

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



**THIAGO DE LEMOS BELO**

**PROJETO DE ANEL DE RESSONÂNCIA EM  
FOTÔNICA INTEGRADA**

VITÓRIA

2023

THIAGO DE LEMOS BELO

**PROJETO DE ANEL DE RESSONÂNCIA EM  
FOTÔNICA INTEGRADA**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno Thiago de Lemos Belo, 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.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Schmidt Castellani

VITÓRIA

2023

THIAGO DE LEMOS BELO

## PROJETO DE ANEL DE RESSONÂNCIA EM FOTÔNICA INTEGRADA

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno Thiago de Lemos Belo, 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 06 de outubro de 2023.

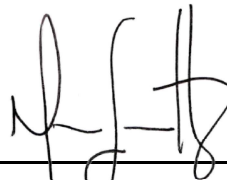
### COMISSÃO EXAMINADORA:



---

**Prof. Dr. Carlos Eduardo Schmidt  
Castellani**


Universidade Federal do Espírito Santo  
Orientador



---

**Prof. Dr. Marcelo Eduardo Vieira  
Segatto**

Universidade Federal do Espírito Santo  
Examinador

Documento assinado digitalmente  
 **PABLO RAFAEL NEVES MARCIANO**  
Data: 28/11/2023 08:03:28-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

**Msc. Pablo Rafael Neves Marciano**  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Examinador

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a minha família, em especial meus pais, Jocemir e Rosana, pelo suporte, compreensão, incentivo ao longo de toda a graduação. Suas palavras de encorajamento foram os pilares que sustentaram meu caminho acadêmico.

Agradeço aos meus amigos e colegas de curso, que compartilharam experiências e conhecimentos, tornando esta jornada mais rica. Em especial, Tiago, Pedro, Eduardo, Marcio, Matheus, Mariana, Antônio e Vinícius.

Agradeço ao meu orientador Carlos Eduardo, pela orientação dedicada e pelo constante incentivo ao longo deste processo. Suas valiosas orientações e sugestões foram fundamentais para o desenvolvimento deste projeto de graduação.

À banca examinadora pela aceitação do convite e pelo tempo investido para leitura e avaliação desse trabalho. À Universidade Federal do Espírito Santo e aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica, por terem desempenhado um papel fundamental em minha jornada educacional.

## RESUMO

O presente projeto de graduação propõe o desenvolvimento e síntese de um anel de ressonância em fotônica integrada por meio da ferramenta FDTD, analisando como a alteração de parâmetros construtivos, como raio de curvatura, largura de guia de onda e distância de acoplamento, interferem na resposta em frequência e no FSR. Com isso, espera-se compreender como o anel de ressonância se comporta a partir dessas variações, permitindo que a construção desses dispositivos seja facilitada e melhorada. Como resultado, se obteve a resposta em frequência de três tipos de anéis de ressonância, de caminho duplo, acoplado em série e acoplado em paralelo, para diversas mudanças construtivas e configuracionais, sendo possível analisar como essas mudanças impactaram na maneira que cada anel se comporta, com o anel acoplado em série se mostrando uma opção bastante versátil e customizável, o anel acoplado em paralelo com bom funcionamento para filtros do tipo banda, e por fim, o anel de caminho duplo sendo uma opção mais simples porém igualmente eficiente.

**Palavras-chave:** Anel de Ressonância; Fotônica Integrada; Fotônica em Silício.

## ABSTRACT

This graduation project proposes the development and synthesis of an integrated photonics ring resonator using the FDTD tool, analyzing how changes in constructive parameters, such as curvature radius, waveguide width, and coupling distance, affect the frequency response and FSR. The goal is to understand how the ring resonator behaves with these variations, facilitating and improving the construction of these devices. As a result, the frequency response of three types of ring resonators was obtained: double-bus, series-coupled, and parallel-coupled rings, for various constructive and configurational changes, making possible to analyze how these changes impacted the behavior of each ring. The series-coupled ring proved to be a highly versatile and customizable option, the parallel-coupled ring performed well for band-type filters, and the double-bus ring, while simpler, was equally efficient.

**Keywords:** Ring Resonator; Integrated Photonics; Silicon Photonics.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura de um PIC. . . . .	16
Figura 2 – Integração dos PIC's de InP e SiPh com lasers e amplificadores. . . . .	18
Figura 3 – Espectro de operação do InP, SiN e SiPh. . . . .	19
Figura 4 – Estrutura de uma fibra óptica. . . . .	21
Figura 5 – Tipos de estrutura de guias de onda em fotônica integrada. . . . .	21
Figura 6 – Interferômetro de Mach-Zehnder. . . . .	23
Figura 7 – Ilustração esquemática de um modulador do tipo linha, modulador do tipo anel e modulador do tipo Mach-Zehnder. . . . .	25
Figura 8 – Anel de ressonância de caminho único e com dois caminhos, respectivamente. . . . .	26
Figura 9 – Luz em $1,56 \mu m$ viajando ao longo da guia de acesso e em $1,55 \mu m$ acoplada no ressonador, respectivamente. . . . .	27
Figura 10 – Anéis de ressonância acoplados em série e paralelo, respectivamente. . . . .	28
Figura 11 – Propriedades construtivas de um anel de ressonância. . . . .	28
Figura 12 – Espectro de transmissão de um anel de ressonância. . . . .	30
Figura 13 – Transmissão do anel de ressonância para tempos de simulação de 1000, 4000, 7000 e 10000 fs. . . . .	34
Figura 14 – Transmissão do anel de ressonância para diferentes valores de precisão da malha. . . . .	35
Figura 15 – Estrutura utilizada no Lumerical para um anel com comprimento de acoplamento de $2.5 \mu m$ , <i>gap</i> de $0.1 \mu m$ , raio de $3 \mu m$ e demais parâmetros da tabela 1. . . . .	36
Figura 16 – Estrutura utilizada no Lumerical para um anel com raio de $7 \mu m$ , <i>gap</i> de $0.1 \mu m$ e demais parâmetros da tabela 3. . . . .	38
Figura 17 – Estrutura utilizada no Lumerical para anéis acoplados em série. . . . .	39
Figura 18 – Estrutura com três e cinco anéis acoplados em série. . . . .	40
Figura 19 – Estrutura com três e cinco anéis acoplados em paralelo. . . . .	42
Figura 20 – Gráfico do comprimento de acoplamento x coeficiente de acoplamento. . . . .	44
Figura 21 – Gráfico do comprimento de acoplamento x FWHM. . . . .	44
Figura 22 – Gráfico do comprimento de onda x transmissão para anel com comprimento de acoplamento de $1 \mu m$ . . . . .	45
Figura 23 – Gráfico do comprimento de acoplamento x Q-factor. . . . .	45
Figura 24 – Gráfico do <i>Gap</i> x Acoplamento. . . . .	46
Figura 25 – Gráfico do <i>Gap</i> x Q-factor. . . . .	47
Figura 26 – Gráfico do Comprimento de onda x Transmissão normalizada para anel com raio de $3 \mu m$ . . . . .	48

Figura 27 – Gráfico do Raio x FSR. . . . .	48
Figura 28 – Gráfico do Raio x Acoplamento. . . . .	49
Figura 29 – Gráfico do Comprimento de onda x Transmissão normalizada para anéis de raio 1 e 4 $\mu m$ . . . . .	49
Figura 30 – Gráfico do <i>Gap</i> x FWHM. . . . .	50
Figura 31 – Gráfico do <i>Gap</i> x Q-factor. . . . .	51
Figura 32 – Gráfico do Comprimento de onda x Transmissão normalizada para anel acoplado com <i>gap</i> de 0.05 $\mu m$ . . . . .	51
Figura 33 – Gráfico do Raio x Q-factor. . . . .	52
Figura 34 – Gráfico do Comprimento de onda x Transmissão normalizada para anéis de raio 1 e 4 $\mu m$ . . . . .	53
Figura 35 – Gráfico da Quantidade de Anéis x FWHM. . . . .	54
Figura 36 – Gráfico da Quantidade de Anéis x Q-factor. . . . .	54
Figura 37 – Gráfico do Raio x FWHM. . . . .	55
Figura 38 – Gráfico do Comprimento de onda x Transmissão normalizada para anéis de raio 1 e 4 $\mu m$ . . . . .	55
Figura 39 – Gráfico do <i>Gap</i> x FWHM. . . . .	56
Figura 40 – Gráfico da Quantidade de anéis x FWHM. . . . .	57
Figura 41 – Gráfico da Quantidade de anéis x Q-factor. . . . .	58
Figura 42 – Gráfico do Comprimento de Onda x Transmissão normalizada para quatro anéis acoplados em paralelo. . . . .	58



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros utilizados na simulação de comprimento de acoplamento. . .	36
Tabela 2 – Parâmetros utilizados na simulação do <i>gap</i> . . . . .	37
Tabela 3 – Parâmetros utilizados na simulação do raio. . . . .	37
Tabela 4 – Parâmetros utilizados na simulação do <i>gap</i> para anéis acoplados em série.	38
Tabela 5 – Parâmetros utilizados na simulação do raio para anéis acoplados em série.	39
Tabela 6 – Parâmetros utilizados na simulação dos anéis acoplados em série. . . .	40
Tabela 7 – Parâmetros utilizados na simulação dos anéis acoplados em paralelo . .	41
Tabela 8 – Parâmetros utilizados na simulação dos anéis acoplados em paralelo . .	41
Tabela 9 – Parâmetros utilizados na simulação dos anéis acoplados em paralelo . .	41
Tabela 10 – Tempo para a realização das simulações das estruturas propostas . . .	42

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CI	Circuito Integrado
CMOS	<i>Complementary metal oxide semiconductor</i>
FDTD	<i>Finite-difference time-domain</i>
FSR	<i>Free spectral range</i>
FWHM	<i>Full Width at Half Maximum</i>
InP	Fosfeto de Índio
Labtel	Laboratório de Telecomunicações
MZM	<i>Modulador Mach-Zehnder</i>
PIC	<i>Photonic Integrated Circuits</i>
PML	<i>Perfectly Matched Layer</i>
SOI	<i>Silicon-on-Insulator</i>
SiN	Nitreto de Silício
SiPh	Fotônica em Silício
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
<b>1.1</b>	<b>Apresentação</b>	<b>12</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivo geral</b>	<b>13</b>
1.2.1	Objetivos Específicos	14
<b>1.3</b>	<b>Metodologia e etapas de desenvolvimento</b>	<b>14</b>
<b>1.4</b>	<b>Estrutura do texto</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>FOTÔNICA INTEGRADA</b>	<b>16</b>
<b>2.1</b>	<b>Circuitos fotônicos integrados</b>	<b>16</b>
2.1.1	Materiais utilizados em PICs	17
2.1.1.1	Fosfeto de Índio	17
2.1.1.2	Nitreto de Silício	18
2.1.1.3	Fotônica em Silício	19
<b>2.2</b>	<b>Componentes e elementos presentes em PIC's</b>	<b>20</b>
2.2.1	Guias de Onda	20
2.2.2	Interferometria	22
2.2.3	Filtros Ópticos	23
2.2.4	Moduladores	24
<b>3</b>	<b>ANEL DE RESSONÂNCIA</b>	<b>26</b>
<b>3.1</b>	<b>Propriedades de um anel de ressonância</b>	<b>27</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA E ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO</b>	<b>32</b>
<b>4.1</b>	<b>FDTD</b>	<b>32</b>
<b>4.2</b>	<b>Estruturas analisadas</b>	<b>35</b>
4.2.1	Anel de caminho duplo	36
4.2.1.1	Variação do comprimento de acoplamento	36
4.2.1.2	Variação do <i>gap</i>	37
4.2.1.3	Variação do raio	37
4.2.2	Anéis acoplados em série	38
4.2.2.1	Variação do <i>gap</i> entre anéis	38
4.2.2.2	Variação do raio	39
4.2.2.3	Variação da quantidade de anéis acoplados	39
4.2.3	Anéis acoplados em paralelo	40
4.2.3.1	Variação do raio	40
4.2.3.2	Variação do <i>gap</i> entre anéis	41

4.2.3.3	Variação da quantidade de anéis acoplados . . . . .	41
4.3	<b>Alocação de recursos . . . . .</b>	<b>42</b>
5	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES . . . . .</b>	<b>43</b>
5.1	Resultados das simulações da seção 4.2.1.1: <b>Variação do comprimento de acoplamento para anel de caminho duplo . . . . .</b>	<b>43</b>
5.2	Resultados das simulações da seção 4.2.1.2: <b>Variação do <i>gap</i> para anel de caminho duplo . . . . .</b>	<b>46</b>
5.3	Resultados das simulações da seção 4.2.1.3: <b>Variação do raio para anel de caminho duplo . . . . .</b>	<b>47</b>
5.4	Resultados das simulações da seção 4.2.2.1: <b>Variação do <i>gap</i> entre anéis para anéis acoplados em série . . . . .</b>	<b>50</b>
5.5	Resultados das simulações da seção 4.2.2.2: <b>Variação do raio para anéis acoplados em série . . . . .</b>	<b>52</b>
5.6	Resultados das simulações da seção 4.2.2.3: <b>Variação da quantidade de anéis acoplados para anéis acoplados em série . . . . .</b>	<b>53</b>
5.7	Resultados das simulações da seção 4.2.3.1: <b>Variação do raio para anéis acoplados em paralelo . . . . .</b>	<b>54</b>
5.8	Resultados das simulações da seção 4.2.3.2: <b>Variação do <i>gap</i> entre anéis para anéis acoplados em paralelo . . . . .</b>	<b>56</b>
5.9	Resultados das simulações da seção 4.2.3.3: <b>Variação da quantidade de anéis acoplados para anéis acoplados em paralelo . . . . .</b>	<b>57</b>
6	<b>CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS . . . . .</b>	<b>59</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>61</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Apresentação

A fotônica tem se desenvolvido nas últimas décadas como uma tecnologia de extrema importância para áreas como tecnologia da informação, telecomunicações e sensores, sendo que nesse mesmo campo outra área vem ganhando grande reconhecimento, a fotônica integrada (THYLÉN; WOSINSKI, 2014). A compactação de dispositivos ópticos sempre foi algo muito investigado pois possibilitaria a expansão de suas áreas de aplicação, visto que dispositivos convencionais geralmente apresentam um tamanho muito elevado, variando na ordem de centímetros até metros, dificultando a sua utilização em diversos setores.

A integração fotônica permite que diversos dispositivos sejam incorporados em um único chip, como um circuito integrado eletrônico, o CI. Como visto na eletrônica convencional, fabricar um chip é muito mais econômico do que fabricar componentes ópticos individuais e depois realizar a integração entre eles (INFINERA, 2021). Porém, ao contrário dos CI's eletrônicos, a fotônica integrada ainda caminha em direção a um avanço em seus processos de produção. Enquanto um chip fotônico apresenta um número de dispositivos que varia da ordem das dezenas até as centenas, muito devido a natureza dos seus sinais, a sua contraparte eletrônica, apresentam transistor na ordem de bilhões (THYLÉN; WOSINSKI, 2014). Entretanto os chips fotônicos apresentam grandes vantagens que fazem valer seu investimento atual, tanto em comparação aos dispositivos ópticos convencionais quanto aos circuitos integrados eletrônicos.

Em um chip eletrônico existem limitações como a velocidade de operação, afetando a quantidade de informações que podem ser transmitidas, já na fotônica integrada é possível ter alta velocidade na troca de informação, em muitos casos até mesmo sem interferência. O consumo de energia também é reduzido, além de apresentar um melhor desempenho devido às perdas de acoplamento minimizadas ao conectar funções ópticas com guias de onda dentro do chip, em oposição ao acoplamento óptico entre componentes, o que se mostra uma grande vantagem em comparação aos dispositivos ópticos convencionais, onde temos perdas que podem ser significativas devido as diversas conexões (INFINERA, 2021; THOMSON et al., 2016).

Atualmente o número de dispositivos presentes em um chip fotônico vem crescendo exponencialmente graças a utilização de materiais que apresentam um índice refração mais elevado, como o silício (THYLÉN; WOSINSKI, 2014). Esse alto índice de refração permite um melhor confinamento da luz em guias de onda ópticos, podendo criar assim dispositivos que apresentem mais eficiência, que aliado a grande diminuição de atenuação apresentada

nos últimos anos, permite dimensões de guia de onda submicrométricas, curvas apertadas e espaçamento estreito e, por sua vez, possibilita o empacotamento denso de funções ópticas na superfície de um chip (BOGAERTS; CHROSTOWSKI, 2018).

O silício é um dos materiais que vem desempenhando papel fundamental na expansão da pesquisa em fotônica integrada, justamente por apresentar uma série de vantagens. A compatibilidade com CMOS (do inglês *Complementary metal oxide semiconductor*) é um dos pontos chave para o sucesso deste material, pois permite utilizar a infraestrutura já existente na fabricação de CI's eletrônicos, obtendo assim uma fabricação de baixo custo e com grandes volumes (BOGAERTS; CHROSTOWSKI, 2018).

Devido a crescente pesquisa em fotônica integrada, tentando encontrar materiais e métodos mais eficientes, a busca por dispositivos que permitam a implantação dessa plataforma também vem aumentando vertiginosamente. Dispositivos como o interferômetro Mach-Zehnder e anéis de ressonância vem se tornando cada vez mais peças habilitadoras pois apresentam uma série de aplicações e vantagens, que são fundamentais para a área. O anel de ressonância em especial vem desempenhando para a fotônica integrada, e principalmente para a fotônica em silício, a quebra de novas barreiras graças a diversidade de funções que podem ser implementadas, como filtros, switches, linhas de atraso e moduladores, trazendo com si um tamanho pequeno e baixo consumo de energia, sendo ideal para as mais diversas aplicações (BOGAERTS et al., 2012).

Assim, tentando compreender melhor o funcionamento desses dispositivos, esse trabalho tem como principal justificativa realizar a síntese de anéis de ressonância, buscando parâmetros chaves que facilitem seu projeto, compreendendo como alterações desses parâmetros alteram a sua resposta em frequência e como alinhar os resultados obtidos a diferentes tipos de aplicações.

## 1.2 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho consiste no projeto de um anel ressonância por meio da ferramenta FDTD do *software* Lumerical, analisando como as mudanças de características construtivas do anel alteram sua resposta em frequência.

### 1.2.1 Objetivos Específicos

- Apresentar os conceitos e componentes presentes em um chip fotônico.
- Desenvolver diferentes estruturas de anéis de ressonância a partir da alteração de parâmetros construtivos, como raio e distância de acoplamento, por meio do *software* Lumerical.
- Levantar as curvas de transmissão para as diferentes estruturas.
- Comparar os diferentes resultados por meio de métricas como o *Free spectral range*, *full width at half maximum* e *Q-factor*.

### 1.3 Metodologia e etapas de desenvolvimento

Segundo Prodanov e Freitas (2013) existem diversas maneiras de se classificar uma pesquisa científica. Do ponto de vista de sua natureza, esse projeto classifica-se como pesquisa aplicada, pois tem como objetivo gerar conhecimento para compreender como a variação de parâmetros afeta a resposta de um anel de ressonância.

Do ponto de vista de seus objetivos, é uma pesquisa explicativa, onde teremos manipulação e controle de diversas variáveis para a síntese do projeto, e experimental quanto aos procedimentos técnicos.

De acordo com abordagem do problema, podemos classificar este projeto como pesquisa quantitativa, pois podemos traduzir os resultados em números e realizar a classificação e análise deles.

Inicialmente foi realizado um estudo teórico e revisão bibliográfica da fotônica integrada e dos circuitos fotônicos integrados, levantando aspectos históricos, principais materiais utilizados, elementos passivos e ativos mais comuns em circuitos fotônicos, afim de se obter uma boa base teórica do tema. Em paralelo, foi realizado a modelagem do anel de ressonância por meio do FDTD presente no *software* Lumerical, levantando os parâmetros que serão utilizados para avaliação. Por fim, com os parâmetros selecionados, foi realizado as simulações do modelo do anel, levantando a resposta em frequência, avaliando e comparando os resultados obtidos.

## **1.4 Estrutura do texto**

No Capítulo 1 foram apresentados a introdução e contextualização do problema de pesquisa e os objetivos do projeto. No Capítulo 2, é feita uma revisão bibliográfica com conceitos importantes para entendimento do trabalho relacionados aos circuitos fotônicos integrados, como principais materiais e elementos presentes em chip. No Capítulo 3, é apresentado o componente principal deste projeto de graduação, mostrando funcionamento, aplicações e desenvolvimento dos anéis de ressonância. No Capítulo 4, é apresentado a metodologia e as etapas de desenvolvimento adotadas neste trabalho, mostrando as configurações das simulações e as principais estruturas investigadas. No Capítulo 5 são descritos os resultados obtidos e realizado uma comparação entre as estruturas feitas. Por fim, no Capítulo 6 são mostradas conclusões e feitas sugestões para trabalhos futuros.

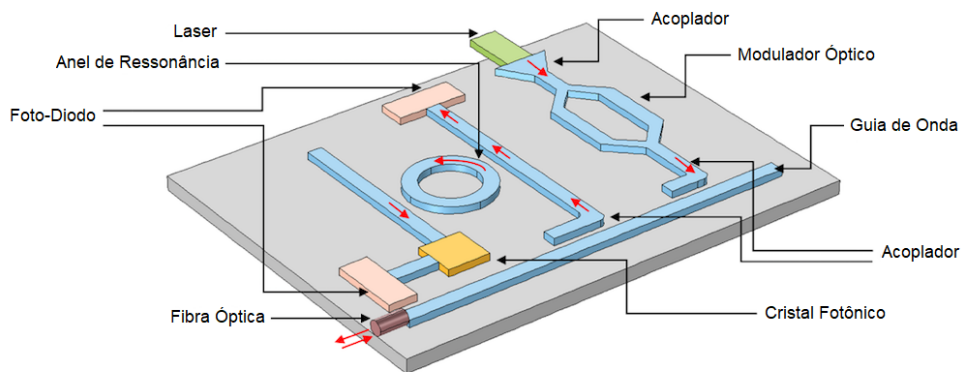


## 2 FOTÔNICA INTEGRADA

### 2.1 Circuitos fotônicos integrados

A base da fotônica integrada são os *photonic integrated circuits*, PIC's, chips que contém vários componentes fotônicos integrados. Em um circuito integrado convencional, o fluxo de elétrons interage com transistores, enquanto que em um chip fotônico, os fótons passam por componentes ópticos como moduladores, filtros ópticos e guias de onda. A figura 1 mostra os diversos componentes ópticos que podem estar presentes em um PIC.

Figura 1 – Estrutura de um PIC.



Fonte: Comsol (2017).

Nota: Adaptado e traduzido pelo autor.

As guias de onda permitem interligar esses vários componentes, que apresentam características distintas, em um mesmo substrato, oferecendo uma solução robusta e miniaturizada. Os componentes presentes no chip podem ser de natureza ativa ou passiva. Entre os componentes passivos podemos citar os filtros, acopladores e ressonadores, para os componentes ativos temos os moduladores, laser e amplificadores.

Os circuitos fotônicos integrados têm uma ampla gama de aplicações, sendo as principais o processamento de sinal óptico, comunicações ópticas e sensoriamento. Os PIC's podem ser usados para processar sinais ópticos, como em filtros ópticos, moduladores, amplificadores. São amplamente utilizados em sistemas de comunicação óptica de alta velocidade, como em data centers e redes de telecomunicações, permitindo transmissões de dados de alta velocidade, com alta eficiência e baixa perda de sinal. Por fim, os PIC's podem ser usados em sensores ópticos para detecção de temperatura, pressão, deformação, vibração e outras

propriedades físicas (BOGAERTS; CHROSTOWSKI, 2018).

A fotônica integrada em geral ainda apresenta uma série de desafios a serem superados. Um desses desafios está relacionando ao *packing*, ou embalagem, desses dispositivos. A embalagem de dispositivos fotônicos integrados apresenta inúmeros desafios tecnológicos, de fabricação e de custos. Historicamente, a embalagem é aceita como um custo alto no processo geral de fabricação, geralmente consumindo mais de 30% do custo total de fabricação. Outro processo caro e complexo é o *assembly*, que se refere ao processo de montagem de vários componentes ópticos em um único substrato. A montagem de chips em fotônica integrada é um processo complexo que exige um alto grau de precisão e controle. Isso ocorre porque os componentes ópticos são altamente sensíveis a mudanças ambientais, como vibrações, variações de temperatura e umidade. Sendo assim, é necessário um ambiente controlado, equipamentos especializados e técnicas avançadas de alinhamento e fixação dos componentes (IPSR, 2020).

### 2.1.1 Materiais utilizados em PICs

Diversos materiais são utilizados em aplicações envolvendo PIC's, como niobato de lítio (QI; LI, 2020) e polímeros (ZHANG et al., 2013), porém alguns deles tem chamado grande atenção devido a facilidade de integração, fabricação e versatilidade. Entre as principais plataformas temos:

1. Fosfeto de Índio (InP)
2. Nitreto de Silício (SiN)
3. Fotônica em Silício (SiPh)

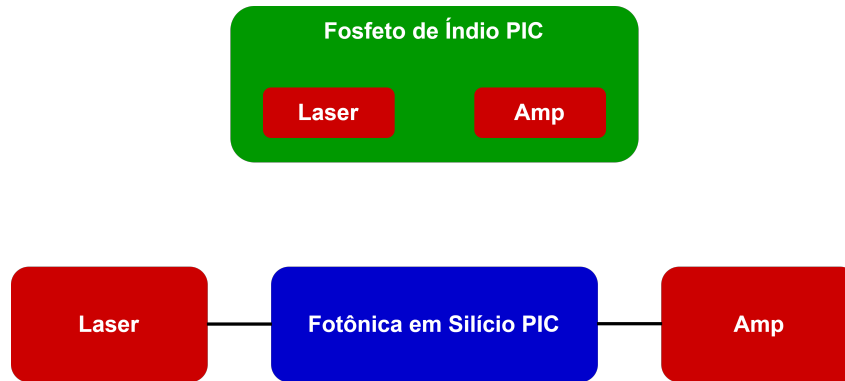
#### 2.1.1.1 Fosfeto de Índio

Dentre todas as principais plataformas, o fosfeto de índio (InP) é considerado uma das plataformas PIC mais popular e avançada (ARAFIN; COLDREN, 2017). O InP possui várias propriedades ópticas que são consideradas ideais para a fotônica integrada, como o melhor desempenho em funções como modulação e fotodetecção.

Outra vantagem para os PIC's projetados com fosfeto de índio é a capacidade de integração com amplificadores ópticos e lasers, ou seja, uma integração monolítica. PIC's construídos

utilizando a plataforma da fotônica em silício não apresentam essa mesma capacidade, sendo necessário uma integração híbrida ou heterogênea, na qual um bloco ou camada de ganho é incorporado a uma plataforma PIC passiva, conforme figura 4 (INFINERA, 2021).

Figura 2 – Integração dos PIC's de InP e SiPh com lasers e amplificadores.



Fonte: Produção do próprio autor.

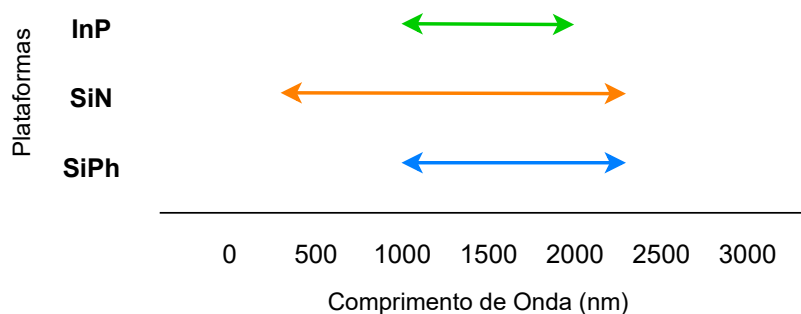
Embora InP seja um material altamente eficiente para a fotônica integrada, o que justifica seu domínio em soluções para a mesma, ele também tem algumas desvantagens em relação aos seus concorrentes, como o fato de ser um material mais caro do que o silício, o que pode tornar os dispositivos baseados em InP mais caros de produzir em larga escala, ser um material pouco estabelecido na indústria de semicondutores e por fim sua menor compatibilidade com dispositivos eletrônicos em silício (ARAFIN; COLDREN, 2017).

### 2.1.1.2 Nitreto de Silício

O nitreto de silício é um material relativamente recente na fotônica integrada, sendo suas principais características a baixa atenuação, ampla janela de operação, alta resistência térmica e química, além de ser um material já conhecido na indústria de semicondutores (BLUMENTHAL et al., 2018).

O SiN apresenta uma janela de operação que vai de 400 nm até 2350 nm, sendo uma opção viável para implementar PIC's que trabalham na faixa abaixo de 1100 nm, onde plataformas como o InP e SiPh não conseguem operar ou apresentam baixa performance, como pode ser visto na figura 3 (BAETS et al., 2016). Outra vantagem na utilização do SiN é a baixa perda por atenuação, enquanto guias de onda baseadas em SOI (do inglês *silicon-on-insulator*) apresentam perdas de 1 a 2 dB/cm, as perdas por atenuação em guias de SiN ficam em torno de 1 dB/m, podendo alcançar valores menores utilizando configurações específicas para as guias de onda (BAETS et al., 2016).

Figura 3 – Espectro de operação do InP, SiN e SiPh.



Fonte: Produção do próprio autor.

A flexibilidade de fabricação também é bastante grande, permitindo por exemplo combinar guias de onda SiN com guias de onda SOI em um mesmo chip, combinando assim os recursos exclusivos de ambas as plataformas. Podemos dizer que o nitreto de silício vem se tornando uma plataforma alternativa ao InP e SiPh, apresentando ótimas vantagens e recursos que complementam essas outras plataformas.

### 2.1.1.3 Fotônica em Silício

A fotônica em silício é umas das tecnologias mais promissoras quando nos referimos a circuitos fotônicos integrados, principalmente por ter o silício como matéria base para a fabricação dos PIC's. O silício é um dos materiais semicondutores mais bem estabelecidos nas indústrias de eletrônica, sendo amplamente utilizado na fabricação de circuitos integrados.

A fotônica em silício aproveita a infraestrutura existente graças a compatibilidade com o processo complementar de óxido metálico-semicondutor (CMOS, do inglês *Complementary metal-oxide-semiconductor*), permitindo que PIC's em SiPh sejam fabricados usando a infraestrutura de fundição já estabelecida. Como os wafers de silício apresentam baixo custo (por unidade de área) e uma qualidade superior em comparação com outros materiais semicondutores, é possível oferecer chips com preços equivalentes aqueles vistos na eletrônica e uma produção em massa de alta eficiência (JALALI; FATHPOUR, 2006). Outro aspecto importante no uso do CMOS é a capacidade de integrar funções fotônicas e eletrônicas em um mesmo chip, permitindo a criação de sistemas fotônicos integrados altamente compactos e eficientes em termos energéticos.

Podemos dizer que o estudo de aplicações do silício na área da fotônica não são recentes, já são realizadas pesquisas há décadas sobre como utilizar esse material de maneira eficiente

como componentes ópticos. Em 1985, Soref já havia demonstrado que esse material poderia ser utilizado na fabricação de guias de onda e dispositivos baseados nessas guias, como moduladores e *splitters* ópticos, além de apresentar bom desempenho nos comprimentos de onda próximos a 1,3 e 1,6  $\mu\text{m}$  (SOREF; LORENZO, 1985).

A compatibilização do SOI e o potencial de integração com a eletrônica impulsionaram ainda mais a plataforma, possibilitando o surgimento de novas maneiras de se trabalhar com o silício. Em 1989 já era possível obter uma perda de 4 dB/cm para guias de ondas ópticas fabricados em SIMOX, um novo substrato de silício (DAVIES et al., 1989). Em menos de 3 anos, Schmidtchen et al. relataram uma perda de 0,4 dB/cm para um guia de ondas de reforço em silício (SCHMIDTCHEN et al., 1991). Estes estudos demonstraram que o silício era de fato um material viável para guias de ondas, pois era visível que a perda por propagação estava diminuindo consideravelmente com novos estudos. Podemos dizer atualmente que está projeção estava correta, onde temos guias de onda com perdas que variam de 1 a 2 dB/cm.

Entretanto, apesar de toda a evolução na utilização do sílico como base em circuitos fotônicos, ainda existem grandes desafios em sua aplicação. Entre esses desafios podemos citar: Integração com lasers e amplificadores, sensibilidade a altas temperaturas e difícil acoplamento com fibras ópticas.

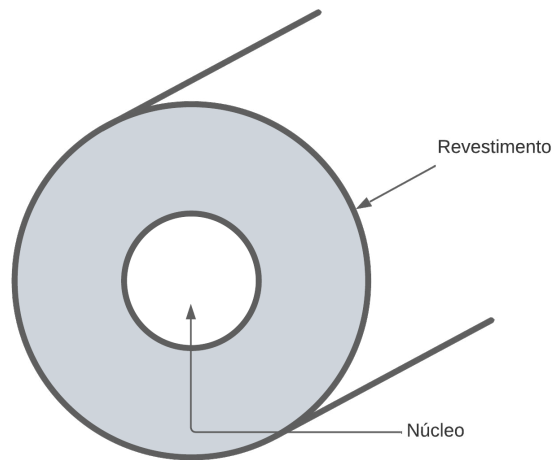
## 2.2 Componentes e elementos presentes em PIC's

### 2.2.1 Guias de Onda

As guias de onda são as estruturas mais básicas utilizadas em circuitos fotônicos. Sua função é confinar e direcionar as onda eletromagnéticas para uma saída, dispositivo ou fotodetector, através de uma trajetória definida, fornecendo uma maior largura de banda e uma menor atenuação, tentando dissipar o mínimo possível de energia. A maioria das guias de onda funcionam pelo princípio de que, quando a luz passa através de uma região de índice de refração mais elevado, ela é desviada em direção a essa região, logo, se essa região for coberta com um índice de refração menor, a luz ficará confinada dentro da região mais elevada. Um dos principais exemplos de guia de onda é a fibra óptica, a figura 4 mostra a estrutura de uma fibra, onde é possível identificar a camada com índice de refração mais elevado e a camada externa, com o índice de refração menor.

Existem diferentes classificações e configurações de guias que podem ser utilizadas em

Figura 4 – Estrutura de uma fibra óptica.

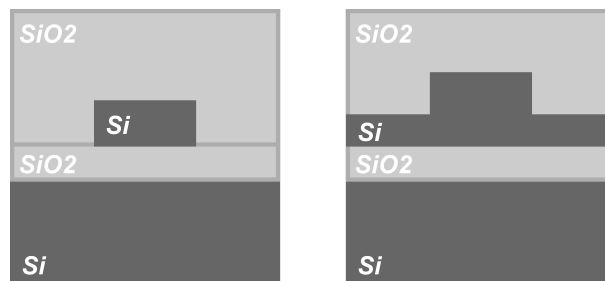


Fonte: Produção do próprio autor.

projetos fotônicos, podendo apresentar configurações passivas e ativas. Guias de onda de dielétrico planar apresentam camadas com materiais de alto e baixo índice de refração, possibilitando um maior confinamento na direção vertical, já guias de onda não planares podem ter diferentes seções transversais e diferentes formas de núcleos, por exemplo (THYLÉN; WOSINSKI, 2014).

O silício é um dos materiais que consegue apresentar um ótimo desempenho em guias de onda graças ao SOI, método utilizado na fabricação de chips semicondutores. Nesse método uma camada de silício é isolada do substrato de silício por uma camada de material isolante, que geralmente é óxido de silício. A figura 5 mostra a estrutura de duas guias de onda utilizadas em fotônica integrada e implementadas através do SOI.

Figura 5 – Tipos de estrutura de guias de onda em fotônica integrada.



Fonte: Produção do próprio autor.

Graças a esse método é possível obter um elevado contraste de índice de refração entre o núcleo de silício ( $n=3,5$ ) e o revestimento de óxido de silício ( $n=1,45$ ), gerando um forte confinamento da luz, alta eficiência de acoplamento, baixa perda de inserção e isolamento

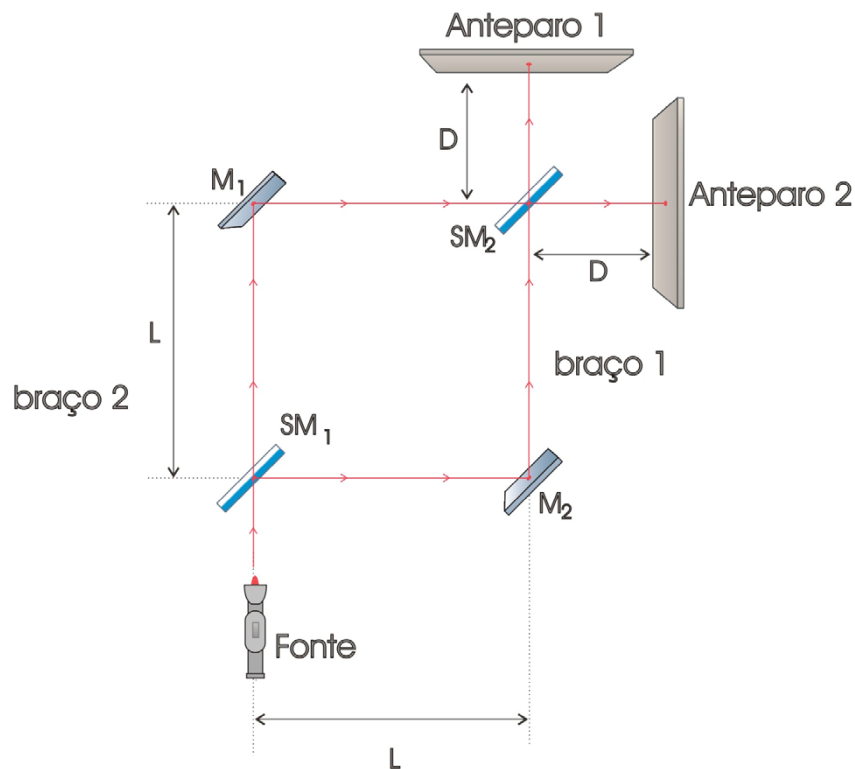
elétrico entre os componentes ópticos e eletrônicos em um chip, se tornando uma tecnologia amplamente usada para aplicações de telecomunicações e mostrando a capacidade de manter alto desempenho mesmo para dispositivos com altos níveis de integração (REED; HEADLEY; PNG, 2005; LIU et al., 2021). O confinamento maior de luz foi um ponto de grande importância pois ele permite tamanhos de núcleo muito pequenos e curvas acentuadas, levando ao encolhimento dos tamanhos dos componentes em várias ordens de magnitude (THYLÉN; WOSINSKI, 2014).

### 2.2.2 Interferometria

A interferometria é um conjunto de técnicas com o objetivo de sobrepor ondas eletromagnéticas, causando o fenômeno de interferência. Seu funcionamento está ligado a interferência construtiva e destrutiva, quando duas ondas eletromagnéticas se coincidem com a mesma fase teremos uma amplificação, uma interferência construtiva, enquanto que se elas estiverem com fases opostas irão se cancelar, uma interferência destrutiva (CARVALHO, 2006). Boa parte dos dispositivos ópticos se baseiam no princípio de funcionamento dos interferômetros, fazendo uso principalmente de lasers. Os interferômetros podem ser classificados por tipos, variando a fonte de luz empregada e suas aplicações. Cada tipo de interferômetro tem sua própria configuração e aplicações específicas.

Entre os principais tipos de interferômetros temos os de Michelson, de Sagnac, Fabry-Pérot e um dos mais utilizados em dispositivos ópticos, o interferômetro de Mach-Zehnder, que já apresenta versões aplicadas em fibras ópticas e fotônica integrada, como moduladores e em cascata (AMIN et al., 2018; HORST et al., 2013). Através da Figura 6 é possível compreender melhor o funcionamento dos interferômetros com base no Mach-Zehnder. Um feixe inicial é emitido em direção a um semi espelho, SM1, na qual 50% da luz incidente é transmitida, logo ele será responsável por dividir o feixe em dois novos feixes, que irão colidir com espelhos refletores, M1 e M2, que vão gerar um atraso relativo de fase em cada feixe dividido, sendo que cada reflexão nos semi espelhos também irá gerar um atraso de fase relativo. Cada reflexão que a luz sofre ao longo do percurso altera sua fase, que roda  $90^\circ$  para cada reflexão. No final esses dois feixes são recombinados em um segundo semi-espelho onde, dependendo da fase relativa adquirida pelos feixes ao longo dos caminhos, exibirá interferência construtiva ou negativa vista nos anteparos (RICCI; OSTERMANN; PRADO, 2007).

Figura 6 – Interferômetro de Mach-Zehnder.



Fonte: Ricci, Ostermann e Prado (2007).

O princípio de funcionamento desses interferômetros vem sendo amplamente estudado e implementado em diversos dispositivos ópticos, devido a alta capacidade de integração e combinação com outros componentes fotônicos em um único chip. Os interferômetros são importantes também principalmente para a plataforma da fotônica em silício, buscando trazer uma integração da eletrônica com a fotônica através da compatibilidade de fabricação com processos CMOS e tentando atender objetivos relacionados a baixo custo, tamanho e confiabilidade (THOMSON et al., 2016).

### 2.2.3 Filtros Ópticos

Filtros ópticos são dispositivos que permitem a transmissão de um comprimento de onda específico ou um conjunto de comprimentos de onda de luz, podendo apresentar diferentes funções dependendo do tipo de filtro óptico (KALYANI; SHARMA, 2016). A filtragem óptica permite a implementação de multiplexação por divisão de comprimento de onda, demultiplexação de canais, equalização de ganho e compensação de dispersão (SADOT; BOIMOVICH, 1998).

Existem vários tipos de filtros ópticos, incluindo filtros de interferência, filtros de absorção,



filtros de difração, filtros de grade, filtros de polarização e outros. Cada tipo de filtro opera de maneira diferente, mas todos funcionam bloqueando ou atenuando certas frequências de luz (KALYANI; SHARMA, 2016).

Os filtros recebem diferentes terminologias de acordo com a faixa que atuam, como *bandpass*, *shortpass*, *longpass* e *notch*. Um filtro *shortpass* permite a passagem de comprimentos de onda mais curtos do que o comprimento de onda de corte, enquanto atenua comprimentos de onda mais longos. Já um filtro *longpass* transmite comprimentos de onda mais longos do que o comprimento de onda de corte, enquanto bloqueia comprimentos de onda mais curtos. Um filtro *bandpass* é um filtro que permite que uma determinada faixa, ou “banda”, de comprimentos de onda passe, mas atenua todos os comprimentos de onda ao redor da banda e por fim o filtro *notch*, que rejeita uma faixa de comprimento de onda (MADSEN; ZHAO, 1999).

Atualmente, filtros baseados em fotônica integrada são amplamente utilizados, envolvendo aplicações que vão desde de telecomunicação até sensores. Entre as principais tecnologias podemos citar filtros baseados em estruturas como interferômetros Mach-Zehnder, anéis de ressonância, grades de Bragg, cavidades de Fabry-Perot, filtros de interferência de filme fino, filtros espaçados de sólidos, grades de difração e filtros de guia de ondas (KALYANI; SHARMA, 2016).

#### 2.2.4 Moduladores

Um modulador é um dispositivo que modifica parâmetros como amplitude, fase, frequência ou polarização de uma portadora óptica a partir de um sinal modulante. A modulação pode ser obtida através da variação do coeficiente de absorção ou da variação no índice de refração (ARAÚJO et al., 2017).

Os moduladores são considerados um dos principais elementos presentes em PIC's, sendo implementado em diferentes plataformas como InP, SiN e SiPh, sendo que cada uma apresenta vantagens e desafios específicos para a fabricação de moduladores.

O silício, por ser um dos materiais mais populares da fotônica integrada, tem apresentado grande evolução no que diz respeito a implementação de moduladores em circuitos fotônicos, mesmo não sendo um material ideal para modulação. Inicialmente o silício não foi um material muito utilizado em modulação devido a não produzir um forte efeito eletro-óptico, porém Soref demonstrou em 1987 que o silício tinha potencial para modulação através da injeção de portadores livres (SOREF; BENNETT, 1987). Os primeiros projetos de

moduladores eram baseados em camadas de guia de silício fabricadas em substratos de silício dopados, e mais tarde foram substituídas por guia de ondas de SOI devido à possibilidade de maior confinamento óptico.

Atualmente os principais moduladores utilizados em fotônica de silício são os moduladores do tipo Mach-Zehnder, moduladores do tipo anel e modulação do tipo em linha, conforme figura 7. Essas estruturas são baseadas em guias de onda em silício eletro-óptico, que são modulados eletricamente para produzir uma modulação óptica.

Figura 7 – Ilustração esquemática de um modulador do tipo linha, modulador do tipo anel e modulador do tipo Mach-Zehnder.

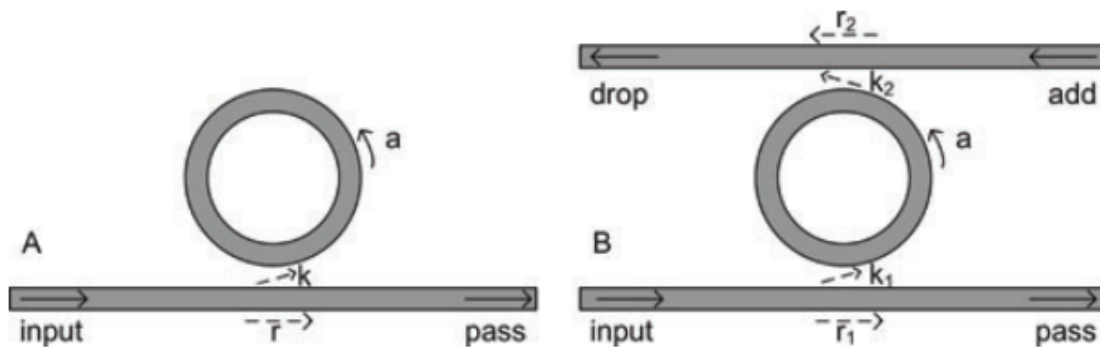


Fonte: Produção do próprio autor.

### 3 ANEL DE RESSONÂNCIA

Os anéis de ressonância, ou *ring resonators*, são dispositivos que vem chamando a atenção para diversas áreas da fotônica nos últimos anos, devido ao seu pequeno tamanho e uma variedade de aplicações, como filtros, moduladores, sensores, comutadores e multiplexação.

Figura 8 – Anel de ressonância de caminho único e com dois caminhos, respectivamente.



Fonte: Bogaerts et al. (2012).

Os anéis de ressonância são constituídos basicamente de uma guia de onda principal, ou barramento principal, e uma guia de onda em loop, também chamado de ressonador. Quando comprimentos de onda são emitidos no barramento principal podemos ter um acoplamento entre a guia de onda e o ressonador, que é determinado pelo comprimento do caminho óptico do loop. Esse dispositivo suporta diferentes comprimentos de onda em ressonância e o espaçamento entre esses comprimentos, o FSR (do inglês *Free Spectral Range*), é determinado pelo comprimento do próprio anel (BOGAERTS et al., 2012). A figura 8 mostra as estruturas mais comuns para anéis de ressonância.

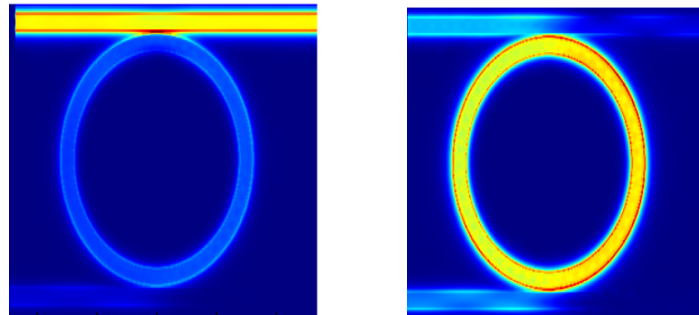
A figura 9 mostra as duas fases de operação de um anel de ressonância, quando a luz apenas viaja pela guia de acesso, sem acoplamento, e quando temos um acoplamento entre guia de acesso e ressonador.

Os anéis de ressonância são sensíveis a diversos tipos de perturbações físicas, como por exemplo temperatura, pressão e concentração de gases, afetando diretamente na ressonância do anel, o que o torna uma ótima opção para aplicações envolvendo filtros e sensores (BOGAERTS et al., 2012).

O primeiro anel de ressonância foi demonstrado na década de 70, consistindo basicamente em uma haste de vidro revestida com poliuretano dopado (REED; HEADLEY; PNG, 2005).

Outra demonstração foi feita em 1980, incorporando guias de onda de polimetilmetacrilato, porém mesmo com o dispositivo apresentando baixa perda ele ainda apresentava um tamanho muito grande. Nos anos seguintes foi apresentado diversos estudos com diferentes materiais, como fibra óptica e outros materiais baseados em vidro, permitindo uma redução considerável de tamanho (WINNIE; MICHEL; KIMERLING, 2008).

Figura 9 – Luz em  $1,56 \mu\text{m}$  viajando ao longo da guia de acesso e em  $1,55 \mu\text{m}$  acoplada no ressonador, respectivamente.



Fonte: Produção do próprio autor.

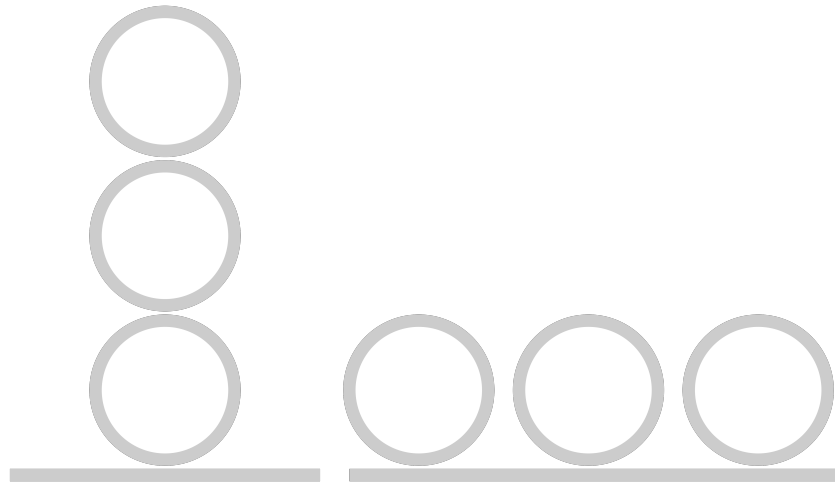
Atualmente o *ring resonator* vem apresentando um grande avanço para a fotônica em silício devido a sua grande flexibilidade para diversas aplicações, sua implementação permite um sistema de modulação que apresenta tamanho bastante reduzido em comparação com outros moduladores, como o Mach-Zehnder, e na área dos sensores, novamente graças ao seu tamanho e preço, poderia ser implementado em diferentes equipamentos e executar funções distintas (LIU et al., 2022). Os objetivos da pesquisa para os anéis de ressonância estão focados em resolver os problemas relacionados a alta sensibilidade a variações de temperatura e fabricação (THYLÉN; WOSINSKI, 2014; LIU et al., 2022).

### 3.1 Propriedades de um anel de ressonância

Existem diferentes configurações para os anéis de ressonância, as mais comuns são os anéis de caminho único e com dois caminhos, como pode ser visto pela figura 8, sendo o primeiro o mais simples e comum, podendo ser chamado de filtro *all-pass* ou filtro *notch*. Anéis de ressonância também podem ser dispostos em série e paralelo, gerando um acoplamento entre os múltiplos anéis, esse tipo de configuração permite obter respostas como filtro de banda e aplicações como WDM. A figura 10 mostra tipos de configurações em série e paralelo que são possíveis de serem implementadas.

As principais propriedades que ditam o funcionamento do anel de ressonância são o

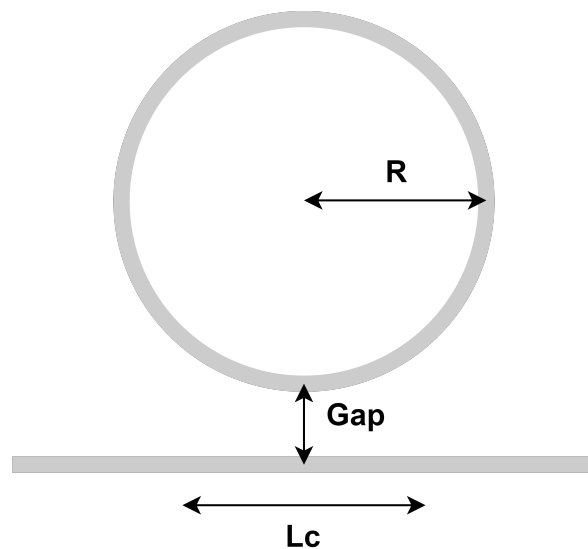
Figura 10 – Anéis de ressonância acoplados em série e paralelo, respectivamente.



Fonte: Bogaerts et al. (2012).

comprimento de acoplamento, o *gap* e o raio do ressonador. O comprimento de acoplamento é o comprimento da região onde ocorre o acoplamento entre a guia de onda de acesso e a guia de onda do ressonador. O *gap* é a distância entre a guia de acesso e o ressonador, sendo um atributo diretamente ligado ao coeficiente de acoplamento do anel. A figura 11 ilustra as propriedades construtivas.

Figura 11 – Propriedades construtivas de um anel de ressonância.



Fonte: Produção do próprio autor.

Para o anel de caminho único, partindo do pressuposto de que as reflexões de volta para o guia de ondas de acesso são desprezíveis, é possível escrever a razão do campo transmitido e incidente, obtendo assim o campo de saída do anel (BOGAERTS et al., 2012).

$$\frac{E_{pass}}{E_{out}} = e^{i(\pi+\phi)} \frac{a - re^{-i\phi}}{1 - are^{i\phi}} \quad (3.1)$$

Onde  $\phi$  representa a mudança de fase, podendo ser escrito como  $\phi = \beta L$  onde  $\beta$  representa a constante de propagação e  $L$  o comprimento do anel,  $a$  é a amplitude de transmissão, que pode ser relacionada com o coeficiente de atenuação através da fórmula  $a = e^{-\frac{L}{2}}$ , e  $r$  o coeficiente de auto acoplamento (BOGAERTS et al., 2012). Podemos representar  $\phi$  como:

$$\phi = \beta.L = \frac{neff.4.\pi^2.raio}{\lambda} \quad (3.2)$$

A partir da equação 3.1, elevando os termos ao quadrado, também é possível obter a intensidade de transmissão do anel de ressonância all-pass:

$$T_n = \frac{a^2 - 2racos(\phi) + r^2}{1 - 2racos(\phi) + (ra)^2} \quad (3.3)$$

Quando temos um anel de ressonância com dois caminhos, o campo de entrada é parcialmente transmitido para a porta *drop*. Temos assim transmissão nas portas *pass* e *drop*, como pode ser visto nas equações 3.4 e 3.5.

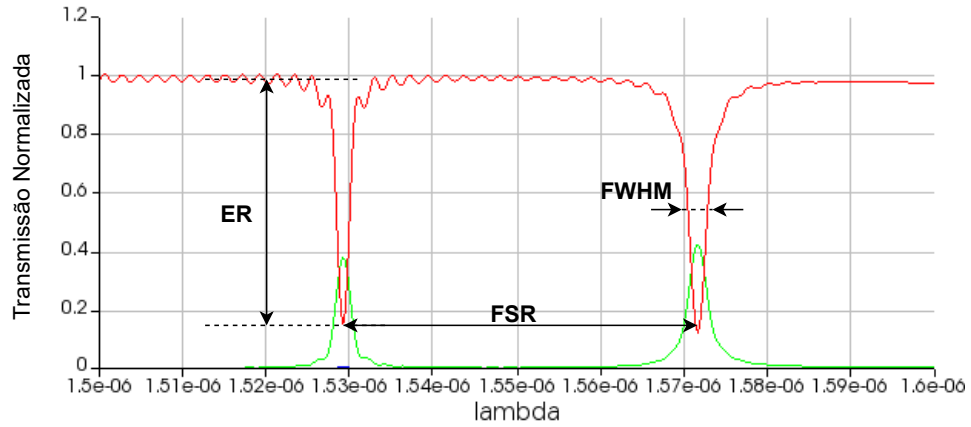
$$T_p = \frac{I_{pass}}{I_{input}} = \frac{r_2^2 a^2 - 2r_1 r_2 a \cos \phi + r_1^2}{1 - 2r_1 r_2 a \cos \phi + (r_1 r_2 a)^2} \quad (3.4)$$

$$T_p = \frac{I_{pass}}{I_{input}} = \frac{(1 - r_1^2)(1 - r_2^2)a}{1 - 2r_1 r_2 a \cos \phi + (r_1 r_2 a)^2} \quad (3.5)$$

Também é possível analisar os principais parâmetros de um anel de ressonância por meio das equações de transmissão. A figura 12 mostra os principais parâmetros a serem analisados em um anel de ressonância, eles estão diretamente ligados as perdas e ao coeficiente de acoplamento e são fundamentais na hora de se projetar esse dispositivo.

Através das equações 3.3, 3.4 e 3.5 é possível obter a largura a meia altura (FWHM, do inglês *full width at half maximum*) do espectro de ressonância para o anel de caminho único e duplo, conforme equação 3.6 e 3.7 respectivamente.

Figura 12 – Espectro de transmissão de um anel de ressonância.



Fonte: Produção do próprio autor.

$$FWHM = \frac{(1 - ra)\lambda_{res}^2}{\pi n_g L \sqrt{ra}} \quad (3.6)$$

$$FWHM = \frac{(1 - r_1 r_2 a)\lambda_{res}^2}{\pi n_g L \sqrt{r_1 r_2 a}} \quad (3.7)$$

O FSR entre duas ressonâncias em função do comprimento de onda pode ser obtido pela equação 3.8.

$$FSR = \frac{\lambda^2}{n_g L} \quad (3.8)$$

A partir do FSR e do FWHM também é possível obter dois parâmetros de avaliação, o Q-factor e o Finesse, conforme equações 3.9 e 3.10, o primeiro é a medida da nitidez da ressonância em relação à sua frequência central e o segundo é uma medida da nitidez das ressonâncias relativas ao seu espaçamento.

$$Q - factor = \frac{\lambda_{res}}{FWHM} \quad (3.9)$$

$$Finesse = \frac{FSR}{FWHM} \quad (3.10)$$

Através do campo de saída e da intensidade de transmissão do anel é possível compreender como a alteração de atributos no anel mudam sua resposta final e parâmetros intrínsecos, como por exemplo o coeficiente de acoplamento. A alteração dos atributos também terá impacto nas aplicações do anel, pois para cada aplicação é necessário uma determinada resposta em frequência, que por sua vez é obtida através da alteração de suas propriedades construtivas.

É necessário ressaltar que as equação de campo de saída e da intensidade de transmissão só são válidas para anéis com a construção apresentada na figura 8, para analisar anéis assimétricos, com diferentes formatos, deve-se utilizar algum *software* que aplique diferenças finitas no domínio do tempo, permitindo uma análise mais profunda dos parâmetros utilizados.



## 4 METODOLOGIA E ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO

A síntese de um dispositivo fotônico está totalmente ligado a geometria dos elementos presentes nesse dispositivo, influenciando diretamente na sua resposta a determinados estímulos. Compreender como as ondas eletromagnéticas irão se comportar em um circuito fotônico é portanto a chave na hora de se realizar um projeto. A principal maneira de entender esse comportamento é por meio do uso das equações de Maxwell, através delas é possível modelar a propagação das ondas eletromagnéticas em diversas situações.

### 4.1 FDTD

O método das diferenças finitas no domínio do tempo foi proposto por Kane Yee em 1966, ele apresentou um modelo de discretização das equações de Maxwell que facilitaria sua implementação em simulações. Devido às limitações computacionais e baixo poder de processamento da época o método não foi muito aplicado, porém com o avanço da capacidade computacional e dos softwares matemáticos temos a implementação das diferenças finitas nos mais diferentes softwares (LUZ et al., 2013).

O método FDTD é baseado na série de Taylor para aproximação das derivadas em diferenças finitas, onde a partir de uma função  $f(x)$  conseguimos encontrar sua derivada realizando manipulações das expressões da série de Taylor (LUZ et al., 2013). Yee, através da série de Taylor, discretizou as equações de Maxwell, e formulou as equações para a propagação das ondas em três dimensões, pois a onda propaga dependente das três variáveis espaciais  $x$ ,  $y$  e  $z$ , sendo possível também obter as equações para uma ou duas dimensões apenas. Para simulações com diferentes superfícies também é necessário a utilização das condições de contorno, que são obtidas por meio das equações de Maxwell (JOAQUIM, 2016).

Nas simulações computacionais, como não podemos ter uma matriz ou vetor infinito para área livre, temos que definir uma grade com tamanho limitado. Também ocorre um tratamento das bordas da grade por meio de condições de contorno, evitando assim erros de simulação.

O FDTD atualmente vem sendo empregado em larga escala devido as suas vantagens em relação a outros métodos de simulação eletromagnética, como o método dos elementos

finitos. Entre essas vantagens podemos citar: sua versatilidade, podendo ser utilizado em uma ampla variedade de problemas eletromagnéticos, desde de óptica até a simulação de antenas; a capacidade de lidar com geometrias complexas; é uma técnica acessível, apresentando várias implementações em código aberto disponíveis (JOAQUIM, 2016). Porém este método também apresenta algumas desvantagens como: bordas aproximadas por passos em forma de escada, sendo assim contornos ou superfícies curvas podem se tornar um problema quando for necessária mais precisão na simulação; dependendo da estrutura analisada, tempo de simulação consideravelmente alto em comparação com outros métodos (JOAQUIM, 2016).

Um dos softwares que empregam este método é o Lumerical, que resolve as equações por meio de uma grade espacial e temporal discreta, além de permitir diferentes condições de contorno para a solução de problemas, sendo a principal o *Perfectly Matched Layer* ou PML, que permite simular de maneira eficiente a absorção das ondas eletromagnéticas nas bordas da região de simulação, ajudando a minimizar reflexões indesejadas nas fronteiras. Com relação a área para simulação, o Lumerical faz uso de uma malha retangular, onde as grandezas da simulação serão calculadas para cada ponto da malha, sendo assim para se obter uma simulação mais precisa, com mais partições, é necessário mais tempo e esforço computacional.

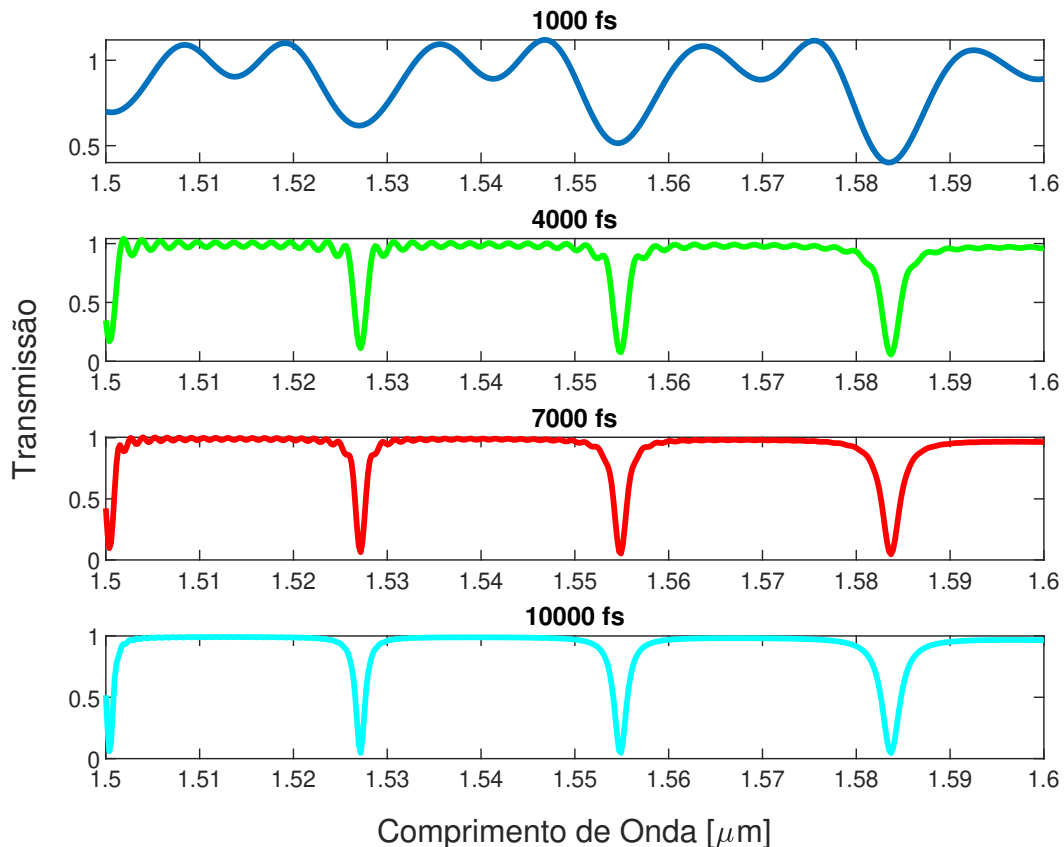
Para o projeto dos anéis de ressonância foi utilizado a ferramenta FDTD do Lumerical, analisando a resposta em frequência de cada anel as alterações nas suas propriedades construtivas. A partir da resposta do anel, foi utilizado o *software* MATLAB para realizar a extração dos indicadores de desempenho, como FSR, FWHM e Q-factor.

Com relação as simulações no Lumerical, foi utilizado o método 3D FDTD que garante resultados mais precisos, porém com tempos de simulação relativamente mais longos. Outro ponto de análise é o tempo de simulação, o Lumerical permite que o usuário escolha qual tempo será utilizado nas simulações. Tempos muito baixos podem gerar impactos diretamente nos resultados obtidos devido ao truncamento da transformada de Fourier, e tempos muito grandes de simulação tendem a demorar consideravelmente. Sendo assim, é necessário investigar qual tempo garante uma simulação correta, não gerando impactos na simulação e com tempo aceitável. A figura 13 mostra a comparação entre diferentes respostas do anel de ressonância para tempos de 1000, 4000, 7000 e 10000 fs.

A partir da figura 13, podemos notar que os tempos de 4000, 7000 e 10000 fs apresentaram comprimentos de onda em ressonância muito próximos e largura de banda e FSR semelhantes, enquanto que para o tempo de 1000 fs é perceptível a distorção em relação aos outros. Logo, para realizar as simulações com anel de caminho duplo foi escolhido o tempo

de 4000 fs, pois conseguimos manter as características da resposta alinhado a tempos inferiores de simulação, enquanto que para estruturas que apresentam anéis acoplados foi necessário um tempo de 8000 fs devido a complexidade das estruturas, demandando mais tempo para a simulação.

Figura 13 – Transmissão do anel de ressonância para tempos de simulação de 1000, 4000, 7000 e 10000 fs.



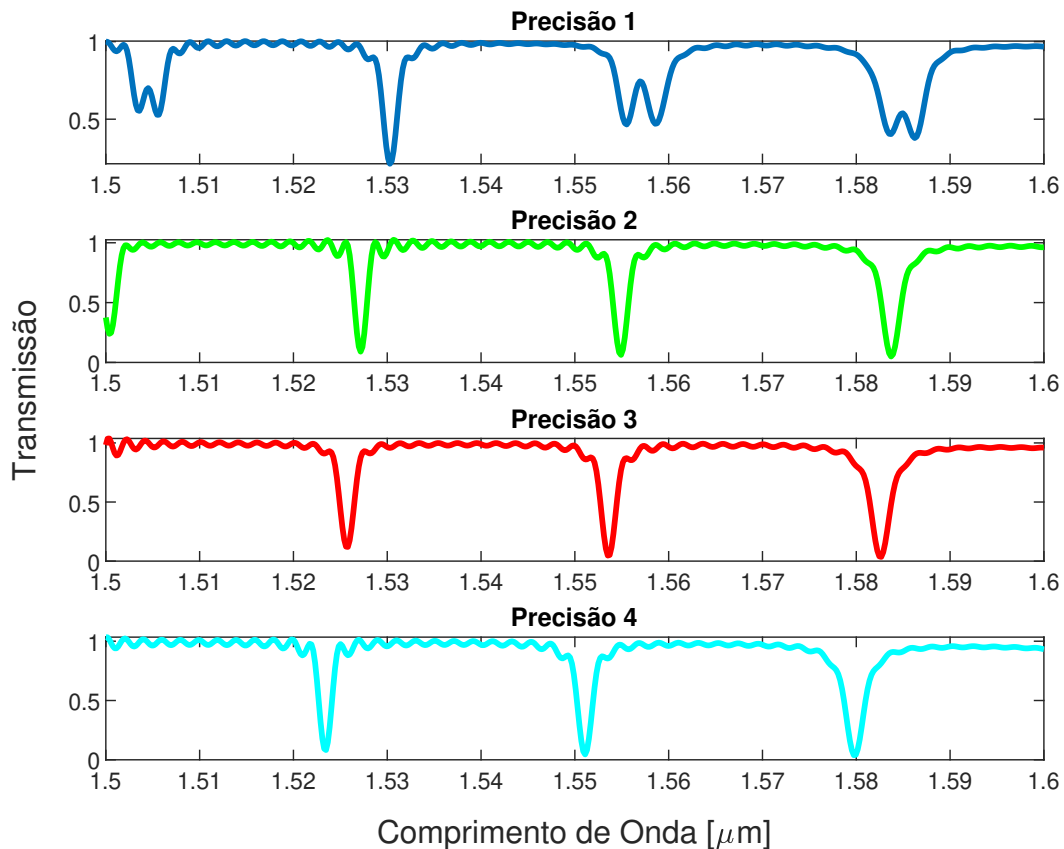
Fonte: Produção do próprio autor.

Com relação ao tipo de malha, foi utilizada a opção *Auto non-uniform*, que é gerada automaticamente com base em um valor para a precisão da malha, sendo a opção padrão do Lumerical. O parâmetro precisão da malha é um número inteiro que varia de 1 a 8, sendo 1 uma precisão mais baixa e 8 uma precisão alta. Quando temos estruturas mais complexas é recomendado uma precisão maior pois permite uma malha com mais pontos e consequentemente mais definição.

A figura 14 mostra as curvas de transmissão obtidas para valores de 1 a 4 de precisão da malha, onde é possível perceber respostas semelhantes para valores de precisão de 2, 3 e 4. Foi notado uma pequena diferença nos comprimentos de onda ressonantes, analisando a faixa de 1.55 até 1.56  $\mu\text{m}$ , por exemplo, tivemos uma diferença de 0.004  $\mu\text{m}$  entre a precisão 2 e precisão 4. Logo, como as características das curvas foram mantidas entre os

valores de precisão de 2 e 4 e focando em menores tempos, foi utilizado para as simulações o valor de precisão de malha igual a 2, pois permite obter resultados semelhantes com tempos até cinco vezes menores que utilizando o valor 4.

Figura 14 – Transmissão do anel de ressonância para diferentes valores de precisão da malha.



Fonte: Produção do próprio autor.

## 4.2 Estruturas analisadas

Nesta seção, serão expostas as principais propriedades avaliadas, onde as simulações serão divididas de acordo com a configuração de anel utilizada, sendo elas: anel de caminho duplo, anel acoplado em série e anel acoplado em paralelo. Para o anel de caminho duplo será realizado a variação do comprimento de acoplamento, variação da distância entre ressonador e guia de acesso e, por fim, a variação do raio do ressonador. Para o anel acoplado em série será realizado simulações com variação dos raios, da quantidade de anéis acoplados e do *gap* entre os anéis. Por fim, para o anel acoplado em paralelo será realizado simulações com a variação *gap*, do raio e da quantidade de anéis acoplados.

## 4.2.1 Anel de caminho duplo

### 4.2.1.1 Variação do comprimento de acoplamento

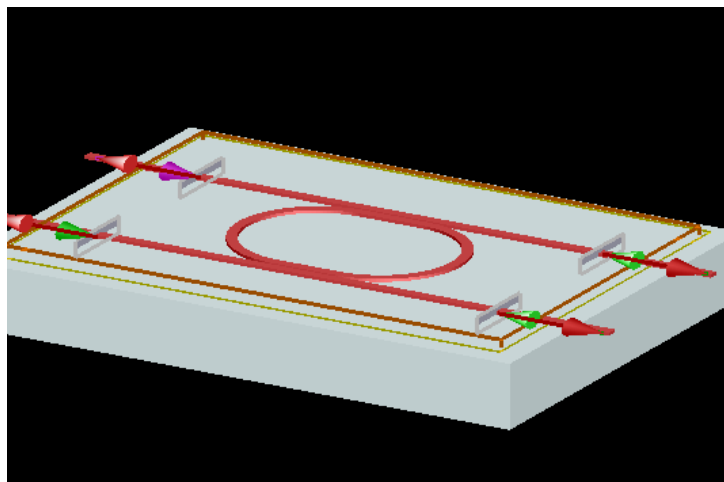
Para a simulação do anel de ressonância, ou de outros dispositivos fotônicos, é recomendado dividir o sistema em diferentes blocos e extrair os parâmetros de cada um desses blocos. Esta é uma abordagem mais interessante pois é possível conseguir valores mais precisos ao mesmo tempo que diminui o tempo de simulação, uma vez que para realizar uma simulação completa seria necessário o uso de um computador mais potente e mais tempo no processo.

A variação de comprimento de acoplamento será feita para três *gaps* diferentes, possibilitando entender o impacto desse comprimento para quando tivermos distâncias maiores entre a guia de onda e ressonador. A primeira etapa da simulação será obter o coeficiente de acoplamento do anel de ressonância por meio dos blocos relativos à área onde ocorre o acoplamento. A tabela 1 contém os parâmetros utilizados para a simulação, com os valores utilizados para o comprimento de acoplamento e *gaps*.

Tabela 1 – Parâmetros utilizados na simulação de comprimento de acoplamento.

Parâmetro	Valor/Especificação
Comprimento de Acoplamento	0, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5 e 5 $\mu m$
Gap	0.1, 0.2 e 0.3 $\mu m$
Raio	3 $\mu m$
Material	Silício/Óxido de silício
Dimensões da Guia de Onda	0.4 x 0.18 $\mu m$

Figura 15 – Estrutura utilizada no Lumerical para um anel com comprimento de acoplamento de 2.5  $\mu m$ , *gap* de 0.1  $\mu m$ , raio de 3  $\mu m$  e demais parâmetros da tabela 1.



Fonte: Produção do próprio autor.

Após a obtenção do coeficiente de acoplamento é feito uma nova simulação para levantarmos as curvas de transmissão do anel. A figura 15 mostra uma das configurações utilizadas no Lumerical para se obter a transmissão no anel.

#### 4.2.1.2 Variação do *gap*

Para compreender melhor a influência do *gap*, será realizado simulações com alterações do *gap* em uma faixa de 0.05 até 2.5  $\mu m$ , variando 0.05  $\mu m$  entre esse intervalo. Para o comprimento de acoplamento será utilizado valores de 0, 1 e 2  $\mu m$ . A tabela 2 contém os parâmetros utilizados de forma mais detalhada.

Tabela 2 – Parâmetros utilizados na simulação do *gap*.

Parâmetro	Valor/Especificação
Comprimento de Acoplamento	0, 1 e 2 $\mu m$
Gap	0.05, 0.1, 0.15, 0.2 e 0.25 $\mu m$
Raio	3 $\mu m$
Material	Silício/Óxido de silício
Dimensões da Guia de Onda	0.4 x 0.18 $\mu m$

#### 4.2.1.3 Variação do raio

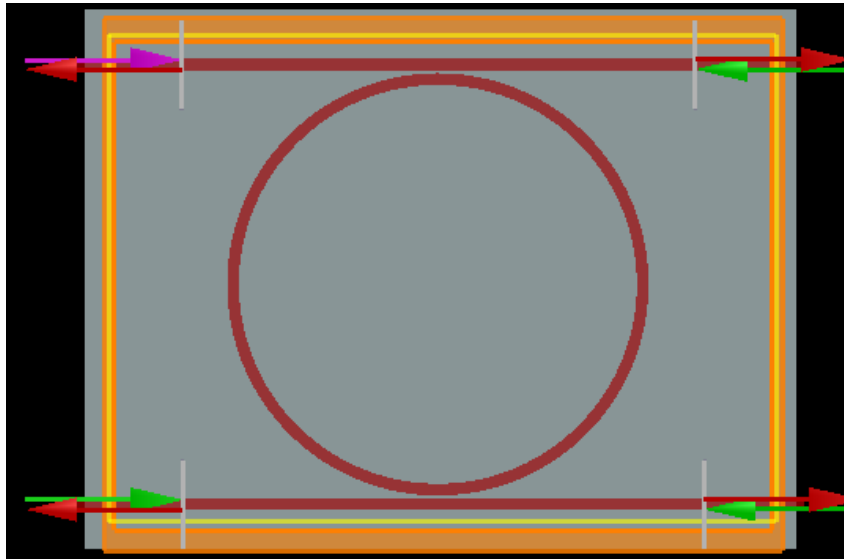
Foi realizado os mesmos passos da etapa anterior, porém variando o raio do ressonador. A variação foi de 1 a 7  $\mu m$  para o raio do ressonador. Acima de 7  $\mu m$  foi notado um aumento considerável no tempo de simulação, tornando muito custoso a análise para raios superiores que os apresentados. A tabela 3 contém os parâmetros utilizados para a simulação, com os valores utilizados para o raio e *gaps*.

Tabela 3 – Parâmetros utilizados na simulação do raio.

Parâmetro	Valor/Especificação
Comprimento de Acoplamento	0 $\mu m$
Gap	0.1, 0.2 e 0.3 $\mu m$
Raio	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 $\mu m$
Material	Silício/Óxido de silício
Dimensões da Guia de Onda	0.4 x 0.18 $\mu m$

A figura 16 mostra uma das estruturas utilizadas para se obter a transmissão dos aneis de ressonância.

Figura 16 – Estrutura utilizada no Lumerical para um anel com raio de  $7 \mu m$ , *gap* de  $0.1 \mu m$  e demais parâmetros da tabela 3.



Fonte: Produção do próprio autor.

## 4.2.2 Anéis acoplados em série

### 4.2.2.1 Variação do *gap* entre anéis

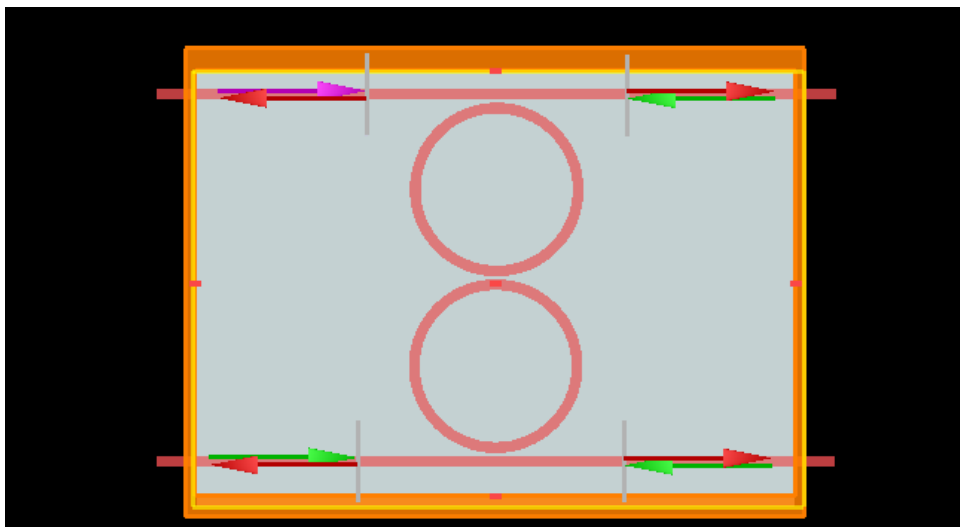
Foi realizado os mesmos passos da simulação da seção 4.2.1.2, porém com anéis acoplados em série. Foi utilizado dois anéis com raio de  $3 \mu m$  e variado apenas o *gap* entre os anéis acoplados, o *gap* entre anel e guia de onda de acesso foi mantido em  $0.1 \mu m$  para todas as simulações. A tabela 4 mostra as configurações utilizadas na simulação.

Tabela 4 – Parâmetros utilizados na simulação do *gap* para anéis acoplados em série.

Parâmetro	Valor/Especificação
Comprimento de Acoplamento	$0 \mu m$
Gap (Guia de acesso - Anel)	$0.1 \mu m$
Gap (Anel - Anel)	$0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35 \mu m$
Raio	$3 \mu m$
Material	Silício/Óxido de silício
Dimensões da Guia de Onda	$0.4 \times 0.18 \mu m$

A figura 17 mostra a estrutura com dois anéis acoplados, onde foi utilizado *gap* de  $0.1 \mu m$  entre os anéis.

Figura 17 – Estrutura utilizada no Lumerical para anéis acoplados em série.



Fonte: Produção do próprio autor.

#### 4.2.2.2 Variação do raio

Nesta etapa foi utilizado a mesma estrutura para anéis acoplados em série, porém a variação foi feita para o raio dos anéis. Os demais parâmetros foram fixados e o raio foi variado de 1 a 5  $\mu m$ , conforme tabela 5. Devido a limitações computacionais não foi possível realizar as simulações acima de 5  $\mu m$ , onde era demandado grande esforço computacional e de tempo.

Tabela 5 – Parâmetros utilizados na simulação do raio para anéis acoplados em série.

Parâmetro	Valor/Especificação
Comprimento de Acoplamento	0 $\mu m$
Gap (Guia de acesso - Anel / Anel - Anel)	0.1 $\mu m$
Raio	1, 2, 3, 4 e 5 $\mu m$
Material	Silício/Óxido de silício
Dimensões da Guia de Onda	0.4 x 0.18 $\mu m$

#### 4.2.2.3 Variação da quantidade de anéis acoplados

Para esta simulação foi utilizado uma diferente quantidade de anéis acoplados em série, com variação de um anel até cinco anéis. O intuito dessa simulação é perceber a variação da largura de banda a medida que mais anéis anéis são colocados em série e seus *gaps* são alterados, para isso foi utilizado dois espaçamentos, de 0.1  $\mu m$  e um espaçamento maior entre os anéis, de 0.25  $\mu m$ . Os parâmetros podem ser vistos através da tabela 6

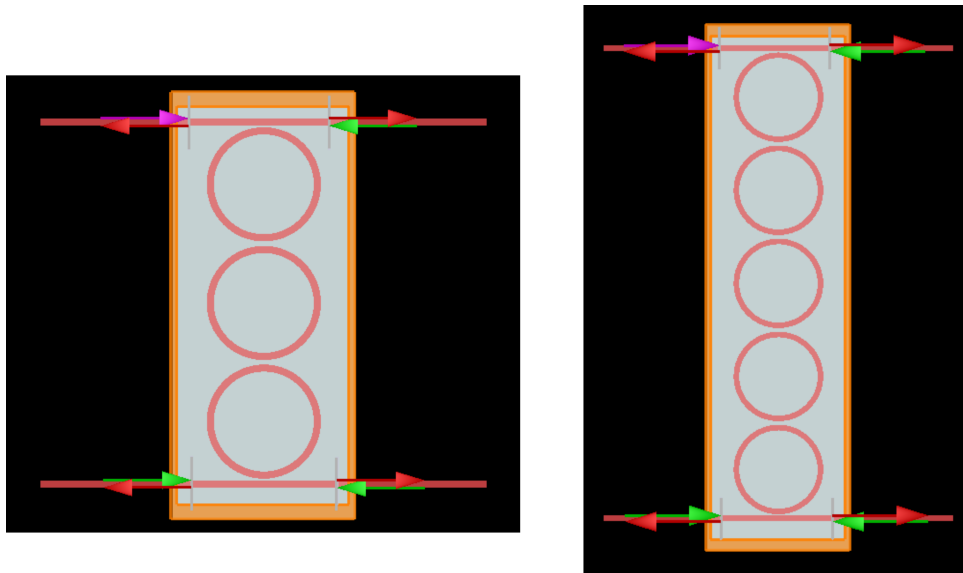


Tabela 6 – Parâmetros utilizados na simulação dos anéis acoplados em série.

Parâmetro	Valor/Especificação
Comprimento de Acoplamento	0 $\mu m$
Gap (Guia de acesso - Anel)	0.1 $\mu m$
Gap (Anel - Anel)	0.1 e 0.25 $\mu m$
Raio	3 $\mu m$
Material	Silício/Óxido de silício
Dimensões da Guia de Onda	0.4 x 0.18 $\mu m$

A figura 18 mostra duas das configurações utilizadas na simulação, apresentando três e cinco anéis em série.

Figura 18 – Estrutura com três e cinco anéis acoplados em série.



Fonte: Produção do próprio autor.

### 4.2.3 Anéis acoplados em paralelo

#### 4.2.3.1 Variação do raio

A simulação para anéis acoplados em paralelo consistiu na variação do raio de 1 a 6  $\mu m$  de todos os anéis utilizados nessa configuração. Foi considerado dois anéis em paralelo com um *gap* entre eles e entre a guia de acesso de 0.1  $\mu m$ . A tabela 7 mostra todos os parâmetros utilizados.

Tabela 7 – Parâmetros utilizados na simulação dos anéis acoplados em paralelo

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor/Especificação</b>
Comprimento de Acoplamento	0 $\mu m$
Gap (Guia de acesso - Anel)	0.1 $\mu m$
Gap (Anel - Anel)	0.1 $\mu m$
Raio	3 $\mu m$
Material	Silício/Óxido de silício
Dimensões da Guia de Onda	0.4 x 0.18 $\mu m$

#### 4.2.3.2 Variação do *gap* entre anéis

Para a simulação envolvendo a variação do *gap* foi considerado basicamente a mesma estrutura utilizada na seção 4.2.3.1, com dois anéis em paralelo, realizando a variação apenas da distância entre os dois anéis. Foi utilizado um raio de 3  $\mu m$  para os dois anéis, conforme tabela 8.

Tabela 8 – Parâmetros utilizados na simulação dos anéis acoplados em paralelo

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor/Especificação</b>
Comprimento de Acoplamento	0 $\mu m$
Gap (Guia de acesso - Anel)	0.1 $\mu m$
Gap (Anel - Anel)	0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 1, 1.5, 2 e 3 $\mu m$
Raio	3 $\mu m$
Material	Silício/Óxido de silício
Dimensões da Guia de Onda	0.4 x 0.18 $\mu m$

#### 4.2.3.3 Variação da quantidade de anéis acoplados

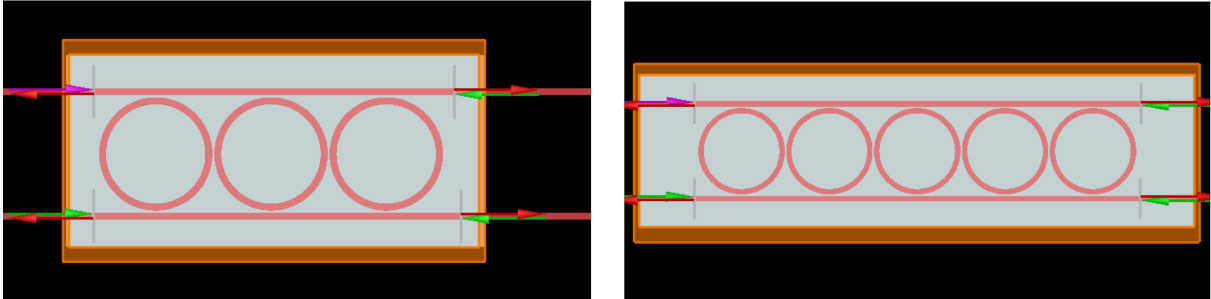
Tabela 9 – Parâmetros utilizados na simulação dos anéis acoplados em paralelo

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor/Especificação</b>
Comprimento de Acoplamento	0 $\mu m$
Gap (Guia de acesso - Anel)	0.1 $\mu m$
Gap (Anel - Anel)	0.1 e 0.5 $\mu m$
Raio	3 $\mu m$
Material	Silício/Óxido de silício
Dimensões da Guia de Onda	0.4 x 0.18 $\mu m$

Foi realizado uma simulação semelhante a da seção 4.2.2.3, porém com os anéis dispostos em paralelo. A quantidade de anéis acoplados foi de um até cinco, além disso foi utilizado dois *gaps* diferentes entre os anéis para as simulações, com 0.1 e 0.5  $\mu m$ . A tabela 9 mostra as propriedades utilizadas.

A figura 19 mostra duas das configurações utilizadas na simulação, apresentado três e cinco anéis em paralelo com *gap* de  $0.1 \mu m$  entre anéis.

Figura 19 – Estrutura com três e cinco anéis acoplados em paralelo.



Fonte: Produção do próprio autor.

### 4.3 Alocação de recursos

Para a realização das simulações foi utilizado um notebook com sistema operacional Windows 10, processador Intel(R) Core(TM) i7-9750h, memória RAM de 16 GB e unidade de armazenamento de 500 GB. Devido a limitações computacionais algumas simulações apresentam grandes tempos de simulação, a tabela 10 mostra o tempo necessário para a finalização das simulações de algumas estruturas analisadas.

Tabela 10 – Tempo para a realização das simulações das estruturas propostas

Estrutura	Tempo estimado [hh:mm]
Anel caminho duplo, Raio= $6 \mu m$ , precisão da malha=2	0:54
Anel caminho duplo, Raio= $6 \mu m$ , precisão da malha=6	32:00
Anel série, 5 anéis, Raio= $3 \mu m$ , precisão da malha=2	1:25
Anel série, 5 anéis, Raio= $3 \mu m$ , precisão da malha=4	12:20
Anel paralelo, 5 anéis, Raio= $3 \mu m$ , precisão da malha=2	1:59
Anel paralelo, 5 anéis, Raio= $3 \mu m$ , precisão da malha=2	12:30

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, é apresentado os resultados das simulações listadas no capítulo 4. Na seção 5.1, é abordado os resultados para a variação do comprimento de acoplamento de um anel de caminho duplo. Na seção 5.2, os resultados para a variação do *gap* em um anel de caminho duplo. Na seção 5.3, são mostrados os resultados para variação do raio em um anel de caminho duplo. Na seção 5.4, os resultados para variação do *gap* entre os anéis acoplados de um anel cascadeado em série. Na seção 5.5, é apresentado os resultados para variação do raio dos anéis acoplados em série. Na seção 5.6, temos os resultados da variação da quantidade de anéis acoplados em série. Na seção 5.7, é apresentado os resultados da variação do raio dos anéis acoplados em paralelo. Na seção 5.8, temos os resultados da variação do *gap* entre os anéis acoplados em paralelo. Por fim, na seção 5.9, é apresentado os resultados da variação da quantidade de anéis acoplados em paralelo.

### 5.1 Resultados das simulações da seção 4.2.1.1: Variação do comprimento de acoplamento para anel de caminho duplo

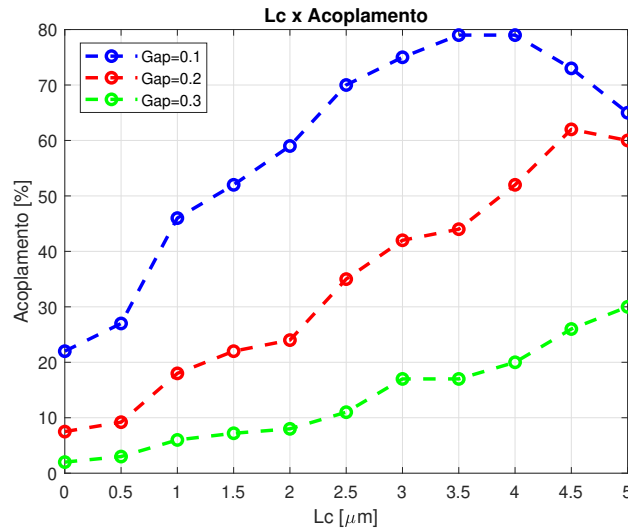
Por meio do FDTD, foi possível verificar a resposta para frequências de 1500 a 1600  $\eta m$  e levantar os parâmetros para análise dos resultados obtidos. A figura 20 mostra a curva obtida do coeficiente de acoplamento para os três *gaps* avaliados, é perceptível que o aumento do comprimento de acoplamento resulta no aumento do coeficiente de acoplamento, principalmente para distâncias menores entre ressonador e guia de acesso, onde o *gap* de 0.1  $\mu m$  apresentou valores de acoplamento mais altos que o *gap* de 0.2 e 0.3  $\mu m$ .

No gráfico também fica visível um ponto de "saturação" do aumento do coeficiente de acoplamento, onde mesmo aumentando o comprimento de acoplamento não temos o aumento do acoplamento e sim uma redução a partir de determinado ponto.

Com relação a largura de banda, foi notado um comportamento muito semelhante a curva de acoplamento da figura 20, onde o aumento do comprimento de acoplamento resultou no aumento da largura de banda, conforme figura 21. Para os *gaps* de 0.2 e 0.3  $\mu m$  não foi obtido um aumento muito perceptível, mostrando que para *gaps* com distância maiores não teremos grandes variações dos valores obtidos, sendo necessário aumentar demasiadamente o comprimento de acoplamento para termos uma influência mais visível

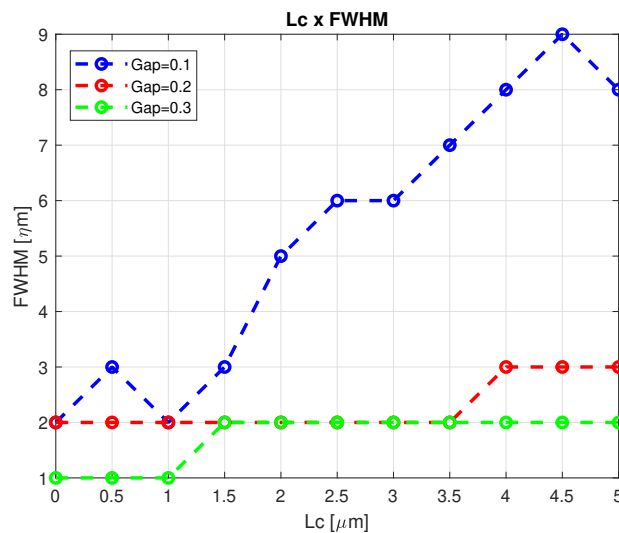
na largura de banda. Um dos principais problemas com o aumento da largura de banda nessa configuração é a forma inconsistente da resposta em frequência devido ao aumento do comprimento de acoplamento, onde para comprimentos acima de  $3 \mu m$  começamos a perder a resposta característica de um anel de ressonância, apresentando um fator de forma muito baixo. Para se trabalhar com comprimentos de acoplamento maior o recomendado é aumentar o raio do anel, mantendo a resposta menos oscilatória.

Figura 20 – Gráfico do comprimento de acoplamento x coeficiente de acoplamento.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 21 – Gráfico do comprimento de acoplamento x FWHM.



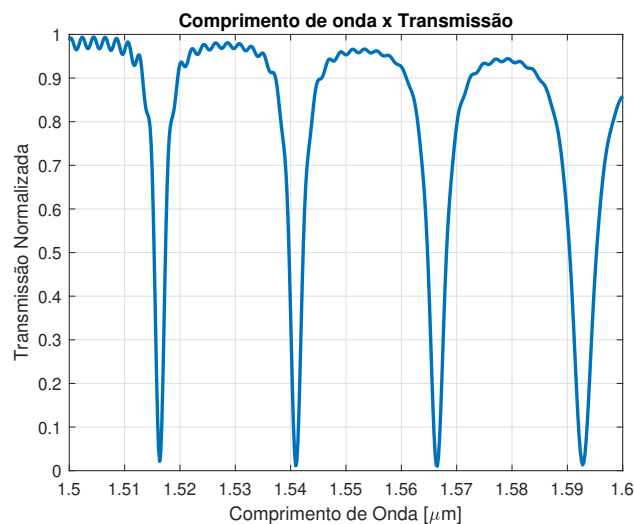
Fonte: Produção do próprio autor.

Com o aumento do comprimento de acoplamento também foi notado mais ressonâncias entre o ressonador e guia de acesso, tendo três ressonâncias para um  $L_c=0$  e seis para  $L_c=5$ . A maior quantidade de ressonâncias acabou resultando na diminuição do FSR para

todos os *gaps* analisados, caindo de 28 para 18  $\eta m$  em todos os casos, demonstrando que a alteração dos *gaps* não impacta diretamente nos FSRs obtidos, apenas o comprimento de acoplamento.

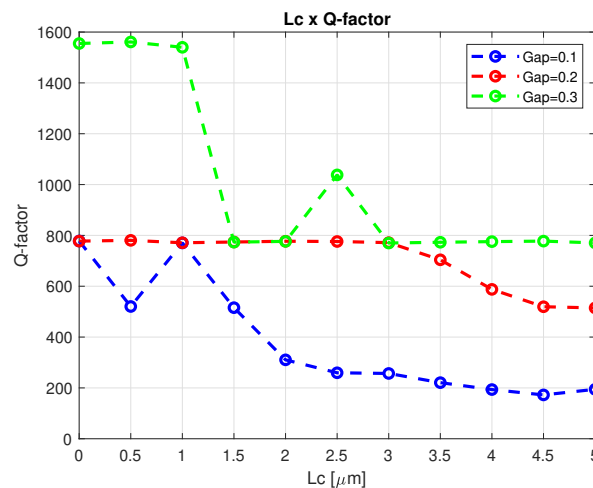
Com relação ao Q-factor, foi obtido uma redução com o aumento do comprimento de acoplamento, como pode ser visto pela figura 23. Essa redução já era um resultado esperado, pois a largura de banda e Q-factor são grandezas inversamente proporcionais. Os maiores resultados foram obtidos para o *gap* de 0.3  $\mu m$ , que iniciou com aproximadamente 1600 e se estabilizou em torno de 800, para os *gaps* de 0.2 e 0.1  $\mu m$  foi notado uma redução de seus valores também, passando de 800 para 500 e de 800 para 200, respectivamente.

Figura 22 – Gráfico do comprimento de onda x transmissão para anel com comprimento de acoplamento de 1  $\mu m$ .



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 23 – Gráfico do comprimento de acoplamento x Q-factor.



Fonte: Produção do próprio autor.

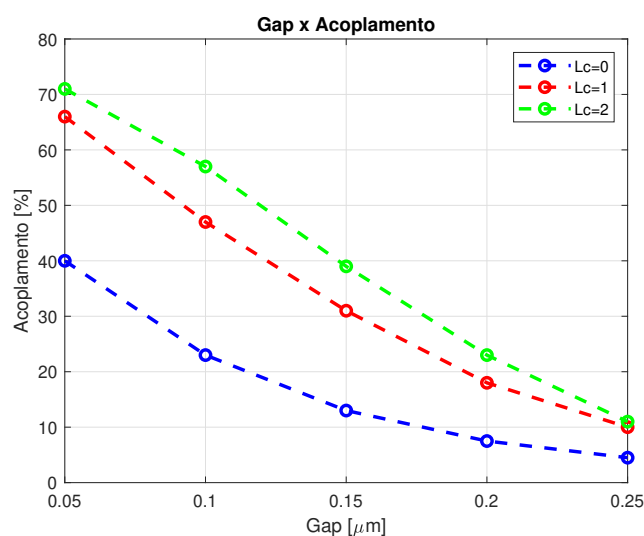
A figura 22 mostra a curva de transmissão obtida para o anel com comprimento de acoplamento de  $1 \mu m$ . Para esta configuração obtivemos quatro ressonâncias e uma largura de banda maior para comprimentos de onda próximos de  $1.6 \mu m$ . Para os cálculos de Q-factor e largura de banda foram considerados comprimentos de ressonância mais próximos de  $1.55 \mu m$ , no caso da figura 22 a análise foi feita em cima do comprimento de  $1.542 \mu m$ .

Por meio da avaliação dos dados, é possível concluir que a alteração do comprimento de acoplamento teve um efeito direto na largura de banda. Isso indica que tal configuração é adequada para filtros de banda, uma vez que o aumento no comprimento de acoplamento possibilita a maximização da largura de banda das ressonâncias observadas. Essa característica se revela particularmente interessante para aplicativos desse gênero.

## 5.2 Resultados das simulações da seção 4.2.1.2: Variação do *gap* para anel de caminho duplo

Os resultados obtidos para a variação do *gap* foram bem semelhantes aos da seção anterior, porém com mais ênfase na variação do *gap*. Com relação ao coeficiente de acoplamento, tivemos um redução esperada devido ao aumento da distância entre a guia e o ressonador, como pode ser visto pela figura 24. Os maiores valores para o *gap* de  $0.05 \mu m$  foram nos comprimentos de acoplamento de  $2$  e  $1 \mu m$ , enquanto que para o *gap* de  $0.25 \mu m$  todos resultados ficaram próximos, com valores variando entre  $4.5\%$  e  $11\%$ .

Figura 24 – Gráfico do *Gap* x Acoplamento.



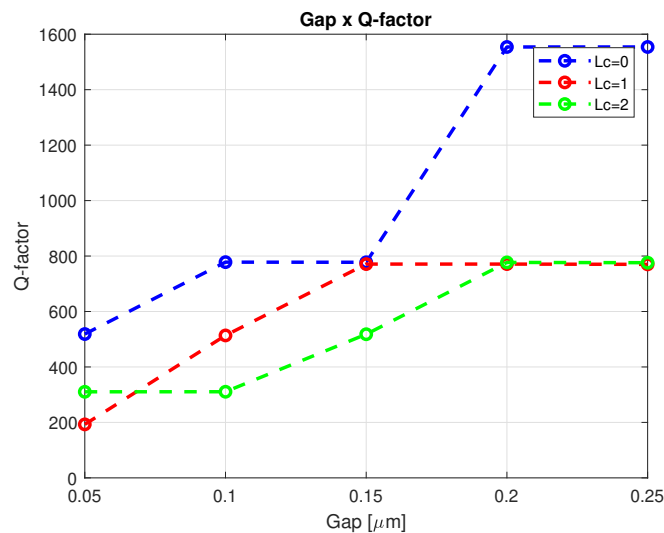
Fonte: Produção do próprio autor.

O aumento do *gap* também influenciou na diminuição da largura de banda obtida, que

variou entre 8 e 1  $\eta m$  para os três comprimentos de acoplamento fixados. O FSR se manteve inalterado, ficando com valores de 28, 25 e 22  $\eta m$  para  $L_c=0$ ,  $L_c=1$  e  $L_c=2$ , respectivamente. Com relação ao Q-factor, foi obtido valores maiores para *gaps* maiores, principalmente a distância de 0.25  $\mu m$ , porém não ultrapassando o valor de 1600, conforme figura 25.

A figura 26 mostra a resposta em frequência obtida para a variação do *gap* em um anel de raio 3  $\mu m$  e sem comprimento de acoplamento em cima do comprimento de onda de 1.55  $\mu m$ , nela é possível perceber a redução do acoplamento com a aumento da distância entre o ressonador e a guia de acesso.

Figura 25 – Gráfico do *Gap* x Q-factor.



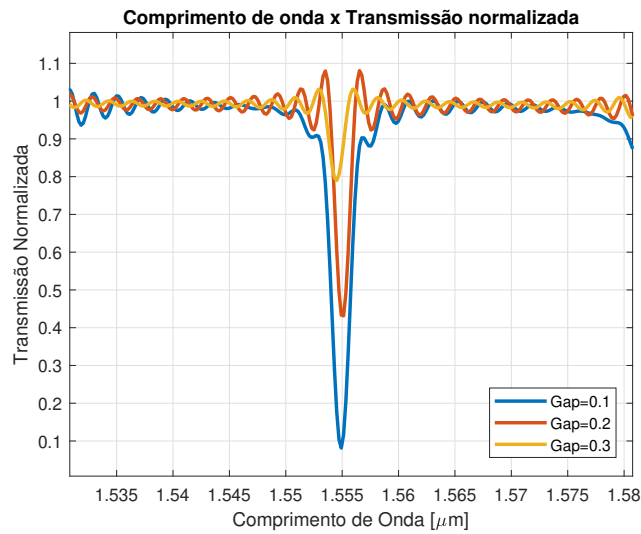
Fonte: Produção do próprio autor.

### 5.3 Resultados das simulações da seção 4.2.1.3: Variação do raio para anel de caminho duplo

Nas simulações envolvendo variação do raio temos como principal mudança a quantidade de ressonâncias que ocorrem entre os comprimentos de onda de 1500 a 1600  $\eta m$ . Para o anel com raio de 1  $\mu m$  foi obtido apenas uma ressonância, a medida que o tamanho do raio foi aumentado temos também aumento da quantidade de ressonâncias, onde um anel com raio de 7  $\mu m$  gerou nove ressonâncias no mesmo intervalo analisado. O aumento das ressonâncias é importante pois impacta diretamente no FSR, Q-factor e na largura de banda.

A figura 27 mostra a variação do FSR obtido com o aumento do raio do anel, onde temos

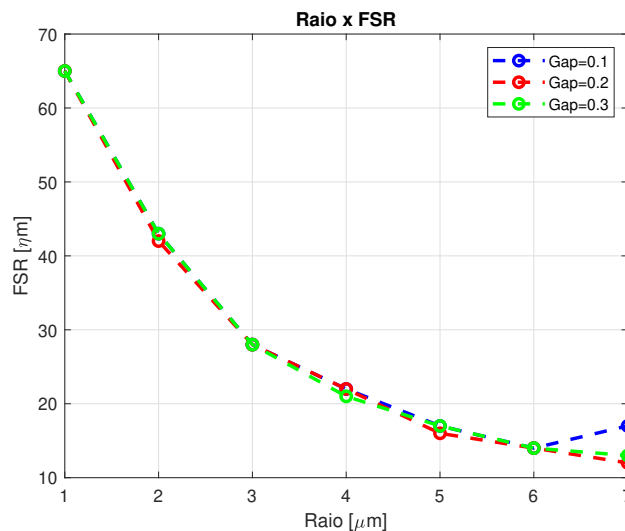


Figura 26 – Gráfico do Comprimento de onda x Transmissão normalizada para anel com raio de  $3 \mu\text{m}$ .

Fonte: Produção do próprio autor.

uma redução perceptível de seus valores, nota-se também que os *gaps* não afetam o FSR, com os valores de mantendo para os mesmos *gaps* de 0.1, 0.2 e 0.3  $\mu\text{m}$ . Com relação ao coeficiente de acoplamento, para todos os casos tivemos aumento, porém para *gaps* maiores foi obtido um aumento mais ligeiro em comparação a *gaps* menores, como é o caso do *gap* de 0.1  $\mu\text{m}$ . A figura 28 mostra a variação obtida para acoplamento.

Figura 27 – Gráfico do Raio x FSR.

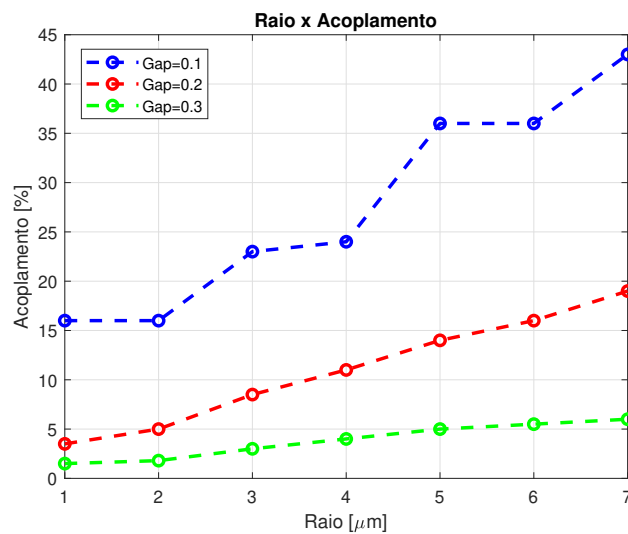


Fonte: Produção do próprio autor.

Para a largura de banda foi verificado um comportamento semelhante ao obtido para o FSR, uma redução em todos os casos avaliados devido ao aumento da quantidade de ressonâncias, com valores variando entre 6 a 1  $\eta\text{m}$ . A redução da largura de banda impactou no aumento

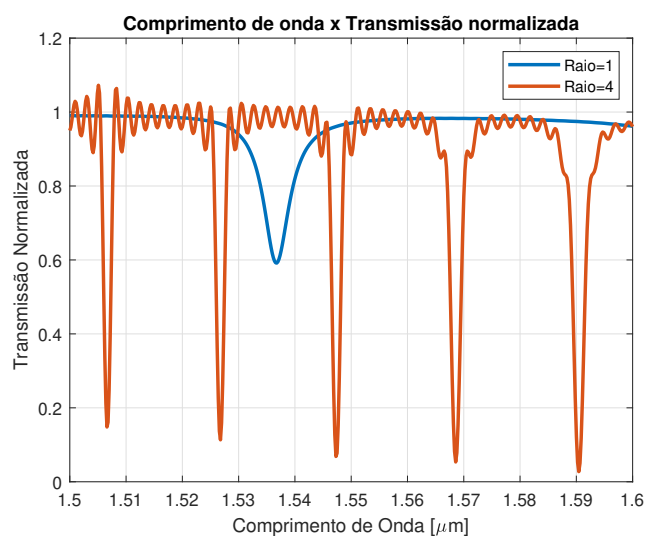
do Q-factor, ficando novamente na faixa de 800 a 1600 observada anteriormente. Caso o projeto de anel de ressonância foque em obter um Q-factor elevado, uma das maneiras de aumentar os valores de Q-factor é aumentar o raio do anel. Como as configurações analisadas apresentam anéis com raios consideravelmente pequenos o Q-factor obtido acaba ficando limitado, porém ao aumentar o raio do anel aumentamos também a quantidade de ressonâncias, forçando a redução da largura de banda e aumentando consequentemente o Q-factor, sendo uma das principais maneiras de se obter esses resultados.

Figura 28 – Gráfico do Raio x Acoplamento.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 29 – Gráfico do Comprimento de onda x Transmissão normalizada para anéis de raio 1 e 4  $\mu\text{m}$ .



Fonte: Produção do próprio autor.

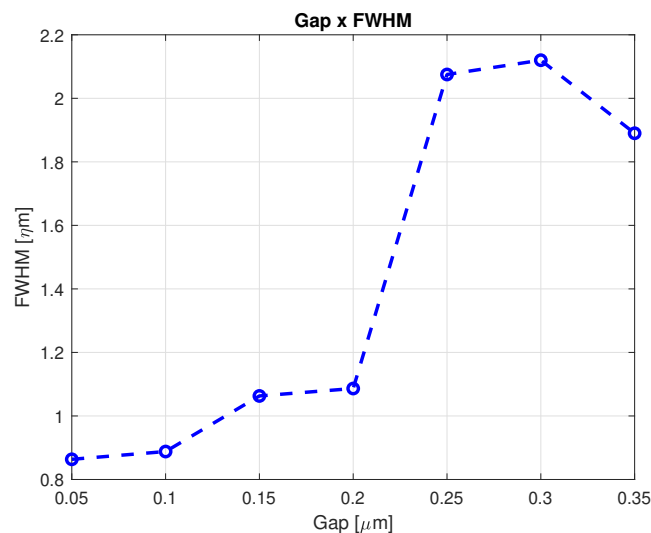
A figura 29 mostra a resposta obtida para os raios de 1 e 4  $\mu m$ , onde é possível perceber o aumento da quantidade de ressonâncias, a diminuição do FSR e a diminuição da largura de banda para as duas configurações.

Observamos que a principal consequência da variação do raio é o aumento tanto no número de ressonâncias quanto no valor do Q-factor. Esse resultado se mostra relevante quando se almeja obter ressonâncias muito definidas, acompanhadas de um Q-factor elevado. Isso se mostra particularmente vantajoso em aplicações como WDM, nas quais a extração de comprimentos de onda extremamente específicos é crucial.

#### 5.4 Resultados das simulações da seção 4.2.2.1: Variação do *gap* entre anéis para anéis acoplados em série

Essa simulação consistiu da variação do *gap* entre os dois anéis acoplados em série. A figura 30 mostra a variação da largura de banda, onde podemos ver que ao aumentar a distância entre os anéis temos o aumento da largura de banda. Esse comportamento demonstra a diferença da variação do *gap* entre guia de acesso/Anel e Anel/Anel, onde no primeiro caso ao aumentar o *gap* diminuímos a largura de banda, conforme seção 5.0.2, enquanto que para o *gap* Anel/Anel temos uma reação contrária.

Figura 30 – Gráfico do *Gap* x FWHM.

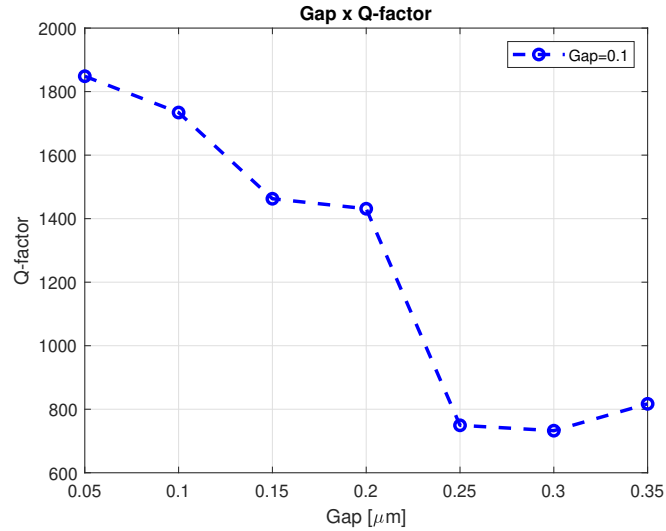


Fonte: Produção do próprio autor.

Como a variação foi feita apenas no *gap* não tivemos grande alteração do FSR, que se manteve entre 24 e 28  $\eta m$ . Com relação ao Q-factor, foi observado uma queda devido ao

aumento da largura de banda, conforme figura 31, onde iniciou em aproximadamente 1850 e terminou em 815.

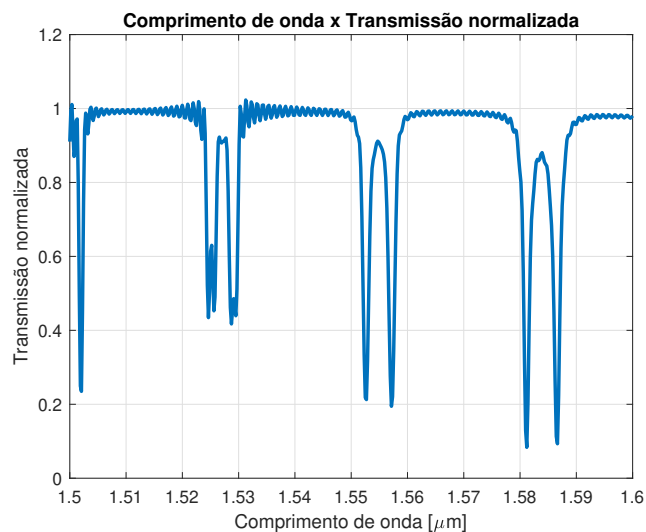
Figura 31 – Gráfico do *Gap* x Q-factor.



Fonte: Produção do próprio autor.

A figura 32 mostra a resposta obtida para um anel com *gap* de  $0,05 \mu\text{m}$ , onde é possível notar pares de ressonância devido a presença de dois anéis acoplados em série. Quando o *gap* é aumentado o par de ressonância se transforma em apenas uma ressonância, com maior largura de banda. Essa característica é mais explorada na seção 5.6, garantindo grande versatilidade para anéis acoplados em série.

Figura 32 – Gráfico do Comprimento de onda x Transmissão normalizada para anel acoplado com *gap* de  $0,05 \mu\text{m}$ .

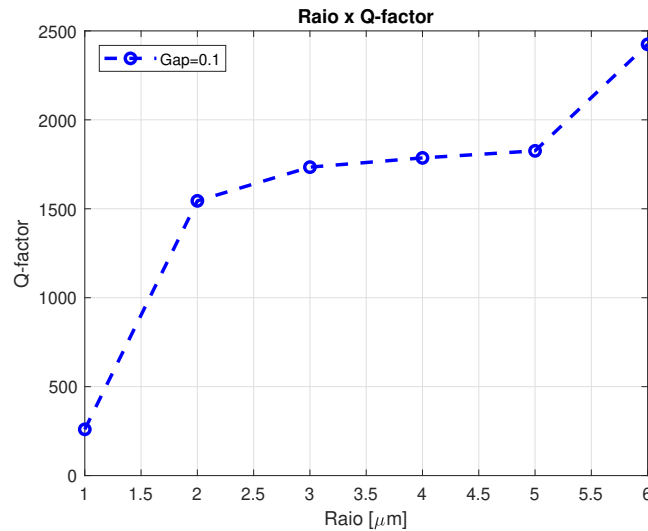


Fonte: Produção do próprio autor.

### 5.5 Resultados das simulações da seção 4.2.2.2: Variação do raio para anéis acoplados em série

Os resultados obtidos para a variação do raio foram bem próximos dos obtidos para o anel de caminho duplo, na seção 5.3, com o FSR caindo de 65 para  $9 \text{ } \eta m$  e a largura de banda de 6 para  $0.63 \text{ } \eta m$ . Como foi obtido pares de ressonância, para o cálculo do FSR foi escolhido o primeiro par de cada ressonância e calculado a distância somente entre esses pares. A queda da largura de banda possibilitou um leve aumento no Q-factor, isso mostra que anéis cascadeados em série, dependendo da distância entre os anéis, podem gerar um elevado Q-factor sem a necessidade de raios demasiadamente grandes, que são geralmente utilizados para essa aplicação. A figura 33 mostra a curva do Q-factor obtida.

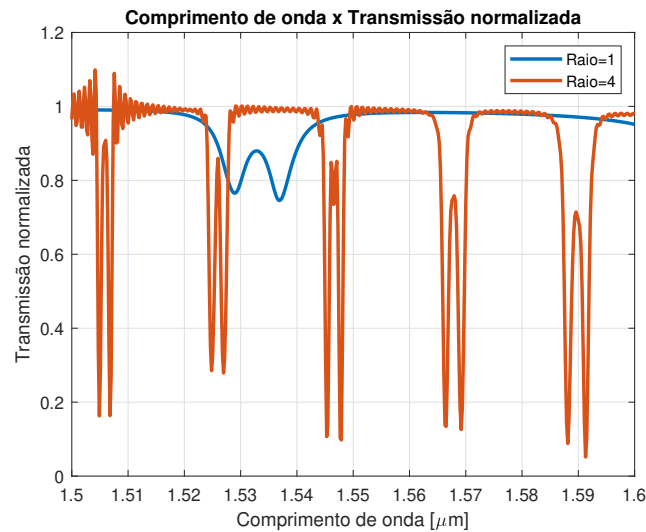
Figura 33 – Gráfico do Raio x Q-factor.



Fonte: Produção do próprio autor.

Para a resposta do anel nesta configuração, tivemos um resultado semelhante ao da figura 29, com quase o mesmo comprimento de onda em ressonância, conforme figura 34, sendo a principal diferença a presença dos pares de ressonância.

É observável novamente como a alteração do raio afeta o Q-factor obtido, especialmente em anéis acoplados. Isso reforça a abordagem em busca de aplicações que demandam ressonâncias bem definidas.

Figura 34 – Gráfico do Comprimento de onda x Transmissão normalizada para anéis de raio 1 e 4  $\mu m$ .

Fonte: Produção do próprio autor.

## 5.6 Resultados das simulações da seção 4.2.2.3: Variação da quantidade de anéis acoplados para anéis acoplados em série

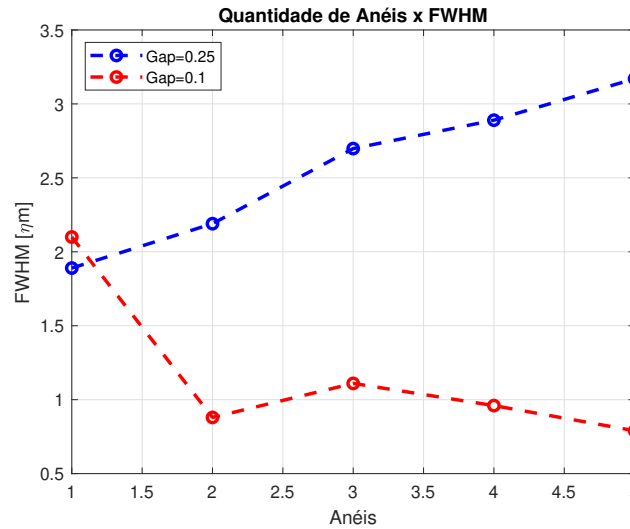
A última simulação para a configuração de anéis cascadeados em série foi a variação da quantidade de anéis acoplados, indo de um até cinco anéis. Com relação ao FSR, como foi adicionado anéis de mesmo raio, não foi obtido variação significativa de seus valores, visto que essa variação é mais ampla para anéis com diferentes tamanhos. Para o *gap* de 0.25 o FSR se manteve igual, com 29  $\eta m$ , enquanto que para o *gap* de 0.1 ele variou de 31 a 27  $\eta m$ .

A largura de banda e o Q-factor apresentaram comportamentos diferentes para os *gaps* de 0.1 e 0.25  $\mu m$ . Para 0.1  $\mu m$  tivemos uma diminuição da largura de banda, que se iniciou próximo de 2 e terminou abaixo de 1  $\eta m$ , essa diminuição acabou gerando um aumento do Q-factor, chegando próximo a 2000. Porém, para o *gap* de 0.25  $\mu m$  foi obtido uma resposta contrária, com a largura de banda aumentando de 1.89 para 3.17  $\eta m$ , e um Q-factor de aproximadamente 480. As figuras 35 e 36 mostram as curvas obtidas para largura de banda e Q-factor.

As diferentes respostas obtidas para a largura de banda e para o Q-factor mostram a versatilidade da configuração com anéis cascadeados, onde é possível gerar tanto filtros do tipo notch quanto filtros do tipo banda apenas alterando a distância entre os anéis. Além dessas variações, é possível combinar diferentes configurações para cada anel associado, como anéis cascadeados com diferentes raios, comprimentos de acoplamento e *gaps*, tornando

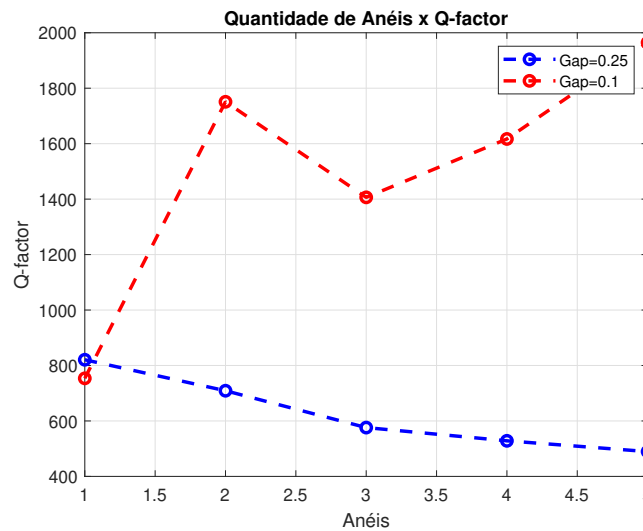
essa configuração ideal para diferentes aplicações e ajustes mais finos.

Figura 35 – Gráfico da Quantidade de Anéis x FWHM.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 36 – Gráfico da Quantidade de Anéis x Q-factor.

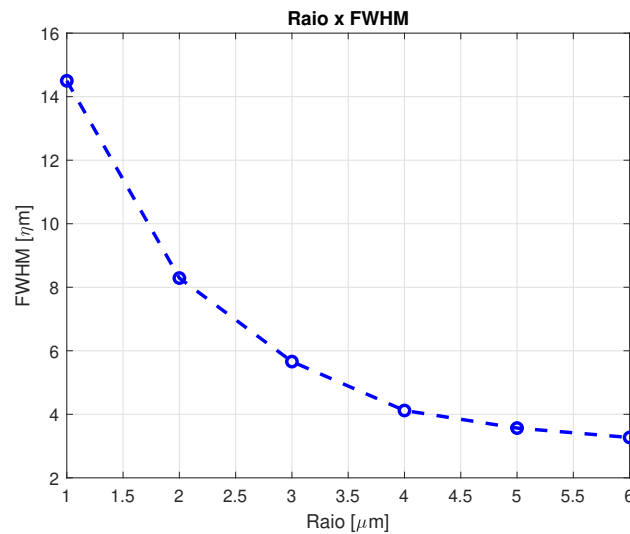


Fonte: Produção do próprio autor.

## 5.7 Resultados das simulações da seção 4.2.3.1: Variação do raio para anéis acoplados em paralelo

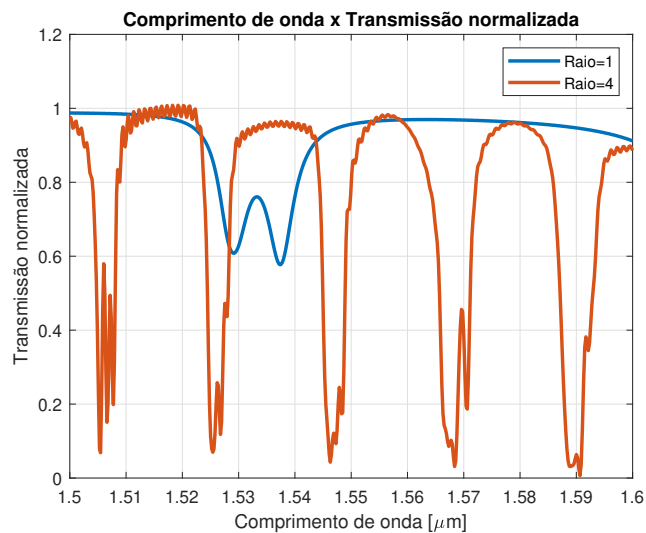
Os resultados para variação do raio com anéis cascadeados em paralelo se manteve muito próximo ao obtido nas seções anteriores. O FSR apresentou queda com o aumento do raio, caindo de 63 para aproximadamente 10  $\mu\text{m}$ , com uma curva bem semelhante a da figura 27.

Figura 37 – Gráfico do Raio x FWHM.



Fonte: Produção do próprio autor.

Com relação a largura de banda, uma das principais características da configuração de anéis acoplados em paralelo é resposta com maiores larguras de banda. Diante dessa característica, as larguras de banda obtidas para anéis com raios menores variou entre 14 e 8  $\eta\text{m}$ , já para o raio de 6  $\mu\text{m}$  foi obtido um valor de 3.27  $\eta\text{m}$ , conforme figura 37. Com valores mais altos para largura de banda, foi obtido menores valores para o Q-factor, que ficou na faixa de 100 a 500.

Figura 38 – Gráfico do Comprimento de onda x Transmissão normalizada para anéis de raio 1 e 4  $\mu\text{m}$ .

Fonte: Produção do próprio autor.

A figura 38 mostra a resposta obtida para a variação do raio, bem semelhante a vista na variação do raio para anel de caminho duplo e cascadeado em série. A principal diferença



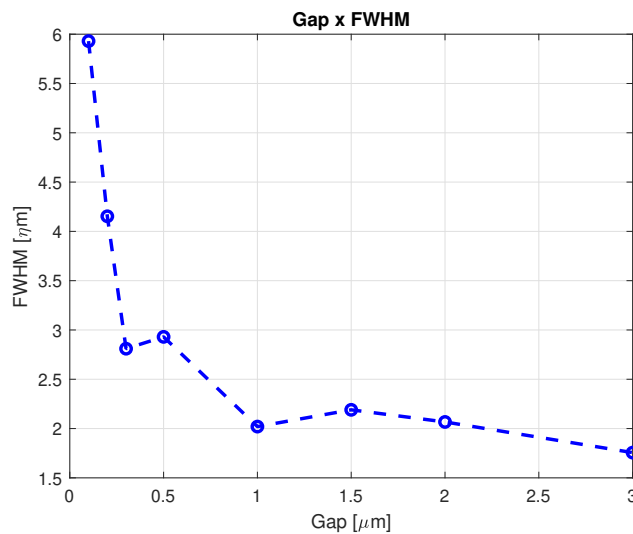
observada está na largura de banda para o anel de raio de  $4 \mu m$ , que apresentou valor maior do que os casos observados anteriormente.

É evidente que o principal destaque dessa configuração é a ampla largura de banda obtida, especialmente para aplicações que requerem essa característica, como os filtros de passagem de banda. Os anéis acoplados em paralelo emergem como a escolha mais vantajosa em comparação com outras configurações de anéis de ressonância.

### 5.8 Resultados das simulações da seção 4.2.3.2: Variação do *gap* entre anéis para anéis acoplados em paralelo

A alteração dos *gaps* não resultou em grandes impactos como visto nas respostas apresentadas anteriores. O FSR se manteve constante para todos os *gaps*, com valor de  $29 \eta m$ .

Figura 39 – Gráfico do Gap x FWHM.



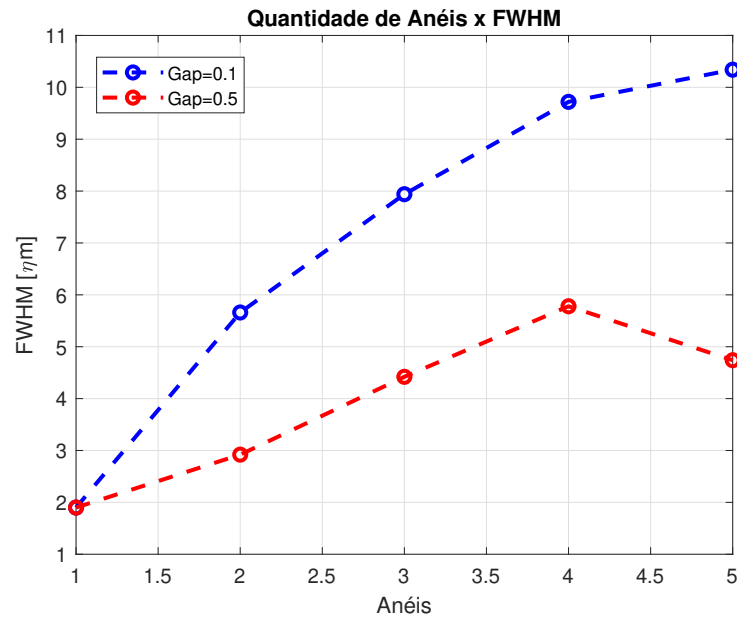
Fonte: Produção do próprio autor.

A largura de banda apresentou uma redução com o afastamento dos anéis, comportamento apostado ao observado na seção 5.4, se iniciando em aproximadamente 6 e terminando em  $1.76 \eta m$ , conforme figura 39. O Q-factor apresentou um aumento para *gaps* maiores, chegando a valores próximos de 900

### 5.9 Resultados das simulações da seção 4.2.3.3: Variação da quantidade de anéis acoplados para anéis acoplados em paralelo

Na simulação envolvendo a variação da quantidade de anéis, a principal característica notada é a oscilação da resposta para muitos anéis acoplados em determinados comprimentos de onda, onde acima de quatro anéis já foi possível identificar algumas distorções no sinal obtido. O FSR variou muito pouco para os dois *gaps* avaliados, ficando entre 30 e 27  $\eta m$ .

Figura 40 – Gráfico da Quantidade de anéis x FWHM.



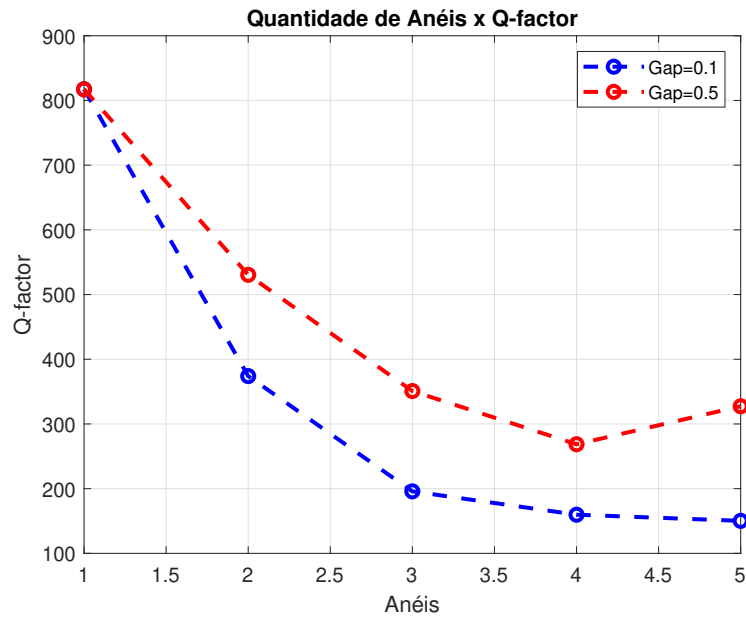
Fonte: Produção do próprio autor.

Com relação a largura de banda, o aumento na quantidade de anéis gerou um aumento considerável, sendo que para o *gap* de 0.1  $\mu m$  foi obtido um salto de 2 para 11  $\eta m$  com cinco anéis acoplados, conforme figura 40.

Com o aumento da largura de banda consequentemente tivemos também uma redução do Q-factor obtido, como ser observado na figura 41. Podemos dizer que para aplicações envolvendo filtros com banda o mais recomendado é utilizar até quatro anéis, por esses apresentarem resposta menos oscilatória.

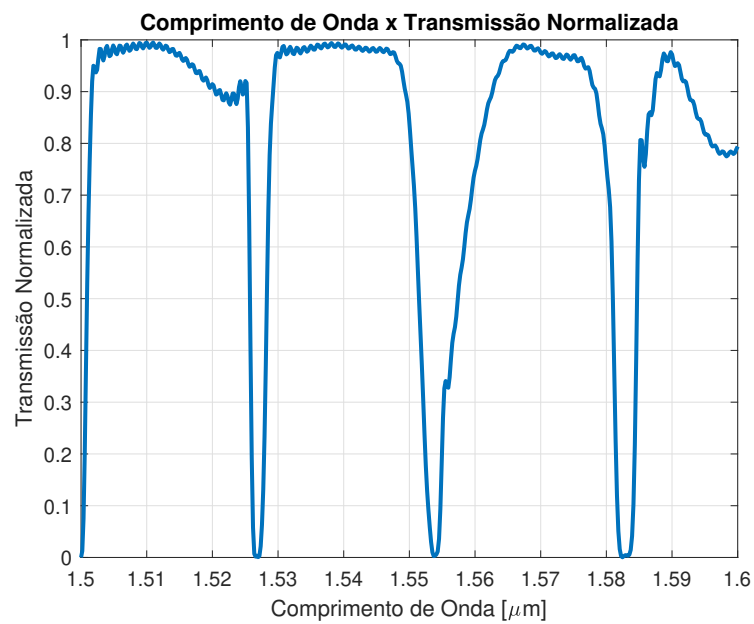
A figura 42 mostra a resposta de quatro anéis acoplados em paralelo com *gap* de 0.1  $\mu m$ , onde foi possível obter uma faixa plana entre o intervalo de 1.53 a 1.55  $\eta m$ .

Figura 41 – Gráfico da Quantidade de anéis x Q-factor.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 42 – Gráfico do Comprimento de Onda x Transmissão normalizada para quatro anéis acoplados em paralelo.



Fonte: Produção do próprio autor.

## 6 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

O objetivo principal deste projeto de graduação foi realizar a síntese de anéis de ressonância em fotônica integrada, levantando a influência de seus parâmetros construtivos em sua resposta a determinadas frequências. Para isso, foi utilizado as três principais configurações para anéis de ressonância, anel de caminho duplo, anéis acoplados em série e anéis acoplados em paralelo.

Como resultado, foi possível perceber como a mudança dos parâmetros construtivos afetam sua resposta em frequência. A alteração desses parâmetros possibilita maximizar o uso do dispositivo para as mais diversas aplicações. Anéis acoplados em série se mostraram extremamente versáteis, conseguindo trazer os benefícios de outras configurações, podendo atuar como um filtro banda ou notch, além de ser altamente customizável. Anéis acoplados em paralelo no geral se mostraram excelentes para filtros do tipo banda, conseguindo atingir bons valores para largura de banda. Por fim, o anel de caminho duplo apresentou resultados entre as outras duas configurações, não sendo altamente customizável, mas uma solução simples e também eficaz.

A fotônica de silício também vem se mostrando uma plataforma extremamente importante para os anéis de ressonância. As guias de ondas de SOI estão cada vez mais apresentando melhores resultados de desempenho, permitindo anéis com curvatura extremamente pequena, e possibilitando as mais variadas aplicações, como filtros, sensores e moduladores.

Para trabalhos futuros, sugere-se:

- Variação individual de cada anel para a configuração de anéis acoplados em série.
- Combinar e cascatear diferentes estruturas e dispositivos, como Mach-Zehnder, para estudar seus efeitos combinados.
- Utilizar outras plataformas, como fosfeto de índio e nitreto de silício, e estudar maneiras de integrá-las com a fotônica em silício.
- Fabricação e caracterização dos arranjos propostos, além da verificação com os resultados das simulações.

Por fim, de acordo com o resultados obtidos e análises realizadas, foi possível atender aos objetivos iniciais propostos, sendo esses resultados extremamente importantes para a

realização de um novo projeto de anel de ressonância. Podemos dizer que a área dos anéis de ressonância em silício vem progredindo a uma taxa significativa graças a um crescente interesse na área, que vai permitir cada vez mais novos avanços tecnológicos que irão se traduzir em novas estruturas e aplicações.

## REFERÊNCIAS

- AMIN, R.; MAITI, R.; CARFANO, C.; MA, Z.; TAHERSIMA, M. H.; LILACH, Y.; RATNAYAKE, D.; DALIR, H.; SORGER, V. J. 0.52  $\mu$ m ito-based mach-zehnder modulator in silicon photonics. APL Photonics, AIP Publishing LLC, v. 3, n. 12, p. 126104, 2018. Citado na página 22.
- ARAFIN, S.; COLDREN, L. A. Advanced in photonic integrated circuits for communication and sensing. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE, v. 24, n. 1, p. 1–12, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 18.
- ARAÚJO, L. M. C. d. et al. Fotônica integrada para redes ópticas flexíveis usando supercanais ópticos. Universidade Federal de Campina Grande, 2017. Citado na página 24.
- BAETS, R.; SUBRAMANIAN, A. Z.; CLEMMEN, S.; KUYKEN, B.; BIENSTMAN, P.; THOMAS, N. L.; ROELKENS, G.; THOURHOUT, D. V.; HELIN, P.; SEVERI, S. Silicon photonics: Silicon nitride versus silicon-on-insulator. In: OPTICA PUBLISHING GROUP. Optical Fiber Communication Conference. [S.l.], 2016. p. Th3J–1. Citado na página 18.
- BLUMENTHAL, D. J.; HEIDEMAN, R.; GEUZEBROEK, D.; LEINSE, A.; ROELOFFZEN, C. Silicon nitride in silicon photonics. Proceedings of the IEEE, IEEE, v. 106, n. 12, p. 2209–2231, 2018. Citado na página 18.
- BOGAERTS, W.; CHROSTOWSKI, L. Silicon photonics circuit design: methods, tools and challenges. Laser & Photonics Reviews, Wiley Online Library, v. 12, n. 4, p. 1700237, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 17.
- BOGAERTS, W.; HEYN, P. D.; VAERENBERGH, T. V.; VOS, K. D.; SELVARAJA, S. K.; CLAES, T.; DUMON, P.; BIENSTMAN, P.; THOURHOUT, D. V.; BAETS, R. Silicon microring resonators. Laser & Photonics Reviews, Wiley Online Library, v. 6, n. 1, p. 47–73, 2012. Citado 4 vezes nas páginas 13, 26, 28 e 29.
- CARVALHO, M. T. Técnicas de interferometria óptica aplicada à medicina, odontologia e comunicações ópticas. Universidade Federal de Pernambuco, 2006. Citado na página 22.
- COMSOL. Silicon Photonics: Designing and Prototyping Silicon Waveguides. 2017. Disponível em: <<https://www.comsol.com/blogs/silicon-photonics-designing-and-prototyping-silicon-waveguides/>>. Acesso em 25 de mar. de 2022. Citado na página 16.
- DAVIES, D.; BURNHAM, M.; BENSON, T.; KASSIM, N.; SEIFOURI, M. Optical waveguides and simox characterisation. in 1989 ieee sos. In: SOI Technology Conference (Cat. No. 89CH2796-1), 3-5 Oct. [S.l.: s.n.], 1989. Citado na página 20.
- HORST, F.; GREEN, W. M.; ASSEFA, S.; SHANK, S. M.; VLASOV, Y. A.; OFFREIN, B. J. Cascaded mach-zehnder wavelength filters in silicon photonics for low loss and flat pass-band wdm (de-) multiplexing. Optics express, Optical Society of America, v. 21, n. 10, p. 11652–11658, 2013. Citado na página 22.

- INFINERA. The Advantages of Indium Phosphide Photonic Integration in Highperformance Coherent Optics. 2021. Disponível em: <<https://www.infinera.com/white-paper/the-advantages-of-indium-phosphide-photonic-integration-in-high-performance-coherent-optics/>>. Acesso em 17 de jul. de 2022. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 18.
- IPSR. IPSR-I 2020 overview. 2020. Disponível em: <<https://photonicsmanufacturing.org/>>. Acesso em 03 de abril de 2023. Citado na página 17.
- JALALI, B.; FATHPOUR, S. Silicon photonics. Journal of lightwave technology, IEEE, v. 24, n. 12, p. 4600–4615, 2006. Citado na página 19.
- JOAQUIM, M. Método das diferenças finitas no domínio do tempo aplicado à grade tridimensional formada por prismas hexagonais. 2016. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 33.
- KALYANI, V. L.; SHARMA, V. Different types of optical filters and their realistic application. Journal of Management Engineering and Information Technology (JMEIT), v. 3, n. 3, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 24.
- LIU, D.; HE, J.; XIANG, Y.; XU, Y.; DAI, D. High-performance silicon photonic filters based on all-passive tenth-order adiabatic elliptical-microrings. APL Photonics, AIP Publishing LLC, v. 7, n. 5, p. 051303, 2022. Citado na página 27.
- LIU, D.; ZHANG, L.; TAN, Y.; DAI, D. High-order adiabatic elliptical-microring filter with an ultra-large free-spectral-range. Journal of Lightwave Technology, IEEE, v. 39, n. 18, p. 5910–5916, 2021. Citado na página 22.
- LUZ, R. L. et al. O método de diferenças finitas no domínio do tempo em eletromagnetismo. Flosrianópolis, SC, 2013. Citado na página 32.
- MADSEN, C. K.; ZHAO, J. H. Optical filter design and analysis. [S.l.]: Wiley New York, 1999. Citado na página 24.
- PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. D. Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico-2ª Edição. [S.l.]: Editora Feevale, 2013. Citado na página 14.
- QI, Y.; LI, Y. Integrated lithium niobate photonics. Nanophotonics, De Gruyter, v. 9, n. 6, p. 1287–1320, 2020. Citado na página 17.
- REED, G. T.; HEADLEY, W. R.; PNG, C. J. Silicon photonics: the early years. In: SPIE. Optoelectronic Integration on Silicon II. [S.l.], 2005. v. 5730, p. 1–18. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 26.
- RICCI, T. F.; OSTERMANN, F.; PRADO, S. D. O tratamento clássico do interferômetro de mach-zehnder: uma releitura mais moderna do experimento da fenda dupla na introdução da física quântica. Revista Brasileira de Ensino de Física, SciELO Brasil, v. 29, p. 79–88, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.
- SADOT, D.; BOIMOVICH, E. Tunable optical filters for dense wdm networks. IEEE Communications Magazine, IEEE, v. 36, n. 12, p. 50–55, 1998. Citado na página 23.

- SCHMIDTCHEN, J.; SPLETT, A.; SCHUPPERT, B.; PETERMANN, K. Low loss integrated-optical rib-waveguides in soi. In: IEEE. 1991 IEEE International SOI Conference Proceedings. [S.l.], 1991. p. 142–143. Citado na página 20.
- SOREF, R.; BENNETT, B. Electrooptical effects in silicon. IEEE journal of quantum electronics, IEEE, v. 23, n. 1, p. 123–129, 1987. Citado na página 24.
- SOREF, R.; LORENZO, J. Single-crystal silicon: a new material for 1.3 and 1.6  $\mu\text{m}$  integrated-optical components. Electronics Letters, v. 21, n. 21, p. 953–954, 1985. Citado na página 20.
- THOMSON, D.; ZILKIE, A.; BOWERS, J. E.; KOMLJENOVIC, T.; REED, G. T.; VIVIEN, L.; MARRIS-MORINI, D.; CASSAN, E.; VIROT, L.; FÉDÉLI, J.-M. et al. Roadmap on silicon photonics. Journal of Optics, IOP Publishing, v. 18, n. 7, p. 073003, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 23.
- THYLÉN, L.; WOSINSKI, L. Integrated photonics in the 21st century. Photonics Research, Optica Publishing Group, v. 2, n. 2, p. 75–81, 2014. Citado 4 vezes nas páginas 12, 21, 22 e 27.
- WINNIE, N. Y.; MICHEL, J.; KIMERLING, L. C. Athermal high-index-contrast waveguide design. IEEE Photonics Technology Letters, IEEE, v. 20, n. 11, p. 885–887, 2008. Citado na página 27.
- ZHANG, X.; HOSSEINI, A.; LIN, X.; SUBBARAMAN, H.; CHEN, R. T. Polymer-based hybrid-integrated photonic devices for silicon on-chip modulation and board-level optical interconnects. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE, v. 19, n. 6, p. 196–210, 2013. Citado na página 17.