

Multimode Interferometer (MMI) 4x4 90° hybrid

Edilberto Elias Xavier Junior, Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)

Abstract—Esse relatório tem como objetivo analisar o desempenho do dispositivo fotônico Multimode Interferometer (MMI) 4x4 90° hybrid, abordando desde sua geometria até parâmetros de transmissão na banda C. As análises envolvem convergência de modos, otimização de dimensões, perda de inserção, desequilíbrio entre portas e diferença de fase. Como solução para atingir as especificações de fase de 90° entre as portas, o estudo propõe a integração do dispositivo com o Mach-Zehnder Interferometer (MZI). O estudo revela que, mesmo após otimizações, o MZI foi essencial para atender às especificações de fase.

Index Terms—dispositivos fotônicos, MMI 4x4, híbrido 90°, banda C.

I. INTRODUCTION

O MMI 4x4 90° hybrid é um dispositivo fotônico que distribui a potência de entrada entre quatro portas de saída com diferenças de fase de 90°. Além de ser amplamente utilizado em sistemas de comunicações ópticas, ele apresenta desafios relacionados à transmissão balanceada e precisão de fase, sendo necessário estudar ajustes na geometria e otimização do dispositivo.

Esse estudo analisa a operação do MMI na banda C, com foco nos seguintes aspectos:

- 1) Geometria e otimização dimensional.
- 2) Análise de convergência de modos e transmissão.
- 3) Soluções para atingir diferenças de fase de 90°.

II. GEOMETRIA

O MMI 4x4 foi projetado com base em três componentes principais (Fig. 1):

- **Entradas e Saídas:** Guias de onda com taper para reduzir perdas de inserção.
- **Box Central:** Responsável pelo processamento dos modos e distribuição uniforme da potência.

Dimensões Finais: As dimensões a seguir são as dimensões finais já considerando otimizações e baseadas em [1] e [2].

Dimensões dos Waveguides:

- 1) Altura = 0.22μm
- 2) Largura = 0.48μm
- 3) Comprimento = 2μm

Dimensões dos Tapers:

- 1) Altura = 0.22μm
- 2) Largura maior = 2μm
- 3) Largura menor = 0.48μm
- 4) Comprimento = 6μm

Dimensões do Box Central:

- 1) Altura = 0.22μm
- 2) Largura = 10μm
- 3) Comprimento = 176.5μm

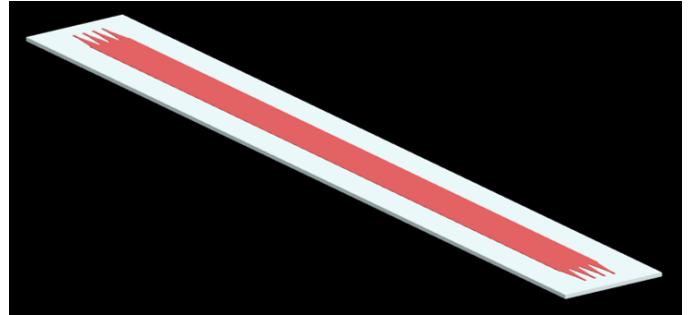


Fig. 1. MMI 4x4.

III. CONSTRUÇÃO DO DISPOSITIVO

A. Material Utilizado

O material utilizado para todo o dispositivo foi Silício (*Si*), cujo índice de refração $n_r = 3.476$. Além disso é necessário estabelecer também a base onde o dispositivo vai ser posicionado cujo material utilizado foi o Dióxio de Silício (SiO_2) com índice de refração $n_c = 1.444$, suas dimensões não precisam ser exatas, basta que caiba completamente o MMI e que o solver a ser utilizado não seja maior que ela.

B. Comprimento do Box Central

Para construir o Box central há uma equação de comprimento L_{MMI} que vai garantir que exista a formação de imagens para cada porta de saída, isto é, garante que há potência considerável em cada saída do MMI. Com o número de saídas $N = 4$, comprimento L_{MMI} é determinado por [3]:

$$L_{MMI} = \frac{3}{N} * L_\pi = 173,48\mu m \quad (1)$$

O valor de L_π também é definido por uma equação, considerando $\lambda_c = 1500nm$ e $\Delta n_{eff} = 0,0067$, tem-se que:

$$L_\pi = \frac{\lambda_c}{\Delta n_{eff}} = 231,31\mu m \quad (2)$$

IV. METODOS DE SIMULAÇÃO

As simulações para analisar o MMI 4x4 podem ser realizadas utilizando diversos métodos e solvers, entretanto foram adotados dois solvers distintos da LUMERICAL:

- 1) **Solver EME (Eigenmode Expansion):** Simulações rápidas para ajustes preliminares.
- 2) **Solver FDTD (Finite-Difference Time-Domain):** Alta precisão, usado na validação final.

Etapas de Simulação:

- **Definição das Regiões:** Entradas, taper, box central e saídas.

- **Convergência de Modos:** Determinação do número de modos propagantes para cada região.
- **Simulações:**

- O EME foi usado para avaliar rapidamente os ajustes iniciais das dimensões.
- O FDTD foi aplicado para validar resultados com maior precisão.

A. Solver EME

O solver EME tem uma série de parâmetros que devem ser definidos cuidadosamente para que a simulação não seja desnecessariamente demorada. Primeiramente é necessário definir as regiões de simulação, que nesse caso são cinco: duas para as entradas, uma para o box central e duas para as saídas. Visto que o MMI é simétrico é necessário analisar somente em três regiões específicas: **waveguide**, **taper** e **box central**. Após definir o número de regiões o número de células em cada região de simulação é muito importante, como o waveguide e o box central não tem variação de dimensão em toda sua extensão apenas uma célula é necessária, mas como taper varia sua largura de uma extremidade a outra mais células são necessárias, onde foram adotadas uma célula a cada $0,5\mu m$. Após esse passo de ser feita uma análise de convergência de modos nas regiões mencionadas.

	group spans (μm)	cells	subcell method	modes	custom	cell range	start (μm)	stop (μm)
1	1.5	1	none	10	default	[1]	-95.82	-94.32
2	6.07	12	CVCS	26	default	[2 ... 13]	-94.32	-88.25
3	176.5	1	none	49	default	[14]	-88.25	88.25
4	6.07	12	CVCS	26	default	[15 ... 26]	88.25	94.32
5	1.5	1	none	10	default	[27]	94.32	95.82

Fig. 2. Regiões de simulação.

V. ANÁLISE DE CONVERGÊNCIA DE MODOS

Na análise de convergência de modos foi utilizado o solver EME, nele é observado quantos modos se propagam em cada região do dispositivo para que as simulações usando esse solver não se tornem desnecessariamente demoradas. Em cada região é observado o número de modos que se propagam no Si, isto é, onde $n_{eff} > n_c$.

A. Waveguide

A partir da Fig. 3 é possível observar que para a região dos waveguides apenas oito modos se propagam, mas foram adotados dez modos para que haja uma folga na simulação.

mode #	effective index	wavelength (μm)	loss (dB/cm)	group index	TE polarization fraction (Ey)	waveguide TE/TM fraction (%)
1	2.345480-3.395490e-10i	1.55	-0.00011955	4.478775+9.819426e-09i	98	70.93 / 81.6
2	2.345480-3.398098e-10i	1.55	-0.00011965	4.478775+9.838948e-09i	98	70.93 / 81.6
3	2.345480-3.401333e-10i	1.55	-0.00011976	4.478775+9.863140e-09i	98	70.93 / 81.6
4	2.345480-3.403952e-10i	1.55	-0.00011985	4.478775+9.882760e-09i	98	70.93 / 81.6
5	1.568225-0.0002292348i	1.55	-80.713	3.429498+0.009784455i	8	72.86 / 88.37
6	1.568145-0.0002213701i	1.55	-77.944	3.433052+0.009377485i	8	72.84 / 88.35
7	1.568046-0.0002115959i	1.55	-74.502	3.437457+0.008867819i	8	72.8 / 88.32
8	1.567965-0.0002036453i	1.55	-71.703	3.441031+0.008450082i	8	72.77 / 88.29
9	1.417168+0.009635869i	1.55	3392.8	1.491865-0.009578696i	0	95.87 / 99.69
10	1.417167+0.009631030i	1.55	3391.1	1.491654-0.009825297i	0	95.87 / 99.69

Fig. 3. Modos propagantes - Waveguide.

B. Taper

A partir da Fig. 4 é possível observar que para a região dos tapers apenas vinte e quatro modos se propagam, mas foram adotados vinte e oito modos para que haja uma folga na simulação.

mode #	effective index	wavelength (μm)	loss (dB/cm)	group index	TE polarization fraction (Ey)	waveguide TE/TM fraction (%)
10	2.137535+2.650126e-10i	1.55	9.3310e-05	4.910374-4.257408e-08i	97	59.96 / 86.06
11	2.137533+1.779649e-10i	1.55	6.2661e-05	4.910445-3.557132e-08i	97	59.96 / 86.06
12	2.137531+1.074076e-10i	1.55	3.7818e-05	4.910504-2.989486e-08i	97	59.95 / 86.06
13	1.811970-3.411938e-06i	1.55	-1.2013	4.194700+0.0001917901i	3	61.9 / 94.83
14	1.811953-3.329500e-06i	1.55	-1.1723	4.195241+0.0001865731i	3	61.9 / 94.82
15	1.811931-3.227686e-06i	1.55	-1.1365	4.195909+0.0001801257i	3	61.89 / 94.81
16	1.811914-3.145386e-06i	1.55	-1.1075	4.196449+0.0001749107i	3	61.89 / 94.81
17	1.574793-7.680867e-05i	1.55	-27.044	4.206659+0.004541719i	12	71.42 / 78.17
18	1.574347-6.572966e-05i	1.55	-23.143	4.221978+0.003846339i	12	71.35 / 78.07
19	1.573791-5.153981e-05i	1.55	-18.147	4.241385+0.002936316i	12	71.26 / 77.95
20	1.573336-3.963999e-05i	1.55	-13.957	4.257485+0.002156428i	12	71.19 / 77.84
21	1.478629+0.0001977390i	1.55	69.623	5.363043-0.02045334i	80	55.57 / 91.89
22	1.477830+0.0001346947i	1.55	47.426	5.394086-0.01425150i	79	55.15 / 91.84
23	1.476834+4.886395e-05i	1.55	17.205	5.431289-0.005624474i	77	54.63 / 91.79
24	1.476023-2.7337278e-05i	1.55	-9.6254	5.459871+0.002093466i	76	54.22 / 91.74
25	1.417416+0.009513976i	1.55	3349.8	1.512668-0.02021933i	0	95.52 / 99.57
26	1.417348+0.009510740i	1.55	3348.7	1.503494-0.01926376i	0	95.67 / 99.6
27	1.413729+0.01098490i	1.55	3867.8	1.635936-0.09211252i	1	93.56 / 98.34
28	1.412379+0.01178024i	1.55	4147.8	1.556954-0.06482644i	1	95.04 / 98.57
29	1.410112+0.01233750i	1.55	4344.0	1.557124-0.03307929i	1	95.25 / 98.25
30	1.406132+0.01342948i	1.55	4728.5	1.587421-0.04653958i	1	95.26 / 97.64

Fig. 4. Modos propagantes - Taper.

C. Box Central

A partir da Fig. 5 é possível observar que para a região do box central apenas quarente e sete modos se propagam, mas foram adotados quarenta e nove modos para que haja uma folga na simulação.

mode #	effective index	wavelength (μm)	loss (dB/cm)	group index	TE polarization fraction (Ey)	waveguide TE/TM fraction (%)
30	1.878128-1.381724e-06i	1.55	-0.48650	4.163839+7.743392e-05i	1	59.94 / 98.61
31	1.867244-1.416221e-06i	1.55	-0.49865	4.186907+7.936045e-05i	2	60.38 / 97.53
32	1.853302-1.464400e-06i	1.55	-0.51561	4.218593+8.268147e-05i	3	60.93 / 96.14
33	1.835936-1.537340e-06i	1.55	-0.54129	4.252077+8.648837e-05i	4	61.64 / 94.46
34	1.827918-3.983242e-08i	1.55	-0.014025	5.730331+1.391253e-05i	91	44.16 / 90.91
35	1.814976-1.581906e-06i	1.55	-0.55698	4.343925+7.680443e-05i	6	62.11 / 92.37
36	1.791442-1.782697e-06i	1.55	-0.62768	4.348671+0.0001012251	6	63.4 / 90.19
37	1.763698-1.998974e-06i	1.55	-0.70383	4.412138+0.0001139439i	8	64.47 / 87.56
38	1.736934-9.763057e-07i	1.55	-0.34375	5.394143+0.0003256803i	39	54.07 / 89.48
39	1.729637-1.248517e-06i	1.55	-0.43960	5.153021-0.0002013124i	25	58.31 / 87.79
40	1.697754-3.023458e-06i	1.55	-1.0646	4.561784+0.0001794124i	11	67.02 / 81.52
41	1.658525-4.237003e-06i	1.55	-1.4918	4.658567+0.0002590083i	13	68.47 / 78.03
42	1.633229-8.056042e-08i	1.55	0.028365	6.232338+0.0001177071i	75	41.44 / 91.39
43	1.613539-5.809930e-06i	1.55	-2.0457	4.934827+0.0002019827i	17	68.22 / 76.09
44	1.568520-1.458766e-05i	1.55	-5.1363	4.885613+0.001035114i	17	71.65 / 70.71
45	1.519977+1.370460e-05i	1.55	4.8254	6.732130-0.001718855i	84	36.06 / 92.61
46	1.515625-3.646462e-05i	1.55	-12.839	4.995618+0.002800082i	19	73.8 / 66
47	1.458102-9.250504e-05i	1.55	-32.571	5.114758+0.002699617i	21	75.63 / 62.23
48	1.417043+0.009768623i	1.55	3439.5	5.1512459-0.02561932i	0	95.63 / 98.85
49	1.416945+0.008955113i	1.55	3153.1	1.137588-0.09840238i	2	93.32 / 94.25
50	1.412984+0.01104080i	1.55	3887.4	1.269322-0.04646698i	2	92.44 / 95.28

Fig. 5. Modos propagantes - Box central.

D. Transmissão pela convergência de modos

O EME ainda apresenta uma ferramenta que é capaz de mostrar a transmitância de acordo com número de modos que se propagam, comprovando que as regiões de simulação realmente foram adotadas corretamente como pode ser visto na Fig. 6.

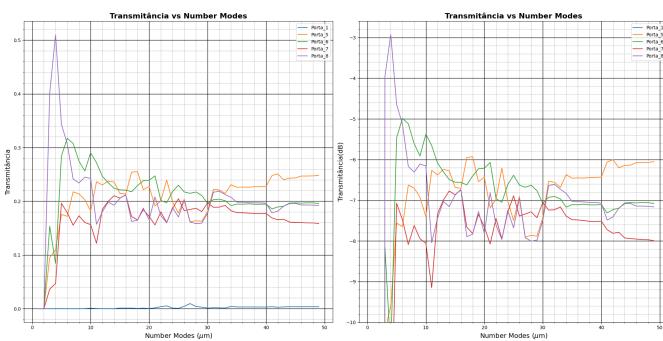


Fig. 6. Transmissão nas portas em função do número de modos.

VI. OTIMIZAÇÃO DO DISPOSITIVO

Conforme as Fig. 7 e 8, é possível notar que a transmitânciça nas portas de saída não são de 0,25, ou seja, uma transmissão de 25% em cada porta de saída, sendo necessário uma otimização nas dimensões do dispositivo.

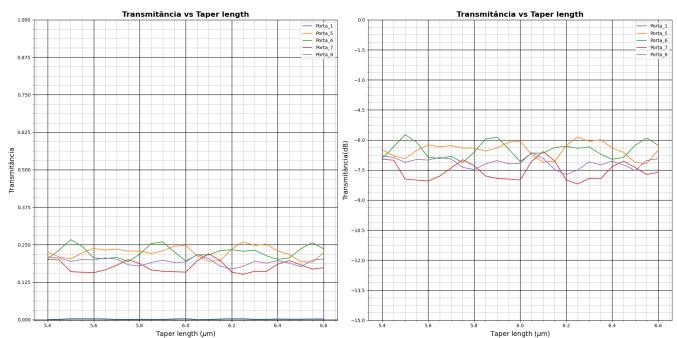


Fig. 7. Transmissão nas portas em função do comprimento dos tapers.

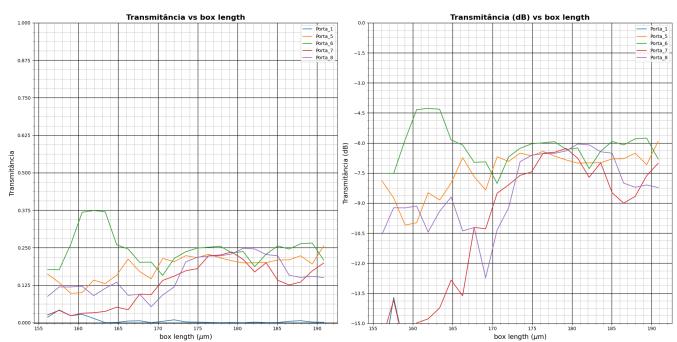


Fig. 8. Transmissão nas portas em função do comprimento do box central.

No que diz respeito ao comprimento do taper nota-se que o ideal seria $L_{taper} = 6,07\mu m$, mas como essa diferença é muito pequena a com o intuito de diminuir o número de simulações, foi mantido esse mesmo comprimento,. Cintudo para o caso do box central, o ideal seria um comprimento $L_{box} = 176,5\mu m$, o que é uma difenraça considerável. Após a correção desse comprimento uma nova série de simulações deve ser feita.

VII. RESULTADOS

Uma série de elementos de elementos são importantes para que se chegue a uma conclusão sobre os resultados obtidos nas simulações. As principais trazidas foram: **Perfis de Campo Elétrico, Transmissâncias, Imbalance e Perda de Inserção e Diferença entre as Fases**.

A. Perfil de Campo Elétrico

O perfil de Campo Elétrico é importante para se ter uma noção de como os campos estão se propagando dentro do dispositivo, entretanto ele não passa uma boa noção de quanto de potência está sendo transmitida.

- Antes da Otimização:** Distribuição não uniforme da potência entre as portas (Fig. 9 e 12).
- Depois da Otimização:** Melhoria no confinamento e transmissão uniforme (Fig. 10, 13, 11 e 14).

1) Escala Linear:

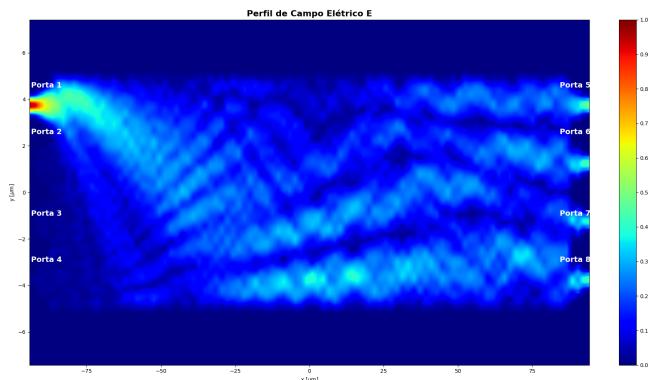


Fig. 9. Perfil de Campo Elétrico - EME não otimizado.

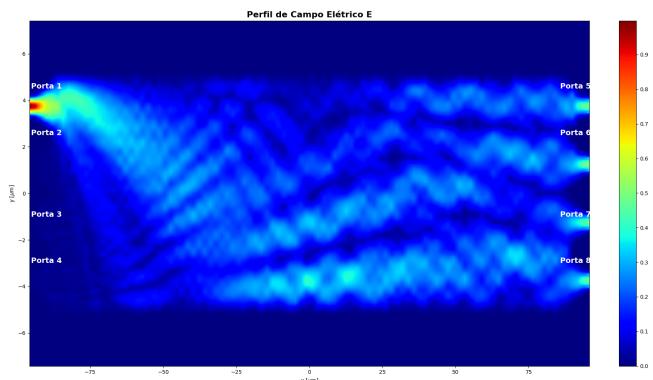


Fig. 10. Perfil de Campo Elétrico - EME otimizado.

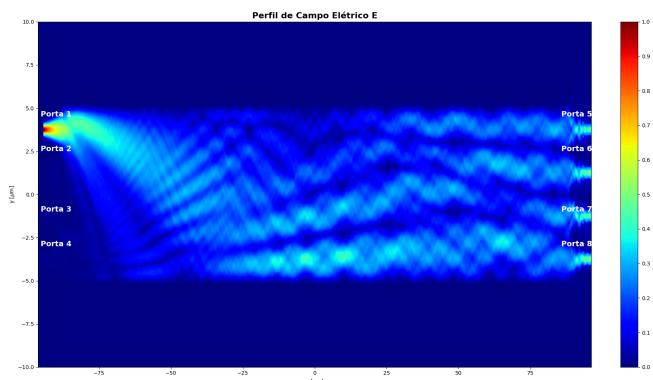


Fig. 11. Perfil de Campo Elétrico - FDTD otimizado.

2) Escala Logarítmica:

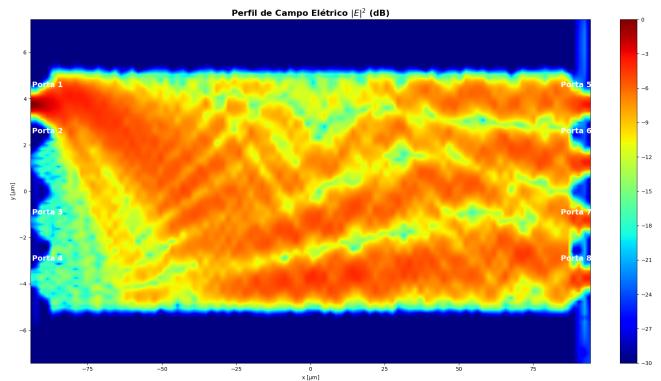


Fig. 12. Perfil de Campo Elétrico - EME não otimizado.

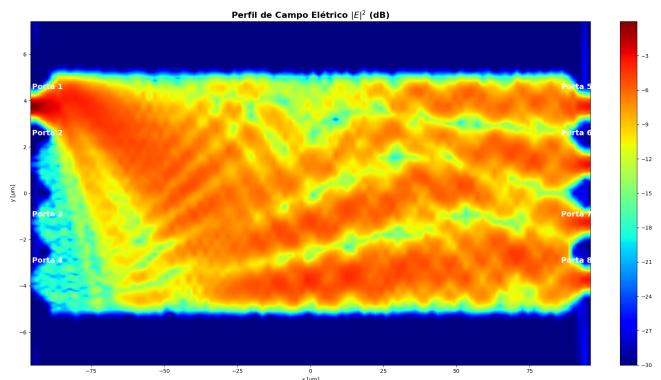


Fig. 13. Perfil de Campo Elétrico - EME otimizado.

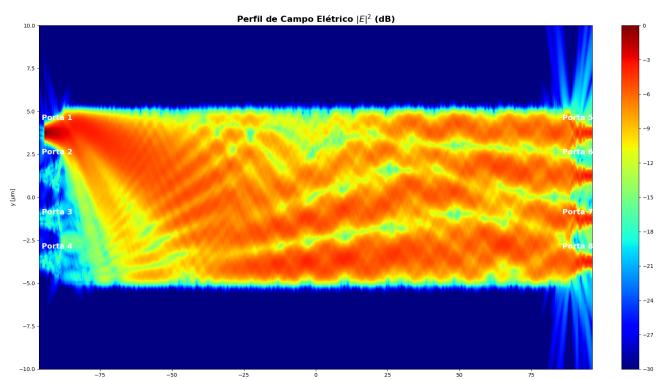


Fig. 14. Perfil de Campo Elétrico - FDTD otimizado.

B. Transmitância nas Portas

A análise da transmitância é importante exatamente para ver o quanto de potência está sendo transmitida em cada porta. Nota-se que somente com a analise do perfil de campo aparentemente as portas estão com os 25% desejados, mas a realidade é completamente diferente.

- **Antes da Otimização:** Transmissão desequilibrada, com valores diferentes de 25% por porta (15).
- **Depois da Otimização:** Ajuste das dimensões resultou em transmissão balanceada de 25% por porta (Fig. 16 e 17).

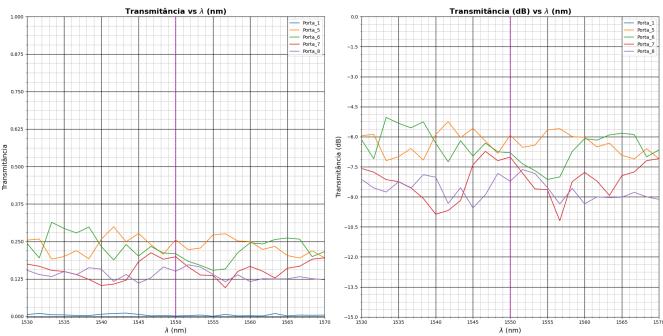


Fig. 15. Transmitância nas Portas - EME não otimizado.

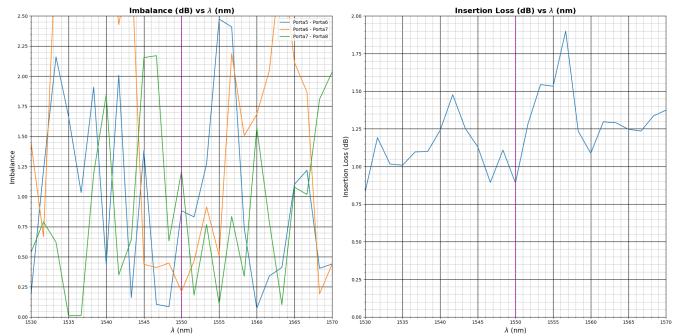


Fig. 18. Imbalance e Perda de Inserção - EME não otimizado.

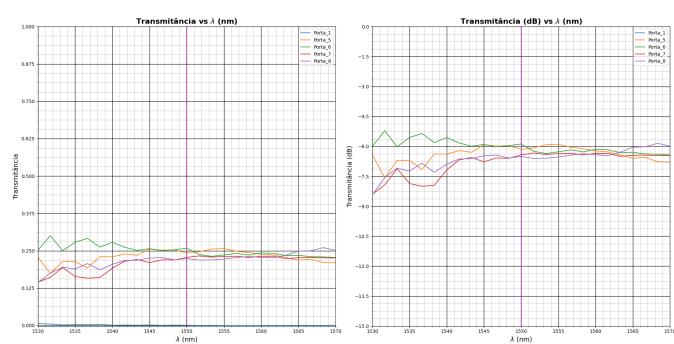


Fig. 16. Transmitância nas Portas - EME otimizado.

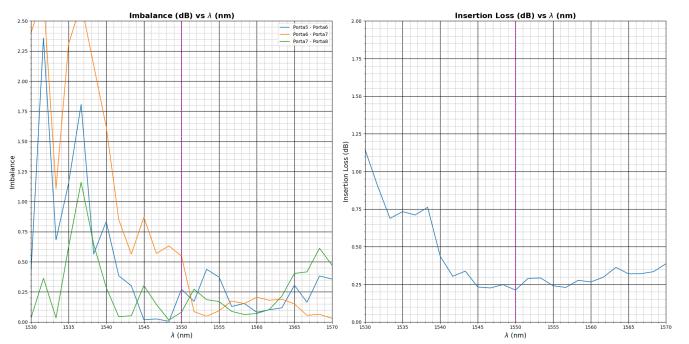


Fig. 19. Imbalance e Perda de Inserção - EME otimizado.

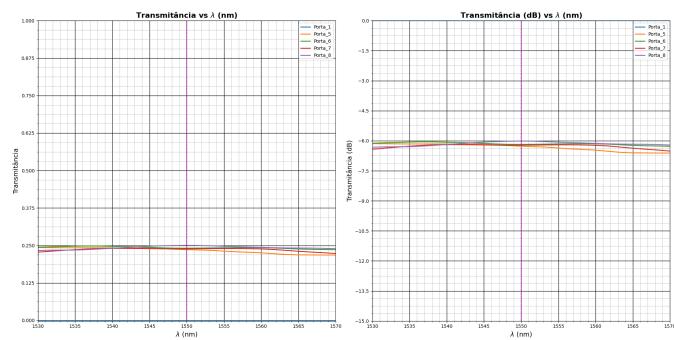


Fig. 17. Transmitância nas Portas - FDTD otimizado.

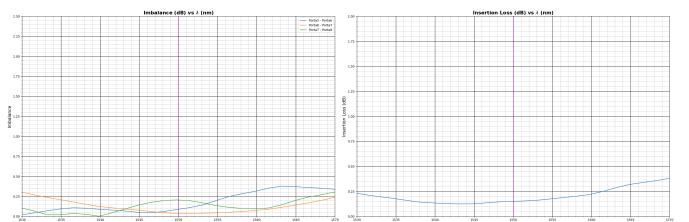


Fig. 20. Imbalance e Perda de Inserção - FDTD otimizado.

C. Imbalance e Perda de Inserção

O imbalance mostra o quanto a potência entre as portas divergem entre si, antes da otimização ela é bem alta, maior que $1dB$ (18), entretanto após a otimização o imbalance reduz para valores inferiores a $0,5dB$ (Figs. 19 e 20). O mesmo ocorre para a perda de inserção, antes da otimização, é de quase $1dB$, e após a otimização ela cai para menos de $0,25dB$.

D. Diferença de Fase

O mais preocupante são as diferenças de fase, que mesmo após a otimização ela ainda não satisfaz o 90° entre as portas de saída (Fig. 21 e (22), sendo assim outro tipo de abordagem é necessária.



Fig. 21. Diferença de Fase - EME não otimizado.

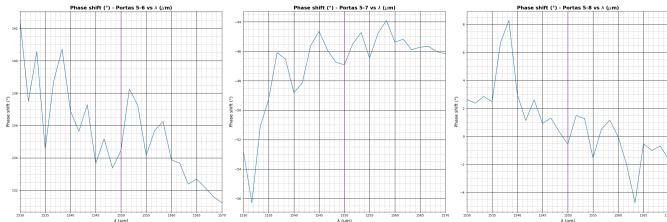


Fig. 22. Diferença de Fase - EME otimizado.

VIII. MACH-ZENDHER INTERFEROMETER (MZI)

A diferença de fase desejada de 90° entre as portas de saída não foi atingida. Para resolver essa limitação, foi utilizado um dispositivo auxiliar, o Mach-Zehnder Interferometer (MZI), que permite ajustar a diferença de fase para atender à condição especificada.

A construção do MZI foi realizada utilizando o solver INTERCONNECT. Nesse solver, foi implementado um acoplador ótico e dois waveguides para cada saída do acoplador.

As dimensões do dispositivo são determinadas pela diferença de comprimento entre os dois waveguides (ΔL). Antes de definir essa diferença, é essencial considerar o parâmetro **Free Spectral Range (FSR)**. O FSR é uma medida do comprimento de onda necessário para que cada porta complete um ciclo 2π . Para este estudo, o valor adotado foi $FSR = 1,1nm$ [2].

A diferença de comprimento ΔL é determinada pela seguinte equação:

$$\Delta L = \frac{\lambda_c^2}{n_g * FSR} \quad (3)$$

Buscando suavizar as curvas necessárias para construção do MZI, foi adotado que:

$$L_{MZI_{MAIOR}} = 5 * \Delta L = 2408,84\mu m \quad (4)$$

$$L_{MZI_{MENOR}} = L_{MZI_{MAIOR}} - \Delta L = 1927,07\mu m \quad (5)$$

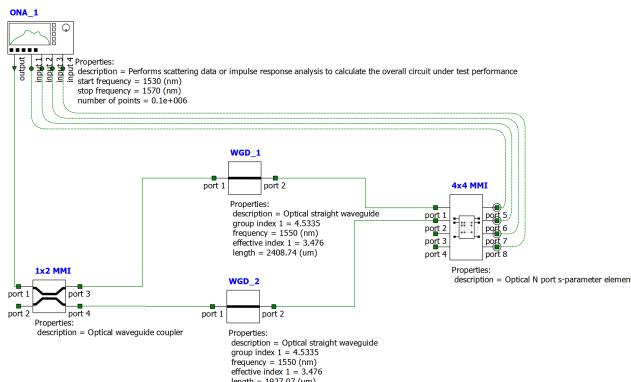


Fig. 23. MMI 4x4 com MZI.

Por fim, o último parâmetro de análise a ser estimado é o $\Delta\lambda$, que é a distância entre os mínimos das portas extraídos do FSR para um diferença de fase $\Delta\phi = 90^\circ$.

$$\Delta\lambda = \frac{\Delta\phi * FSR}{2 * \pi} = 0,275\mu m \quad (6)$$

A. Resultados com o MZI

A diferença de fase de 90° entre as portas foi alcançada com precisão, conforme Figuras 25 e 26.

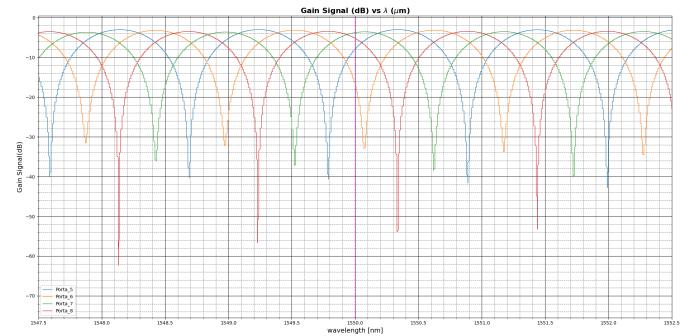


Fig. 24. FSR de cada porta - INTERCONNECT

B. Diferença de Fase

Como pode ser observado, após ser introduzido ao sistema o MZI a diferença de fase entre as portas de

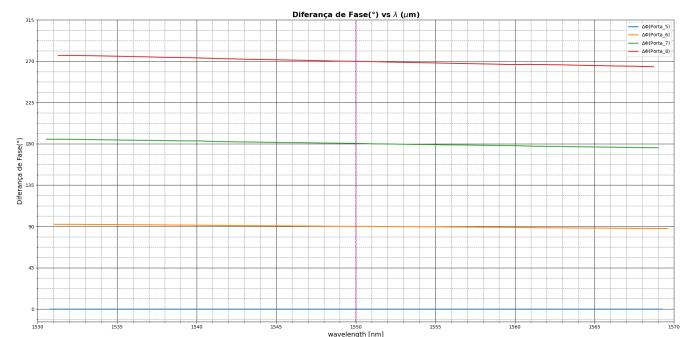


Fig. 25. Diferença de fase - INTERCONECT otimizado.

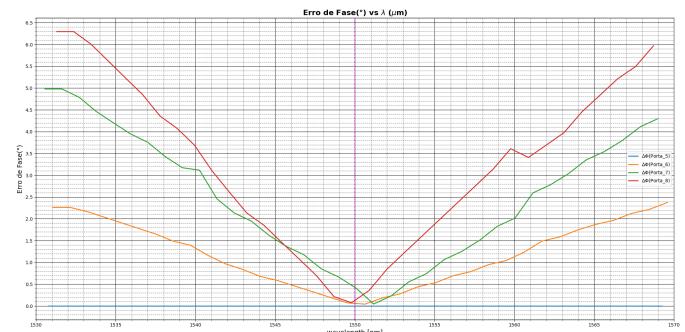


Fig. 26. Erro de Fase.

IX. CONCLUSÃO

O estudo demonstrou que o MMI 4x4 90° hybrid pode operar de forma eficiente na banda C após as otimizações realizadas. As transmissões foram balanceadas e houve uma redução significativa nas perdas de inserção. Contudo, a diferença de fase entre as portas de saída não foi alcançada apenas com as otimizações geométricas, exigindo a integração de um Mach-Zehnder Interferometer (MZI), que proporcionou o ajuste necessário para atender às especificações desejadas.

Como trabalhos futuros, sugere-se explorar otimizações que vão além do comprimento do dispositivo, considerando também ajustes na forma de suas partes, como guias de onda e tapers. Essas modificações podem contribuir para a redução de perdas ópticas e aumentar a precisão dimensional, proporcionando um desempenho ainda mais eficiente para o MMI 4x4 90° hybrid.

REFERENCES

- [1] K. Voigt, L. Zimmermann, G. Winzer, K. Petermann, and C. Weinert, “Silicon-on-insulator 90° optical hybrid using 4×4 waveguide couplers with c-band operation,” in *2008 34th European Conference on Optical Communication*. IEEE, 2008, pp. 1–2.
- [2] K. Voigt, L. Zimmermann, G. Winzer, H. Tian, B. Tillack, and K. Petermann, “C-band optical 90° hybrids in silicon nanowaveguide technology,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 23, no. 23, pp. 1769–1771, 2011.
- [3] L. B. Soldano and E. C. Pennings, “Optical multi-mode interference devices based on self-imaging: principles and applications,” *Journal of lightwave technology*, vol. 13, no. 4, pp. 615–627, 1995.