ANÁLISE DE ACOPLADORES COMPACTOS ENTRE GUIAS DE ONDAS DIELÉTRICAS E GUIAS DE ONDAS PLASMÔNICOS

A. C. Tsujiguchi - Duarte[1], C. E. Rubio - Mercedes[2].

[1] Bolsista do PIBIC/UEMS, Curso de Matemática da UEMS/Dourados.
[2] Professor do curso de Matemática UEMS/Dourados - MS.

Resumo

Neste trabalho realizamos uma análise teórica de acoplamento de ondas eletromagnéticas em guias plasmônicos através do Método dos Elementos Finitos (FEM-*Finite Element Method*). Basicamente, mostramos o comportamento do campo magnético em guias metálicos. Utilizamos um código robusto baseado no FEM bidimensionais (2D), o qual discretiza a equação de onda em coordenadas retangulares.
Palavras-chaves: Método de elementos finitos. Simulação computacional. Campos Próximos.

Abstract

In this work, a coupling theoretical analysis of electromagnetic waves in plasmonic waveguides is made by the Finite Element Methods (FEM). Basically, we show the behavior of magnetic fields in metallic waveguide. We use a robust code based in the bidimensional FEM (2D-FEM), wish discretize the wave equations in rectangular coordinates.
Keywords: Method of finite element. Computational simulation. Near-field.

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a pesquisa em dispositivos nanofotônicos tem aumentado. Isto se justifica pela necessidade da miniaturização dos componentes optoeletrônicos de forma que a manipulação de luz seja totalmente óptica [6].

Neste contexto, os métodos numéricos cada vez mais robustos e versáteis são necessários de forma que possamos simular os fenômenos físicos envolvidos, numa etapa de pré-projeto no desenho de dispositivos fotônicos na ordem dos nanômetros.

Neste trabalho analisamos numericamente acopladores compactos de guias de onda plasmônicos, através do método numérico dos FEMs. Estudamos o comportamento dos acopladores nanométricos baseados em metais e analisar o guiamento de luz nestas estruturas. Calculamos a distribuição de campo eletromagnético nas diferentes estruturas analisadas.

Para discretizar o domínio computacional usamos um programa comercial chamado GiD (*Geometry and Data*). O GID é uma interface gráfica para a geração de malhas.

2. METODOLOGIA

Primeiramente, simulamos uma estrutura curva em forma de "U", onde foi considerado um guia de ar com nanofios cilíndricos metálicos numa configuração periódica e o material utilizado foi a prata. Dispositivos baseados em metais sejam como microfitas, aberturas ou estruturas periódicas tem atraído à atenção de pesquisadores devido as suas aplicações no processamento de sinais no domínio óptico. Eles são fabricados usando materiais semicondutores dentre eles, silício, arseneto de gálio ou qualquer outro material transparente na faixa de freqüências ópticas e metais tais como ouro, prata, cobre ou alumínio. [3]

Compreender a forma de limitar e manipular luz sobre um comprimento de onda é fundamental para avançar com base em nanoescala ópticas, espectroscopia e optoelectrônica. Segundos os autores foram-se obtidos resultados significantes com buracos em filmes de metal e matrizes nanopartículas de metal [3].

A segunda simulação analisada trata-se da propagação em estruturas periódicas de cilindros metálicos formados um guia metálico, onde observa-se a transmissão de ondas eletromagnéticas nos guias.

As oscilações de ondas eletromagnéticas ou SPP (*Surface Plasmon Polariton*) são campos que se propagam ao longo das superfícies metálicas.

Estas estruturas metálicas têm atraído grande atenção nos últimos dez anos devido a seu potencial uso em aplicações ópticas. Em contraste com o guia de onda convencionais dielétricos, podem ser dispositivos para propagar ondas eletromagnéticas na escala nanométrica. Essas superfícies metálicas podem ser utilizadas para o transporte de energia abaixo do limite de difração [4].

Como último exemplo, simulamos o acoplamento de campos próximos de uma lente de focamento em guias de onda dielétricos [4].

3. RESULTADOS NUMÉRICOS

Simulamos vários exemplos numéricos, os quais foram obtidos da literatura [1-5]. Estas estruturas têm atraído bastante atenção nos últimos dez anos devido ao seu potencial usado para comprimentos menores que o comprimento de onda ótica convencional e as suas aplicações no processamento de sinais no domínio totalmente óptico.

3.1 Guias curvos metálicos

Dispositivos baseados em metais sejam como microfitas, aberturas ou estruturas periódicas tem atraído á atenção de pesquisadores devido as suas aplicações no processamento de sinais no domínio óptico. Eles são fabricados misturando materiais semicondutores dentre eles, silício, arseneto de gálio ou qualquer outro material transparente na faixa de freqüências ópticas e metais tais como ouro, prata, cobre ou alumínio [3].

A utilização de metais é devido à característica de possuírem índices de refração menores que o ar (η<1) em freqüências ópticas.

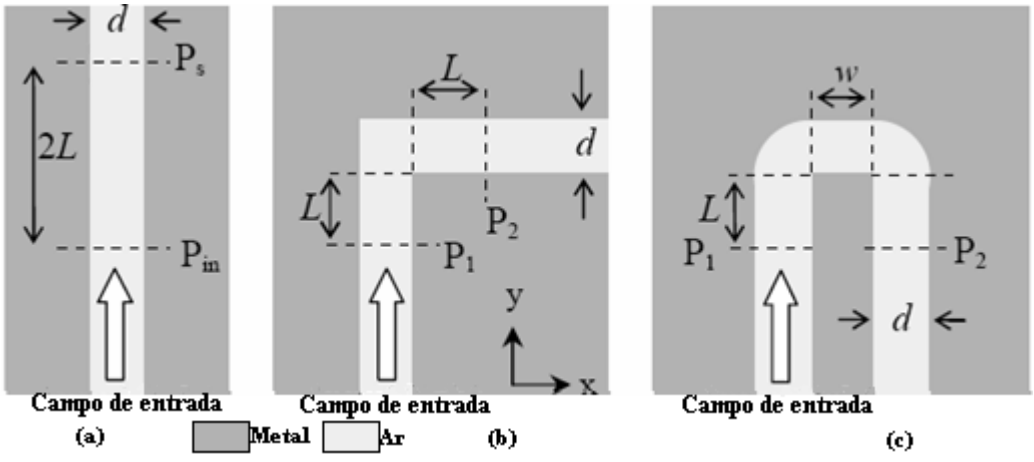

Fig. 1: Diagrama do sistema de guias metálicos: reto, ângulo reto e estrutura em forma de U.

A Figura 1 mostra estruturas de guias metálicos, trata-se de estruturas bidimensionais, uma vez que apresenta invariância com respeito uma coordenada. O campo é transversal magnético (TM), ou seja, o campo magnético é transversal ao eixo de propagação.

Para a primeira simulação consideramos um guia curvo, como o da Figura 1(c). A geometria que constitui o domínio computacional é apresentada na Figura 2.

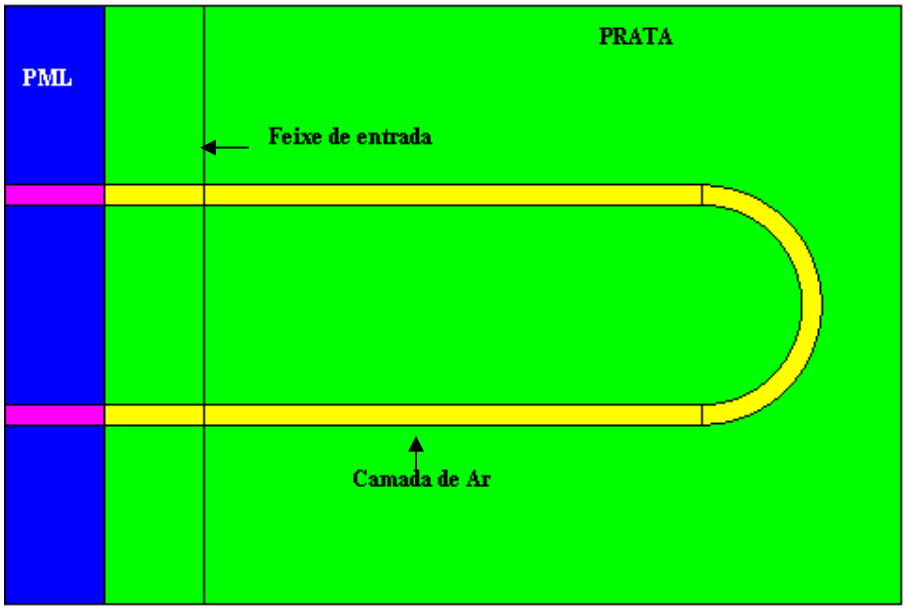

Fig. 2: Geometria da malha em formato U.

Na Figura 2 mostramos a geometria de um guia curvo de ar cercado por metal com largura do guia de onda de 100 μm, raio de curvatura de 200 μm e comprimento de onda da luz de 1,55 μm.

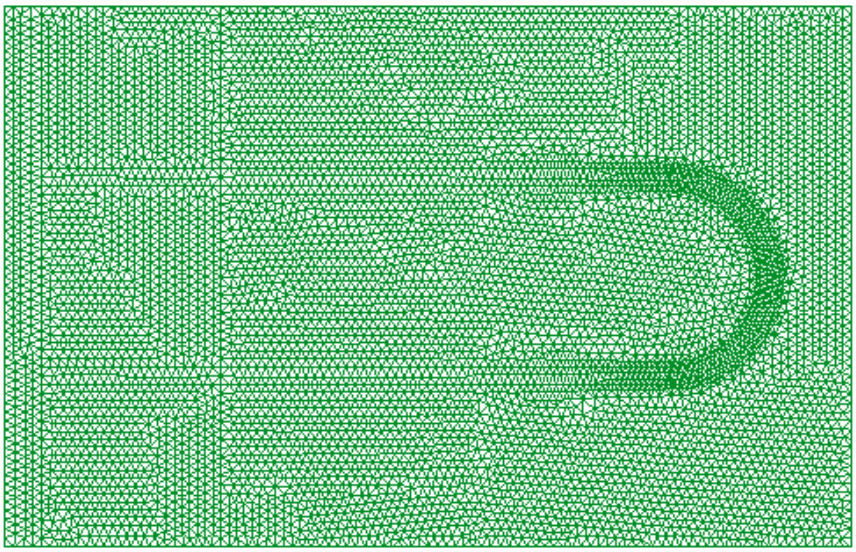

Fig. 3: Malha do guia de onda curvo em formato U.

Na Figura 3, mostramos a malha da geometria dada na Figura 2. Esta malha contém: 13.292 elementos triangulares e 26.908 nós (pontos). O índice de refração do metal é dado por $n = 0.0858 - 4.167i$ para um comprimento de onda 1.55 μm.

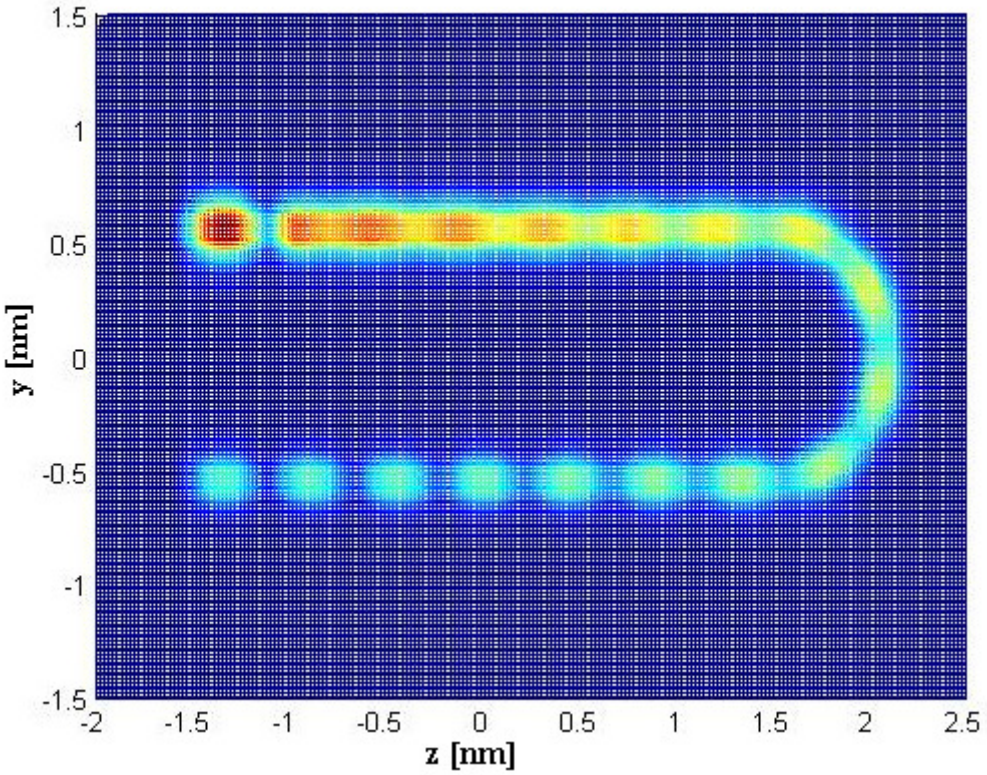

Fig. 4: Distribuição espacial no campo magnético.

Resolve-se numericamente a equação de onda pelo FEM. Calculamos a distribuição do campo eletromagnético, o qual é mostrado na Figura 4. Estes resultados estão em estrita concordância com os resultados da literatura.

3.2 Guias plasmônicos formado por cilindros metálicos

O segundo exemplo trata-se de guias plasmônicos formando Cilindros Metálicos: Guia de ondas plasmônico reto, veja Fig. 5. [4]. O guia de onda analisado é composto por duas correntes de nanocilíndros. Onde os cilindros são compostos por material com características da prata comprimento de onda de 650 nm.

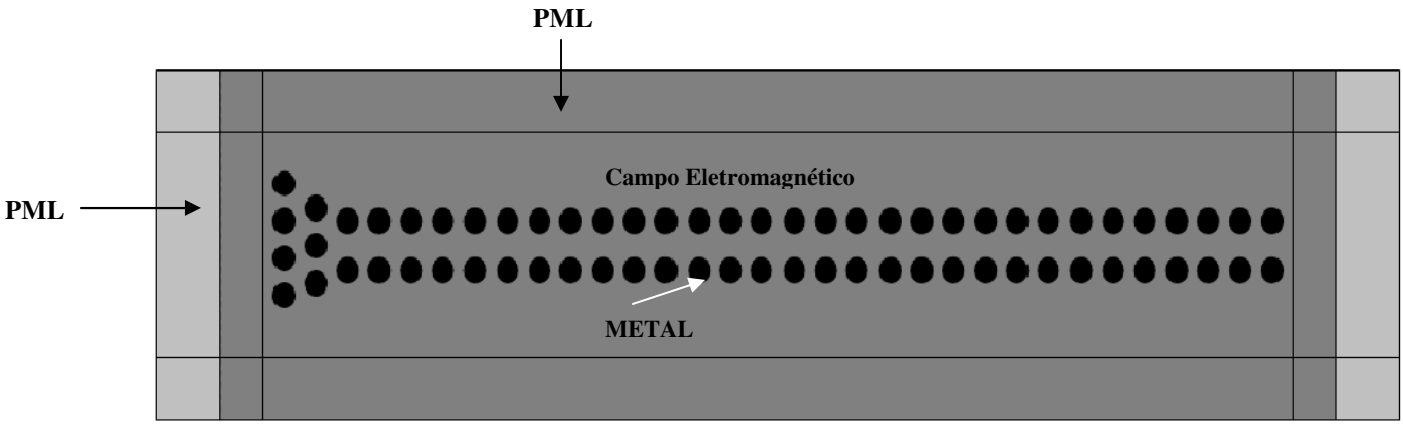

Fig.5: Guia de onda plasmônico reto.

Como em [4], usamos 51 pares de cilindros, formando um total de 109 cilindros, o raio de cada cilindro é de $50\,nm$, e as distâncias entre os centros de cada par de cilindros é de $200\,nm$, enquanto a distâncias de centro a centro dos cilindros adjacentes é de $120\,nm$. Foram usadas PML de 200 nm cercando domínio computacional. Em nossas simulações apenas a metade da estrutura é discretizada, pela sua simetria respeito ao eixo z. Isto reduz o esforço computacional, já que é reduzido o número de incógnitas ruim em 50%.

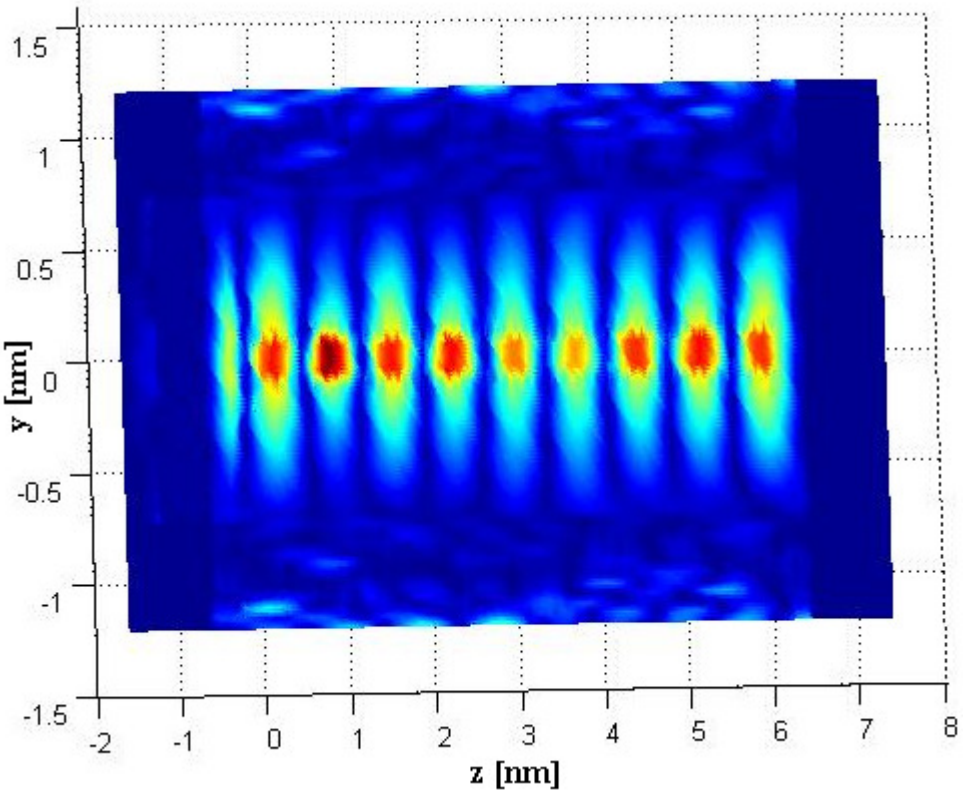

Fig. 6: Distribuição Espacial no Campo eletromagnético no guia plasmônico reto.

Na Figura 6 mostramos o campo eletromagnético, para o guia plasmônico reto da Figura 5. Observamos a propagação dos campos no guia formado pelos cilindros metálicos.

3.3 Y-Divisor

O terceiro exemplo trata-se de um guia plasmônico no formato Y. A estrutura simulada consiste numa geometria que forma um "Y", onde a divisão forma um ângulo de 90° [4]. Neste exemplo constam 16 pares de cilindros em cada canal, sendo a distância entre cada par de cilindro $141\,nm$. Na entrada da estrutura a distância entre os cilindros é de $200\,nm$, e no guia a distância é de apenas $100\,nm$, para que possa reduzir a perda de energia.

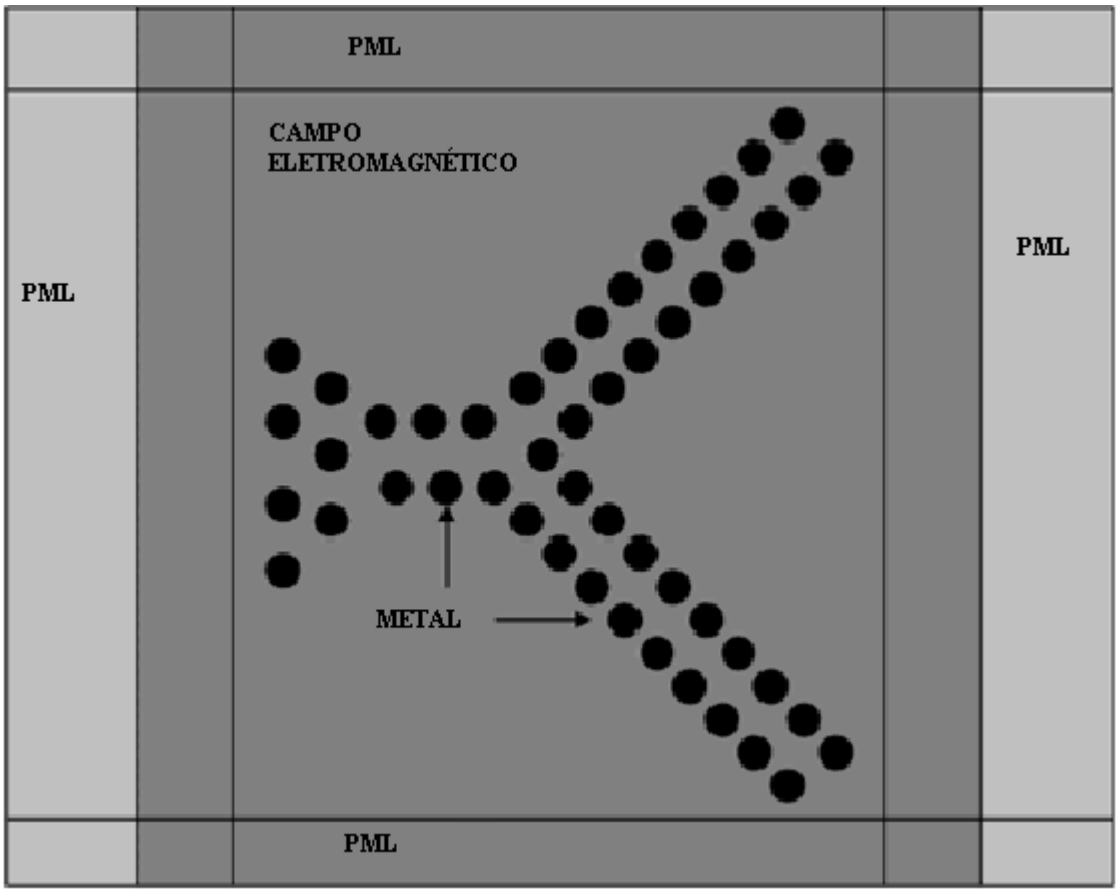

Fig. 7: Guia de onda plasmônico em formato Y.

A Figura 7 mostra a geometria do guia em forma de Y, o comprimento da é de 2,95μm e sua largura possui 1,7 μm no eixo y, o tamanho da PML é de 200nm. O comprimento de onda utilizado foi o mesmo da simulação anterior de $650\ nm$.

Para que as ondas incidentes não interferissem nos braços do guia de onda, temos colocado uma placa metálica na disjunção do guia Y.

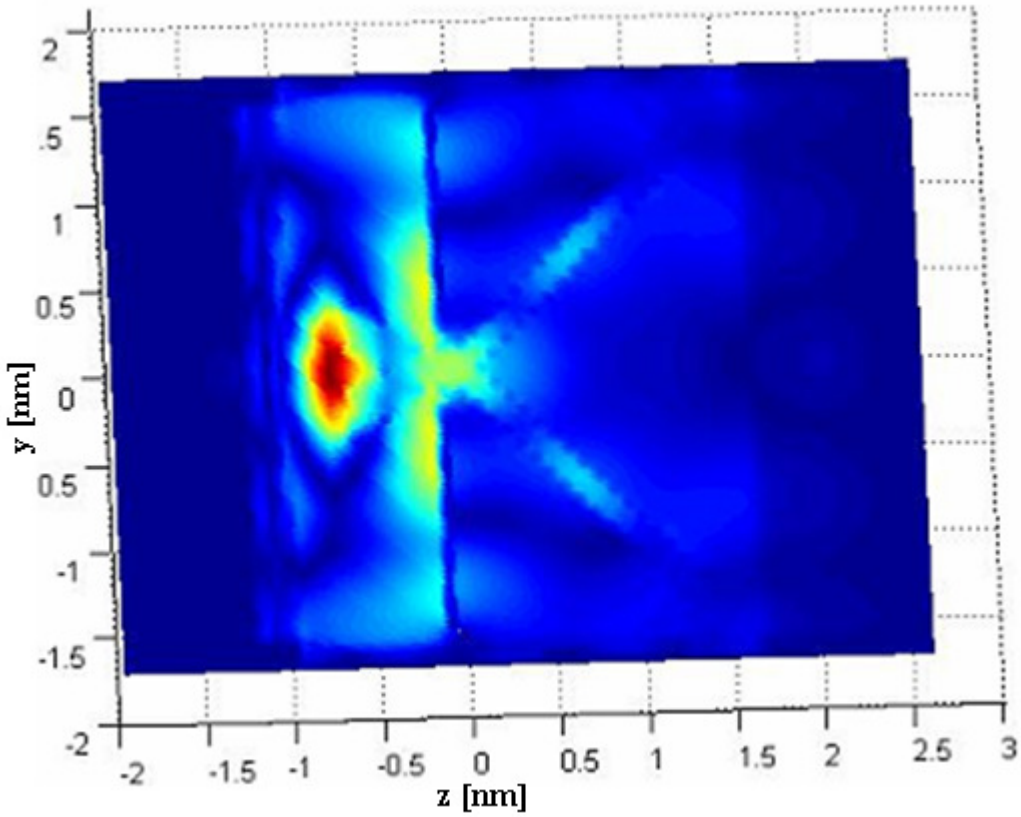

Fig. 8: Distribuição Espacial no Campo eletromagnético com placa metálica.

Na Figura 8 mostramos o campo magnético obtido na estrutura de guia plasmônico em formato Y e com placa metálica. Os parâmetros utilizados foram: índice de refração de $n = 0.0858\text{-}4.167\text{i}$, e o valor do comprimento de onda é de: $\lambda = 650nm$. Na Figura 9, mostramos o campo magnético obtido na estrutura de guia plasmônico em formato Y sem placa metálica. Verificamos que houve melhores resultados quando retirado à placa metálica, pois o acoplamento nos braços do guia é mostrado, como pode ser verificado a partir da Figura 9.

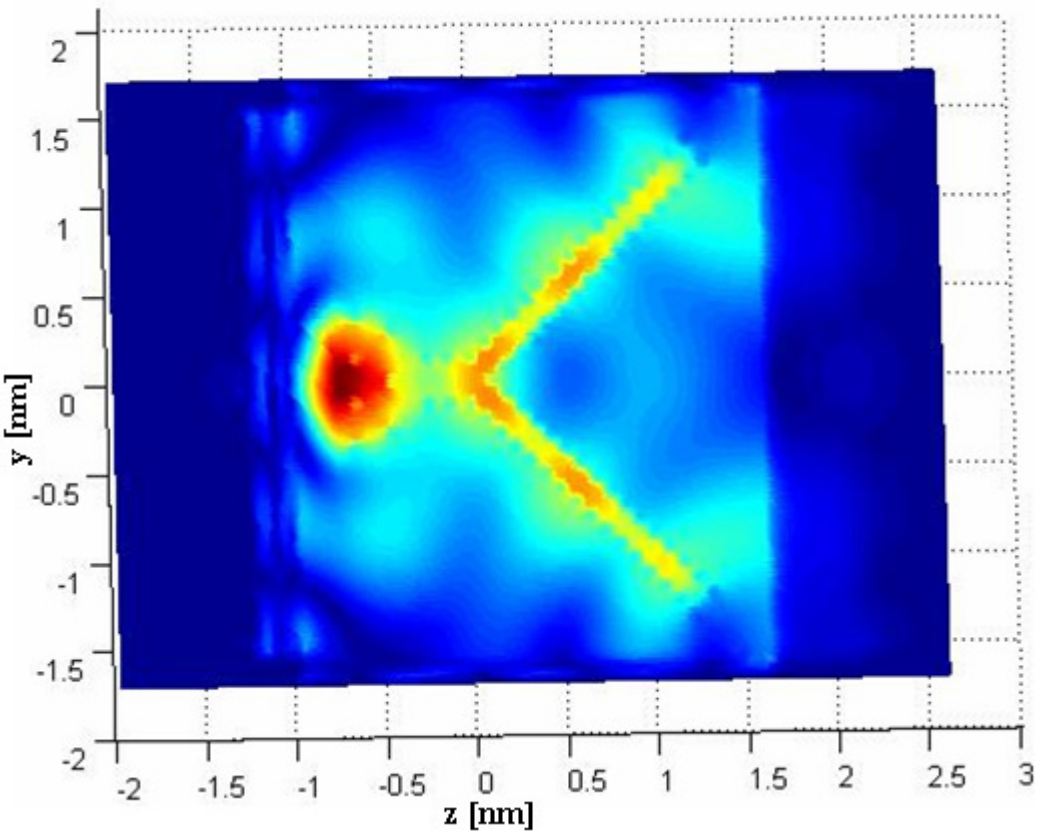

Fig. 9: Distribuição espacial do campo magnético sem placa metálica.

Na Figura 9 foi utilizado os mesmos parâmetros do que na Figura 8, apenas foi retirada a placa metálica, é notável a melhoria, já que houve uma melhor ressonância das SPP. A geometria desta malha possui 8.130 elementos quadráticos e 16.523 nos.

3.4 Lente de focamento plasmônica

O último exemplo consiste no estudo do acoplamento de SPP de uma lente de focamento plasmônica em guias dielétrico de diferentes larguras. A lente plasmônica de focamento é formada por 39 camadas em forma alternada entre ar e metal, sendo a largura das camadas de metal constante de valor $24\,nm$ e a largura das camadas de ar variam em função da distancia no eixo y, ou seja, veja Figura 10, onde a largura da estrutura possui $6.5\,\mu m$ [1].

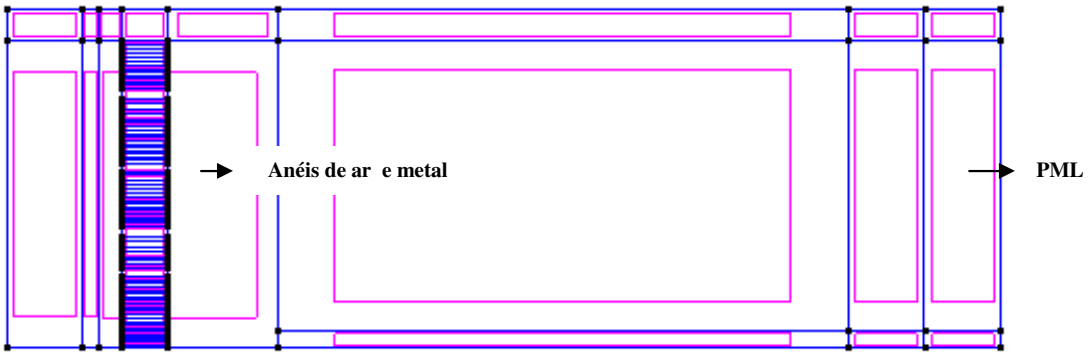

Fig. 10: Geometria da lente plasmônica de focamento.

A Figura 10 mostra a geometria da lente plasmônica de focamento e um guia dielétrico. Na Figura 11 mostramos a malha gerada a partir da geometria dada pela Figura 10, esta malha possui 21.335 elementos quadráticos e 43.122 nós. Foram utilizados os seguintes parâmetros: índice de refração de n = 0.23 -2.17i e comprimento de onda de $\lambda = 0.405\,nm$.

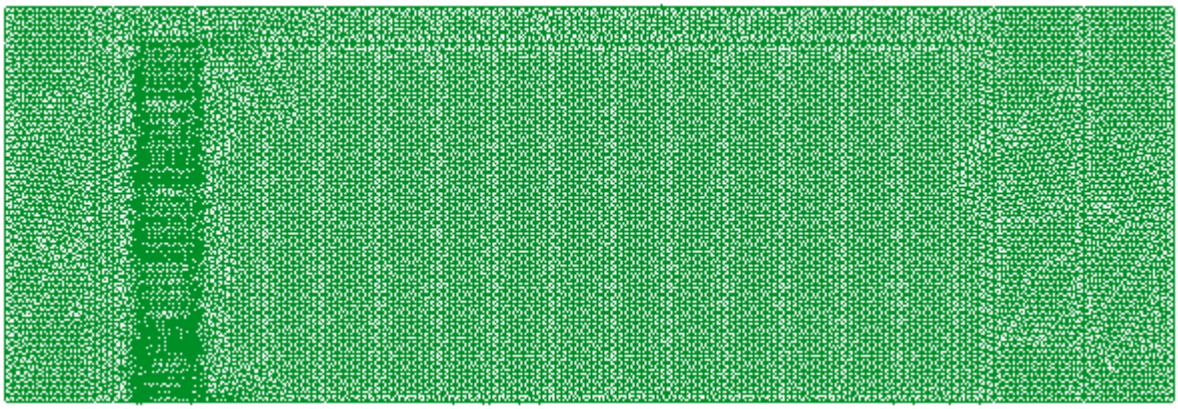
Fig. 11: Malha da Geometria de uma lente plasmônica acoplado a um guia dielétrico.

Na Figura 12 mostramos a distribuição espacial do campo magnético do acoplamento da lente plasmônica num guia dielétrico de largura $0.05\mu m$.

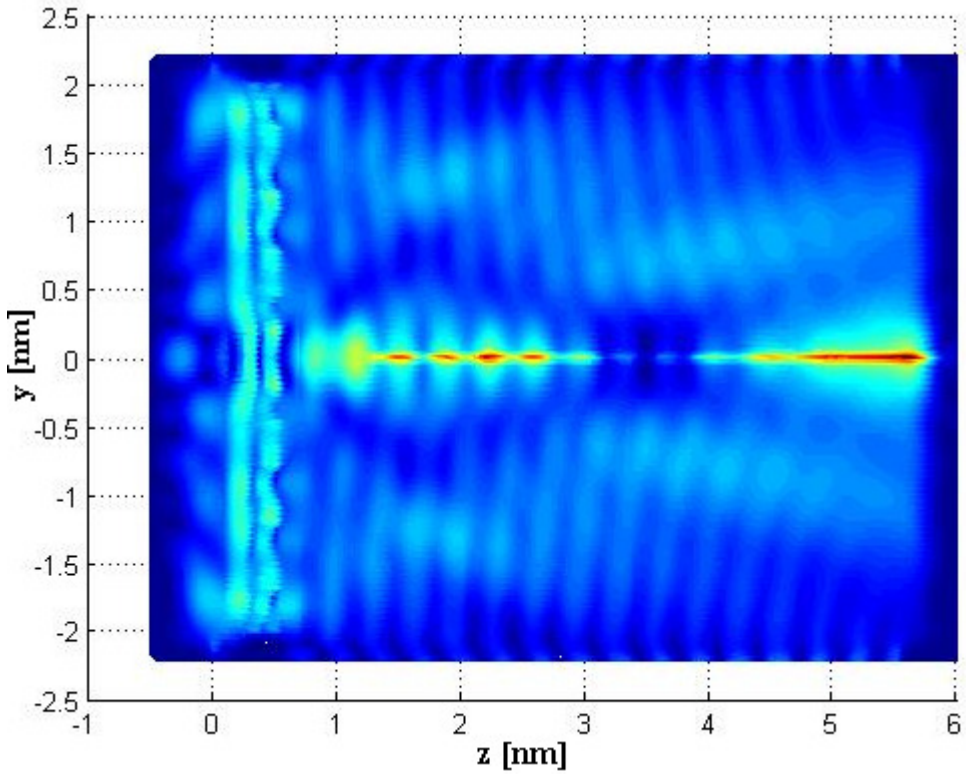

Fig. 12 Distribuição espacial no campo magnético acoplado a um guia de largura $0.05\mu m$.

Na Figura 13 mostramos a distribuição espacial do campo magnético do acoplamento da lente plasmônica num guia dielétrico de largura $0.1\mu m$.

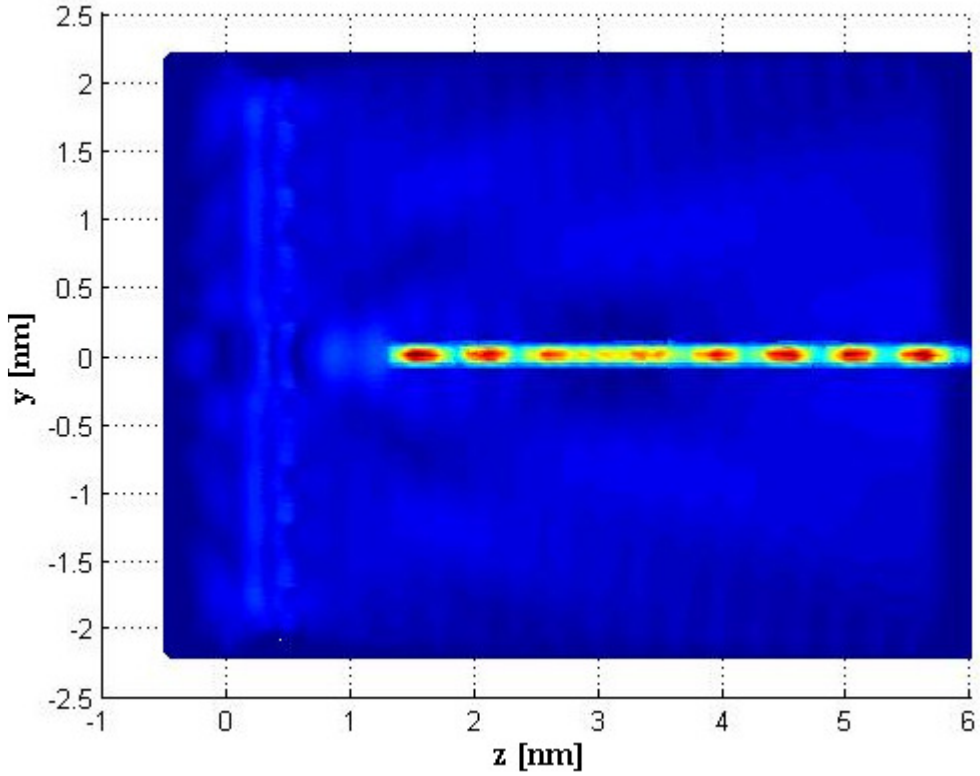

Fig. 13 Distribuição espacial no campo magnético para num guia dielétrico de largura $0.1\mu m$.

Na Figura 14 mostramos a distribuição espacial do campo magnético do acoplamento da lente plasmônica num guia dielétrico de largura $0.2\mu m$.

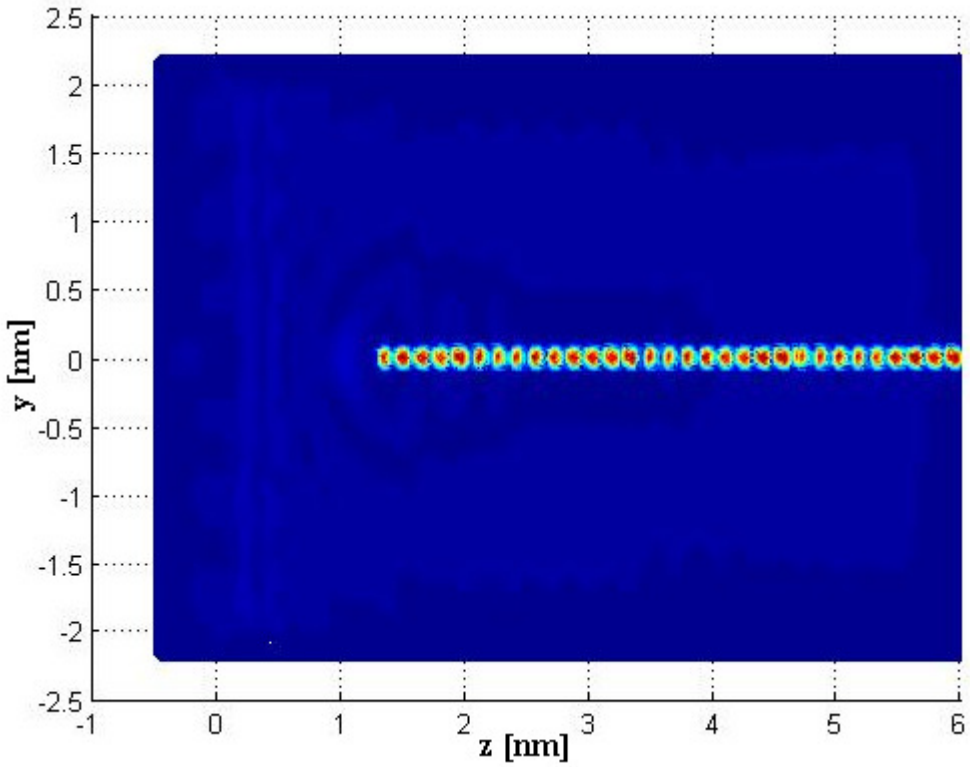

Fig. 14: Distribuição espacial no campo magnético para num guia dielétrico de largura $0.2\mu m$.

4. DISCUSSÃO

Obtivemos resultados satisfatórios e em estrita concordância com literatura estudada. Usamos um processador Pentium 4 com velocidade de processamento 3.2 Ghz e com memória RAM 2 GB, as implementações computacionais foram feitas usando a linguagem de programação FORTRAN e MATLAB o que foi de grande importância pois me ajudou a me familiarizar com tais programas. O programa que utilizei para fazer as simulações foi criado pelo meu orientador.

Temos analisado diversos dispositivos de acopladores e guias de onda baseados com o uso de metais. Estudamos e entendemos o comportamento das SPP em estruturas metálicas. No último exemplo de simulação, obtivemos interessantes resultados, os

quais podem ser discutidos de forma mais detalhada e posteriormente ser submetido para congresso na área de pesquisa.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao suporte financeiro do CNPq (processo número 471658/2007-3), FUNDECT (Processo 23/200.317/2008) e ao Programa PIBIC/UEMS pela bolsa de iniciação científica concedida.

6. Referências Bibliográficas

[1] Rodríguez-Esquerre, V .F; Rêgo, D. F; Santos, T .F; Rubio-Mercedes. C. E.; Pereira. C. A. & Hernández-Figuerosa, H. E. 2009. Analysis and Desing of Subwavelenght Focusing by Cylindrical Lenses.

[2] Rubio-Mercedes, C. E.; Rodríguez-Esquerre, V. F. & Hernández-Figueroa, H. E. 2008. Analysis of Photonic Devices by a Novel Frequency Domain Approach in Cylindrical Coordinates.

[3] Tae, W. L.& Stephen, K. G. 2005. Subwavelenght Light Bending by Metal Slit Structures. **OPTICS EXPRESS**, v. 13, n. 24, p.9652-9659.

[4] Zhan, C. L.; Ren, X. F.; Huang, Y. F.; Duan, K. M & Guo, G. C.2007. FTD Studies of Metallic Cylinder Arrays: Plasmons Waveguide and Y – Splitter. **CHIN. PHYS. LETT**, v. 25, n. 2, p. 559-562.

[5] Esquerre, V. F. R. 1999. Caracterização Numérica de Fibras Ópticas e Filtros a Fibra. **Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica)**, Universidade Estadual de Campinas, 85p.

[6] Rubio-Mercedes, C. E. 2002. Análise de Estruturas Fotônicas por Elementos Finitos no Domínio da Freqüência. **Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)**, Universidade Estadual de Campinas, 109p.