



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA  
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA ELÉTRICA

TEEE: PROJETO DE CIRCUITOS FOTÔNICOS EM SILÍCIO

### Atividade 9

Professor: Adolfo Fernandes Herbster  
Aluno: Erick Cândido Sousa  
Turma: 01  
Matrícula: 120110361

Campina Grande - CG  
2024

## 1. Objetivo.

- gerar os componentes e objetos de simulação por meio da API Python;
- realizar análises do dispositivo por meio do API Python;
- utilizar o *Lumerical EME* para determinar o comprimento ótimo da caixa central de um MMI;
- comparar o desempenho do MMI simulado no EME com os resultados obtidos por meio do *varFDTD* e *FDTD*;
- utilizar o Lumerical INTERCONNECT para simular o dispositivo utilizando os parâmetros S gerados no *EME* e *FDTD*.

## 2. Atividades.

- O primeiro passo consiste em criar uma estrutura de MMI 2x2 que opere como *splitter* 50/50, semelhante à apresentada pela Figura 1. Para isso, é considerado  $W_m = 7 \mu m$ , tappers com comprimento igual à  $15 \mu m$  e largura maior igual a  $1,5 \mu m$ . Já os guias retangulares possuem comprimento igual a  $4 \mu m$ , largura igual a  $450 nm$  e altura igual a  $220 nm$ . Para o cálculo do comprimento da caixa, foi utilizada a seguinte expressão:

$$L_{\pi} = \frac{\pi}{(\beta_0 - \beta_1)} \quad (1)$$

$$L = \frac{3L_{\pi}}{4N} \quad (2)$$

- $L_{\pi}$  obtido é igual a  $153,23 \mu m$  e  $L$  obtido é igual a  $57,62 \mu m$ , para  $N = 2$ .
- A implementação da estrutura foi feita integralmente via API Python. O Resultado obtido é ilustrado na Figura 2.

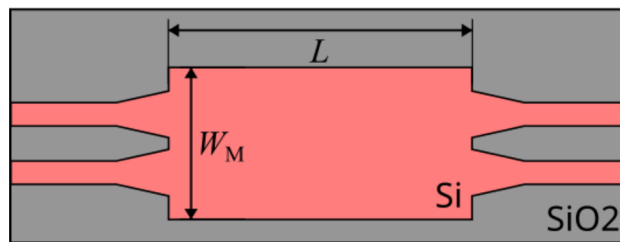


Figura 1 – MMI em Si.



Figura 2 – MMI em Si.

- Para as primeiras simulações via FDE é importante destacar que tanto o próprio FDE quanto o *mesh* são feitos de modo que sejam normais ao eixo x.

### 2.1. Simulação via EME.

- O **perfil de campo elétrico** é ilustrado na Figura 3.

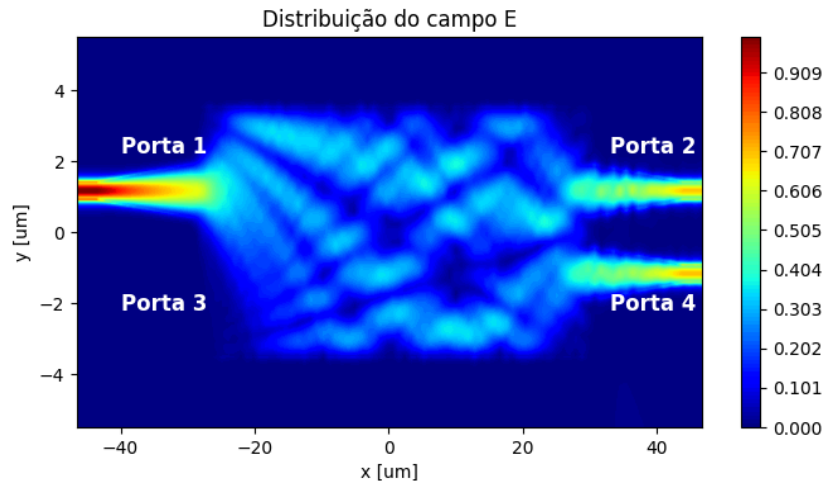


Figura 3 - Perfil de campo elétrico em escala linear via EME.

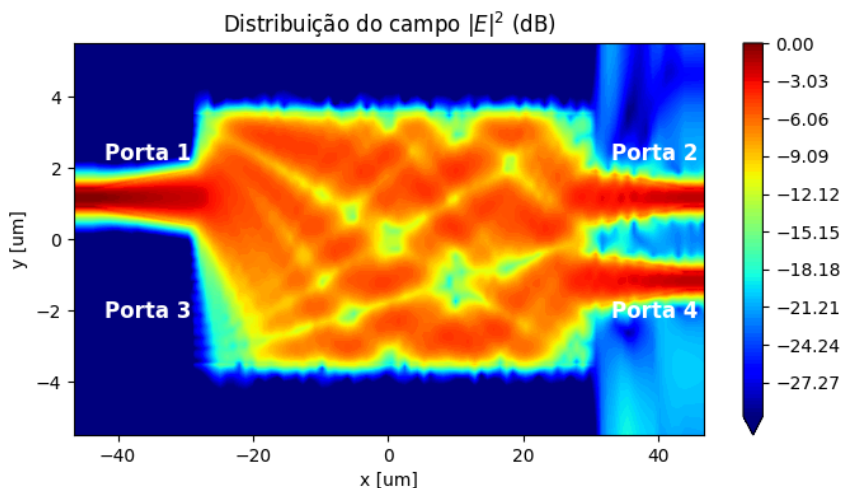


Figura 4 - Perfil de campo elétrico em escala logarítmica via EME.

- Note pela imagem que a formação das duas imagens se dá em torno de  $56,70 \mu m$ , e teoricamente se esperava  $57,62 \mu m$ .
- A formação de três imagens ocorre em torno de  $38,50 \mu m$ , já teoricamente era esperado que isso ocorresse em  $38,30 \mu m$ .
- Foi plotado o gráfico (Figura 5) da transmitância em função da dimensão  $L$  da caixa levando em conta uma variação de  $\pm 10\%$  de  $L$ .

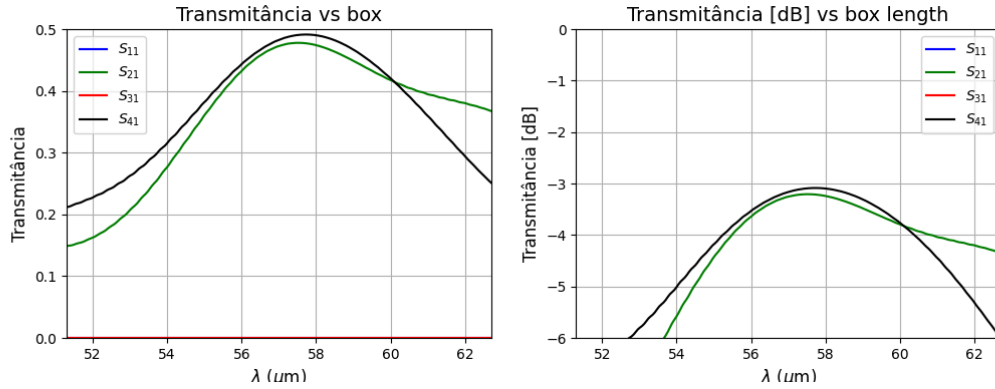


Figura 5 - Transmitância em função do comprimento da caixa.

- O *imbalance*, perda de inserção e *phase shift* são obtidos antes da otimização e ilustrados na Figura 6.

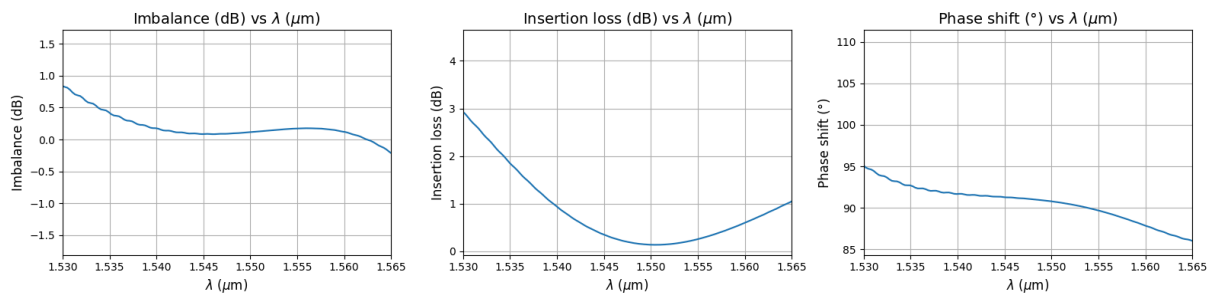


Figura 6 - *Imbalance*, Perda de inserção e *Phase shift* em função do comprimento de onda.

- Pela Figura 5, nota-se que o comprimento da caixa ideal é algo em torno de  $L_{novo} = 57,80 \mu m$ . Assim sendo, é realizado um sweep para  $L_{novo}$  dentro da faixa de operação da banda C, ilustrado na Figura 7.

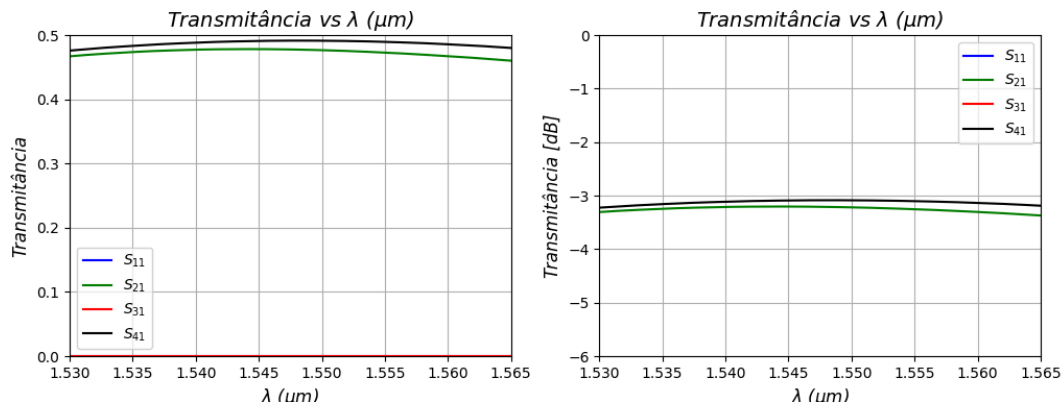


Figura 7 - Transmitância em função do comprimento de onda.

- Pelos gráficos, nota-se que a transmitância é igual a 0,49 na porta 4 e 0,47 na porta 2, aproximadamente, para  $\lambda = 1550 nm$ . Esse valor é bem próximo do desejado  $T_{ideal} = 0,50$ . Já na Figura 8 é novamente ilustrado o *imbalance*, perda de inserção e *phase shifting*, todos em função do comprimento de onda. O *imbalance* ilustra qual o desajuste de amplitude entre a transmitância apresentada pelas portas de saída 2 e 4. Na prática, equivale a subtrair as duas funções  $S_{21}$  e  $S_{41}$  apresentadas na Figura 7, em dB. Idealmente se

espera 0 dB para um bom *imbalance*. A perda de inserção equivale a quanto que se perde daquilo que é injetado. Se a porta 1 fornece 100% na entrada, idealmente é visto 50% em cada uma das duas portas de saída, ou seja, a soma de 2 e 4 resulta no total. Já o *phase shift* mostra quão defasado estão as duas saídas uma da outra. como a informação está na amplitude e fase, pode-se esperar que em ambas saídas esteja presente uma mesma amplitude  $A$ , porém defasados de um ângulo qualquer  $\theta$ . Basicamente o *phase shift* é uma consequência direta da interferência multimodal e das condições de contorno no guia de onda. Dependendo do comprimento da caixa, por exemplo, essa defasagem pode ser igual a  $90^\circ$  ou  $180^\circ$ .

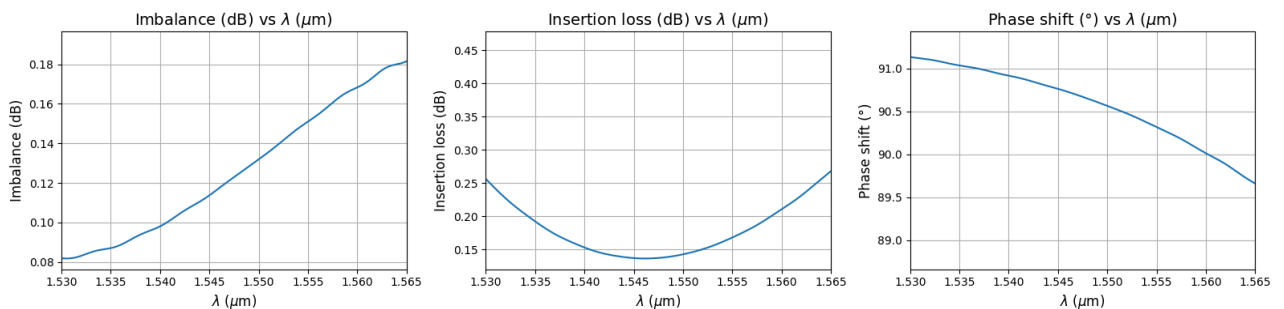


Figura 8 - *Imbalance*, Perda de Inserção e Phase Shift em função do comprimento de onda.

- Pelos gráficos apresentados, nota-se que o *imbalance* é próximo de 0 dB, assim como a perda de inserção, sendo de acordo com o esperado. Já o *phase shift* fica bem próximo de  $90^\circ$ . Isso pode ser explicado pois, cada modo propagado possui uma constante  $\beta_n$  própria bem como uma velocidade de fase própria, sendo assim, é inerente ao processo o surgimento dessas defasagens. Além disso, para esse dispositivo, o comprimento da caixa  $L$  obedece ao aparecimento da reimagem em quadratura, ou seja, ambas imagens em cada saída, defasadas de  $90^\circ$ .

## 2.2. Simulação via varFDTD.

- A estrutura do dispositivo é mantida, sendo alterado apenas o *solver* para a simulação, assim como ilustrado na Figura 9. Para excitação TE, é utilizada a condição de fronteira do tipo “Symmetric” para a metade inferior do eixo  $z$ . Dessa maneira, o que é calculado na metade superior, em  $z$ , da estrutura é espelhado para a região inferior.



Figura 9 - Setup de simulação via varFDTD.

- Nas Figuras 10, 11 e 12 é ilustrado os perfis de campo elétrico em escala linear, logarítmica, bem como a transmissão, respectivamente.

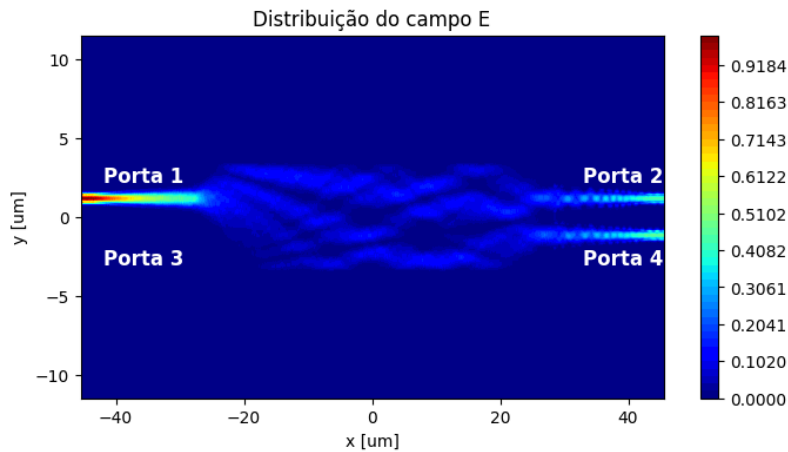


Figura 10 - Perfil de campo elétrico em escala linear via varFDTD.

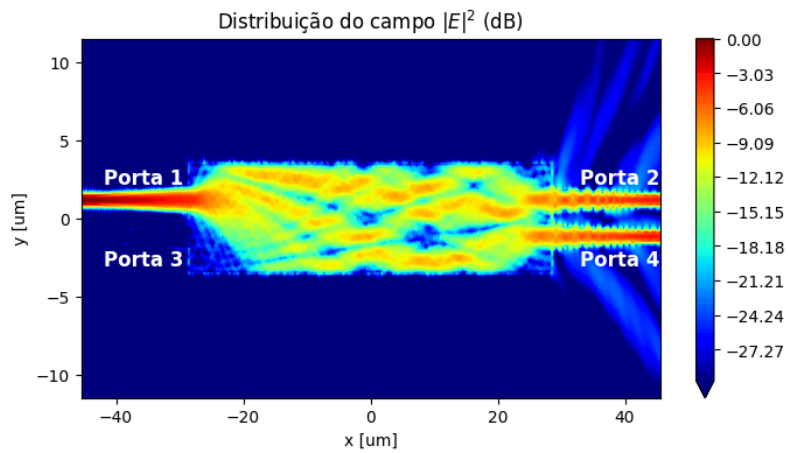


Figura 11 - Perfil de campo elétrico em escala logarítmica via varFDTD.

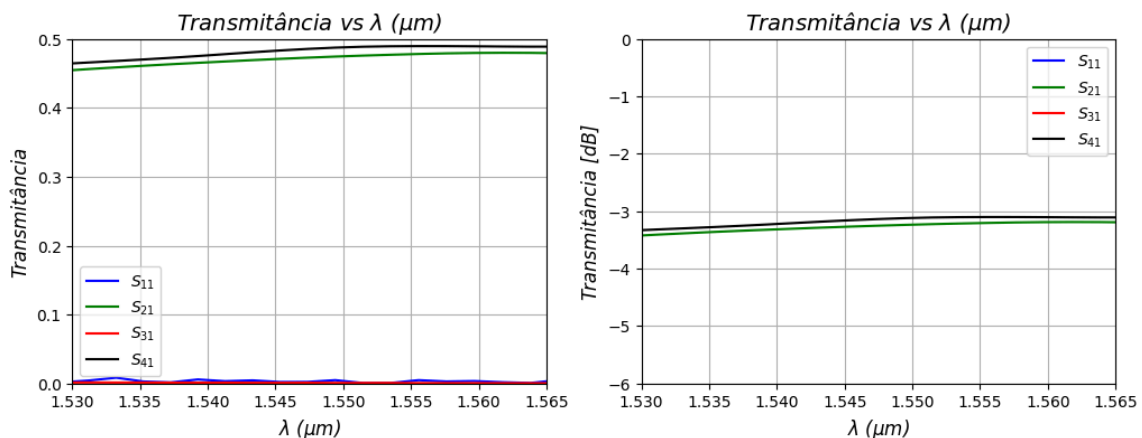


Figura 12 - Transmitância em função do comprimento de onda.

- Pela Figura 12 pode-se notar transmitância igual a 0,49 na porta 4 e 0,48 na porta 2, para  $\lambda = 1550\text{nm}$ , valores estes bem próximos do que foi observado na simulação via EME.
- Na Figura 13 é ilustrada a perda de inserção.

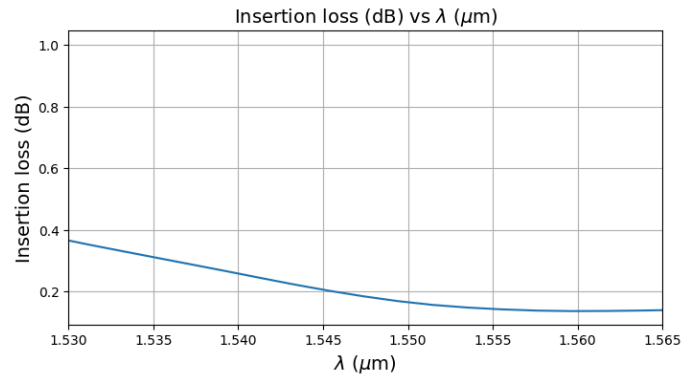


Figura 13 - Perda de inserção.

- Pela Figura 13 é possível notar uma perda de inserção igual a 0,17 dB, aproximadamente, sendo esse valor próximo ao ideal. Na simulação via EME, era possível notar uma perda de inserção igual a 0,14 dB, aproximadamente.
- Pela Figura 12 é possível ver que a banda de operação vai de 1530 nm a 1565 nm, especialmente de 1550 nm a 1565 nm, onde ambas transmitâncias são bem próximas de 0,50.
- Ainda foi aplicada uma excitação TM, mudando as condições de contorno para “Anti-Symmetric” na metade inferior do eixo z. Os perfis de campo elétrico, bem como a transmitância e perda de inserção são ilustrados nas Figuras 14, 15, 16 e 17.

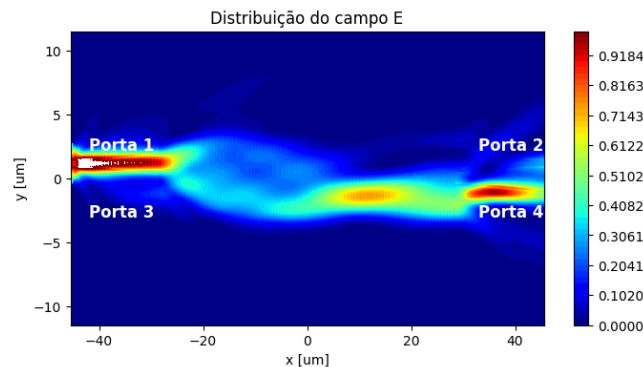


Figura 14 - Perfil de campo elétrico em escala linear via varFDTD - modo TM.

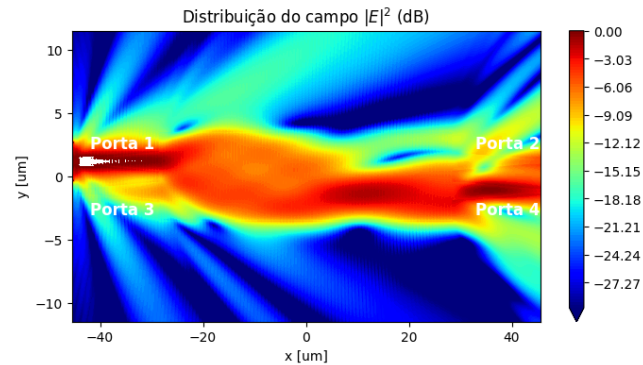


Figura 15 - Perfil de campo elétrico em escala logarítmica via varFDTD - modo TM.

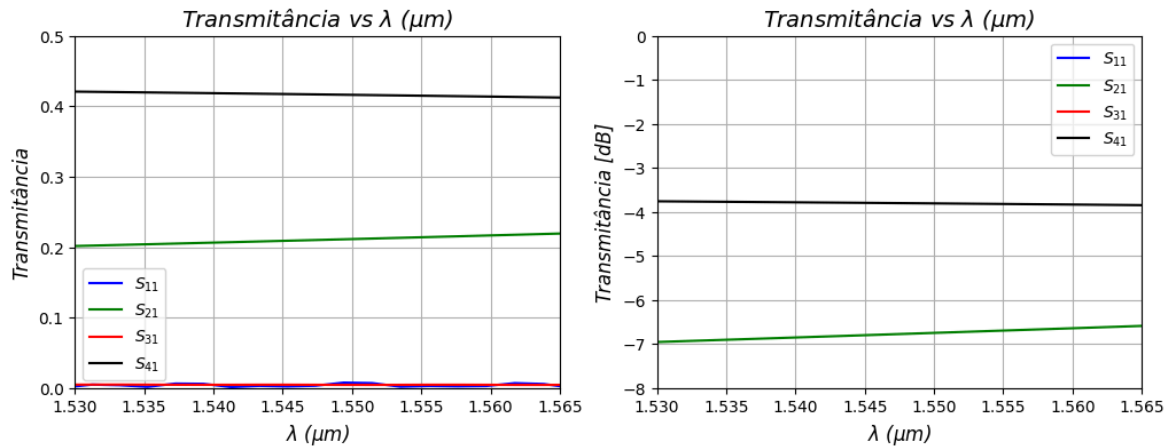


Figura 16 - Transmitância em função do comprimento de onda - modo TM.

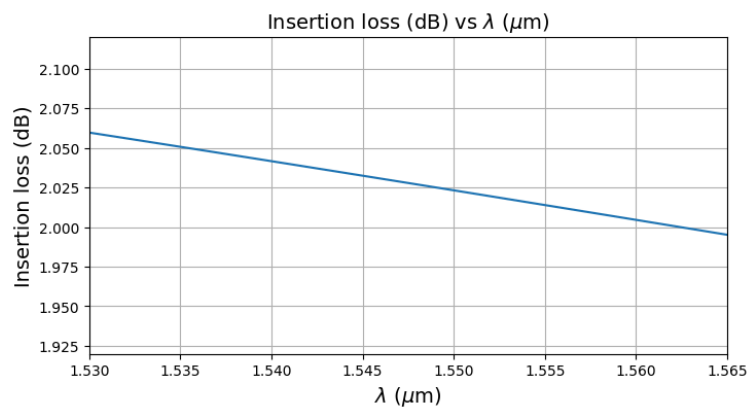


Figura 17 - Perda de inserção - modo TM.

- Para excitação TM há discrepância tanto na formação das imagens como na transmitância. Note que não há a formação de duas imagens, isso ocorre pois as equações utilizadas são voltadas para excitação TE, sem suporte à excitação TM.

### 2.3. Simulação via FDTD.

- A mesma estrutura é simulada, dessa vez utilizando o FDTD como *solver*. Para excitação TE, é utilizada a condição de fronteira do tipo “Symmetric” para a metade inferior do eixo z. Os perfis de campo elétrico, transmitância e perda de inserção são ilustrados nas Figuras 18, 19, 20 e 21, respectivamente.

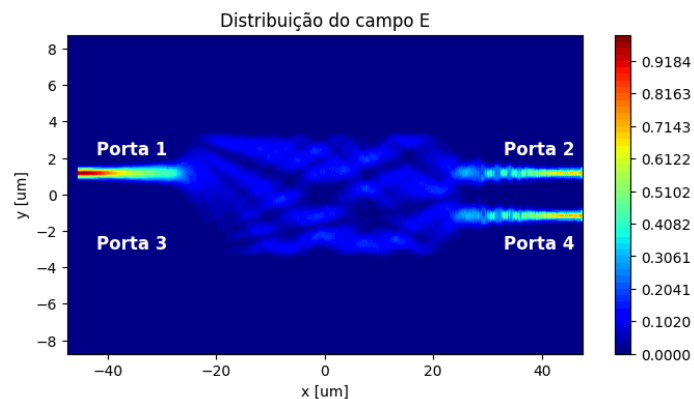




Figura 18 - Perfil de campo elétrico em escala linear via FDTD.

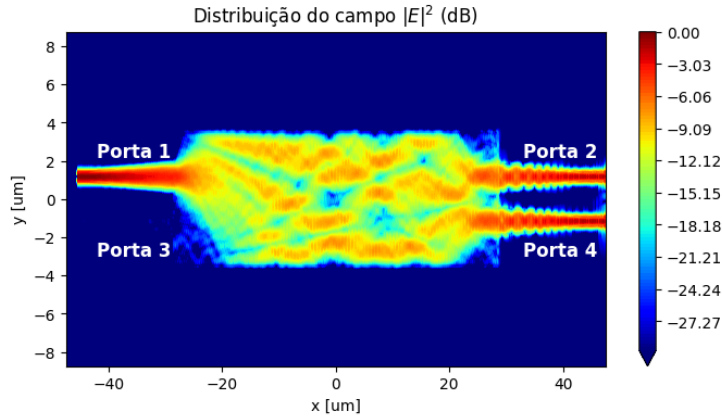


Figura 19 - Perfil de campo elétrico em escala logarítmica via FDTD.

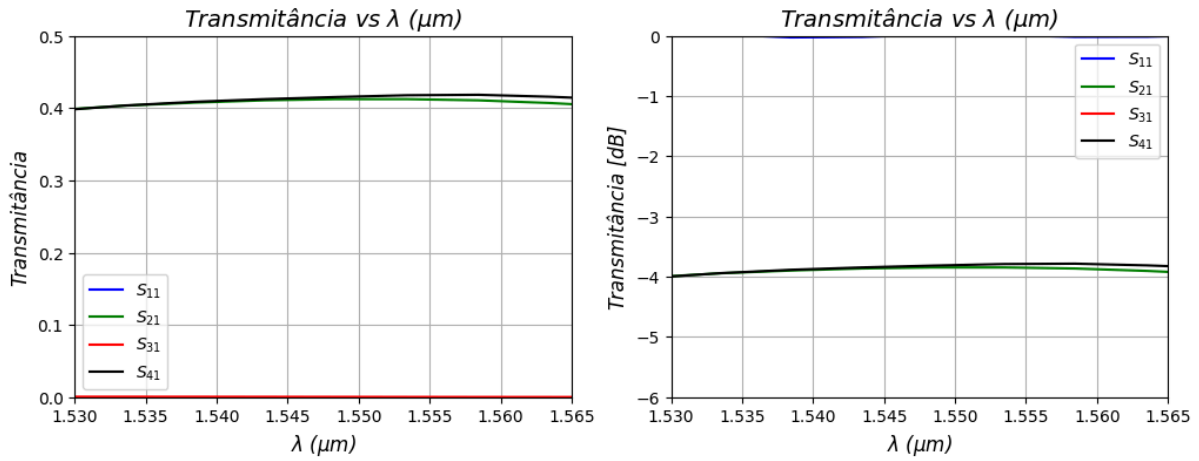


Figura 20 - Transmitância em função do comprimento de onda.

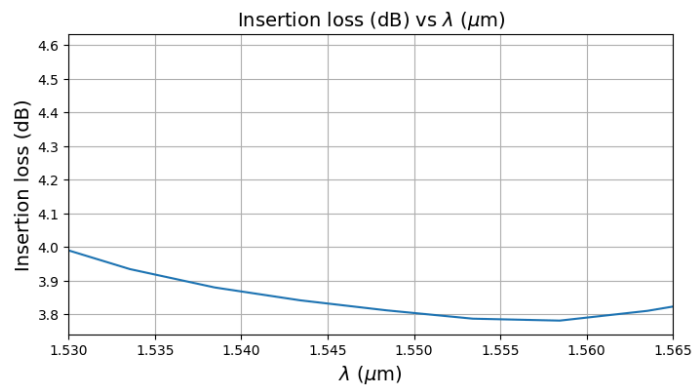


Figura 21 - Perda de inserção.

- Para  $\lambda = 1550 \text{ nm}$  nota-se uma transmitância igual a 0,41, aproximadamente. Para mesmo  $\lambda$  a perda de inserção é aproximadamente igual a 3,80 dB.
- Os valores observados possuem uma certa discrepância comparado aos resultados obtidos nas simulações via EME e varFDTD.
- É possível dizer que o FDTD possui precisão superior aos anteriores, visto que basicamente não há muitas aproximações e se baseia no método das

diferenças finitas. Apesar de possuir maior precisão, requer maior poder de processamento, podendo demorar até 7 vezes mais que simulações feitas com EME.

#### 2.4. Simulação via INTERCONNECT.

- Considerando a excitação TE, foram obtidas as transmitâncias para as portas 2, 3 e 4, levando por base a simulação feita com *solver* EME e FDTD.

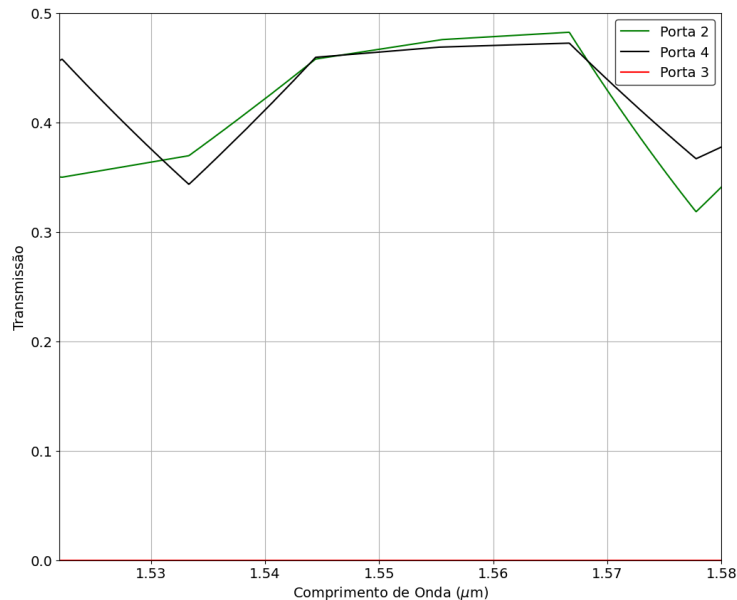


Figura 22 - Transmitância em função do comprimento de onda via *interconnect* - dados EME.

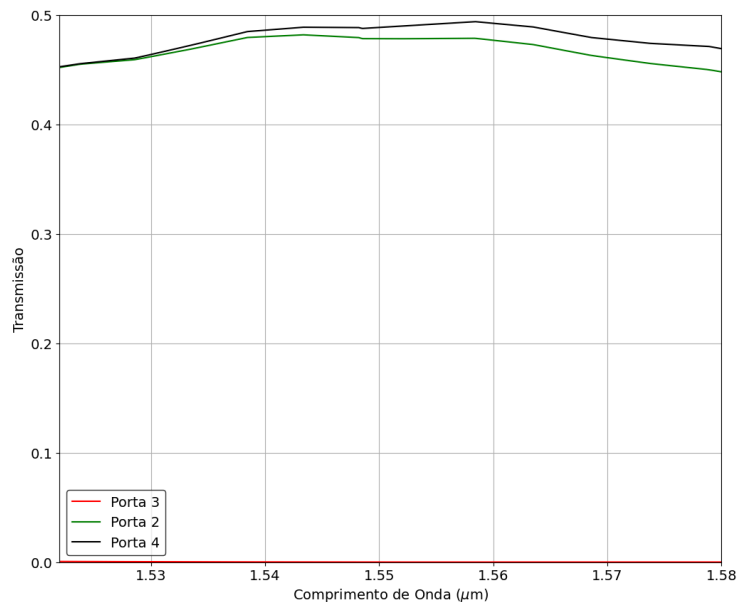


Figura 23 - Transmitância em função do comprimento de onda via *interconnect* - dados FDTD.

- Comparado ao que foi observado em simulações anteriores, aqui a precisão é reduzida, sendo obtidos apenas 10 pontos. Isso ocorre devido a exigência computacional, sendo inviável utilizar grandes quantidades de pontos. Apesar disso, os valores são relativamente próximos quando comparados às simulações anteriores.