

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

FERNANDO FERREIRA DE LIMA

**RELATÓRIO DE ESTÁGIO INTEGRADO - LABORATÓRIO  
EMBEDDED**

RELATÓRIO DE ESTÁGIO INTEGRADO

CAMPINA GRANDE, PB  
2024

FERNANDO FERREIRA DE LIMA

**RELATÓRIO DE ESTÁGIO INTEGRADO - LABORATÓRIO  
EMBEDDED**

Relatório de Estágio Integrado submetido à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade Federal De Campina Grande - UFCG como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Adolfo Fernandes Herbster

---

**Fernando Ferreira de Lima**  
Orientando

---

**Prof. Dr. Adolfo Fernandes Herbster**  
Orientador

CAMPINA GRANDE, PB  
2024

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço aos meus pais, Severino e Dione, por seu amor incondicional, apoio constante e pelos valores que me transmitiram ao longo da vida. Sem a base sólida que eles proporcionaram, esta conquista não seria possível.

Aos meus irmãos, Filipe e Felix, agradeço por estarem sempre presentes, por compartilharem comigo risadas, conselhos e por serem fontes constantes de motivação e inspiração.

À minha companheira, Nathália, agradeço por seu apoio inabalável, compreensão e por ser minha fonte de força e inspiração nos momentos mais difíceis.

Aos demais familiares, amigos e colegas, expresso minha gratidão pela paciência, incentivo e compreensão ao longo desses anos.

Aos amigos que fiz durante a graduação, obrigado por compartilharem risadas, experiências e por tornarem essa jornada mais leve e memorável.

Aos professores que me guiaram e inspiraram, especialmente ao Professor Adolfo Herbster, meu orientador de projeto, agradeço por seu conhecimento, orientação e pela confiança em meu potencial.

Por fim, agradeço a todos os que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho e para o meu crescimento pessoal e acadêmico.

*Não se pode ensinar nada a alguém, pode-se apenas o ajudar a descobrir por si.*  
Galileu Galilei

## RESUMO

LIMA, Fernando. RELATÓRIO DE ESTÁGIO INTEGRADO - LABORATÓRIO EMBEDDED. 2024. 32 f. Relatório de Estágio Integrado – Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal De Campina Grande. Campina Grande, PB, 2024.

O presente relatório descreve as atividades realizadas por Fernando Ferreira de Lima durante o Estágio Integrado no período de 13 meses, como parte dos requisitos para obtenção do grau de bacharel em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Campina Grande. Fernando colaborou com a empresa Lumentum Operations LLC, enquanto aproveitava a oportunidade para explorar a fotônica integrada e participar ativamente no desenvolvimento de projetos e simulações numéricas de componentes e circuitos fotônicos. O estágio proporcionou um ambiente de aprendizado imersivo, integrando teoria e prática em contribuição à conclusão de projetos da empresa.

**Palavras-chave:** Estágio Integrado. Lumentum Operations LLC. Fotônica Integrada. Desenvolvimento de Projetos. Simulações Numéricas, Componentes Fotônicos. Circuitos Fotônicos.

## ABSTRACT

LIMA, Fernando. Integrated Internship Report - LUMENTUM OPERATIONS LLC. Bachelor's Degree in Electrical Engineering, Federal University of Campina Grande. Campina Grande, PB, 2024.

The present report describes the activities carried out by Fernando Ferreira de Lima during the Integrated Internship over a period of 13 months, as part of the requirements for obtaining a bachelor's degree in Electrical Engineering from the Federal University of Campina Grande. Fernando collaborated with the company Lumentum Operations LLC, where he had the opportunity to explore integrated photonics and actively participate in the development of projects and numerical simulations of photonic components and circuits. The internship provided an immersive learning environment, integrating theory and practice, and contributing to the completion of company projects.

**Keywords:** Integrated Internship. Lumentum Operations LLC. Integrated Photonics. Project Development. Numerical Simulations. Photonic Components. Photonic Circuits.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fachada do Laboratório Embedded . . . . .	1
Figura 2 – Fachada do VIRTUS . . . . .	2
Figura 3 – Sistema de comunicação óptica simplificado . . . . .	4
Figura 4 – Diagrama de um transmissor óptico simplificado. . . . .	5
Figura 5 – Diagrama de um canal óptico simplificado. . . . .	5
Figura 6 – Perda de transmissão de fibra de sílica e bandas de comprimento de onda de comunicação óptica. . . . .	6
Figura 7 – Diagrama de um receptor direto simplificado. . . . .	7
Figura 8 – Diagrama de um receptor coerente simplificado . . . . .	7
Figura 9 – Exemplos de Componentes Fotônicos Passivos (a) <i>MMI</i> , (b) Divisor de Feixe, (c) <i>DC</i> , (d) Anel de Ressonância, (e) <i>MZI</i> . . . . .	8
Figura 10 – Exemplos de Componentes Fotônicos Ativos. (a) <i>MZM</i> de efeito termo-óptico. (b) <i>MZM</i> de efeito eletro-óptico. . . . .	9
Figura 11 – Fluxograma de Trabalho com <i>Design</i> Fotônico . . . . .	10
Figura 12 – Resumo das tentativas de otimização do divisor de potência com <i>PSO</i> utilizando <i>MODE</i> e <i>FDTD</i> . . . . .	13
Figura 13 – Melhor caso alcançado nas otimizações do <i>PSO</i> com o <i>FDTD</i> . . . . .	14
Figura 14 – Melhor caso alcançado nas otimizações do método adjunto com o <i>FDTD</i> . . . . .	14
Figura 15 – Resultado da sensibilidade do divisor de potência em relação à variação da (a) largura, (b) altura e (c) temperatura. . . . .	15
Figura 16 – Ilustração de parte do circuito teste do divisor de potência compacto . . . . .	16
Figura 17 – Parâmetros de projeto do <i>MMI 4x4</i> como Híbrida de 90° . . . . .	16
Figura 18 – Transmitância das portas de saída do <i>MMI 4x4</i> em função do seu comprimento $L_{MMI}$ . . . . .	18
Figura 19 – Transmitância [dB] das portas de saída do <i>MMI 4x4</i> no esquema <i>MZI</i> para estudo do erro de fase $L_{MMI}$ . . . . .	18
Figura 20 – Resultado da (a) variação da FSR e (b) o equivalente em erro de fase ao longo da banda de simulação . . . . .	19
Figura 21 – Ilustração do modelo de filtro óptico sintonizável baseado em <i>MZM</i> auxiliado por <i>RRs</i> . . . . .	20
Figura 22 – Resultado da variação do coeficiente de acoplamento $K_r$ no filtro sintonizável . . . . .	20
Figura 23 – Resultado da variação da defasagem entre os anéis $\varphi_r$ no filtro sintonizável . . . . .	21
Figura 24 – Resultado da variação da defasagem $\varphi_{MZ}$ no filtro sintonizável . . . . .	21
Figura 25 – Ilustração da geometria do <i>TOPS</i> de tungstênio para guias de silício . . . . .	22
Figura 26 – Resultados da temperatura do aquecedor em função da potência aplicada para três diferentes comprimentos de <i>TOPS</i> . . . . .	23

Figura 27 – Comparação entre a aproximação <i>2D</i> e a simulação <i>3D</i> da variação de fase do <i>TOPS</i> . . . . .	24
Figura 28 – Comparação entre os resultados da simulação e do modelo construído para as respostas elétricas dos <i>TOPSs</i> . . . . .	25
Figura 29 – Diagrama do transmissor óptico coerente. . . . .	26
Figura 30 – Diagrama de um receptor óptico coerente com DSP . . . . .	27
Figura 31 – Resultado da simulação B2B em comparação a aproximação teórica esperada. . . . .	27
Figura 32 – Etapas de processamento do <i>DSP</i> no sistema <i>DP-QPSK</i> . . . . .	28
Figura 33 – Efeito causado pela atenuação do sinal detectado sobre a <i>BER</i> . . . . .	29

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AGC	<i>Automatic Gain Control</i>
API	<i>Application Programming Interface</i>
CATI	Comitê da Área de Tecnologia da Informação
CEEI	Centro de Engenharia Elétrica e Informática
CFR	<i>Carrier Frequency Recovery</i>
CMRR	<i>Common Mode Rejection Ratio</i>
CPR	<i>Carrier Phase Recovery</i>
DC	<i>Directional Coupler</i>
DP-QPSK	<i>Dual Polarization Quadrature Phase Shift Keying</i>
DRC	<i>Design Rule Checking</i>
DSP	<i>Digital Signal Processor</i>
DBS	<i>Direct Binary Search</i>
EL	<i>Excess Loss</i>
EDC	<i>Electronic Dispersion Compensation</i>
FDTD	<i>Finite-Difference Time-Domain</i>
FSR	<i>Free Spectral Range</i>
GDS	<i>Graphic Design System</i>
IL	<i>Insertion Loss</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
LED	<i>Light-Emitting Diode</i>
LLC	<i>Limited Liability Company</i>
LO	<i>Local Oscillator</i>
MMI	<i>Multi-Mode Interferometer</i>

MZI	<i>Mach-Zehnder Interferometer</i>
MZM	<i>Mach-Zehnder Modulator</i>
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
RR	<i>Ring Resonator</i>
TOPS	<i>Thermo-Optic Phase Shifter</i>
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande

## LISTA DE SÍMBOLOS

$c$	Velocidade da luz no espaço livre
$\lambda_c$	Frequência central
$n_{core}$	Índice de refração do núcleo
$n_{clad}$	Índice de refração do revestimento
$n_g$	Índice de Grupo
$\Delta L$	Variação de comprimento
$W_e$	Largura efetiva
$K_c$	Coefficiente de Acoplamento do DC
$K_r$	Coefficiente de Acoplamento do RR
$L_r$	Perímetro do RR
$\varphi_r$	Defasagem dos RR do filtro
$\varphi_{MZ}$	Defasagem dos braços do filtro
$Si$	Silício
$Si_3N_4$	Nitreto de Silício
$SiO_2$	Dióxido de Silício
$TiN$	Nitreto de Titânio
$W$	Tungstênio
$Hz$	Hertz (unidade de medida de frequência)
$dB$	Decibel (adimensional - décima parte de um bel)
$rad$	Radiano (unidade de medida de ângulo)
$\mu m$	Micrômetro (medida de comprimento - milionésima parte do metro)
$nm$	Nanômetro (medida de comprimento - bilionésima parte do metro)

# SUMÁRIO

<b>1 – INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1 O LABORATÓRIO <i>EMBEDDED</i>	1
1.2 O <i>VIRTUS</i>	2
1.3 OBJETIVO GERAL	2
1.3.1 Objetivos específicos	3
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	3
<b>2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>4</b>
2.1 SISTEMAS DE COMUNICAÇÕES ÓPTICAS	4
2.1.1 Transmissor Óptico	4
2.1.2 Canal Óptico	5
2.1.3 Receptor Óptico	6
2.2 CIRCUITOS FOTÔNICOS INTEGRADOS - <i>PICs</i>	7
2.2.1 Tipos de Componentes Fotônicos	7
2.2.1.1 Componentes Fotônicos Passivos	7
2.2.1.2 Componentes Fotônicos Ativos	8
2.3 FLUXO DE TRABALHO DA FOTÔNICA	9
<b>3 – ATIVIDADES DESENVOLVIDAS</b>	<b>12</b>
3.1 DIVISOR DE POTÊNCIA 50/50 COMPACTO	12
3.1.1 Métodos de Otimização Utilizados	12
3.1.1.1 Otimização por Enxame de Partículas ( <i>PSO</i> )	13
3.1.1.2 Otimização por <i>Design</i> Inverso — Método Adjunto	13
3.2 <i>MMI 4x4</i> DE NITRETO DE SILÍCIO COMO HÍBRIDA DE 90°	16
3.3 FILTRO SINTONIZÁVEL BASEADO EM <i>MZM</i> AUXILIADO POR <i>RRs</i>	19
3.4 <i>TOPs</i> DE TUNGSTÊNIO PARA GUIAS DE SILÍCIO	22
3.5 DESEMPENHO DE HÍBRIDAS EM UM SISTEMA <i>DP-QPSK</i> COM <i>DSP</i> BASEADO NA <i>OPTICOMMPY</i>	25
3.6 ATIVIDADES COMPLEMENTARES	28
<b>4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>30</b>
Referências	31

## 1 INTRODUÇÃO

Este relatório descreve as atividades desenvolvidas durante a execução da disciplina curricular Estágio Integrado. Tal estágio, realizado por Fernando Ferreira de Lima no Laboratório *Embedded*, faz parte do programa de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (*PD&I*) entre a Universidade Federal de Campina Grande (*UFCG*) e o Centro de Engenharia Elétrica e Informática (*CEEI*) com o *VIRTUS*.

Ao longo do estágio, orientado pelo Prof. Adolfo Fernandes Herbster e supervisionado pelo Prof. Gutemberg Gonçalves Santos Júnior, Fernando dedicou-se ao desenvolvimento e otimização de componentes fotônicos para sistemas ópticos coerentes de alta taxa. O interesse crescente em circuitos fotônicos integrados se deve à sua capacidade de alta velocidade e capacidade de transmissão de dados, à eficiência energética e à capacidade de miniaturização e integração. Este relatório abrange as atividades conduzidas entre 14 de abril de 2023 e 14 de maio de 2024, totalizando cerca de 1700 horas.

### 1.1 O LABORATÓRIO *EMBEDDED*

O Laboratório de Sistemas Embarcados e Computação Pervasiva (*Embedded*) é uma parte integrante do Centro de Engenharia Elétrica e Informática (*CEEI*) da Universidade Federal de Campina Grande (*UFCG*), situado em Campina Grande, Paraíba. Fundado em dezembro de 2005, suas operações se estendem por um edifício de 600 metros quadrados no campus da *UFCG*. Uma imagem da fachada do laboratório pode ser vista na Figura 1.

Figura 1 – Fachada do Laboratório Embedded



Fonte: Adaptado de <https://www.embedded.ufcg.edu.br>. Acesso em 26 de abril de 2024

Por meio da *UFCG*, o Laboratório Embedded recebe credenciamento no Comitê da Área de Tecnologia da Informação (*CATI*), permitindo-lhe acesso aos recursos da Lei de Informática, com o Parque Tecnológico da Paraíba também atuando como interveniente financeiro credenciado no *CATI*.

A equipe do Laboratório Embedded é uma comunidade de professores e pesquisadores do CEEI da UFCG, engajados em uma variedade de atividades. Composta por alunos de doutorado, mestrado e graduação nos campos de Engenharia Elétrica e Ciência da Computação, essa equipe é reconhecida por seu alto nível de competência e dedicação.

As áreas de atuação do laboratório abrangem a *Internet* das Coisas, o *Co-Design* de *Software* e *Hardware*, além da Microeletrônica e Fotônica Integrada.

## 1.2 O VIRTUS

O VIRTUS é o Núcleo de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação em Tecnologia da Informação, Comunicação e Automação — um órgão suplementar da UFCG vinculado ao CEEI.

Figura 2 – Fachada do VIRTUS



Fonte: Adaptado de <https://www.virtus.ufcg.edu.br>. Acesso em 26 de abril de 2024

O VIRTUS cria novas opções de futuro por meio de projetos de pesquisa, desenvolvimento e inovação tecnológica com parceiros da indústria, nas mais diversas áreas de tecnologia da informação, comunicação e automação. Como parte do CEEI/UFCG, ICT pública no Nordeste, o VIRTUS executa projetos de Lei de Informática, EMBRAPPII, ANP, dentre outros mecanismos de incentivo.

## 1.3 OBJETIVO GERAL

O objetivo do estágio é de projetar e caracterizar componentes e dispositivos fotônicos de silício e nitreto de silício, além de sistemas ópticos, via simulações numéricas e simulações ao nível de circuito usando de base o estudo da literatura do assunto para propor melhorias e satisfazer as exigências do projeto em questão, isso sob supervisão de uma equipe de engenheiros de *design* fotônico da *Lumentum*.

### 1.3.1 Objetivos específicos

- Otimizar e caracterizar componentes e dispositivos fotônicos diversos (divisor de potência compacto, *MMI 2x2*, acoplador direcional com dobras tipo Euler, híbrida, defasador termo-óptico, filtro sintonizável).
- Simular um sistema *DP-QPSK* para verificação do desempenho de diferentes híbridas.
- Realizar simulações de sensibilidade para verificar a robustez dos componentes frente a defeitos de fabricação e variação de temperatura.
- Desenhar circuitos de teste para os componentes projetados.
- Compor relatórios e apresentações semanais detalhando o desenvolvimento das atividades e alimentar o repositório com *scripts* e arquivos dos projetos.

## 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho é dividido em 4 (quatro) capítulos. O capítulo 1 dá uma breve apresentação do estágio realizado. O capítulo 2 fornece uma fundamentação teórica relacionada às atividades desenvolvidas. Em seguida, o capítulo 3 descreve atividades realizadas durante o período estágio. E por fim, o capítulo 4 apresenta as considerações finais acerca das atividades do estágio.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesse capítulo são descritos os principais conceitos e fundamentos teóricos necessários para prover um embasamento técnico às atividades apresentadas no próximo capítulo. São apresentados os conceitos de sistema de comunicações ópticas, circuitos fotônicos integrados e o fluxo de trabalho no projeto de componentes fotônicos.

### 2.1 SISTEMAS DE COMUNICAÇÕES ÓPTICAS

Os sistemas de comunicação óptica, fundamentais para a conectividade moderna, utilizam sinais ópticos para eficiente transmissão de dados em longas distâncias, com as fibras ópticas desempenhando papel crucial (AMIREH, 2023). A pesquisa contínua é vital para aprimorar esses sistemas. No âmbito da comunicação óptica, o transmissor, canal e receptor ópticos interagem harmoniosamente para assegurar a propagação eficiente dos sinais, destacando a importância de cada componente na comunicação de alta velocidade e baixa perda.

Figura 3 – Sistema de comunicação óptica simplificado



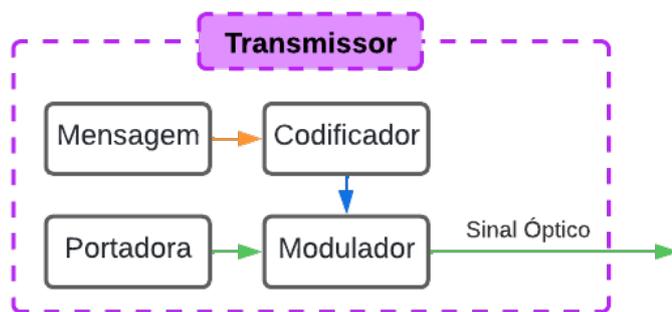
Elaborado pelo autor.

#### 2.1.1 Transmissor Óptico

O transmissor óptico é um componente essencial dos sistemas de comunicação óptica, responsável pela conversão de sinais elétricos em sinais ópticos adequados para a transmissão pelo canal óptico. Esse processo envolve vários elementos importantes, incluindo um diodo de laser ou *LED* para gerar o sinal da portadora óptica, técnicas de modulação (AGRAWAL, 2010) para codificar os dados elétricos na portadora óptica e vários componentes ópticos, como lentes e acopladores, para moldar e direcionar o feixe óptico. A Figura 4 mostra o diagrama de um transmissor óptico simplificado.

Além dos elementos básicos, o transmissor também pode incorporar circuitos de condicionamento de sinal para otimizar a qualidade e a fidelidade do sinal transmitido, garantindo uma comunicação confiável em longas distâncias (DJORDJEVIC et al., 2010).

Figura 4 – Diagrama de um transmissor óptico simplificado.

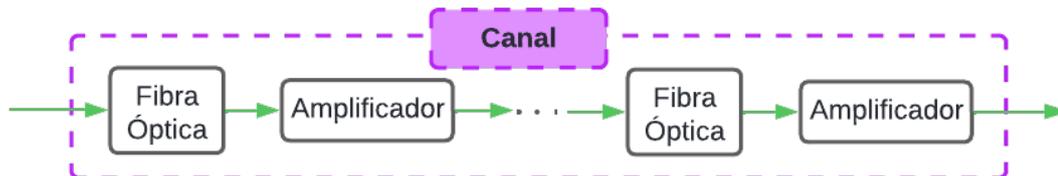


Elaborado pelo autor.

### 2.1.2 Canal Óptico

O canal óptico refere-se ao meio pelo qual os sinais ópticos se propagam entre o transmissor e o receptor em um sistema de comunicação óptica. As fibras ópticas são o meio de transmissão mais comum e eficiente nos canais ópticos modernos, oferecendo baixa atenuação de sinal, alta largura de banda e imunidade à interferência eletromagnética (PROAKIS; SALEHI, 2008). A figura 5 mostra o diagrama de um canal óptico.

Figura 5 – Diagrama de um canal óptico simplificado.

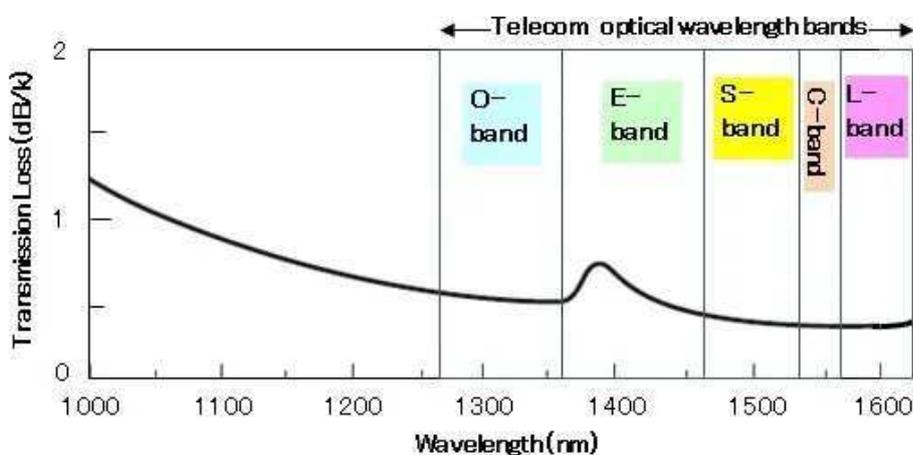


Elaborado pelo autor.

As fibras ópticas consistem em um núcleo cercado por uma camada de revestimento, com o núcleo tendo um índice de refração mais alto para permitir a reflexão interna total do sinal óptico. Vários tipos de fibras ópticas, como as fibras monomodo e multi-modo, estão disponíveis para atender a diferentes requisitos de transmissão. Além disso, amplificadores ópticos e compensadores de dispersão podem ser empregados ao longo do canal óptico para aumentar a intensidade do sinal e atenuar a distorção do sinal causada pelos efeitos de dispersão.

As bandas de operação da fibra óptica são faixas de comprimento de onda que dividem o espectro em segmentos com diferentes níveis de atenuação. Na figura 6, é possível observar o perfil de atenuação da fibra de sílica, juntamente com as bandas de comprimento de onda comumente utilizadas em comunicações ópticas. Entre essas faixas, destacam-se as bandas C e L, que representam as faixas de operação mais utilizadas devido às menores perdas apresentadas, tornando-as ideais para diversas aplicações em sistemas de comunicação óptica.

Figura 6 – Perda de transmissão de fibra de sílica e bandas de comprimento de onda de comunicação óptica.



Fonte: (FIBERLABS, 2023)

### 2.1.3 Receptor Óptico

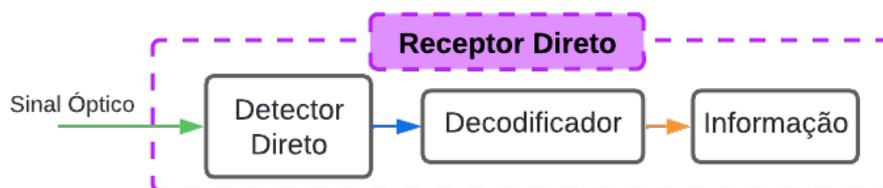
O receptor óptico desempenha um papel fundamental nos sistemas de comunicação óptica, detectando, amplificando e decodificando sinais ópticos transmitidos pelo canal óptico. Ao receber o sinal óptico, o receptor emprega um fotodetector, como um fotodiodo ou uma matriz de fotodetectores, para converter o sinal óptico em um sinal elétrico. O sinal elétrico é então amplificado por um circuito amplificador para aumentar sua força para processamento posterior. Posteriormente, técnicas de processamento de sinal, como filtragem, demodulação e correção de erros, são aplicadas para extrair os dados originais do sinal elétrico com alta precisão e confiabilidade. Além disso, o receptor pode incorporar mecanismos de equalização e controle automático de ganho (AGC) para otimizar a qualidade do sinal e compensar as variações na intensidade do sinal e a distorção ao longo do canal óptico.

Existem dois principais métodos de detecção em comunicações ópticas: detecção direta e detecção coerente (DJORDJEVIC et al., 2010).

Na detecção direta, o sinal óptico é convertido diretamente em um sinal elétrico pelo fotodetector (figura 7). Esse método é simples e amplamente utilizado em sistemas de curto alcance e baixa taxa de dados, como redes locais (LANs) e comunicações ponto a ponto. No entanto, a detecção direta tem limitações em termos de sensibilidade e capacidade de lidar com sinais ópticos modulados em alta velocidade.

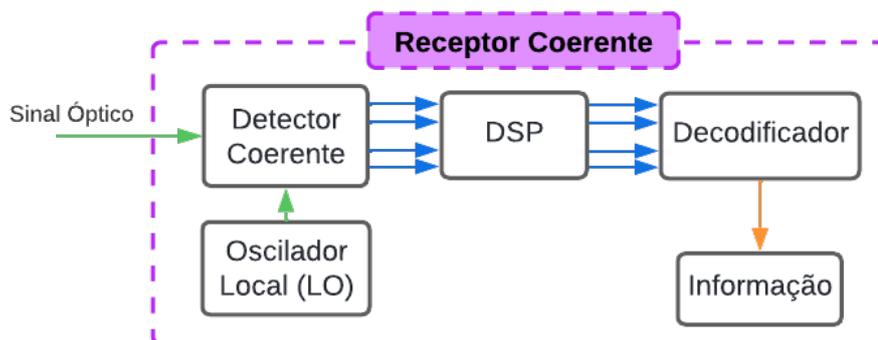
Na detecção coerente em comunicações ópticas, o sinal óptico é combinado com um sinal local antes da detecção pelo fotodetector (Figura 8). Isso permite a recuperação precisa da amplitude e fase do sinal, melhorando significativamente a sensibilidade e eficiência do sistema. Os receptores coerentes, com o auxílio de algoritmos de processamento digital de sinais (DSP), oferecem desempenho superior, sendo ideais para transmissões de longa distância e sistemas de comunicação quântica emergentes.

Figura 7 – Diagrama de um receptor direto simplificado.



Elaborado pelo autor.

Figura 8 – Diagrama de um receptor coerente simplificado



Elaborado pelo autor.

## 2.2 CIRCUITOS FOTÔNICOS INTEGRADOS - PICs

Os circuitos fotônicos integrados representam uma abordagem inovadora na área de comunicações ópticas, permitindo a integração de múltiplos componentes ópticos em um único substrato. Essa tecnologia oferece vantagens significativas em termos de miniaturização, eficiência e custo, facilitando a implementação de funcionalidades complexas em dispositivos compactos.

### 2.2.1 Tipos de Componentes Fotônicos

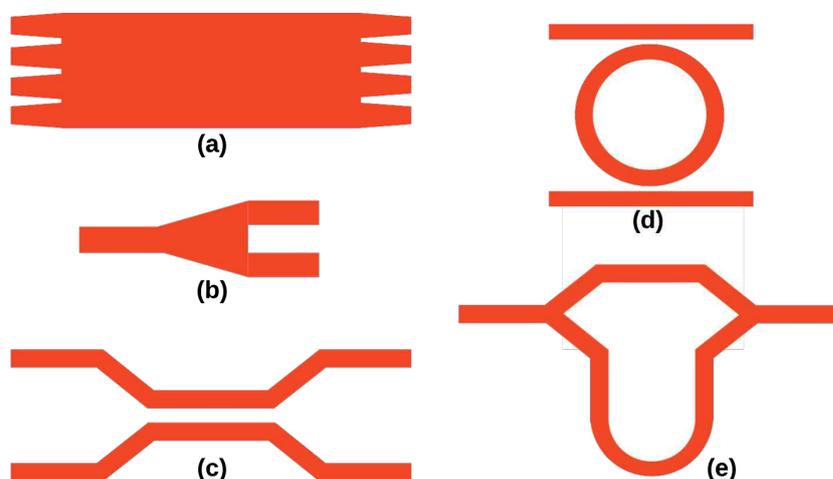
Nos circuitos fotônicos integrados, existem dois principais tipos de componentes: passivos e ativos.

#### 2.2.1.1 Componentes Fotônicos Passivos

Os componentes passivos desempenham um papel fundamental na manipulação e direcionamento dos sinais ópticos, sem a necessidade de energia externa para operar. Eles incluem elementos como guias de onda, acopladores direcionais, divisores de feixe, interferômetro de *Mach-Zehnder* (MZI), filtros ópticos, entre outros (SU et al., 2020), essenciais para o roteamento, distribuição e processamento dos sinais ópticos no circuito integrado. Na classe dos divisores de feixe, os interferômetros de multi-modo (MMI) se destacam pela sua versatilidade, sendo empregados desde tarefas fundamentais de divisão e combinação de luz até aplicações

avançadas, como multiplexação, demultiplexação e acoplamento de sinais ópticos. A Figura 9 mostra alguns exemplos de componentes passivos.

Figura 9 – Exemplos de Componentes Fotônicos Passivos (a) *MMI*, (b) Divisor de Feixe, (c) *DC*, (d) Anel de Ressonância, (e) *MZI*.



Elaborado pelo autor.

### 2.2.1.2 Componentes Fotônicos Ativos

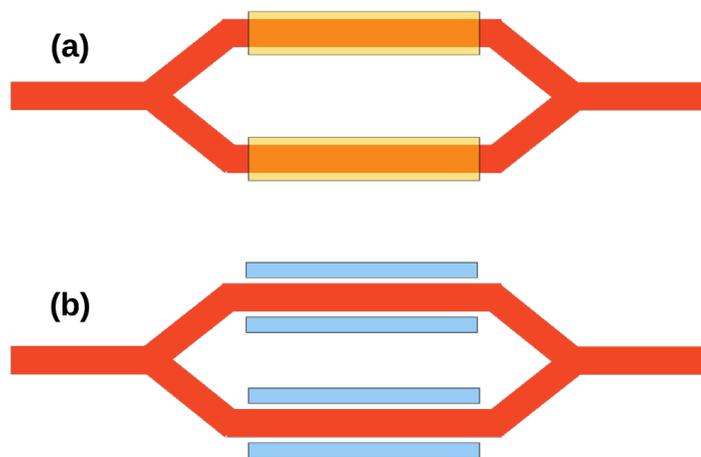
Os componentes ativos requerem uma fonte de energia externa para operar e conseguem modificar ativamente os sinais ópticos. Isso inclui dispositivos como lasers e moduladores, fundamentais para a geração, modulação e detecção de sinais ópticos no circuito fotônico integrado.

Esses componentes dependem de dois principais efeitos fundamentais: os efeitos eletro-ópticos e térmicos. O efeito eletro-óptico envolve a modificação das propriedades ópticas de um material em resposta a um campo elétrico externo. Este fenômeno é explorado em dispositivos como moduladores eletro-ópticos (SINATKAS et al., 2021), onde a aplicação de um campo elétrico permite a modulação ativa da luz, alterando sua intensidade, fase ou polarização em tempo real.

Por outro lado, o efeito térmico refere-se à alteração das propriedades ópticas de um material em resposta às variações de temperatura. Em dispositivos como moduladores termo-ópticos, baseados nos defasadores termo-ópticos (*Thermo-Optical Phase Shifter — TOPS*) (LIU; FENG et al., 2022), e filtros termo-ópticos (DING et al., 2022), essa alteração controlada da temperatura permite o ajuste das características da luz, como comprimento de onda ou intensidade.

Esses componentes permitem a transmissão, recepção e processamento eficiente de informações ópticas em uma variedade de aplicações, como comunicações ópticas e processamento de sinais ópticos. A Figura 10 mostra alguns exemplos de componentes ativos, onde são vistos dois tipos de moduladores de Mach-Zehnder (*MZM*).

Figura 10 – Exemplos de Componentes Fotônicos Ativos. (a) *MZM* de efeito termo-óptico. (b) *MZM* de efeito eletro-óptico.



Elaborado pelo autor.

### 2.3 FLUXO DE TRABALHO DA FOTÔNICA

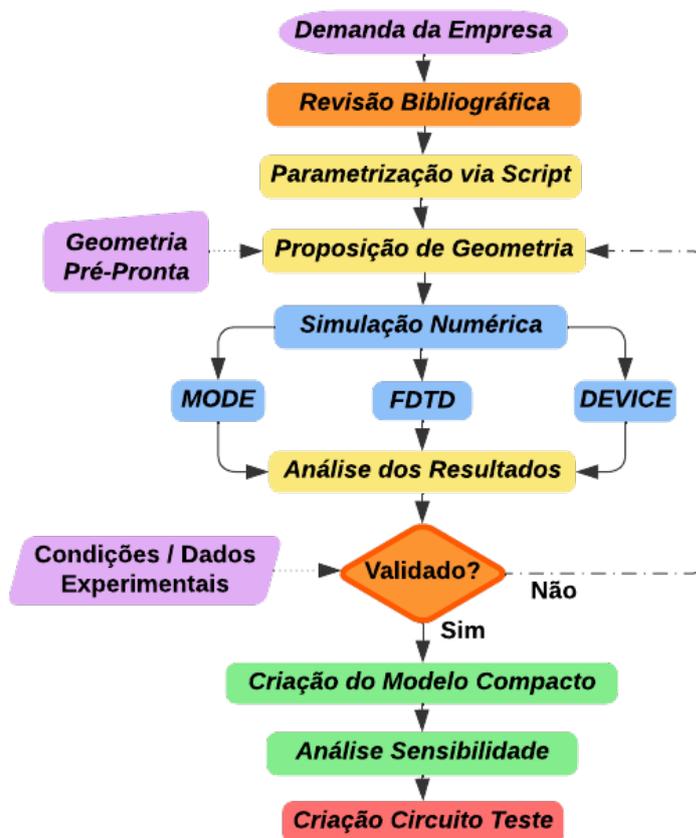
No geral, cada projeto de componente fotônico segue um fluxo de processos parecido. A figura 11 mostra um fluxograma com as principais etapas seguidas no design fotônico. A depender do projeto, algumas etapas podem ser omitidas.

Todo projeto inicia com uma demanda da empresa, que pode ser tanto a criação de um novo layout quanto a otimização de algum já existente, com base em definições sobre especificações de desempenho almejadas, limitações de dimensões, banda de operação e características do material utilizado, fornecidos pela demandante. Uma complementação de informações é feita na etapa de revisão bibliográfica, onde também é buscado o estado da arte do componente em questão para auxiliar na escolha da geometria e direcionar as possíveis otimizações.

Visando agilizar as possíveis otimizações, nos estudos posteriores das variações na geometria é feita uma parametrização da criação da geometria utilizando a *API* de automação (ANSYS, 2019), que permite a interoperabilidade com os solucionadores da *Ansys Lumerical* utilizando a linguagem *Python*. Com a utilização dessa linguagem, também é facilitada a análise de resultados e a produção de gráficos de qualidade.

Para as simulações numéricas, os principais softwares utilizados no estágio foram os da *Ansys Lumerical*, que possuem solucionadores ao nível de componente como o *MODE*, *FDTD* e *DEVICE*, e ao nível de circuito com o *INTERCONNECT*. Para componentes passivos, são utilizados os solucionadores em duas dimensões (2D) como o *MODE solver* e/ou em três dimensões (3D) como o *FDTD solver*, e para componentes ativos é utilizado o *DEVICE solver*.

O *MODE solver* possui três opções de ferramentas: *FDE*, *varFDTD* e *EME*; e seu uso depende das características da geometria a ser simulada. O *FDTD solver* tem esse nome devido ao método no qual é baseado: método de diferenças finitas no domínio do tempo (*FDTD*). O

Figura 11 – Fluxograma de Trabalho com *Design* Fotônico

Elaborado pelo autor.

*DEVICE* solver possui o solucionador de efeito térmico *HEAT*, entre outras ferramentas para simulação de transporte de carga em semicondutores.

Em geral, a simulação do componente passivo é iniciada com um solucionador *2D* do *MODE* por ser mais rápido em fornecer resultados com boa precisão e, em seguida, é feita a verificação dos resultados com a simulação *3D* do *FDTD*. Tendo confirmado que os resultados dos solucionadores *2D* têm precisão suficiente, são feitas outras simulações considerando algumas variações de geometria no processo de fabricação, a fim de prever o comportamento do componente frente aos possíveis defeitos de produção.

Após a etapa das simulações numéricas, que podem levar bastante tempo dependendo das dimensões físicas do componente, é feita a análise dos resultados para verificar se as especificações da demanda da empresa são atendidas. Se não forem, o processo volta à etapa de proposição de geometria com propostas de melhoria. Se forem atendidas, o processo segue para a etapa de criação do modelo compacto do componente no simulador de circuitos *INTERCONNECT*, utilizando os dados de parâmetros de espalhamento extraídos das simulações numéricas.

Com o modelo compacto em mãos, é possível agora realizar as análises de sensibilidade do componente, não apenas manualmente como pode ser feita na etapa de análise de resultados, mas também de forma estatística com a ferramenta de análise *Monte Carlo*, já disponibilizada

no *INTERCONNECT*.

Em seguida, é elaborado o circuito teste do componente no formato *GSDII*, utilizando alguma ferramenta de layout como o *KLayout*, que possui interface de usuário, ou mesmo alguma biblioteca do *Python*, como o *gdsfactory*, por exemplo. Ainda é importante serem feitas etapas de verificação das regras de *design* (*DRC*) antes de encaminhar finalmente o projeto à fábrica responsável por sua produção.

### 3 ATIVIDADES DESENVOLVIDAS

Nesta seção, serão apresentadas as principais atividades desenvolvidas durante o período de estágio. Os projetos foram realizados sob supervisão da equipe de fotônica da Lumentum, com reuniões remotas semanais que tratavam sobre o direcionamento das atividades.

#### 3.1 DIVISOR DE POTÊNCIA 50/50 COMPACTO

Os divisores de potência fotônicos desempenham um papel fundamental em sistemas ópticos, permitindo a distribuição eficiente da luz incidente entre múltiplos caminhos. Esses dispositivos são essenciais em uma variedade de aplicações fotônicas, incluindo comunicações ópticas, sensores e sistemas de processamento de sinal. O princípio de funcionamento desses divisores baseia-se na capacidade de dividir a luz de entrada em duas ou mais saídas, com intensidades específicas determinadas pelo design do dispositivo.

Os divisores de potência 50/50 distribuem a luz de maneira equitativa, gerando duas saídas com potência idêntica. No design desses dispositivos, são almejadas características como baixa perda de inserção, desbalanceamento mínimo de potência, tamanho físico (*footprint*) reduzido e ampla faixa de operação em frequência.

Sendo  $P_{in}$  a potência de entrada e  $P_{out_1}$  e  $P_{out_2}$  as potências de saídas, têm-se as definições de perda de inserção (*Insertion Loss — IL*), perda excessiva (*Excess Loss — EL*) e desbalanceamento de potência (*Power Imbalance — PI*) a seguir:

$$IL_i = 10 \log_{10} \frac{P_{in}}{P_{out_i}}, i = 1, 2. \quad (1)$$

$$EL_i = 10 \log_{10} \frac{P_{in}}{2P_{out_i}}, i = 1, 2. \quad (2)$$

$$PI = 10 \log_{10} \frac{P_{out_1}}{P_{out_2}} \quad (3)$$

Nesta seção é apresentado o desenvolvimento de um divisor de potência 50/50 compacto de silício para banda C, que, aliás, foi o primeiro projeto desenvolvido no período deste estágio.

##### 3.1.1 Métodos de Otimização Utilizados

Para a otimização da geometria do divisor de potência 50/50 compacto foram experimentados dois métodos: Otimização por Enxame de Partículas (*PSO*) e Otimização de *Design Inverso* com o chamado Método Adjunto.

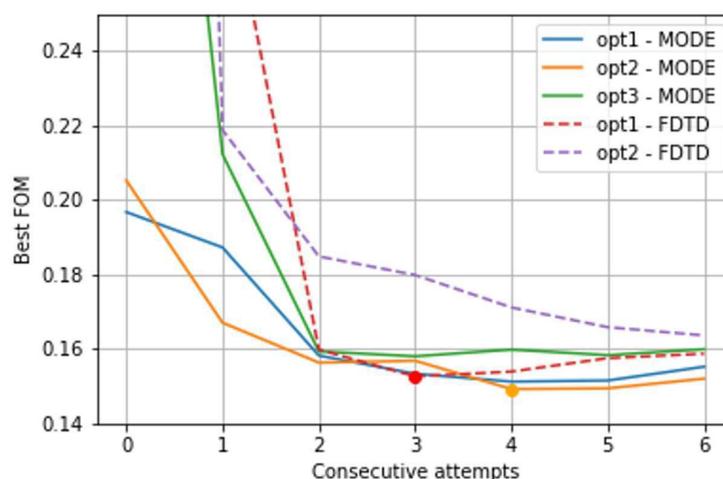
### 3.1.1.1 Otimização por Enxame de Partículas (PSO)

Conhecido como *PSO* (*Particle Swarm Optimization*), esse método utiliza a analogia de múltiplas *partículas* que representam soluções candidatas. Essas partículas são ajustadas iterativamente em direção à solução ótima, buscando minimizar uma função objetivo, que nesse caso foi a perda excessiva (*EL*).

Tanto o *MODE solver* e o *FDTD solver* da *Ansys Lumerical* já disponibilizam na parte de *Sweeps and Optimizations* uma ferramenta que permite a aplicação do *PSO* após definida uma geometria inicial e os parâmetros da geometria a serem otimizados.

Iniciou-se a otimização com simulações *2D* no *MODE* a fim de definir melhor as condições iniciais e parâmetros da otimização e em seguida fez-se a otimização final com simulações *3D* utilizando o *FDTD* que garante resultados mais confiáveis. Um resumo de algumas tentativas de otimização da geometria utilizando o *PSO* é mostrado na figura 12.

Figura 12 – Resumo das tentativas de otimização do divisor de potência com *PSO* utilizando *MODE* e *FDTD*



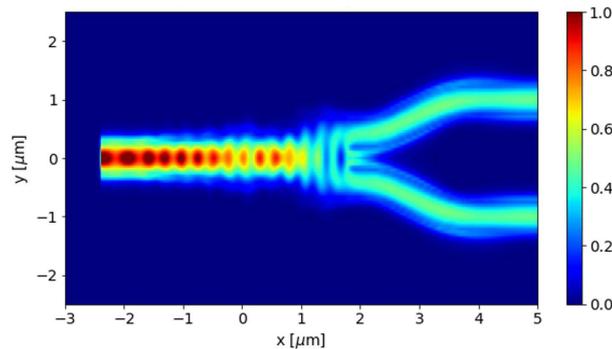
Elaborado pelo autor.

O melhor caso dentre as tentativas de otimização do *FDTD* é mostrado na figura 13b, o qual obteve a menor perda excessiva (*EL*) de 0.1527 dB na frequência central de 1550 nm. A distribuição de potência pode ser vista pelo perfil de campo elétrico mostrado na figura 13a.

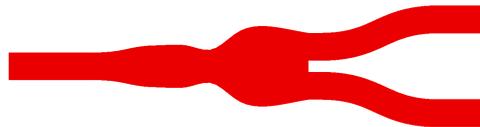
As tentativas subsequentes de otimização, utilizando o melhor caso como geometria inicial, não resultaram em melhorias adicionais, e como o componente ainda não havia alcançado as especificações da demanda, outra forma de otimização foi buscada.

### 3.1.1.2 Otimização por *Design Inverso* — Método Adjunto

Esse método utiliza o cálculo do gradiente da função objetivo em relação aos parâmetros de design, avaliando eficientemente as sensibilidades dos parâmetros em relação à função objetivo. Isso permite atualizações iterativas para direcionar a geometria para uma solução ótima em termos de desempenho (LALAU-KERALY et al., 2013).

Figura 13 – Melhor caso alcançado nas otimizações do *PSO* com o *FDTD*.

(a) Perfil de campo elétrico.

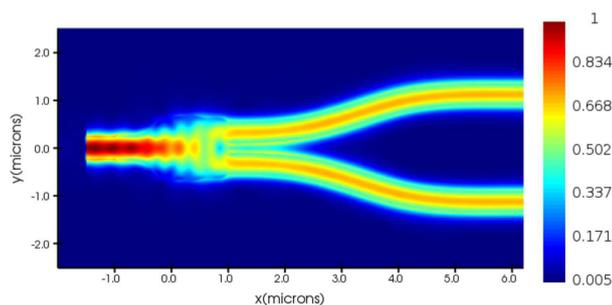


(b) Geometria alcançada

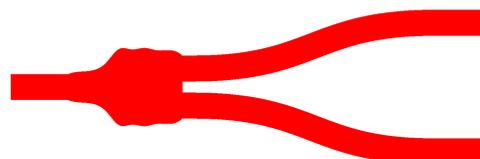
Elaborado pelo autor.

Para empregar esse método, foi utilizada a biblioteca *lumopt* (LALAU-KERALY et al., 2023), voltada para o uso com as ferramentas *MODE* e *FDTD* da *Ansys Lumerical*.

Nesse projeto de divisor de potência compacto, buscava-se uma geometria de fácil fabricação, limitando-se ao modelo de geometria padrão de um guia contínuo. No entanto, existem outros trabalhos com geometrias mais complexas e eficientes, desenvolvidas a partir de métodos como Busca Binária Direta (*DBS*) (XU et al., 2021) ou redes neurais artificiais de aprendizado profundo com autocodificadores (WANG et al., 2021).

Figura 14 – Melhor caso alcançado nas otimizações do método adjunto com o *FDTD*.

(a) Perfil de campo elétrico.



(b) Geometria alcançada

Elaborado pelo autor.

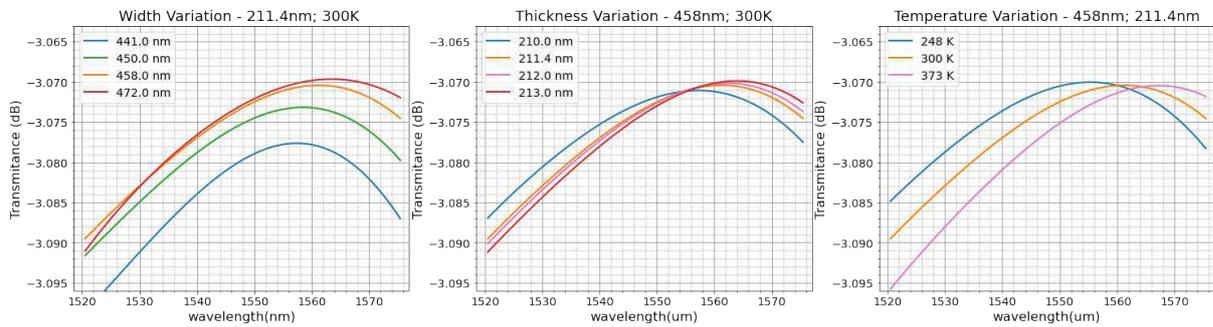
Durante o desenvolvimento do componente, foi solicitado que a distância entre as

portas de saída fosse aumentada, o que teoricamente causa uma perda maior, uma vez que a curvatura dos braços se torna mais acentuada. Mesmo assim, o melhor caso alcançado pelo método (Figura 14), com uma perda excessiva de 0.0426 dB, ainda é consideravelmente melhor do que o melhor caso obtido pelo método *PSO*, que possui uma perda cerca de 3,6 vezes maior ( $EL = 0.1517$  dB).

Essa geometria atendia os critérios da demanda, e assim foi a escolhida para dar continuidade nas próximas etapas: criação do modelo compacto no *INTERCONNECT*, estudo da sensibilidade e criação do circuito teste.

O modelo compacto do componente foi criado com informações da variação da largura, altura e temperatura extraídas de simulações extras com o *FDTD*. A sensibilidade a cada parâmetro foi analisada separadamente, como mostra a Figura 15. A variação da largura causa uma diminuição considerável da perda de inserção do componente, uma vez que a transmitância aumenta (Figura 15a). A variação da altura da camada não causa impacto, o que indica robustez (figura 15b). Já em relação à variação de temperatura (figura 15c), o efeito mais notório é o deslocamento da banda de operação, que não é muito relevante, uma vez que a largura de banda do componente é elevada.

Figura 15 – Resultado da sensibilidade do divisor de potência em relação à variação da (a) largura, (b) altura e (c) temperatura.



Elaborado pelo autor.

Uma ilustração do *layout* do circuito teste criado é exibida na figura 16, onde é visto o cascadeamento dos divisores utilizado obter medições precisas no laboratório, visto que a perda excessiva do componente é muito pequena. Um esquema de interferometria, nesse caso um *MZI*, também é usualmente colocado no *layout* de teste para a obtenção de grandezas, como o índice de grupo ( $n_g$ ).

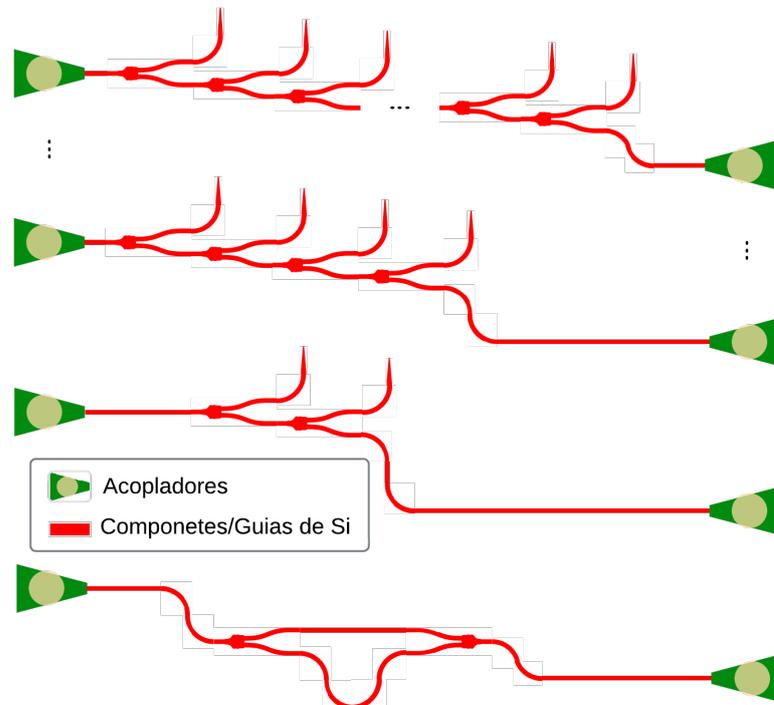
$$FSR_{Hz} = FSR_m \times \frac{c}{\lambda_o^2} \quad (4)$$

$$FSR_{Hz} = \frac{c}{n_g \Delta L} \quad (5)$$

$$\therefore n_g = \frac{c}{FSR_{Hz} \Delta L} = \frac{\lambda_c^2}{FSR_m \Delta L} \quad (6)$$

Onde  $FSR_{Hz}$  é a *FSR (Free Spectral Range)* do sinal saída do *MZI* dada em *hertz (Hz)*,  $c$  é a velocidade da luz, e  $(\Delta L)$  a diferença de comprimento entre os braços do *MZI*.

Figura 16 – Ilustração de parte do circuito teste do divisor de potência compacto

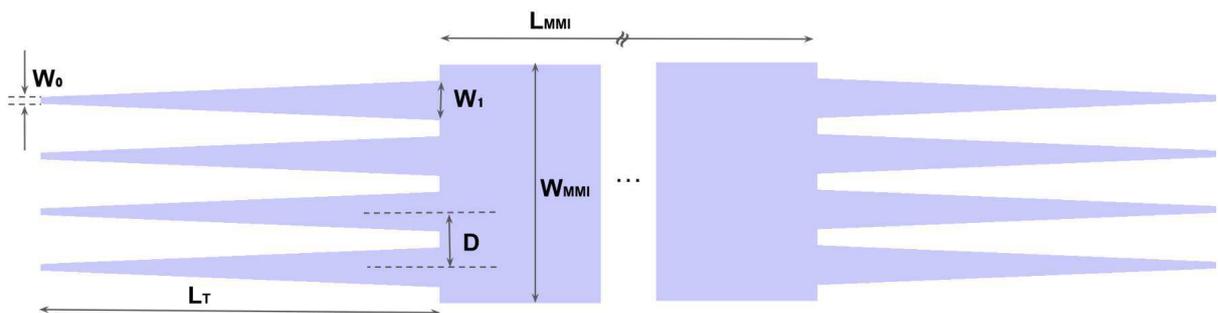


Elaborado pelo autor.

### 3.2 MMI 4x4 DE NITRETO DE SILÍCIO COMO HÍBRIDA DE 90°

A híbrida de 90 graus é um componente vital em sistemas de comunicação óptica coerente, permitindo a extração dos componentes em fase ( $I$ ) e quadratura ( $Q$ ) dos sinais ópticos. Ela desempenha um papel crucial na detecção e demodulação das informações transmitidas, gerando sinais ópticos ortogonais deslocados por 90 graus.

Figura 17 – Parâmetros de projeto do *MMI 4x4* como Híbrida de 90°



Elaborado pelo autor.

Os *MMIs*  $4 \times 4$  pode se comportar como uma híbrida de 90 graus, caso sejam devidamente projetados. As principais características a serem projetadas no *MMI*  $4 \times 4$  são mostradas na figura 17.

Tanto as portas de saída, como as de entrada tem o mesmo formato cônico (*taper*), definido pelos parâmetros  $W_0$ , que seria a menor largura,  $W_1$  que seria maior largura, e  $L_T$  que é o comprimento da porta.

Uma boa e simples aproximação para o melhor valor da distância entre as portas é  $D = \frac{W_{MMI}}{N}$ , sendo  $N$  o número de portas para distribuir ( $N = 4$ ). No entanto, pode-se ainda melhorar o posicionamento dessas portas considerando a largura dos modos  $W_e$  (largura efetiva) em vez da largura do *MMI*, como mostra a equação 7.

$$D = \frac{W_e}{N} \quad (7)$$

Onde,  $W_e$  é a largura dos modos (também chamada de largura efetiva) (SOLDANO; PENNING, 1995), e pode ser dada pela equação 8, considerando apenas o modo TE.

$$W_e = W_{MMI} + \left( \frac{\lambda_0}{\pi} \right) (n_{core}^2 - n_{clad}^2)^{-(1/2)} \quad (8)$$

Onde,  $\lambda_0$  é a frequência central de operação do componente, nesse caso 1550 nm,  $n_{core}$  é o índice de refração do núcleo, que nesse caso é o do  $Si_3N_4$ , e  $n_{clad}$  é o índice de refração do revestimento (*cladding*), que nesse caso é o  $SiO_2$ .

A largura menor da porta  $W_0$  é definida pela largura desejada dos guias de  $Si_3N_4$ . Observou-se que ao aumentar a largura maior da porta  $W_1$ , a perda de inserção do *MMI* diminuía. Seria possível aumentar  $W_1$  até o máximo, conforme mostrado na Equação 9, mas preferiu-se manter as portas um pouco mais afastadas para evitar ângulos críticos impraticáveis na fabricação.

$$W_{1max} = W_{MMI} - \frac{N-1}{N} W_e \quad (9)$$

A largura  $W_{MMI}$  do *MMI* irá determinar o seu próprio comprimento  $L_{MMI}$ . Foi definida uma largura fixa para *MMI*  $W_{MMI} = 30 \mu m$ , e em seguida, com a ferramenta *Propagation Sweep* do *EME solver (MODE)* foi encontrado o valor ideal para o comprimento  $L_{MMI}$ , como mostra a figura 18.

$$IL[dB] = 10 \log \frac{P_{in}}{P_{out}} \quad (10)$$

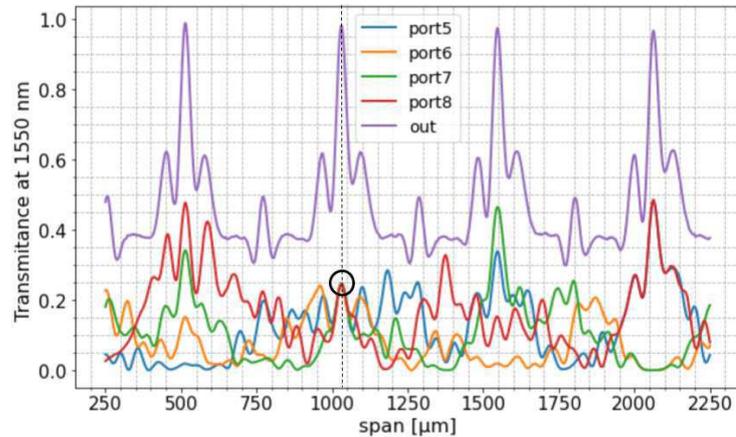
$$PI[dB] = 10 \log \frac{P_{p1}}{P_{p2}} \quad (11)$$

$$CMRR[dB] = 10 \log \left| \frac{P_{p1} - P_{p2}}{P_{p1} + P_{p2}} \right| \quad (12)$$

A partir das potências de saída normalizadas, chamadas de transmitâncias é possível extrair outras métricas importantes para uma híbrida, tais como a perda de inserção (IL), o desbalanceamento de potência (PI) entre as componentes em fase e em quadratura, e a chamada taxa de rejeição comumente (CMRR), definidas nas equações 10, 11 e 12.

Para a geometria definida obteve-se uma  $IL$  média na banda C de 0.6 dB, valores de  $PI$  médios menores que 0.13 dB, e valores  $CMRRs$  maiores que 30 dB sobre toda a banda C.

Figura 18 – Transmitância das portas de saída do MMI  $4 \times 4$  em função do seu comprimento  $L_{MMI}$

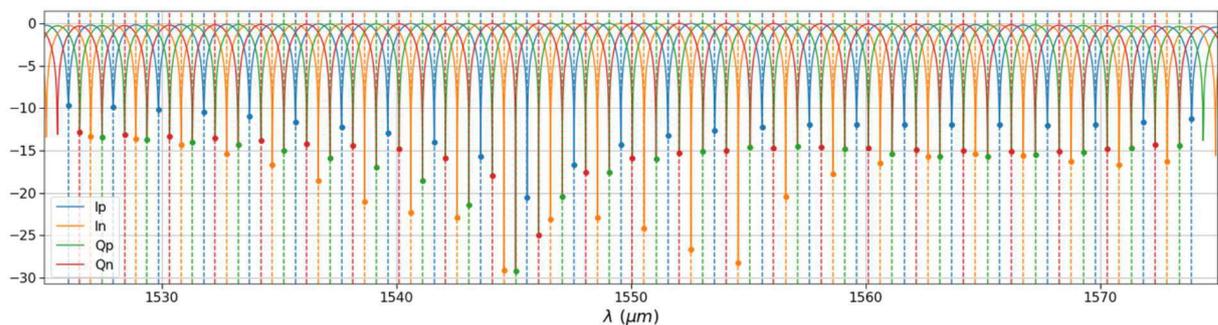


Elaborado pelo autor.

Com os dados (parâmetros  $S$ ) da híbrida de  $90^\circ$  definida, extraídos de simulações numéricas utilizando o *EME solver*, criou-se o modelo compacto no *INTERCONNECT*. Para tornar a simulação ainda mais confiável, foram exportados dados do guia de  $Si_3N_4$  com dimensões adaptadas às especificações do projeto da híbrida. Em seguida, montou-se um esquema de *MZI* com a híbrida para verificar seu erro de fase.

Utilizando as equações (4) e (5), projetou-se o *MZI* para ter uma *FSR* conveniente de 2 nm. A Figura 19 mostra o resultado da transmitância com os padrões de interferência a serem analisados para o cálculo do erro de fase.

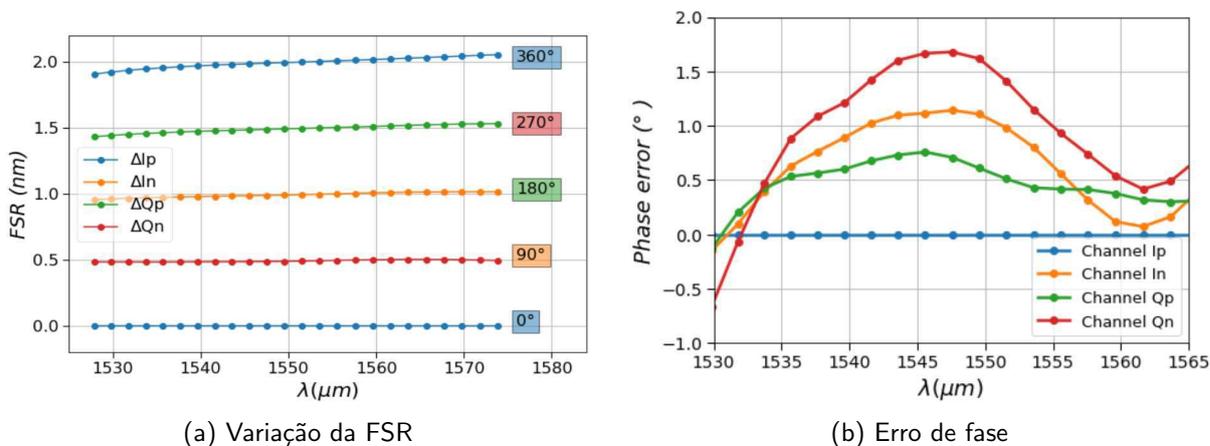
Figura 19 – Transmitância [dB] das portas de saída do MMI  $4 \times 4$  no esquema *MZI* para estudo do erro de fase  $L_{MMI}$



Elaborado pelo autor.

A partir do padrão de interferência da saída do *MZI* é possível analisar o erro na *FSR* observada nessas curvas de transmitância. Usando um dos canais como referência, obtém-se a variação da *FSR* ao longo da banda de simulação como mostra a Figura 20a, e sabendo que a *FSR* é de 2 nm, que representa  $360^\circ$ , tem-se que  $FSR/N = 0.5 \text{ nm}$  corresponde a uma defasagem de  $90^\circ$ , e partir dessa relação o erro de fase calculado (Figura 20b).

Figura 20 – Resultado da (a) variação da FSR e (b) o equivalente em erro de fase ao longo da banda de simulação



Elaborado pelo autor.

### 3.3 FILTRO SINTONIZÁVEL BASEADO EM MZM AUXILIADO POR RRs

Um filtro óptico sintonizável é um dispositivo que pode variar suas características de filtragem, como largura de banda e frequência central controladamente. Eles são frequentemente utilizados em sistemas de comunicação óptica, espectroscopia e processamento de sinal óptico, onde a capacidade de sintonizar as características espectrais é crucial para atender às demandas específicas do sistema.

Nesse projeto, foi solicitada a proposição e análise de um filtro óptico em fotônica de silício para a banda C que fosse sintonizável em frequência central e em largura de banda. Foi realizada uma extensa pesquisa bibliográfica a fim de encontrar o dispositivo que melhor atendesse às especificações da demanda da empresa.

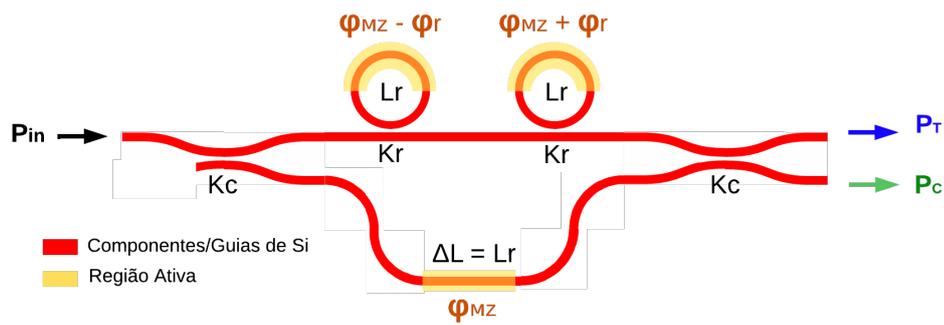
Os modelos de filtro foram simulados utilizando circuitos em bloco no *INTERCONNECT*. Os melhores candidatos seriam àqueles filtros de baixa complexidade que apresentassem um fácil das características espectrais.

Iniciou-se a implementação de filtros simples como os *MZMs*, depois fez-se a análise de anéis ressonadores. Como esses modelos básicos não atendiam a necessidade de controle de tanto da largura da banda como da frequência central, experimentou-se a combinação desses filtros.

Primeiro foi testado um anel ressonador (*RR*) auxiliado por *MZMs* que apresentava o possível controle tanto da largura da banda, quanto da frequência central (LIU et al., 2022). No entanto, o controle das características desejadas não era possível de ser feito separadamente, isto é, ao ajustar a largura de banda desejada, a frequência de operação sofria um deslocamento indesejável, e da mesma forma, ao corrigir o deslocamento da frequência central, a largura de banda era desajustada. Modelando matematicamente os efeitos do controle da largura de banda e os efeitos do controle da frequência central seria possível ajustar o filtro de modo a trabalhar com ambas as especificações desejadas.

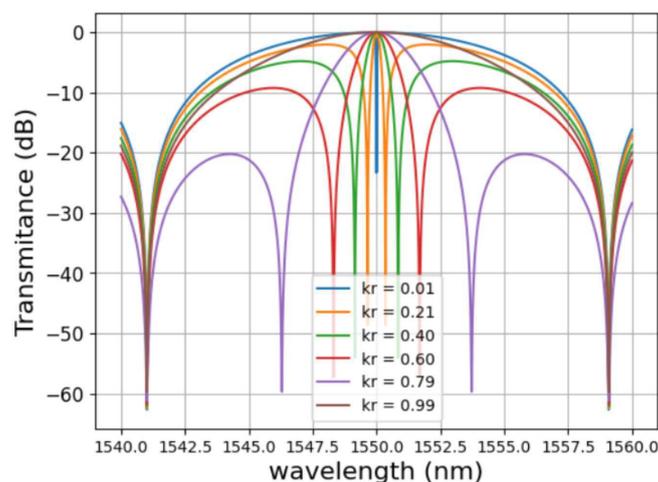
Deu-se prosseguimento à busca por um filtro de controle mais prático, e dessa forma foi testado um modelo formado por um *MZM* auxiliado por anéis de ressonância, que no trabalho de referência prometia um comportamento praticamente linear e independente no controle de largura de banda e de frequência central (ORLANDI et al., 2012). O modelo desse filtro é mostrado na Figura 21.

Figura 21 – Ilustração do modelo de filtro óptico sintonizável baseado em *MZM* auxiliado por *RRs*



O comprimento do perímetro dos anéis ressonadores  $L_r$  é igual à diferença de comprimento entre os braços do *MZM*,  $\Delta L$ , a qual é definida segundo a *FSR* desejada utilizando a equação 5. O coeficiente de acoplamento dos acopladores direcionais  $K_C$  é 0.5, já o coeficiente de acoplamento dos anéis  $K_r$  foi definido a partir do raio de extinção de 20 dB desejado, como mostra a Figura 22. O raio de extinção é a medida de quanto o filtro irá atenuar nos arredores da sua banda de operação. A definição do  $K_r$  irá, também, determinar a menor largura de banda do filtro.

Figura 22 – Resultado da variação do coeficiente de acoplamento  $K_r$  no filtro sintonizável

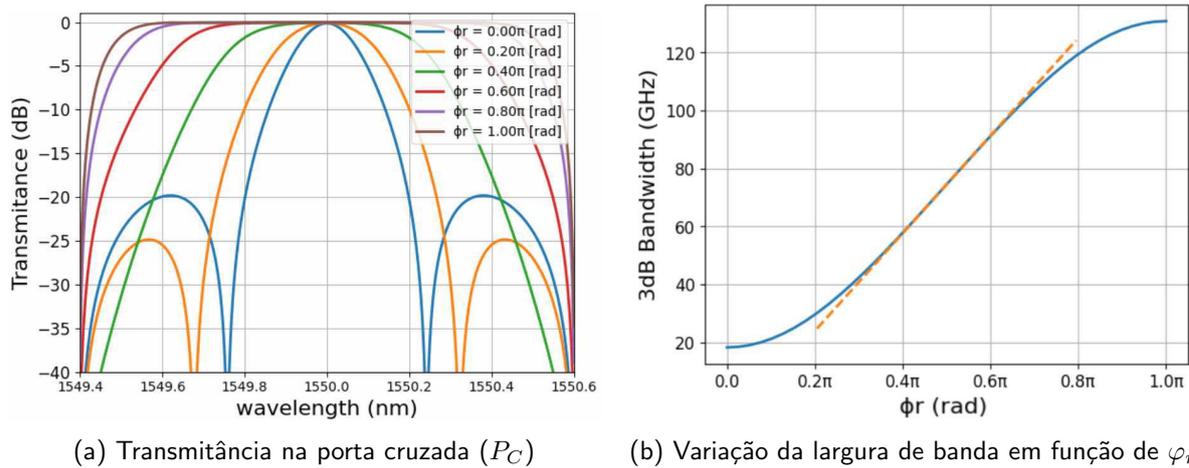


Tendo definido os parâmetros do filtro, foi feita a análise do seu desempenho em relação ao controle da largura de banda e da frequência central de operação:

- **Ajuste da Largura de Banda:** O parâmetro ajustado para o controle da largura de banda é a defasagem dos anéis  $\varphi_r$  [rad], que tem seu efeito exibido na Figura 23, onde se

percebe que apenas a largura de banda do filtro é variada, enquanto a frequência central permanece inalterada. Para uma faixa de variação de largura de banda mais estreita, como de 40 GHz até 100 GHz, a relação com  $\varphi_r$  pode ser considerada linear. A perda de inserção ( $IL$ ) calculada na frequência central varia 0,13 dB até 0,03 dB com o aumento do  $\varphi_r$ .

Figura 23 – Resultado da variação da defasagem entre os anéis  $\varphi_r$  no filtro sintonizável



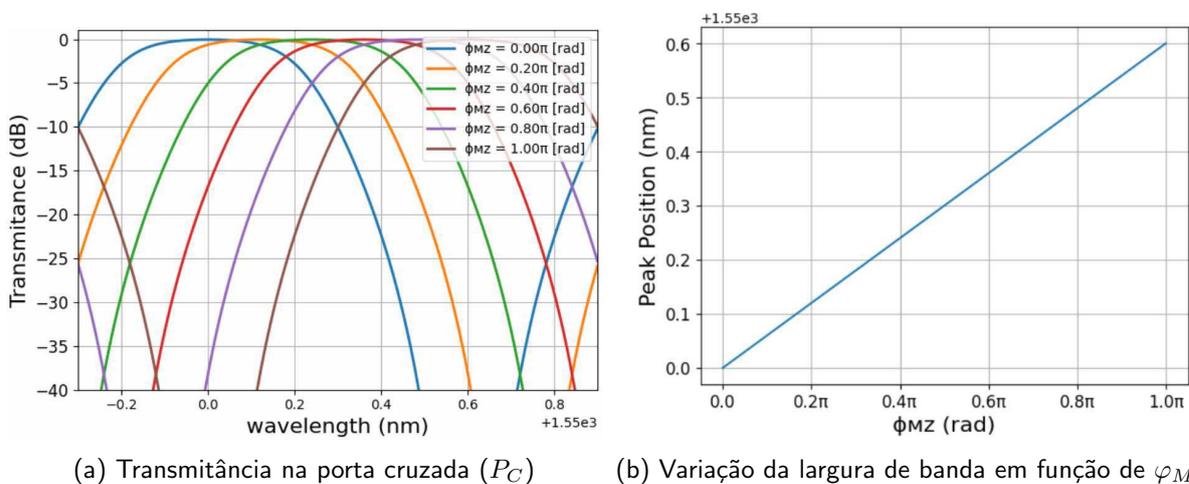
(a) Transmitância na porta cruzada ( $P_C$ )

(b) Variação da largura de banda em função de  $\varphi_r$

Elaborado pelo autor.

- **Ajuste da Frequência Central:** O parâmetro ajustado para o controle da frequência central é a defasagem  $\varphi_{MZ}$  [rad], que tem seu efeito exibido na Figura 24, onde se percebe que apenas a frequência central do filtro é variada, enquanto a largura de banda permanece inalterada. Ainda é possível observar que a relação entre  $\varphi_{MZ}$  e a frequência central é dada linearmente, facilitando a sua manipulação. A perda de inserção do filtro tem uma variação desprezível.

Figura 24 – Resultado da variação da defasagem  $\varphi_{MZ}$  no filtro sintonizável



(a) Transmitância na porta cruzada ( $P_C$ )

(b) Variação da largura de banda em função de  $\varphi_{MZ}$

Elaborado pelo autor.

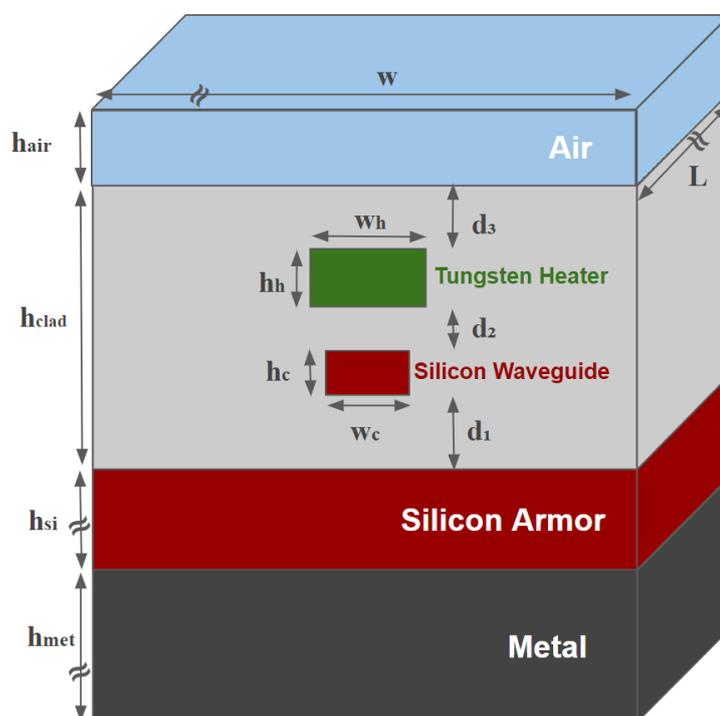
### 3.4 TOPS DE TUNGSTÊNIO PARA GUIAS DE SILÍCIO

Os deslocadores de fase termo-ópticos, *TOPS* (*Thermo-Optical Phase Shifter*), são dispositivos que modulam a fase da luz usando o efeito termo-óptico. Eles são compostos por guias de onda ópticos em materiais termo-ópticos, nos quais a temperatura pode ser controlada para induzir mudanças na constante dielétrica do material,  $\epsilon$ , consequentemente, alterações na fase do sinal óptico que passa pelo guia de onda (SUN et al., 2022). Esses dispositivos são úteis em sistemas ópticos para ajustar a fase da luz precisamente, o que os torna valiosos em uma variedade de aplicações, incluindo modulação de fase em sistemas de comunicação óptica, interferometria e processamento de sinal óptico.

As regiões ativas ilustradas da Figura 21 do capítulo 3.3 deste relatório são exemplos de *TOPS* usados na criação de um filtro óptico sintonizável, no qual é necessário um controle preciso sobre a defasagem dos sinais.

Nessa demanda dada pela empresa, a geometria do *TOPS* a ser trabalhado já estava pré-definida, e o principal interesse nessa atividade era fazer verificações pontuais para conferir se as simulações apresentavam, de fato, resultados fies aos dados de medição que estavam em posse dos engenheiros orientadores. A Figura 25 mostra uma ilustração da geometria do *TOPS*.

Figura 25 – Ilustração da geometria do *TOPS* de tungstênio para guias de silício



Elaborado pelo autor.

Os principais parâmetros de comparação foram o valor do  $P_\pi$  (potência necessária para causar a defasagem de  $\pi$  rad) e as temperaturas do aquecedor metálico (*Heater*) e do guia óptico quando a potência  $P_\pi$  era aplicada.

O simulador utilizado foi o *HEAT solver*, ferramenta do *DEVICE* da *Ansys Lumerical*.

A princípio, as temperaturas obtidas estava muito elevadas, chegando até mais que o dobro das esperadas. Diversas simulações foram feitas alterando os parâmetros da geometria (Figura 25), condições de fronteiras, parâmetros dos materiais e outras configurações de simulação, mas os resultados continuaram com valores fora do esperado por um longo tempo.

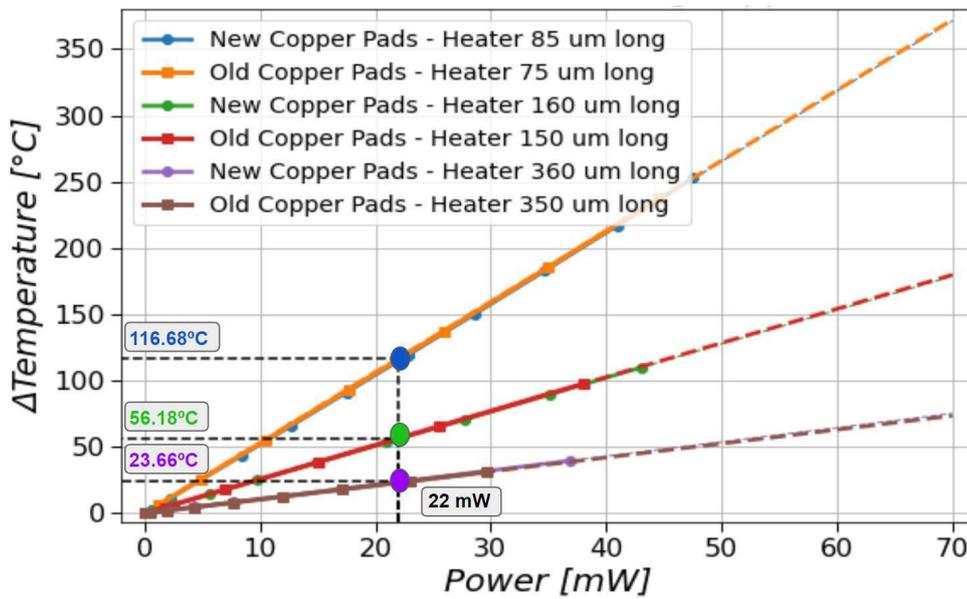
Por fim, após obter os dados experimentais da medição da resistência do aquecedor (filamento de tungstênio —  $W$ ) e realizar o ajuste do modelo de condutividade do *Heater* no simulador, os resultados de  $P_\pi$  e as temperaturas obtidas passaram a estar nos intervalos esperados. Os coeficientes do modelo de condutividade foram determinados ao reorganizar matematicamente o resultado da regressão linear dos dados, conforme o modelo da Equação 14.

$$\sigma(T) = \left[ \frac{1}{\sigma_0} * (1 + \alpha(T - T_0)) \right]^{-1} \quad (13)$$

$$R(T) = \frac{L}{\sigma(T) * A} = \frac{L}{\sigma_0 * A} * (1 + \alpha(T - T_0)) \quad (14)$$

Onde  $\sigma_0$  é a condutividade elétrica na temperatura ambiente,  $\alpha$  é o coeficiente térmico de resistividade, e  $T_0$  é a temperatura ambiente. Os resultados de temperatura do *Heater* em função da potência aplicada para três diferentes comprimentos de *TOPS* são mostrados na Figura 26.

Figura 26 – Resultados da temperatura do aquecedor em função da potência aplicada para três diferentes comprimentos de *TOPS*



Elaborado pelo autor.

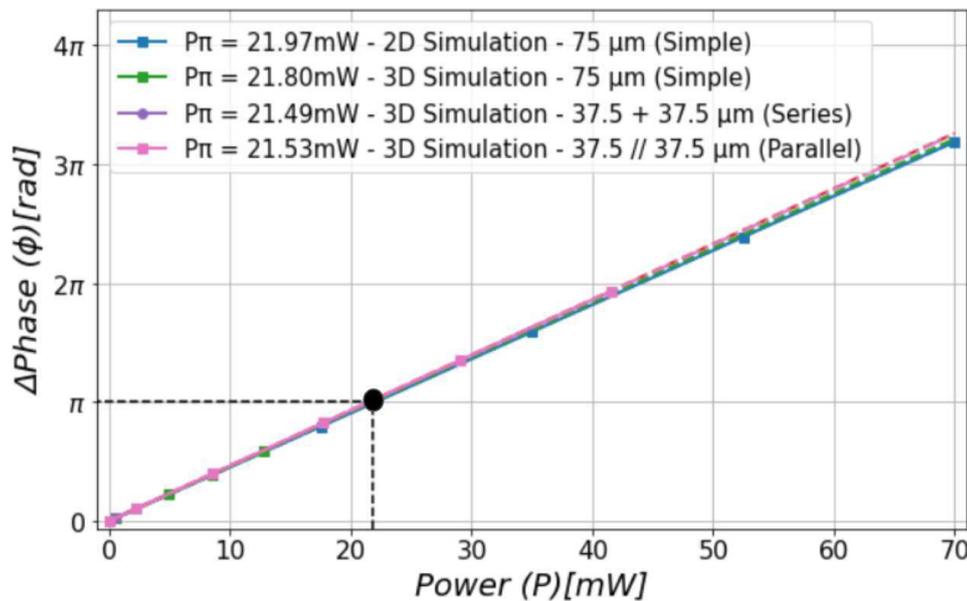
O cálculo da fase deslocada pelo *TOPS* em função da potência aplicada ( $\phi$ ) foi realizado com base na equação 15, a qual é uma aproximação que considera a variação de temperatura do guia de onda de *Si* ( $\Delta T$ ) constante em uma secção transversal do *TOPS*. Assim,  $\Delta T(z)$  representa uma série de valores de temperatura no centro do guia de onda ao longo do comprimento do *TOPS*, obtidos da simulação com o *HEAT*, e  $\frac{dn_{eff}}{dT}$  é o coeficiente

de variação do índice efetivo em função da temperatura, extraído da simulação óptica 2D com a ferramenta *FDE solver* do MODE da Ansys Lumerical.

$$\Delta\phi = \int_0^L \frac{2\pi}{\lambda} \frac{dn_{eff}}{dT} \Delta T(z) dz \quad (15)$$

A obtenção da fase deslocada pelo *TOPS* também pode ser feita com uma simulação óptica 3D com o *FDTD solver* após importar os dados da malha de temperatura 3D, sem a necessidade da aplicação manual da equação 15. No entanto, essa simulação demanda muito tempo, o que a tornou inviável para as diversas análises intermediárias que foram feitas. Alguns testes pontuais foram realizados para demonstrar que o resultado do cálculo aproximado com a equação 15 era, de fato, similar ao resultado da demorada simulação 3D, como mostra a Figura 27.

Figura 27 – Comparação entre a aproximação 2D e a simulação 3D da variação de fase do *TOPS*

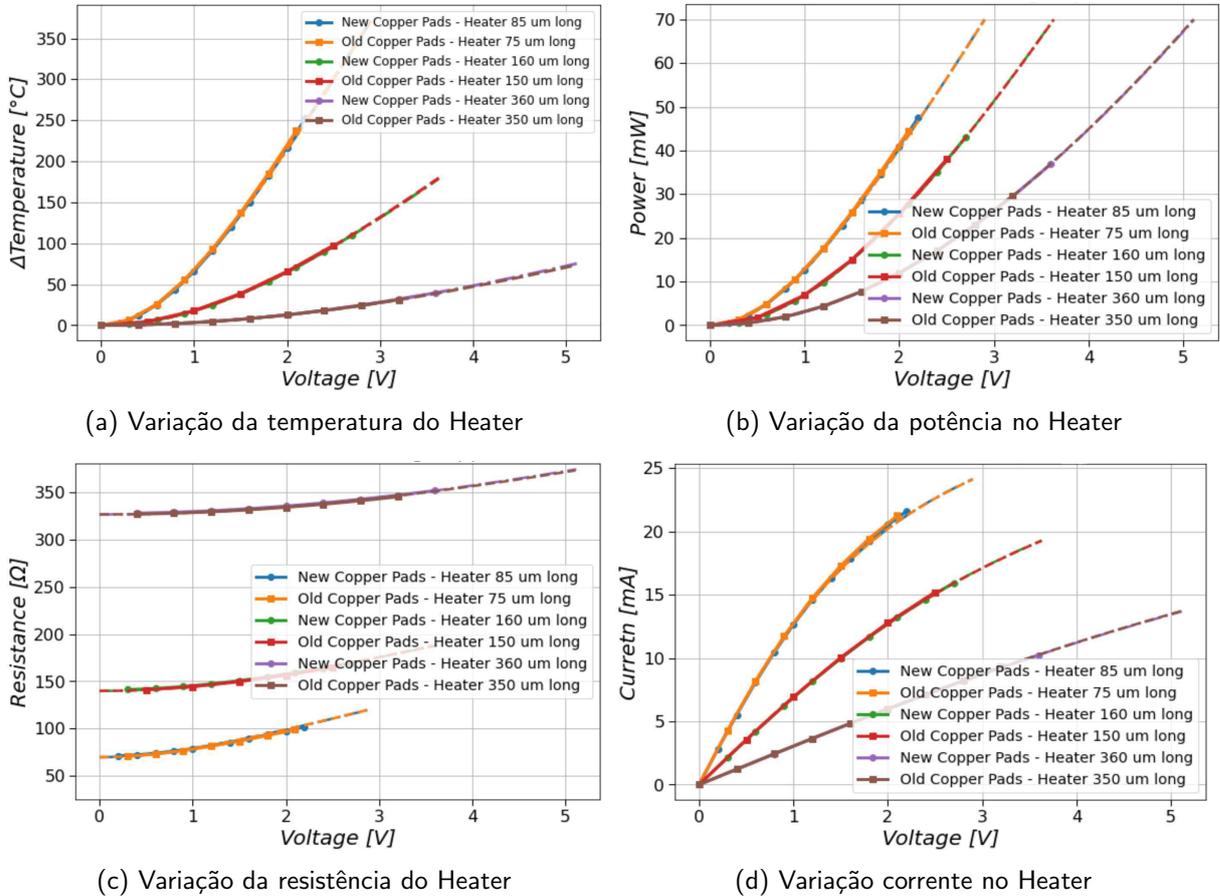


Elaborado pelo autor.

O valor de  $P_\pi$  não muda com a variação do comprimento do *TOPS*: se o comprimento aumenta, a temperatura cai na mesma proporção, e vice-versa, resultando em uma variação de fase nula. Também foram testados arranjos elétricos em série e paralelos, e observou-se que o resultado de fase praticamente não se altera. Por fim, foi desenvolvido um modelo matemático que prevê com grande precisão as respostas elétricas do *TOPS* quando uma tensão  $V$  é aplicada em seus terminais (Figura 28).

Os resultados de temperatura, potência, resistência e corrente em função da tensão para três diferentes comprimentos de *TOPS* são mostrados na Figura 28, onde as curvas tracejadas se referem às previsões do modelo e as curvas contínuas aos resultados de simulação. Como já mencionado, o  $P_\pi$  é considerado o mesmo para todos esses casos.

Figura 28 – Comparação entre os resultados da simulação e do modelo construído para as respostas elétricas dos TOPSs



Elaborado pelo autor.

### 3.5 DESEMPENHO DE HÍBRIDAS EM UM SISTEMA DP-QPSK COM DSP BASEADO NA OPTICOMMPY

A híbrida de 90 graus é um componente essencial em sistemas de comunicação óptica coerente, que possibilita a extração dos componentes em fase ( $I$ ) e quadratura ( $Q$ ) dos sinais ópticos, desempenhando um papel fundamental na detecção e demodulação das informações transmitidas.

Ter informações como perda de inserção ( $IL$ ), desbalanceamento de potência ( $PI$ ),  $CMRR$  e erro de fase é crucial para uma avaliação inicial e categorização de diferentes híbridas. No entanto, apenas com essas informações não é possível prever com clareza qual será o desempenho desses dispositivos quando aplicados em um sistema real de recepção coerente, onde estarão expostos a efeitos como ruído, desvios de frequência e fase, dispersão cromática, mistura de polarizações, efeitos não lineares, dentre outros.

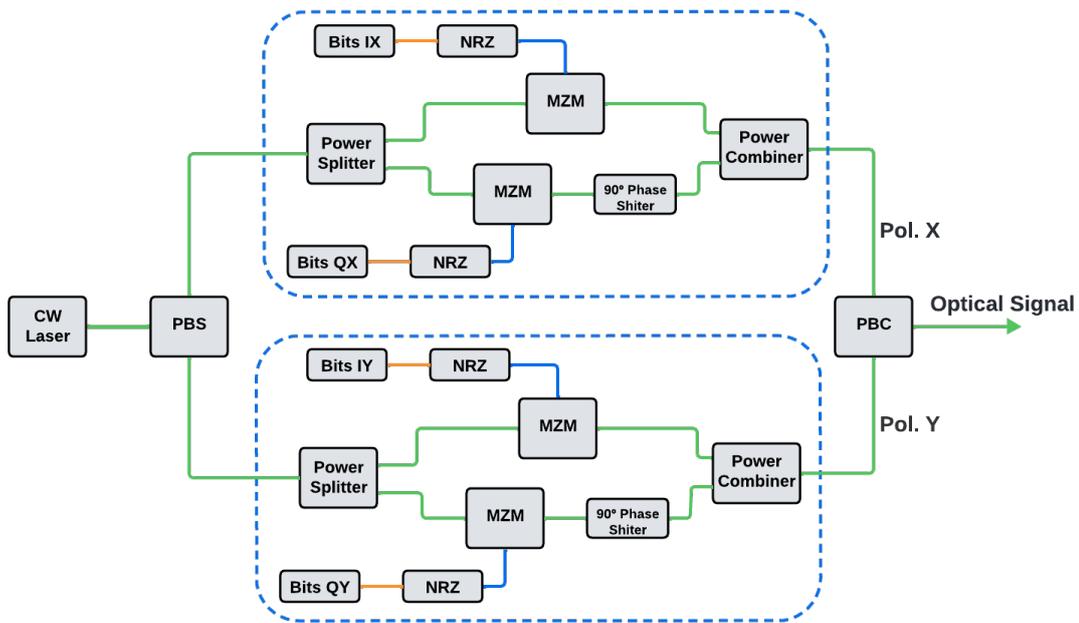
Foi solicitada, como uma nova demanda da empresa, a simulação de um sistema DP-QPSK para verificar o desempenho de diferentes híbridas. O sistema foi simulado no INTERCONNECT solver e testado com três tipos diferentes de híbridas provenientes de

simulações ópticas com *MODE* e *FDTD*, utilizando os seus modelos compactos já disponíveis, sendo uma baseada num par de interferência de  $S_i$  (JEONG; MORITO, 2010), outra num *MMI*  $4 \times 4$  de  $S_i$ , e a outra num *MMI*  $4 \times 4$  de  $S_{i_3N_4}$ . Também foi utilizada uma híbrida ideal como base de comparação nos testes realizados.

A principal métrica de avaliação do sistema utilizada foi a taxa de erro de bit (*Bit Erro Rate* — *BER*) em função da relação sinal-ruído (*Signal-to-Noise Ratio* — *SNR*). Os sinais digitais foram visualizados principalmente utilizando os chamados diagramas de constelação.

O diagrama do transmissor óptico coerente utilizado é mostrado na Figura 29, onde alguns elementos já mencionados, como o modulador *Mach-Zehnder* (*MZM*), o divisor de potência (*power splitter*) e o defasador (*phase shifter*), podem ser vistos. Além dos elementos já mencionados, na figura estão presentes: o laser de onda contínua (*CW Laser*); o *PBS* e o *PBC*, os quais são os respectivos divisores e combinadores de feixe de polarização; e o formatador de pulsos *NRZ* (*Non Return to Zero*). A informação a ser transmitida foi produzida com geradores de sequência binária pseudoaleatória (*PRBS*).

Figura 29 – Diagrama do transmissor óptico coerente.

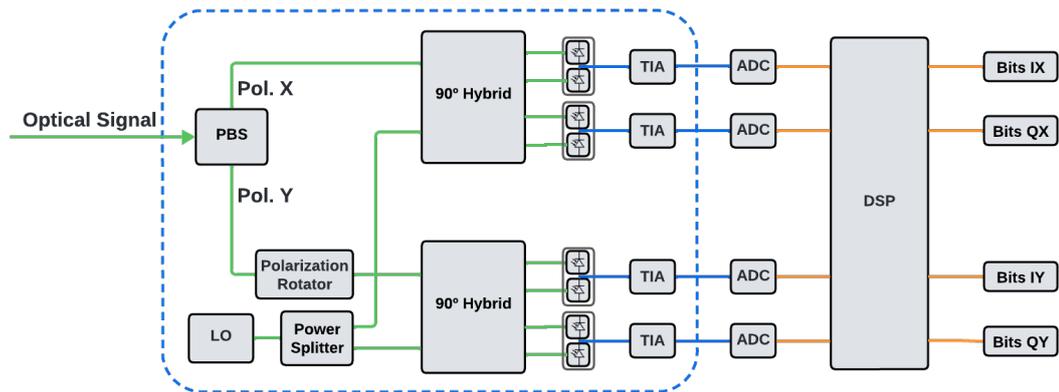


Elaborado pelo autor.

O canal óptico utilizado era composto basicamente de uma fibra óptica e um amplificador óptico. Já o receptor óptico coerente utilizado era formado por duas híbridas de  $90^\circ$  (elemento já mencionado na seção 3.2), divisores de feixe de polarização (*PBS*), amplificadores de transimpedância (*TIA*), um rotador de polarização (*PR*) e um oscilador local (*LO*), como mostra a Figura 30. Além disso, foi montado um processador digital de sinais (*DSP*), implementado com a biblioteca *OptiCommPy* (SILVA et al., 2023).

Até o momento da escrita deste relatório, os efeitos não-lineares e de mistura de polarização na fibra óptica ainda estavam desativados. O canal óptico estava com apenas os efeitos de atenuação, dispersão cromática e ruído de amplificação ativados. Na recepção,

Figura 30 – Diagrama de um receptor óptico coerente com DSP

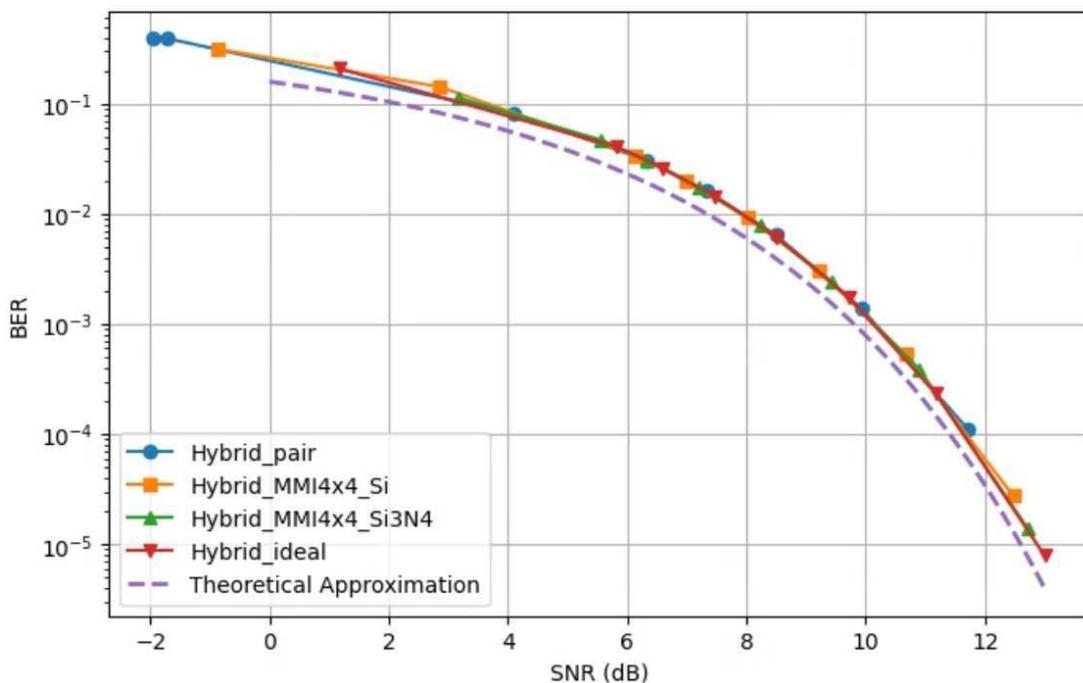


Elaborado pelo autor.

estavam ativados os efeitos de desvio de fase e frequência da portadora, além de ruídos de detecção óptica e amplificação elétrica.

Para simular o efeito de filtragem dos *MZMs* no transmissor, foram utilizados filtros na saída dos formatadores de pulso. No receptor, o efeito da filtragem já era adicionado pelo *TIA*.

Figura 31 – Resultado da simulação B2B em comparação a aproximação teórica esperada.



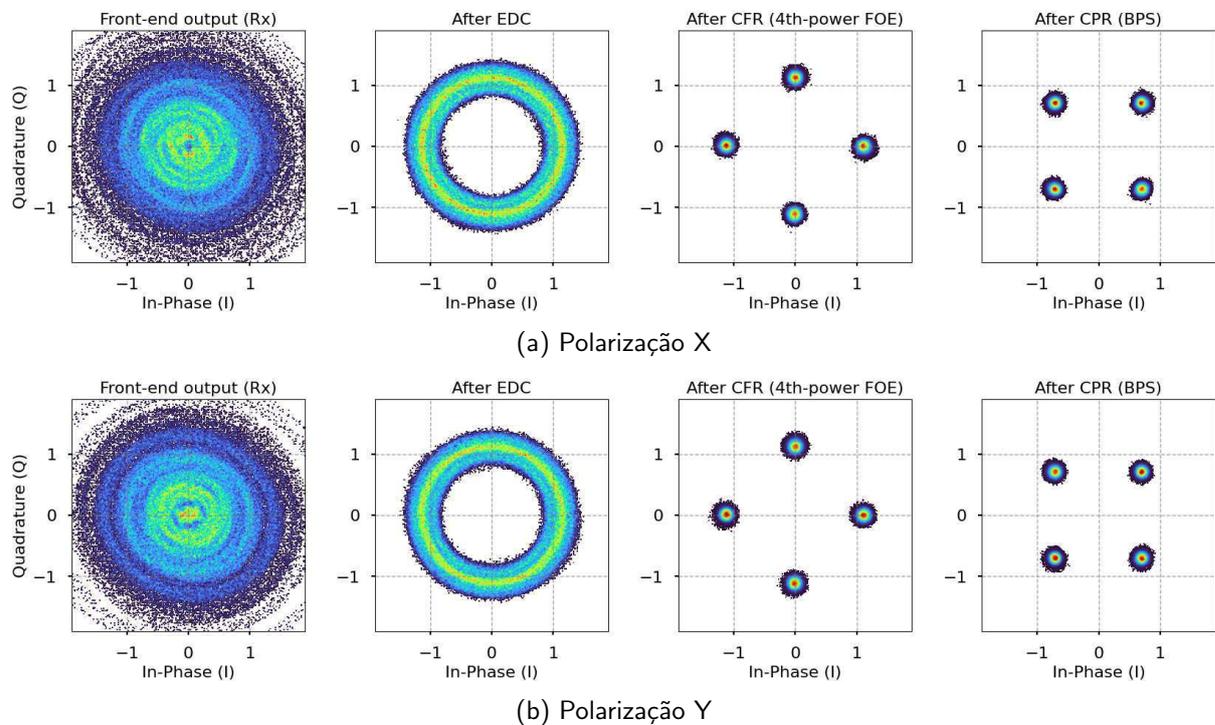
Elaborado pelo autor.

Tendo montado o sistema *DP-QPSK* no *INTERCONNECT*, realizamos uma simulação sem o canal, também conhecida como *Back-to-Back (B2B)*, visando validar o simulador. Essa simulação consiste em conectar diretamente o transmissor e o receptor para analisar os resultados em métricas como a *BER* em função da *SNR*. A Figura 31 mostra as curvas de *BER* obtidas na simulação *B2B* com as diferentes híbridas em comparação com a curva teórica

esperada (SEIMETZ, 2009), onde é possível observar uma boa aproximação entre elas, a qual melhora com o aumento da *SNR*.

Validado o sistema, o canal é adicionado novamente para uma simulação completa. Os resultados dos processos do *DSP* são mostrados na Figura 32, onde é possível ver a constelação dos sinais nas etapas de compensação da dispersão (*EDC*) e recuperação da frequência (*CFR*) e da fase (*CPR*) da portadora óptica. Outras etapas intermediárias são realizadas para garantir o funcionamento do *DSP*: redução do número de amostras para uma amostra por *bit*, sincronização dos sinais com os símbolos transmitidos e correção de possíveis rotações. Na Figura 32, são mostrados apenas os resultados da híbrida baseada no par de interferência, uma vez que esse resultado visual das demais híbridas é bastante similar.

Figura 32 – Etapas de processamento do *DSP* no sistema *DP-QPSK*



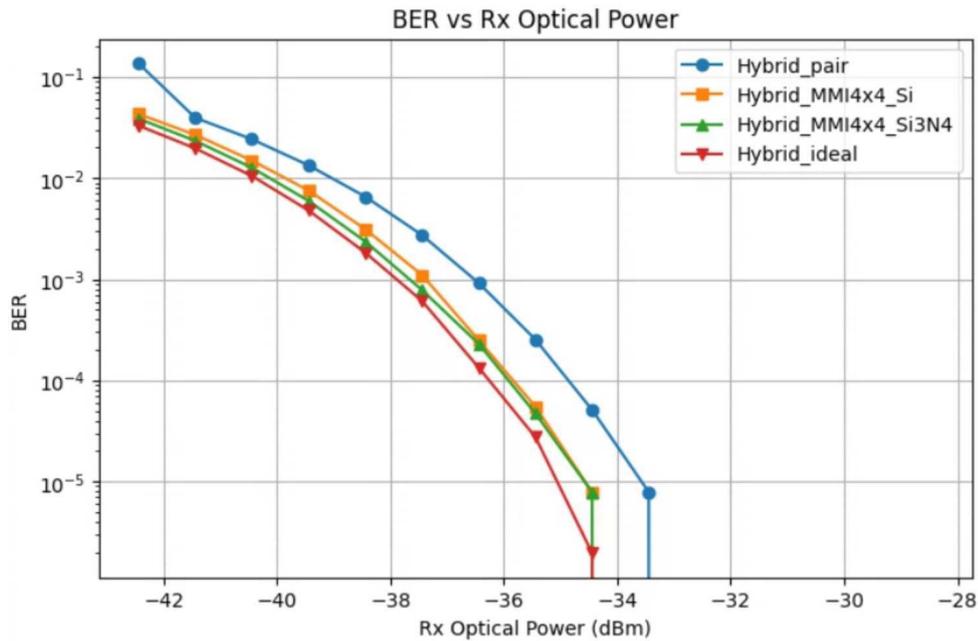
Elaborado pelo autor.

Com o *DSP* funcionando corretamente, podem ser realizados testes de robustez. A Figura 33 mostra como a atenuação do sinal que chega ao receptor coerente afeta a *BER*. A potência que chega ao receptor sem atenuação é de -15 dB. Devido à quantidade relativamente baixa de bits utilizados nesta simulação (130 kbits), erros (*BER* diferente de zero) só são percebidos para potências menores que -33 dB. Uma *BER* de  $10^{-5}$ , por exemplo, significa que, em média, haverá apenas 1 erro em um segmento de 100.000 (cem mil) bits.

### 3.6 ATIVIDADES COMPLEMENTARES

Ao longo do estágio, foram desenvolvidas algumas outras atividades repetitivas e outras corriqueiras. Realizou-se a análise de um *MMI*  $2 \times 2$  de *Si* de geometria pré-pronta,

Figura 33 – Efeito causado pela atenuação do sinal detectado sobre a BER



Elaborado pelo autor.

bem como o projeto de um *MMI*  $2 \times 2$  de  $Si_3N_4$ , bastante semelhante ao caso descrito na seção 3.2. Além disso, foi conduzido um projeto voltado para o estudo de guias de  $Si_3N_4$  e a análise do acoplamento entre eles. Também foram realizados outros trabalhos com guias de  $Si_3N_4$ , incluindo a análise de um acoplador de borda (fibra óptica para guia de onda), a análise de um *DC* com curvaturas tipo Euler e o projeto de um *TOPS* de nitreto de titânio (*TiN*), semelhante ao caso descrito na seção 3.4.

## 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste relatório, são apresentadas as principais atividades realizadas durante o estágio integrado, realizado no Embedded em colaboração com o VIRTUS, totalizando cerca de 1700 horas de trabalho.

O período desse estágio proporcionou uma oportunidade única para aplicar os conhecimentos teóricos adquiridos ao longo do curso de Engenharia Elétrica na UFCG em um ambiente profissional e prático. Principalmente, os conhecimentos adquiridos nas disciplinas da Ênfase de Telecomunicações e na Capacitação em Circuitos Fotônicos em Silício foram essenciais para enfrentar os desafios e contribuir de maneira significativa para os projetos desenvolvidos durante o estágio.

O contato direto com a equipe de engenheiros da empresa permitiu uma imersão intensiva no desenvolvimento de componentes fotônicos, destacando a importância de um ambiente de trabalho rigoroso e enfatizando a precisão e a confiabilidade dos resultados. Essa vivência contribuiu significativamente para o crescimento profissional e pessoal do estagiário, fornecendo uma base sólida para futuras oportunidades no campo da engenharia de telecomunicações e fotônica.

## Referências

- AGRAWAL, G. P. **Fiber-Optic Communication Systems**. Hoboken, New Jersey: John Willer & Sons, Inc., 2010. 13-16 p. Citado na página 4.
- AMIREH, Y. Optical communication systems. 2023. Faculty of Engineering and Natural Sciences, Sabahattin Zaim University. Citado na página 4.
- ANSYS. **Python API overview**. 2019. <<https://optics.ansys.com/hc/en-us/articles/360037824513>>. Acesso em: 28 de abril de 2024. Citado na página 9.
- DING, Y. et al. Thermo-optic tunable optical filters with ghz-bandwidth and flat-top passband on thin film lithium niobate platform. **Optics Express**, v. 30, n. 12, p. 22135–22139, 2022. Citado na página 8.
- DJORDJEVIC, I. et al. **Coding for Optical Channels**. New York, NY: Springer, 2010. 123-125 p. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 6.
- FIBERLABS, I. **Optical Communication Band**. 2023. Disponível em: <<https://www.fiberlabs.com/glossary/optical-communication-band/>>. Citado na página 6.
- JEONG, S.-H.; MORITO, K. Novel optical 90 hybrid consisting of a paired interference based 2 4 mmi coupler, a phase shifter and a 2 2 mmi coupler. **IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology - J LIGHTWAVE TECHNOL**, v. 28, p. 1323–1331, 05 2010. Citado na página 26.
- LALAU-KERALY, C. M. et al. Adjoint-based optimization of electromagnetic devices using shape derivatives. **Optics Express**, v. 21, n. 18, p. 21693–21705, 2013. Citado na página 13.
- LALAU-KERALY, C. M. et al. **lumopt**. 2023. <<https://github.com/chriskeraly/lumopt>>. Citado na página 14.
- LIU, J. et al. Bandwidth-tunable silicon nitride microring resonators. **Chinese Physics B**, Chin. Phys. B, v. 31, n. 1, 2022. Citado na página 19.
- LIU, S.; FENG, J. et al. Thermo-optic phase shifters based on silicon-on-insulator platform: state-of-the-art and a review. **Frontiers of Optoelectronics**, p. 1–21, 2022. Citado na página 8.
- ORLANDI, P. et al. Bandwidth-tunable optical filters in silicon photonics. p. 1–2, 2012. Citado na página 20.
- PROAKIS, J. G.; SALEHI, M. **Digital Communications**. New York, NY: McGraw-Hill, 2008. 3-10 p. Citado na página 5.
- SEIMETZ, M. **High-Order Modulation for Optical Fiber Transmission**. [S.l.]: Springer Berlin Heidelberg, 2009. 244 p. (Springer Series in Optical Sciences). ISBN 9783540937708. Citado na página 28.
- SILVA, E. P. da et al. **OptiCommPy: v0.7.0-alpha**. Zenodo, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.5281/zenodo.10304945>>. Citado na página 26.

- SINATKAS, G. et al. Electro-optic modulation in integrated photonics. **J. Appl. Phys.**, v. 130, p. 010901, 2021. Citado na página 8.
- SOLDANO, L. B.; PENNINGS, E. C. M. Optical multi-mode interference devices based on self-imaging: Principles and applications. **Journal of Lightwave Technology**, v. 13, n. 4, p. 615, April 1995. Citado na página 17.
- SU, Y. et al. Silicon photonic platform for passive waveguide devices: Materials, fabrication, and applications. **Advanced Materials Technologies**, p. 1–19, 2020. Citado na página 7.
- SUN, H. et al. Silicon photonic phase shifters and their applications: A review. **Micromachines**, MDPI, v. 13, n. 9, p. 1509, 2022. Citado na página 22.
- WANG, Y. et al. Deep neural networks for inverse design of nanophotonic devices. **Journal of Lightwave Technology**, IEEE, v. 39, n. 4, p. 1014–1020, 2021. Citado na página 14.
- XU, Y. et al. Ultra-compact power splitters with low loss in arbitrary direction based on inverse design method. **Photonics**, MDPI, v. 8, p. 516, 2021. Citado na página 14.