

Antena Yagi-Uda-Espira Aplicada a Nanoenlace sem Fio Alimentado por Feixe Gaussiano

Paulo R. Amaral, Patrik C. Lopes e Karlo Q. da Costa

Resumo— Neste trabalho é feita uma análise teórica comparativa de nanoenlaces ópticos sem fio, formados por nanoantenas plasmônicas Yagi-Uda-espira e dipolo, alimentadas por feixe Gaussiano. A análise numérica é realizada pelo método dos momentos linear, onde é investigado a potência recebida na carga em função da distância entre transmissor e receptor. Os nanoenlaces analisados são dos tipos Yagi-Uda-espira/dipolo e dipolo/dipolo. Os resultados de transmissão de potência mostram que o nanoenlace Yagi-Uda-espira/dipolo apresenta uma melhora de aproximadamente 5 dB em relação ao nanoenlace dipolo/dipolo.

Palavras-Chave— Nanoantena Yagi-Uda-espira, Nanoenlace óptico sem fio, Feixe Gaussiano.

Abstract— In this work, a theoretical comparative analysis is conducted on wireless optical nanolinks formed by plasmonic Yagi-Uda-loop and dipole nanoantennas, powered by a Gaussian beam. The numerical analysis is performed using the linear method of moments, investigating the received power at the load as a function of the distance between the transmitter and receiver. The analyzed nano-links are of the Yagi-Uda-loop/dipole and dipole/dipole types. The power transmission results show that the Yagi-Uda-loop/dipole nanolink exhibits an improvement of approximately 5 dB compared to the dipole/dipole nanolink.

Keywords— Yagi-Uda-loop nanoantenna, Wireless optical nanolink, Gaussian beam.

I. INTRODUÇÃO

Nanoantenas ópticas são estruturas em escala nanométrica que funcionam de maneira semelhante às antenas de radiofrequência. No entanto, apresentam diferenças importantes, decorrentes, por exemplo, das propriedades ressonantes, onde as nanoestruturas metálicas possuem um comprimento de onda ressonante efetivo menor do que o comprimento de onda da luz incidente [1][2], o que possibilita o confinamento de campos ópticos em pequenas regiões para além do limite de difração da luz [3].

Estas propriedades intrigantes permitem que as nanoantenas ópticas sejam capazes de amplificar, manipular e confinar campos ópticos em escala nanométrica [1]. Com esse atributo, é possível a aplicação em várias áreas, como biologia, química, informática, ótica e engenharia, entre outras [1][4][5].

Uma aplicação interessante e alternativa de nanoantenas é o potencial para criar canais de comunicação sem fio ópticos ultra-rápidos e de banda larga, possibilitando assim, conexões sem fio eficientes entre componentes ópticos de nanocircuitos,

reduzindo significativamente as perdas que ocorrem na comunicação com fio. Em [6][7][8][9], nanoenlaces ópticos sem fio com diferentes geometrias de nanoantenas foram investigados na literatura. Estes trabalhos [6][7][8][9], utilizaram antenas transmissoras e receptoras, e mostraram que nanoenlaces óptico sem fio podem ter menor perda em comparação com link com fio, dependendo da distância entre as antenas, transmissora e receptora, o que é de grande importância para futuros nanocircuitos ópticos plasmônicos integrados.

Neste trabalho é feita uma análise comparativa de nanoenlaces formados por nanoantenas plasmônicas transmissoras e receptoras iguais e diferentes, sendo que as antenas transmissoras são alimentadas por um feixe Gaussiano, que é uma fonte alimentação mais realista, de comprimento de onda igual à $\lambda = 1153$ nm. As antenas utilizadas nos enlaces são Yagi-Uda-espira e dipolo, onde a antena Yagi-Uda-espira consiste na combinação de uma antena Yagi-Uda e uma espira parasita cilíndrica. Estas nanoantenas já foram analisadas em situações isoladas, sendo alimentadas por fonte de tensão. Porém, o presente trabalho investiga pela primeira vez essas nanoantenas em nanoenlaces sem fio e elas sendo alimentadas por feixe Gaussiano.

As análises dos nanoenlaces são feitas utilizando o método dos momentos (MoM - *Method of Moments*) linear, da mesma forma que foi feita em [10] e [14]. Onde investiga-se a transmissão potência ou a potência recebida na carga, em função da distância entre transmissor e receptor, em nanoenlaces sem fio e com fio. Os nanoenlaces analisados são dos tipos Yagi-Uda-espira/dipolo e dipolo/dipolo. Os resultados mostram que o nanoenlace Yagi-Uda-espira/dipolo apresenta uma melhora na transmissão de potência de aproximadamente 5 dB em relação ao nanoenlace dipolo/dipolo. Além disso, nanoenlaces sem fio, baseados em antenas Yagi-Uda-espira ou dipolo, apresentam melhores resultados para distâncias acima de aproximadamente $30 \mu\text{m}$, quando comparados aos nanoenlaces com fio do tipo OTL bifilar, o que é de grande importância para futuras aplicações em comunicação sem fio em nanoescala.

II. DESENVOLVIMENTO TEÓRICO

A. Descrição dos Nanoenlaces

Neste trabalho são propostos e analisados nanoenlaces sem fio formados por antenas Yagi-Uda-espira e dipolo, onde a antena Yagi-Uda-espira consiste na combinação de uma antena Yagi-Uda e uma espira parasita cilíndrica. Os nanoenlaces analisados são dos tipos dipolo/dipolo (Figura 1(b), sem diretor, refletores e espira do transmissor) e Yagi-Uda-espira/dipolo (Figura 1(b)).

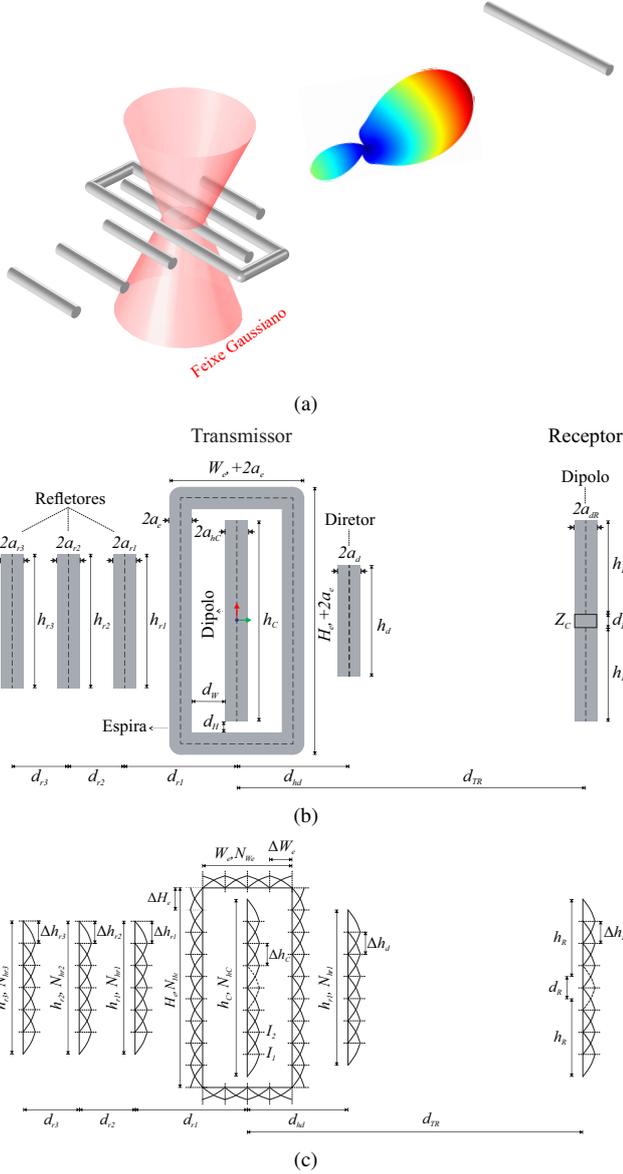


Fig. 1. Nanoenlace óptico sem fio utilizando nanoantenas Yagi-Uda-espira e dipolo, transmissor (esquerda) e receptor (direita). (a) Vista em perspectiva. (b) Vista superior. (c) Vista superior da discretização para aplicação do MoM.

A Figura 1(a) mostra a geometria do nanoenlace Yagi-Uda-espira/dipolo, onde um feixe Gaussiano alimenta a nanoantena da esquerda, que funciona como transmissor (antena Yagi-Uda-espira), convertendo o campo próximo em radiação óptica (campo espalhado) se propagando no espaço livre. A nanoantena localizada à direita funciona como receptor (antena dipolo), capturando a radiação externa vinda da antenna transmissora e a converte potência recebida pela carga Z_C . Os elementos do nanoenlace são formados por condutores cilíndricos de ouro e estão localizados no espaço livre. A nanoantena transmissora é composta por um dipolo, um diretor, três refletores e uma espira retangular (Figura 1(b) esquerda). O dipolo do transmissor, localizado no plano $z = 0$ ao longo do eixo x e centrado na origem, tem comprimento h_C , raio a_{hC} . O diretor tem comprimento h_d e raio a_d . O primeiro, o segundo e o terceiro refletor possuem comprimentos h_{r1} ,

h_{r2} , h_{r3} e raios a_{r1} , a_{r2} , a_{r3} , respectivamente. A espira tem comprimento $H_e + 2a_e$, largura $W_e + 2a_e$, raio a_e , e os parâmetros d_W e d_H , são as distâncias entre as superfícies do dipolo e da espira. Os parâmetros d_{hd} , d_{hr1} , d_{hr2} e d_{hr3} são as distâncias entre os elementos da antenna Yagi-Uda (Figura 1(b) esquerda). A antenna receptora é um dipolo (Figura 1(b) direita), localizado no plano $z = 0$ e deslocado a uma distância d_{TR} em relação ao eixo do dipolo da antenna transmissora, de comprimento total $2h_R + d_R$, raio a_{hR} , comprimento d_R onde a carga Z_C está conectada.

B. Método dos Momentos

Para realizar a análise do nanoenlace da Figura 1, o método linear dos momentos (MoM) é aplicado para resolver a equação integral 1D do campo elétrico, com aproximação linear da corrente longitudinal, funções de base senoidal e funções de teste do pulso retangular [10].

O metal utilizado para constituir as nanoantenas é o ouro, cuja permissividade complexa desse material é representada pelo modelo de Lorentz-Drude [2]. Uma descrição detalhada deste modelo pode ser encontrada em [10].

As perdas no metal são descritas pela impedância superficial Z_s . Esta impedância pode ser determinada, de forma aproximada, considerando o condutor como um guia cilíndrico no modo TM_{01} . Neste caso, a impedância superficial é dada por [11]:

$$Z_s = \frac{T J_0(Ta)}{2\pi a j \omega \epsilon_1 J_1(Ta)}, \quad (1)$$

onde $T = k_0 \sqrt{\epsilon_{r1}}$ e $k_0 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$, J_0 e J_1 são as funções de Bessel de primeiro tipo de ordem zero e um, respectivamente, ω a frequência angular de operação, k_0 a constante de propagação no ar, μ_0 a permeabilidade magnética do ar e ϵ_0 a permissividade elétrica do ar.

A equação integral do problema de espalhamento é obtida pela seguinte condição de contorno na superfície do condutor, $(\vec{E}_s + \vec{E}_i) \cdot \vec{a}_l = Z_s I$, onde \vec{a}_l é um vetor unitário tangencial a superfície do condutor, \vec{E}_s é o campo elétrico espalhado devido à corrente linear I induzida no condutor, \vec{E}_i é o campo elétrico externo que incide sobre condutor devido ao feixe Gaussiano, e I é a corrente longitudinal induzida em um determinado ponto da nanoantena. O campo espalhado é dado por:

$$\vec{E}_s(\vec{r}) = \frac{1}{j\omega\epsilon_0} \left[k_0^2 \int_l \vec{I} g(R) dl' + \int_l \frac{dI}{dl'} \nabla g(R) dl' \right], \quad (2)$$

onde $g(R) = \frac{e^{-jk_0 R}}{4\pi R}$ é a função de Green do espaço livre e $R = |\vec{r} - \vec{r}'|$ é a distância entre a fonte e os pontos de observação. Para aplicação do MoM, o nanoenlace da Figura 1(b) é discretizado (ver 1(c)), onde N_{hC} , N_{He} , N_{We} , N_{hd} , N_{hr1} , N_{hr2} , N_{hr3} e N_{hR} são os números de segmentos retos em h_C , H_e , W_e , h_d , h_{r1} , h_{r2} , h_{r3} e $h_R - 0,5d_R$, respectivamente, com tamanhos $\Delta h_C = h_C/N_{hC}$, $\Delta H_e = H_e/N_{He}$, $\Delta W_e = W_e/N_{We}$, $\Delta h_d = h_d/N_{hd}$, $\Delta h_{r1} = h_{r1}/N_{hr1}$, $\Delta h_{r2} = h_{r2}/N_{hr2}$, $\Delta h_{r3} = h_{r3}/N_{hr3}$ e $\Delta h_R = (h_R - 0,5d_R)/N_R$ (segmento com linha sólida no dipolo da antenna receptora),

respectivamente. A carga possui dois segmentos no centro do dipolo da antena receptora, com tamanho Δd_R (segmento com linha tracejada no dipolo da antena receptora). O número total de segmentos retos do nanoenlace são $N_t = N_{hC} + N_{H_e} + N_{W_e} + N_{h_d} + N_{hr1} + N_{hr2} + N_{hr3} + 2N_{hR}$ e o número de funções base senoidal são $N = N_t - 1$. Para a estabilidade do método é utilizada a condição de convergência $\Delta h_C > 2a_{hC}$, $\Delta H_e > 2a_e$, $\Delta W_e > 2a_e$, $\Delta h_{hd} > 2a_{hd}$, $\Delta h_{hr1} > 2a_{hr1}$, $\Delta h_{hr2} > 2a_{hr2}$, $\Delta h_{hr3} > 2a_{hr3}$ e $\Delta h_R > 2a_{hR}$. Então a corrente em cada segmento é aproximada por funções de base senoidal. As constantes de expansão são mostradas na Figura 1(c), onde cada constante define uma corrente senoidal triangular. Para determinar essas constantes, utiliza-se funções de teste de pulso retangular com amplitude unitária e realiza-se o procedimento de teste convencional [10], onde o seguinte sistema linear é obtido:

$$V_m = Z_s I_m \Delta_m - \sum_{n=1}^N Z_{mn} I_n, \quad m = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

onde V_m é a tensão em um segmento genérico m , os elementos de Z_{mn} representam a impedância mútua entre diferentes pontos m e n na superfície da antena, $\Delta_m = 1/2 (\Delta l_m^- + \Delta l_m^+)$. A solução do sistema (3) fornece a corrente ao longo dos elementos que formam os nanoenlaces. Com esses resultados é possível calcular as distribuições de campo próximo e distante e outros parâmetros.

C. Feixe Gaussiano

O campo incidente \vec{E}_i que alimenta as antenas transmissoras é um feixe Gaussiano ideal. Este tipo de onda é obtido resolvendo a equação da onda escalar de Helmholtz com a aproximação paraxial [12]. O potencial do vetor magnético de um feixe gaussiano polarizado no eixo x e propagando-se na direção $+z$ é dado por

$$\bar{A} = u_0 \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{\omega} \exp\left(\frac{\rho^2}{w^2}\right) \exp\left[-j\left(\frac{k_0 \rho^2}{2R} - \phi\right)\right] e^{-jk_0 z} \bar{a}_x \quad (4)$$

onde $u_0 = (2P\mu_0/kw)^{1/2}$, P é a potência do feixe, w é o raio do feixe, R é o raio de curvatura da frente de fase, e ϕ é a fase do feixe. Os três parâmetros principais que definem o feixe são a potência P , o raio da cintura do feixe w_0 , e o comprimento de onda operacional λ . Com o potencial vetorial (4), a componente x do campo elétrico E_x do feixe Gaussiano pode ser obtida a partir das equações de Maxwell [12].

III. RESULTADOS NUMÉRICOS

A. Antenas Transmissoras

Nesta seção as antenas Yagi-Uda-espira e dipolo são analisadas separadamente. Para esta análise, os valores dos parâmetros geométricos utilizados são: $h_C = 550$ nm, $a_{hC} = 27$ nm, $h_d = 254$ nm, $d_{hd} = 267$ nm, $a_d = 29$ nm, $h_{r1} = 285$ nm, $d_{hr1} = 291$ nm, $a_{r1} = 30$ nm, $h_{r2} = 281$ nm, $d_{hr2} = 283$ nm, $a_{r2} = 30$ nm, $h_{r3} = 280$ nm, $d_{hr3} = 290$ nm, $a_{r3} = 28$ nm, $a_e = 20$ nm, $d_W = 50$ nm, $d_H = 20$ nm, $W_e =$

$2a_e + 2a_{dT} + 2d_W$, $H_e = 2h_T + d_T + 2a_e + 2d_H$, onde com estes valores a principal ressonância está em torno de 260 THz. Os parâmetros das antenas transmissoras são baseados em [13], onde o autor utilizou o método de otimização chamado AGPSO adaptativo *Fuzzy*, para encontrar a melhor geometria para a nanoantena Yagi-Uda-espira.

O feixe de excitação usado para alimentar as antenas transmissoras é focado no dipolo transmissor com polarização ao longo do eixo do dipolo (eixo x), a direção de propagação é $+z$, o eixo do feixe está ao longo do eixo z e a cintura mínima (w_0) está localizado em $z = 0$, que é o plano das nanoantenas. Em todas as análises será utilizado um feixe Gaussiano fixo, com potência, $P = 10^{-12}$ W, comprimento de onda, $\lambda = 1153$ nm e cintura do feixe, $w_0 = 340$ nm. Os parâmetros do feixe são baseados em [14].

A Figura 2 apresenta os resultados de distribuição de corrente e diagrama de radiação (intensidade de radiação) de campo distante 3D para o nanodipolo isolado (ver Figura 2(a)) e Yagi-Uda-espira (ver Figura 2(b)).

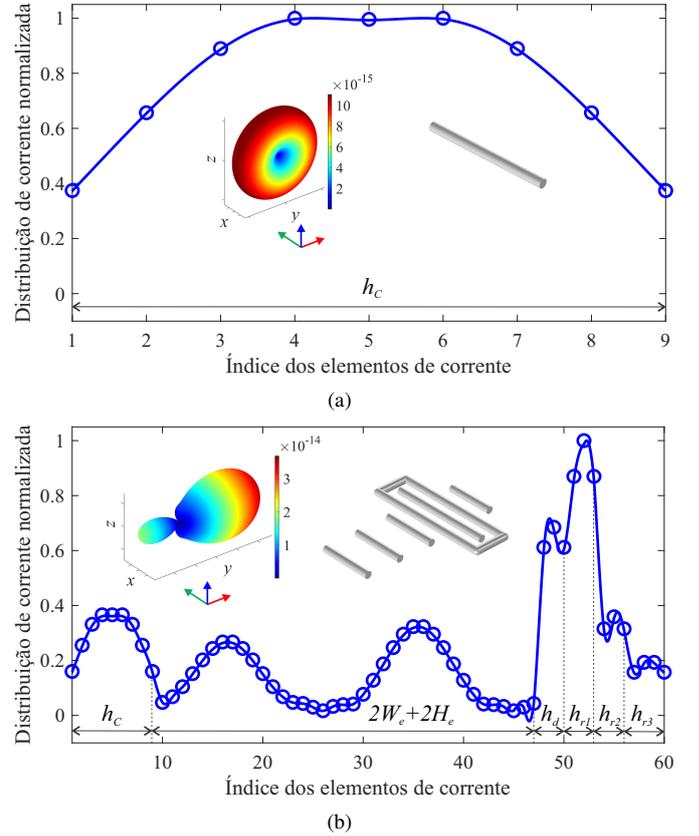


Fig. 2. Distribuição de corrente e diagrama de radiação (intensidade de radiação) de campo distante 3D das nanoantenas dipolo (a) e Yagi-Uda-espira (b).

Para o nanodipolo isolado (Figura 2(a)) é possível observar o diagrama 3D com o padrão de radiação omnidirecional convencional do dipolo e a distribuição de corrente esperada, apresentando o formato de meio comprimento de onda $\lambda/2$.

Para o caso da nanoantena Yagi-Uda-espira (Figura 2(b)), observa-se o diagrama de radiação direcional, com o lóbulo principal (direção $+y$), e um pequeno lóbulo secundário na direção $-y$. Na distribuição de corrente são traçados alguns

limites para identificar a corrente de cada elemento da nanoantena Yagi-Uda-espira, da esquerda para direita são: dipolo (h_C), espira ($2W_e + 2H_e$), diretor (h_d), refletor 1 (h_{r1}), refletor 2 (h_{r2}) e refletor 3 (h_{r3}). Pode-se observar que todos elementos da antena Yagi-Uda-espira possui um padrão de distribuição de corrente dipolar, se aproximando de meio comprimento de onda $\lambda/2$. Além disso a amplitude da corrente é menor nos refletores mais afastados do dipolo.

As Figuras 3(a), (b) e (c) mostram a distribuição de campo próximo incidente, espalhado e total, respectivamente para o nanodipolo isolado. Já as Figuras 4(a), (b) e (c) mostram a distribuição de campo próximo incidente, espalhado e total, para nanoantena Yagi-Uda-espira. Percebe-se nas Figuras 3(b,c) e 4(b,c) que os pontos com maior intensidade de campo elétrico encontram-se próximo das nanoantenas, portanto, pode-se observar um bom acoplamento entre o feixe Gaussiano e as nanoantenas transmissoras, ou seja, o feixe Gaussiano está excitando de forma eficaz essas nanoestruturas.

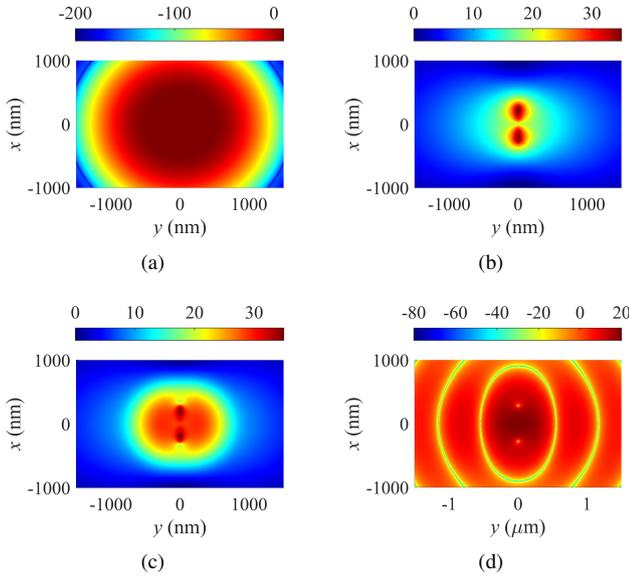


Fig. 3. Distribuição de campo elétrico próximo, no plano $z = a_{hC} + 20$ nm, para o dipolo isolado. (a) Campo elétrico incidente do feixe Gaussiano, $E = 20 \log_{10} (|\text{Re}(E_{feixe})|)$. (b) Campo elétrico espalhado, $E = 20 \log_{10} (|\text{Re}(E_{espalhado})|)$. (c) Campo elétrico total (incidente + espalhado) $E = 20 \log_{10} (|\text{Re}(E_{total})|)$. (d) Módulo e fase do campo elétrico, $E = 20 \log_{10} (|\text{Re}(E_x)|)$.

As Figuras 3(d) e 4(d) mostram o módulo e a fase da distribuição de campo elétrico próximo, $E = 20 \log_{10} (|\text{Re}(E_x)|)$, para as antenas dipolo e Yagi-Uda, respectivamente, no plano $z = a_{hC} + 20$ nm. Neste resultado, observa-se uma frente de onda mais esférica na Figura 4(b) devido principalmente à espira, que possui uma geometria mais esférica neste plano.

B. Nanoenlaces

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos na análise dos nanoenlaces dipolo/dipolo (Figura 1, sem diretor, refletores e espira do transmissor) e Yagi-Uda-Espira/dipolo (Figura 1). Os parâmetros utilizados para as antenas transmissoras são os mesmos da seção anterior e para as antenas

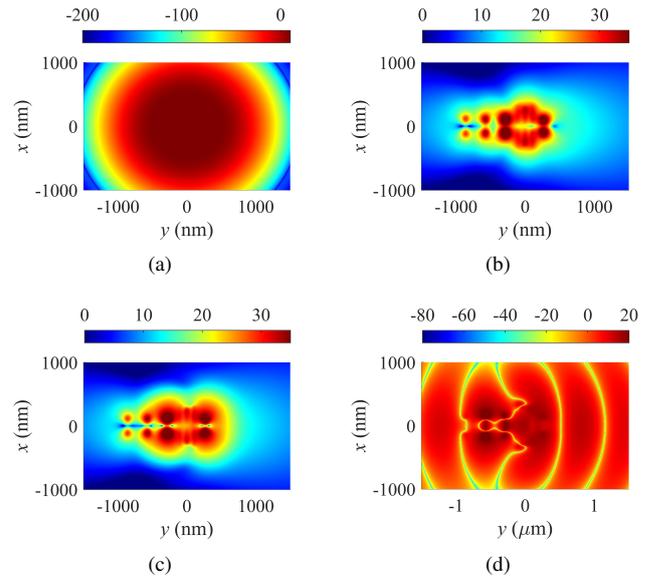


Fig. 4. Distribuição de campo elétrico próximo, no plano $z = a_{hC} + 20$ nm, para a nanoantena Yagi-Uda-espira. (a) Campo elétrico incidente do feixe Gaussiano, $E = 20 \log_{10} (|\text{Re}(E_{feixe})|)$. (b) Campo elétrico espalhado, $E = 20 \log_{10} (|\text{Re}(E_{espalhado})|)$. (c) Campo elétrico total (incidente + espalhado) $E = 20 \log_{10} (|\text{Re}(E_{total})|)$. (d) Módulo e fase do campo elétrico, $E = 20 \log_{10} (|\text{Re}(E_x)|)$.

receptoras os parâmetros utilizados foram: $h_R = 260$ nm, $d_R = 30$ nm e $a_{dR} = 27$ nm. Para cada nanoenlace utilizou-se uma carga $Z_C = 50 \Omega$ conectada na antena receptora.

A transferência de energia entre enlaces transmissor-receptor pode ser investigada calculando a transmissão de potência (ou função de transferência de potência). Esta transmissão de potência pode ser calculada aproximadamente utilizando a equação analítica de transmissão de Friis [15], ou mais precisamente pelo modelo numérico do MoM. A definição deste parâmetro é a razão entre a potência entregue à carga Z_C e a potência entregue nos terminais da antena transmissora. Pelo MoM tem-se que essa potência é dada por $P_{ZC}/P_{in} = (0,5) |I_C|^2 \text{Re}(Z_C)/P_{in}$, onde o P_{in} utilizado foi a potência do feixe Gaussiano ($P_{in} = 10^{-12}$ W).

A Figura 5 mostra o comportamento da transmissão de potência, em função da distância, para os nanoenlaces dipolo/dipolo e Yagi-Uda-espira/dipolo. Além disso, a transmissão de potência de uma linha de transmissão óptica (OTL) cilíndrica bifilar é mostrada na figura, onde esta OTL é conectada entre as antenas transmissora e receptora da Figura 1, sem o diretor, os refletores, formando um nanocircuito óptico. A antena transmissora é alimentada pelo mesmo feixe Gaussiano dos nanoenlaces sem fio e a OTL tem raio de 15 nm.

As perdas na OTL são calculadas da mesma forma que foi feito em [7], onde a constante de perda α é calculada, que é quase constante para o modo principal de propagação na OTL, e pode ser obtida, aproximadamente, pelo valor médio da inclinação da curva da corrente versus distância ao longo do comprimento L da OTL. Assim, $\alpha = \Delta I/\Delta L$, onde ΔI é a variação média da amplitude da corrente em decibéis (dB) ao longo de uma dada distância ΔL na OTL. O parâmetro

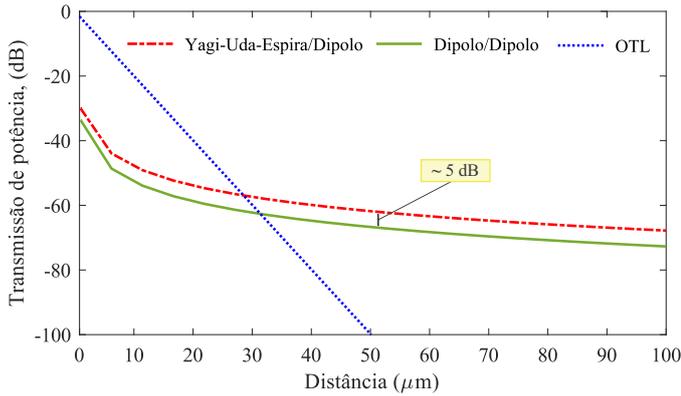


Fig. 5. Transmissão de potência, em função da distância, no caso do nanoenlace dipolo/dipolo (linha verde), nanoenlace Yagi-Uda/dipolo (linha azul) e nanoenlace Yagi-Uda-espira/dipolo. (linha vermelho)

α encontrado para a OTL, considerando uma linha com $L = 5 \mu\text{m}$ de comprimento, foi de aproximadamente 0.0019954 dB/nm .

A Figura 5 mostra que nanoenlaces ópticos sem fio podem ter menor perda em comparação com nanoenlace com fio, a partir de uma determinada distância, onde para os casos considerados é a partir de $30 \mu\text{m}$. Isso mostra que nanoenlaces ópticos baseados em nanoantenas são mais adequados que OTL para comunicação a distâncias acima de aproximadamente $30 \mu\text{m}$. Além disso, o nanoenlace Yagi-Uda-espira/dipolo apresenta uma melhora de aproximadamente 5 dB em relação ao nanoenlace dipolo/dipolo.

A Figura 6 mostra a distribuição de campo elétrico próximo, $E = 20 \log_{10} (|\text{Re}(E_x)|)$, dos nanoenlaces dipolo/dipolo e Yagi-Uda-espira/dipolo, no plano $z = a_{hC} + 20 \text{ nm}$, para uma distância entre as antenas transmissoras e receptoras de $5 \mu\text{m}$. Nos três nanoenlaces mostrados nesta figura, pode-se observar o campo elétrico se propagando das antenas transmissoras para as antenas receptoras. Além disso, observa-se o decaimento da intensidade do campo elétrico com a distância.

IV. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi feita uma análise comparativa de nanoenlaces formados por nanoantenas plasmônica Yagi-Uda-espira e dipolo, investigando a potência de transmissão para os nanoenlaces dos tipos Yagi-Uda-espira/dipolo e dipolo/dipolo. Os resultados mostraram que o nanoenlace Yagi-Uda-espira/dipolo apresenta uma melhora de aproximadamente 5 dB em relação ao nanoenlace dipolo/dipolo. Além disso, os dois nanoenlaces sem fio apresentam melhor transmissão acima da distância de aproximadamente $30 \mu\text{m}$, quando comparados aos nanoenlaces com fio do tipo OTL bifilar, o que é de grande importância para futuras aplicações em comunicação sem fio em nanoescala.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas (FAPESPA) pelo apoio financeiro.

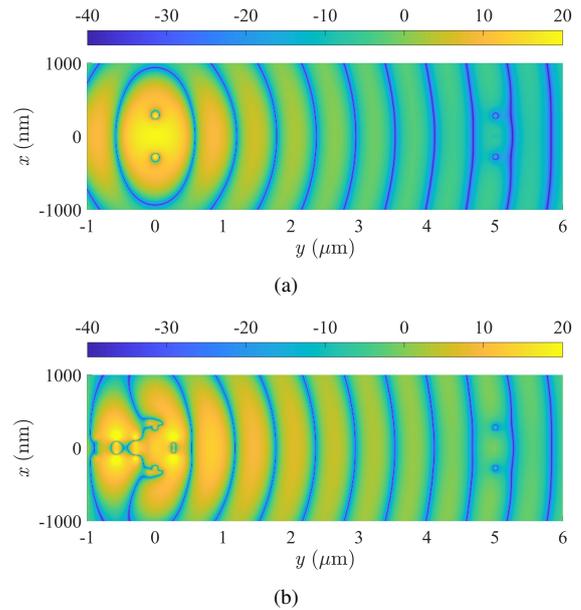


Fig. 6. Distribuição de campo elétrico próximo, $E = 20 \log_{10} (|\text{Re}(E_x)|)$, no plano $z = a_{hC} + 20 \text{ nm}$, dos nanoenlaces dipolo/dipolo (a), Yagi-Uda/dipolo (b) e Yagi-Uda-espira/dipolo, para uma distância entre as antenas transmissoras e receptoras de $5 \mu\text{m}$.

REFERÊNCIAS

- [1] L. Novotny and N. van Hulst, "Antennas for light," *Nature Photonics*, vol. 5, no. 2, pp. 83–90, 2011.
- [2] L. Novotny and B. Hecht, *Principles of Nano-Optics*, 2nd ed. Cambridge: *Cambridge University Press*, 2012.
- [3] D. K. Gramotnev and S. I. Bozhevolnyi. Plasmonics beyond the diffraction limit. *Nature Photonics*, 4:83–91, 2010.
- [4] P. Bharadwaj, B. Deutsch, and L. Novotny, "Optical Antennas", *Advances in Optics and Photonics*, vol. 1, pp. 438-483, 2009.
- [5] M.S. Santos, R. Lameirinhas, J. P. Torres, J. F. Fernandes, and C. Bernardo. "Nanostructures for Solar Energy Harvesting". *Micromachines*, vol. 14, no. 2, pp. 1-24, January 2023.
- [6] A. Alù and N. Engheta. "Wireless at the nanoscale: optical interconnects using matched nanoantennas". *Physical Review Letters*, vol. 104, pp. 213902-4, 2010.
- [7] J. L. de Souza and K. Q. da Costa, "Broadband Wireless Optical Nanolink Composed by Dipole-Loop Nanoantennas," *IEEE Photonics Journal*, vol. 10, pp. 1-8, April 2018.
- [8] A. A. C. Alves, et.al, "Plasmonic nanoantennas for 6g intra/inter-chip optical-wireless communications". In *2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT)*, pp. 1-4, 2020.
- [9] M. Elsaid, K.R. Mahmoud, M. Hussein et al. "Improvement of sectoral horn nanoantenna based on arc directors for point to point communications". *Opt Quant Electron*, v. 53, p. 1-15, 2021.
- [10] K. Costa and V. Dmitriev, "Simple and efficient computational method to analyze cylindrical plasmonic nanoantennas," *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2014, 8 pages, 2014.
- [11] G. W. Hanson. "On the applicability of the surface impedance integral equation for optical and near infrared copper dipole antennas". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 54, n. 12, pp. 3677-3685, 2006.
- [12] K. Zhang and D. Li, *Electromagnetic Theory for Microwaves and Optoelectronics*, Springer, New York, NY, USA, 2nd edition, 2007.
- [13] P. Santos, V. Dmitriev, K. da Costa, "Optimization of Modified Yagi-Uda Nanoantenna Arrays Using Adaptive Fuzzy GAPSO", *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2021, Article ID 8874385, 11 pages, 2021.
- [14] K. da Costa, V. Dmitriev, J. Souza, G. Silvano, "Analysis of Nanodipoles in Optical Nanocircuits Fed by Gaussian Beam", *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2014, 12 pages, 2014.
- [15] S. K. Patel and C. Argyropoulos. "Plasmonic nanoantennas: enhancing light-matter interactions at the nanoscale". *EPJ Applied Metamaterials*, vol. 2, no. 4, 2015.