

# Novas arquiteturas fotônicas para redução da dependência do Fator de Qualidade e Fator de Extinção à erros de nanofabricação em cavidades ópticas

**Estudante:** Bruno Rangel Furtado de Souza  
*Departamento de Engenharia Elétrica - DEE*  
*Universidade Federal de São Carlos - UFSCar*  
São Carlos, SP

**Orientador:** Luís Alberto Mijam Barêa  
*Departamento de Engenharia Elétrica - DEE*  
*Universidade Federal de São Carlos - UFSCar*  
São Carlos, SP

**Resumo**— Neste trabalho de conclusão de curso foi utilizado dados experimentais de um dispositivo fabricado em uma Foundry para demonstrar redução da dependência do valor do fator de qualidade e da potência mínima transmitida à erros de nanofabricação. Para provar isso, se comparou as métricas de desempenho de uma cavidade de raio  $5\mu\text{m}$  acoplada diretamente em um guia de onda com uma mesma cavidade acoplada dentro de uma cavidade maior, com raio de  $20\mu\text{m}$ , que por sua vez foi acoplada em um guia de onda. Os resultados mostraram que o fator de qualidade e o fator de extinção de uma cavidade aumentam significativamente quando acoplada em outro anel comparado com o acoplamento dessa cavidade diretamente em um guia de onda. Além disso, esse arranjo demonstrou robustez para esses parâmetros, quando submetidos a variações no gap ou na rugosidade dos guias que formam as cavidades.

**Palavras-chave**— Acoplamento de cavidade interna em formato de anel, Fator de Qualidade, Fator de Extinção, Guia de Onda, Robustez, Variações do gap.

## I. INTRODUÇÃO

A evolução das telecomunicações, a chegada da quinta geração de comunicações móveis (5G) e o surgimento da indústria 4.0 fez com que, cada vez mais, houvesse dispositivos se comunicando e conectados em uma rede. Isto proporciona um alto volume de tráfego de dados, fazendo com que seja necessária uma maior largura de banda. Além do aumento no número de usuários conectados, o tamanho dos arquivos transmitidos via internet também aumentou. Para suportar diversos dispositivos, cada vez mais rápidos, a eletrônica atual já apresenta componentes reduzidos para a escala nanométrica, com transistores, por exemplo, contendo portas de 22 nm. [1] Entretanto, a redução de dimensões de dispositivos físicos não é escalável, o que indica que a integração fotônica se torna inevitável para suprir a necessidade da miniaturização e redução do consumo de energia, permitindo o processamento e transmissão de sinais no domínio óptico. No domínio da luz, a integração entre os diferentes domínios necessários para telecomunicações (eletrônica, fotônica e ondas de rádio) se torna necessária. Para a integração entre eletrônica e fotônica, em termos de dimensões, há uma discrepância entre a dimensão dos transistores e dos dispositivos ópticos, sendo que a solução atual para miniaturizar os componentes fotônicos são as microcavidades. Já no caso da integração entre fotônica e microondas, os comprimentos das ondas transmitidas são incompatíveis com as dimensões miniaturizadas das estruturas fotônicas, sendo que a solução encontrada para essa integração é o uso de dispositivos contendo diversas cavidades ressonantes acopladas e fabricadas sobre plataformas compatíveis com a eletrônica, como o Silício e Nitreto de Silício. Além de facilitar a integração com a eletrônica e com todos os processos de fabricação atuais, estas plataformas unidas às cavidades ressonantes permitem uma facilidade para guiar e armazenar a luz.

Dispositivos optoeletrônicos e fotônicos baseados em microrressonadores ópticos permitem confinar fótons em volumes pequenos, proporcionando baixo consumo de energia, alta velocidade de processamento e altos tempos de vida fotônico. O formato destas micro cavidades e os materiais utilizados para sua fabricação podem ser ajustados para suportar um espectro desejado, sendo estas micro cavidades ultracompactas e de fácil integração com outros dispositivos, podendo ser empregadas em circuitos fotônicos integrados de larga escala. [2] [3] No entanto, dispositivos baseados em micro cavidades requerem uma resposta espectral no qual os modos presentes devem ser bem definidos e espaçados, com alto fator de qualidade e alto fator de extinção. Com isto, se tornam possíveis correções de efeitos de dispersão, que na maioria das vezes prejudica o funcionamento de vários dispositivos, e aplicações no armazenamento de dados e processamento de sinais. De modo geral, os ressonadores devem ter alto fator de qualidade (Q), com ressonâncias bem definidas e ocupando uma área reduzida no chip. Desta maneira deve-se tentar ao máximo reduzir as perdas dos dispositivos, sendo que a maioria destas perdas se deve a espalhamento por rugosidade causada durante a fabricação. Portanto, a alta qualidade dos materiais e dos processos de nanofabricação envolvidos são essenciais para se obter filtros com altos Qs e evitar o desperdício de materiais.

De toda forma, mesmo aplicando processos de nanofabricação precisos e adequados, os erros em algumas dimensões do dispositivo ou a presença de rugosidade nas paredes das cavidades durante as etapas de corrosão acabam estando presentes, tornando-se um gargalo para indústria de componentes fotônicos. Nesse sentido, aplicando o método de matriz de transferência (do inglês *Transfer-Matrix Method*, TMM) e programas robustos de simulação capazes de simular a resposta espectral de arranjos de microcavidades, junto com dispositivos fabricados em um processo convencional e compatível com a tecnologia CMOS, foi possível provar nesse trabalho que quando saímos de uma condição de anel acoplado diretamente em um guia de onda para um anel acoplado no interior de um segundo anel, que por sua vez está acoplado no guia, o sistema altera seu comportamento, garantindo condições espectrais interessantes e relevantes para os dispositivos baseados nesses arranjos de microcavidades, bem como maior robustez quanto aos erros de fabricação. Nesses arranjos de microcavidades, conhecidos como Moléculas Fotônicas (PMs) [4] [5], quando o gap, ou seja, a distância entre a cavidade e o guia de onda ou entre as cavidades, variam, é possível demonstrar que o dispositivo apresenta reduzida modificação na forma das ressonâncias e pouco prejuízo para os fatores de qualidades das cavidades empregadas. Ademais, também se demonstrou que o fator de extinção é pouco modificado com erros nesses gaps, permitindo um design mais flexível e robusto para erros de fabricação.

## II. METODOLOGIA

Neste trabalho foram utilizados dados experimentais de dispositivos fabricados em uma Foundry no exterior, cujas caracterizações ópticas permitiram obter informações sobre o índice de grupo ( $N_g$ ), a atenuação ( $A$ ) e o fator de acoplamento ( $k$ ) de cada uma das cavidades fabricadas. Esses resultados permitiram validar as fórmulas matemáticas desenvolvidas com o TMM e, com isto, conseguir inferir corretamente o comportamento desses dispositivos ópticos em diferentes análises. As equações obtidas por esse método geraram gráficos e resultados que permitiram identificar quais os índices de refração efetivos, o espaçamento espectral livre (do inglês *Free spectral range*, FSR), a potência transmitida e o fator de qualidade. Os resultados gerados teoricamente foram comparados com os dados experimentais do dispositivo que foi fabricado por uma Foundry no exterior e caracterizado em nossos laboratórios parceiros na Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Após isto, foi realizado um fitting das curvas utilizando a teoria desenvolvida a fim de provar que mesmo com variações nos gaps entre cavidades e guias de onda ou cavidades-cavidades, pouca modificação é vista nos fatores de qualidade e na potência mínima transmitida nas ressonâncias das cavidades internas. Essa demonstração é fundamental para provar que esses arranjos garantem robustez para os dispositivos baseados em PMs.

Os resultados obtidos foram discutidos para interpretar o efeito das variações dos parâmetros dos dispositivos em seu desempenho e entender como essas informações podem ser úteis para o aprimoramento do projeto de circuitos fotônicos baseados em dispositivos similares.

### A. Dispositivo

Os dispositivos investigados nesse trabalho foram fabricados em uma Foundry no exterior em uma plataforma de Silício sobre isolante (do inglês *Silicon on Insulator*, SOI), como mostrado na Figura 1(a), e possuem arquiteturas diferentes, que permitem combinar as cavidades e investigá-las quando estão acopladas diretamente em um guia de onda ou formando uma PM. O primeiro dispositivo é constituído de um anel com  $5\mu\text{m}$  de raio acoplado a um guia de onda por um gap de  $200\text{nm}$ , como mostrado na Figura 1(b). Nessa mesma Figura 1(b) também é mostrado um segundo dispositivo formado por um anel com raio  $20\mu\text{m}$ .

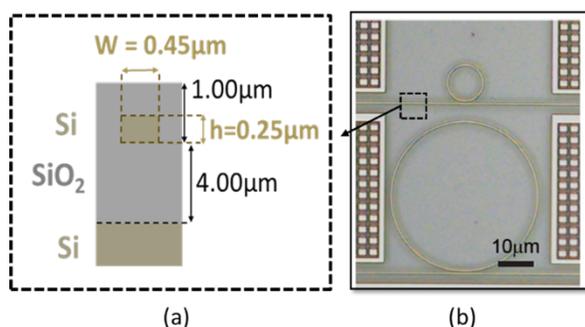


Figura 1: (a) Plataforma de silício sobre isolante utilizada para fabricação na Foundry, com as dimensões do guia de onda e das camadas de Silício (Si) e dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) empregadas; (b) Cavidades em anel acopladas diretamente sobre um guia de onda, fabricadas em uma Foundry. O anel menor possui um raio de  $5\mu\text{m}$  e está acoplado em um guia de onda com gap de  $200\text{nm}$ . O anel maior possui um raio de  $20\mu\text{m}$  e está acoplado ao guia de onda com a mesma distância de  $200\text{nm}$ .

A combinação entre os dois dispositivos mostrados na Figura

1(b) pode ser realizada por meio da fabricação de um terceiro dispositivo onde o anel de raio  $5\mu\text{m}$  foi acoplado no interior do anel de raio  $20\mu\text{m}$ , que continuou acoplado ao guia de onda. Nesse dispositivo, mostrado em detalhes na Figura 2, os gaps entre cavidade-cavidade e cavidade-guia de onda são de  $200\text{nm}$ .

A fim de investigar o impacto da variação do gap na resposta espectral do dispositivo da Figura 1(b), o anel de raio  $5\mu\text{m}$  teve sua distância do guia de onda alterada de  $200\text{nm}$  para  $300$  e  $400\text{nm}$ . Um processo semelhante foi realizado com o dispositivo da Figura 2 que contém duas cavidades. Entretanto, neste último, foi alterado apenas a distância entre a cavidade de raio  $5\mu\text{m}$  com a de  $20\mu\text{m}$ , a fim de avaliar o impacto desse erro de fabricação nas ressonâncias da cavidade menor. Para cada arranjo de distâncias foi gerado dados acerca do comportamento do dispositivo, empregando o aparato experimental da Figura 3.

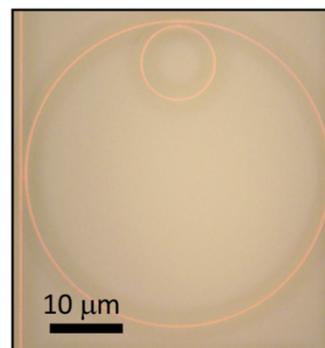


Figura 2: Molécula Fotônica fabricada em uma plataforma SOI e formada por duas cavidades em anel (raios de  $20\mu\text{m}$  e  $5\mu\text{m}$ ) acopladas em um guia de onda. Os gaps cavidade-cavidade e cavidade-guia são de  $200\text{nm}$ .

No aparato experimental da Figura 3 é possível ver que, primeiramente, um feixe de laser gerado por um laser sintonizado é levado por uma fibra óptica até um polarizador, cuja saída também é acoplada em uma fibra contendo uma lente do tipo bastão com índice de gradiente (GRIN). Essa lente é responsável por acoplar o laser na entrada do guia de onda. O laser acoplado atravessa o dispositivo, interagindo com as cavidades, chegando à saída do guia de onda onde é acoplado em uma segunda fibra, utilizando uma segunda lente. Os comprimentos de onda que alcançam a segunda fibra óptica são guiados até um fotodetector, responsável por monitorar a potência da saída. Após o detector os dados experimentais da saída do dispositivo são convertidos e armazenadas em um computador.

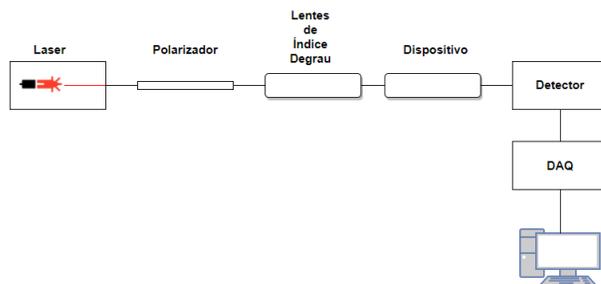


Figura 3: Aparato experimental utilizado para caracterizar os dispositivos fabricados em uma foundry.

### B. Desenvolvimento Matemático

Para o desenvolvimento matemático capaz de prever a resposta espectral dos dispositivos fabricados, investigou-se primeiramente

as equações relacionadas aos parâmetros essenciais para descrever esses dispositivos de interesse. Tais parâmetros estão ilustrados na Figura 4, que traz um exemplo de resposta espectral para um anel acoplado em um guia de onda.

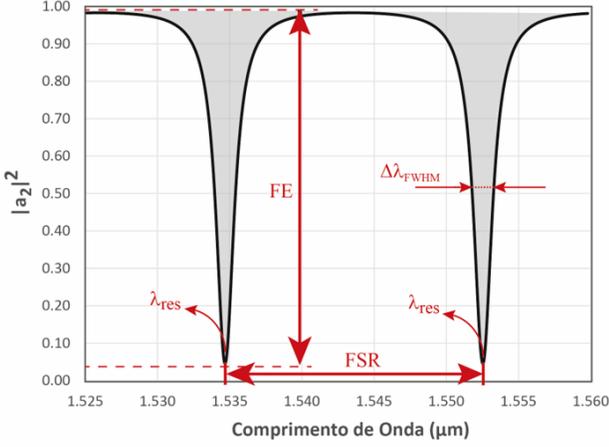


Figura 4: Parâmetros de interesse na caracterização de cavidades acopladas em guias de onda [6]

Analisando a Figura 4 é possível ver que o fator de extinção (FE) é definido como a diferença entre o máximo e o mínimo de intensidade na saída do guia de onda, ou seja, após a passagem pelas cavidades. A potência transmitida (PT) é definida como:

$$PT = 10 \text{Log}(FE) \quad (1)$$

O comprimento de onda de uma das ressonâncias é dado por  $\lambda_{res}$ , já a largura máxima a meia altura é dada por  $\lambda_{FWHM}$ . O FSR é dado como a diferença do comprimento de onda de duas ressonâncias adjacentes. Já o índice de grupo (Ng), calculado a partir do índice de refração efetivo ( $n_{ef}$ ), é dado pela relação:

$$n_g = n_{ef} - \lambda_{res} \frac{dn_{ef}}{d\lambda} \quad (2)$$

A finesse (F) é definida como a razão entre o espaçamento espectral livre e a largura máxima a meia altura para uma Lorentziana traçada em uma das ressonâncias do ressonador [7], e é dada por:

$$F = \frac{FSR}{\Delta\lambda} \quad (3)$$

O Q está diretamente relacionado à dissipação de energia dos modos nas paredes da cavidade e no meio dielétrico em que se propaga. Este fator é definido como  $2\pi$  multiplicado pela razão entre a energia armazenada no ressonador e a energia perdida por ciclo da onda eletromagnética, podendo ser descrito como:

$$Q = 2\pi \frac{U_a}{P_d T} = \omega_0 \frac{U_a}{P_d} = \frac{\lambda_{res}}{\lambda_{FWHM}} \quad (4)$$

Na equação 4,  $U_a$  é a energia armazenada na cavidade,  $P_d$  é a taxa de energia dissipada em cada ciclo da propagação do modo, e  $\omega_0$  é a frequência angular do modo ressonante. Considerando que a energia armazenada é dissipada na forma de decaimento exponencial com tempo de vida fotônico  $t_p$ , têm-se:

$$U(t) = U_0 e^{-\frac{t}{\tau_p}} = U_0 e^{-\frac{\omega_0 t}{Q}} \quad (5)$$

Logo, Q pode ser definido como:

$$Q = 2\pi \frac{\tau_p}{T} \quad (6)$$

Portanto, o fator de qualidade pode ser dado pela relação entre o tempo de vida fotônico e o período da oscilação eletromagnética.

Deste modo percebe-se que a energia armazenada depende do fator Q de modo que quando este fator é alto, ou seja, o tempo de vida fotônico é grande, a redução de energia é minimizada. Portanto, para cavidades com altos fatores Q, a energia armazenada permanecerá mais tempo dentro destas cavidades.

Para a análise da troca de potência entre um guia de onda e um ressonador, considerou-se o esquema ilustrado na Figura 5, em que o acoplamento entre os dispositivos é assumido sem perdas e independente da natureza do acoplamento. Nesse contexto, um único modo unidirecional do ressonador é excitado pela amplitude complexa do campo eletromagnético injetado no guia,  $a_1$ , sendo que uma parte dessa amplitude é transmitida e outra é acoplada ao ressonador, representada por  $b_1$ . O coeficiente de transmissão,  $t$ , indica a fração de potência transmitida. Ao atravessar o ressonador, a amplitude  $b_1$  sofre uma atenuação  $A$  e um desvio de fase  $\eta$ , sendo reduzida a  $b_2$  após uma volta no ressonador. Essa amplitude  $b_2$ , ao passar próximo ao guia de onda, tem uma parte da potência acoplada novamente para o guia. Os coeficientes de acoplamento do guia para o ressonador e vice-versa são representados pelo coeficiente de acoplamento  $K$ . A soma da parcela da potência acoplada ao guia e da potência transmitida é medida na saída do guia de onda pela amplitude  $a_2$ .

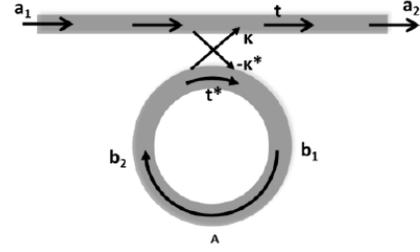


Figura 5: Diagrama para uma cavidade acoplada em um guia de onda [6]

A situação considerada é expressa pela Equação 7 na qual o tamanho do pulso  $t_p$  é muito maior que o tempo de uma volta no anel  $t_v$ , estando em uma situação de caso estacionário em que o pulso sempre interage consigo mesmo na região de acoplamento. [8]

$$\begin{bmatrix} a_2 \\ b_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t & k \\ -k^* & t^* \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_1 \\ b_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Nesta equação, as amplitudes complexas  $a_j$  e  $b_j$ , para o guia ou cavidade, respectivamente, são normalizadas de modo que a amplitude dos seus quadrados corresponda à potência modal. O índice  $j = 1, 2$  indica entrada e saída, respectivamente, do guia ou cavidade. Dessa forma, como não consideramos perdas na região de acoplamento, deve ocorrer:

$$|a_1|^2 + |b_2|^2 = |a_2|^2 + |b_1|^2 \quad (8)$$

Isto implica que a matriz de acoplamento será unitária:

$$|k|^2 + |t|^2 = 1 \quad (9)$$

Considerando a propagação dentro do ressonador,  $b_2$ , esse campo pode ser dado em função de um fator de atenuação real  $A$  e um desvio de fase  $\eta$ :

$$b_2 = A e^{i\eta} b_1 \quad (10)$$

O desvio de fase  $\eta$  está relacionado com  $\frac{\omega L}{c}$ , onde  $L = 2\pi R$  é o perímetro do anel, com  $R$  sendo o raio do anel. O fator de atenuação inclui perdas de propagação e perdas de acoplamento, além de estar relacionado com o coeficiente de atenuação de potência  $\alpha$ , expresso em [1/cm], pela relação:

$$A = e^{-\alpha L} \quad (11)$$

Considerando a potência de entrada  $|a_1|^2 = 1$ , as saídas do guia e do ressonador podem ser escritos como:

$$a_2 = \frac{-A + te^{-i\eta}}{-At + e^{-i\eta}} \quad (12)$$

e

$$b_2 = \frac{-AK^*}{-At + e^{-i\eta}} \quad (13)$$

Dessa forma, a potência transmitida e medida na saída do guia é dada por:

$$|a_2|^2 = \frac{A^2 + |t|^2 - 2A|t|\cos(\eta + \delta_t)}{1 + A^2 + |t|^2 - 2A|t|\cos(\eta + \delta_t)} \quad (14)$$

Considerando  $t = |t|e^{i\delta_t}$ , sendo que  $\delta_t$  indica o desvio de fase durante a transmissão, se tem que a potência medida na saída do ressonador é dada por:

$$|b_2|^2 = \frac{A^2(1 - |t|^2)}{1 + A^2 + |t|^2 - 2A|t|\cos(\eta + \delta_t)} \quad (15)$$

Quando o ressonador está na condição de ressonância, isto é,  $\eta + \delta_t = m2\pi$ , com m inteiro, se observa as seguintes equações:

$$|a_2|^2 = \frac{(A - |t|)^2}{(1 - A|t|)^2} \quad (16)$$

e

$$|b_2|^2 = \frac{A^2(1 - |t|)^2}{(1 - A|t|)^2} \quad (17)$$

Deste modo as equações demonstram que quando a atenuação interna do ressonador for igual ao fator de transmissão ( $A=|t|$ ), a potência transmitida será nula. Tal condição é conhecida como acoplamento crítico e toda a energia estará armazenada na cavidade.

É sabido que a potência na saída cai à medida que se aumenta o fator de transmissão e se aproxima do acoplamento crítico. Ao passar por este ponto, a potência na saída do guia aumenta rapidamente dividindo o acoplamento guia e cavidade em dois regimes: subcrítico e supercrítico. Para o regime subcrítico,  $|t| > A$  e a intensidade transmitida diminui quando o fator  $|t|$  diminui (ou  $|k|$  aumenta). Portanto, neste regime, à medida que se diminui o fator de transmissão, a intensidade está sendo acoplada com mais eficiência na cavidade, até chegar no acoplamento crítico ( $A=|t|$ ). A partir deste ponto se entra no regime supercrítico, e com isto, se diminuir  $|t|$  e aumentar o fator de acoplamento  $|k|$ , a intensidade na saída do guia deve aumentar, reduzindo a intensidade dentro da cavidade.

Para duas cavidades acopladas como na Figura 6, se percebe que as letras a, b e c são utilizadas para representar a amplitude complexa do modo propagado no guia, na cavidade externa e na cavidade interna, respectivamente, além de,  $k_s$  e  $t_s$  continuarem a representar os fatores de acoplamento e transmissão, com o índice  $s = 1, 2$  representando a região de acoplamento entre guia e cavidade e entre cavidade e cavidade, respectivamente.

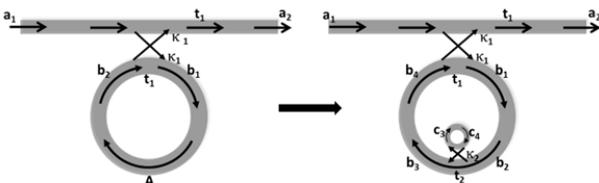


Figura 6: Transição entre os diagramas para uma cavidade e duas cavidades [6]

Desta maneira é possível escrever a matriz de acoplamento entre guia e cavidade da seguinte maneira:

$$\begin{bmatrix} a_2 \\ b_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_1 & ik_1 \\ ik_1 & t_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_1 \\ b_2 \end{bmatrix} \quad (18)$$

Considerando a presença da cavidade interna, surgirá uma segunda região de acoplamento que pode ser descrita pela matriz:

$$\begin{bmatrix} b_3 \\ c_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_2 & ik_2 \\ ik_2 & t_2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} b_4 \\ c_4 \end{bmatrix} \quad (19)$$

Acompanhando a parcela da onda  $b_1$  que acopla na cavidade externa, se percebe que ela sofre uma pequena atenuação ao percorrer metade da cavidade externa, tornando-se a onda de amplitude  $b_2$ . Próximo à região de acoplamento com a cavidade interna, uma parcela de  $b_2$  acopla ao anel menor gerando a amplitude  $c_3$ . Essa amplitude percorre toda a cavidade interna, sofrendo uma perda de propagação  $\alpha$ , em  $cm^{-1}$ , e tornando-se  $c_4$ . Por sua vez, uma parcela de  $c_4$  pode acoplar novamente ao anel externo, somando-se à parcela da amplitude  $b_2$  transmitida e formando a amplitude  $b_3$ . Esta, finalmente, percorre a última parte do anel externo, originando a amplitude  $b_4$  que chega na região de acoplamento entre cavidade e guia. As relações entre essas amplitudes, considerando as perdas e a mudança de fase devido à segunda região de acoplamento, podem ser expressas por:

$$b_2 = e^{-\frac{\alpha L_1}{2}} e^{\frac{i\omega T_1}{2}} b_1 \quad (20)$$

$$c_4 = e^{-\alpha L_2} e^{i\omega T_2} c_3 \quad (21)$$

$$b_4 = e^{-\frac{\alpha L_1}{2}} e^{\frac{i\omega T_1}{2}} b_3 \quad (22)$$

Nessas equações,  $L_p = 2\pi R_p$  é o perímetro das cavidades, com  $p = 1, 2$  representando o anel externo e interno, respectivamente.  $T_p$  é o tempo que a onda precisa para percorrer uma volta na cavidade  $p$ , dado por  $T_p = 2\pi R_p n_{g,p}$ , sendo que  $n_{g,p}$  é o índice de grupo da cavidade  $p$ . Utilizando as equações acima é possível encontrar a resposta espectral na saída do guia ( $a_2$ ), normalizada pela entrada:

$$a_2 = \frac{t_1(1 - t_2 A_2 e^{i\omega T_2}) - A_1 e^{i\omega T_1}(t_2 - A_2 e^{i\omega T_2})}{(1 - t_2 A_2 e^{i\omega T_2}) - t_1 A_1 e^{i\omega T_1}(t_2 - A_2 e^{i\omega T_2})} \quad (23)$$

Nesta equação,  $A_p = e^{-\alpha L_p}$  é a atenuação da amplitude no interior de cada cavidade  $p$ . Para o caso de apenas uma cavidade é possível fazer  $k_2 = 0$ , o que implica em  $t_2 = 1$ , e fazer  $A_2 = 0$ .

Deste modo, se obtém a seguinte equação que representa a resposta espectral para saída do guia de onda com apenas uma cavidade acoplada:

$$a_2 = \frac{t_1 - A_1 e^{i\omega T_1}}{1 - t_1 A_1 e^{i\omega T_1}} \quad (24)$$

### III. ANÁLISE DE UMA CAVIDADE ACOPLADA EM UM GUIA DE ONDA

#### A. Análise do espectro experimental para uma cavidade

Para analisar como uma cavidade se comporta, os parâmetros de  $N_g$  e  $A$  foram extraídos dos resultados experimentais do dispositivo, sendo  $N_g = 4.09198$  e  $A = 0.99800$ . Após isto simulou-se a equação 24 com estes parâmetros, obtendo-se os seguintes fittings para os gaps de 200, 300 e 400nm em relação ao guia de onda. As curvas em vermelho representam a simulação e as em preto, os dados experimentais.

No gráfico de 200nm, mostrado na Figura 7, nota-se que os dados experimentais possuem um grande ruído e ressonâncias que possuem fatores de extinção diferentes. Os fatores de extinção distintos podem ser explicados devido ao número de pontos necessários para resolver a ressonância, uma vez que elas são muito finas. Quando

ao ruído, ele é explicado devido às reflexões da luz na entrada do guia de onda.

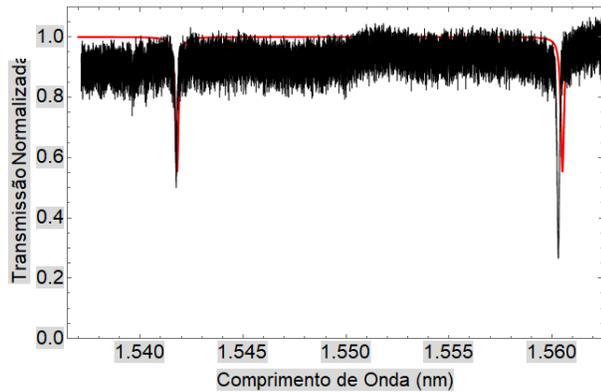


Figura 7: Análise da resposta espectral de uma cavidade ( $R=5\mu\text{m}$ ) acoplada em um guia de onda com um gap de 200nm. A curva em vermelho é um fitting teórico realizado com a equação 24.

Para o fitting de 300nm, é possível ver na Figura 8 que novamente há grande ruído e cavidades com diferentes fatores de extinção, mas com menor diferença entre eles.

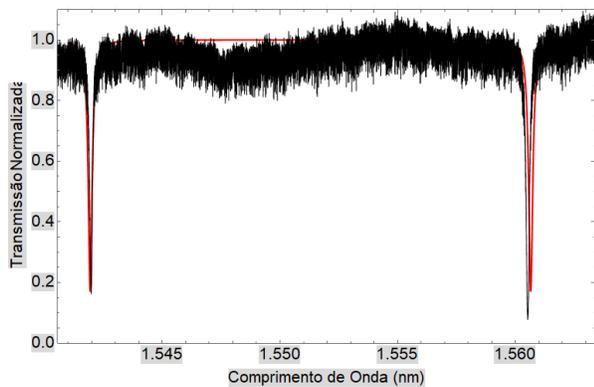


Figura 8: Análise da resposta espectral de uma cavidade ( $R=5\mu\text{m}$ ) acoplada em um guia de onda com um gap de 300nm. A curva em vermelho é um fitting teórico realizado com a equação 24.

Já para o fitting no dispositivo com gap de 400nm, a Figura 9 também demonstra grande ruído, mas cavidades com fatores de extinção muito próximas.

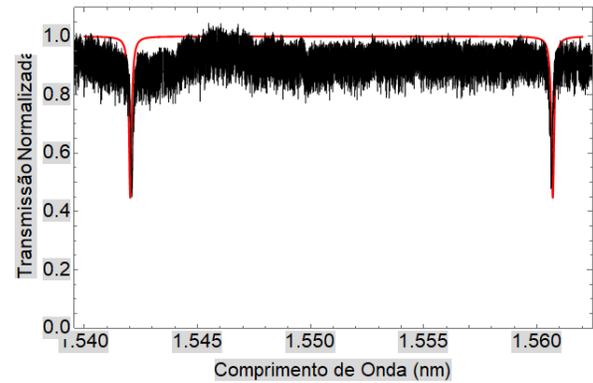


Figura 9: Análise da resposta espectral de uma cavidade ( $R=5\mu\text{m}$ ) acoplada em um guia de onda com um gap de 400nm. A curva em vermelho é um fitting teórico realizado com a equação 24.

De toda forma, analisando os fittings realizados utilizando a Equação 24, infere-se que o desenvolvimento matemático foi correto, dado que é perceptível que as curvas obtidas através das simulações conseguem descrever muito bem o comportamento dos dispositivos reais. A saber, os dados obtidos para os fatores de transmissão  $t$  para os três dispositivos foram:

Gap (nm)	200	300	400
$t$	0.98800	0.99520	0.99000

Tabela I: Valores dos fatores de transmissão para cada um dos dispositivos com diferentes gaps

### B. Fator de Qualidade

A partir do fitting comprovando que as equações descrevem o comportamento do dispositivo, e fixando o valor de  $A$  encontrado, variou-se o  $t$  de modo que o quociente de  $\frac{t}{A}$  varie de 0.1 até 1.005. Com essa variação, foi possível avaliar a mudança no  $Q$  das ressonâncias da cavidade ( $R=5\mu\text{m}$ ) acoplada no guia de onda em função de  $\frac{t}{A}$ . Essa variação é relevante pois demonstra como os erros de fabricação nos gaps (que causam variação no  $t$ ) ou a presença de rugosidade (que causa redução em  $A$ ) pode afetar o dispositivo em análise.

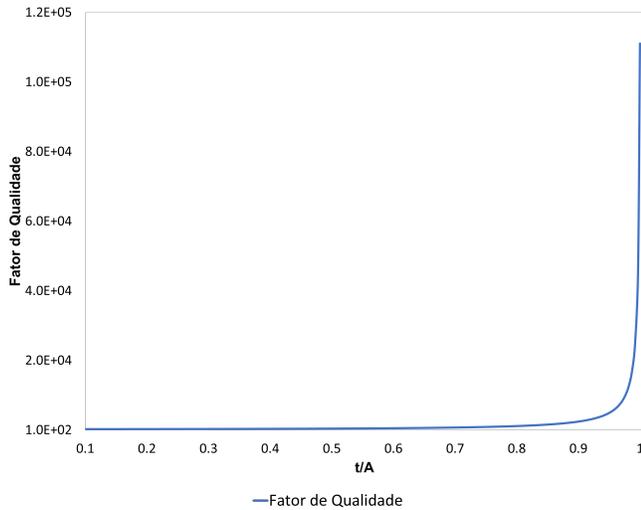


Figura 10: Variação do Fator de Qualidade em Função da variação de  $t/A$ , considerando  $A=0.99800$

Na Figura 10 observa-se que o fator de qualidade é muito sensível às variações de  $\frac{t}{A}$ , tornando-se abaixo de 100 quando  $\frac{t}{A}$  está abaixo de 0.9. A fim de melhorar a visualização dos detalhes da Figura 10 para altos Q, a Figura 11 traz a curva simulada de Q para  $\frac{t}{A}$  maior que 0.97.

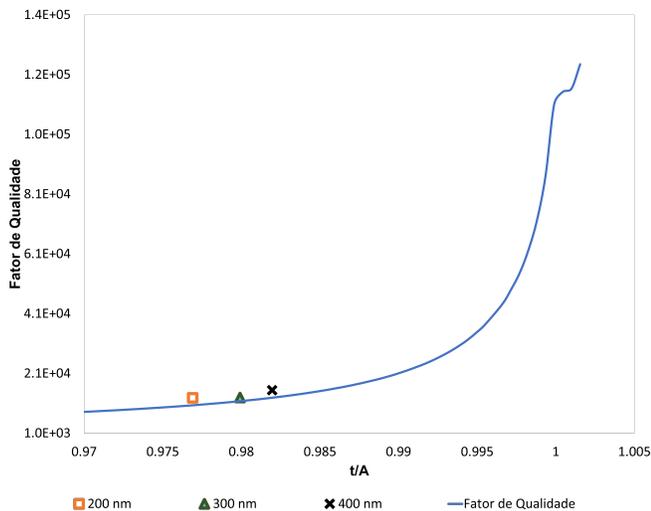


Figura 11: Detalhe do Fator de Qualidade em Função da variação de  $t/A$  mostrado na Figura 10, para  $A=0.99800$

Nesta Figura 11 é perceptível que o fator de qualidade aumenta drasticamente ao chegar mais próximo de 1 e os pontos experimentais, obtidos com os fittings das curvas dos dispositivos com gaps distintos, estão muito próximos da curva, provando que os dispositivos construídos com os parâmetros de  $\frac{t}{A}$  definidos na curva possuem o mesmo comportamento

### C. Potência Transmitida

A potência transmitida indica o quanto que a luz é armazenada no anel a partir do guia de onda. Fixando o valor de A em 0.99800 e variando os valores de t se obteve a potência transmitida em decibéis no anel para a cavidade no comprimento de onda de 1506nm. Esses resultados estão mostrados na Figura 12.

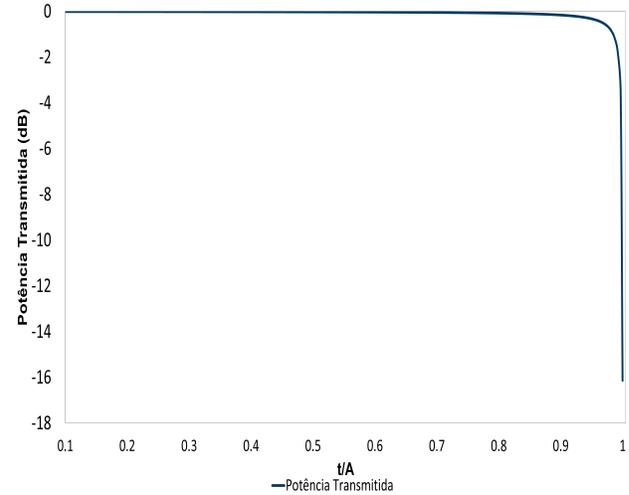


Figura 12: Variação da Potência Transmitida em Função da variação de  $t/A$ , considerando  $A=0.99800$

Assim como na Figura 11, é necessário reduzir o eixo x para observar melhor o comportamento da potência transmitida no dispositivo. Essa situação é mostrada na Figura 13, onde é notável que uma pequena variação dos valores de  $\frac{t}{A}$  faz com que a luz não fique armazenada no anel, o que dependendo da situação de aplicação, pode fazer com que o dispositivo tenha que ser descartado e seus materiais perdidos

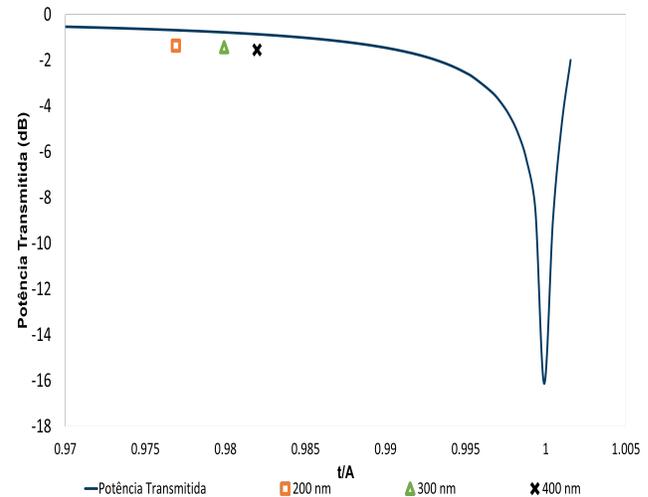


Figura 13: Detalhe da Potência Transmitida em Função da variação de  $t/A$  mostrada na Figura 12, para  $A=0.99800$

Na Figura 13 também é possível notar que a ressonância ocorre muito próximo a  $\frac{t}{A}$  igual a 1, além de os dados experimentais inseridos no gráfico estarem muito próximos da curva da potência transmitida simulada, provando a eficácia do método empregado para analisar esses dispositivos.

## IV. ANÁLISE DA MOLÉCULA FOTÔNICA COM DUAS CAVIDADES

O modelo de duas cavidades consistiu no acoplamento de um anel de  $5\mu\text{m}$  de raio dentro de um anel de  $20\mu\text{m}$  de raio. A análise foi realizada variando os parâmetros  $\frac{t_1}{A_1}$  e  $\frac{t_2}{A_2}$ , onde  $t_1$

e  $t_2$  são os fatores de acoplamento das cavidades em cada região de acoplamento e  $A_1$  e  $A_2$  são as atenuações em cada cavidade

### A. Análise do espectro experimental para uma PM com duas cavidades acopladas

Através do fitting realizado com as curvas experimentais se extraiu os valores de  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $N_{g1}$ ,  $N_{g2}$ ,  $t_1$  e  $t_2$ . Como o objetivo é analisar o comportamento do anel de  $5\mu\text{m}$ , agora acoplado dentro de uma cavidade maior, alterou-se somente a distância entre o anel menor e o maior, considerando-se gaps entre 200 e 300nm. Não se utilizou 400nm pois os dados experimentais da Foundry não possuíam ressonâncias relacionadas com o anel de  $5\mu\text{m}$  para esse gap. Com isso, se fixou os valores de  $A_1$  em 0.94880,  $t_1$  em 0.96200 e  $A_2$  em 0.99729. Variando o coeficiente  $\frac{t_2}{A_2}$ , que simula erros de fabricação no gap cavidade-cavidade, foi possível obter o resultado demonstrado na Figura 14.

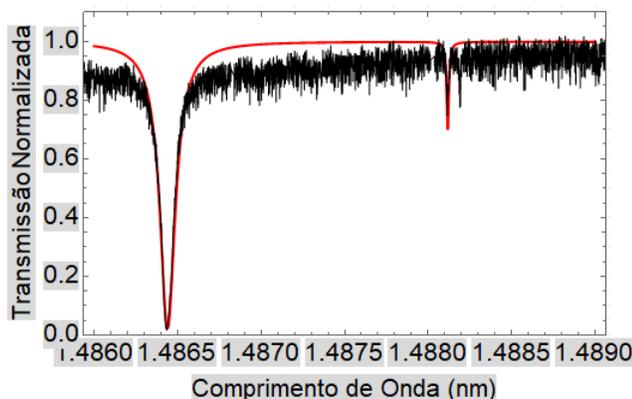


Figura 14: Fitting (curva vermelha) do espectro experimental (curva preta) para uma PM contendo duas cavidades acopladas com um gap de 200nm.

Analisando a Figura 14 é possível notar que a curva simulada (vermelha) se aproxima muito, apesar dos ruídos, da curva experimental (preta). O mesmo foi realizado para a PM com um gap de 300nm entre as cavidades. A Figura 15 mostra o resultado dessa análise.

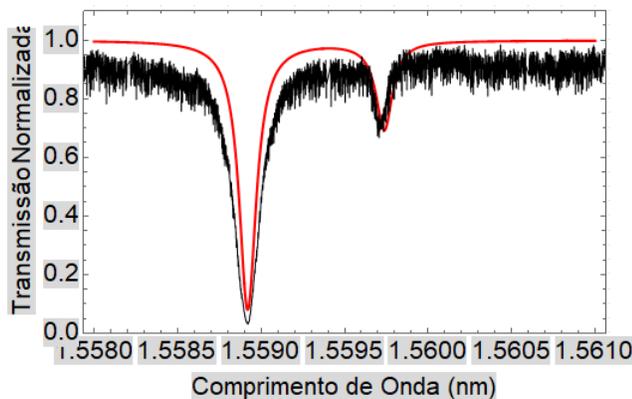


Figura 15: Fitting (curva vermelha) do espectro experimental (curva preta) para uma PM contendo duas cavidades acopladas com um gap de 300nm.

Nesta Figura 15 se nota que os comprimentos de onda analisados são diferentes do fitting anterior (vide Figura 14). Isso ocorreu devido ao dispositivo experimental não ter apresentado ressonâncias

no mesmo comprimento de onda daquele anterior, devido à mudança dos gaps. Como para manter a coerência na análise manteve-se os valores dos parâmetros  $A_1$ ,  $A_2$  e  $t_1$  fixos, a curva teórica não descreveu com precisão a ressonância da cavidade de  $20\mu\text{m}$ , mas é satisfatória para descrição da ressonância relacionada com a cavidade de  $5\mu\text{m}$ , relevante para análise de robustez do dispositivo.

### B. Análise do Fator de Qualidade

Para realizar uma análise do impacto dos erros dos gaps ou inserção de perdas de rugosidade nesses dispositivos, primeiramente os valores de  $A_1$  e  $t_1$  foram fixados em 0.9488 e 0.96200 respectivamente; e com isto variou-se os valores de  $A_2$  e  $t_2$  de modo a se entender o que acontece com o Q e a potência transmitida quando acontece erros de fabricação relacionados com a cavidade menor. Posteriormente fixou-se os valores de  $A_2$  e  $t_2$  em 0.997292 e 0.98700 respectivamente; e com isto variou  $A_1$  e  $t_1$ , ou seja, situações onde os erros de fabricação acontecem na cavidade maior. Com isso, foi possível obter a variação do fator de qualidade mostrado na Figura 16 para as duas situações.

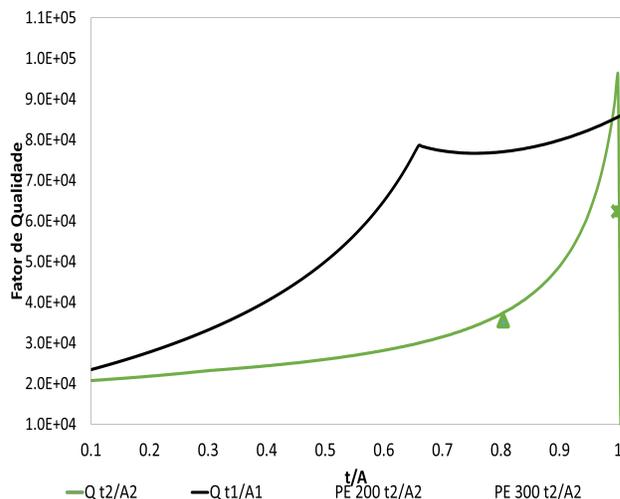


Figura 16: Variação do fator de qualidade em função da variação de  $t/A$  para PM contendo duas cavidades. Os pontos inseridos são referentes aos resultados experimentais.

Analisando os resultados da Figura 16 percebe que o fator de qualidade da ressonância da cavidade menor possui uma grande resiliência em mudanças dos fatores  $\frac{t}{A}$  dado que ele se mantém na ordem de 10 000 em quase todo o range de variações de  $\frac{t}{A}$ . Apesar desse reduzido impacto no Q devido às variações de  $\frac{t}{A}$ , é possível observar que as variações de  $\frac{t_1}{A_1}$  impactam menos o Q do que as variações em  $\frac{t_2}{A_2}$ . Esse fato demonstra a robustez do fator de qualidade das ressonâncias da cavidade de  $5\mu\text{m}$  de raio quando inserida dentro de uma cavidade maior.

### C. Potência Transmitida

Realizando a mesma metodologia de análise do fator de qualidade para a potência transmitida relacionada a ressonância da cavidade de  $R=5\mu\text{m}$ , demonstra-se o resultado obtido na Figura 17, já contendo os pontos experimentais.

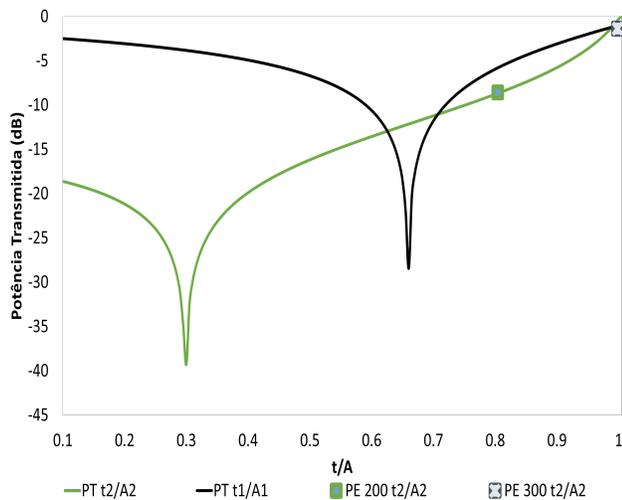


Figura 17: Variação da potência transmitida da ressonância da cavidade de raio  $5\mu\text{m}$  em função da variação de  $t/A$  para PM contendo duas cavidades acopladas.

Neste gráfico, adotando  $-15\text{dB}$  como uma potência aceitável de transmissão, nota-se que para variações dos fatores  $\frac{t_2}{A_2}$ , relacionados com a cavidade menor, se tem cerca de 66% de tolerância a erros de fabricação (gap ou perdas) para manter a potência mínima de ressonância dessa cavidade menor acima de  $-15\text{ dB}$ . Para o caso de variações dos parâmetros  $\frac{t_1}{A_1}$ , percebe-se que a variação de cerca de 4.5% dos parâmetros da cavidade maior interfere na potência transmitida ideal para a ressonância da cavidade menor. Sendo assim, ao acoplar a cavidade menor na maior, o sistema se torna muito mais robusto para erros de fabricação nos parâmetros da cavidade menor de interesse, e um pouco mais robusto para erros na maior.

## V. COMPARAÇÃO ENTRE OS DISPOSITIVOS CONTENDO UMA E DUAS CAVIDADES ACOPLADAS

Deste modo, analisando os resultados obtidos até aqui percebem-se que o fator de qualidade nem sempre é máximo para os parâmetros onde ocorre o acoplamento crítico, dado que para ambas as variações dos parâmetros o máximo fator de qualidade ocorre após a ressonância, no regime *Overcoupled*. Os dados experimentais de fator de qualidade e potência transmitida vão ao encontro das curvas simuladas e nestas se utiliza somente os pontos variando  $\frac{t_2}{A_2}$  devido a variação de 200 para 300 nm de distância ser entre a cavidade menor e a maior, não devendo interferir nos parâmetros da cavidade maior.

O fator de qualidade do anel de  $5\mu\text{m}$  quando acoplado na cavidade maior é da ordem de  $10^4$  em quase toda sua extensão de variação dos parâmetros, enquanto ele acoplado apenas no guia de onda, é da ordem de  $10^3$  até chegar próximo a ressonância. Ademais, se nota que a potência transmitida possui valores aceitáveis, abaixo de  $-15\text{ dB}$ , para grandes variações de  $\frac{t}{A}$  quando a cavidade está acoplada. Já quando ela está sozinha, qualquer modificação dos parâmetros, podendo ser causado por fabricação ou imperfeições, levará o dispositivo a uma perda drástica de  $Q$  e potência transmitida na ressonância.

A análise da variação do fator de qualidade em função dos parâmetros  $\frac{t_1}{A_1}$  e  $\frac{t_2}{A_2}$  mostrou que o acoplamento do anel de  $5\mu\text{m}$  de raio dentro do anel de raio  $20\mu\text{m}$  resultou em um aumento significativo do fator de qualidade. Este aumento é devido ao fato que o comprimento de onda ressonante no anel menor não é ressonante no anel maior, reduzindo a perda de potência para o guia de onda, aumentando o  $Q$ .

Além disso, a análise da variação da potência transmitida em função dos parâmetros  $\frac{t_1}{A_1}$  e  $\frac{t_2}{A_2}$  mostrou que o acoplamento dos dois anéis resultou em uma maior robustez do sistema em relação a erros de nanofabricação. Isto ocorre porque o acoplamento ressonante entre os dois anéis gera um mecanismo de feedback que reduz a sensibilidade do sistema a variações nas dimensões dos anéis, no acoplamento e nas perdas.

Com base nestes resultados, pode-se concluir que o acoplamento de um anel de  $5\mu\text{m}$  de raio dentro de um anel de  $20\mu\text{m}$  de raio é uma arquitetura fotônica promissora para reduzir a dependência do  $Q$  e do fator de extinção, ou potência transmitida, à erros de nanofabricação em cavidades ópticas. Esta arquitetura apresenta um aumento significativo do fator de qualidade e uma maior robustez em relação a erros de nanofabricação, o que pode ter importantes aplicações em tecnologias fotônicas avançadas.

## VI. CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos da simulação e experimentos das novas arquiteturas fotônicas para redução da dependência do  $Q$  e Fator de Extinção à erros de nanofabricação em cavidades ópticas, pode-se concluir que o acoplamento de uma cavidade a outro anel pode aumentar drasticamente o fator de qualidade e a potência transmitida para a ressonância da cavidade acoplada internamente, aumentando a retenção de fótons no anel. Além disso, o acoplamento de duas cavidades pode reduzir significativamente a sensibilidade a erros de fabricação em comparação com as cavidades com acoplamento direto no guia de onda.

Esses resultados indicam que as novas arquiteturas fotônicas, chamadas PMs, têm o potencial de melhorar o desempenho de dispositivos optoeletrônicos, tornando-os mais robustos e menos suscetíveis a variações na nanofabricação. Portanto, esta pesquisa pode contribuir para avanços significativos na área de fotônica e oferecer oportunidades para futuras aplicações em áreas como comunicações ópticas, sensores ópticos e processamento de informações ópticas.

Deste modo, este trabalho de conclusão de curso prova que existem novos caminhos a serem explorados que garantem melhorias significativas de desempenho, como previsto pelas simulações em uma plataforma de SOI, ao se adicionar uma micro-cavidades dentro de um anel acoplado a um guia de onda.

## REFERÊNCIAS

- [1] HD. A. B. Miller and H. M. Ozaktas, Limit to the bit-rate capacity of electrical interconnects from the aspect ratio of the system architecture, Especial Issue on Parallel Computing with Optical Interconnects, J. Parallel and Distributed Computing 41, 4252 (1997).
- [2] W. Bogaerts, V. Wiaux, P. Dumon, D. Taillaert, J. Wouters, S. Beckx, J. Van Campenhout, B. Luyssaert, D. Van Thourhout, and R. Baets, Large-scale production techniques for photonic nanostructures, Proc. SPIE 5225, pp. 101 - 112, 2003.
- [3] W. Bogaerts, P. De Heyn, T. Van Vaerenbergh, K. DeVos, S. K. Selvaraja, T. Claes, P. Dumon, P. Bienstman, D. Van Thourhout, and R. Baets, "Silicon microring resonators," Laser Photonics Rev. 6(1), 47–73 (2012).
- [4] VALLINI, Felipe et al. Silicon technology compatible photonic molecules for compact optical signal processing. Applied physics letters. Melville, NY : AIP Publishing, 2013. Vol. 103, n. 20 (Nov., 2013), n. art. 201102, p. 1-4. Disponível em: <https://hdl.handle.net/20.500.12733/6318>. Acesso em: 20 mar. 2023.
- [5] I. Chremmos, O. Schwelb, and N. Uzunoglu, *Photonic microresonator research and applications*. Springer, 2010, vol. 156.
- [6] Barêa, L. A. M.; Moléculas Fotônicas para aplicações em Engenharia Espectral e Processamento de Sinais Ópticos. Tese (Doutorado em Física) - Instituto de Física Gleb Wataghin, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2014.
- [7] S. Bedi, "Silicon nitride waveguide optical filter components for access network applications," Ph.D. dissertation, École de technologie supérieure, 2018.
- [8] Yariv, A. Universal relations for coupling of optical power between microresonators and dielectric waveguides. Electronics Letters. 2000, Vol. 36.