



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROJETO DE CIRCUITOS FOTÔNICOS EM SILÍCIO

Professor: Adolfo Herbster

Aluno: Caio Rodrigues Correia de Oliveira

Lista de exercícios: Guia dielétricos retangulares

17 de fevereiro de 2022

Campina grande, PB



Pasta do exercício:

[TEEE-2021.1/Subject Exercises/Exercício 03 \(Github.com\)](https://github.com/TEEE-2021.1/Subject-Exercises/Exercício-03)

1. Considere um guia retangular tipo *buried* similar ao da estrutura ilustrada na Figura 1. O índice do núcleo é $n_1 = 1,5$, enquanto as regiões horizontais laterais possuem índice $n_4 = n_5 = 1.49$, e as regiões do topo e borda possuem índice $n_3 = n_2 = 1.495$. As dimensões do guia são $a = 10 \mu\text{m}$ e $b = 5 \mu\text{m}$. Se um sinal óptico de comprimento de onda $\lambda = 1 \mu\text{m}$ no vácuo é propagado no guiam qual polarização apresentará maior valor de beta para os modos fundamentais, E_x ou E_y ?

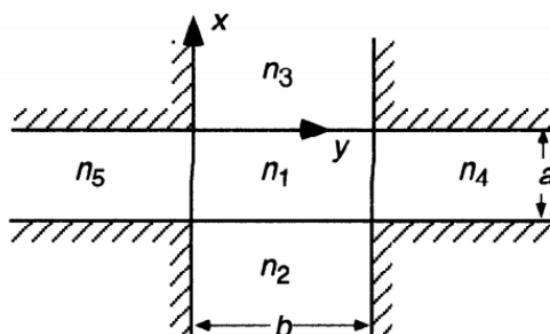
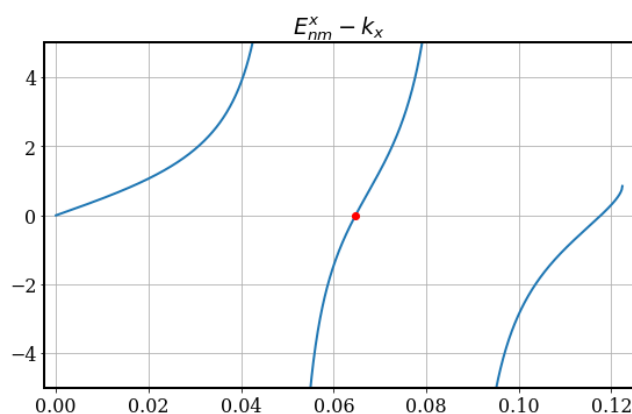
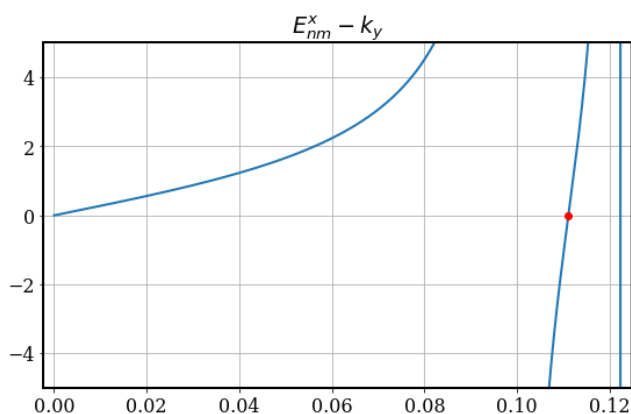


Figura 1 - Problema 1.

Com base no método de marcatili, obtêm-se os seguintes pares de gráficos, um par para o modo E_x e outro para o modo E_y



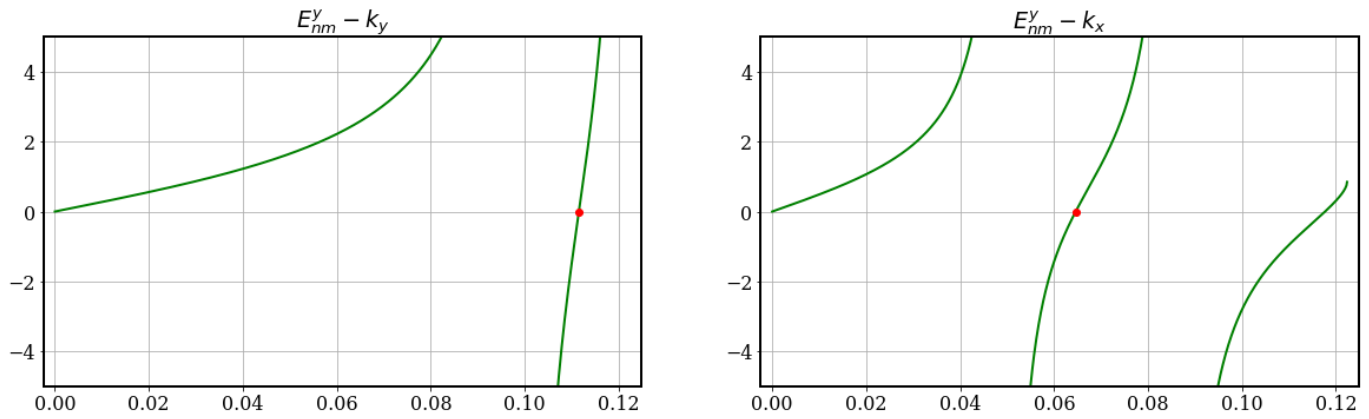


Figura 1 – Gráficos (Lhs-Rhs) $\times (k_x \cdot k_0)$ e (Lhs-Rhs) $\times (k_y \cdot k_0)$

Devido à minuciosidade da localização das soluções nos gráficos, optou-se pelo método numérico, assim obtendo

	K_x	K_y	Beta
Modo E_x	406621,06	698246,43	9390077,25
Modo E_y	405878,77	700931,64	9389909,31

Assim, concluindo que a polarização E_x possui o maior beta.

2. Considere um guia retangular ilustrado na Figura 2 que será utilizado para conectar dois chips de alta velocidade. Qual o comprimento de onda de corte do modo de mais baixa ordem? Utilize o método de Mercatili.

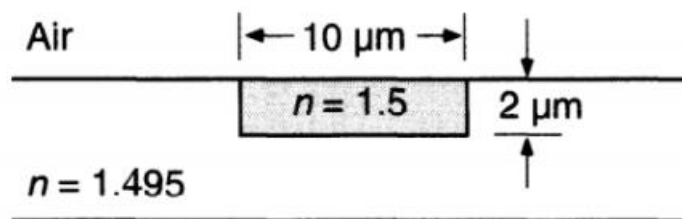
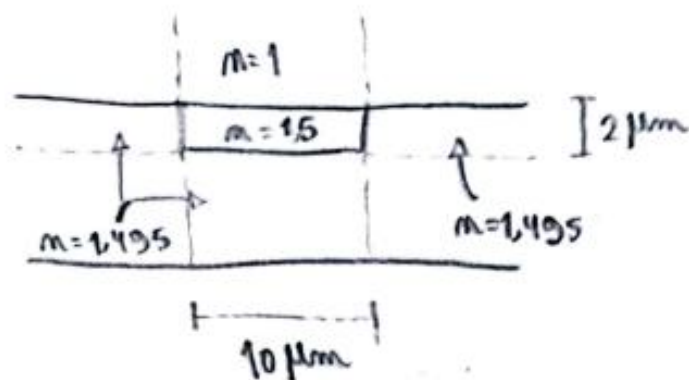
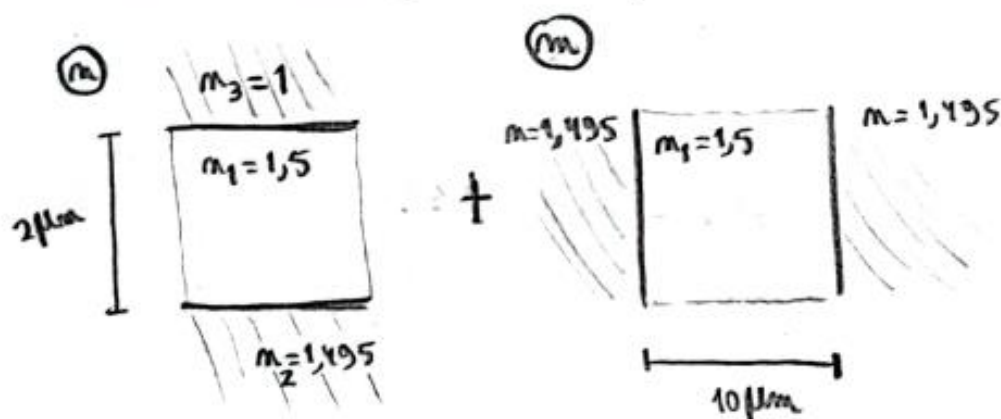


Figura 2 - Problema 2 e Problema 3.



Usando o método de Marcaltili, pode-se calcular separadamente as frequências de corte para os casos de $E_m^x(TM)$, $E_m^x(TE)$, $E_m^y(TM)$ e $E_m^y(TE)$, e assim determinar qual o modo de menor ordem, e seu comprimento de onda de corte:



Sabendo que $V_c^m = m\pi + \arctan(p_c \sqrt{\delta})$, conclui-se que para o guia vertical (m), $\delta = 0$, então $V_c^0 = 0 \Rightarrow f_c^0 = 0$.

Dessa forma, se mostra somente necessário calcular as frequências de corte para E_m^x e E_m^y

Sabe-se que $V = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot a \cdot \sqrt{m_f^2 - m_s^2}$, logo:

$$\lambda_c^m = \frac{4\pi \cdot a \cdot \sqrt{m_f^2 - m_s^2}}{m\pi + \arctan(p_c \sqrt{b})}$$

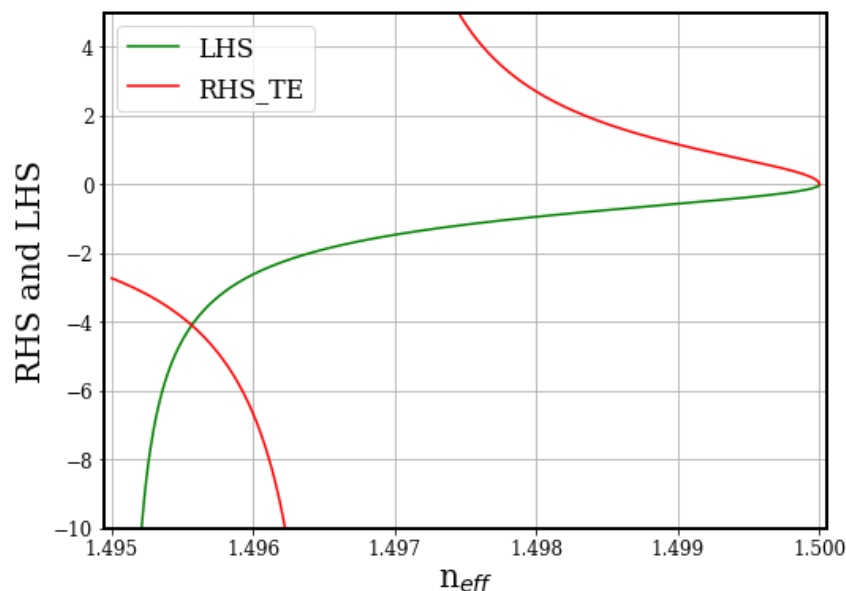
para E_x no guia horizontal \odot , $p_c = \frac{m_f^2}{m_c^2} \Rightarrow \lambda_c^0 \approx 1,0104 \cdot 10^{-6} \text{ m}$

para E_y no guia horizontal \odot , $p_c = 1 \Rightarrow \lambda_c^0 \approx 1,0525 \cdot 10^{-6} \text{ m}$

Conclui-se que E_{11}^y é o modo de mais baixa ordem
com $\lambda_c^0 \approx 1,0525 \mu\text{m}$

3. Considerando ainda o guia ilustrado na Figura 2, determine a partir do método do índice efetivo o valor de β para o comprimento de onda $\lambda = 0,8 \mu\text{m}$.

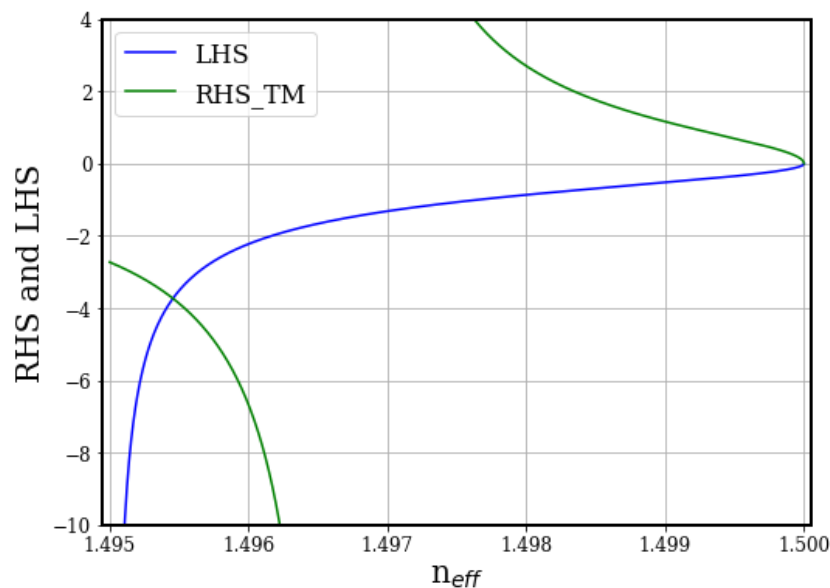
Analisando primeiramente no modo E_y , no slab formado por $n_3/n_1/n_2$ (modo TE) resgata-se seu índice efetivo graficamente abaixo, com valor de aproximadamente $n_{\text{eff}} = 1.49562$



Utilizando o slab formado por $n_5/n_{\text{eff}}/n_4$, resgata-se seu índice efetivo e sua constante de propagação beta

	beta	neff
TM		
0	1.174499e+07	1.495418

Analisando agora no modo E_x , no slab formado $n_3/n_1/n_2$ (modo TM) resgata-se seu índice efetivo graficamente abaixo, com o valor de aproximadamente $n_{\text{eff}} = 1.49545$



Utilizando o slab formado por $n_5/n_{\text{eff}}/n_4$, resgata-se seu índice efetivo e sua constante de propagação beta

	beta	neff
TE		
0	1.174386e+07	1.495275

4. Considere o guia simétrico ilustrado na Figura 3. O núcleo apresenta um índice de refração $n_1 = 1,5$ e o índice da região circundante é $n_2 = 1,499$. As dimensões do guia são $a = 5 \mu\text{m}$ e $b = 10 \mu\text{m}$. Determine o índice efetivo e a intensidade das componentes do modo $E_{x_{12}}$ para o comprimento de onda $\lambda = 0,4 \mu\text{m}$.

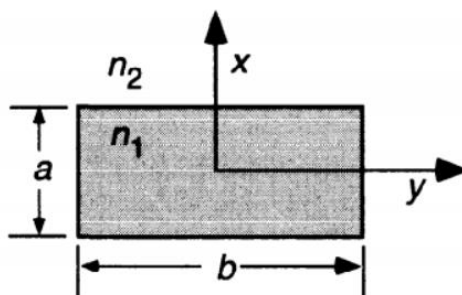


Figura 3 - Problema 4.

Utilizando a princípio o método do índice efetivo para determinar n_{eff} , analisa-se o slab formado por $n_2/n_1/n_2$, obtendo:

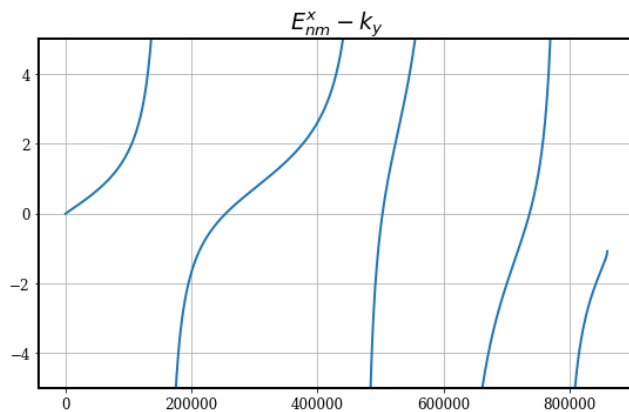
	beta	neff
TE		
0	2.355815e+07	1.499758

E por conseguinte, analisa-se o slab $n_2/n_{\text{eff}}/n_2$, obtendo:

	beta	neff
TM		
0	2.355685e+07	1.499676
1	2.355311e+07	1.499438

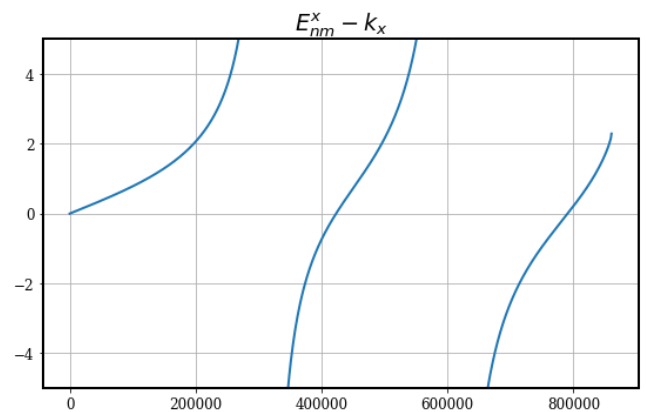
Utilizaremos o índice efetivo da solução TE_1 , assim $n_{\text{eff}} = 1.499438$

Utilizando o método gráfico e numérico, extrapola-se os seguintes valores para k_x e k_y



$K_y = \{ 254169.5, 500000, 725000 \}$

$K_x = \{ 422943.8, 790000 \}$



Assim, para E_{12}^x , $K_x = 422943.8$, $K_y = 500000$

Calculando γ_2 , γ_3 , γ_4 , γ_5 , ϕ_x e ϕ_y a partir de K_x e K_y , temos:

```
gamma_2 = 749060.8333193765
gamma_3 = 749060.8333193765
gamma_4 = 699981.1354397765
gamma_5 = 699981.1354397765
```

```
phix = -0.513436786300424
phiy = -0.9505340942601401
```

Assim, as componentes do modo E_{12}^x são, para cada região:

Região 1: $\text{Sen}(422943.8 \cdot x - 0.51343) \cdot \text{Cos}(500000 \cdot y - 0.95053)$

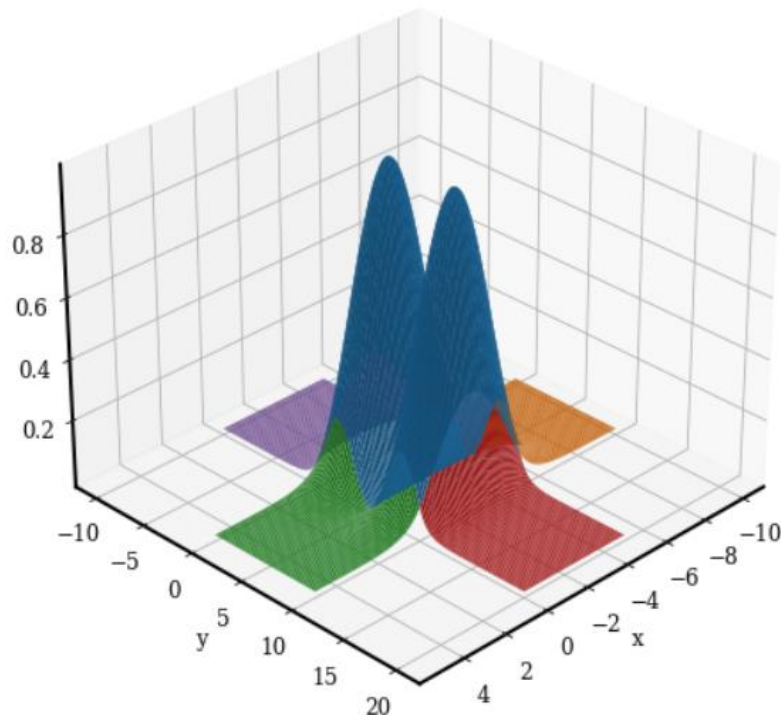
Região 2: $\text{Cos}(500000 \cdot y - 0.95053) \cdot \exp(749060 \cdot (x + 5 \cdot 10^{-6}))$

Região 3: $\text{Cos}(500000 \cdot y - 0.95053) \cdot \exp(-749060 \cdot x)$

Região 4: $\text{Sin}(422943.8 \cdot x - 0.51343) \cdot \exp(-699981.1 \cdot (y - 10 \cdot 10^{-6}))$

Região 5: $\text{Sin}(422943.8 \cdot x - 0.51343) \cdot \exp(699981.1 \cdot y)$

	$\text{Cos}(K_y \cdot y + \phi_y) \cdot \exp(-\gamma_3 \cdot x)$	
$\text{Sin}(K_x \cdot x + \phi_x) \cdot \exp(\gamma_5 \cdot y)$	$\text{Sin}(K_x \cdot x + \phi_x) \cdot \text{Cos}(K_y \cdot y + \phi_y)$	$\text{Sin}(K_x \cdot x + \phi_x) \cdot \exp(-\gamma_4 \cdot (y - b))$
	$\text{Cos}(K_y \cdot y + \phi_y) \cdot \exp(\gamma_2 \cdot (x + a))$	



5. Considere o guia simétrico quadrado ilustrado na Figura 4, cujo índice de refração do núcleo é $n_1 = 1,5$ e o índice da casca em torno do núcleo é $n = 1.499$. Como o guia é simétrico, ele deve guiar pelo menos um modo. Para o comprimento de onda $\lambda = 1,3 \mu\text{m}$, determine a distribuição

de campo do modo guiado de mais baixa ordem.

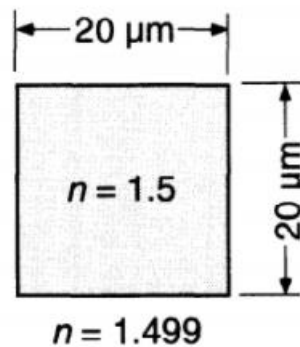
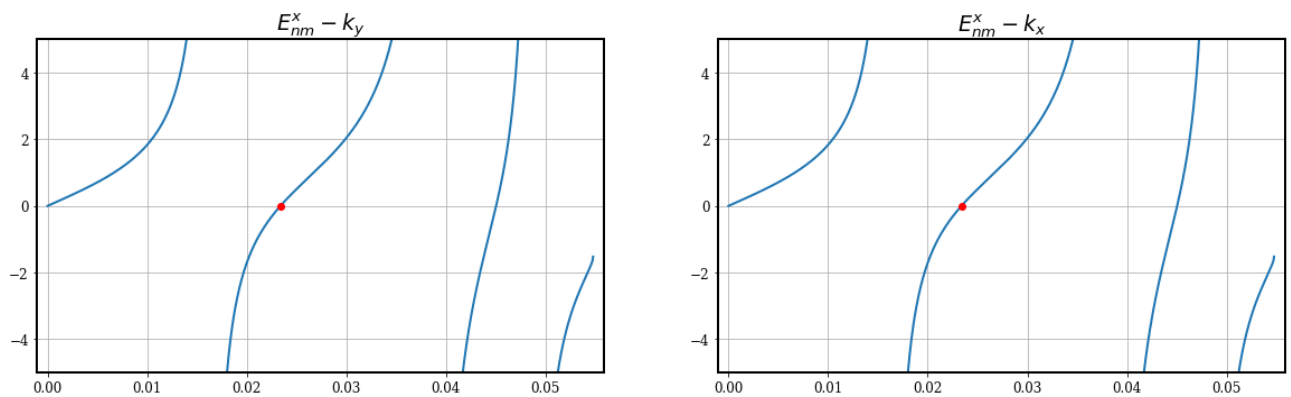


Figura 4 - Problema 5.

É argumentável que, pelo fato do guia ser simétrico tanto no eixo vertical quanto no horizontal, os valores característicos para E^x e E^y são iguais. Portanto, por preferência singular, tratar-se-á de resolver para E^x



Assim, extrai-se $K_x = 113015.46$ e $K_y = 112979.16$ (soluções E_{11}^x)

```
gamma_2 = 239341.13110975985
gamma_3 = 239341.13110975985
gamma_4 = 239358.26838779825
gamma_5 = 239358.26838779825
```

```
phix = -0.44064169100342954
phiy = -1.1297915362964477
```

Assim, as componentes do modo E_{11}^x são, para cada região:

Região 1: $\text{Cos}(113015.46 \cdot x - 0.44064) \cdot \text{Cos}(112979.16 \cdot y - 0.95053)$

Região 2: $\text{Cos}(112979.16 \cdot y - 1.12979) \cdot \exp(239341.13 \cdot (x + 20 \cdot 10^{-6}))$

Região 3: $\text{Cos}(112979.16 \cdot y - 1.12979) \cdot \exp(-239341.13 \cdot x)$

Região 4: $\text{Cos}(113015.46 \cdot x - 0.44064) \cdot \exp(-239358.27 \cdot (y - 20 \cdot 10^{-6}))$

Região 5: $\text{Cos}(113015.46 \cdot x - 0.44064) \cdot \exp(239358.27 \cdot y)$

6. Utilize o método do índice efetivo para determinar o modo propagante (ou modos propagantes) no guia retangular tipo ridge ilustrado na Figura 5. Assuma que o campo está polarizado na direção y e que o comprimento de onda é $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$. Em seguida, calcule o confinamento do modo encontrado.

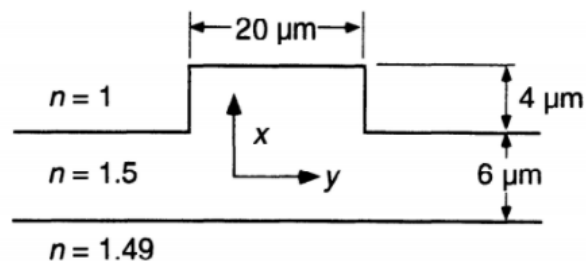


Figura 5 - Problema 6.

Podemos transformar o guia retangular acima em 3 slabs horizontais como está descrito na imagem abaixo (slab laranja, slab vermelho, slab amarelo)

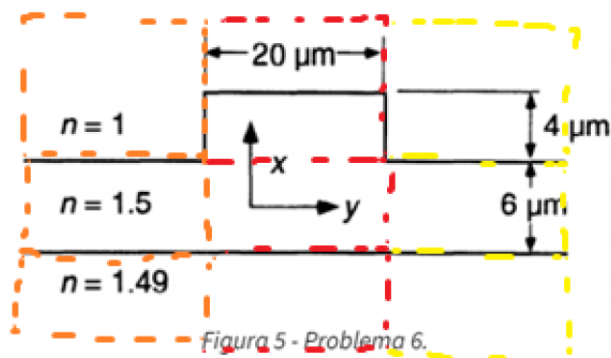


Figura 5 - Problema 6.

Como o campo está polarizado na direção y , os três slabs estão admitindo modos TE, assim, calculando os n_{eff} dos slabs

Laranja e amarelo

	n_{eff}
TE	
0	1.496538

Vermelho

	n_{eff}
TE	
0	1.498497

Calculando o n_{eff} resultante do slab equivalente:

	n_{eff}
TM	
0	1.498132
1	1.497097

Assim possuindo os fatores de confinamento $\Gamma_0 = 0.96172$ e $\Gamma_1 = 0.81971$