

Efeito do Substrato Truncado em Nanoenlaces com Antenas Yagi-Uda

Paulo R. Amaral, Janilson L. de Souza, Patrik C. Lopes, Yago G. da Conceição 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 e dipolo em três situações, a primeira com as nanoantenas posicionadas no espaço livre, a segunda com as nanoantenas em cima de um substrato truncado de SiO_2 , e a terceira com as nanoantenas em cima de um substrato truncado de SiO_2 , mas separadas pelo espaço livre. A análise numérica é realizada pelo método dos elementos finitos, onde é investigado o efeito do substrato truncado na potência de transmissão e no campo elétrico próximo para os nanoenlaces dos tipos Yagi-Uda/Yagi-Uda, Yagi-Uda/dipolo e dipolo/dipolo. Os resultados mostraram os três enlaces nas três situações podem operar com boa transmissão de potência em torno de 170 THz.

Palavras-Chave— Nanoantenas, Nanoenlace óptico sem fio, Substrato truncado, Transmissão de potência.

Abstract— In this work, a theoretical analysis is compared of wireless optical nanolinks, formed by nanoantennas plasmonic Yagi-Uda and dipole in three situations, the first with nanoantennae positioned in free space, a second with as nanoantennae on top of the truncated substrate of SiO_2 , and a third with nanoantennas on top of a truncated SiO_2 substrate, but separated by free space. The numerical analysis is performed by the finite element method, where the effect of the truncated substrate on the transmission and in the near electric field for the Yagi-Uda/Yagi-Uda, Yagi-Uda/dipole and dipole/dipole nanolinks. The results showed the three links in the three situations can operate with good power transmission around 170 THz.

Keywords— Nanoantennas, Optical nanolink wireless, Truncated substrate, Power transmission.

I. INTRODUÇÃO

Desenvolvimentos recentes de nanoantenas ópticas têm atraído muita atenção devido às suas boas perspectivas em vários campos da nanotecnologia, pois, estas antenas permitem amplificar, manipular e confinar campos ópticos para além do limite de difração da luz [1]. Devido essas características, elas oferecem oportunidades únicas para aplicações em várias áreas, como nanofotônica, biologia, química, informática, ótica e engenharia, entre outros [1]-[3]. Além disso, estes estudos foram expandidos devido ao desenvolvimento dos métodos numéricos computacionais e as inovações nas técnicas de nanofabricação, como a litografia por feixe de elétrons, a litografia coloidal e a litografia por feixe de íons [4].

Uma aplicação interessante e alternativa de nanoantenas é o potencial para criar canais de comunicação sem fio ópticos

ultrarrápidos 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 [5]. Nos trabalhos [6]-[10] são apresentados enlaces sem fio utilizando diferentes geometrias de nanoantenas ópticas plasmônicas. Em [6] foram propostos nanoenlaces ópticos sem fio intra/inter-chip ultralongo utilizando nanoantenas horn e plantenna, com base no uso conjunto de duas nanoantenas diferentes, visando aplicações de 6G a 474 THz, simulações numéricas demonstram a aplicabilidade da abordagem proposta, na qual as nanoantenas apresentaram alto desempenho, atuando como emissores e receptores ópticos, foram adequadamente projetadas para proporcionar perdas reduzidas de propagação óptica, baixo nível de coeficiente de reflexão, alta diretividade e alto ganho. Em [7] foi proposto um nanoenlace com característica de banda larga, formado por antenas dipolo-espira, os resultados mostraram que usando esse nanoenlace com antenas dipolo-espira em vez de dipolos convencionais, é possível aumentar a largura de banda operacional do sistema para a faixa de 179,1 a 202,5 THz, que está dentro da faixa óptica das telecomunicações. Em [8] um nanoenlace sem fio formado por antenas de dipolo, é comparado com um nanoenlace com fio formado por um guia de ondas, o estudo mostrou que o enlace sem fio pode funcionar melhor que um guia de ondas plasmônico no envio de sinal óptico em nanoescala de um ponto a outro, a partir de determinada distância. Em [9] é apresentada outra aplicação de nanoenlace sem fio formado por uma nanoantena Vivaldi transmissora e outra receptora, para ser utilizada em chip, com esse nanoenlace foram obtidos um alto ganho e uma largura de banda que cobre amplamente todo o espectro da banda C das telecomunicações. Estes estudos [6]-[9] utilizaram antenas transmissoras e receptoras, e mostraram a viabilidade de utilizar comunicação sem fio na nanofotônica.

Neste trabalho é feita uma análise comparativa de nanoenlaces formados por nanoantenas plasmônicas transmissoras e receptoras iguais e diferentes em três situações, a primeira situação é com as antenas posicionadas no espaço livre, é um cenário ideal, mas com pouca aplicabilidade, a segunda situação é com as antenas em cima de um substrato de dióxido de silício (SiO_2), esse cenário é mais realista podendo ser aplicado em comunicação intra-chip, a terceira situação é com as antenas também em cima de um substrato truncado de SiO_2 , mas separadas pelo espaço livre, esse cenário pode ser aplicado para interconexões inter-chip (chip-a-chip). As antenas utilizadas nos enlaces são Yagi-Uda e dipolo. A análise dos enlaces é realizada utilizando o Método dos Elementos Finitos (*FEM - Finite Element Method*) através do *software*

Paulo Amaral¹, e-mail: pauloamaral2708@gmail.com; Janilson Souza², e-mail: janilson.souza@ifpa.edu.br; Patrik Lopes¹, e-mail: patrick14lopes@gmail.com; Yago Conceição¹, e-mail: yagocg.ee@gmail.com; Karlo Costa¹, e-mail: karlo@ufpa.br; ¹Universidade Federal do Pará; ²Instituto Federal do Pará. Este trabalho foi parcialmente financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES).

Comsol Multiphysics [12]. Onde investigamos o efeito do substrato truncado na potência de transmissão e no campo elétrico próximo para os nanoenlaces dos tipos Yagi-Uda/dipolo, Yagi-Uda/Yagi-Uda e dipolo/dipolo. Os resultados mostraram que para os três enlacs, a situação em que as antenas estão posicionadas em cima do substrato de SiO_2 apresentou o melhor desempenho da transmissão de potência. Além disso os três enlacs nas três situações podem operar com boas transmissão de potência em torno de 170 THz, o que é de grande importância para futuras aplicações em comunicação sem fio em nanoescala.

II. DESCRIÇÃO DOS NANOENLACES

Neste trabalho são propostos e analisados três modelos de nanoenlaces sem fio em três situações, a primeira com as antenas posicionadas no espaço livre, a segunda para as antenas em cima de um substrato de SiO_2 e a terceira com as antenas também em cima de um substrato de SiO_2 , mas separadas pelo espaço livre. O primeiro nanoenlace é formado por antenas dipolo/dipolo (Figura 1 sem o refletor e diretores do transmissor), o segundo por antenas Yagi-Uda/dipolo (Figura 1) e o terceiro por antenas Yagi-Uda/Yagi-Uda (Figura 1, com a antena receptora igual a antena transmissora).

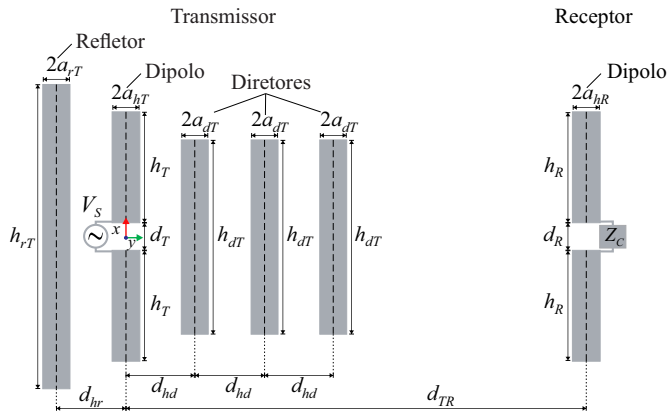


Fig. 1. Geometria do nanoenlace óptico sem fio utilizando nanoantenas Yagi-Uda e dipolo isolado, transmissora (esquerda) e receptora (direita).

A Figura 1 mostra a geometria do nanoenlace Yagi-Uda/dipolo, onde uma fonte de tensão V_s excita a nanoantena da esquerda, que funciona como transmissor (antena Yagi-Uda) e a nanoantena localizada à direita funciona como receptor (antena dipolo), com carga Z_C . O nanoenlace é formado por condutores de ouro e a permissividade complexa desse material é representada pelo modelo de Lorentz-Drude [13]. A nanoantena transmissora Yagi-Uda é composta por um dipolo, um refletor e três diretores (Figura 1 esquerda). O dipolo do transmissor, localizado no plano $z = 0$ ao longo do eixo x e centrado na origem, tem comprimento total $2h_T + d_T$, raio a_{hT} e comprimento d_T do gap de tensão. O refletor tem comprimento h_{rT} e raio a_{rT} . Os diretores possuem o mesmo comprimento h_{dT} e raio a_{dT} . Os parâmetros d_{hr} e d_{hd} são as distâncias entre os elementos da antena Yagi-Uda (Figura 1 esquerda). A antena receptora é um dipolo (Figura 1 direita), localizado no plano $z = 0$ e deslocado a uma d_{TR} em relação

ao eixo do dipolo da antena transmissora, de comprimento total $2h_R + d_R$, raio a_{hR} , comprimento d_R do gap onde a carga Z_C está conectada.

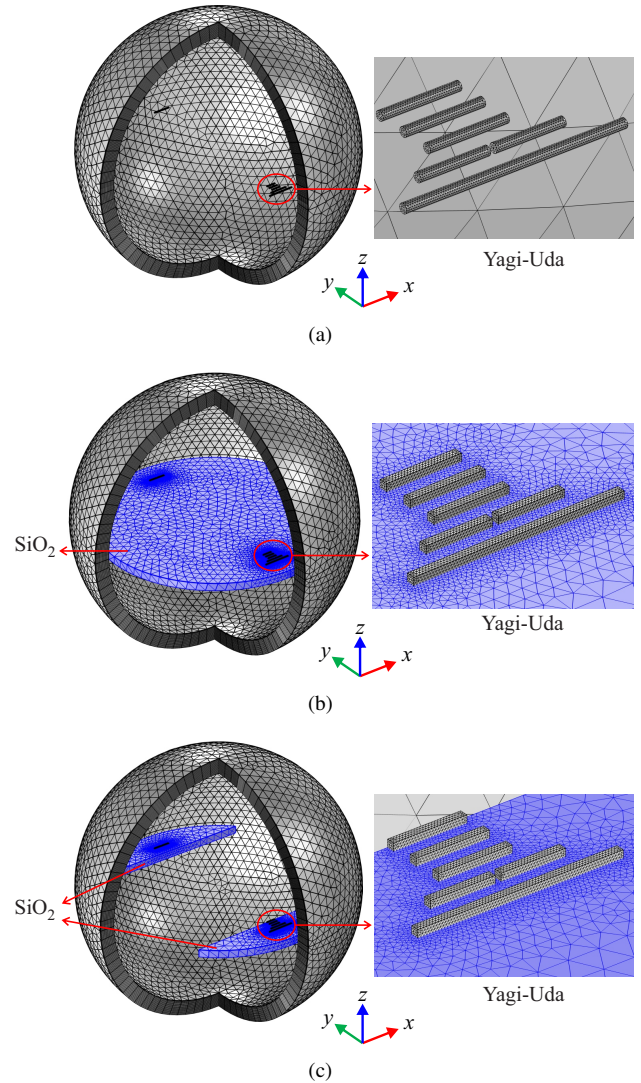


Fig. 2. Malhas geradas no COMSOL para as simulações do nanoenlace Yagi-Uda/dipolo. Em (a) as antenas estão posicionadas no espaço livre, em (b) as antenas estão em cima de um substrato de SiO_2 e em (c) as antenas estão em cima de um substrato de SiO_2 , separadas pelo espaço livre.

As Figuras 2 (a), (b) e (c) mostram a malha customizada do nanoenlace Yagi-Uda/dipolo com as antenas no espaço livre, em cima de um substrato e em cima de um substrato separadas pelo espaço livre, respectivamente, modeladas no COMSOL. As antenas estão em um domínio esférico, com condição de espalhamento aplicada nas suas extremidades.

III. RESULTADOS

A. Antenas Transmissoras

Nesta seção, as antenas Yagi-Uda e dipolo são analisadas separadamente. Para esta análise, os valores dos parâmetros geométricos utilizados são: $h = 220$ nm, $d = 20$ nm, $a = 15$ nm, $h_r = 700$ nm, $a_r = 15$ nm, $h_d = 250$ nm, $a_d = 15$ nm, $d_r = 100$ nm e $d_d = 100$ nm, onde com estes valores as principais ressonâncias estão na faixa de frequência de 100 a

400 THz considerada. Os parâmetros do nanodipolo isolado são baseados em [13] e os dos elementos da nanoantena Yagi-Uda foram escolhidos de forma que o elemento refletor fosse maior que o dipolo e os diretores menores que o dipolo.

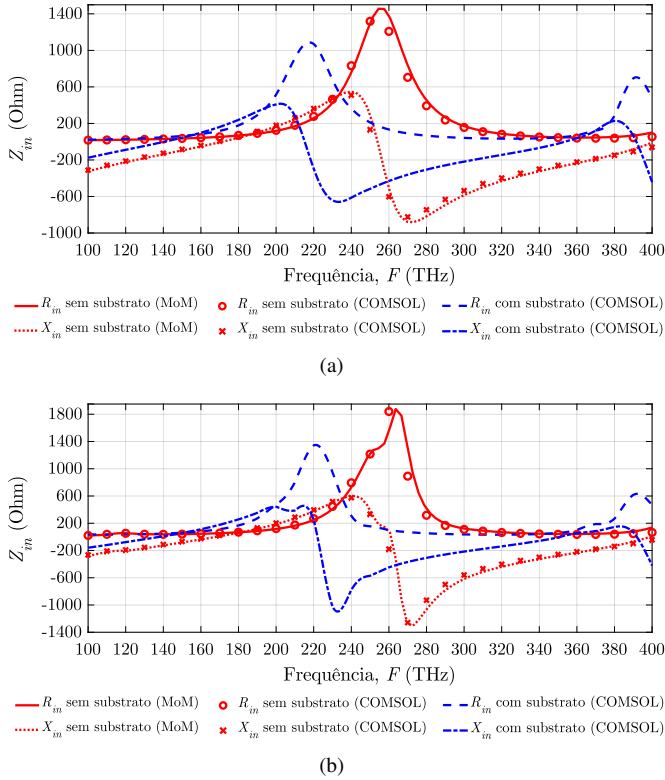


Fig. 3. Impedância de entrada (Z_{in}) das nanoantenas dipolo (a) e Yagi-Uda (b).

A Figura 3 mostra a impedância de entrada ($Z_{in} = R_{in} + jX_{in}$) para as antenas Yagi-Uda e dipolo. A impedância de entrada das antenas, além de ser calculada pelo COMSOL, é calculada também pelo Método dos Momentos (MoM - *Method of Moments*) aplicado a nanoantenas plasmônicas cilíndricas [14], através da codificação do modelo matemático de [14] em Matlab, obtendo boa concordância entre esses dois métodos, isso mostra que os dois métodos estão convergindo para uma única solução, sendo que a diferença (ou erro relativo) é devido as aproximações utilizadas em cada método. Pode-se afirmar que o resultado utilizando FEM é mais preciso que o MoM devido ao fato que o primeiro utiliza uma malha 3D para as antenas enquanto que o MoM aproxima as correntes nestas na forma linear, desprezando as pequenas variações transversais das correntes nos condutores [14].

Comparando o resultado da impedância de entrada entre as antenas Yagi-Uda e dipolo no espaço livre, nota-se que as duas primeiras frequências ressonantes estão próximas, o que mostra que os diretores e refletor não afetam significativamente as frequências ressonantes originais do dipolo isolado. A primeira ressonância desloca-se de 169 THz (dipolo) para 165.1 THz (Yagi-Uda) e a segunda ressonância de 251.8 THz (dipolo) para 256.5 THz (Yagi-Uda). As principais diferenças entre essas duas antenas transmissoras, são observadas próximas das frequências de 175 THz e 260 THz, que correspondem

fisicamente às ressonâncias dipolar dos refletor e diretores, respectivamente.

Ainda, as impedâncias de entrada das antenas são calculadas para duas situações, a primeira com as antenas posicionadas no espaço livre e a segunda para as antenas em cima de um substrato de SiO_2 com permissividade de 2,15.

O cálculo da impedância de entrada (Figura 3) com o substrato tem por objetivo mostrar o efeito do mesmo nas propriedades ressonantes das antenas. Uma vez que, em aplicações práticas, as nanoantenas geralmente são colocadas em cima de um substrato. Na Figura 3 observa-se que colocando as antenas sobre o substrato, as ressonâncias das antenas são deslocadas para frequências menores em relação as antenas no espaço livre. Esse efeito do substrato é semelhante ao que ocorre em antenas no regime de microondas [15].

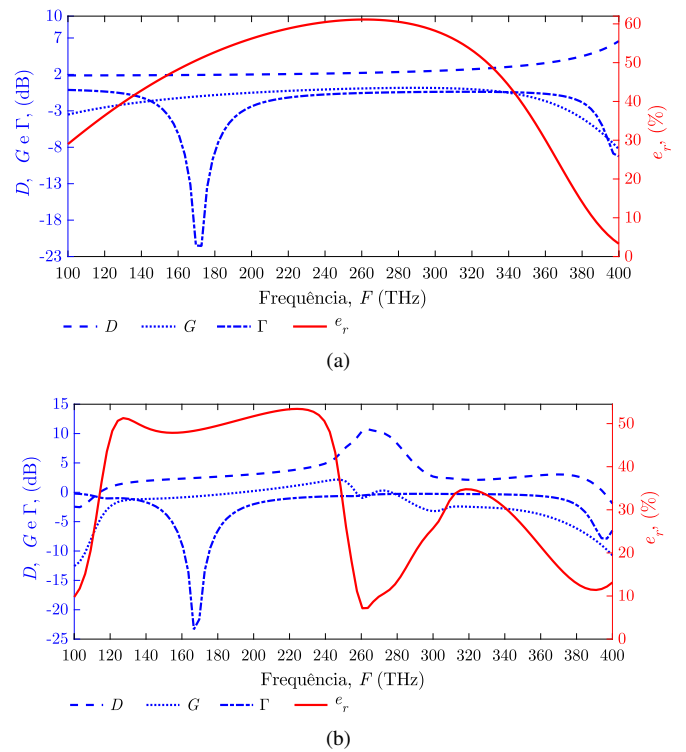


Fig. 4. Diretividade (D), ganho (G), eficiência de radiação (e_r) e coeficiente de reflexão (Γ) das antenas dipolo (a) e Yagi-Uda (b).

A Figura 4 mostra, os resultados de diretividade (D), ganho (G), eficiência de radiação (e_r) e coeficiente de reflexão (Γ) versus frequência para as antenas dipolo (Figura 4(a)) e Yagi-Uda (Figura 4(b)). A diretividade e o ganho são calculados na direção $+y$ (Figura 4). Na Figura 4(a) observa-se a característica convencional do dipolo isolado, onde em uma ampla faixa de 150 – 300 THz tem-se aproximadamente $D \approx 1,6$ dB, $e_r \approx 60$ % e $G \approx 1$ dB ($G = e_r D$). No caso da nanoantena Yagi-Uda (Figura 4(b)), tem-se um pico de $D = 12$ dB próximo a $F = 264$ THz, mas nessa frequência a eficiência de radiação é mínima $e_r \approx 10$ %, e o ganho é $G = 0,86$ dB. Mas, se for desejado maior ganho e eficiência ao invés de alta diretividade, a frequência próxima de $F \approx 240$ THz é mais adequada, onde tem-se aproximadamente o ganho máximo $G_{max} \approx 1,6$ dB.

O coeficiente de reflexão, de ambas antenas, foi calculado considerando que fossem conectadas uma linha de transmissão com impedância característica de 50Ω . Com esse resultado, observa-se que o melhor ponto de frequência de casamento de impedância, para ambas antenas, ocorre em torno da primeira frequência de ressonância, no entanto a máxima eficiência de radiação ocorre em frequências mais elevadas.

A Figura 5 apresenta os diagramas de radiação (ganho) de campo distante 3D para as nanoantenas dipolo (Figura 5(a) e (b)) e Yagi-Uda (Figura 5(c) e (d)), calculados para a frequência de 240 THz. As nanoantenas estão posicionadas no espaço livre para as figuras 5(a) e 5(c), e sobre um substrato de SiO_2 para para as figuras 5(b) e 5(d). Observa-se que o ganho máximo do Yagi-Uda no espaço livre ($G_{max} \approx 1,6$ dB) é aproximadamente 60 % maior que o ganho máximo ($G_{max} \approx 1$ dB) do dipolo no espaço livre. Para o caso da antena Yagi-Uda, o ganho máximo ocorre na direção $+y$ e existe um lóbulo pequeno na direção $-y$. O lóbulo principal (direção $+y$) é devido principalmente aos diretores.

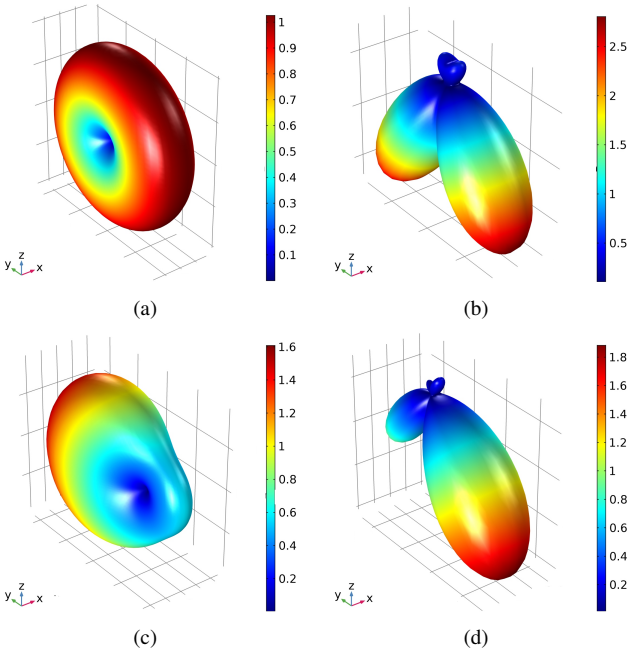


Fig. 5. Diagrama de radiação (ganho) de campo distante 3D para as nanoantenas dipolo (a,b) e Yagi-Uda (c,d), para $F=240$ THz. As nanoantenas estão posicionadas no espaço livre para as figuras (a) e (c), e sobre um substrato de SiO_2 para para as figuras (b) e (d).

B. Nanoenlaces

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos na análise dos nanoenlaces dipolo/dipolo (Figura 1, sem refletor e diretores do transmissor), Yagi-Uda/dipolo (Figura 1) e Yagi-Uda/Yagi-Uda (Figura 1, com a antena receptora igual a antena transmissora), para três situações, a primeira com as antenas posicionadas no espaço livre, a segunda para as antenas em cima de um substrato de SiO_2 e a terceira com as antenas também em cima de um substrato de SiO_2 , mas separadas pelo espaço livre. As análises são feitas para uma faixa de frequência de 100 a 400 THz e uma fonte de tensão de 1V. Os parâmetros utilizados para as antenas receptoras são os

mesmos das antenas transmissoras, com $Z_C = 50$ para cada modelo de nanoenlace em cada situação.

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], como foi feito em [7]-[10], ou pelo modelo numérico no COMSOL. A definição deste parâmetro é a razão entre a potência entregue à carga Z_C e a potência entregue nos terminais da antena transmissora.

A Figura 6 mostra a transmissão de potência versus frequência para os três nanoenlaces nas três situações com as nanoantenas receptoras posicionadas a uma distância $d_{TR} = 5000$ nm para todos os casos. Os resultados mostraram que para os três enlaces, a melhor transmissão de potência é alcançada em torno de 170 THz. A situação em que as antenas estão posicionadas em cima do substrato de SiO_2 apresentou o melhor desempenho da transmissão de potência (além da situação em que as nanoantenas estão posicionadas no espaço livre que é o cenário ideal, mas com pouca aplicabilidade), esse cenário é mais realístico podendo ser aplicado por exemplo, em comunicação intra-chip.

A Figura 7 mostra a distribuição do módulo e fase do campo elétrico próximo, ($E = 20 \log_{10} (|\text{Re}(E_x)|)$), no plano $z = 25$ nm, dos nanoenlaces dipolo/dipolo (a, b, c), Yagi-Uda/dipolo (d, e, f) e Yagi-Uda/Yagi-Uda (g, h, i). As antenas receptoras estão posicionadas a $5 \mu\text{m}$ das antenas transmissoras, com $F = 170$ THz. As nanoantenas estão posicionadas no espaço livre para as figuras (a), (d) e (g), em cima de um substrato de SiO_2 para as figuras (b), (e) e (h), e em cima de um substrato de SiO_2 , mas separadas pelo espaço livre para as figuras (c), (f) e (i). Em todos os tipos de nanoenlaces mostrados nesta figura, pode ser visualizado o campo elétrico se propagando das antenas transmissoras para as antenas receptoras. 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 e dipolo, investigando a potência de transmissão para os nanoenlaces dos tipos Yagi-Uda/Yagi-Uda, Yagi-Uda/dipolo e dipolo/dipolo em três situações, a primeira com as nanoantenas posicionadas no espaço livre, a segunda com as nanoantenas em cima de um substrato truncado de SiO_2 , e a terceira com as nanoantenas em cima de um substrato truncado de SiO_2 , mas separadas pelo espaço livre. Os resultados mostraram que para os três enlaces, a situação em que as antenas estão posicionadas em cima do substrato de SiO_2 apresentou o melhor desempenho da transmissão de potência, podendo ser aplicado em comunicação intra-chip. Além disso os três enlaces podem operar com boas transmissão de potência em torno de 170 THz, o que é de grande importância para futuras aplicações em comunicação sem fio em nanoescala.

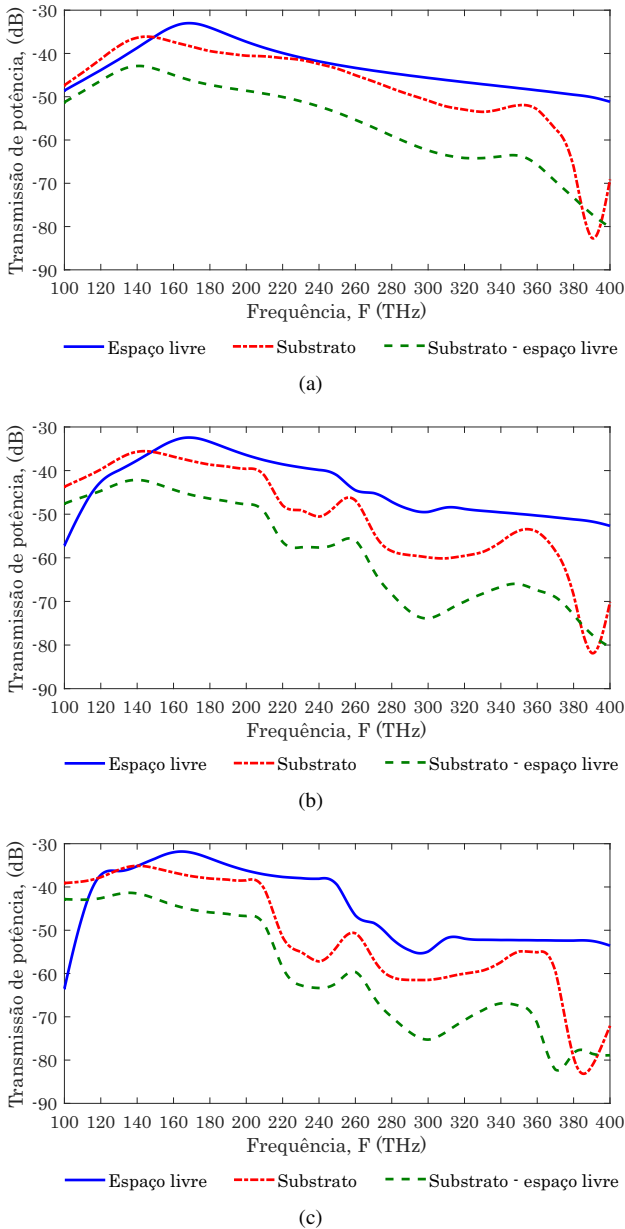


Fig. 6. Transmissão de potência versus frequência para os nanoenlaces dipolo/dipolo (a), Yagi-Uda/dipolo (b) e Yagi-Uda/Yagi-Uda (c), para os enlaces em três situações, a primeira com as antenas posicionadas no espaço livre, a segunda para as antenas em cima de um substrato de SiO_2 e a terceira com as antenas também em cima de um substrato de SiO_2 , mas separadas pelo espaço livre.

REFERÊNCIAS

- [1] L. Novotny and N. V. Hulst, "Antennas for light," *Nature Photonics*, pp. 83–90, Fevereiro 2011.
- [2] T. B. Susilo, S. S. Jehangir, M. I. Hussein, and A. Wahyudie, "A Plasmonic Nanoantenna Array for Solar Energy Applications," *2018 5th International Conference on Renewable Energy: Generation and Applications (ICREGA)*, pp. 181–182, Fevereiro 2018.
- [3] E. Cubukcu, N. Yu, E. J. Smythe, L. Diehl, K. B. Crozier, and F. Capasso, "Plasmonic laser antennas and related devices," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, pp. 1448–1461, Abril 2008.
- [4] V. Giannini, A. I. Fernández-Domínguez, S. C. Heck, and S. A. Maier, "Plasmonic nanoantennas: fundamentals and their use in controlling the radiative properties of nanoemitters," *Chemical Reviews*, pp. 3888–3912, Março 2011.
- [5] S. K. Patel and C. Argyropoulos, "Plasmonic nanoantennas: enhancing

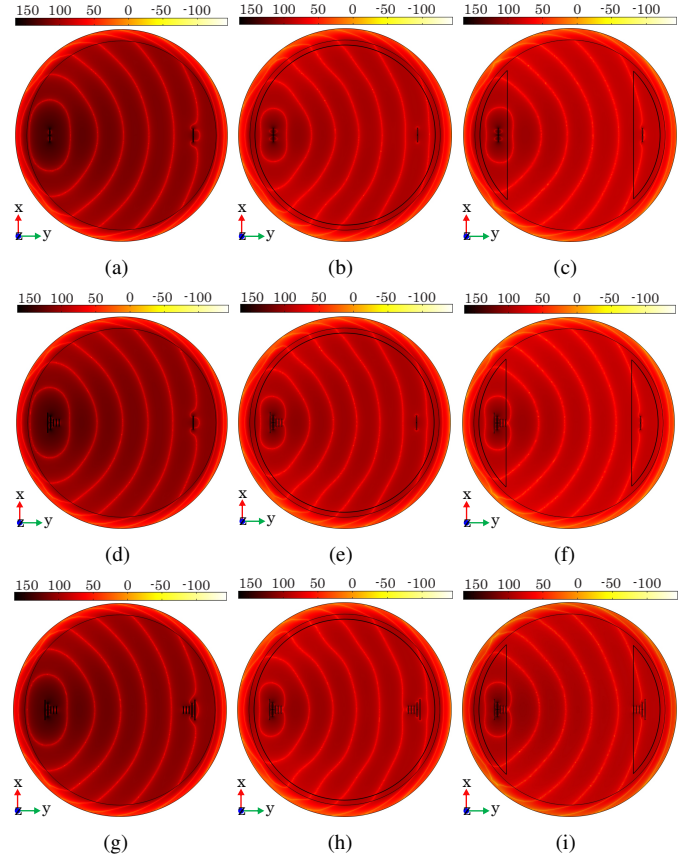


Fig. 7. Distribuição do módulo e fase do campo elétrico próximo ($(E = 20 \log_{10} (|\text{Re}(E_x)|))$), no plano $z = 25$ nm, dos nanoenlaces dipolo/dipolo (a, b, c), Yagi-Uda/dipolo (d, e, f) e Yagi-Uda/Yagi-Uda (g, h, i). As antenas receptoras estão posicionadas a $5 \mu\text{m}$ das antenas transmissoras, com $F = 170$ THz. As nanoantenas estão posicionadas no espaço livre para as figuras (a), (d) e (g), em cima de um substrato de SiO_2 para as figuras (b), (e) e (h), e em cima de um substrato de SiO_2 , mas separadas pelo espaço livre para as figuras (c), (f) e (i).

light-matter interactions at the nanoscale," *EPJ Applied Metamaterials*, pp. 1–15, Dezembro 2015.

- [6] A. A. C. Alves, M. C. Melo, J. J. Siqueira, F. Zanella, J. R. Mejía-Salazar and C. S. Arismar, "Plasmonic Nanoantennas for 6G Intra/Inter-Chip Optical-Wireless Communications," *2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT)*, pp. 1–4, Março 2018.
- [7] J. L. de Souza and K. Q. da Costa, "Broadband wireless optical nanolink composed by dipole-loop nanoantennas," *IEEE Photonics Journal*, pp. 1–8, Abril 2018.
- [8] A. Alù and N. Engheta, "Wireless at the nanoscale: optical interconnects using matched nanoantennas," *Physical Review Letters*, pp. 21390-4, Maio 2010.
- [9] G. Bellanca, G. Calò, A. E. Kaplan, P. Bassi, and V. Petruzzell, "Integrated vivaldi plasmonic antenna for wireless on-chip optical communications" *Optics Express*, pp. 16214–16227, Julho 2017.
- [10] M. Klemm, "Novel directional nanoantennas for single-emitter sources and wireless nano-links," *International Journal of Optics*, pp. 1–7, Abril 2012.
- [11] D. Dregely, K. Lindfors, M. Lippitz, N. Engheta, M. Totzeck, and H. Giessen, "Imaging and steering an optical wireless nanoantenna link," *Nature Communications*, pp. 4354–8, Julho 2014.
- [12] COMSOL Multiphysics 5.3a, COMSOL Inc. (<http://www.comsol.com/>).
- [13] K. Q. Da Costa and V. Dmitriev, "Radiation and absorption properties of gold nanodipoles in transmitting mode," *Microwave and Optical Technology Letters*, pp. 1–6, Janeiro 2015.
- [14] K. Q. Da Costa and V. Dmitriev, "Simple and efficient computational method to analyze cylindrical plasmonic nanoantennas," *International Journal of Antennas and Propagation*, pp. 1–8, Abril 2014.
- [15] C. A. Balanis, *Antenna theory-analysis and design*, Wiley-Interscience, third edition, 2005.