

## OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO APLICADA AO PROJETO DE ANTENAS FILAMENTARES

### MULTIOBJECTIVE OPTIMIZATION APPLIED TO THE DESIGN OF FILAMENT ANTENNAS

Ricardo Martins Ramos<sup>1</sup>, Rodney Rezende Saldanha<sup>2</sup>, Ricardo Hiroshi Caldeira Takahashi<sup>3</sup>, Fernando José Silva Moreira<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Faculdade de Ciências Exatas de Pedro Leopoldo – UNIPEL

Depto. Ciência da Computação

R. Teófilo Calazans de Barros, 100 – 33600-000 – Pedro Leopoldo – MG – Brasil

e-mail: [ramos@cpdee.ufmg.br](mailto:ramos@cpdee.ufmg.br)

<sup>2</sup>Universidade Federal de Minas Gerais

Depto. De Eng. Elétrica, Depto. de Matemática, Depto. De Eng. Eletrônica

Av. Antônio Carlos, 6627 – 31270-010 – Belo Horizonte – MG – Brasil

e-mails: [rodney@cpdee.ufmg.br](mailto:rodney@cpdee.ufmg.br); [fernando@eee.ufmg.br](mailto:fernando@eee.ufmg.br); [taka@mat.ufmg.br](mailto:taka@mat.ufmg.br)

#### ABSTRACT

This work presents a multiobjective genetic algorithm (RBMGA) with a novel feature: the real biased crossover operator. This operator takes into account the function values of the two *parents*, defining a non-uniform probability for the new individuals' locations that biases them towards the best parents' locations. The procedure leads to better estimates of the *Pareto-set* during the multiobjective search. The novel algorithm is further applied to the optimization of a Yagi-Uda antenna, where the element's length and separation between elements are varied. The RBMGA provides an antenna geometry with superior performance than those presented in the available literature.

**Keywords:** Genetic Algorithms, Optimization Methods, Antennas.

#### RESUMO

Esse trabalho apresenta a otimização multiobjetivo de antenas Yagi-Uda, utilizando-se para tanto o Algoritmo Genético Multiobjetivo Real Polarizado (RBMGA – Real Biased Multiobjective Genetic Algorithm) que apresenta uma nova característica: o operador cruzamento polarizado. A utilização deste algoritmo leva a uma melhor estimativa do Conjunto Pareto-Ótimo durante a busca multiobjetivo. Para a otimização, utiliza-se a variação dos comprimentos dos elementos e dos distanciamentos entre os mesmos, dentro de uma faixa de operação pré-estabelecida. Como resultado, obtivemos antenas cuja geometria possui desempenho superior àquelas encontradas na literatura disponível.

**Palavras-Chave:** Algoritmos Genéticos, Métodos de Otimização, Antenas

#### 1 - INTRODUÇÃO

O projeto ótimo de antenas têm atraído a atenção de vários pesquisadores nas últimas décadas; especialmente para aplicações sem fio, que demandam um espectro de frequências relativamente grande além de uma faixa de frequências de funcionamento que exige que os parâmetros estejam dentro de certos limites dentro dessa faixa.

Geralmente, a otimização tinha como objetivo diretividade máxima e casamento de impedâncias, aliado à requisitos de níveis específicos de emissões de energia pelos lóbulos laterais. Um amplo e variado conjunto de técnicas de otimização têm sido aplicados no projeto de antenas filamentosas[1-4]. Para exemplificação, em [1] métodos determinísticos foram utilizados para que se alcançasse somente ganho máximo, enquanto que em [2] foi objetivado além do ganho, um casamento de impedância, com uma dada linha de transmissão. Pela relativa simplicidade geométrica e a grande variedade de medidas e resultados disponíveis na literatura, a otimização de antenas filamentosas foi empregada nesse trabalho.

Devido à quantidade de variáveis de otimização (especialmente para antenas de vários elementos) e

restrições impostas sob as características elétricas das antenas, uma boa estratégia para o projeto de antenas filamentosas pode ser a utilização de técnicas que levam em consideração vários objetivos simultaneamente, em particular pelo fato da sensibilidade das características das antenas com a variação da frequência ao longo da banda de operação.

Isso sugere então a aplicação técnicas multiobjetivo, não consideradas nos trabalhos anteriores [1- 4].

A área da otimização multiobjetivo utilizando os algoritmos genéticos têm atraído a atenção de vários pesquisadores nos últimos anos. Esse artigo apresenta a aplicação de um algoritmo genético multiobjetivo na otimização de antenas. Tal algoritmo ainda apresenta uma nova característica: o cruzamento polarizado, isto é, uma característica que produz novos indivíduos que possuem uma maior probabilidade de se situarem mais próximos ao indivíduo gerador que possui melhor desempenho. Isso faz com que o (RBMGA) [5] alcance um conjunto Pareto-Ótimo com aprimorado esforço computacional e melhor resolução. Para o problema em questão, a otimização de uma antena Yagi-Uda, o RBMGA foi aplicado com

sucesso, levando a antenas de desempenho superior às aquelas encontradas na literatura [1- 4].

## 2 - PROBLEMA MULTIOBJETIVO

O problema multiobjetivo pode ser definido com segue. Dado um conjunto de funções objetivo a ser minimizado,  $f_i$ ,  $i = 1, \dots, m$ , poderá ser encontrado um conjunto  $P$  de soluções que satisfaçam :

$$P = \{ x \in F \mid \text{não existe } y \in F \text{ tal que } f(y) \leq f(x) \text{ e } f(y) \neq f(x) \}, \quad (1)$$

no qual  $F$  denota o conjunto de busca viável. O conjunto  $P$  contém as *soluções eficientes* do problema, e é chamado de *Conjunto Pareto-Ótimo*.

No presente artigo, as funções objetivo são conjuntos de especificações para a antena, objetivando uma maximização da diretividade, razão frente-costas e casamento de impedâncias; e a minimização dos ângulos de meia potência nos planos E e H, em três frequências diferentes através da faixa de operação, como será detalhado na Seção IV.

## 3 - ALGORITMO GENÉTICO MULTIOBJETIVO REAL POLARIZADO

No presente trabalho, uma nova característica para o cruzamento será aplicada para a construção do algoritmo genético multiobjetivo. O operador utiliza informações sobre a diferença entre os valores de retorno das funções objetivo dos dois indivíduos que compõe o par selecionado, na geração de novos indivíduos. Essa medida pode ser interpretada como “*long-term gradient*”. Como a falta de informações sobre o gradiente é a causa primária da baixa eficiência computacional, o novo operador leva a um algoritmo mais eficiente. O Conjunto Pareto-Ótimo é encontrado com menor esforço computacional e com melhor resolução.

O algoritmo aplicado é descrito como segue. Inicialmente a população é dividida em dois grupos, e para cada par formado, é verificada a ocorrência do cruzamento. Seja  $J(x)$  o valor de retorno da função objetivo do indivíduo  $x$ , considere os vetores  $x_1$  e  $x_2$  representando dois indivíduos, de forma que  $J(x_2) < J(x_1)$ . A operação de cruzamento polarizado é definida como:

$$x_g = \alpha x_1 + (1 - \alpha) x_2 \quad (2)$$

com  $\alpha$  escolhido no intervalo  $[-0.1; 1.1]$ , de acordo com a distribuição de probabilidades definida por:

$$\alpha = 1.4\beta_1\beta_2 - 0.2 \quad (3)$$

onde  $\beta_1$  and  $\beta_2$  são variáveis aleatórias com distribuição de probabilidades uniforme dentro do domínio definido  $[0; 1]$ . Tais condições são de tal forma que determinam uma distribuição de probabilidades quadrática para  $\alpha$ .

Somente um dos indivíduos gerados será fruto de cruzamento polarizado, caso este venha a ocorrer. O outro

sempre será escolhido sem polarização. Os outros operadores são conforme definidos por [6,7] em seus respectivos trabalhos.

No caso de um indivíduo sair da região admissível, o método da reflexão será aplicado para forçar os indivíduos a para dentro o espaço viável [8]. Para a reflexão, no limite inferior ( $x_L$ ), a operação é definida como:

$$x_r = x_L + |x - x_L| \quad (4)$$

onde  $x$  é o indivíduo fora da região admissível e  $x_r$  representa o indivíduo resultante após a reflexão. Para o limite superior ( $x_U$ ):

$$x_r = x_U - |x - x_U| \quad (5)$$

O operador mutação também poderá ser aplicado conforme probabilidade de ocorrência. Neste caso, a operação é definida por  $\delta + x$ , onde  $x$  representa o indivíduo dentro da região admissível e o vetor  $\delta$  é definido como:

$$\delta_i = 0.05 \beta_i (x_r)_i \quad (6)$$

em que  $\beta_i$  representa um número aleatório com distribuição Gaussiana, média zero, e variância igual a um e  $i$  mostra que o vetor é diferente a cada mutação. O vetor  $x_r$  é o vetor de range entre os limites mínimo ( $x_L$ ) e máximo ( $x_U$ ).

## 4 - OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO DA ANTENA YAGI-UDA

Nesta seção, mostraremos com o algoritmo genético multiobjetivo será aplicado à otimização de uma antena Yagi-Uda de seis elementos, como ilustrado na Fig. 1. O elemento centrado na origem é o refletor, seguido pelo elemento excitador, alimentado pelo centro e os quatro diretores. As distâncias entre os elementos (5 no total) e os comprimentos de cada um dos elementos são os parâmetros a serem otimizados. O raio utilizado para todos os elementos é igual a  $0.003377 \lambda$ .

As especificações de projeto a respeito do Diagrama de Radiação da antena são as maiores diretividade e razão frente-costas possíveis, com os ângulos de meia potência mais estreitos nos planos E e H. A resistência de entrada deverá ter o valor o mais próximo possível de  $50 \Omega$ . Estas imposições são para três frequências diferentes (inferior, central e superior), numa largura de banda de 5%, cuja frequência central é de 300 MHz.

As características elétricas da antena, necessárias para atender aos objetivos, serão analisadas numericamente através do Método de Momentos (MoM) [9]. Para a presente geometria, a densidade de corrente elétrica no  $p$ -ésimo elemento ( $p=1, \dots, 6$ ) pode ser expandida de acordo com [9]:

$$I_p(z) = \sum_{n=1}^N I_{np} \cos \left[ (2n-1) \frac{\pi z}{L_p} \right], \quad (7)$$

onde  $N$  é um número inteiro ímpar e  $L_p$  é o comprimento do  $p$ -ésimo elemento. Neste trabalho, foi adotado para todos os elementos um  $N = 8$ . A expansão em (7) é escolhida de forma a que  $I_p(z)$  vá a zero nas extremidades dos elementos, forçando a condição de continuidade [9]. Também, note-se que a variação azimutal está sendo desprezada, pelo fato de o diâmetro ser muito pequeno quando comparado ao comprimento de onda. A equação integral a ser avaliada é dada por [9]:

$$E_z(x, y, z) = -j \frac{\eta}{4\pi k} \sum_{p=1}^{D+2} \sum_{n=1}^N I_{np} \int_{-L_p/2}^{L_p/2} G(x, y, z | x', y', z') \cos \left[ (2n-1) \frac{\pi z'}{L_p} \right] dz' \quad (8)$$

onde

$$G(x, y, z | x', y', z') = \frac{e^{-jkr}}{r^5} \left[ (1 + jkr)(2r^2 - 3a^2) + k^2 a^2 r^2 \right] \quad (9)$$

$$r = \sqrt{(x'-x)^2 + (y'-y)^2 + (z'-z)^2 + a^2} \quad (10)$$

e  $2a$  é o diâmetro dos elementos (veja Fig. 1). A equação (8) é numericamente avaliada pela técnica do MoM utilizando-se “point matching”, conforme discutido em [8]. Depois da determinação dos coeficientes  $I_{np}$ , a representação da corrente elétrica dada por (7) é aplicada para que se determine o campo radiado e, consequentemente, o diagrama de radiação da antena e a resistência de entrada [9].

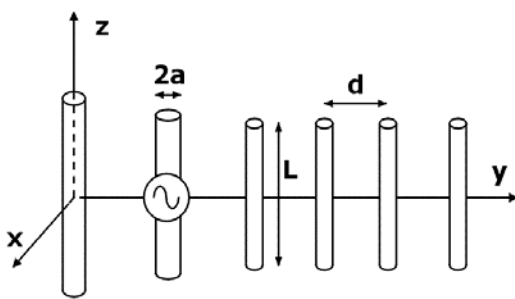


Fig. 1 . Configuração de uma antena Yagi-Uda de seis elementos

## 5 - RESULTADOS NUMÉRICOS

Foram alcançadas 192 antenas no Conjunto Pareto-Ótimo que, de acordo com a equação (1) são antenas candidatas a ótimo. Depois dessa etapa, vem a iteração com o Decisor, ou projetista, agente o qual escolherá dentre essas antenas, aquelas que atendem aos requisitos para a aplicação específica.

Os requisitos necessários para o projeto foram: diretividade e razão frente-costas maiores que 10 dB; os ângulos de meia potência deveriam ser menores que 60° nos planos E e H. A resistência de entrada deveria estar na faixa entre 45 e 55  $\Omega$ .

Quinze antenas foram selecionadas dentro do Conjunto Pareto-Ótimo. Na Tabela I estão apresentadas três dentre as antenas escolhidas. Os parâmetros destas antenas estão

mostrados na tabela II. Os comprimentos e espaçamentos entre os elementos dos resultados otimizados estão mostrados na tabela III, onde uma das 15 antenas é comparada com outras, encontradas na literatura [3,4].

Na tabela IV, podemos ver a comparação entre os parâmetros encontrados e os parâmetros das antenas encontradas na literatura.

A otimização alcançou antenas com desempenho superior. As mesmas apresentaram-se boa desempenho em todos os objetivos na faixa de frequências determinada.

Tabela 1 - Comprimentos e distanciamentos das 3 antenas escolhidas a partir do conjunto pareto-ótimo. Resultados em  $\lambda$  (a 300 MHz).

| Este Trabalho |        |        |        |        |        |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Comp.         | Dist.  | Comp.  | Dist.  | Comp.  | Dist.  |
| 0.5084        | -      | 0.5089 | -      | 0.5184 | -      |
| 0.4890        | 0,2450 | 0.4824 | 0.2208 | 0.4943 | 0.2445 |
| 0.4382        | 0,1486 | 0.4331 | 0.1428 | 0.4383 | 0.1480 |
| 0.4047        | 0,2830 | 0.4018 | 0.2542 | 0.4070 | 0.2794 |
| 0.4325        | 0,3844 | 0.4149 | 0.3705 | 0.4254 | 0.3627 |
| 0.4198        | 0,2438 | 0.3903 | 0.2699 | 0.4123 | 0.2657 |

Tabela 2 - (1) Frequência Normalizada, (2) Razão Frente-Costas em dB, (3) Diretividade em dB, Ângulos de meia potência em (°) nos planos (4) E- e (5) H-, e (6) Resistência de entrada ( $\Omega$ ).

| RBMGA |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| (1)   | 0.975 | 1     | 1.025 | 0.975 | 1     | 1.025 | 0.975 | 1     | 1.025 |
| (2)   | 21.42 | 17.55 | 12.37 | 18.82 | 18.60 | 15.75 | 22.90 | 17.62 | 12.66 |
| (3)   | 11.00 | 11.64 | 11.50 | 10.51 | 11.04 | 11.59 | 10.89 | 11.60 | 11.92 |
| (4)   | 48.40 | 44.60 | 39.54 | 52.31 | 49.79 | 46.69 | 49.66 | 46.22 | 42.00 |
| (5)   | 55.28 | 49.86 | 43.09 | 61.46 | 57.48 | 52.89 | 57.21 | 52.15 | 46.35 |
| (6)   | 52.02 | 49.64 | 49.94 | 50.10 | 50.13 | 49.99 | 52.77 | 49.04 | 53.89 |

Tabela 3 - Comprimentos e Distâncias entre os elementos. Resultados em  $\lambda$  (a 300 MHz).

| RBMGA  |        | Ref. [3] |       | Ref. [4] |       |
|--------|--------|----------|-------|----------|-------|
| Comp.  | Dist.  | Comp.    | Dist. | Comp.    | Dist. |
| 0,5084 | -      | 0,478    | -     | 0,50     | -     |
| 0,4890 | 0,2450 | 0,450    | 0,182 | 0,46     | 0,22  |
| 0,4382 | 0,1486 | 0,448    | 0,152 | 0,40     | 0,16  |
| 0,4047 | 0,2830 | 0,434    | 0,229 | 0,40     | 0,29  |
| 0,4325 | 0,3844 | 0,422    | 0,435 | 0,39     | 0,31  |
| 0,4198 | 0,2438 | 0,440    | 0,272 | 0,33     | 0,29  |

Tabela 4 - (1) Frequência Normalizada, (2) Razão Frente-Costas em dB, (3) Diretividade em dB, Ângulos de meia potência em (°) nos planos (4) E e (5) H, e (6) Resistência de entrada ( $\Omega$ ).

| Este Trabalho |       |       | Ref. [3] |       |       | Ref. [4] |       |       |
|---------------|-------|-------|----------|-------|-------|----------|-------|-------|
| (1)           | 0.975 | 1     | 1.025    | 0.975 | 1     | 1.025    | 0.975 | 1     |
| (2)           | 21.42 | 17.55 | 12.37    | 16.86 | 10.52 | 10.33    | 14.31 | 15.55 |
| (3)           | 11.00 | 11.65 | 11.50    | 11.79 | 12.66 | 11.60    | 9.475 | 9.702 |
| (4)           | 48.40 | 44.60 | 39.54    | 44.72 | 40.53 | 35.96    | 56.75 | 55.23 |
| (5)           | 55.28 | 49.86 | 43.09    | 50.15 | 44.47 | 40.05    | 69.15 | 66.33 |
| (6)           | 52.02 | 49.64 | 49.94    | 21.02 | 49.49 | 1.849    | 54.44 | 62.05 |

As figuras 2, 3, e 4 mostram a diretividade da primeira antena obtida da otimização neste trabalho, mencionada na tabela II, nas três frequências. A figura 5 mostra os resultados para diretividade e resistência de entrada ao longo da faixa de operação. Os resultados encontrados são

comparados os do NEC2, que é uma ferramenta padrão, e mostraram boa concordância.

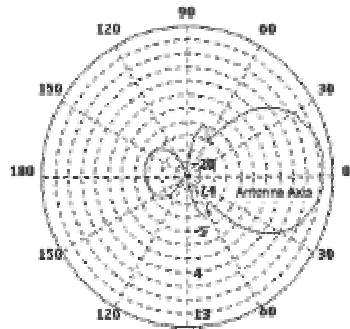


Fig. 2. Diretividade no Plano E. Frequência: 292.5 MHz

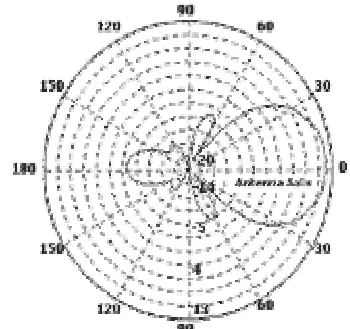


Fig. 3. Diretividade no Plano E. Frequência: 300 MHz

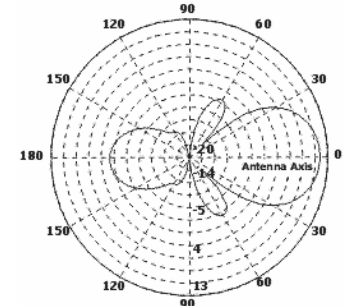


Fig. 4. Diretividade no Plano E. Frequência: 307.5 MHz

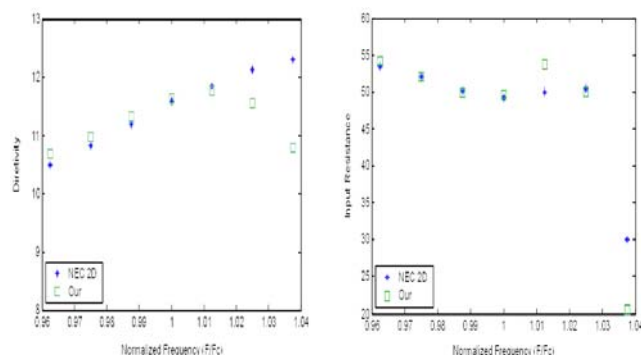


Fig. 5. Diretividade e Resistência de entrada ao longo da Faixa de Operação

## 6 - CONCLUSÕES

A utilização de técnicas multiobjetivo e algoritmos genéticos se mostrou bastante eficiente no projeto de antenas filamentos, no presente caso, uma antena Yagi-Uda. A utilização desta técnica foi a chave para a obtenção de antenas de desempenho superior na faixa de frequências desejada.

A conjunto Pareto-Ótimo se mostrou bastante variado e era possuidor de várias antenas que atendiam aos requisitos de projeto, viabilizando assim, uma melhor tomada de decisão segundo critérios mais específicos para cada aplicação. O operador cruzamento polarizado se mostrou eficiente na função desempenhada.

## 7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] D. K. CHENG AND C. A. CHEN, "Optimum spacings for Yagi-Uda arrays", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-21, pp. 615—623, Sept. 1973.
- [2] C. A. CHEN AND D. K. CHENG, "Optimum element lengths for Yagi-Uda arrays", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-23, pp. 8—15, Jan. 1975.
- [3] E. A. JONES AND W. T. JOINES, "Design of Yagi-Uda antennas using genetic algorithm", *IEEE Antennas Propagat. Magazine*, vol. 39, pp. 1386—1391, Sept. 1997.
- [4] D. CORREA, A. J. M. SOARES, AND M. A. B. TERADA, "Optimization of gain, impedance and bandwidth in Yagi-Uda antennas using genetic algorithm", in *SBMO/IEEE MTT-S IMOC'99 Proceedings*, pp. 41—44, Rio de Janeiro, Brazil, 1999.
- [5] R. A. MENEGUIM, "Análise de sensibilidade de soluções ótimas baseada em elipsóides mínimos", *Dissertação de Mestrado*, PPGEE – UFMG, Belo Horizonte, Brasil, 1999.
- [6] D. E. GOLDBERG, "Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Reading, MA: Addison-Wesley Publishing Co., 1989.
- [7] R. M. RAMOS, "Utilização de Algoritmos Genéticos em Otimização Multiobjetivo de Antenas Yagi-Uda" *Dissertação de Mestrado*, PPGEE - UFMG, Belo Horizonte, Brasil, 2002.
- [8] G. A. THIELE, "Analysis of Yagi-Uda type Antennas", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-17, n° 01, pp. 24-31, Jan. 1969.