

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Gabriela Akemi Yamamoto Zanfelicce

**Design de Acopladores Ópticos Poliméricos em
SU-8 para Acoplamento Fibra-Chip**

São Carlos, SP
2026

Resumo

A fotônica integrada tem se consolidado como uma importante tecnologia para aplicações em comunicações ópticas, sensoriamento e processamento de sinais, permitindo a miniaturização de dispositivos e a redução do consumo energético. Nesse contexto, o acoplamento eficiente entre fibras ópticas e guias de onda integrados é fundamental para o desempenho dos circuitos fotônicos. Este trabalho apresenta o projeto e a otimização de acopladores ópticos do tipo taper em SU-8, um polímero de baixo custo e compatível com processos convencionais de microfabricação. Foram analisadas diferentes geometrias de transição, modos de polarização e dimensões estruturais, visando maximizar a eficiência de acoplamento entre fibra óptica e guia de onda. Os resultados indicaram eficiências superiores a 88% e perdas inferiores a 0,6 dB para as melhores configurações, demonstrando o potencial do SU-8 para aplicações em dispositivos fotônicos integrados de baixo custo.

Palavras-chave: Fotônica integrada, Óptica Integrada, Chip, SU8, Acoplador, Taper, Geometria, Guia de Onda, Reflexão Total.

Sumário

I	Introdução	3
II	Fundamentação Teórica	4
III	Metodologia	6
IV	Resultados	7
IV.A	Acopladores Lineares	8
IV.A.1	Acoplador linear de altura $1\mu m$	8
IV.A.2	Acoplador linear de altura $2\mu m$	8
IV.A.3	Acoplador linear de altura $3\mu m$	9
IV.B	Acopladores Exponenciais	9
IV.B.1	Acoplador exponencial de altura $1\mu m$	9
IV.B.2	Acoplador exponencial de altura $2\mu m$	10
IV.B.3	Acoplador exponencial de altura $3\mu m$	10
V	Discussão de resultados	11
VI	Conclusão	11
	REFERÊNCIAS	13

Design de Acoplador Óptico em SU8 para Fotônica Integrada

Estudante: Gabriela Akemi Y. Zanfelicce
Universidade Federal de São Carlos

Orientador: Luís Alberto Mijam Barêa
Universidade Federal de São Carlos

Resumo—A fotônica integrada tem se consolidado como uma importante tecnologia para aplicações em comunicações ópticas, sensoriamento e processamento de sinais, permitindo a miniaturização de dispositivos e a redução do consumo energético. Nesse contexto, o acoplamento eficiente entre fibras ópticas e guias de onda integrados é fundamental para o desempenho dos circuitos fotônicos. Este trabalho apresenta o projeto e a otimização de acopladores ópticos do tipo taper em SU-8, um polímero de baixo custo e compatível com processos convencionais de microfabricação. Foram analisadas diferentes geometrias de transição, modos de polarização e dimensões estruturais, visando maximizar a eficiência de acoplamento entre fibra óptica e guia de onda. Os resultados indicaram eficiências superiores a 88% e perdas inferiores a 0,6 dB para as melhores configurações, demonstrando o potencial do SU-8 para aplicações em dispositivos fotônicos integrados de baixo custo.

I Introdução

A óptica integrada surgiu como uma alternativa à eletrônica convencional para a transmissão e o processamento de informações. Por utilizar fótons como portadores de informação, essa tecnologia apresenta vantagens como elevadas taxas de transmissão, menores perdas de propagação e maior imunidade a interferências eletromagnéticas. Dessa forma, a óptica integrada tem sido amplamente explorada no desenvolvimento de dispositivos capazes de processar grandes volumes de dados de forma rápida e eficiente. [1]

Com o avanço da óptica integrada, surgiram os circuitos fotônicos integrados (Photonic Integrated Circuits – PICs), dispositivos capazes de concentrar diferentes funções ópticas em um único chip [2]. Essa integração possibilita o desenvolvimento de sistemas mais compactos, eficientes e com maior capacidade de transmissão e processamento de informações.

Outra vantagem importante é que os PICs são menos suscetíveis à interferência eletromagnética (EM) e permitem a transmissão de sinais por distâncias maiores sem degradação significativa, tornando-os ideais para apli-

cações que exigem alta velocidade, eficiência energética e processamento confiável de sinais em comunicação de longa distância [2].

Apesar dos grandes avanços na área, ainda existem questões a serem resolvidas. A necessidade de utilizar materiais e processos de fabricação com custo elevado, por exemplo, motiva novas pesquisas com o objetivo de desenvolver novos materiais que possuam as características necessárias para os diferentes componentes de um chip, mantendo eficiência, baixa perda óptica e compatibilidade com técnicas de microfabricação. Uma opção promissora é o SU-8, um polímero fotorresistente negativo, que apresenta alta sensibilidade à luz ultravioleta (UV), compatibilidade com processos tradicionais de fotolitografia e bons resultados de estabilidade e espessura em uma única aplicação [3].

No contexto de guias de onda, o SU-8 apresenta características que favorecem o seu uso. Sua alta sensibilidade à luz UV permite a obtenção de estruturas tridimensionais com alta definição, possibilitando a fabricação de componentes ópticos complexos, estáveis e de pequenas dimensões. Sua estrutura permite a preparação de dispositivos em substratos mecanicamente flexíveis, possibilitando modelagens específicas para diferentes aplicações [4]. Baseado nessas características, é esperado que estudos com o SU-8 como núcleos de guias de onda proporcionem um confinamento eficiente da luz, especialmente quando combinado com revestimentos apropriados.

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo projetar acopladores ópticos do tipo taper em polímero SU-8 para aplicações em dispositivos fotônicos integrados. Para isso, foram investigadas diferentes geometrias de transição, modos de polarização e dimensões estruturais, visando determinar configurações capazes de maximizar a eficiência de acoplamento entre uma fibra óptica monomodo e um guia de onda integrado.

O estudo está estruturado em 6 seções. A fundamentação teórica apresenta conceitos necessários em termos de guias de onda, reflexão de luz, acopladores e SU-8 para embasar

a discussão a partir dos dados obtidos. A seção III apresenta metodologia utilizada nesse estudo, e a seção IV é formada pelos resultados obtidos. As discussões dos resultados encontrados nesse estudo, bem como suas conclusões, limitações e sugestões para que novos estudos possam aprofundar ainda mais os resultados encontrados estão apresentados nas seções V e VI.

II Fundamentação Teórica

Para o funcionamento da Óptica integrada, guias de onda e acopladores exercem diferentes funções. Enquanto os guias de onda utilizam o fenômeno da reflexão total para confinar e guiar a luz em um núcleo [5], os acopladores são utilizados para realizar a transferência de energia entre meios distintos [6]. Ambos são essenciais na condução, adaptação e transferência de sinais ópticos dentro de um chip fotônico. O material utilizado na fabricação dos componentes influencia diretamente o desempenho óptico e seus custos. Nesse contexto, materiais poliméricos, como o SU-8, vêm sendo estudados como alternativas promissoras, uma vez que apresentam propriedades ópticas favoráveis e possibilidade de produção com menores custos quando comparado a plataformas fotônicas convencionais, devido à simplicidade dos processos de fabricação e à menor demanda por etapas complexas de deposição e corrosão. [7].

Guias de Onda

Os guias de onda ópticos são estruturas projetadas para confinar e guiar a luz dentro de uma região de determinado índice de refração. Um dos tipos mais comuns de guias opera a partir da reflexão interna total da luz, ocorrendo dentro de um núcleo de maior índice de refração, cercado por revestimentos de menor índice. [5]

A Figura 1 apresenta a estrutura de um guia de onda retangular construído em um substrato de índice n_4 , e altura $h_{substrato}$. Seus revestimentos superior e inferior possuem índices de refração n_1 e n_3 , respectivamente, e alturas $h_{superior}$ e $h_{inferior}$. O seu núcleo, onde ocorre a propagação da luz, possui largura wt , altura h e índices de refração n_2 .

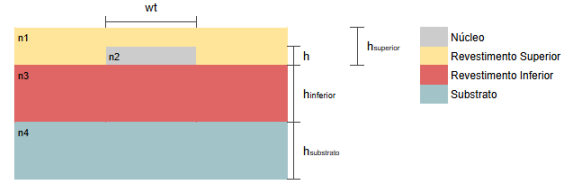


Figura 1 – Modelo de um Guia de Onda retangular

Fonte: autoria própria

Este estudo adotou os guias de onda retangulares, como o apresentado na Figura 1, e simétricos, os quais apresentam os revestimentos superior e inferior com o mesmo índice de refração ($n_1 = n_3$).

Reflexão da luz

A análise do fenômeno de reflexão total da luz pode ser feita a partir das equações de Maxwell, que descrevem a propagação dos campos elétrico e magnético, e impõem condições de contorno nas interfaces entre os meios. As condições de contorno impostas aos campos eletromagnéticos nas interfaces entre meios distintos permitem obter a Lei de Snell, que relaciona os ângulos de incidência e refração da luz. A lei pode ser escrita através da equação 1, onde n_f representa o índice de refração do meio inicial, e n_c o índice de refração onde a luz vai incidir. O ângulo de incidência é definido por θ_1 e o ângulo de refração é definido por θ_2 . [5]

$$n_f \sin \theta_1 = n_c \sin \theta_2 \quad (1)$$

À medida que o ângulo de incidência (θ_1) aumenta, o ângulo de refração (θ_2) também aumenta e, quando $\theta_2 = 90^\circ$, o ângulo de incidência atinge o seu valor crítico, que pode ser encontrado de forma direta através da Equação 2, válida para $n_f > n_c$. [8]

$$\theta_c = \sin^{-1}(n_c/n_f) \quad (2)$$

Para ângulos de incidência maiores do que o ângulo crítico ($\theta_1 > \theta_c$), não ocorre propagação de potência óptica para o segundo meio, e toda a luz é refletida de volta ao meio de origem, caracterizando o fenômeno de reflexão interna total. [8].

Os fenômenos da refração e da reflexão total da luz são ilustrados na Figura 2, na qual os índices de refração de cada camada são representados por n_x .

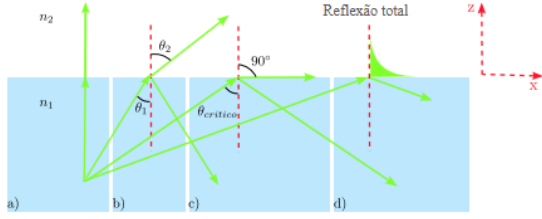


Figura 2 – Reflexão da luz a partir dos ângulos de incidência: a) $\theta_1 = 0^\circ$; b) $0^\circ < \theta_1 < \theta_{\text{crítico}}$; c) $\theta_1 = \theta_{\text{crítico}}$; d) $\theta_1 > \theta_{\text{crítico}}$

Fonte: Adaptado de [8].

Dessa forma, o ângulo com que a luz de um meio incide na superfície de outro meio, determina quanto de sua potência será refletida ou refratada. A partir da reflexão total da luz, uma onda pode ser propagada em um meio, conforme representado na Figura 3. Esse é o conceito que rege o funcionamento de um guia de onda.

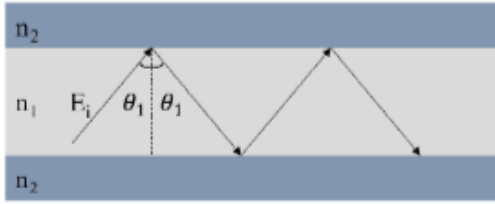


Figura 3 – Fenômeno da reflexão interna em um Guia de Onda

Fonte: [9].

As ondas eletromagnéticas refletidas e confinadas no guia de onda obedecem as Equações de Fresnel, que permitem relacionar a amplitude complexa da onda com o seu ângulo de incidência. De acordo com a equação 3, onde r é uma função do ângulo de incidência e da polarização da luz, E_r refere-se à amplitude complexa da onda refletida, e E_i , à amplitude complexa da onda incidente. [3]

$$E_r = r E_i \quad (3)$$

Os campos elétrico e magnético associados podem assumir diferentes direções quando relacionados com o plano de incidência, dando origem a dois modos diferentes de propagação da onda. O modo transversal elétrico (TE) ocorre quando o campo elétrico é perpendicular ao plano de incidência, enquanto o modo transversal magnético ocorre quando o campo

magnético for perpendicular ao plano de incidência [9]. A Figura 4 exemplifica os campos elétrico e magnético para cada um dos casos em um guia de onda plano.

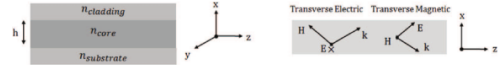


Figura 4 – Exemplificação dos modos de propagação para um guia planar

Fonte: [5]

Acopladores

Os acopladores ópticos são dispositivos responsáveis pela transferência eficiente de potência óptica entre diferentes meios ou componentes fotônicos. Esses dispositivos podem ser classificados de acordo com sua geometria ou com o mecanismo de acoplamento. Entre os principais tipos, encontram-se os acopladores direcionais, que operam por meio da interação de campos evanescentes entre guias próximos, os acopladores por grades, baseados no conceito da difração, e os acopladores adiabáticos, que serão o foco do presente estudo.

Os acopladores adiabáticos, também conhecidos como *tapers*, realizam a transferência de energia por meio de uma variação gradual de sua geometria. Nesse caso, a seção transversal do guia é modificada progressivamente ao longo da direção de propagação da onda, de forma que as dimensões sejam alteradas de um meio para outro [10].

Nesse contexto, a forma como ocorre a mudança de geometria dos guias desempenha um papel fundamental na adaptação dos modos ópticos ao longo da estrutura. A Figura 5 apresenta algumas das geometrias mais utilizadas na construção de acopladores ópticos.



Figura 5 – Esquema dos diferentes perfis de afunilamento: (a) linear; (b) multi-seccional; (c) parabólico; e (d) exponencial.

Fonte: [11].

O perfil linear é o mais simples, favorecendo maior agilidade de projeto, embora nem sempre apresente o melhor desempenho de adaptação entre os meios. Por outro lado, os

perfis parabólico e exponencial promovem uma variação mais suave da geometria, o que tende a reduzir descontinuidades ópticas e melhorar a eficiência de acoplamento. Já o acoplador multisseccional é dividido em regiões discretas, o que permite um maior controle do modo ao longo da estrutura e, conseqüentemente, um melhor ajuste do desempenho do dispositivo [11].

SU-8

Materiais poliméricos vêm sendo amplamente utilizados como alternativas ao silício na óptica integrada. Entre suas principais vantagens, destacam-se o baixo custo de fabricação e de consumo de energia, além da confiabilidade, e flexibilidade, características que permitem sua utilização em larga escala. Apesar disso, esses materiais podem apresentar limitações relacionadas à baixa resistência e a altas temperaturas, frequentemente empregadas nos processos de fabricação de dispositivos integrados [12].

O SU-8 é um polímero fotossensível à base de epóxi e foi desenvolvido pela IBM no final da década de 1980. Na microtecnologia, o material foi inicialmente utilizado em processos do tipo LIGA (Lithographie, Galvanoformung e Abformung), nos quais o polímero é utilizado na definição de moldes estruturados [13]. Os processos LIGA, são técnicas de microfabricação adequadas para a produção de estruturas precisas, retilíneas, planas, e com altas proporções de aspecto [14], definida como a relação entre a altura e a largura da estrutura.

Devido às suas altas estabilidades mecânica, térmica e química, o SU-8 mostrou-se um material promissor para a fabricação de microestruturas poliméricas, permitindo processos de fabricação de baixo custo e alta produtividade [14]. O material já foi utilizado em diversas aplicações, como espaçadores para displays de cristal líquido, materiais dielétricos e dispositivos ópticos, incluindo guias de onda [14].

No contexto da fotônica integrada, o SU-8 apresenta propriedades vantajosas para aplicações em chips fotônicos, como elevada transparência óptica para comprimentos de onda maiores do que 600 nm , resistência térmica para temperaturas superiores a 200°C e possibilidade de fabricação de estruturas em escala micrométrica e com altas proporções de aspecto [7].

III Metodologia

O estudo dos acopladores foi realizado por meio de simulações numéricas utilizando

o software comercial chamado RSoft, no qual foi desenvolvido o modelo geométrico do dispositivo. A estrutura analisada consistiu em um acoplador óptico do tipo taper fabricado em SU-8 ($n = 1,552$ em 1550 nm), depositado sobre uma camada de SiO_2 ($n = 1,444$), responsável pelo confinamento óptico do modo propagado. O acoplamento foi realizado a partir de uma fibra óptica monomodo com diâmetro de $8\text{ }\mu\text{m}$, operando em um comprimento de onda de $\lambda = 1,55\text{ }\mu\text{m}$. A largura final do guia foi de $1,5\text{ }\mu\text{m}$, dimensão essa de interesse de projetos em andamento no grupo de pesquisa.

A Figura 6 apresenta o modelo adotado nas simulações. Durante o estudo, as dimensões representadas em roxo foram mantidas constantes, enquanto as dimensões indicadas em verde foram sistematicamente variadas, permitindo avaliar a influência da largura de entrada do taper, do comprimento do acoplador e da altura do guia de onda sobre a eficiência de acoplamento entre a fibra óptica e o guia integrado.

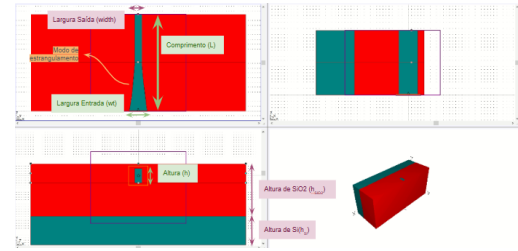


Figura 6 – Dimensões variadas durante o estudo

Fonte: [11].

O objetivo das simulações foi determinar as melhores dimensões de largura de entrada (wt) e comprimento (L) do acoplador, considerando duas geometrias de transição geométrica, linear e exponencial, e dois modos de propagação, TE e TM.

Para a verificação da eficiência de acoplamento, η , foi utilizado um monitor posicionado na extremidade do guia de onda para medir a potência óptica transmitida. Esse monitor forneceu a potência normalizada, calculada pela razão entre a potência óptica de saída, P_{out} , e a potência óptica de entrada, P_{in} , conforme apresentado na Equação 4.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} * 100\% \quad (4)$$

A partir das potências ópticas transmitidas (P_{out} e P_{in}), obtidas nas simulações, foram

calculadas as perdas de inserção (insertion loss) de cada configuração em decibéis (dB), utilizando a equação 5.

$$Loss = -10 * \log_{10}\left(\frac{P_{out}}{P_{in}}\right) \quad (5)$$

As simulações foram realizadas em cinco fases sucessivas a partir do modelo adotado, com o objetivo de encontrar as dimensões ótimas, que maximizam a transmissão de potência para cada uma das configurações estudadas. A Figura 7 apresenta o fluxograma adotado para a realização do procedimento.

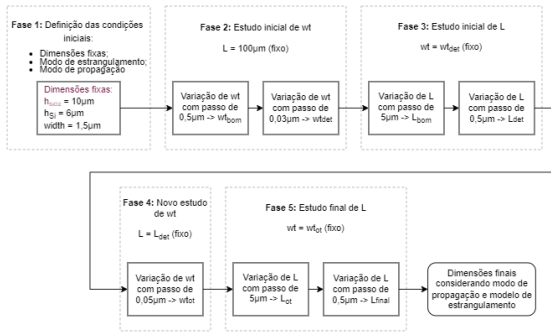


Figura 7 – Fluxograma do estudo realizado

Fonte: [11].

Para a realização dos testes de $h = 3\mu m$, a camada de SiO_2 foi aumentada em $1\mu m$, para que o núcleo permanecesse com uma altura menor do que a altura do núcleo superior. Dessa forma, os estudos para acopladores de altura $3\mu m$ seguiram o fluxograma adaptado na Figura 8.

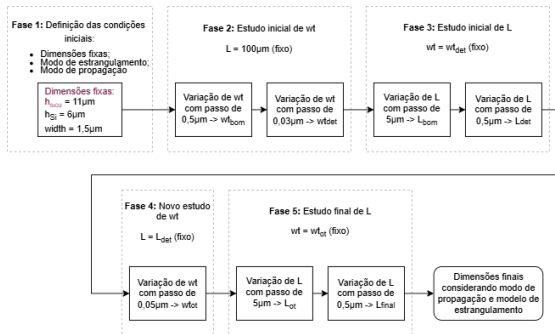


Figura 8 – Fluxograma do estudo realizado para altura de $3\mu m$

Fonte: [11].

Na primeira fase, foram definidos o tipo de transição geométrica do taper, seu modo de

propagação, e as suas dimensões fixas, mantidas durante os estudos.

Já na segunda fase, foi realizada uma análise inicial da largura de entrada no acoplador (wt). Para isso, o seu comprimento (L) foi mantido fixo em uma medida inicial determinada ($L = 100\mu m$), enquanto a largura foi variada no intervalo $0\mu m < wt < 10\mu m$, e passo $\Delta wt = 0,5\mu m$, sendo possível definir wt_{bot} , dimensão com a maior eficiência de acoplamento. Em seguida, foi realizada uma nova simulação detalhada ao redor do valor definido, porém utilizando $\Delta wt = 0,03\mu m$, sendo nomeado novamente o valor de maior potência transmitida, wt_{det} .

Na terceira fase, a largura foi fixada em $wt = wt_{det}$, e foi realizado um estudo análogo para o comprimento do acoplador. Dessa forma, o seu comprimento foi variado no intervalo $10\mu m < L < 250\mu m$, com passo de $\Delta L = 5\mu m$, permitindo identificar o valor de L_{bot} . Posteriormente, foi realizada uma simulação ao redor desse valor, utilizando passo de $\Delta L = 0,5\mu m$, possibilitando identificar o valor de L_{det} .

Na quarta fase foi realizada uma nova análise de wt, mantendo o comprimento fixo em $L = L_{det}$, e variando wt com passo de $\Delta wt = 0,05\mu m$, resultando no valor otimizado da largura do acoplador, denotado wt_{ot} .

Por fim, na quinta fase foram realizadas duas novas simulações, mantendo $wt = wt_{ot}$. Inicialmente, L foi variado no intervalo $10\mu m < L < 250\mu m$, com passo $\Delta L = 5\mu m$, identificando-se L_{ot} . Em seguida, foi novamente realizado um estudo detalhado, a partir de uma simulação ao redor de L_{ot} , utilizando passo $\Delta L = 0,5\mu m$, resultando na determinação do valor otimizado de L, L_{final} .

Esse procedimento permitiu determinar as dimensões otimizadas de largura (wt) e de comprimento (L) para cada geometria de modificação geométrica da largura e modo de polarização analisados, considerando a maior potência atingida de transferência da onda.

IV Resultados

As simulações realizadas permitiram determinar as dimensões ótimas dos acopladores nanotaper em SU-8 para diferentes alturas do guia de onda, perfis de transição geométrica e modos de polarização. As Tabelas 1 e 2 apresentam os parâmetros geométricos que resultaram na maior eficiência de acoplamento para os per-

fis linear e exponencial, respectivamente, bem como as perdas de inserção associadas a cada configuração.

Tabela 1 – Resultados do taper linear

Linear	$wt[\mu m]$	$L[\mu m]$	Perda[dB]
Modo TE ($h = 1\mu m$)	0,65	16,5	0,92
Modo TM ($h = 1\mu m$)	0,65	19,0	0,88
Modo TE ($h = 2\mu m$)	0,50	42,5	0,93
Modo TM ($h = 2\mu m$)	0,50	81,0	1,00
Modo TE ($h = 3\mu m$)	3,85	102,5	0,55
Modo TM ($h = 3\mu m$)	3,65	79,50	0,59

Tabela 2 – Resultados do taper exponencial

Exponencial	$wt[\mu m]$	$L[\mu m]$	Perda[dB]
Modo TE ($h = 1\mu m$)	0,80	19,0	0,94
Modo TM ($h = 1\mu m$)	0,70	17,5	0,89
Modo TE ($h = 2\mu m$)	3,50	86,5	0,98
Modo TM ($h = 2\mu m$)	3,35	83,5	1,02
Modo TE ($h = 3\mu m$)	3,65	84,5	0,55
Modo TM ($h = 3\mu m$)	3,65	81,50	0,59

A partir dos resultados obtidos, foi possível observar que os tapers apresentam eficiências de transmissão relacionadas com a semelhança entre os modos da fibra de entrada e do guia. Ou seja, quanto melhor a sobreposição entre os modos, maior será a eficiência.

Para isso, as larguras de entrada e saída do guia podem variar formando um afunilamento ou uma ampliação de sua dimensão.

A seguir, são detalhados os resultados obtidos a partir das simulações realizadas durante o estudo.

IV.A Acopladores Lineares

IV.A.1 Acoplador linear de altura $1\mu m$

Para o acoplador linear com altura $h = 1\mu m$, as dimensões que permitiram maior potência transmitida foram no modo TM, com dimensões de $wt = 0,65\mu m$ e $L = 19,0\mu m$, alcançando uma transferência de 81,63%. No modo TE, a máxima potência transferida foi de 80,87%, para dimensões de $wt = 0,65\mu m$ e $L = 16,5\mu m$.

A variação de perda de potência em função do comprimento do acoplador para cada um dos modos de propagação foi calculada a partir da equação 5 e pode ser visualizada na Figura 9.

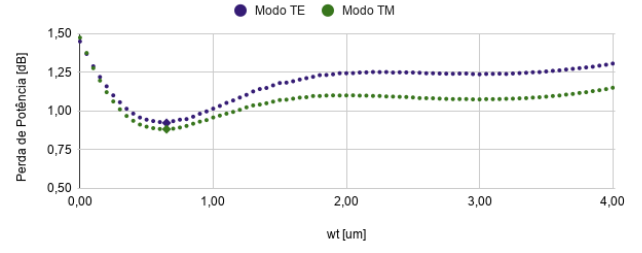
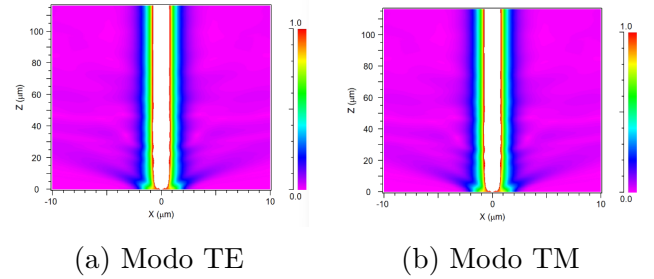


Figura 9 – Variação da perda de potência versus wt , tanto para polarização TE quanto para TM.

As Figuras 10a e 10b mostram a distribuição de potência transferida ao longo do guia de onda para as dimensões ideais encontradas para cada um dos modos.



(a) Modo TE

(b) Modo TM

Figura 10 – Potência transmitida da fibra para o guia de onda em cada um dos modos

IV.A.2 Acoplador linear de altura $2\mu m$

O acoplador linear de altura $h = 2\mu m$ apresentou maior eficiência no modo TE, com uma transferência de potência de 80,70%, e dimensões de $wt = 0,5\mu m$, $L = 42,5\mu m$. No modo TM, as dimensões ótimas encontradas foram de $wt = 0,5\mu m$, $L = 81,0\mu m$, resultando em uma transferência de 79,36% de potência.

A evolução da perda de potência de acordo com o comprimento do acoplador nos modos, calculada a partir da equação 5, pode ser vista na Figura 11.

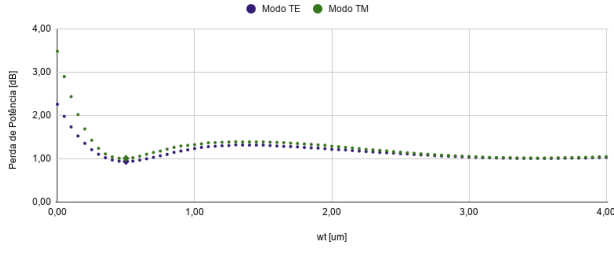


Figura 11 – Variação da perda de potência versus wt , tanto para polarização TE quanto para TM.

As Figuras 12a e 12b apresentam a distribuição da potência transferida ao longo do guia de onda para os modos TE e TM com as dimensões ideais estudadas.

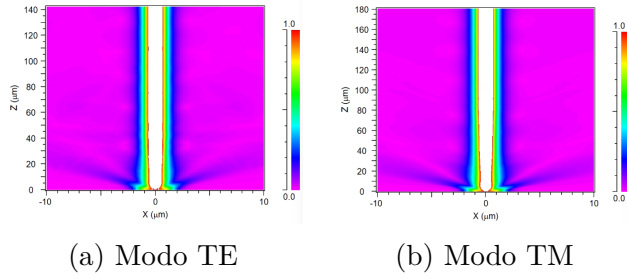


Figura 12 – Potência transmitida da fibra para o guia de onda em cada um dos modos

IV.A.3 Acoplador linear de altura $3\mu m$

Para o acoplador linear de altura $h = 3\mu m$, a espessura da camada de SiO_2 foi aumentada em $1\mu m$, de forma que as dimensões consideradas foram de $h = 3\mu m$ e $h_{SiO_2} = 4\mu m$.

Nessas condições, a maior potência de transmissão foi de 88,13% no modo TE, com dimensões $wt = 3,85\mu m$ e $L = 102,5\mu m$. Já no modo TM, a potência máxima transferida foi de 87,31%, com $wt = 3,65\mu m$, $L = 79,5\mu m$.

A potência transferida ao longo do guia em função de wt , que foi calculada a partir da equação 5, pode ser vista na Figura 13.

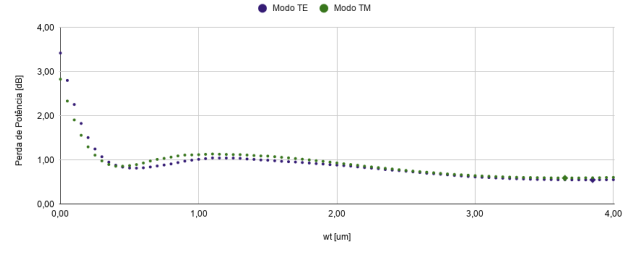


Figura 13 – Variação da perda de potência versus wt , tanto para polarização TE quanto para TM.

As Figuras 14a e 14b apresentam a potência transmitida da fibra para o guia de onda, para cada um dos modos estudados em suas dimensões ótimas encontradas.

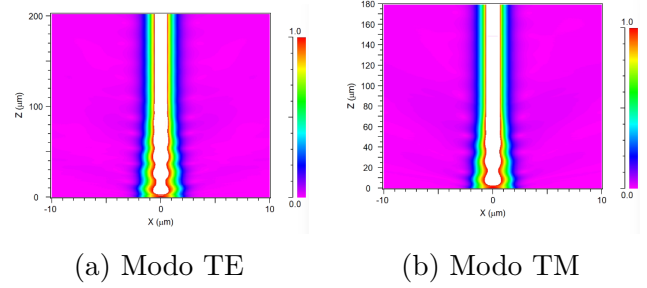


Figura 14 – Potência transmitida da fibra para o guia de onda em cada um dos modos

IV.B Acopladores Exponenciais

IV.B.1 Acoplador exponencial de altura $1\mu m$

O acoplador exponencial de altura $h = 1\mu m$ apresentou melhor desempenho no modo TM, com dimensões de $wt = 0,70\mu m$ e $L = 17,5\mu m$, atingindo uma transferência de 81,49% de potência. No modo TE, o guia apresentou máxima potência transferida de 80,49%, quando as dimensões foram de $wt = 0,80\mu m$, $L = 19,0\mu m$.

A variação da perda de potência em função da largura do taper foi calculada a partir da equação 5 e é apresentada na Figura 15.

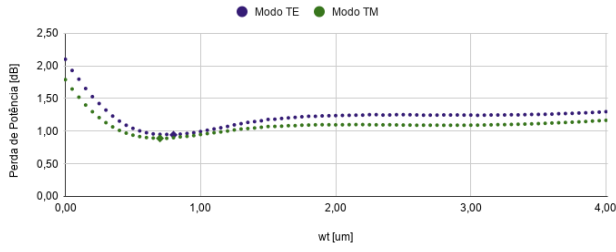


Figura 15 – Variação da perda de potência versus wt , tanto para polarização TE quanto para TM.

A potência acoplada ao longo do guia para cada um dos modos pode ser vista nas Figuras 16a e 16b, que foram geradas considerando as dimensões ótimas encontradas no estudo.

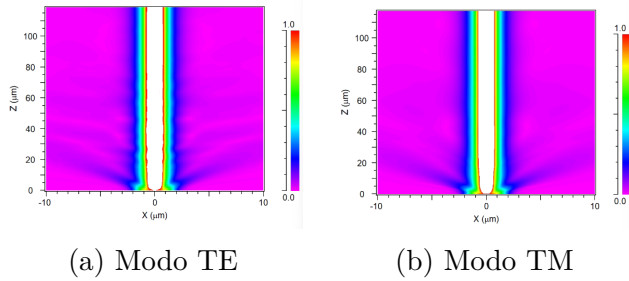


Figura 16 – Potência transmitida da fibra para o guia de onda em cada um dos modos

IV.B.2 Acoplador exponencial de altura $2\mu m$

Para o acoplador exponencial com altura $h = 2\mu m$, a maior eficiência foi obtida nas dimensões $wt = 3,5\mu m$, $L = 86,5\mu m$, no modo TE, no qual a transferência de potência atingiu 79,82%. No modo TM, a potência máxima transferida foi de 79,15%, com dimensões ótimas de $wt = 3,35\mu m$, $L = 83,5\mu m$.

A Figura 17 mostra a variação da perda de potência para os diferentes valores de largura do taper, calculada a partir da equação 5.

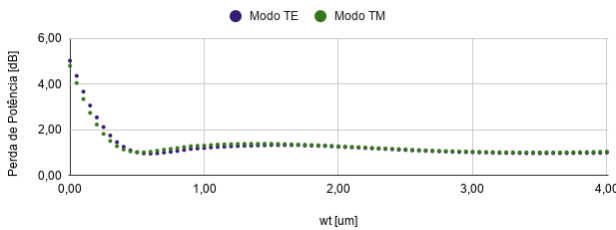


Figura 17 – Variação da perda de potência versus wt , tanto para polarização TE quanto para TM.

As Figuras 18a e 18b apresentam a distribuição da potência acoplada ao longo do guia para os modos TE e TM, respectivamente.

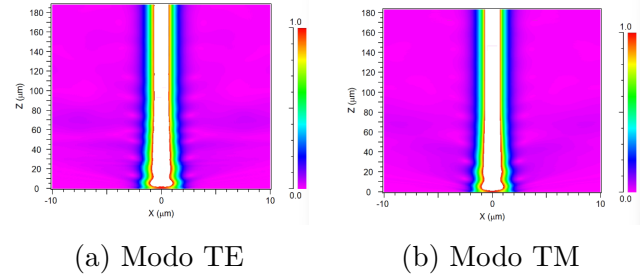


Figura 18 – Potência transmitida da fibra para o guia de onda em cada um dos modos

IV.B.3 Acoplador exponencial de altura $3\mu m$

Para o estudo do acoplador exponencial de altura $h = 3\mu m$, a espessura da camada de SiO_2 foi novamente aumentada em $1\mu m$, de forma que o acoplador foi estudado com dimensões de $h = 3\mu m$ e $h_{SiO_2} = 4\mu m$.

Dessa forma, o acoplador em questão apresentou maior eficiência de acoplamento nas dimensões $wt = 3,65\mu m$, $L = 84,5\mu m$, no modo TE, resultando em uma transferência de 88,07% da potência inicial. No modo TM, as dimensões ótimas encontradas foram de $wt = 3,65\mu m$, $L = 81,5\mu m$, com transferência de 87,24% da potência.

A variação de perda de potência em função do aumento de wt foi calculada a partir da equação 5 e pode ser vista na Figura 19

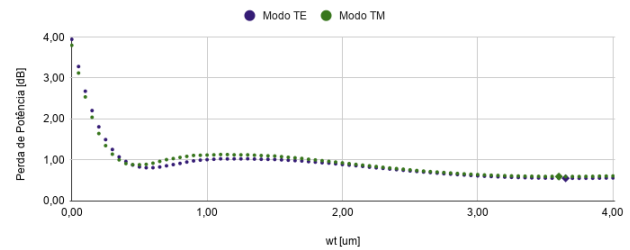


Figura 19 – Variação da perda de potência versus wt , tanto para polarização TE quanto para TM.

A potência acoplada para cada um dos modos considerando as dimensões ideais encontradas pode ser vista nas Figuras 20a e 20b.

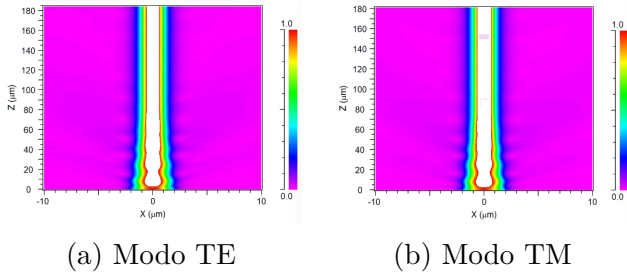


Figura 20 – Potência transmitida da fibra para o guia de onda em cada um dos modos

V Discussão de resultados

Com base nos resultados obtidos nas simulações, foi elaborada a Tabela 3, consolidando as dimensões ótimas, as eficiências de acoplamento e as perdas de inserção encontradas para cada uma das configurações analisadas, com a altura do guia, a largura ótima e o comprimento ótimo em μm , a eficiência máxima em % e a perda mínima em dB.

Tabela 3 – Resultados consolidados

Altura do Guia	Perfil	Polarização	Largura Ótima	Comprimento Ótimo	Eficiência Máxima	Perda Mínima
1,00	Linear	TE	0,65	16,5	80,87%	0,92
1,00	Linear	TM	0,65	19,0	81,63%	0,88
1,00	Exponencial	TE	0,80	19,0	80,49%	0,94
1,00	Exponencial	TM	0,70	17,5	81,49%	0,89
2,00	Linear	TE	0,50	42,5	80,70%	0,93
2,00	Linear	TM	0,50	81,0	79,36%	1,00
2,00	Exponencial	TE	0,60	86,5	80,16%	0,96
2,00	Exponencial	TM	3,35	83,5	79,15%	1,02
3,00	Linear	TE	3,85	102,5	88,13%	0,55
3,00	Linear	TM	3,65	79,50	87,31%	0,59
3,00	Exponencial	TE	3,65	84,5	88,07%	0,55
3,00	Exponencial	TM	3,65	81,50	87,24%	0,59

A geometria de um guia de onda influencia diretamente o confinamento do modo óptico propagado. Guias com seções transversais reduzidas apresentam menor capacidade de confinamento, permitindo uma maior expansão do campo óptico para as regiões adjacentes ao núcleo e resultando em modos de maiores dimensões [11]. Em contrapartida, acopladores com larguras iniciais maiores e transições geométricas suficientemente suaves favorecem a adaptação gradual entre o modo da fibra óptica e o modo do guia de onda, reduzindo perdas por descasamento modal [11].

Os resultados obtidos corroboram esse comportamento. Para as alturas de 1 μm e 2 μm , as larguras ótimas de entrada do taper variaram entre 0,5 μm e 0,8 μm para a maioria das configurações analisadas. Nesses casos, o afunilamento promove uma adaptação progressiva entre o modo proveniente da fibra óptica e o modo confinado no guia de onda, permitindo eficiências de acoplamento superiores a 79%.

A influência da polarização nas dimensões ótimas observadas está relacionada à distri-

buição dos campos eletromagnéticos no interior do guia de onda. Os modos TE e TM apresentam diferentes distribuições espaciais dos campos, o que altera o grau de confinamento óptico e, conseqüentemente, as dimensões necessárias para uma adaptação modal eficiente [15]. Apesar dessas diferenças, os resultados mostraram desempenhos bastante semelhantes para ambas as polarizações, com variações relativamente pequenas na eficiência de acoplamento e nas perdas de inserção.

Observou-se também que as configurações com altura de 3 μm apresentaram os melhores resultados, alcançando eficiências superiores a 87% e perdas inferiores a 0,6 dB. Esse comportamento pode estar associado ao maior confinamento óptico proporcionado pela estrutura, favorecendo a transferência de potência entre a fibra óptica e o guia de onda. Entretanto, deve-se destacar que, para essa configuração, a espessura da camada de *SiO2* também foi aumentada para 4 μm . Dessa forma, os resultados obtidos refletem os efeitos combinados dessas modificações, não sendo possível atribuir o ganho de desempenho exclusivamente ao aumento da altura do guia.

Por fim, a comparação entre os perfis linear e exponencial revelou diferenças pouco significativas em termos de eficiência de acoplamento. Em todas as alturas analisadas, ambos os perfis apresentaram desempenhos semelhantes, indicando que a escolha entre essas geometrias pode ser realizada com base em critérios adicionais, como simplicidade de projeto, facilidade de fabricação e dimensões finais do dispositivo.

VI Conclusão

Neste trabalho foi realizado o projeto e a otimização de acopladores ópticos do tipo taper em SU-8 para aplicações em fotônica integrada. Por meio da análise de diferentes geometrias de transição, alturas de guia de onda e modos de polarização, foi possível determinar as configurações que proporcionam maior eficiência de acoplamento entre uma fibra óptica monomodo e um guia de onda integrado.

Os resultados obtidos demonstraram que os acopladores em SU-8 apresentam elevadas eficiências de transmissão, superiores a 79% para todas as configurações analisadas e acima de 87% para os melhores casos, com perdas de inserção inferiores a 0,6 dB. Esses resultados evidenciam o potencial do SU-8 para aplicações em dispositivos fotônicos integrados,

combinando bom desempenho óptico com compatibilidade com processos convencionais de microfabricação.

A comparação entre os perfis linear e exponencial indicou diferenças pouco significativas em termos de eficiência de acoplamento, sugerindo que a escolha entre essas geometrias pode ser realizada considerando aspectos adicionais, como simplicidade de projeto, facilidade de fabricação e dimensões finais do dispositivo. Observou-se ainda que as configurações com maior altura do guia de onda apresentaram os melhores desempenhos. Entretanto, como a espessura da camada de SiO_2 também foi modificada nessa etapa do estudo, não foi possível avaliar isoladamente a contribuição de cada parâmetro para o aumento da eficiência de acoplamento.

Dessa forma, trabalhos futuros poderão investigar separadamente a influência da altura do guia e da espessura da camada de SiO_2 sobre o desempenho dos acopladores, permitindo uma compreensão mais detalhada dos mecanismos responsáveis pela adaptação modal observada. Além disso, a fabricação dos tapers projetados e sua posterior caracterização experimental permitirão validar os resultados obtidos por simulação, avaliar os efeitos de tolerâncias de fabricação e verificar a viabilidade da utilização de estruturas em SU-8 em aplicações reais de fotônica integrada. Também será relevante aprofundar o estudo, investigando a influência das rugosidades geradas durante o processo de fabricação do núcleo em SU-8 sobre o desempenho óptico dessas estruturas.

Referências

- [1] H. Kogelnik, "An introduction to integrated optics," in *Optical Information Processing*, E. S. Barrekette, G. W. Stroke, Y. E. Nesterikhin, and W. E. Kock, Eds. Springer, 1978, pp. 349–389.
- [2] M. A. Butt, B. Janaszek, and R. Piramidowicz, "Lighting the way forward: The bright future of photonic integrated circuits," *Journal of Photonics for Energy*, vol. 6, no. 3, p. 0326, 2025.
- [3] H. Lorenz, M. Despont, N. Fahrni, N. Labianca, P. Vettiger, and P. Renaud, "Su-8: a low-cost negative resist for mems," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 7, no. 3, pp. 121–124, 1997.
- [4] O. Nitiss, M. Tokmakovs, A. Pudzs, V. Busenbergs, and M. Rutkis, "All-organic electro-optic waveguide modulator comprising su-8 and nonlinear optical polymer," *Optics Express*, vol. 25, no. 15, pp. 17 442–17 452, 2017.
- [5] S. K. Selvaraja and P. Sethi, "Review on optical waveguides," in *Optical Waveguide Technology*. IntechOpen, 2018.
- [6] M. Emara, "A review of optical coupler theory, techniques, and applications," 2021.
- [7] A. Borreman, S. Musa, A. A. M. Kok, M. B. J. Diemeer, and A. Driessen, "Fabrication of polymeric multimode waveguides and devices in su-8 photoresist using selective polymerization," *Proceedings of SPIE*, vol. 4987, pp. 133–140, 2003.
- [8] L. F. Cely Ruiz, "Diseño de trampas ópticas con campos evanescentes," Tesis de Maestría, Maestría en Ciencias en Óptica, con orientación en Optoelectrónica, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), Ensenada, Baja California, México, 2024.
- [9] J. L. Tonelli and L. A. M. Barêa, "Projeto de acopladores do tipo nanotaper em guias de onda de silício e nitreto de silício," Master's thesis, Departamento de Engenharia Elétrica (DEE), Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, Brasil, 2020.
- [10] Y. Fu, T. Ye, W. Tang, and T. Chu, "Efficient adiabatic silicon-on-insulator waveguide taper," *Photonics Research*, vol. 2, no. 3, pp. A41–A44, 2014.
- [11] X. Mu, X. Zhang, J. Wang, M. Wang, and X. Zhang, "Edge couplers in silicon photonic integrated circuits: A review," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 4, p. 1538, 2020.
- [12] J. Cordoba, J. Schianti, M. Almeida, A. Pavani, R. Panepucci, and L. Gabrielli, "Low-loss modified su-8 waveguides by direct laser writing at 405 nm," *Optical Materials Express*, vol. 7, pp. 2651–2659, 06 2017.
- [13] K. H. Rasmussen, S. S. Keller, F. Jensen, A. M. Jorgensen, and O. Hansen, "Su-8 etching in inductively coupled oxygen plasma," *Microelectronic Engineering*, vol. 112, pp. 35–40, 2013.
- [14] G. Genolet and H. Lorenz, "Uv-liga: From development to commercialization," *Micromachines*, vol. 5, no. 3, pp. 486–500, 2014.
- [15] V. R. Almeida, R. R. Panepucci, and M. Lipson, "Nano-taper for compact mode conversion," *School of Electrical and Computer Engineering, Cornell University*, 411 Phillips Hall, Ithaca, NY 14853.