

Otimização de Geometrias de Nanoantenas Yagi-Uda Usando AGPSO Adaptativo *Fuzzy*

PittherN. dos Santos¹ e Karlo Q. da Costa²

Resumo - Neste trabalho estudamos a influência de quatro geometrias de nanoantenas Yagi-Uda em suas características de radiação. As quatro geometrias são formadas pela inserção de novos elementos, diferentes combinações dos elementos, diferentes espaçamentos e tamanhos dos mesmos. Utilizamos o Método dos Momentos (MoM) para análise eletromagnética e para determinação da radiação da antena. Depois utilizamos o método de otimização chamado AGPSO adaptativo *Fuzzy*, que é resultante da hibridização envolvendo o algoritmo genético (AG) e otimização por enxame de partículas (PSO). É utilizado um sistema *fuzzy* para adaptar o peso inercial ω e os coeficientes de aceleração $C1$ e $C2$, do PSO. Apresentamos os resultados de radiação, diretividade e ganho.

Palavras-Chave — Nanoantena Yagi-Uda, Algoritmo genético, PSO, Sistema *Fuzzy*, Método dos Momentos

Abstract— In this work, we study the influence of four Yagi-Uda nanoantenna geometries on its radiation characteristics. The four geometries are analyzed with the insertion of new elements, different combinations of elements, different spacing and sizes of them. We use the Moments Method (MoM) to analysis electromagnetics e determination of the radiation characteristics. Then we use the optimization method called adaptive *Fuzzy* GAPSO, which is the result of the hybridization involving Genetic Algorithm (GA) and Particle Optimization Swarm (PSO). The fuzzy system is used to adapt the inertial weight ω and the acceleration coefficients $C1$ and $C2$, of the PSO. We present the optimized results os radiation efficiency, directivity and gain.

Keywords — Nanoantenna Yagi-Uda, Genetic Algorithm, PSO, Fuzzy System, Method of Moments.

I - INTRODUÇÃO

As nanoantenas despertam grande interesse da comunidade científica devido às possibilidades de aplicação que estas apresentam em áreas como engenharia, biologia, química, informática, microscopia óptica e outras [1]. Este interesse se deve as inovações tecnológicas nas técnicas de fabricação de nanoestruturas, tais como a litografia e a fotolitografia – empregadas na produção de dispositivos plasmônicos [2].

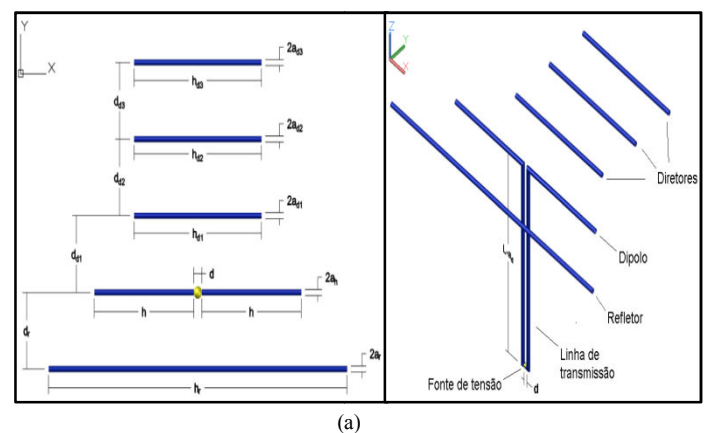
Diversas geometrias de nanoantenas já foram investigadas, tais como dipolos dobrados [3], antenas em formato T [4], loops [5] e cilíndricas [6-7]. Em todos esses trabalhos, os parâmetros geométricos das antenas foram projetados a fim de se obter o casamento de impedâncias entre as nanoantenas e suas respectivas linhas de transmissão.

Em [8], é projetada uma nanoantena diretiva Yagi-Uda cujos parâmetros geométricos foram otimizados por meio de um algoritmo genético a fim de maximizar a sua diretividade. O emprego da nanoantena Yagi-Uda, em conjunto com a otimização via algoritmo genético, gerou resultados superiores

as outras geometrias. Partindo do exposto, propõe-se a otimização de quatro modelos de nanoantenas Yagi-Uda. A primeira é uma clássica composta por cinco elementos cilíndricos de ouro, sendo um refletor, um dipolo e três diretores, onde o dipolo é alimentado por uma fonte de tensão. A segunda possui a mesma geometria do caso anterior, mas é conectada a uma linha de transmissão óptica (OTL) através do dipolo. A terceira é uma Yagi-Uda clássica combinada a uma espira retangular acima do dipolo, sendo este alimentado por uma fonte de tensão. A quarta é a mesma Yagi-Uda do caso anterior conectada a uma OTL. A otimização tem como objetivo obter geometrias que apresentem, máxima impedância de entrada, eficiência de radiação, ganho e diretividade dentro da faixa de frequência de 100-400 THz, os mesmos são calculado a partir da variação do espaçamentos entre os elementos, comprimentos dos elementos e presença/ausência de linha de transmissão e da espira retangular, sendo que essas variações foram modelada pelo o método dos momentos (MoM) e otimizada usado AGPSO adaptativo *fuzzy* visando a obtenção de valores ótimos das características de radiação.

II-DESCRIÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO DAS NANOANTENAS

O problema de radiação eletromagnética das nanoantenas consiste em determinar as correntes induzidas em seus condutores e seus respectivos campos espalhados E_e , devido a um campo de excitação E_i proveniente de uma fonte de tensão localizada no centro do dipolo ou na OTL [9]. Os parâmetros geométricos das nanoantenas são: para o dipolo, comprimento do braço (h), raio (a_h) e *gap* (d); para o refletor, comprimento (h_r), raio (a_r) e distância ao dipolo (d_h); para os diretores, comprimento (h_{dn}), raio (a_{dn}) e distância ao diretor anterior (d_n), sendo $n=1, 2$ e 3 ; para a OTL, o comprimento (L) e o raio (a_l); e para a espira, o comprimento (h_e), largura (w_e), altura (z_e) e raio (a_e). Além destes, há a fonte de tensão V_f , como ilustrado na Fig. 1.



III - Método Híbrido AGPSO-Adaptativo *Fuzzy*

A otimização da geometria da nanoantena requer a determinação do ganho, diretividade, eficiência e impedância de entrada da nanoantena a partir do campo elétrico E_e obtido via MoM. Esse cálculo, devido à sua alta complexidade, alto número de dimensões envolvidas e elevado custo computacional, torna proibitivo o uso de métodos diretos e/ou exaustivos de otimização [15].

Para realizar a otimização, empregou-se o método híbrido AGPSO Adaptativo *Fuzzy*, desenvolvido por [15]. O AGPSO Adaptativo *Fuzzy* é composto por três métodos diferentes que operam em conjunto para buscar uma solução ótima para problemas de otimização, os quais são: algoritmo genético (AG), sistema de inferência *fuzzy* (SIF) e otimização por enxame de partículas (PSO).

Inicialmente, o AGPSO Adaptativo *Fuzzy* cria uma população de N indivíduos, em que cada indivíduo é representado por um vetor com m valores; os indivíduos representam as soluções candidatas, e os vetores representam os parâmetros de cada solução. Em seguida, define-se um número máximo n de iterações, o qual será o critério de parada do AGPSO Adaptativo *Fuzzy*, define-se a função objetivo (função que avalia o custo dos indivíduos), o espaço de busca e as restrições da otimização.

Feito isso, o AGPSO Adaptativo *Fuzzy* executa iterativamente, em sequência, o AG ou SIF e o PSO, gere uma nova população de indivíduos a cada iteração, conforme mostra o fluxograma na Fig. 2.

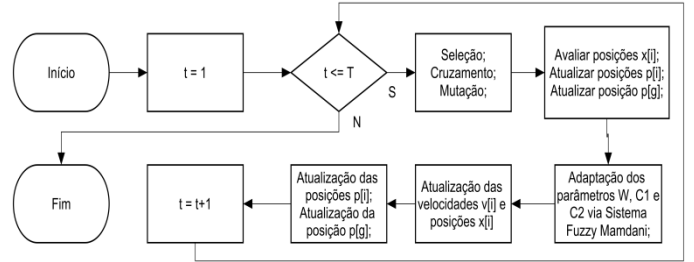
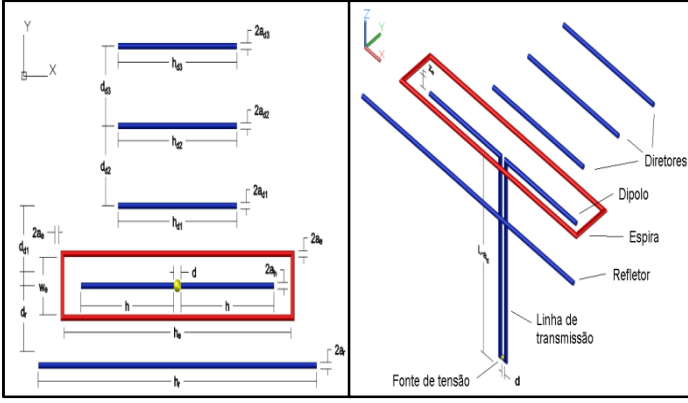


Figura 2 - Fluxograma do AGPSO Adaptativo *Fuzzy*.

A. Algoritmo Genético

O algoritmo genético (AG) é uma técnica metaheurística inspirada na seleção natural darwiniana, no qual as soluções candidatas são representadas por indivíduos, nos quais os vetores de parâmetros são codificados na forma de cromossomos, os quais são formados pelos próprios parâmetros codificados na forma de genes. O AG realiza, iterativamente, processos de seleção, cruzamento e mutação nos indivíduos a fim de gerar indivíduos com parâmetros otimizados. O processo de seleção consiste em selecionar, dentre a população de indivíduos, aqueles que apresentam a melhor avaliação, de acordo com a função objetivo aplicada, enquanto os demais são descartados. A seleção pode ser feita por *ranking* [16], roleta [17] ou torneio [18], e o critério de seleção pode ser tanto um valor limiar de custo quanto uma porcentagem da população.

O processo subsequente de cruzamento consiste na formação de novos indivíduos a partir da recombinação de genes entre indivíduos existentes – denominados progenitores – a fim de obter melhores soluções pela combinação de características favoráveis das soluções existentes. Os principais métodos de cruzamento empregados são: cruzamento simples [19], cruzamento aritmético [20], e cruzamento uniforme [21].



(b)

Figura 1-Geometrias das quatro nanoantenas Yagi-Uda consideradas, (a) Yagi-Uda clássica e Yagi-Uda clássica conectada a uma linha de transmissão, (b) Yagi-Uda clássica combinada a uma espira retangular, alimentada por uma fonte de tensão (esquerda) e conectada a uma linha de transmissão (direita).

O metal empregado para constituir a antena é o ouro, cuja permissividade ϵ_r na faixa óptica ($\lambda > 550$ nm) é calculada pelo modelo de Lorentz-Drude [10], e impedância superficial Z_s . Com os parâmetros da geometria, da fonte de tensão e do material, aplica-se a condição de contorno do campo elétrico na superfície do metal, dada pela equação 1 [11]:

$$(\vec{E}_e + \vec{E}_t) \cdot \vec{a}_t = Z_s \cdot I \quad (1)$$

onde \vec{a}_t é o vetor unitário tangencial da superfície do condutor e I é a corrente em um determinado ponto sobre a nanoantena. A impedância de superfície Z_s é determinada, considere o condutor um guia de onda cilíndrico no modo TM_{01} [12], por ser o modo fundamental do problema para a faixa de frequência de 100-400 THz, são dadas por dada pelas equações (2)(3):

$$Z_s = \frac{T \cdot J_0(Ta)}{2\pi \cdot a \cdot j\omega \cdot \epsilon \cdot J_1(Ta)} \quad (2)$$

$$T = k_0 \sqrt{\epsilon - \left(\frac{\beta}{k_0}\right)^2} \quad (3)$$

onde $k_0 = \omega\sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$, J_0 e J_1 são as funções de Bessel de primeiro tipo de ordem zero e um, respectivamente, j é a unidade imaginária, ω é a frequência angular de operação, β é a constante de propagação na guia, k_0 é a constante de propagação no ar, μ_0 é a permeabilidade magnética do ar, e ϵ_0 a permissividade elétrica do ar. Substituindo a equação integral do campo elétrico E_e [13] em (1), aplica-se o MoM com funções base senoidal, funções teste pulso retangular e a aproximação linear da corrente [14], obtêm-se o seguinte sistema de equações:

$$V_m = Z_s I_m \Delta + \sum_{n=1}^{N-1} Z_{mn} I_n, \quad m = 1, 2, \dots, N-1 \quad (4)$$

onde V_m é a tensão em um segmento m da nanoantena, os termos Z_{mn} representam a impedância mútua entre os pontos m e n . O sistema em (5) é solucionado a fim de encontrar a distribuição de corrente na nanoantena. Com essa distribuição, é possível determinar o campo E_e e, a partir deste, determinar o ganho, a diretividade, a eficiência e a impedância de entrada da nanoantena.

O processo final de mutação modifica, com uma probabilidade arbitrária, alguns parâmetros dos indivíduos, a fim de gerar e manter a diversidade na população, e melhorar a exploração do espaço de busca. A mutação aleatória é o principal método de mutação empregado, e consiste em escolher aleatoriamente os indivíduos e, dentre estes, os genes a serem modificados, os quais assumirão outros valores também aleatórios [22].

B. Sistema de Inferência Fuzzy (SIF)

São sistemas que empregam lógica difusa (*fuzzy*) para realizar inferências a partir de variáveis linguísticas, utiliza como matrizes de regras para fornecer uma resposta do sistema às entradas fornecidas. Tais sistemas são usados para lidar com parâmetros com margem de incerteza considerável e/ou cuja representação matemática é complexa [15]. Tais sistemas são formados por: variáveis de entrada, funções de pertinência, matriz de regras e variáveis de saída. As variáveis de entrada são grandezas as quais o SIF recebe para realizar as inferências. As funções de pertinência estabelecem uma relação entre uma dada variável de entrada/saída e suas variáveis linguísticas, determine o quanto a variável de entrada é pertinente a cada conjunto *fuzzy* definido por estas variáveis [23]. A matriz de regras estabelece as relações entre as variáveis de entrada e variáveis de saída, a partir de suas variáveis linguísticas. A partir dos valores de pertinência das variáveis de entrada, a matriz de regras infere os valores de pertinência das variáveis de saída. O método de inferência empregado nessa determinação varia de acordo com a classificação do SIF, sendo que as duas classes de SIF mais empregadas são os sistemas Mamdani [24] e Tagaki-Sugeno [25]. As variáveis de saída recebem os valores de pertinência inferidos pelo sistema e, por meio de suas funções de pertinência, determinam os valores reais correspondente aos valores de pertinência recebidos, os quais, por fim, são retornados para a saída do SIF. A partir desses valores reais, é possível realizar o controle e ajuste adaptativo de outros sistemas associados ao sistema *fuzzy* [23].

No caso do AGPSO adaptativo *Fuzzy*, o SIF é da classe Mamdani e é responsável por ajustar os coeficientes de aceleração C_1 e C_2 —os quais são as variáveis de saída do SIF—tendo como variáveis de entrada: o percentual de iterações concluídas; e a distância euclidiana normalizada, definida pela razão entre a média das distâncias entre o indivíduo com melhor avaliação e os demais indivíduos e a distância entre o indivíduo mais distante e o indivíduo com melhor avaliação.

C. Enxame de Partículas (PSO)

O enxame de partículas (PSO) é uma metaheurística inspirada no comportamento de bando de pássaros em busca de alimento [26]. As soluções candidatas são representadas por partículas, nas quais os vetores de parâmetros das soluções são codificados na posição que cada partícula ocupa no espaço de busca. As partículas $i = 1 \dots n$ são descritas pela posição atual \vec{x}_i que ocupam no espaço de busca, por sua velocidade \vec{v}_i e pela melhor posição individual \vec{g}_i [15].

O PSO, inicialmente, determina as melhores posições individuais \vec{g}_i , por meio da avaliação da solução contida em cada partícula, e a melhor posição global \vec{g}_b como o \vec{g}_i com melhor avaliação. Em seguida, atualiza-se a velocidade \vec{v}_i de cada partícula a partir da equação 5 [26]:

$$\vec{v}_i = W * \vec{v}_i + rand * C_1 * \vec{g}_i + rand * C_2 * \vec{g}_b \quad (5)$$

onde W é o coeficiente de inércia da partícula, e quantifica a resistência que a partícula apresenta a mudanças em sua

velocidade; C_1 é o coeficiente de aceleração individual, e quantifica a tendência da partícula a se direcionar à sua melhor solução individual; C_2 é o coeficiente de aceleração social, e quantifica a tendência da partícula a se direcionar à melhor solução global; e $rand$ é uma variável aleatória com distribuição uniforme no intervalo $[0,1]$ [27]. Com a velocidade atualizada, realiza-se a etapa final de deslocamento das partículas, conforme a equação 6 [26]:

$$\vec{x}_i = \vec{x}_i + \vec{v}_i \quad (6)$$

IV – RESULTADOS

Com base na teoria apresentada acima foi desenvolvido um código MoM no software MatLab para calcular os seguintes resultados: impedância de entrada, diagrama de radiação, eficiência de radiação, ganho e diretividade das quatro nanoantenas modelada pelo método dos momentos e otimizado pelo AGPSO adaptativo *fuzzy*.

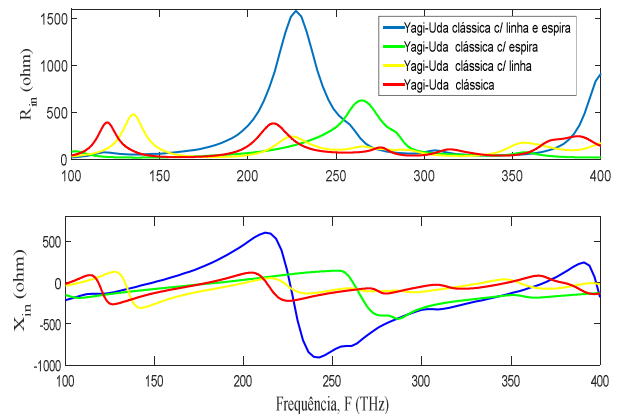


Figura 3 –Variação da impedância de entrada das quatro nanoantena Yagi-Uda da frequência.

O resultado da impedância de entrada, da nanoantena Yagi-Uda clássica conectada a uma linha de transmissão e combinado a uma espira retangular, mostram que acoplamento eletromagnético entre a nanoantena Yagi-Uda clássica com a inserção da linha de transmissão e da espira retangular modifica em maior grau a impedância de entrada da nanoantena em comparação com as demais antenas. É observado que as nanoantena Yagi-Uda clássica e Yagi-Uda clássica conectado a uma linha de transmissão alcançaram maior valor de impedância na faixa de frequência $F= 100$ à 150 THz, já a nanoantena Yagi-Uda clássica combinado a uma espira retangular e Yagi-Uda clássica conectado a uma linha de transmissão e combinado a uma espira retangular alcançaram maior valor de impedância na faixa de frequência $F= 180$ à 280 THz. As frequências de ressonâncias decaem levemente da parte imaginária como mostra a fig.3.

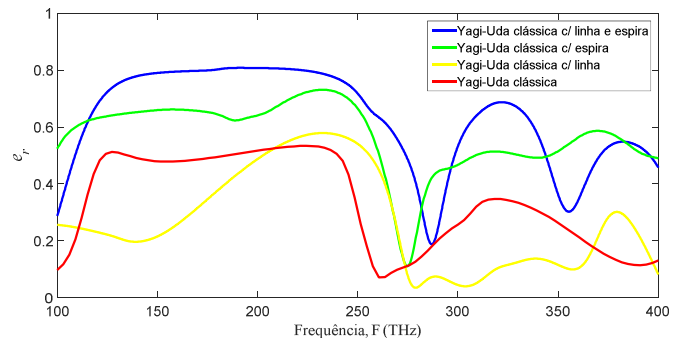


Figura 4 – Eficiência de radiação e_r das quatro nanoantenas Yagi-Uda otimizada.

Na Fig. 4 mostra os resultados da eficiência de radiação (e_r) versus frequência calculada por MoM e otimizado pelo AGPSO adaptativo *fuzzy*. A otimização por AGPSO adaptativo *fuzzy* se mostrou bem eficaz quando aplicado para projetar nanoantenas, para o nosso trabalho obteve resultados significativos com eficiência $e_r=0,80$ para nanoantena Yagi-Uda clássica conectado a uma linha de transmissão e combinado a uma espira retangular, $e_r=0,73$ para nanoantena Yagi-Uda clássica combinado a uma espira retangular, $e_r=0,57$ para nanoantena Yagi-Uda conectada a uma linha de transmissão, $e_r=0,53$ para nanoantena Yagi-Uda. É observado com a inserção de novos elementos (linha e espira) na nanoantena Yagi-Uda clássica juntamente com a otimização dos espaçamentos e comprimentos dos elementos pelo algoritmo de otimização ocorreu um aumento significativo na eficiência de radiação da nanoantena com mostra a Fig.4.

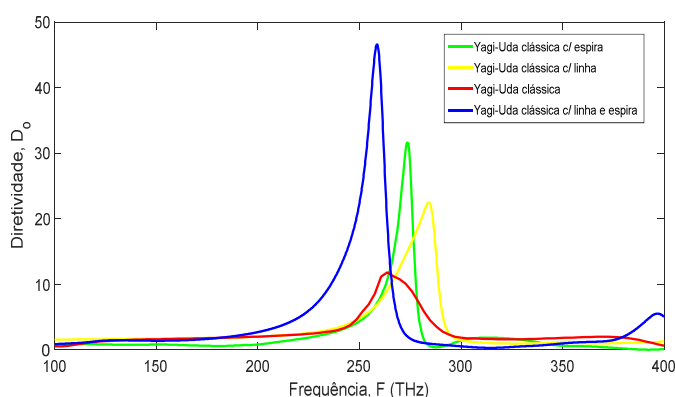


Figura 5 – Diretividade D_0 das quatro nanoantenas Yagi-Uda otimizada.

Na Fig. 5 mostra uma análise final da diretividade das quatro nanoantenas Yagi-Uda na direção $+y$. No caso Yagi-Uda clássica conectada a uma linha de transmissão e combinado a uma espira retangular, temos um pico de $D_0=46,5$ próximo 258 THz. Pela análise da tabela verificamos que as nanoantenas com inserção dos elementos linha de transmissão e espira retangular ocorreu um aumento da diretividade comparado com a nanoantena Yagi-Uda clássica.

TABELA 1 – FREQUÊNCIA DE RESSONÂNCIA E VALORES MÁXIMOS DA DIRETIVIDADE DAS QUATRO NANOANTENAS

Nanoantena	Frequência (THz)	D_0
Yagi-Uda clássica	263,6	11,8
Yagi-Uda clássica c/ linha	284,3	22,4
Yagi-Uda clássica c/ espira	273,5	31,7
Yagi-Uda clássica c/ linha e espira	258,6	46,5

Pode-se observar na Fig. 6 que o processo AGPSO adaptativo *fuzzy*, aplicado na otimização do projeto da nanoantena Yagi-Uda clássica, obteve resultados bastante significativos para o ganho, aumentando de $G_0=5$ para 7.6 com adição da linha de transmissão, aumento para 7.8 com inserção da espira retangular, e aumento para 9,6 a inclusão da linha e espira.

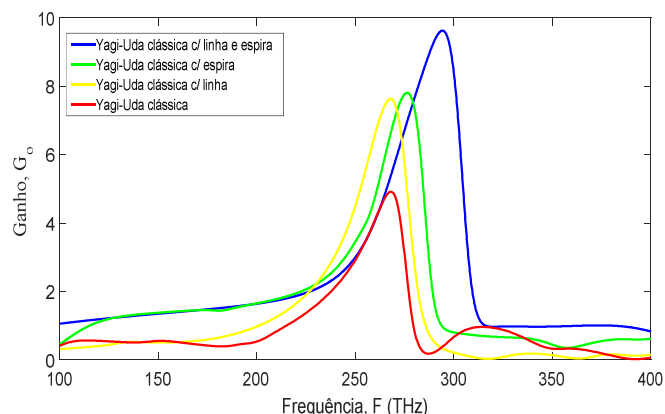


Figura 6-Ganho G_0 das quatro nanoantenas Yagi-Uda otimizadas.

No caso da nanoantena Yagi-Uda conectada a uma linha de transmissão produz um ganho $G_0=7,6$ perto da $F=267$ THz, mais uma elevada diretividade D_0 perto $F=258$ THz (Fig.5) e menor eficiência e_r próximo de $F=280$ THz (Fig. 4), e notamos que o pico máximo do ganho são reduzido e deslocados para frequências menores com a retirada da linha transmissão e da espira retangular ou seja a nanoantena Yagi-Uda clássica torna-se menos diretiva com a retirada dos elementos.

V - CONCLUSÕES

Os resultados mostraram, em geral, que a inserção de novos elementos na geometria da nanoantena Yagi-Uda clássica produzem mudanças mais significativas na diretividade e no ganho do que da geometria simples na antena Yagi-Uda clássica. Além disso, observamos que a variação do espaçamento dos elementos e a variação do comprimento dos elementos modificam principalmente a magnitude da diretividade e ganho. Outra conclusão importante obtida é que, em uma nanoantena Yagi-Uda, o ganho máximo não ocorre necessariamente na mesma frequência da máxima diretividade. Isso significa que o ponto de operação depende de qual característica, diretividade ou ganho, é mais importante em uma determinada aplicação.

Devido ao método AGPSO adaptativo *fuzzy* ser capaz de otimizar qualquer função objetivo com poucas restrições, o mesmo pode ser utilizado para otimizar outros arranjos de antena, como as antenas Quasi Yagi-Uda e Log-Periódica, por exemplo. Isso torna o método AGPSO adaptativo *fuzzy* uma ferramenta extremamente versátil para a modelagem/otimização de nanoantenas e para a otimização de problemas complexos em engenharia.

Na próxima etapa de nossa pesquisa, pretendemos aplicar uma fonte mais realística na geometria do tipo feixe gaussiano e estudar as características de absorção.

REFERÊNCIAS

- [1] K. Q. da Costa, and V. Dmitriev, "Numerical Analysis of Cylindrical Nanodipoles by Linear Moment Method", *International Microwave and Optoelectronics Conference, IMOC* 2011.
- [2] W. Zhu, M. G. Banaee, D. Wang, Y. Chu, e K. B. Crozier, "Lithographically Fabricated Optical Antennas with Gaps Well Below 10 nm", *Small*, vol. 7, No. 13, pp. 1761-1766, 2011.
- [3] H. Iizuka, N. Engheta, H. Fujikawa, e K. Sato, "Arm-edge conditions in plasmonic folded dipole nanoantennas", *Optics Express*, vol.19, No. 13, pp. 12325, Junho 2011.

- [4] Y. Sachkou, A. Eryieuski, e A. V. Lavrinenko, "Impedance Conjugate Matching of Plasmonic Nanoantennas in Optical Nanocircuits", *53rd International Symposium ELMAR*, Setembro 2011, Zadar, Croatia.
- [5] A. Locatelli, "Peculiar Properties of Loop Nanoantennas", *IEEE photonics society*, vol. 3, No. 5, pp. 1943-0655, Outubro 2011.
- [6] J.S. Huang, T. Feichtner, P. Biagioni, e B. Hecht, "Impedance Matching e Emission Properties of Nanoantennas in an Optical Nanocircuit," *Nano Letters*, vol. 9, No. 5, pp. 1897-1902, Abril 2009.
- [7] A. Alúe N. Engheta, "Input Impedance, Nanocircuit Loading, e Radiation Tuning of Optical Nanoantennas", *Physical Review Letters*, vol. 101, pp. 043901, Julho 2008.
- [8] F. Obelleiro, J. M. Taboada, D. M. Solís, L. Bote. "Directive antenananoacoplador to plasmonic gap waveguides". *Optics Letters*, vol. 38, n. 10, pp. 1630-1632, Maio 2013.
- [9] J. L. de Souza, K.Q. da Costa. "Análise da Impedância de Entrada de Nanodipolos Cilíndricos Utilizando o Método dos Momentos". *XX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações – SBrT'12*, Setembro 2012.
- [10] K. Q. da Costa, V. Dmitriev, "Simple and Efficient Computational Method to Analyze Cylindrical Plasmonic Nanoantennas", *International Journal of Antennas e Propagation*, Vol. 2014, Article ID 675036, 8 pages, 2014.
- [11] COMSOL, *COMSOL Multiphysic 5.2*, <http://www.comsol.com>
- [12] Janilson L. de Souza, Karlo Q. da Costa, Victor Dmitriev Felipe Bamberg, "Broadband Dipole-Loop Combined Nanoantenna Fed by Two-Wire Optical Transmission Line", *International Journal of Antennas e Propagation*, Vol. 2017, Article ID 4903747, 13 pages, 2017.
- [13] L. Novotny, B. Hecht, *Principles of Nano-Optics*, 2ªed. New York: Cambridge, 2012.
- [14] K. Q. da Costa, e V. Dmitriev, "Software based on MoM model to analyze electromagnetic transients in grounding systems", *International Conference on Grounding e Earthing & 2nd International Conference on Lightning Physics e Effects*, Novembro 2006.
- [15] Michalewicz, Z. e Schoenauer, M. *Evolutionary Algorithms for Constrained Parameter Optimization Problems*. *Evolutionary Computation*, 4, 1-32, 1996.
- [16] Holle J.H. *Genetic Algorithms e Adaptation*. In: Selfridge O.G., Rissle E.L., Arbib M.A. (eds) *Adaptive Control of Ill-Defined Systems*. NATO Conference Series (II Systems Science), vol.16., Springer, Boston, MA, 1984.
- [17] Miller, B. L. e Goldberg, D. E., *Genetic algorithms, tournament selection, and the effects of noise*, *Complex Syst*9, p.193-212, 1995.
- [18] Higuchi T., Tsutsui S e Yamamura M. *Theoretical Analysis of Simplex Crossover for Real-Coded Genetic Algorithms*. In: Schoenauer M. et al. (eds) *Parallel Problem Solving from Nature*. PPSN VI. PPSN 2000. Lecture Notes in Computer Science, vol 1917. Springer, Berlin, Heidelberg, 2000.
- [19] T. Yalcinoz, H. Altun e M. Uzam, "Economic dispatch solution using a genetic algorithm based on arithmetic crossover," 2001 IEEE Porto Power Tech Proceedings (Cat. No.01EX502), Porto, Portugal, 2001, pp. 4 pp. vol.2.
- [20] W. M. Spears e K. D.D. Jong. "On the virtues of parametrized uniform crossover". [S.1], 1995;
- [21] Hesser, J. e Manner, R. (1990). Towards an optimal mutation probability for genetic algorithms. In *Parallel Problem Solving from Nature, PPSN I*.
- [22] L.A.Zader, "Fuzzy logic, neural networks, and soft computing". *Communications of the ACM, Association for Computing Machinery, Inc.*, v. 37, n.3, p. 77-85, 1994.
- [23] E. H. Mamdani, e S. Assilian, "An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller". *International journal of man-machine studies*, Elsevier v.7, n.1, p. 1-13, 1975.
- [24] T. Tagaki, M. Sugeno, "Fuzzy identification of systems e its applications to modeling e control". *IEEE transactions on systems, man, e cybernetics*. IEEE, n.1, p. 116-132, 1985.
- [25] R. Eberhart, J. Kennedy, "A new optimizer using particle swarm theory". In: *IEEE Micro Machine e Human Science, 1995, MHS'95, Proceedings of the Sixth International Symposium on*, p. 39-43.
- [26] C. W. Reynolds, "Flocks, herds e schools: A distributed behavioral model". *ACM SIGGRAPH computer graphics*, ACM, v. 21, n.4, p. 25-34, 1987.