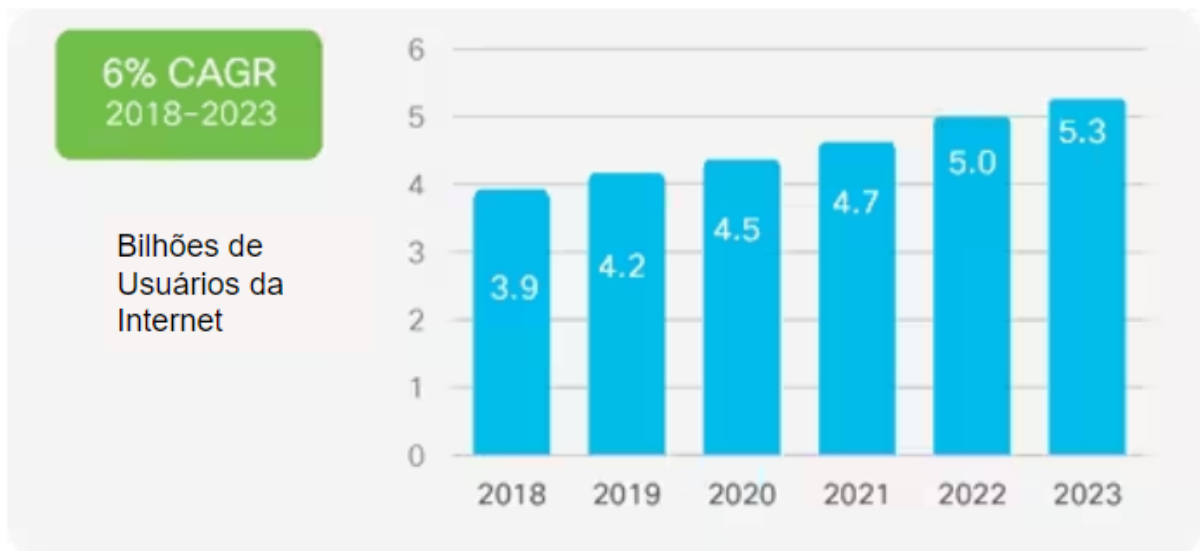
1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Justificativa	16
1.2	Estrutura do Texto	17
2	OBJETIVOS	18
2.1	Objetivo Geral	18
2.2	Objetivos Específicos	18
3	REFERENCIAL TEÓRICO	19
3.1	Fotônica Integrada	19
3.2	Componentes Ópticos	20
3.2.1	Acopladores Ópticos	20
3.2.2	Y-Branch	23
3.2.3	Interferômetro de Mach-Zehnder	25
3.2.4	Deslocador de Fase Termo-Óptico	28
3.2.5	Amplificadores Ópticos	29
3.2.6	Filtros Ópticos	29
3.3	Geração de Múltiplas Portadoras Ópticas	30
3.3.1	Pentes de Frequências Ópticas OFC	31
3.3.2	Uso dos Pentes de Frequências Ópticas em Sistemas de Comunicação WDM	32
3.3.3	Geração de Pentes de Frequências Ópticas	32
3.4	Transmissão em Telecomunicações	34
3.4.1	Modulador de Mach-Zehnder	35
3.4.2	Modulação de Amplitude OOK	36
4	METODOLOGIA E ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO	37
4.1	Metodologia	37
4.2	Etapas de Desenvolvimento	37
4.2.1	Geração de Múltiplas Portadoras Ópticas	37
4.2.1.1	Simulação Analítica	38
4.2.1.2	Modelagem Numérica	39
4.2.2	Idealização do Sistema de Transmissão	41
4.3	Recursos Disponíveis	42
5	RESULTADOS E ANÁLISES	43
5.1	Geração de Múltiplas Portadoras Ópticas	43
5.1.1	Simulação Analítica	43

5.1.2	Modelagem Numérica	48
5.2	Transmissão de Dados	56
6	CONCLUSÃO	66
	REFERÊNCIAS	68

1 INTRODUÇÃO

É indiscutível que a informação tornou-se um dos principais recursos preciosos na atual conjuntura da sociedade. De fato, o acesso à informação e o compartilhamento de dados não só envolvem como também alteram praticamente todas as áreas da sociedade como a educação, a saúde, o entretenimento e a comunicação. Nos últimos anos, houve um notável aumento na demanda por dados e no número de pessoas conectadas globalmente, especialmente na internet, a rede mundial de informações mais conhecida. O número de usuários da internet aumentou em quase trezentos milhões por ano, o que representa um crescimento de cerca de um bilhão e meio em um período de cinco anos, como vê-se na Figura 1.

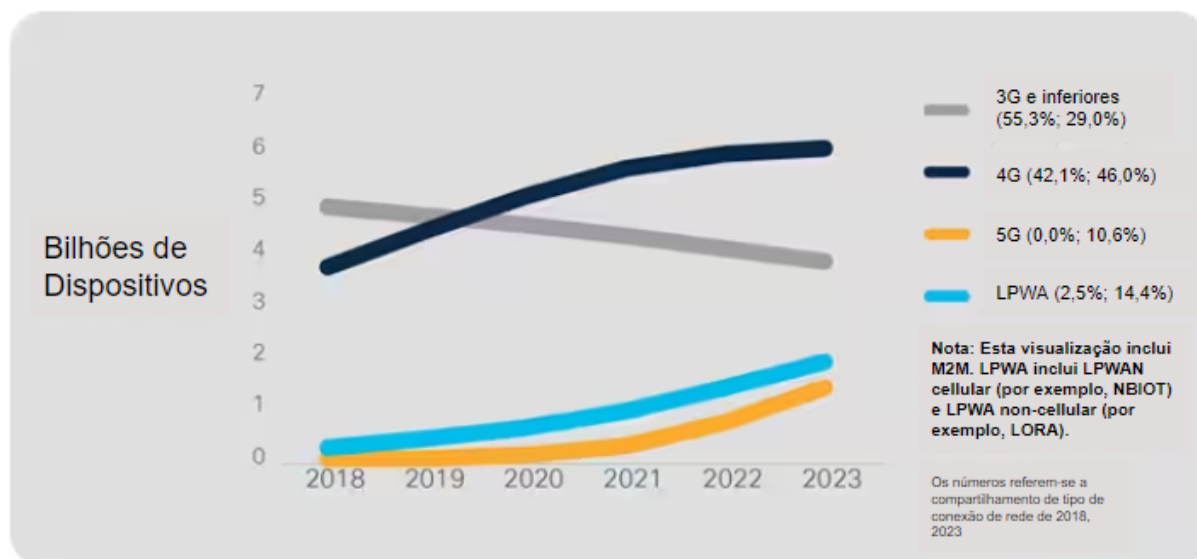
Figura 1 – Crescimento global de usuários da internet entre os anos de 2018-2023.



Fonte: Cisco (2022). Adaptado pelo autor.

Além disso, com o surgimento de novas tecnologias, como a quinta geração da telecomunicação (5G) e a evolução da conectividade de rede de gerações inferiores para as mais recentes. Assim, houve um considerável aumento no tráfego de dados em todos os sistemas, especialmente nos dispositivos móveis. Observou-se um crescimento exponencial nos últimos cinco anos nos aparelhos que possuem tecnologia 5G, enquanto os dispositivos com tecnologias mais antigas, como 4G, permaneceram estáveis ou até diminuíram, como indicado no gráfico da Figura 2.

Figura 2 – Crescimento global de dispositivos móveis e conexões entre os anos de 2018-2023.



Fonte: Cisco (2022). Adaptado pelo autor.

Um estudo anual realizado pela Cisco Systems relata que o uso geral de dispositivos tende a aumentar ao passo que a velocidade de transferências de dados aumenta. Deste modo, há uma previsão de que a velocidade alcançada do 5G seja treze vezes maior do que a conexão móvel média utilizada até o ano 2023 (CISCO, 2022). Tais aumentos de velocidade e dispositivos contribuirão para um aumento ainda mais desproporcional do tráfego de dados.

Para evidenciar ainda mais este crescente consumo de dados, tem-se como um grande exemplo massivo número de dispositivos se comunicando entre si como esperado em soluções (ou ambientes) IoT. Os sistemas implementados com IoT permitem a implementação de uma rede de dezenas e até milhares de dispositivos conectados entre si que coletam e compartilham dados através da internet. Assim, a eficiência e efetividade dessas redes são definidas pela quantidade massiva de dados armazenados, processados e enviados em tempo real, o que torna necessário aumentar cada vez mais a capacidade dos canais de transmissão (TUSA; CLAYMAN, 2021).

Em decorrência de tais aumentos de demandas, uma solução já incluída por grande parte das comunicações atuais é a utilização da fotônica, principalmente na aplicação das fibras ópticas como meios de transmissão. As fibras ópticas se popularizaram nas telecomunicações nos anos 80 através das inovações de se realizar transmissões com grandes larguras de banda com baixas perdas. Como o sinal está no domínio óptico e confinado em um núcleo, as transferências de dados são imunes a interferências, fazendo com que o

sinal tenha um nível muito grande de qualidade (HUI, 2015).

Além disso, com os avanços na tecnologia, os custos para implementação e manutenção de sistemas fotônicos mais simples passaram a ser menores, tornando-os capazes de suprir as necessidades atuais e impulsionando o surgimento de novos estudos que potencializam ainda mais a eficiência. Todavia, como a aplicabilidade de sistemas totalmente ópticos ainda permanecia complexo, o surgimento de uma filosofia da indústria sobre semicondutores desenvolveu a integração de dispositivos fotônicos.

1.1 Justificativa

A fotônica integrada surgiu como uma grande revolução na comunicação óptica. De fato, por apresentar grandes similaridades no processo de produção com os semicondutores, o número de investimentos das indústrias aumentam constantemente. É evidente que tal tendência é ocasionado pelo grande potencial que a inclusão dos circuitos fotônicos integrados traz. Dentre as vastas vantagens da integração óptica, vale-se destacar as suas capacidades de apresentar um melhor aproveitamento das grandes larguras de bandas provenientes da fotônica tradicional as quais muita das vezes são subutilizadas devido a falta de flexibilização, os baixos custos em produções de larga escala e a possibilidade processar os sinais no domínio óptico, evitando a baixa velocidade e o consumo de energia das conversões óptico-elétrico e vice-versa (CHEN et al., 2018).

Os dispositivos ópticos integrados, como os guias, os moduladores e os acopladores, por exemplo, continuam mantendo os princípios teóricos e práticos dos modelos tradicionalmente empregados, acrescentando somente os benefícios de terem os tamanhos reduzidos drasticamente e projetos de custos também diminuídos (REIDER, 2016). Entretanto, as únicas restrições no processo de integração consistem em limitações físicas e a necessidade de realizar ampliações dos sinais, uma vez que alguns componentes ópticos não são miniaturizados facilmente e apresentam perdas durante a propagação em curvas.

Outro fator considerável é a técnica de multiplexação por divisão de comprimento de onda que já é empregada na infraestrutura atual dos sistemas ópticos a fim de otimizar a comunicação, ou seja, são utilizados um conjunto de fontes de laser de comprimentos distintos e discretos para a realização de transmissões em links ópticos. Entretanto, estudos direcionados para a implementação de pentes de frequências ópticas em sistemas com multiplexação por divisão de comprimento de onda, do inglês Wavelength-Division Multiplexing (WDM), mostram ser possível fazer com que um pente óptico substitua, no mínimo, dezenas de lasers individuais, ocasionando um consumo muito menor de energia e

diminuindo a escala dos transmissores (MARCIANO, 2016), (HU; OXENLØWE, 2021), (LEI et al., 2015).

Assim, a fotônica tradicional, através técnica WDM e outras vantagens como a capacidade de gerar grandes larguras de banda, consegue aumentar a quantidade e a capacidade de canais na telecomunicação significativamente. Portanto, a fotônica integrada pode ser utilizada com o propósito de garantir que tais capacidades sejam utilizadas ao máximo e de maneira otimizada, se tornando um grande investimento para suprir às grandes necessidades de dados como apresentando no capítulo anterior.

1.2 Estrutura do Texto

Este trabalho está dividido em seis partes distintas.

Inicialmente, será apresentado uma introdução do projeto de pesquisa, contextualizando-o no cenário e expondo os principais motivos que justificam sua realização. Essa abertura foi desenvolvida considerando o panorama atual da comunidade científica e global.

Em seguida, serão apresentados os objetivos geral e específicos, os quais demonstram as limitações e o propósito do projeto, bem como uma breve explicação das etapas do processo para alcançá-los.

A terceira seção consiste no referencial teórico, onde serão apresentadas as teorias necessárias para compreender e executar o projeto. O intuito é garantir um entendimento completo por parte do leitor em relação aos temas abordados.

Posteriormente, será exposta a metodologia adotada para o desenvolvimento do projeto, destacando as etapas necessárias para sua conclusão, assim como os recursos disponíveis utilizados.

Na quinta parte deste trabalho, serão abordados todos os resultados obtidos, incluindo a geração de múltiplas portadoras ópticas por meio de dois métodos para estudo e a transmissão de dados. Além disso, serão apresentadas as métricas utilizadas para avaliar a qualidade dessa transmissão, validando o sistema proposto como um transmissor.

Por fim, na sexta parte, serão apresentadas as conclusões deste trabalho, evidenciando os principais objetivos alcançados e a contribuição do projeto.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho consiste em desenvolver uma fonte óptica em fotônica integrada de maneira simulada que possibilite realizar a geração de múltiplas portadoras capazes de serem moduladas a fim de se realizar transmissões de dados.

2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos incluem:

- Implementar e simular uma fonte óptica em fotônica integrada em silício baseado no método de deslocamento de frequência por recirculação - RFS para geração de multiportadoras;
- Realizar a simulação de um dos tipos de modulações tradicionais em sistemas de telecomunicações em uma das portadoras geradas pela fonte óptica.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

O referencial teórico abordará estudos anteriores e teorias relevantes que são essenciais para a compreensão e execução deste projeto. Isso será fundamental para proporcionar ao leitor uma melhor compreensão, clareza e facilitar o aprendizado relacionado ao tema em questão.

Será iniciada a base teórica através da tecnologia da fotônica integrada com os dispositivos ópticos necessários para o desenvolvimento. Após isso, será tratado do processo de geração de múltiplas portadoras que caracterizará o transmissor proposto e, por fim, será apresentado um dos processos básicos utilizados na telecomunicação: o processo de modulação de dados em uma portadora para sua transmissão por um canal.

3.1 Fotônica Integrada

Atualmente, os sistemas fotônicos tradicionais são desenvolvidos por componentes de usos específicos construídos a partir de inúmeros materiais e geralmente de diferentes fabricantes (CHROSTOWSKI; HOCHBERG, 2015). O grande problema em questão é que cada parte do sistema é implementado para que o componente tenha um melhor desempenho individualmente, fazendo com que cada parte tenha um custo elevado de projeto e perdendo o rendimento ao serem acoplados com outros dispositivos. A fotônica integrada surgiu como uma solução que realiza a integração de diferentes componentes que possuem múltiplas funções em um único sistema, sendo fabricados, em sua maioria, a partir de um mesmo material e na mesma indústria.

Assim, a fotônica integrada consiste na utilização de guias de onda para realizar a propagação da luz (YARIV, 1991), sendo possível desenvolver dispositivos ópticos de maneira integrada por meio de inúmeros arranjos desses guias de onda de diferentes substratos, como os materiais semicondutores que permitem a integração de elementos eletro-ópticos e o silício (REIDER, 2016). O uso de silício como substrato é ideal, pois apresenta um baixo custo devido a possibilidade dos circuitos fotônicos integrados serem fabricados em larga escala pelas indústrias de microeletrônica. Isso se dá por conta das similaridades com o processo de fabricação de semicondutores CMOS e pelo índice de refração entre o núcleo de silício e o revestimento utilizado de dióxido de silício possuir um contraste alto, tornando-os potencialmente melhores em relação ao guiamento (CHEN et al., 2018).

Portanto, todos os componentes e circuitos integrados apresentados neste presente trabalho, serão baseados na tecnologia de fotônica integrada em silício.

3.2 Componentes Ópticos

Através dos componentes ópticos desenvolvidos de forma integrada, pode-se realizar a implementação de inúmeros circuitos ópticos com diferentes funcionalidades e aplicações. Neste sentido, assim como em sistemas da radiofrequência (RF) tradicional, os elementos se dividem em componentes ativos e passivos. Dentre os elementos passivos, se encontram os *fundamental/basic building blocks* (BBB) que são os principais elementos utilizados no desenvolvimento de PICs, por exemplo os guias de ondas, os acopladores e moduladores ópticos. (CHROSTOWSKI; HOCHBERG, 2015)

3.2.1 Acopladores Ópticos

Dentre os métodos de divisão e combinação de luz durante os processos de transmissões em sistemas fotônicos, os acopladores ópticos são os dispositivos mais utilizados. O acoplador óptico consiste em um componente dividido em dois guias de ondas paralelos, em que o coeficiente de acoplamento é definido pelo espaçamento entre os guias e ambos os comprimentos do acoplador, como apresentado na Figura 3. Deste modo, ao incidir luz na entrada, haverá uma alteração de módulo e de fase os quais dependem do coeficiente do dispositivo, gerando um acoplamento da onda entre os guias.

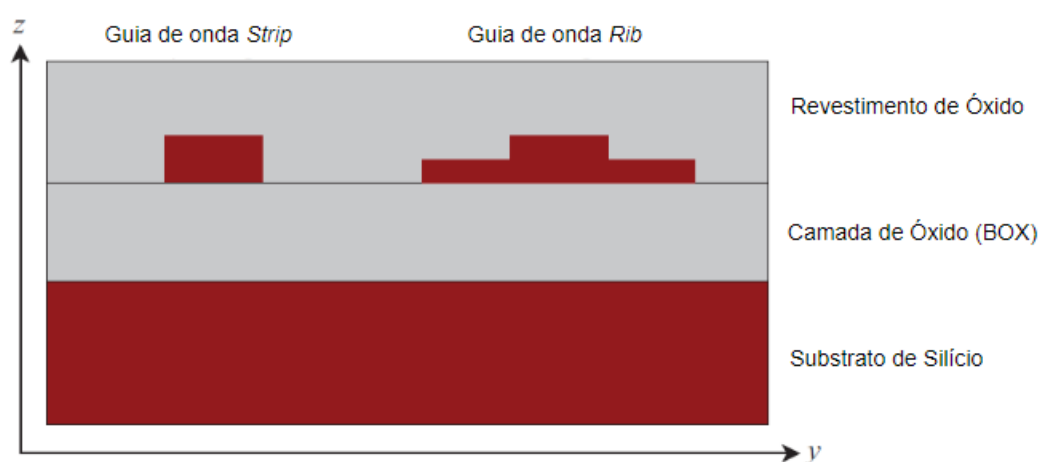
Figura 3 – Geometria genérica de um acoplador óptico com guias de ondas paralelos.



Se tratando da fotônica integrada, os acopladores são desenvolvidos com diferentes tipos de guias de ondas, entretanto, os mais empregados são os do tipo *Rib* e os do tipo *Strip*. Os guias de onda *Strip* são guias normalmente utilizado para transmissões em canais, pois permitem a realização de curvaturas com raios pequenos. Já os guias de onda *Rib*

são comumente utilizados para desenvolvimento de dispositivos eletro-ópticos, uma vez que são habilitados para permitir conexões elétricas ao longo do guia (CHROSTOWSKI; HOCHBERG, 2015). De fato, esses guias têm diferenças em sua construção, como mostrado na Figura 4. Ambos são revestidos por óxido de silício e possuem uma base de substrato de silício, mas se distinguem pela geometria do guia interno. Enquanto o *Strip* possui uma forma retangular, o *Rib* possui uma estrutura similar a um trapézio a fim de permitir passagem de conexões elétricas. Tais mudanças de geometria, portanto, definem as suas aplicações.

Figura 4 – Diferenças entre a construção *Rib* e *Strip* nos guias de ondas em fotônica integrada em silício.



Fonte: Chrostowski e Hochberg (2015). Adaptado pelo autor.

O funcionamento de um acoplador óptico está intrinsecamente relacionado com a teoria dos modos acoplados, a qual consiste em uma técnica comumente empregada para tratar perturbações periódicas de amplitude e/ou fase em guias durante o acoplamento por considerar que os modos de um guia sem perturbação continuam inalterados ou com leves variações na presença de pequenas perturbações. Neste contexto, a fração da potência acoplada de um guia de onda para outro no dispositivo é definida como (CHROSTOWSKI; HOCHBERG, 2015):

$$k^2 = \frac{P_{acoplada}}{P_{entrada}} = \sin^2(C \cdot L) \quad (3.1)$$

onde $P_{entrada}$ é a potência óptica na entrada, $P_{acoplada}$ é a potência óptica acoplada através do acoplador, L é o comprimento do acoplador, e C é o coeficiente de acoplamento. Assim, assumindo-se que um acoplador não possua perdas ($k^2 + t^2 = 1$), tem-se que a potência remanescente da entrada após se propagar pelo guia do acoplador será:

$$t^2 = \frac{P_{resultante}}{P_{entrada}} = \cos^2(C \cdot L) \quad (3.2)$$

Em relação à determinação do coeficiente de acoplamento, faz-se necessário utilizar a abordagem da expansão de modo próprio ao invés dos modos acoplados, pois essa técnica de expansão apresenta-se como uma análise mais precisa e direta. Neste sentido, sendo n_1 e n_2 os índices efetivos dos guias utilizados, o coeficiente será determinado por (CHROSTOWSKI; HOCHBERG, 2015):

$$C = \frac{\pi \Delta n}{\lambda} \quad (3.3)$$

onde Δn representa a diferença entre os índices $n_1 - n_2$. Uma outra relação importante nas análises dos guias é a do coeficiente de propagação, o qual é definido como:

$$\beta_1 = \frac{2\pi n_1}{\lambda} \quad (3.4)$$

$$\beta_2 = \frac{2\pi n_2}{\lambda} \quad (3.5)$$

A medida em que as ondas se propagam, a intensidade do campo oscila entre os dois guias de onda. Neste sentido, quando os dois feixes estão em fase, a potência é localizada no primeiro guia de onda e após acontecer uma diferença de deslocamento de fase π entre os feixes a potência se localiza no segundo guia de ondas. Este efeito acontece após uma distância conhecida como comprimento de cruzamento L_x e determina-se por:

$$\beta_1 L_x - \beta_2 L_x = \pi$$

Através das Equações 3.4 e 3.5, têm-se:

$$L_x \cdot \left(\frac{2\pi n_1}{\lambda} - \frac{2\pi n_2}{\lambda} \right) = \pi$$

$$L_x = \frac{\lambda}{2\Delta n} \quad (3.6)$$

Após as análises referentes à amplitude dos acopladores, é necessário realizar um estudo sobre como a fase da luz é influenciada. Como ponto de partida, considera-se que os feixes de luz incidindo sobre os guias de onda, apresentam um campo elétrico descrito por:

$$E_{guiaA} = \frac{1}{\sqrt{2}} (e^{j\beta_1} + e^{j\beta_2 L}) \quad (3.7)$$

$$E_{guiaB} = \frac{1}{\sqrt{2}} [e^{j\beta_1} + e^{j(\beta_2 L - \pi)}] \quad (3.8)$$

A mudança de fase em π aplicada em 3.8 acontece devido ao surgimento de um campo de sentido oposto ao referencial. Sendo assim, a fase da luz propagada em cada guia e a diferença entre ambos, pode ser determinadas:

$$\angle E_{guiaA} = \frac{\beta_1 + \beta_2}{2} \cdot L \quad (3.9)$$

$$\angle E_{guiaB} = \frac{\beta_1 + \beta_2}{2} \cdot L - \frac{\pi}{2} \quad (3.10)$$

$$\angle E_{guiaB} - \angle E_{guiaA} = -\frac{\pi}{2} \quad (3.11)$$

Portanto, incluindo as fases nas equações dos coeficientes de acoplamento 3.1 e 3.2, têm-se:

$$t = |t|^2 \cdot e^{\frac{\beta_1 + \beta_2}{2} \cdot L} \quad (3.12)$$

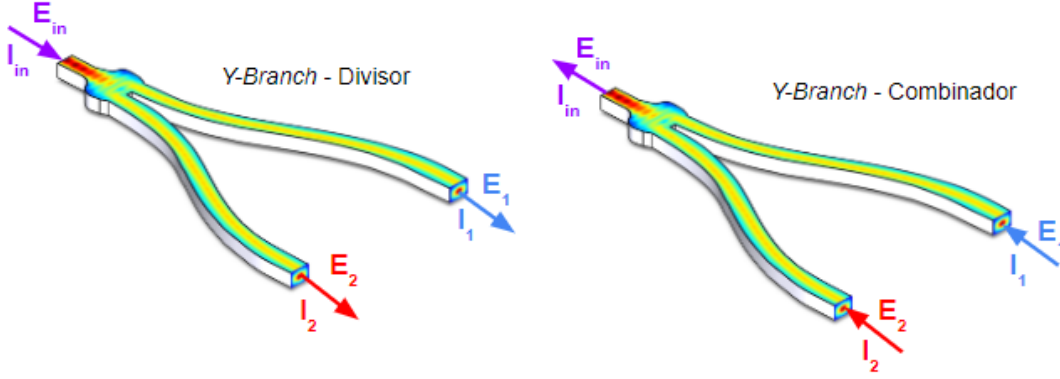
$$k = |k|^2 \cdot e^{j(\frac{\beta_1 + \beta_2}{2} \cdot L - \frac{\pi}{2})} \quad (3.13)$$

3.2.2 Y-Branch

Além dos acopladores ópticos citados anteriormente, há um dispositivo fundamental extremamente importante quando se trata de divisão e combinação de luz, o *Y-branch*. Este componente óptico é capaz de realizar a divisão da luz propagada por um guia de

onda em duas partes iguais (50/50%) para outros dois guias de onda ou combinar a luz de dois guias de ondas em um único guia. Para melhor compreensão, é apresentado na Figura 5 os tipos de configurações e sua geometria no modelo mais simples.

Figura 5 – Geometria e tipos de configurações do componente óptico *Y-branch*.



Fonte: Ansys (2023). Adaptado pelo autor.

Acerca da configuração de divisão, considera-se que uma luz com intensidade I_{in} e campo elétrico E_{in} seja incidida sobre a entrada do componente. Deste modo, a luz será particionada igualmente e, em cada saída, haverá uma intensidade de

$$I_1 = I_2 = I_{in}/2 \quad (3.14)$$

e, como $I \propto |E|^2$, um campo elétrico de

$$E_1 = E_2 = E_{in}/\sqrt{2} \quad (3.15)$$

Para a configuração da combinação dos feixes de luz, utilizam-se as mesmas Equações 3.14 e 3.15, ou seja, considerando que a entrada da luz aconteça somente em uma das saídas do divisor anteriormente apresentado com I_1 e E_1 , a intensidade e o campo elétrico resultante da combinação na saída serão:

$$I_{in} = I_1/2 \quad (3.16)$$

$$E_{in} = E_1/\sqrt{2} \quad (3.17)$$

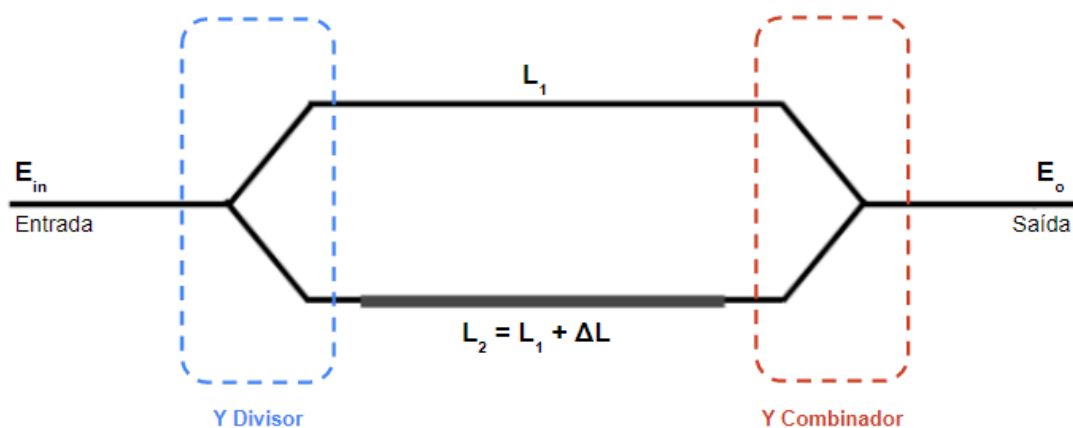
Sendo assim, o *Y-branch* realiza o processo de divisão e combinação de luz em diferentes guias de onda quando utilizado em diferentes direções. Além disso, ao analisar a Equação 3.16, nota-se que na configuração de combinador, quando houver apenas a incidência de luz em uma das entradas, a saída será equivalente à metade do valor incidido. (CHROSTOWSKI; HOCHBERG, 2015)

3.2.3 Interferômetro de Mach-Zehnder

Para realizar diferentes efeitos de interferências construtivas e destrutivas entre feixes de luz, pode-se utilizar o modelo Mach-Zehnder. O interferômetro de Mach-Zehnder, ou somente MZI, consiste em um dispositivo com uma entrada capaz de dividir a ondas incidida em dois caminhos (guias de onda) diferentes e, após a propagação, faz a recombinação em um único caminho. Entretanto, como deseja-se provocar o efeito de interferência, uma diferença no comprimento de um dos guias propagantes é posta e, tal mudança, realiza uma diferença de fase entre as ondas que ao recombinadas resultam em uma interferência. (REIDER, 2016)

Além disso, na fotônica integrada, o MZI mantém os mesmos princípios operacionais de sua estrutura tradicional, como se vê na Figura 6, neste sentido, a divisão ou combinação pode ser desenvolvida através de outros componentes ópticos básicos como o *Y-branch* e os acopladores vistos anteriormente. Neste trabalho, para implementação do interferômetro, os guias de onda utilizados serão do tipo monomodo. Isso significa que o projeto desses guias são realizados de forma a não permitir o surgimento de outros modos de propagação.

Figura 6 – Modelo de um interferômetro de Mach-Zehnder.



Considera-se inicialmente que uma luz de intensidade I_{in} e campo elétrico E_{in} seja inserida na entrada do MZI. Tomando o *Y-branch* como divisão/combinação e a Equação 3.15, têm-se que na saída do divisor inicial os campos elétricos nos guias superior e inferior

serão, respectivamente, $E_1 = E_{in}/\sqrt{2}$ e $E_2 = E_{in}/\sqrt{2}$. Além disso, os comprimentos dos guias serão de L_1 e $L_2 = L_1 + \Delta L$ e com constantes de fase de propagação representada pelas Equações 3.4 e 3.5.

Outrossim, serão desconsiderados os efeitos das constantes de atenuações α_1 e α_2 sobre os guias. Portanto, ao final de ambos os guias, teremos na entrada do combinador os campos elétricos descritos como

$$E_{o1} = E_1 \cdot e^{-j\beta_1 L_1} \quad (3.18)$$

$$E_{o2} = E_2 \cdot e^{-j\beta_2 L_2} \quad (3.19)$$

Substituindo 3.15 em 3.18 e 3.19, têm-se então:

$$E_{o1} = \frac{E_{in}}{\sqrt{2}} \cdot e^{-j\beta_1 L_1} \quad (3.20)$$

$$E_{o2} = \frac{E_{in}}{\sqrt{2}} \cdot e^{-j\beta_2 L_2} \quad (3.21)$$

Por fim, após realizada a combinação de ambos os feixes de luz, pela Equação 3.17, o campo elétrico resultante será de:

$$E_o = \frac{E_{o1} + E_{o2}}{\sqrt{2}} = \frac{E_{in}}{2} \cdot (e^{-j\beta_1 L_1} + e^{-j\beta_2 L_2}) \quad (3.22)$$

e como visto no tópico anterior, a intensidade da luz é proporcional ao módulo do campo elétrico, assim também é obtido o valor da intensidade na saída do *Y-branch* utilizado no interferômetro:

$$I_o = |E_o|^2$$

$$I_o = \left| \frac{E_{in}}{2} \cdot (e^{-j\beta_1 L_1} + e^{-j\beta_2 L_2}) \right|^2$$

$$I_o = \frac{E_{in}}{4} \cdot |e^{-j\beta_1 L_1} + e^{-j\beta_2 L_2}|^2 \quad (3.23)$$

A partir da relação de Euler, pode-se reescrever a Equação 3.23 em uma notação de cossenos e senos como mostra-se na Equação 3.24 (CHROSTOWSKI; HOCHBERG, 2015).

$$I_o = \frac{E_{in}}{4} \cdot [\cos(\beta_1 L_1) - j \sin(\beta_1 L_1) + \cos(\beta_2 L_2) - j \sin(\beta_2 L_2)]^2 \quad (3.24)$$

Sabe-se, pela trigonometria, que:

$$\cos(x) + \cos(y) = 2 \cdot \cos\left(\frac{x+y}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{x-y}{2}\right) \quad (3.25)$$

$$\sin(x) + \sin(y) = 2 \cdot \sin\left(\frac{x+y}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{x-y}{2}\right) \quad (3.26)$$

$$\cos^2(x) + \sin^2(x) = 1$$

$$\cos^2(x) = \frac{1 + \cos(2x)}{2}$$

Considerando que $A = \beta_1 L_1$, $B = \beta_2 L_2$ e as relações trigonométricas anteriores, tem-se que a Equação 3.24 pode ser simplificada:

$$I_o = \frac{E_{in}}{4} \cdot \{\cos(A) + \cos(B) - j [\sin(A) + \sin(B)]\}^2$$

$$I_o = \frac{E_{in}}{4} \cdot \left\{ 2 \cdot \cos\left(\frac{A+B}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{A-B}{2}\right) - j \left[2 \cdot \sin\left(\frac{A+B}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{A-B}{2}\right) \right] \right\}^2$$

$$I_o = \frac{E_{in}}{4} \cdot \left\{ 4 \cdot \cos^2\left(\frac{A-B}{2}\right) \cdot \left[\cos^2\left(\frac{A+B}{2}\right) + \sin^2\left(\frac{A+B}{2}\right) \right] \right\}$$

$$I_o = E_{in} \cdot \left[\cos^2 \left(\frac{A - B}{2} \right) \right] = E_{in} \cdot \left[\frac{1 + \cos \left(2 \cdot \frac{A-B}{2} \right)}{2} \right]$$

$$I_o = \frac{E_{in}}{2} \cdot [1 + \cos(A - B)]$$

Substituindo novamente A e B , tem-se, portanto, a intensidade simplificada:

$$I_o = \frac{E_{in}}{2} \cdot [1 + \cos(\beta_1 L_1 - \beta_2 L_2)] \quad (3.27)$$

3.2.4 Deslocador de Fase Termo-Óptico

Durante a propagação em um guia de onda, podem surgir deslocamentos de fase devido a imperfeições ocasionadas pelo processo de fabricação ou intencionalmente introduzidas. Esses deslocamentos demandam ajustes específicos para atingir o ponto ideal ou acentuar ainda mais a defasagem. Para realizar tais ajustes na fotônica integrada em silício, podem ser empregados sintonizadores térmicos, como o deslocador de fase termo-óptico (TOPS), ilustrado na Figura 7.

Figura 7 – Modelo de um deslocador de fase termo-óptico em fotônica integrada em silício.



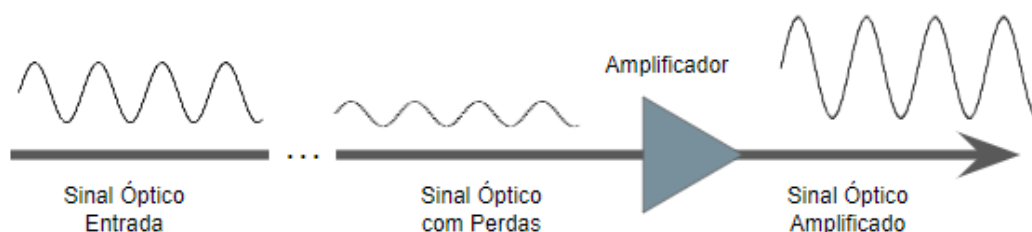
Fonte: Liu et al. (2022). Adaptado pelo autor.

O funcionamento deste dispositivo baseia-se em um material resistivo posicionado acima (ou próximo) e ao longo do guia de ondas. Ao aplicar uma tensão de polarização, uma corrente surge nesse material, aquecendo-o e, conseqüentemente, elevando a temperatura na região circundante, incluindo o guia de ondas. Esta variação de temperatura altera o índice de refração do material do guia de ondas por meio do efeito termo-óptico. Isso, por sua vez, modula o índice efetivo e a fase do feixe propagado no guia de ondas (SITBON; OSTROVSKY; MALKKA, 2022). Portanto, devido a esse funcionamento característico, o TOPS é comumente utilizado em moduladores, anéis ressonantes, comutadores e em outras aplicações.

3.2.5 Amplificadores Ópticos

Independentemente do uso de componentes ativos ou passivos no sistema, a potência de um sinal, à medida que se propaga por um guia de onda, apresenta uma redução devido às perdas, sendo intensificada por grandes distâncias da transmissão. Para compensar essas perdas, são utilizados amplificadores ópticos que ampliam o sinal propagado no sistema através de uma emissão estimulada ou de um processo de transferência de potência óptica, a Figura 8 ilustra o funcionamento de um amplificador óptico genérico. Neste contexto, os três principais tipos de amplificadores ópticos em 1550 nm são os amplificadores ópticos semicondutores (SOAs), os amplificadores de fibra ativa ou de fibra dopada (DFAs) e amplificadores Raman (KEISER, 2021). Dentre os amplificadores mencionados, podem-se destacar os EDFAs que são muito utilizados atualmente em sistemas de telecomunicação e os SOAs que, por se tratar de uma amplificação através de materiais semicondutores, permitem sua implementação em PICs.

Figura 8 – Funcionamento de um amplificador óptico genérico.



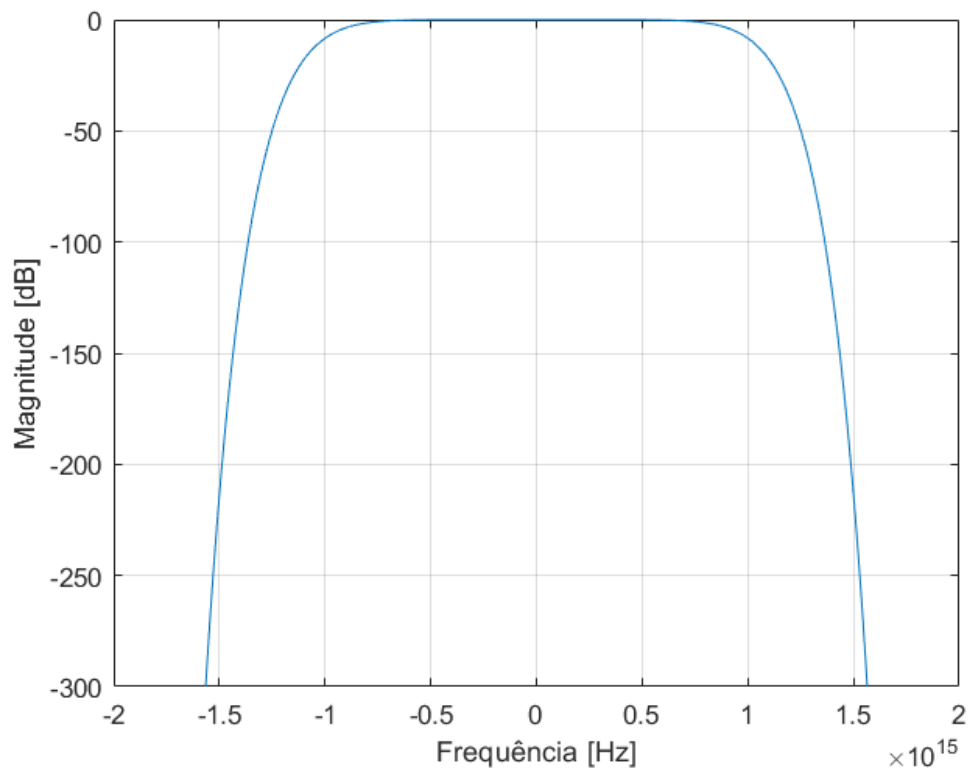
3.2.6 Filtros Ópticos

Os filtros ópticos possuem o mesmo funcionamento dos tradicionalmente empregados em sistemas de RF. Deste modo, os filtros são dispositivos que realizam a seleção de um deter-

minado espectro de um sinal para haver somente a passagens de determinadas frequências em um intervalo desejado. Para tal seleção, os componentes de frequências dentro da faixa de passagem desejada sofrerão baixas atenuações, ao passo que as frequências localizadas na faixa de rejeição terão atenuações elevadas (CARVALHO, 2009).

Dentre os tipos de filtros existentes, caso necessário, será utilizado neste trabalho o filtro passa-faixa, através do qual serão transmitidos somente os componentes com frequências inclusos em um intervalo limitado, os componentes fora dessa faixa serão fortemente atenuados, como apresentado na Figura 9. Tal filtro poderá ser utilizado visando limitar a quantidade de portadoras geradas futuramente.

Figura 9 – Banda passante do filtro passa-faixa.



3.3 Geração de Múltiplas Portadoras Ópticas

A utilização da geração de múltiplas portadoras representa uma estratégia eficaz para otimizar o aproveitamento da largura de banda nas comunicações ópticas. Essa abordagem se destaca como uma solução viável para atender à crescente demanda por capacidade de transmissão de dados. Por meio dessas portadoras, é possível efetuar várias transmissões

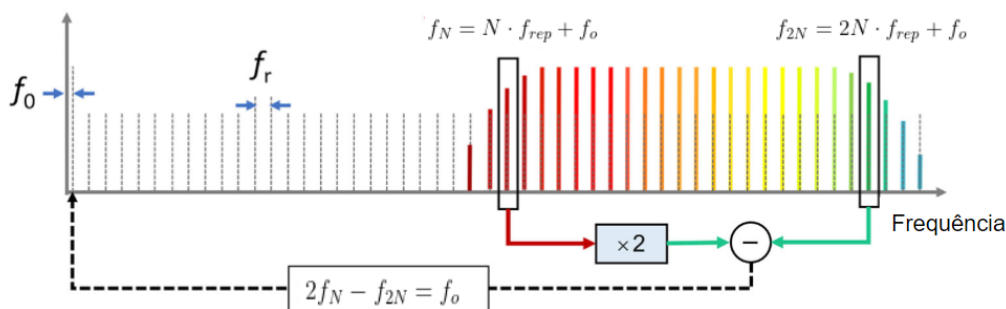
utilizando um único canal, o que resulta em uma economia significativa de recursos, especialmente em termos de capacidade e uso eficiente do espectro disponível.

Uma portadora pode ser definida como um comprimento de onda dentro da banda utilizada como propagante no canal de comunicação e, para gerá-la, é necessário haver um controle constante, uniforme e complexo da corrente e da temperatura da fonte de laser de cada comprimento de interesse. Para melhor entendimento, pode-se fazer uma abstração com uma rodovia, onde a portadora seria como uma das várias faixas de veículos presente na estrada, delimitando o fluxo de carros e direcionando qual direção os veículos devem transitar. Desta forma, a grande vantagem de realizar a geração de múltiplas portadoras é existir apenas uma única fonte geradora com um único controle, como os pentes de frequências ópticas.

3.3.1 Pentas de Frequências Ópticas OFC

Os pentes de frequências ópticas, do inglês *Optical Frequency Comb* (OFC), são definidos como conjuntos de frequências ópticas discretas igualmente espaçadas com características iguais de fase, podendo ser analisadas como frequências de portadoras. A Figura 10 apresenta uma ilustração de um pente óptico.

Figura 10 – Representação de um pente de frequência óptico.



Fonte: Fortier e Baumann (2019). Adaptado pelo autor.

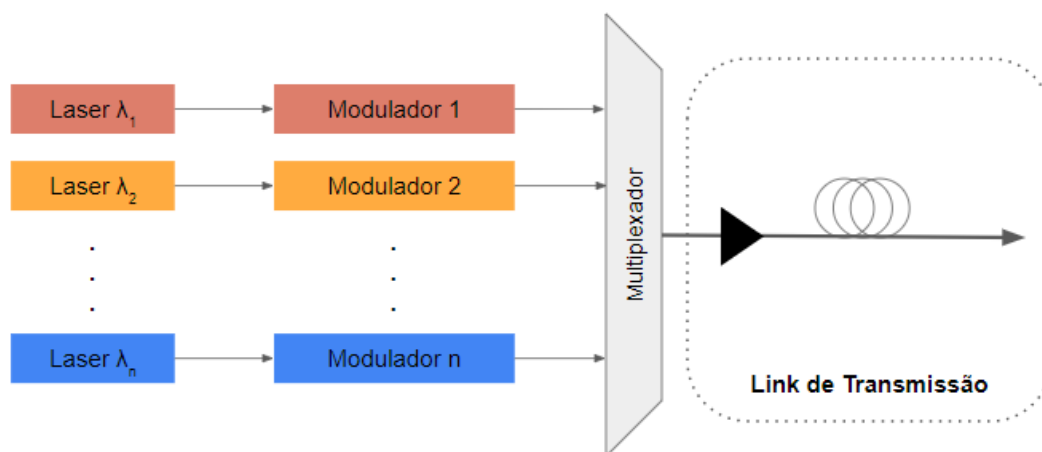
Assim, cada frequência gerada (f_N) na OFC pode ser representada pela Equação 3.28 em que N é a quantidade de repetições de frequências ópticas (f_{rep}) deslocadas da frequência central (f_0) definida (FORTIER; BAUMANN, 2019).

$$f_N = N \cdot f_{rep} + f_0 \quad (3.28)$$

3.3.2 Uso dos Pentes de Frequências Ópticas em Sistemas de Comunicação WDM

Atualmente, devido aos estresses dos sistemas provocados pelo aumento de dados, a otimização da comunicação passou a ser mais presente por todo o seu esqueleto, principalmente no uso de portadoras. Neste sentido, a comunicação óptica cada vez mais aderiu a técnica WDM, que faz uso de um conjunto de fontes de laser de comprimento distintos como portadoras e realiza sua multiplexação para a transmissão pelo canal, como se vê na Figura 11.

Figura 11 – Representação de um sistema óptico WDM tradicional.



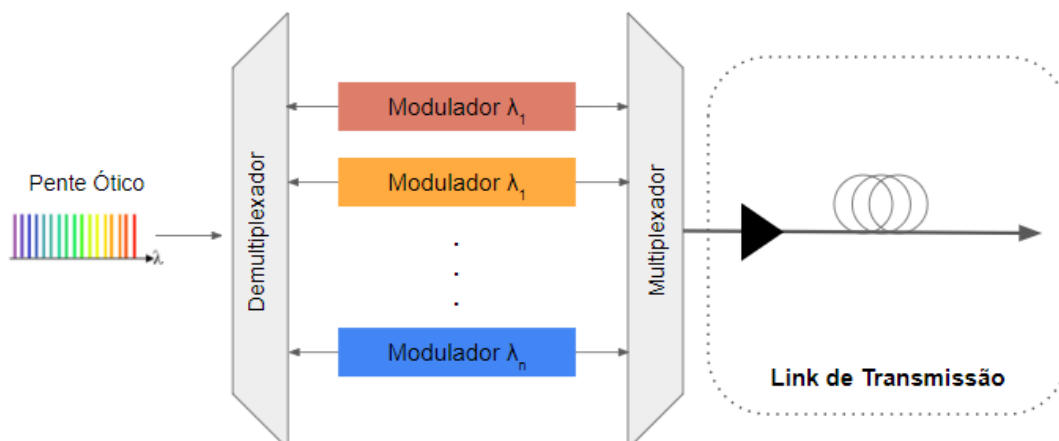
Fonte: Hu e Oxenløwe (2021). Adaptado pelo autor.

Entretanto, com o uso da OFC no lugar deste conjunto de lasers, como representado na Figura 12, é possível ter um sistema contendo uma única fonte de laser com inúmeros e diferentes comprimentos de ondas com larguras finas e uma alta relação de sinal-ruído óptico (OSNR), sendo fundamentais para transmissões ópticas (HU; OXENLØWE, 2021).

3.3.3 Geração de Pentes de Frequências Ópticas

Com o grande número de pesquisas a respeito dos pentes de frequências ópticas, muitas técnicas de geração foram testadas e desenvolvidas. Logo no início do século XXI, os pesquisadores Theodor Hänsch e Jan Hall desenvolveram juntos a técnica de pente de frequências ópticas, e, no ano de 2005, receberam o prêmio nobel de física (CHEN et al., 2018). A técnica utilizada para gerar a OFC se baseava no *Mode Locking* em que as fases relativas aos modos devem ser sempre constantes, caracterizando, no domínio da frequência um pente óptico e no domínio do tempo trens de pulsos periódicos. Atualmente, existem

Figura 12 – Representação de um sistema óptico WDM utilizando OFC.



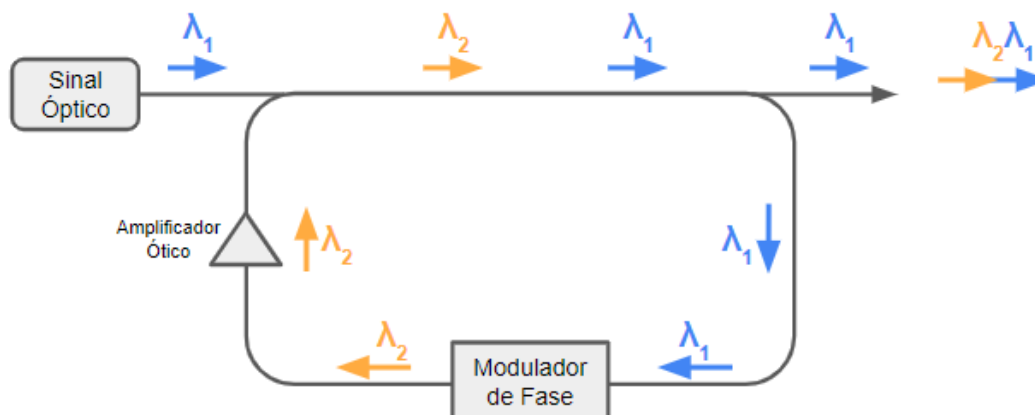
Fonte: Hu e Oxenløwe (2021). Adaptado pelo autor.

outros meios já consolidados no processo de geração dos pentes por meios de sistemas com loops de propagação e dispositivos modulantes com sinais de RF, como por exemplo os moduladores de fase e os eletro-ópticos.

Dentre as técnicas, pode-se destacar a geração de OFCs através do deslocamento de frequência por re-circulação (RFS) que tem como base um sistema com loop na propagação contendo um modulador de fase como apresentado na Figura 13.

Neste sentido, um sinal óptico é posto na entrada e dividido igualmente por um acoplador 50/50%, metade da potência do sinal sai pela saída do sistema enquanto a outra é novamente incidida na entrada após se propagar por um loop que contém um modulador de fase que adiciona deslocamento de frequência a cada ciclo e um amplificador para compensar as perdas. O espaçamento ocasionado pelo atraso de cada componente de frequência é definido pela frequência do sinal de RF posta no modulador, podendo ser utilizado o modulador de Mach-Zehnder no qual será visto mais a frente, por exemplo. Portanto, a técnica RFS faz o uso dessa modulação de fase para realizar múltiplos deslocamentos do sinal de entrada.

Figura 13 – Representação de um sistema RFS utilizado para geração de OFCs.



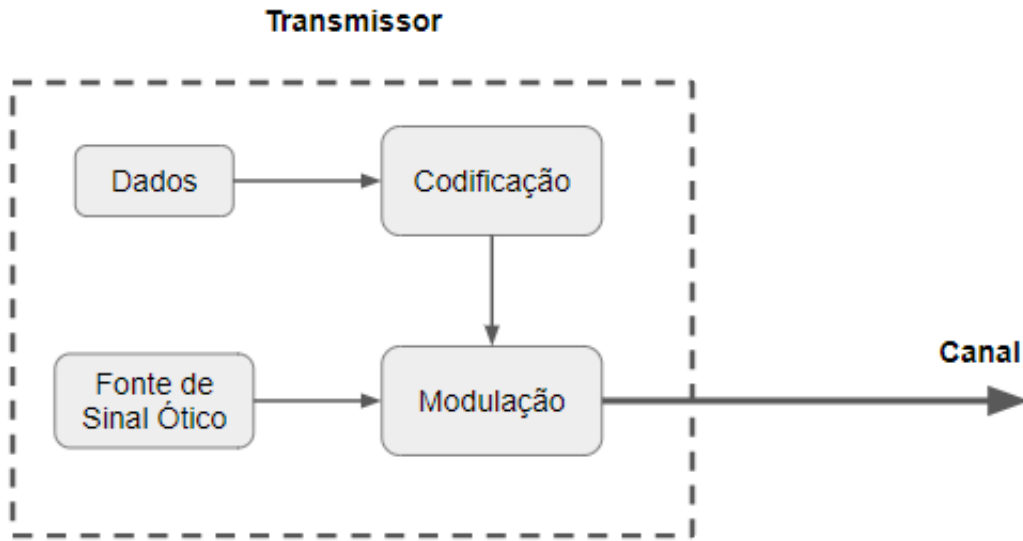
3.4 Transmissão em Telecomunicações

Um sistema básico de telecomunicação é constituído de no mínimo três partes: um transmissor, um canal e um receptor. O transmissor é o dispositivo responsável por realizar a preparação e o envio dos dados que serão transmitidos, neste sentido os dados em questão serão codificados e modulados para poderem ser moldados para se adequar às características do canal. O canal é o meio em que o sinal transmitido será propagado. Por fim, o receptor tem como propósito recuperar através da demodulação e da decodificação os dados enviados pelo canal.

Neste contexto, um transmissor óptico, assim como o tradicional, é constituído por dois processos: a codificação e a modulação. O processo de codificação tem como objetivo gerar símbolos através dos bits transmitidos nos dados. Esses símbolos gerado é importante para aproveitar o canal com eficiência e contribuir para uma melhor relação OSNR. Já no processo de modulação, realiza-se a reformulação do sinal óptico ao combinar com os símbolos codificados para que seja possível atender às características do canal. O modelo de um transmissor óptico é representado na Figura 14.

Neste trabalho, será desenvolvido um projeto de um transmissor óptico com modulação de amplitude OOK, que será discutido no tópico seguinte.

Figura 14 – Modelo genérico de um transmissor óptico.



3.4.1 Modulador de Mach-Zehnder

O modulador de Mach-Zehnder (MZM) é um dispositivo eletro-óptico que realiza a modulação de intensidade por meio da fase construído a partir do MZI, visto anteriormente no Capítulo 3.2.3. Assim como no interferômetro, o MZM possui em suas extremidades *Y-branches* em que na entrada está configurado como divisor e combinador na saída. Diferentemente dos MZIs, em ambos os guias que realizarão a conexão entre a divisão e a combinação, haverá eletrodos em ambos dos braços que aplicarão sinais de tensão e RF. Tais sinais são responsáveis por realizar a alteração de fase na luz propagada por um dos guias que, no que lhe concerne, realizará a modulação de intensidade através da interferência de fase quando combinados os feixes de luz de ambos os braços. O MZM possui dois tipos de configurações, variando a forma com que os braços sofrem alterações de fase. Quando somente um dos braços é modulado, o modulador recebe o nome de *Single Drive* (MZM-SD) e, quando ambos os braços são modulados, *Dual Drive* (MZM-DD) (CONCEIÇÃO, 2021).

A modelagem do modulador Mach-Zehnder é semelhante à do seu interferômetro, mas requer algumas considerações adicionais (BINH, 2008)(MARCIANO, 2016). Primeiramente, considerando E_{in} como o sinal de entrada do modulador e ω_c a frequência em radianos, tem-se que:

$$E_{in} = e^{-j\omega_c t} \quad (3.29)$$

Assim, considerando o sinal de entrada no MZM e que $\Delta\phi_1$ e $\Delta\phi_2$ sejam os sinais em seus braços, a saída do MZM será representada por:

$$E_o(t) = \frac{1}{2}e^{j\omega_c t} [e^{j\Delta\phi_1 t} - e^{j\Delta\phi_2 t}] \quad (3.30)$$

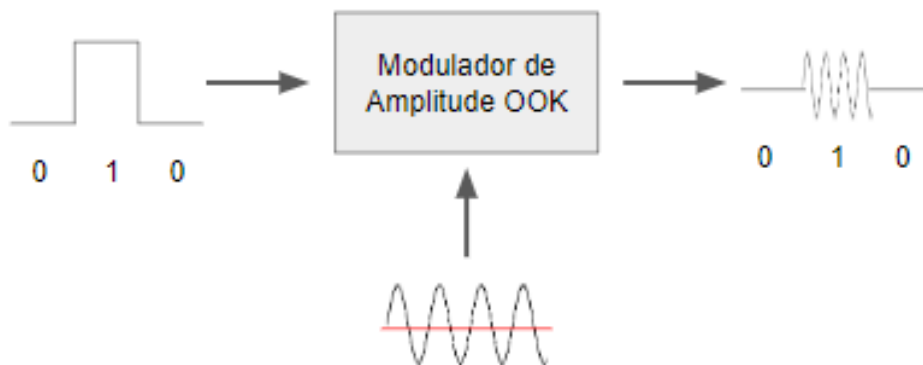
Utilizando novamente a notação de Euler e as relações trigonométricas vistas em 3.25 e 3.26, a Equação 3.30 pode ser reescrita como:

$$E_o(t) = E_{in} \cdot \cos \left[\frac{\Delta\phi_1(t) + \Delta\phi_2(t)}{2} \right] \cdot \left\{ \left[\cos \left(\frac{\Delta\phi_1(t) - \Delta\phi_2(t)}{2} \right) + j \cdot \sin \left(\frac{\Delta\phi_1(t) - \Delta\phi_2(t)}{2} \right) \right] \right\} \quad (3.31)$$

3.4.2 Modulação de Amplitude OOK

Entre os tipos de modulações presentes em sistemas ópticos digitais, a modulação por chaveamento de amplitude, ou *Amplitude Shift Keying* (ASK), é uma das mais utilizadas devido a sua simplicidade de implementação. Além disso, o tipo mais comumente desenvolvido é a modulação *On-Off Keying* (OOK), no qual o sinal binário transmitido é modulado diretamente na portadora realizando supressões e marcações determinadas pelos valores dos bits transmitidos. Ou seja, quando o sinal do dado transmitido assume o valor binário de "1", há uma marcação na portadora, e, de mesmo modo, quando o sinal assume o valor de "0", há uma supressão (CARVALHO, 2009). A modulação OOK é ilustrada na Figura 15.

Figura 15 – Modulação por chaveamento de amplitude OOK.



4 METODOLOGIA E ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO

Aqui se inicia a apresentação do desenvolvimento do projeto de graduação, destacando a metodologia, as etapas e os recursos empregados.

4.1 Metodologia

Este trabalho se propõe a ser um projeto de uma fonte óptica em fotônica integrada simulada, viabilizando a geração de múltiplas portadoras passíveis de modulação e transmissão. Nesse contexto, a metodologia adotada para a concretização da proposta baseou-se principalmente em estudos e simulações de dispositivos integrados convencionais em plataforma de silício, no processo de geração de pentes de frequências ópticas, e nas configurações e diretrizes recomendadas para a transmissão de dados no âmbito das telecomunicações.

4.2 Etapas de Desenvolvimento

O desenvolvimento do projeto seguiu um processo dividido em duas grandes etapas, sendo a primeira subdividida em duas simulações. Na etapa inicial, serão apresentadas as concepções do sistema encarregado da geração de múltiplas portadoras ópticas, utilizando dois métodos simulados para comparação: um método analítico e outro numérico. Na segunda parte, será abordado o sistema responsável pela transmissão de dados, após a geração do pente de frequências ópticas, apresentando uma performance com níveis satisfatórios.

4.2.1 Geração de Múltiplas Portadoras Ópticas

O processo de geração das múltiplas portadoras foi fundamentado nas diretrizes da União Internacional de Telecomunicações (ITU), a agência especializada das Nações Unidas para telecomunicações, tecnologias da informação e comunicação. Assim, utilizou-se a recomendação ITU-T G.694.1, parte da SÉRIE G que abrange sistemas e mídias de transmissão, sistemas e redes digitais, e engloba as características dos sistemas ópticos com grades espectrais para aplicações WDM: faixa de frequência DWDM. O propósito

desta recomendação é estabelecer uma faixa de frequências para suportar aplicações de multiplexação por divisão de comprimento de onda densa (DWDM). A multiplexação DWDM é caracterizada por um espaçamento de canal mais estreito do que o WDM. A faixa de frequências definida por esta recomendação abrange uma variedade de espaçamentos de canais fixos, desde 12,5 GHz até 100 GHz e superiores (múltiplos inteiros de 100 GHz). Assim, para espaçamentos de canal de 12,5 GHz em uma fibra, as frequências de canal permitidas (em THz) são descritas pela Equação 4.2, onde n é um número inteiro positivo ou negativo, incluindo 0 (ITU-T, 2020).

$$f_{portadora} = 193,1 + n \cdot 0,0125 \quad (4.1)$$

No entanto, a fim de sintonizar a frequência em 1550 nm, um valor característico em sistemas de telecomunicações e um comprimento frequentemente utilizado em experimentos de laboratório, a Equação 4.2 será substituída por:

$$f_{portadora} = 193,414 \pm n \cdot 0,0125 \quad (4.2)$$

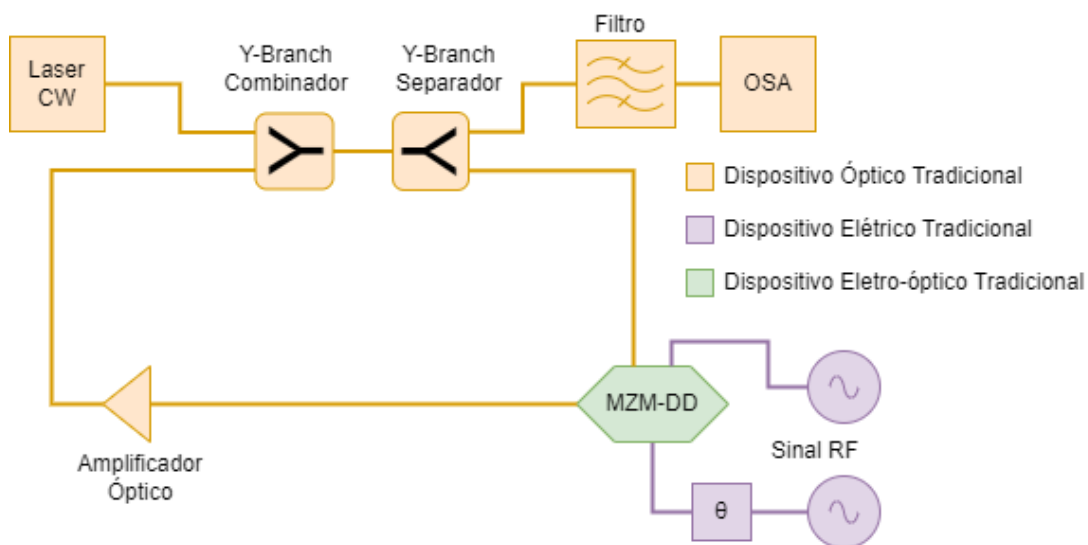
4.2.1.1 Simulação Analítica

A simulação analítica da geração de múltiplas portadoras ópticas tem como propósito desenvolver modelos matemáticos e computacionais que representem de maneira teórica o sistema RFS proposto, visando a obtenção das OFCs, bem como estabelecer uma forma de validar as simulações do sistema por meio de comparações.

Para realizar essa simulação, foi implementado em *Python* um modelo similar ao apresentado na Figura 13, incluindo os dispositivos necessários programados de maneira teórica. Assim tem-se o diagrama da Figura 16 que representa o sistema do modelo analítico.

Neste diagrama, ao contrário do modelo do RFS, são utilizados dois *Y-branch* para separar e combinar os feixes envolvidos no processo, um filtro para limitar a influência do feixe de entrada na saída da recirculação e um modulador MZM-DD que recebe dois sinais RF idênticos em módulo, mas com um defasamento de aproximadamente 90° entre eles. Além disso, as cores usadas representam as classificações dos dispositivos: laranja para dispositivos ópticos, lilás para dispositivos elétricos e verde para dispositivos eletro-ópticos.

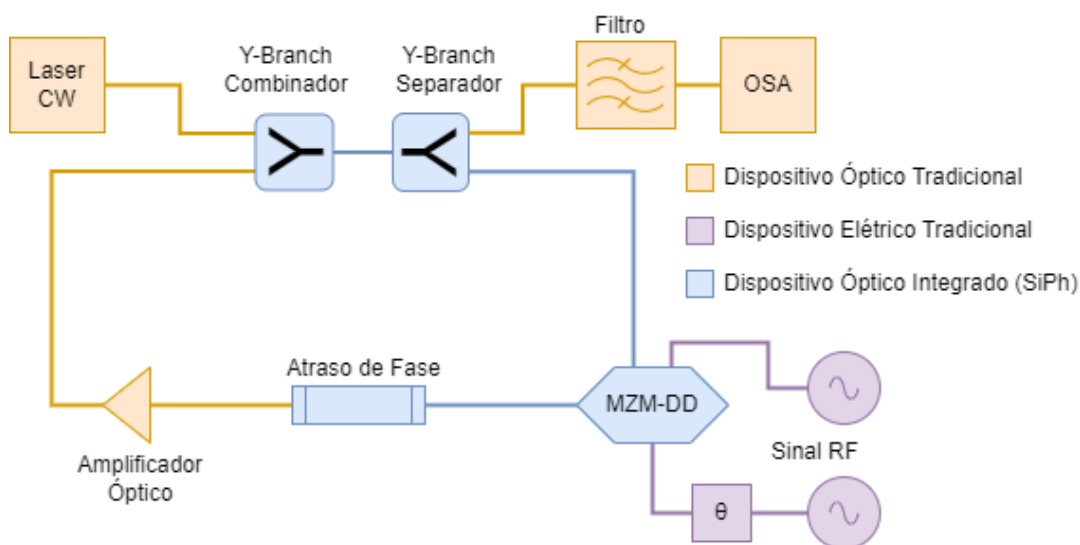
Figura 16 – Diagrama da simulação analítica.



4.2.1.2 Modelagem Numérica

A modelagem numérica da geração de múltiplas portadoras ópticas tem como objetivo desenvolver uma simulação que representa o sistema RFS proposto de maneira mais próxima da prática, visando novamente a obtenção das OFCs, mas de forma mais realista. Para realizar essa modelagem, foi utilizado o software *Ansys Lumerical* (ANSYS, 2023) que contém as ferramentas *INTERCONNECT* e *MODE* que simulam, respectivamente, sistemas ópticos e dispositivos integrados. Assim tem-se o diagrama da Figura 17 que representa o sistema do modelo numérico.

Figura 17 – Diagrama da modelagem numérica.



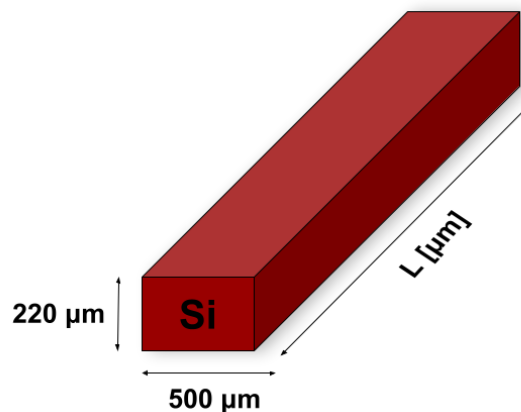
Ao contrário do diagrama da Figura 16, o diagrama numérico, por representar um sistema real, requer uma correção de fase para garantir que não afete a combinação durante o

processo de recirculação. As cores utilizadas para classificar os dispositivos são laranja para dispositivos ópticos, lilás para dispositivos elétricos e azul para dispositivos ópticos integrados em plataforma de silício.

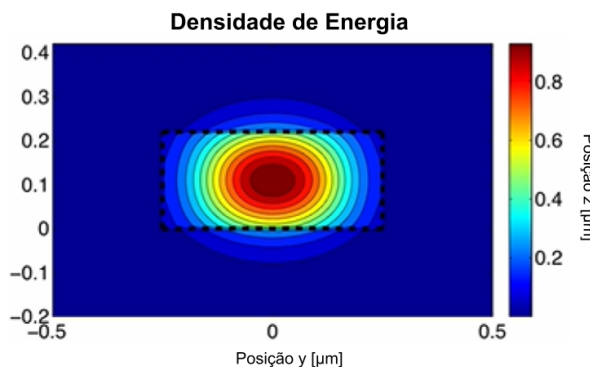
Neste sentido, serão implementados de maneira integrada o acoplador óptico, sendo composto por dois *Y-Branchs* e o modulador de Mach-Zehnder. Para tal implementação, será utilizado a biblioteca de código aberto SiEPIC EBeam PDK (CHROSTOWSKI et al., 2016) para a confecção e simulação dos componentes do circuito. Vale ressaltar que essa biblioteca já é uma plataforma consolidada, ou seja, todos os aspectos construtivos foram previamente definidos, necessitando apenas de pequenos ajustes no comprimento dos guias de onda utilizados. Dessa forma, a Figura 18 ilustra as construções e características desses guias. Na subfigura 18a, são representados os aspectos construtivos do guia de onda, como largura, comprimento e altura. Já nas subfiguras 18b e 18c, são mostrados o comportamento da densidade de energia e a componente do campo elétrico E_y durante a propagação de um feixe de luz nesse guia, respectivamente.

Figura 18 – Aspectos construtivos dos guias de onda integrado da biblioteca SiEPIC EBeam.

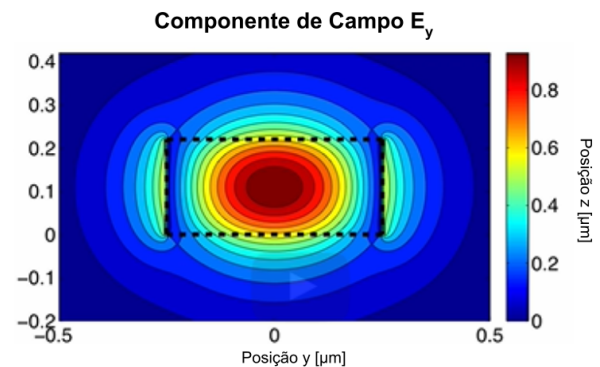
(a) Aspectos geométricos do guia de onda



(b) Densidade de energia no guia de onda



(c) Componente do campo elétrico no guia de onda

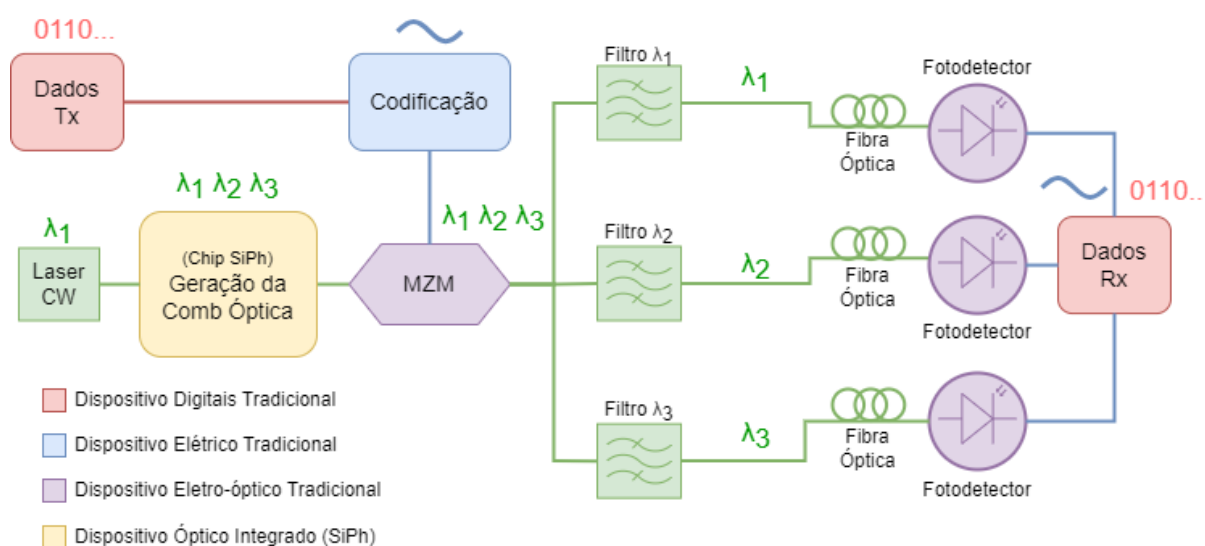


Fonte: Chrostowski et al. (2016). Adaptado pelo autor.

4.2.2 Idealização do Sistema de Transmissão

Por fim, após a implementação da fonte óptica responsável pela geração das múltiplas portadoras, foi desenvolvido um modelo de sistema de transmissão de dados, conforme ilustrado na Figura 19, empregando três das portadoras geradas na etapa da modelagem numérica apresentada anteriormente. Na representação, a cor vermelha é utilizada para indicar os dispositivos digitais, a cor verde para os dispositivos ópticos, a cor azul para os dispositivos elétricos, a cor lilás para os dispositivos eletro-ópticos e, por último, a cor amarela é associada aos dispositivos fotônicos integrados.

Figura 19 – Modelo do sistema de transmissão com multi-portadoras ópticas.



Este sistema será baseado na configuração tradicionalmente utilizado em telecomunicações, composto por um transmissor, um canal e um receptor. Inicialmente, a transmissão se inicia com a geração de dados pelo computador. Esses dados são codificados e modulados em múltiplas portadoras. Três portadoras são separadas por meio de filtros passa-faixa, os quais as separam das demais, preparando-as para serem transmitidas por meio de *links* de fibra óptica. Ao chegar ao destino, três fotodetectores convertem o sinal óptico de volta para o sinal elétrico, viabilizando a recuperação dos dados pelo computador de forma convencional.

Para avaliar o desempenho deste sistema e validar sua utilização, é necessário realizar uma análise das margens de segurança disponíveis. Isso envolve a exploração de possíveis falhas que possam levar à degradação do desempenho do sistema. Esta avaliação é conduzida por meio da análise da Taxa de Erro de Bits (BER) e pelo uso do diagrama de olho. A BER é fundamental, pois representa uma medida de qualidade essencial para uma conexão digital. Ela é expressa como a relação entre o número de bits recebidos com erro e o número

total de bits transmitidos. Quanto ao diagrama, desempenha um papel importante na determinação e análise da qualidade de um sistema digital. Ele fornece uma representação visual do desempenho do sistema e pode oferecer informações valiosas sobre a natureza das imperfeições do canal de transmissão.

4.3 Recursos Disponíveis

Todo o material bibliográfico utilizado é composto, principalmente, por periódicos científicos, artigos, livros e outros documentos de posse do autor. Além disso, outros materiais obtidos são por meio de empréstimo de terceiros, ou ainda estão disponibilizados digitalmente de maneira livre, ou por meio da autenticação com as credenciais de aluno da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES).

Para a implementação e simulação do presente projeto utilizou-se uma máquina, através de acesso remoto disponibilizado pelo Centro de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (CPID), que possui a seguinte configuração: *(i)* sistema operacional Microsoft Windows 10; *(ii)* processador Intel Xeon 3106, 1.70 GHz; *(iii)* memória RAM de 256 GB; *(iv)* unidade de armazenamento de 1TB (disco rígido); *(v)* placa de vídeo Nvidia Quadro RTX 8000. Além disso, nesta mesma máquina virtual encontram-se os softwares necessários para a realização do projeto. Portanto, para a realização da confecção do PIC, utiliza-se o Ansys Lumerical, software que o Laboratório de Telecomunicações (Labetel) e o CPID possuem licença.

5 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo, serão apresentados os resultados provenientes da aplicação das metodologias e das etapas discutidas anteriormente. Serão destacados os resultados obtidos na geração de múltiplas portadoras, incluindo uma comparação entre os dois métodos utilizados, assim como os resultados alcançados na transmissão de dados por meio de três dessas portadoras. Além disso, será realizada uma análise do desempenho dessa transmissão em distintas distâncias de enlace.

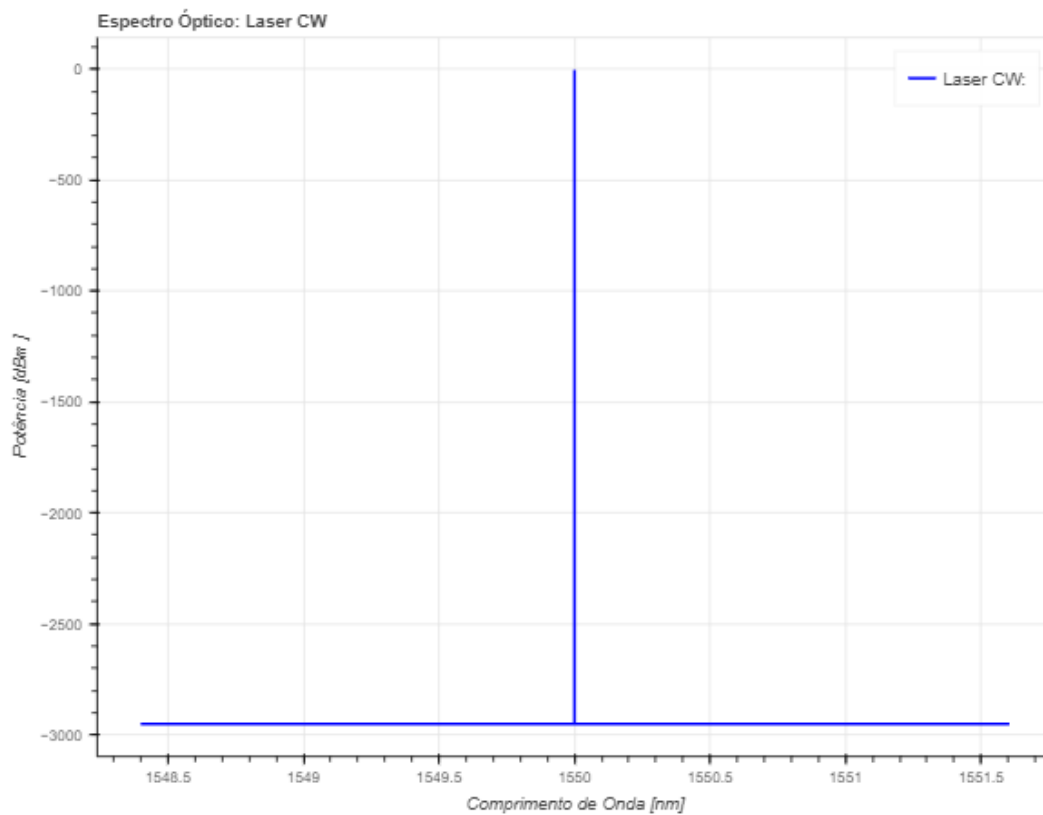
5.1 Geração de Múltiplas Portadoras Ópticas

5.1.1 Simulação Analítica

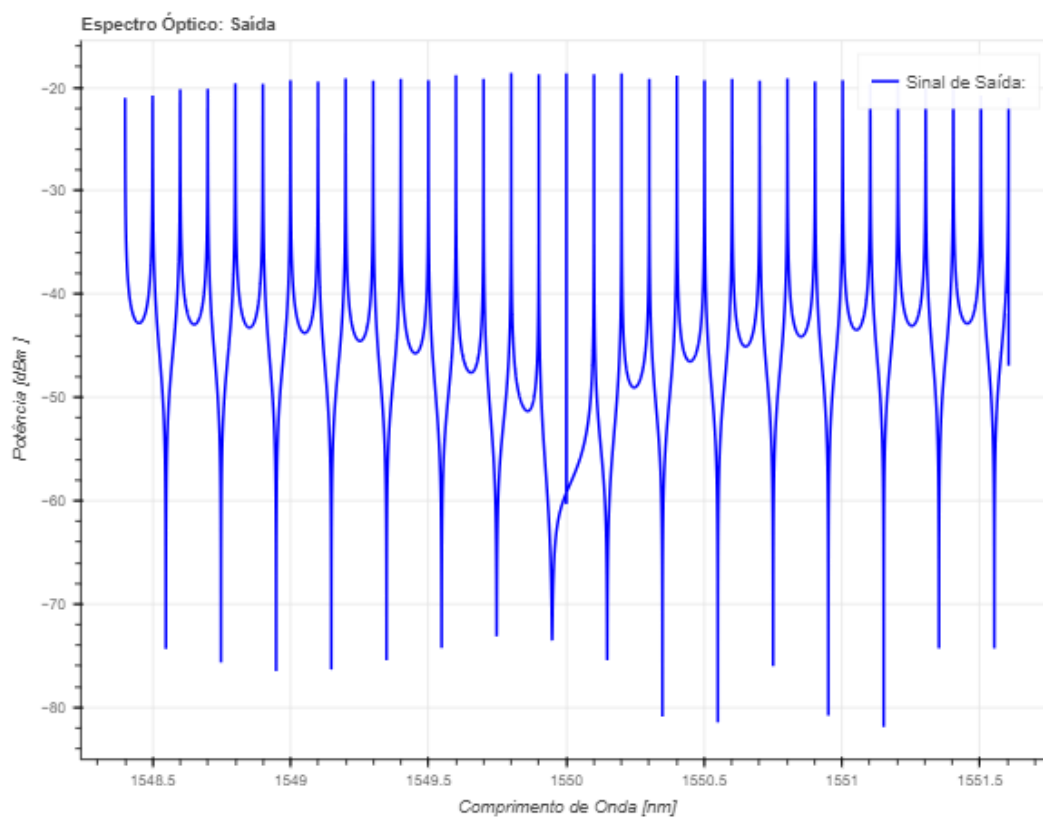
O propósito dessa simulação foi estabelecer modelos matemáticos e computacionais que representassem teoricamente o sistema RFS proposto. Nesse sentido, em Python, foram implementadas as equações que descrevem o modelo teórico dos componentes ópticos discutidos na revisão teórica, como o acoplador formado por dois *Y-Branchs* e o modulador de Mach-Zehnder, por exemplo. Assim, ao direcionar um vetor representando um laser CW centrado em 1550 nm para o sistema mencionado na Figura 16, são geradas algumas dezenas de portadoras na saída após cem iterações, conforme ilustrado na Figura 20. Nessa figura, a subfigura 20a representa o espectro do laser incidente, enquanto a subfigura 20b exhibe as múltiplas portadoras geradas após a passagem pelo sistema.

Figura 20 – Geração das múltiplas portadoras através do método analítico apresentado na Figura 16.

(a) Espectro do laser CW de entrada.



(b) Espectro do sinal de saída após 100 iterações.



Além disso, a fim de compreender melhor a relação entre o processo de formação dessas portadoras com a propagação no sistema RFS, foi gerada figuras nas quais evidenciam a variação do espectro do sinal após realizar diferentes iterações (voltas no loop). Assim, a Figura 21 representa vinte iterações, a Figura 22 representa sessenta iterações e a Figura 23 representa oitenta iterações.

Figura 21 – Variação do espectro do sinal de saída analítico com 20 iterações.

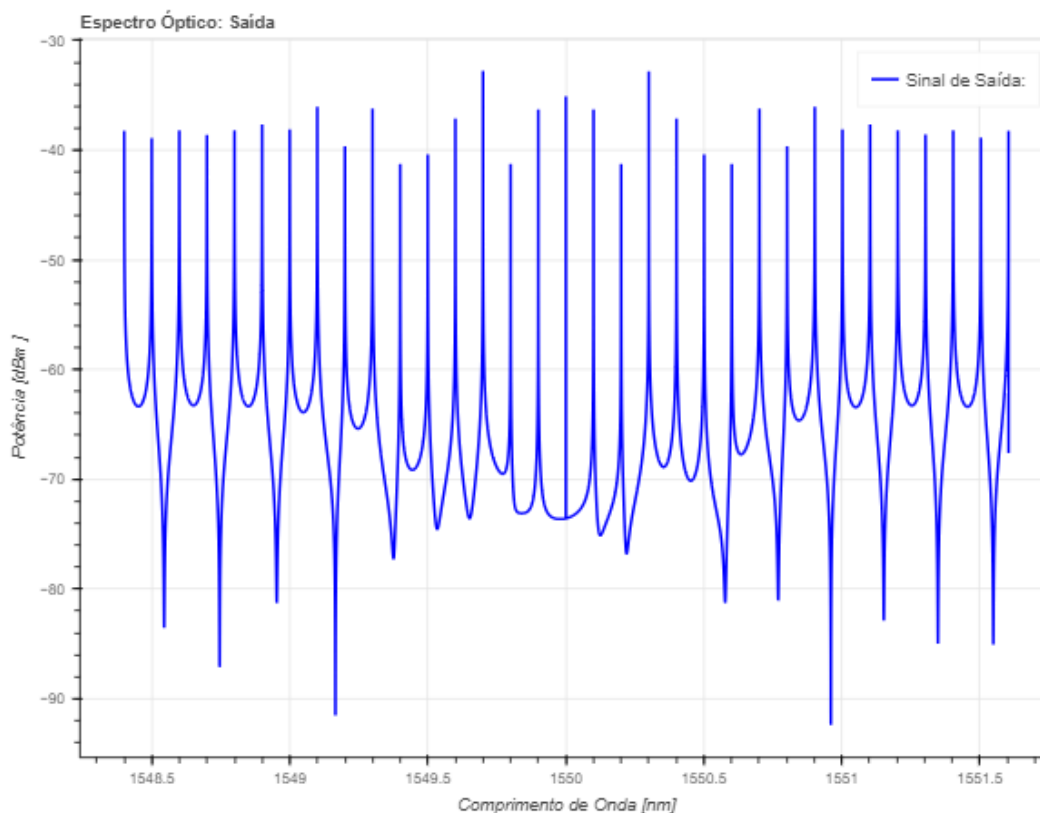


Figura 22 – Variação do espectro do sinal de saída analítico com 60 iterações.

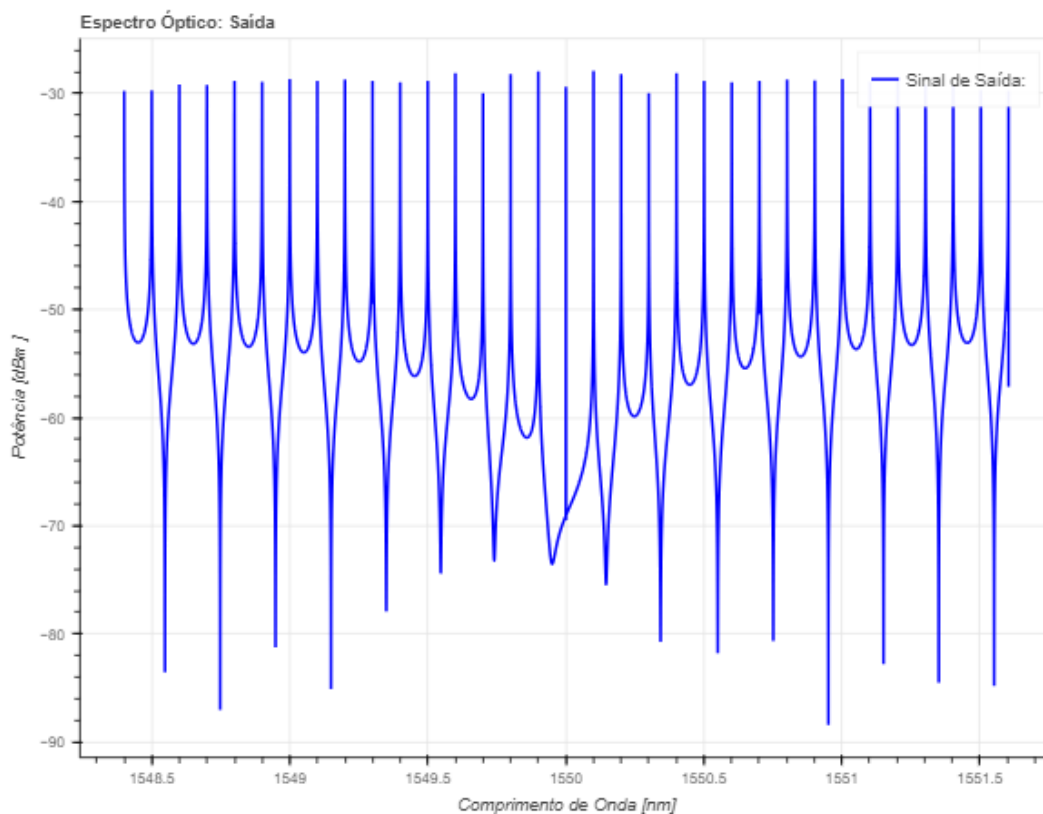
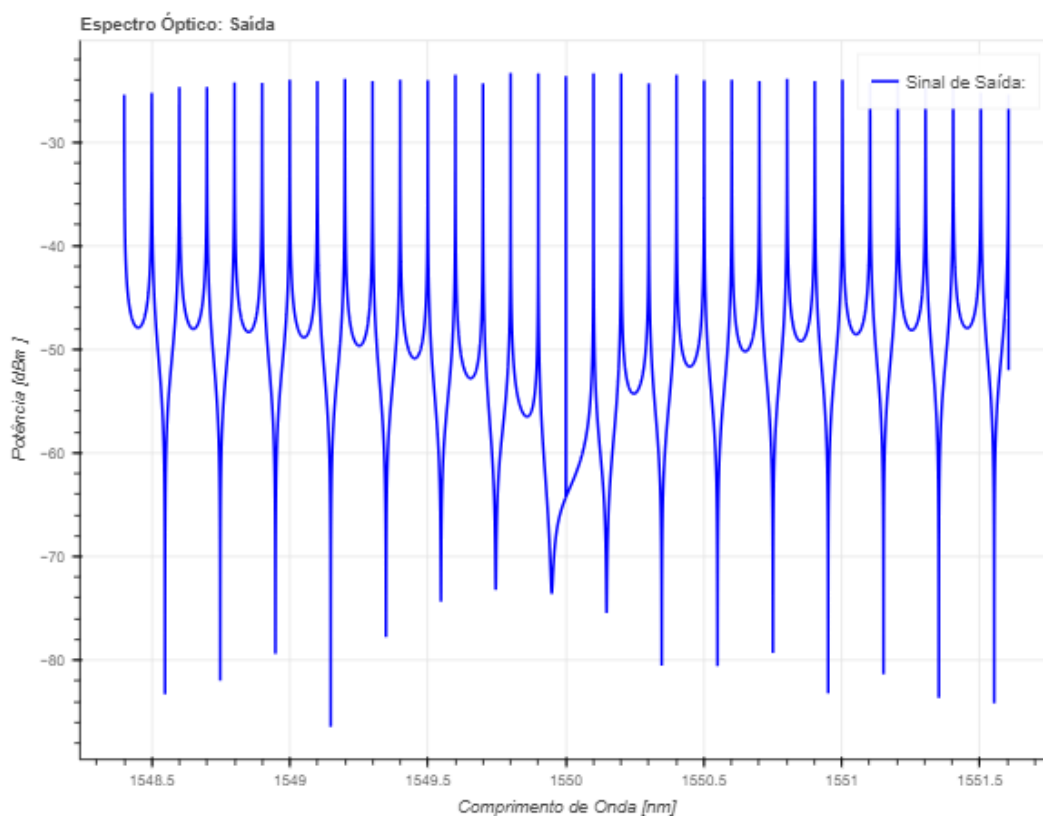


Figura 23 – Variação do espectro do sinal de saída analítico com 80 iterações.



Outro ponto relevante a se observar é o processo de linearização das múltiplas portadoras. Esse fenômeno ocorre devido ao aumento das voltas na recirculação, resultando em cada portadora criada comportando-se de maneira semelhante em potência à portadora central. Assim, as Figuras 24 e 25 ilustram a diferença de linearidade entre as portadoras geradas durante o processo de geração. O objetivo é manter uma diferença de 8 dB de potência entre elas, demonstrando as discrepâncias quando poucas ou muitas iterações são realizadas. Quando há poucas iterações (vinte), aproximadamente nove portadoras atingem essa uniformidade, enquanto com muitas iterações (oitenta), cerca de trinta portadoras mantêm essa linearidade desejada.

Figura 24 – Processo de linearização das portadoras através para 20 iterações no método analítico.

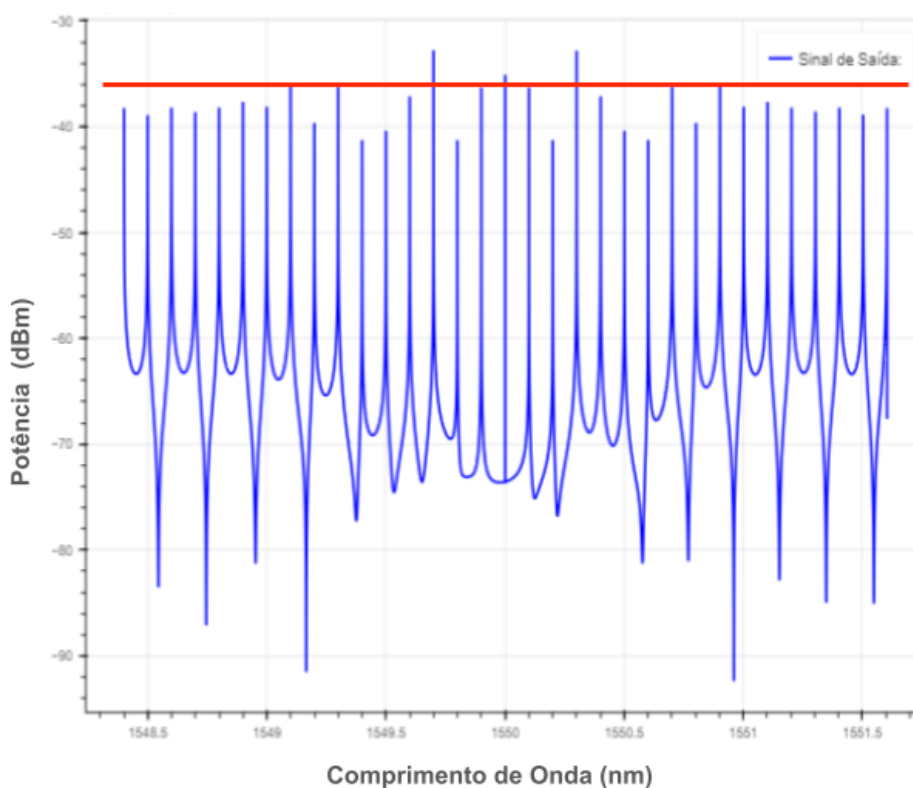
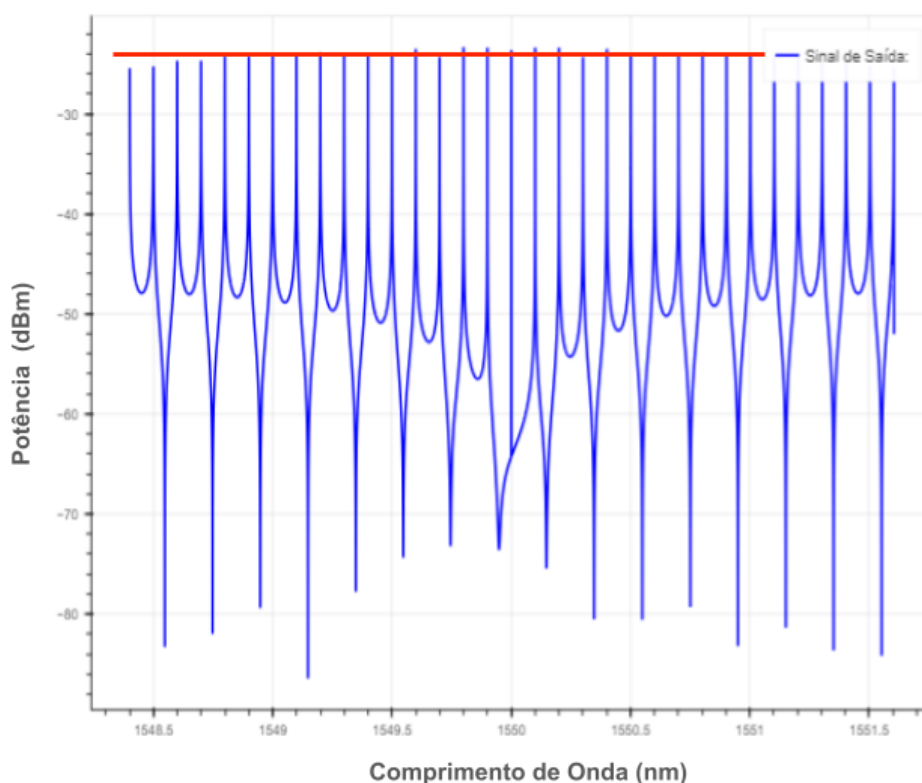


Figura 25 – Processo de linearização das portadoras através para 80 iterações no método analítico.

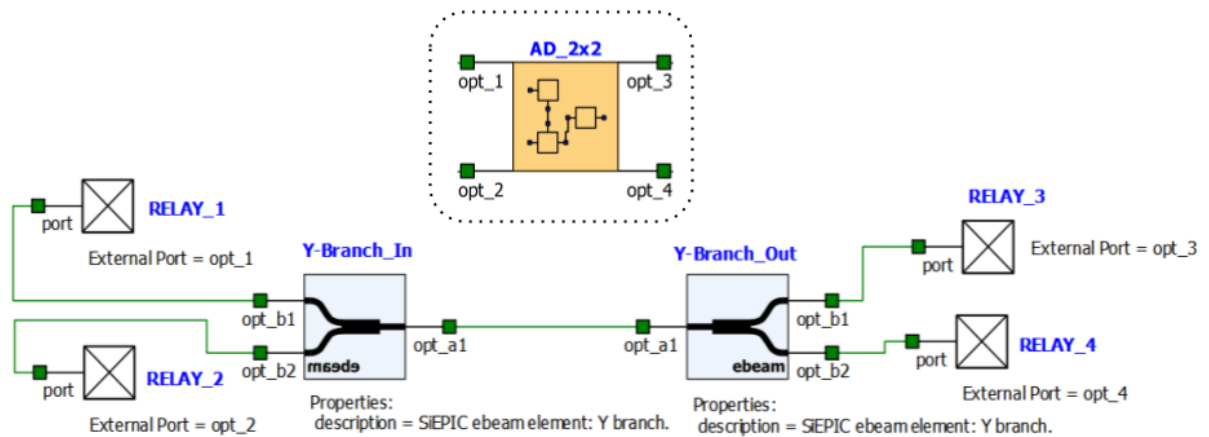


5.1.2 Modelagem Numérica

A modelagem numérica teve como objetivo criar uma simulação que representasse o sistema RFS proposto de maneira mais próxima da prática. Novamente, o propósito era obter as OFCs de forma mais realista por meio do software *Ansys Lumerical*. Para desenvolver o sistema ilustrado na Figura 17, foi fundamental implementar o componente integrado em três partes distintas. A primeira parte consistiu no acoplador 2x2, a segunda parte abrangeu o modulador MZM integrado e, por fim, a integração de todos esses componentes juntamente com um TOPS, responsável por ajustar a fase devido à propagação no sistema, resultando em um único componente integrado representando um chip fotônico integrado na plataforma de silício.

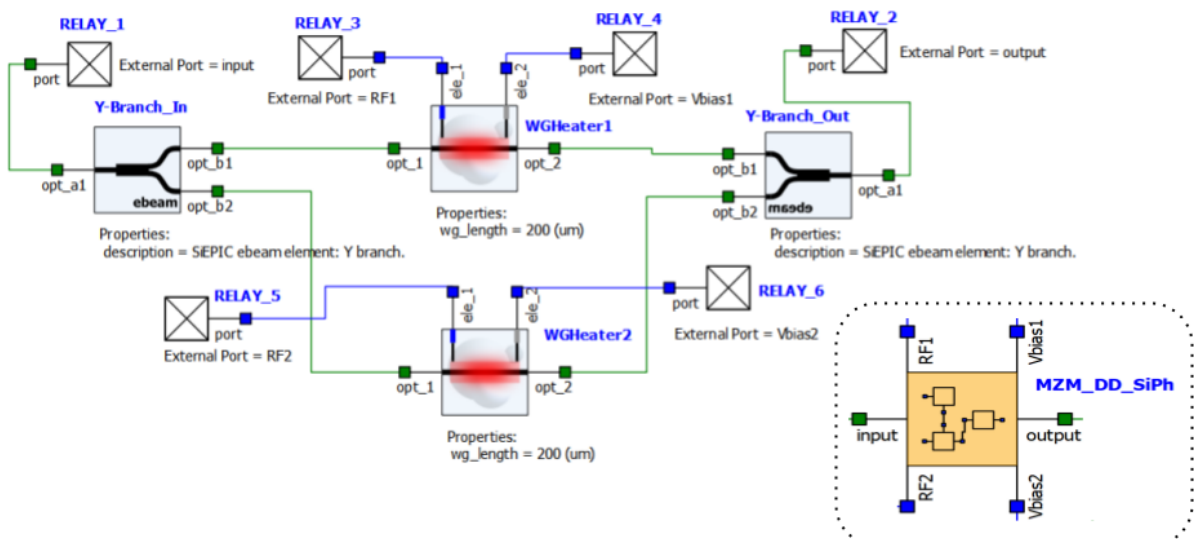
Começando pela modelagem do acoplador 2x2, este foi criado utilizando dois *Y-Branched*. O primeiro Y-Branch desempenha a função de combinar sinais, recebendo um laser em uma entrada que entra no loop, enquanto a outra entrada recebe o feixe proveniente da circulação. O segundo Y-Branch separa os feixes: metade do sinal combinado retorna ao loop, e a outra metade segue para a saída do chip após todas as implementações. Esse acoplador é representado pela Figura 26 e é crucial para as iterações desenvolvidas, pois representa a entrada e a saída do loop necessário para gerar o pente de frequência.

Figura 26 – Modelagem do acoplador 2x2 com dois *Y-Branches* integrado em silício para a simulação.



A etapa seguinte, que envolve a modelagem do MZM integrado, consistiu na implementação de um MZI conforme detalhado no Capítulo 3.2.3. Para isso, foram novamente empregados dois *Y-Branches* para separar e combinar dois feixes de maneira igual. No entanto, como o objetivo era criar um modulador de fase, foi necessário introduzir uma defasagem entre os braços do interferômetro. Para isso, em vez de utilizar guias de onda convencionais, optou-se por empregar dois guias de onda acoplados com TOPS, sendo ajustáveis por meio de tensões de polarização e sinais RF, os quais são responsáveis por definir o espaçamento entre as portadoras. O MZM implementado é ilustrado na Figura 27.

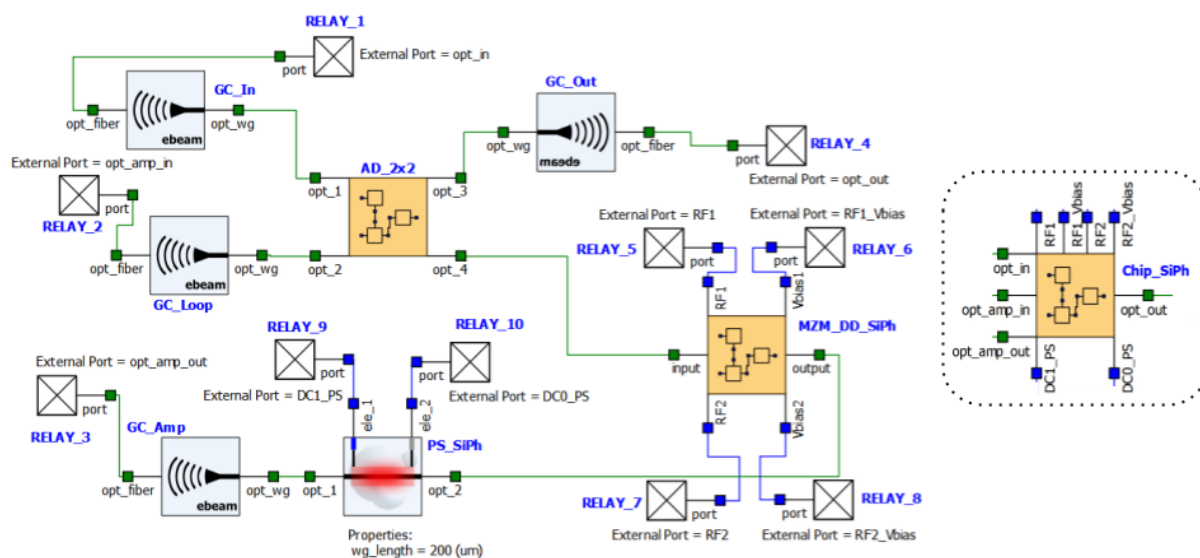
Figura 27 – Modelagem do MZM integrado em silício para a simulação.



Por fim, foi desenvolvido de maneira simulada um chip no qual integra todos os componentes apresentados no diagrama da Figura 17 em uma única peça. Neste dispositivo, também foi realizado o processo de acoplamento entre os dispositivos que usam fibra óptica convencional e os dispositivos integrados. Para isso, foram adicionados os *grating couplers*

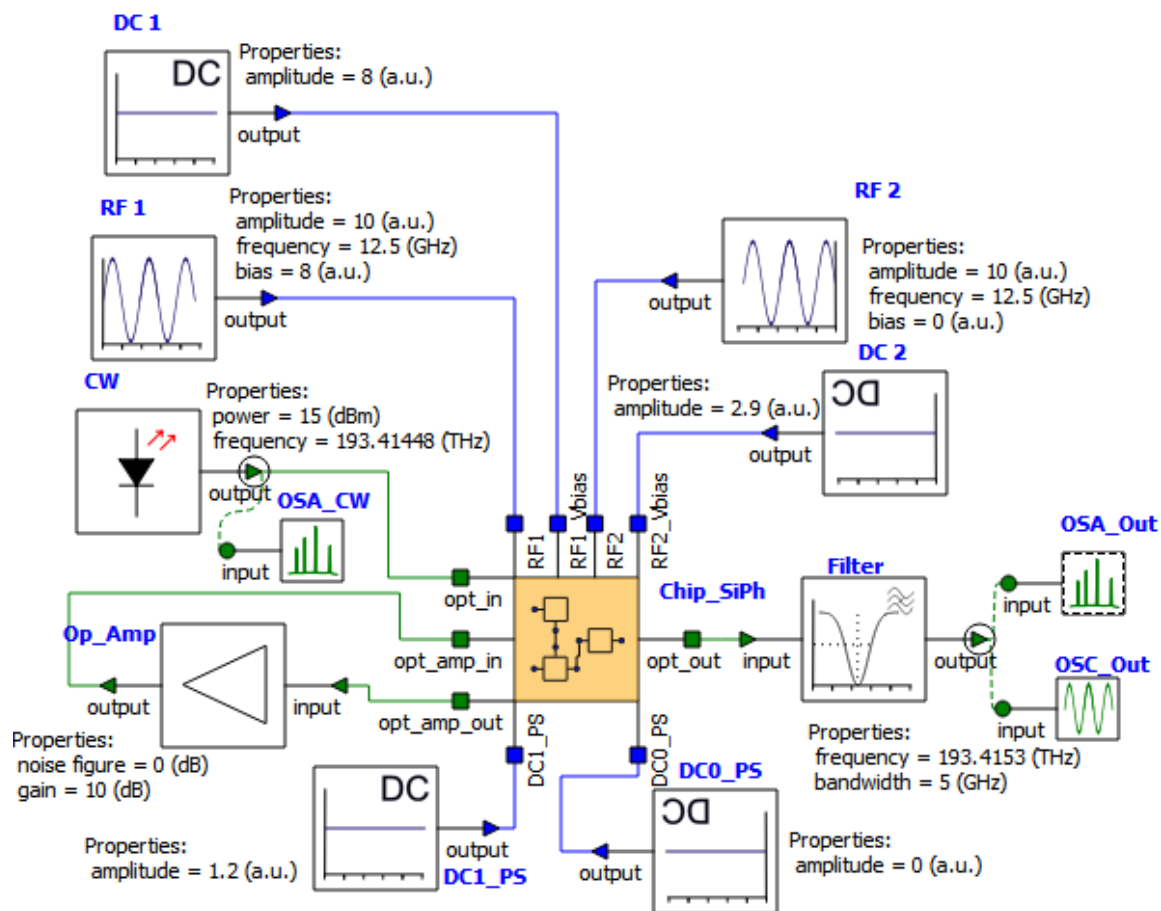
(GC), que são estruturas capazes de difratar feixes da fibra para os guias em micrômetros (CHROSTOWSKI et al., 2016). Adicionalmente, foi incluído mais um TOPS para efetuar pequenas correções de fase que normalmente ocorrem durante a propagação do feixe pelo loop. A Figura 28 ilustra o chip resultante.

Figura 28 – Modelagem do chip integrado em silício que realiza a geração de multi-portadoras para a simulação.



Após concluir todas as etapas de implementação, o restante do diagrama foi desenvolvido. Isso envolveu a inclusão de um laser CW, fontes de tensão, sinais RF, um amplificador para compensar perdas e, por último, um filtro para restringir o sinal da portadora de 1550 nm originado do laser inicial. Como resultado, temos a Figura 29, que representa a simulação do diagrama responsável pela geração do pente de frequência.

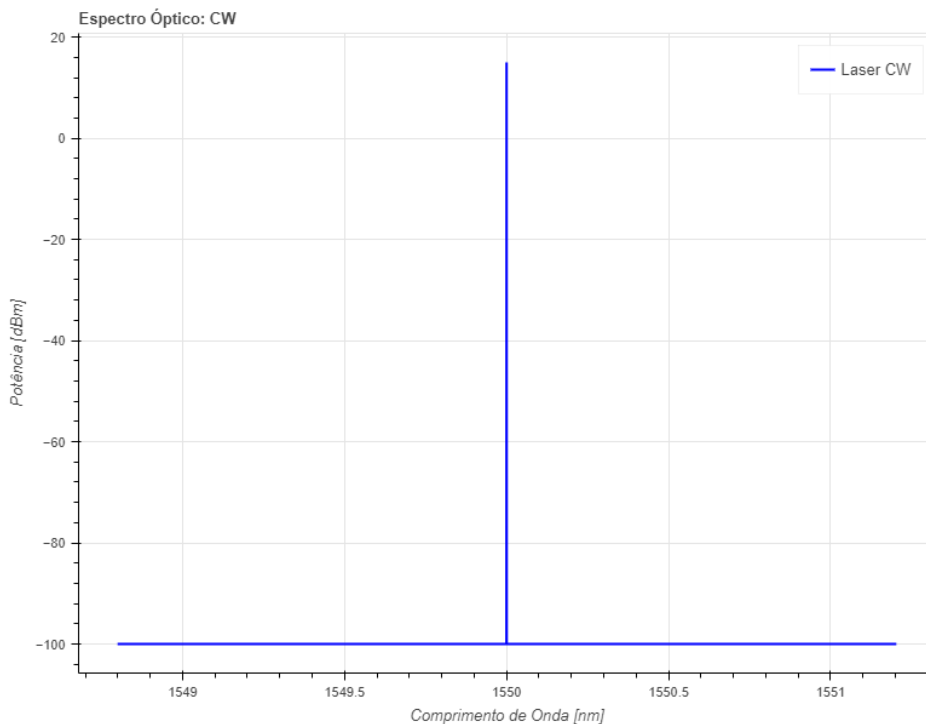
Figura 29 – Modelagem da simulação da Figura 17 de forma integrada em silício.



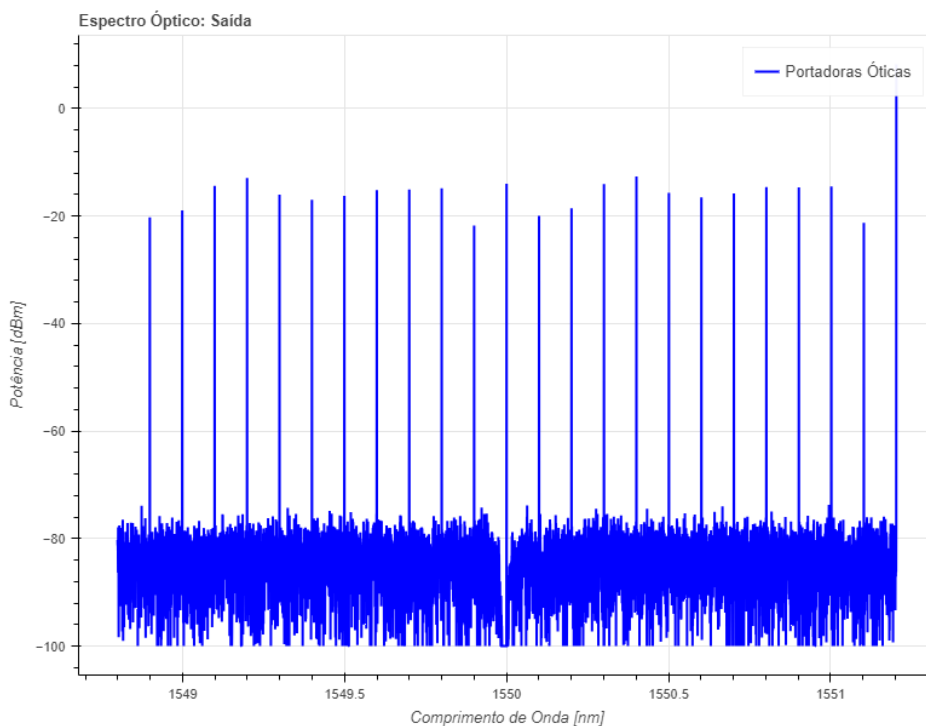
Ao executar a simulação representada na Figura 16, são produzidas várias dezenas de portadoras na saída após cem iterações, como demonstrado na Figura 30. Novamente, a subfigura 30a apresenta o espectro do laser incidente, enquanto a subfigura 30b mostra as múltiplas portadoras geradas após atravessarem o sistema.

Figura 30 – Geração das multi-portadoras através do método numérico apresentado na Figura 17.

(a) Espectro do laser CW de entrada.



(b) Espectro do sinal de saída após 100 iterações.



Similarmente à simulação analítica, para uma compreensão mais aprofundada da relação entre a formação das portadoras e a propagação no sistema RFS da simulação, foram geradas figuras nas quais são destacadas a variação do espectro do sinal após diferentes iterações. Assim, a Figura 31 representa vinte iterações, a Figura 32 representa sessenta

iterações e a Figura 33 representa oitenta iterações.

Figura 31 – Variação do espectro do sinal de saída simulado com 20 iterações.

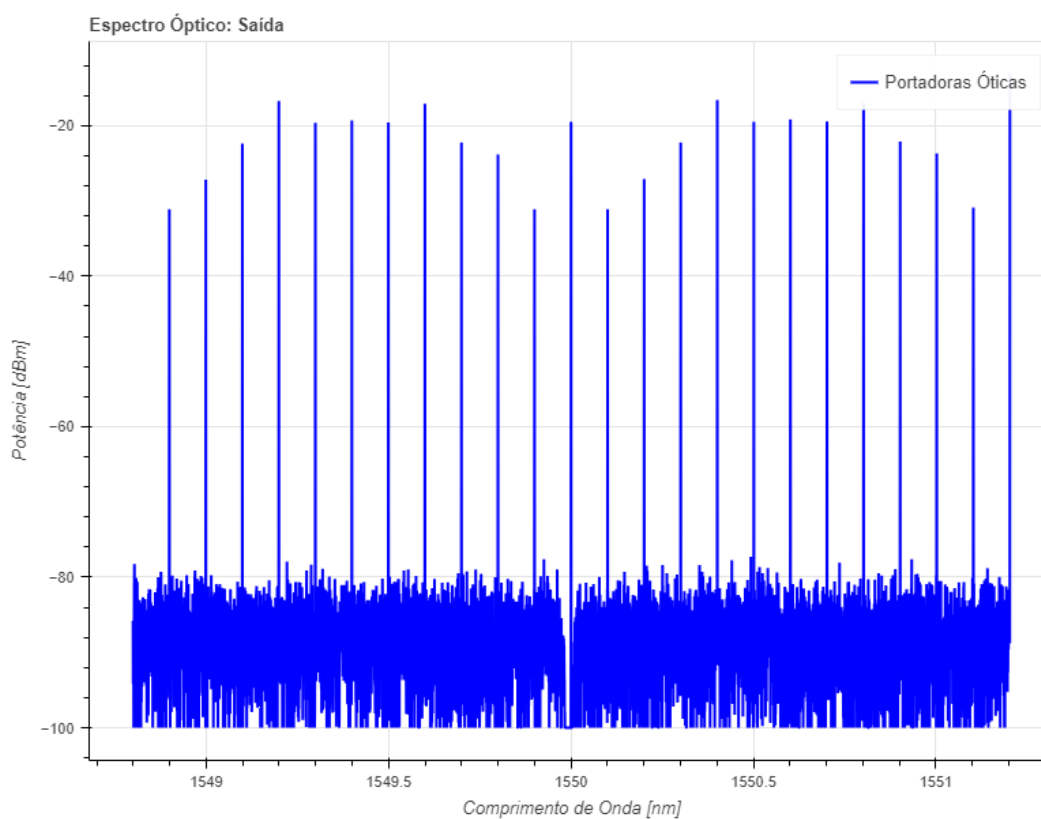


Figura 32 – Variação do espectro do sinal de saída simulado com 60 iterações.

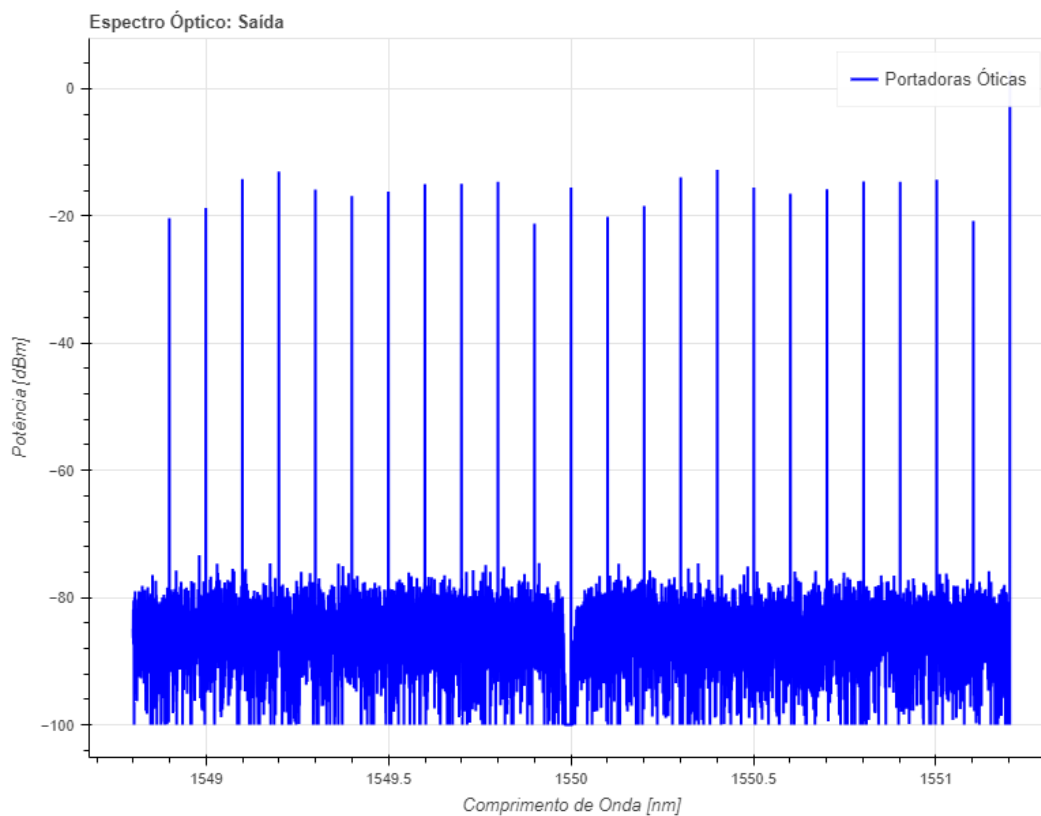
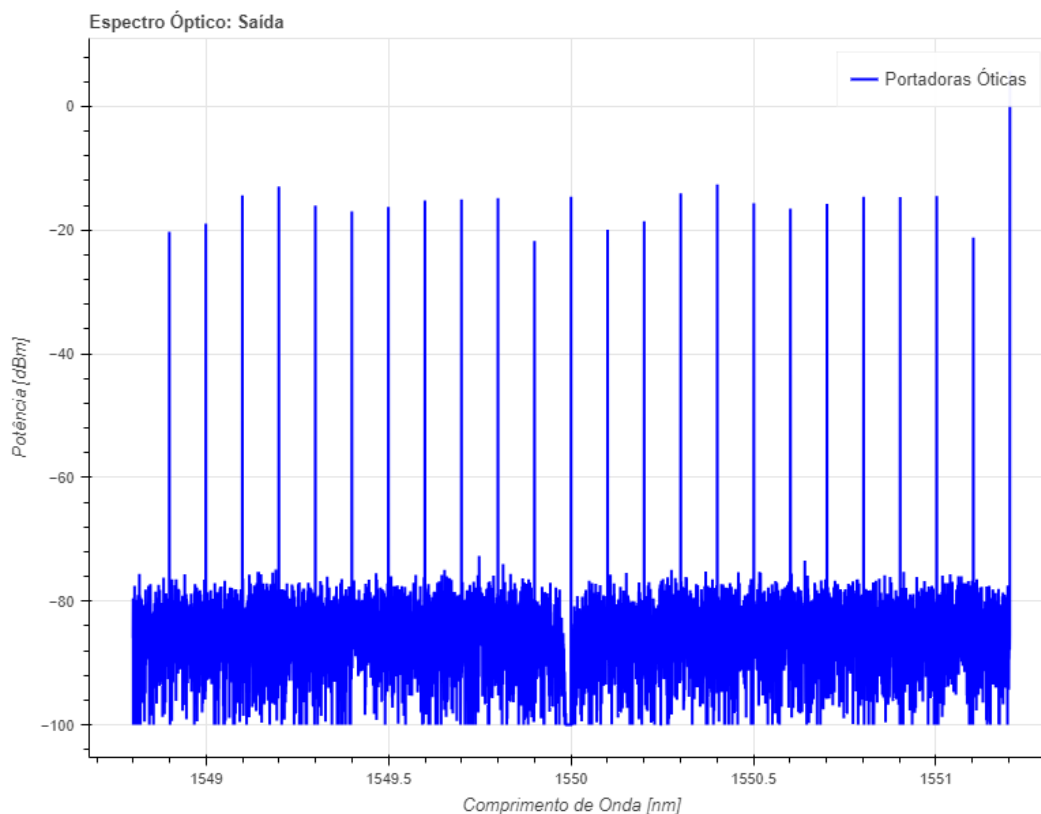


Figura 33 – Variação do espectro do sinal de saída simulado com 80 iterações.



O efeito de linearização das múltiplas portadoras também é perceptível nesta modelagem. Nas Figuras 34 e 35, percebe-se a diferença na linearidade entre as portadoras geradas durante o processo, considerando as diferença de 8 dB de potência entre elas. Quando são realizadas poucas iterações (vinte), aproximadamente seis portadoras mantêm essa uniformidade, enquanto com muitas iterações (oitenta), cerca de vinte e seis portadoras mantêm a linearidade desejada.

Figura 34 – Processo de linearização das portadoras através para 20 iterações no método numérico.

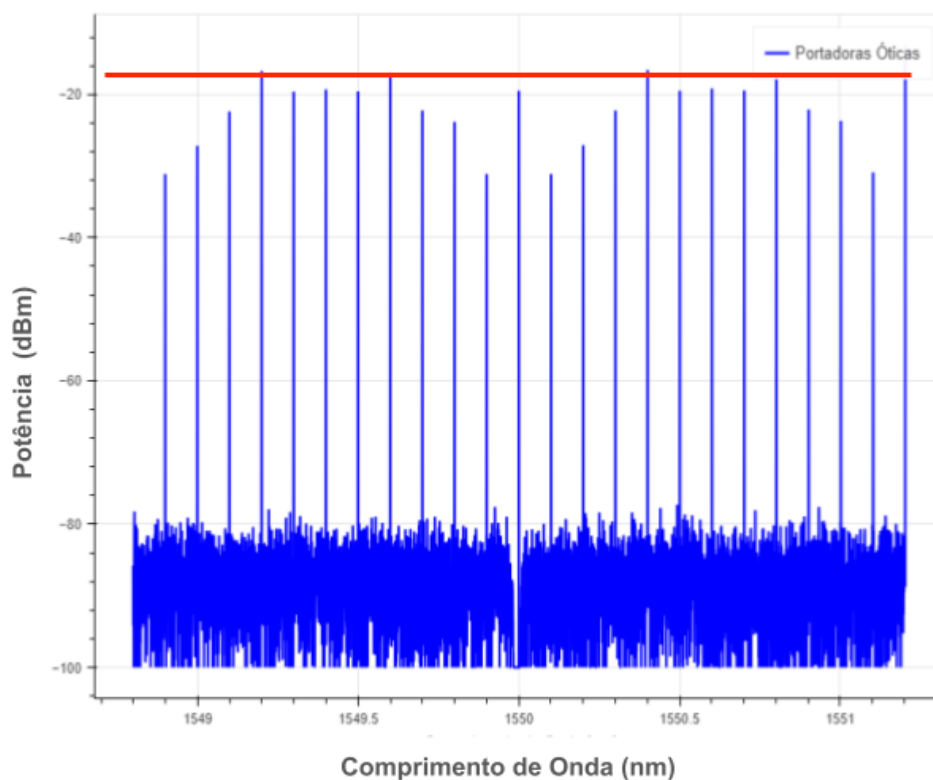
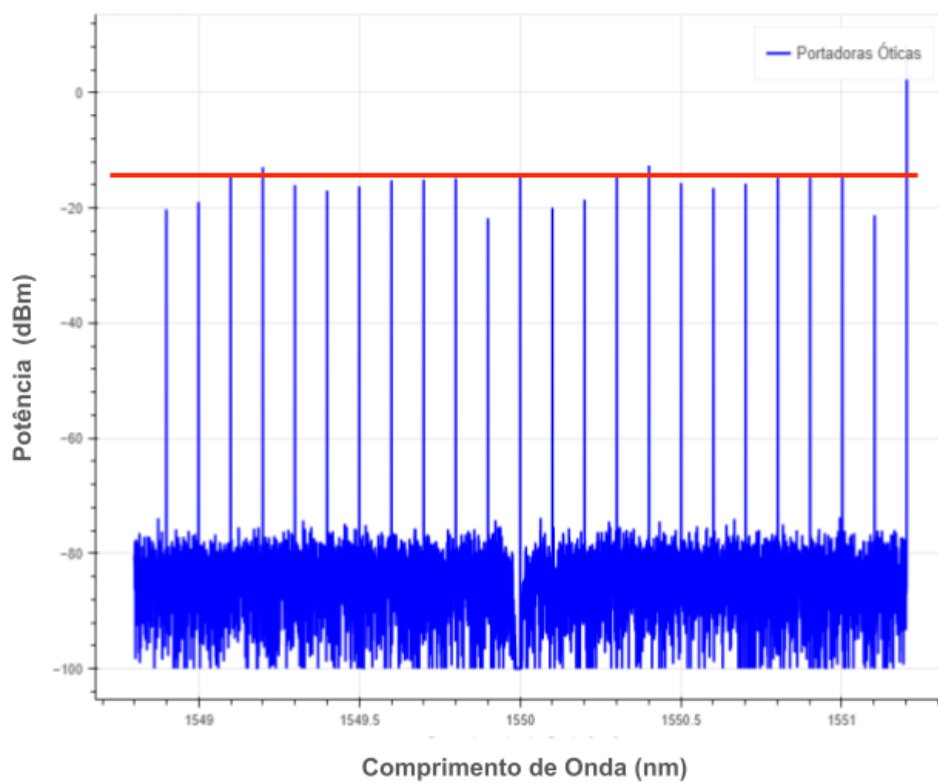


Figura 35 – Processo de linearização das portadoras através para 80 iterações no método numérico.



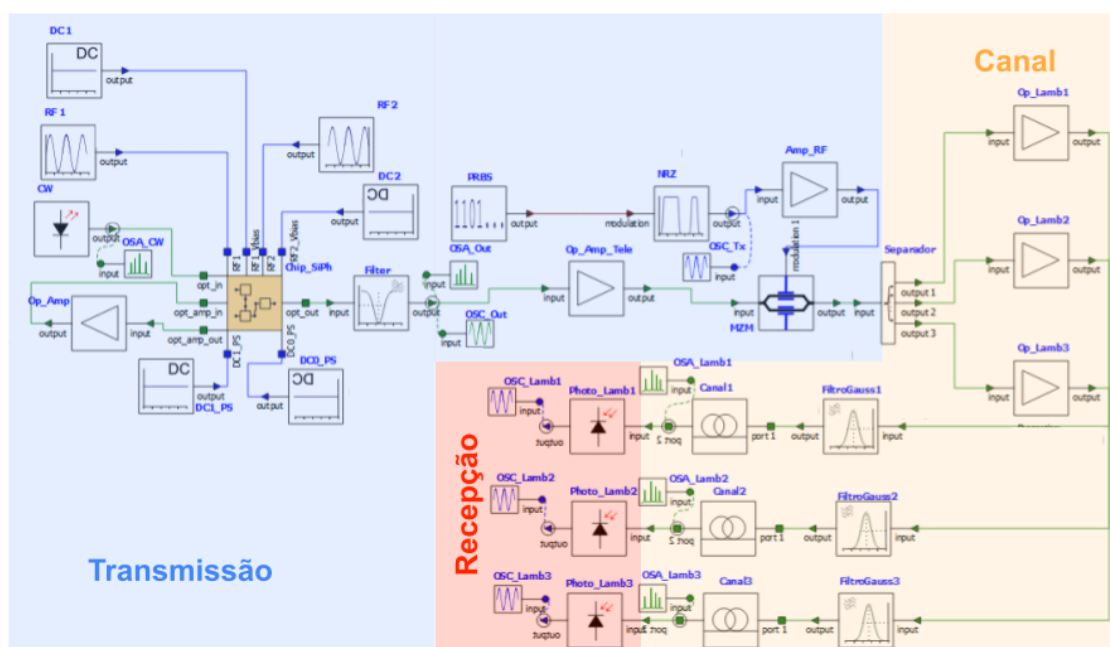
Portanto, ao comparar os resultados apresentados nas Figuras 20 e 30, observa-se uma semelhança significativa entre o comportamento do processo numérico e o teórico. No

entanto, devido à modelagem mais prática dos componentes provenientes da biblioteca, algumas limitações surgiram na simulação, como a restrição ao valor mínimo de -100 dBm do sinal, para garantir que há um limite para o cálculo, e a presença de ruídos durante o processo de circulação. Além disso, é importante considerar que, na teoria, os sinais são complexos e, ao implementá-los, a manipulação de dados inevitavelmente influencia alguns resultados nas visualizações gráficas.

5.2 Transmissão de Dados

Para simular a transmissão de dados usando três das várias portadoras geradas pela fonte óptica, foi desenvolvido o sistema mostrado na Figura 36. Esse sistema foi construído com base no modelo genérico de um transmissor óptico da Figura 14 e no diagrama representado pela Figura 19. No processo de geração das portadoras, foi utilizado o modelo simulado descrito na Figura 29. Na representação visual utilizada, a cor azul foi associada à parte responsável pelo transmissor, a cor amarela foi atribuída ao canal e a cor vermelha foi relacionada ao receptor.

Figura 36 – Simulação no *Ansys Lumerical* do sistema de transmissão de dados da Figura 19.



Nesta simulação, foi executado o processo de transmissão de dados utilizando dados pseudo-aleatórios, codificados e modulados em múltiplas portadoras geradas conforme a simulação da Figura 29. Após a modulação, o sinal foi amplificado e dividido em três canais distintos, cada um correspondendo a uma portadora específica que foi filtrada das

demais. No final do processo, a recepção foi realizada por meio de três fotodetectores distintos, e os dados foram tratados utilizando o *Python*.

Além disso, foram estabelecidos alguns parâmetros essenciais para este tipo de procedimento, como a taxa de bits, o valor de Nyquist e o número de amostras, entre outros. Essas variáveis e suas especificações foram detalhadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros de entrada da simulação.

Parâmetros	Valores
Bitrate [Gbits/s]	12,5
Nyquist [u.a.]	8
N° Símbolos [u.a.]	256
N° iterações [u.a.]	100

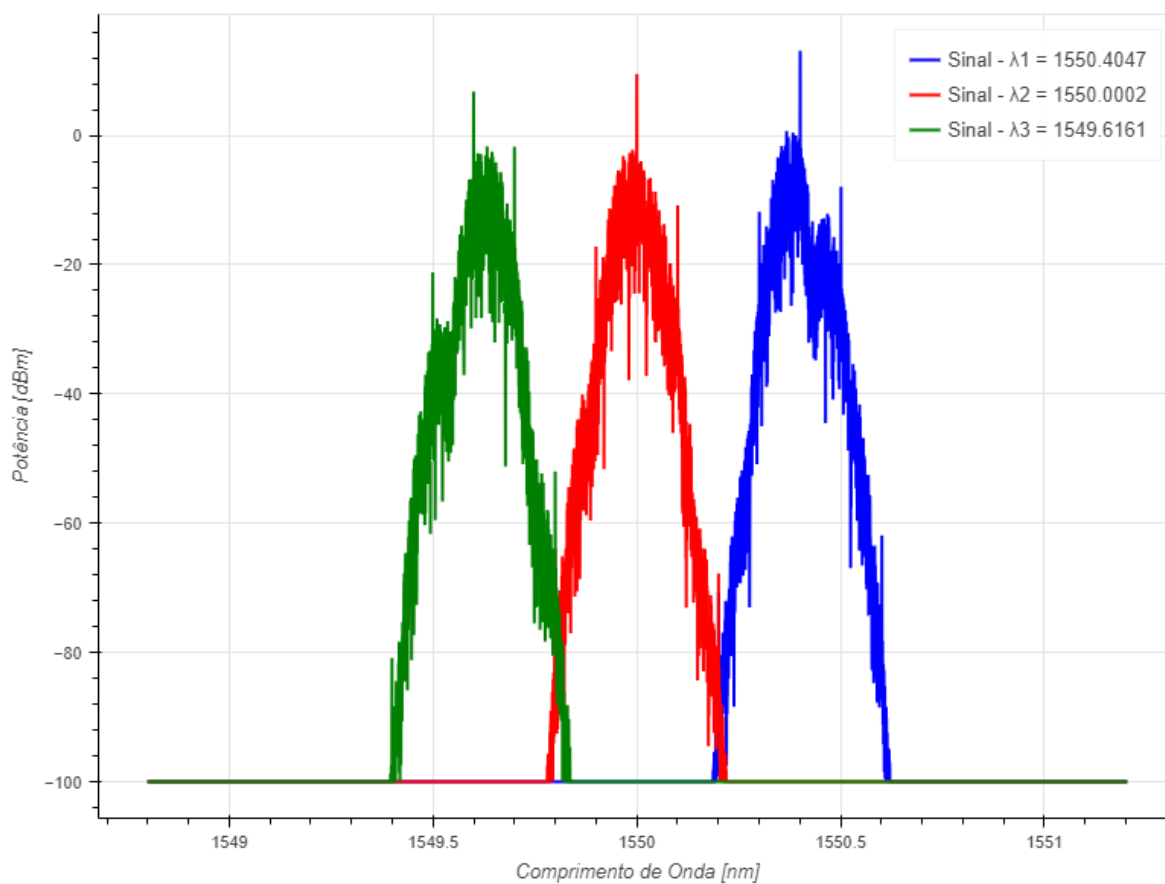
Após o processo de geração das múltiplas portadoras pelo método RFS e a modulação dos dados codificados, foram selecionadas três portadoras para serem filtradas, visando à análise de desempenho na transmissão de dados. A Tabela 2 apresenta o comprimento de onda e a frequência das portadoras escolhidas, enquanto a Figura 37 mostrará o espectro de frequência delas. Na representação visual, a cor vermelha é atribuída à portadora central, a cor azul é associada à portadora com um espaçamento inferior de aproximadamente 50 GHz ($-4 \cdot 12,5$ GHz), e a cor verde é relacionada à portadora com um espaçamento superior de aproximadamente 50 GHz ($+4 \cdot 12,5$ GHz).

Tabela 2 – Escolha das portadoras para análise de desempenho na transmissão de dados.

Comprimento de Onda (nm)	Frequência (THz)
1550,4047	193,364
1550,0002	193,414
1549,6161	193,462

A avaliação do desempenho dessa transmissão foi conduzida por meio da análise da BER e utilizando o diagrama de olho. No entanto, um dos fatores mais relevantes para ambas as medidas é a correlação do sinal e a distância pela qual esse sinal será transmitido. Portanto, a performance das portadoras foi avaliada considerando diferentes tamanhos de enlace, incluindo back-to-back (B2B), que representa a transmissão sem a presença do canal, bem como distâncias de 10 km, 25 km, 50 km e 100 km.

Figura 37 – Espectro dos sinais filtrados resultante da simulação da Figura 36.



Iniciando pela portadora de 1550,4047 nm, temos os resultados sem a presença do canal (B2B), na qual a Figura 38 apresenta a correlação do sinal transmitido representado pela cor azul com o que foi recebido representado pela cor vermelha, enquanto a Figura 39 mostra o diagrama de olho dessa recepção.

Figura 38 – Performance da transmissão com portadora em 1550,4047 nm através da correlação.

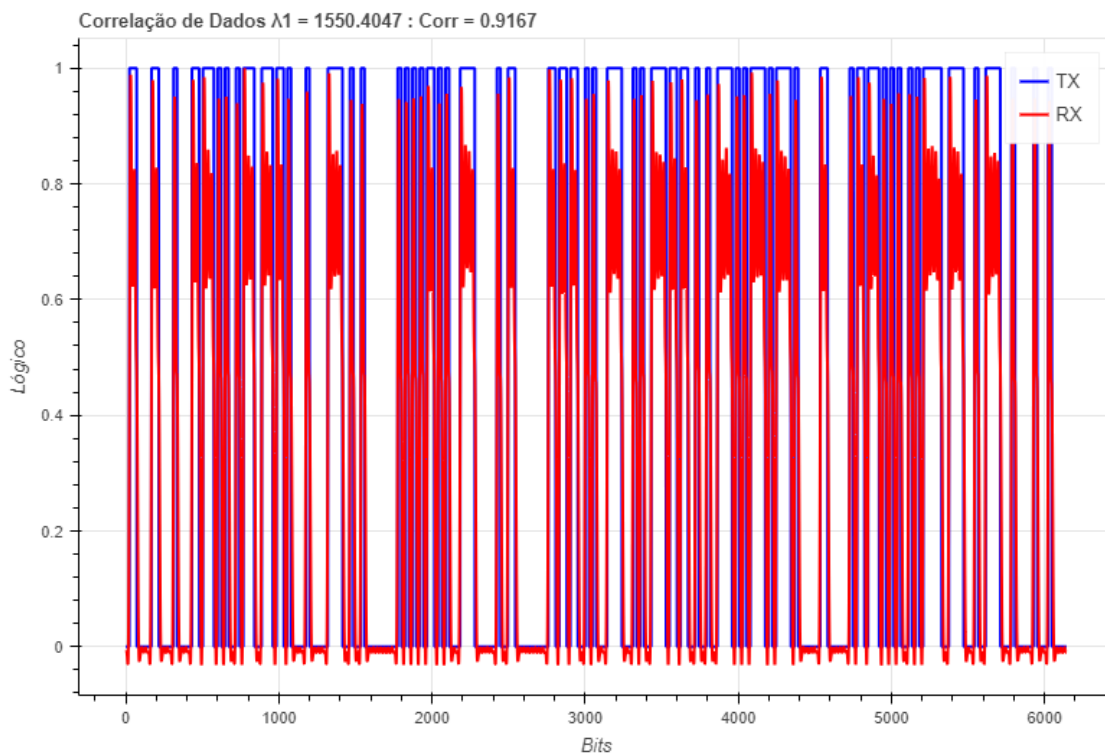
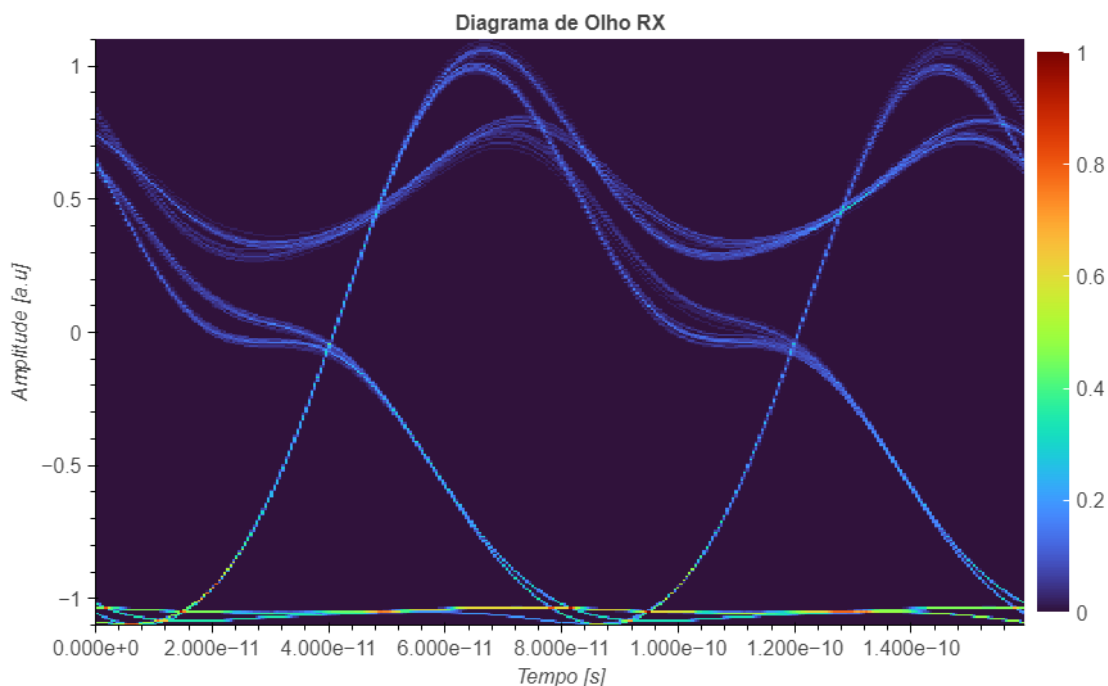


Figura 39 – Performance da transmissão com portadora em 1550,4047 nm através do diagrama de olho.

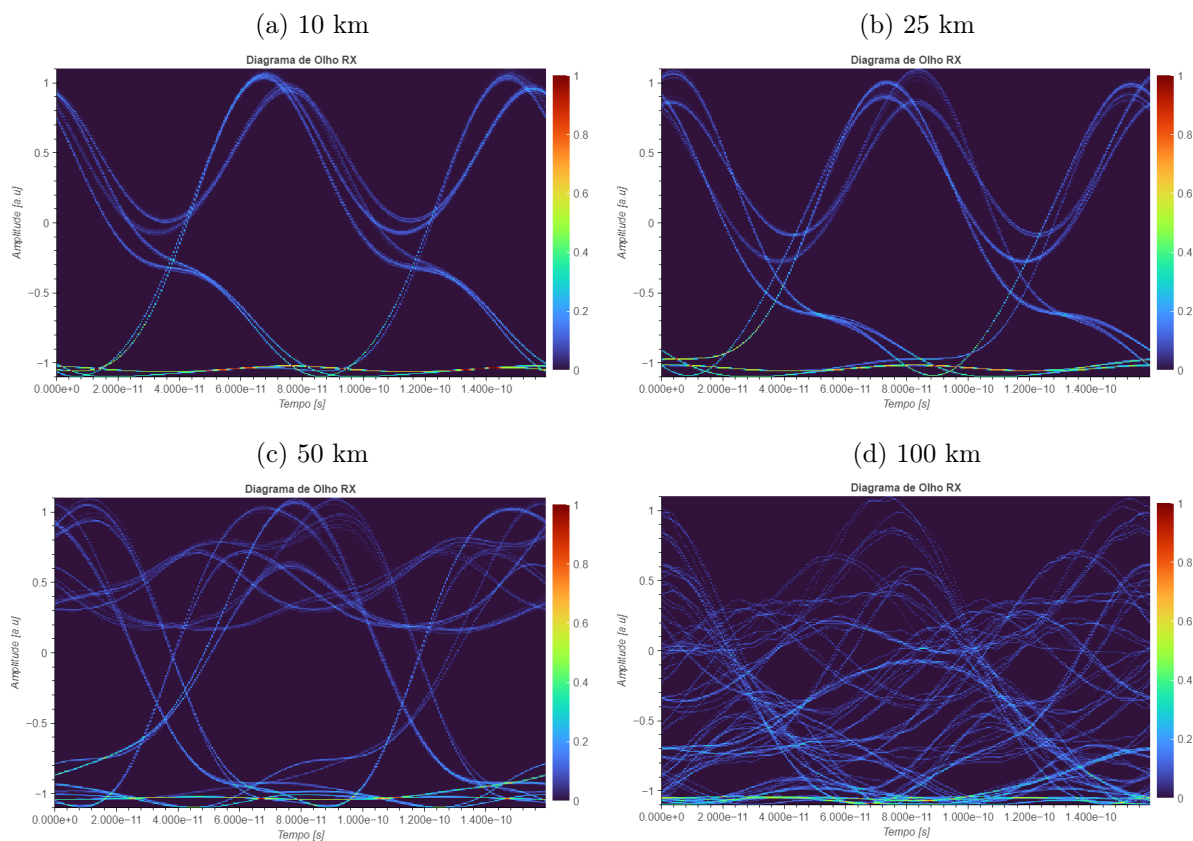


Expandindo essas análises para diferentes distâncias e avaliando a BER dessas transmissões, é apresentado na Tabela 3 os resultados obtidos. Além disso, na Figura 40, é possível visualizar a influência da distância no diagrama de olho.

Tabela 3 – Performance da transmissão com portadora em 1550,4047 nm para diferentes distâncias.

Comprimento de Onda (nm)	Distância (Km)	Correlação	BER
1550,4047	0 (B2B)	0,9167	0,0000
	10	0,8966	0,0000
	25	0,8919	0,0000
	50	0,9281	0,0000
	100	0,8213	0,0001

Figura 40 – Diagrama de olho da transmissão com portadora em 1550,4047 nm para diferentes distâncias.



Para a portadora centrada em 1550,0002 nm, são realizadas as análises anteriores novamente. Isto é, uma transmissão B2B, onde a Figura 41 exibe a correlação entre o sinal transmitido em azul e o recebido em vermelho, enquanto a Figura 42 mostra o diagrama de olho desta recepção.

Figura 41 – Performance da transmissão com portadora em 1550,0002 nm através da correlação.

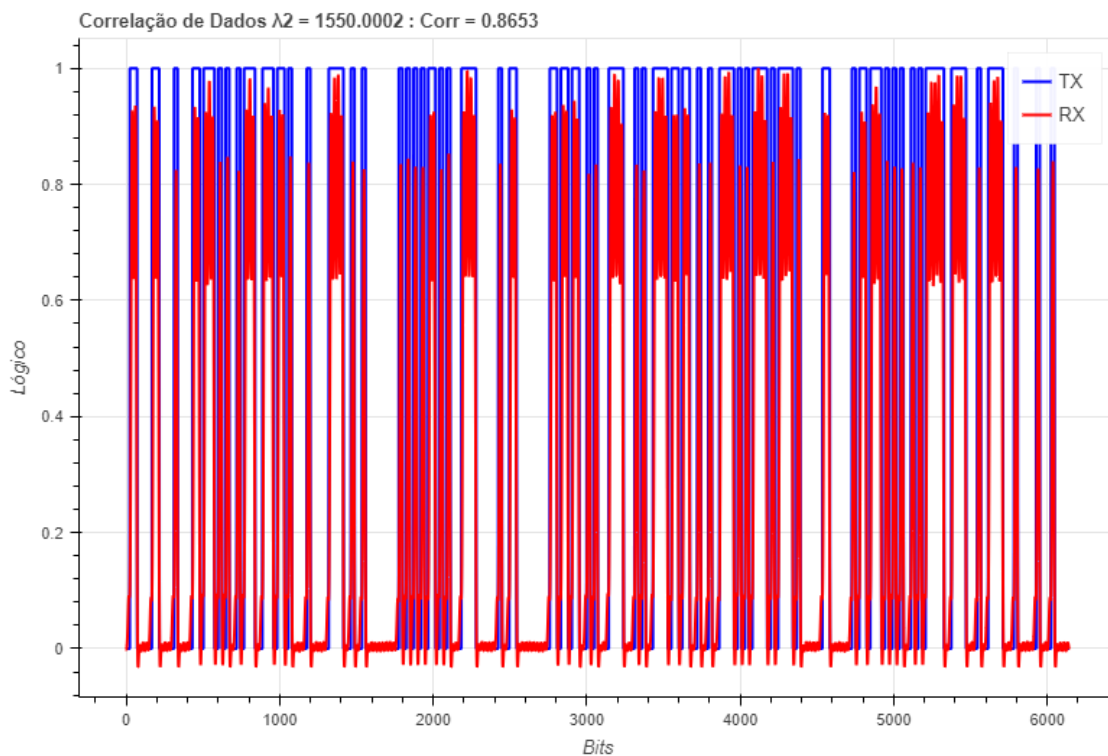
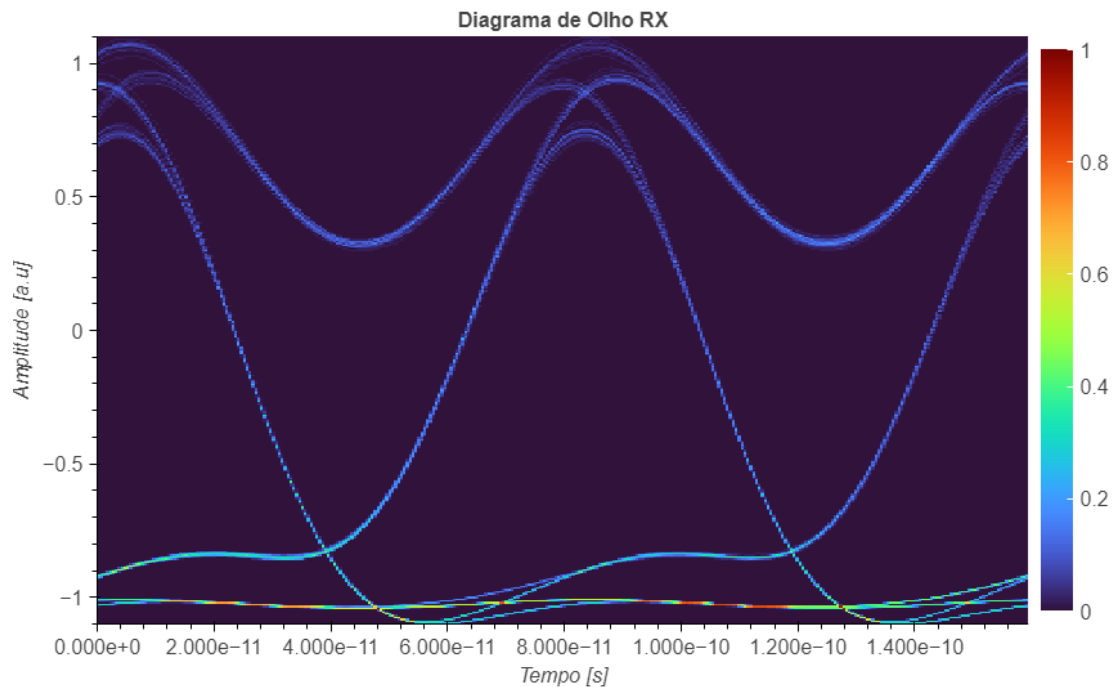


Figura 42 – Performance da transmissão com portadora em 1550,0002 nm através do diagrama de olho.

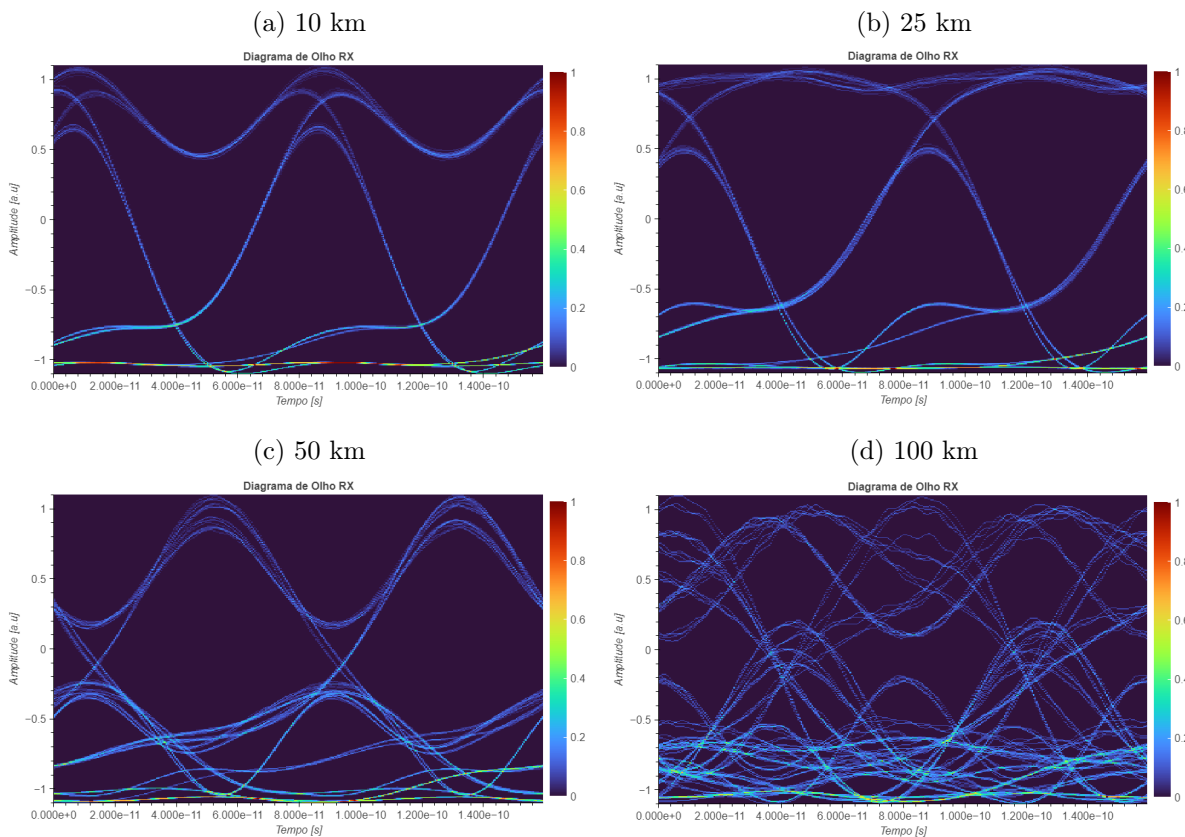


Ao conduzir essas análises para várias distâncias, os resultados obtidos para correlação e BER estão apresentados na Tabela 4. Da mesma forma, a Figura 43 ilustra como essas distâncias influenciam o diagrama de olho.

Tabela 4 – Performance da transmissão com portadora em 1550,0002 nm para diferentes distâncias.

Comprimento de Onda (nm)	Distância (Km)	Correlação	BER
1550,0002	0 (B2B)	0,8653	0,0000
	10	0,8673	0,0000
	25	0,8588	0,0000
	50	0,7350	0,1209
	100	0,6140	0,2578

Figura 43 – Diagrama de olho da transmissão com portadora em 1550,0002 nm para diferentes distâncias.



Finalmente, temos a portadora centralizada em 1549,6161 nm. Para a transmissão B2B deste comprimento de onda, tem-se na Figura 44 é apresentada a correlação entre o sinal transmitido em azul e o recebido em vermelho, enquanto na Figura 45 é exibido o diagrama de olho correspondente a essa recepção.

Figura 44 – Performance da transmissão com portadora em 1549,6161 nm através da correlação.

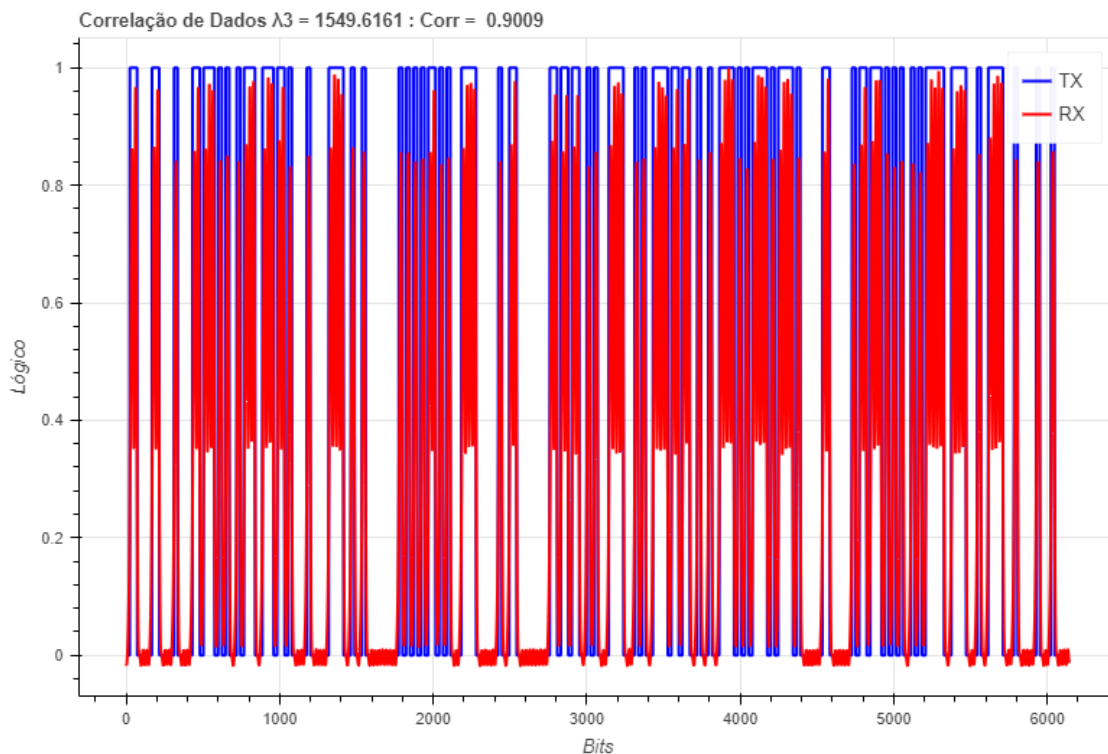
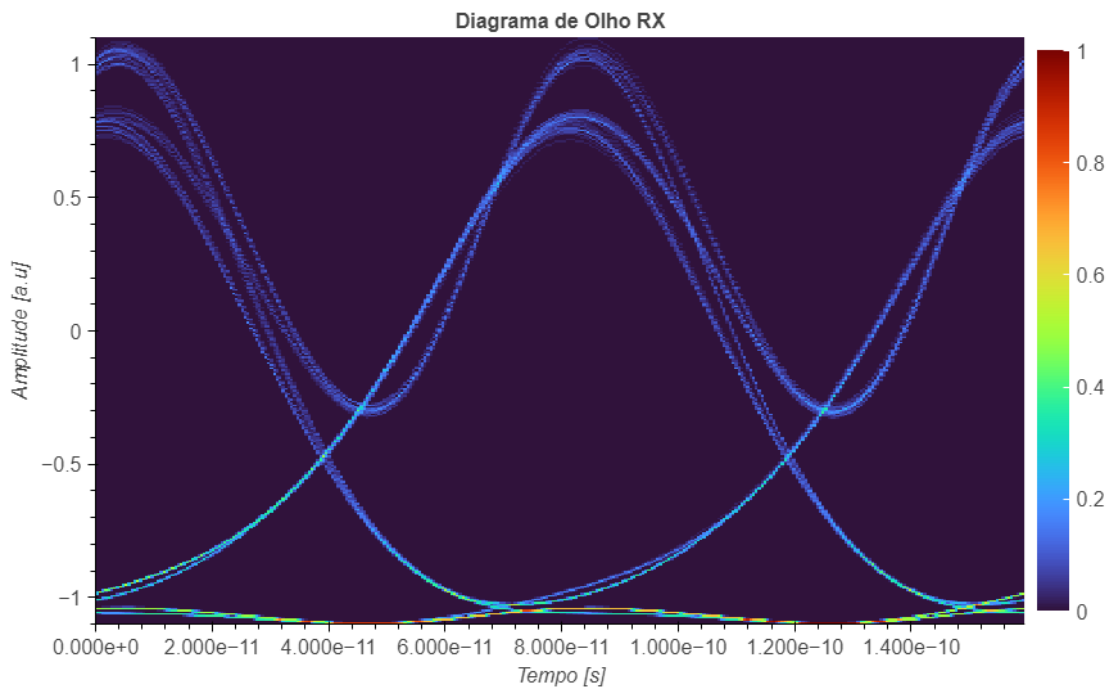


Figura 45 – Performance da transmissão com portadora em 1549,6161 nm através do diagrama de olho.

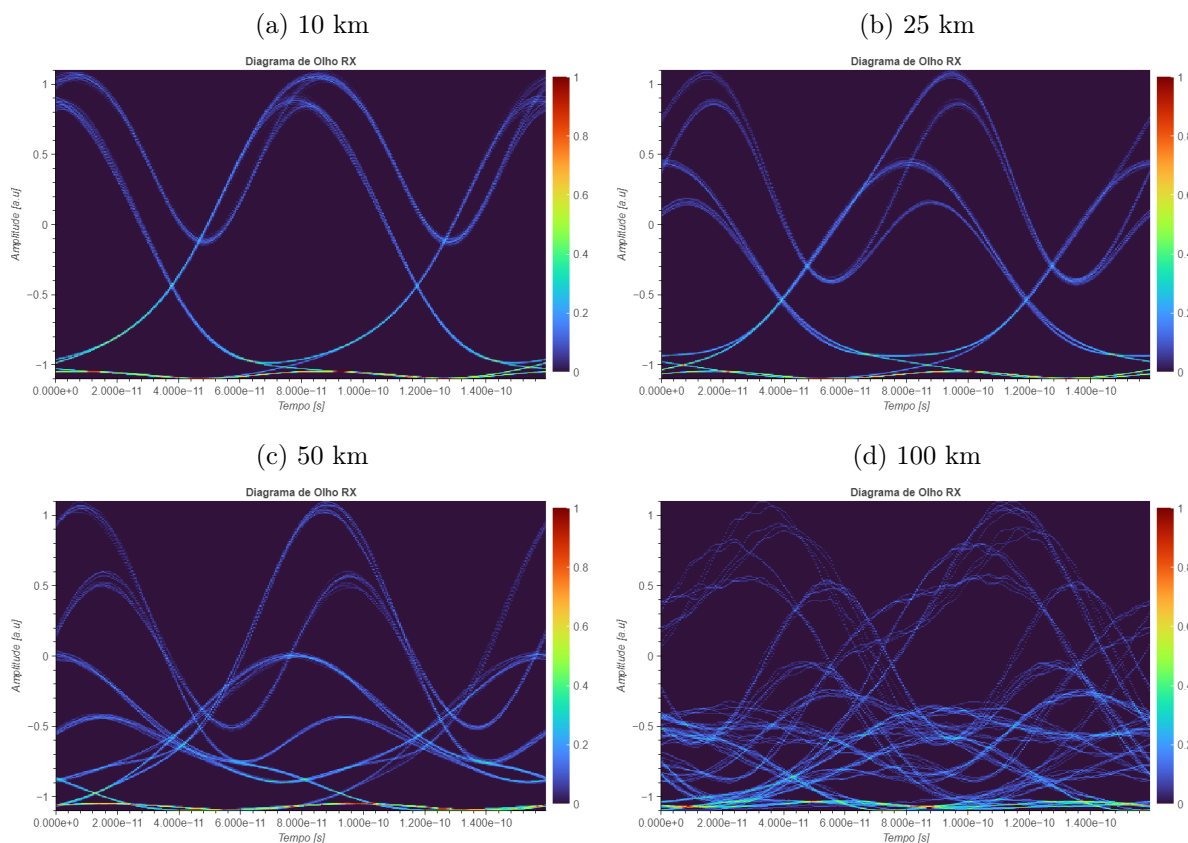


Ampliando para diferentes distâncias, os resultados referentes à correlação e BER é apresentado na Tabela 4. De maneira análoga que as anteriores, a Figura 43 representa a influência dessas distâncias no diagrama de olho.

Tabela 5 – Performance da transmissão com portadora em 1549,6161 nm para diferentes distâncias.

Comprimento de Onda (nm)	Distância (Km)	Correlação	BER
1549,6161	0 (B2B)	0,9009	0,0000
	10	0,9144	0,0000
	25	0,8802	0,0000
	50	0,7779	0,0000
	100	0,6545	0,1953

Figura 46 – Diagrama de olho da transmissão com portadora em 1549,6161 nm para diferentes distâncias.



Após analisar os resultados obtidos, fica claro que o uso das três portadoras para transmitir dados foi satisfatório. Os resultados das Tabelas 3, 4 e 5 indicam que uma das portadoras teve um desempenho melhor no diagrama e na transmissão em comparação com as outras, principalmente devido a variações nas potências durante a geração. Pode-se também destacar que, devido à quantidade de bits transmitidos, uma BER de zero nessas tabelas indica, na verdade, que a transmissão do sistema não apresenta perdas no sinal, sendo totalmente recuperada. Além disso, nota-se uma distorção inesperada no diagrama de olho, especificamente uma alteração na sua abertura vertical (ou atenuação), que se intensifica ao aumentar a distância da transmissão. Essa distorção é causada pelo filtro passa-faixa ao separar as portadoras para suas frequências correspondentes, deixando pequenas oscilações em um sinal recebido que, quando recuperado, afetam as amplitudes do sinal a ser digitalizado. Apesar dessas variações, os dados ainda confirmam a eficácia

do sistema proposto.

A geração integrada de múltiplas portadoras usando a técnica RFS foi satisfatória, assim como o processo de transmissão de dados por elas. Portanto, esses resultados são uma confirmação positiva de que essa proposta de realizar a geração de múltiplas portadoras utilizando o método RFS através da fotônica integrada pode ser uma solução promissora para o futuro das telecomunicações.

6 CONCLUSÃO

O propósito principal deste estudo foi propor o desenvolvimento simulado de uma fonte óptica na área da fotônica integrada, visando a capacidade de gerar múltiplas portadoras moduláveis para transmissão de dados. A técnica sugerida baseou-se principalmente no método de deslocamento de frequência por recirculação para gerar essas portadoras.

Essa abordagem foi motivada pela possibilidade de substituir múltiplos lasers individuais por um único pente óptico, resultando em um consumo de energia muito menor e reduzindo o tamanho dos transmissores. Além disso, ao utilizar a fotônica integrada, pretende-se otimizar ao máximo essas vantagens, representando um investimento significativo para atender às grandes demandas por capacidade de transmissão de dados.

A avaliação de desempenho, realizada por meio da Taxa de Erro de Bit (BER) e do diagrama de olho, revelou que as três portadoras apresentaram um comportamento adequado, conforme os padrões de desempenho convencionais. À medida que a distância aumentava, observou-se que a transmissão era afetada pela atenuação e dispersão do sinal, o que era esperado. É relevante notar que as diferentes portadoras exibiram comportamentos diversos, sendo a portadora em 1550,4147 nm a menos afetada pelos fatores que prejudicam o desempenho do sistema.

Em suma, a análise dos resultados confirma que a metodologia proposta atingiu o objetivo do projeto ao possibilitar a geração de múltiplas portadoras moduláveis para transmissão e recepção bem-sucedidas dos dados. Este projeto de graduação não apenas propôs avanços na comunicação óptica utilizando a fotônica integrada, mas também ofereceu perspectivas estatégicas para o desenvolvimento de tecnologias de comunicação óptica mais eficientes e econômicas, atendendo à crescente demanda por largura de banda em aplicações como IoT e outras áreas dependentes de transmissão de dados.

Como trabalhos futuros, pretende-se desenvolver uma biblioteca própria de componentes integrados, permitindo ajustar as larguras, comprimentos e outros parâmetros construtivos conforme necessário. Isso proporcionará maior flexibilidade na criação e personalização dos componentes.

Adicionalmente, pretende-se avançar na criação de um modelo de chip que consolide todos esses componentes. Isso seria realizado utilizando software especializado voltado para a fabricação de chips fotônicos integrados. O objetivo final é possibilitar a produção física

do chip para testes em um ambiente de bancada.

Essas etapas representam um avanço significativo para viabilizar a aplicação prática da pesquisa, permitindo a produção de chips fotônicos personalizados e a realização de testes laboratoriais para validar e aprimorar o desempenho dos componentes desenvolvidos.

REFERÊNCIAS

- ANSYS, L. Photonics simulation software | ansys lumerical. 2023. Disponível em: <<https://www.ansys.com/products/photonics>>. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 39.
- BINH, L. N. Digital optical communications. 2008. Citado na página 35.
- CARVALHO. Comunicações analógicas e digitais. LTC, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 36.
- CHEN, X.; MILOSEVIC, M. M.; STANKOVIC, S.; REYNOLDS, S.; BUCIO, T. D.; LI, K.; THOMSON, D. J.; GARDES, F.; REED, G. T. The emergence of silicon photonics as a flexible technology platform. v. 106, n. 12, p. 2101–2116, 2018. ISSN 0018-9219, 1558-2256. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8438526/>>. Citado 3 vezes nas páginas 16, 19 e 32.
- CHROSTOWSKI, L.; HOCHBERG, M. Silicon photonics design: From devices to systems. Cambridge University Press, 2015. Disponível em: <<https://www.cambridge.org/core/books/silicon-photonics-design/BF3CF13E8542BCE67FD2BBC7104ECEAB>>. Citado 6 vezes nas páginas 19, 20, 21, 22, 25 e 27.
- CHROSTOWSKI, L.; LU, Z.; FLUECKIGER, J.; WANG, X.; KLEIN, J.; LIU, A.; JHOJA, J.; POND, J. Design and simulation of silicon photonic schematics and layouts. SPIE, v. 9891, p. 185–195, 2016. Disponível em: <<https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/9891/989114/Design-and-simulation-of-silicon-photonic-schematics-and-layouts/10.1117/12.2230376.full>>. Citado 2 vezes nas páginas 40 e 50.
- CISCO. Cisco annual internet report - cisco annual internet report (2018–2023) white paper. 2022. Disponível em: <<https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html>>. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 15.
- CONCEIÇÃO, P. A. d. Experimental characterization of photonic integrated circuits for generation of optical coherent combs. 2021. Accepted: 2022-03-18T23:01:21Z Journal Abbreviation: Caracterização Experimental de Circuitos Fotônicos Integrados para a Geração de Combs Ópticas Coerentes. Disponível em: <<https://estudogeral.sib.uc.pt/handle/10316/99390>>. Citado na página 35.
- FORTIER, T.; BAUMANN, E. 20 years of developments in optical frequency comb technology and applications. v. 2, n. 1, p. 153, 2019. ISSN 2399-3650. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/s42005-019-0249-y>>. Citado na página 31.
- HU, H.; OXENLØWE, L. K. Chip-based optical frequency combs for high-capacity optical communications. v. 10, n. 5, p. 1367–1385, 2021. ISSN 2192-8614, 2192-8606. Disponível em: <<https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/nanoph-2020-0561/html>>. Citado 3 vezes nas páginas 17, 32 e 33.
- HUI, R. Introduction to fiber-optic communications. Academic Press, 2015. Citado na página 16.

- ITU-T, G. Itu-t rec. g.694.1 (10/2020) spectral grids for wdm applications: Dwdm frequency grid. 2020. Disponível em: <<https://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.1/en>>. Citado na página 38.
- KEISER, G. Fiber optic communications. Springer, 2021. Disponível em: <<https://link.springer.com/10.1007/978-981-33-4665-9>>. Citado na página 29.
- LEI, C.; CHEN, H.; CHEN, M.; YANG, S.; XIE, S. Recirculating frequency shifting based wideband optical frequency comb generation by phase coherence control. v. 7, n. 1, p. 1–7, 2015. ISSN 1943-0655. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/6987237>>. Citado na página 17.
- LIU, S.; FENG, J.; TIAN, Y.; ZHAO, H.; JIN, L.; OUYANG, B.; ZHU, J.; GUO, J. Thermo-optic phase shifters based on silicon-on-insulator platform: state-of-the-art and a review. Higher Education Press Limited Company, v. 15, 12 2022. ISSN 20952767. Citado na página 28.
- MARCIANO, P. R. N. Estudo da técnica RFS para geração de múltiplos comprimentos de onda Ópticos. 2016. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 35.
- REIDER, G. A. Photonics. Springer International Publishing, 2016. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-26076-1>>. Citado 3 vezes nas páginas 16, 19 e 25.
- SITBON, E.; OSTROVSKY, R.; MALKA, D. Optimizations of thermo-optic phase shifter heaters using doped silicon heaters in rib waveguide structure. Elsevier B.V., v. 51, 9 2022. ISSN 15694429. Citado na página 29.
- TUSA, F.; CLAYMAN, S. The impact of encoding and transport for massive real-time IoT data on edge resource consumption. v. 19, n. 3, p. 32, 2021. ISSN 1570-7873, 1572-9184. Disponível em: <<https://link.springer.com/10.1007/s10723-021-09577-9>>. Citado na página 15.
- YARIV, A. Optical electronics. PA: Saunders College Publishing, 1991. Citado na página 19.