

# Estudo de uma Antena Corneta Acoplada a uma Estrutura de Dielétrico Artificial

Antônio Tomaz<sup>1</sup> e Joaquim J. Barroso<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos, SP, Brasil

<sup>2</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, SP, Brasil

**Resumo** — Este trabalho discute as propriedades eletromagnéticas de dielétricos artificiais com permissividade elétrica efetiva menor que a do espaço livre e seus efeitos nas propriedades de radiação de uma antena corneta em banda X. Através de simulações numéricas, modelou-se um meio dielétrico artificial e não-magnético. Em seguida, com tal estrutura posicionada na abertura de uma antena do tipo corneta examinou-se o seu comportamento. Uma metodologia de projeto foi desenvolvida para sintetizar valores adequados da espessura desse material artificial visando obter uma permissividade elétrica relativa menor que um.

**Palavras-Chave** — antenas corneta, dielétrico artificial, metamateriais, banda X, lóbulos laterais.

## I. INTRODUÇÃO

Estruturas de obstáculos discretos, ou elementos espalhadores, denominados de dielétricos artificiais foram extensivamente estudados nos anos 1960 [1],[2]. Esses dielétricos artificiais são projetados para operar no regime em que o comprimento de onda da radiação incidente seja muito maior que as dimensões dos elementos discretos e do espaçamento periódico entre eles. Como resultado, esses dielétricos artificiais podem ser considerados meios efetivamente homogêneos quando da descrição de fenômenos eletromagnéticos no nível macroscópico. Os elementos espalhadores emulam os átomos ou moléculas em um dielétrico e assim produzem uma polarização média que dá origem a uma permissividade elétrica efetiva. Desta maneira, resultam as propriedades eletromagnéticas de tais estruturas e que podem ser descritas quantitativamente em termos de parâmetros materiais constitutivos.

Revigorado com o advento dos metamateriais a partir dos anos 2000 [3], o estudo de dielétricos artificiais formados por estruturas periódicas vem se apresentando como uma interessante alternativa para modelagem de meios com propriedades eletromagnéticas não encontradas na natureza. A engenharia de micro-ondas vem se beneficiando dos conceitos e aplicações apresentadas por diferentes grupos de pesquisas em diversos países. Entre as múltiplas frentes de trabalho e estudo, destacam-se aplicações em antenas, guias de onda e linhas de transmissão. Essas diversas aplicações beneficiam diferentes áreas da engenharia tais como de defesa, espaço e biomedicina [3]-[7]. Além disso, estruturas artificiais apresentam aplicação em diferentes tipos de

antenas, desde um simples dipolo até antenas planares [6]-[7].

O presente trabalho enfatiza a aplicação de meios artificiais em antenas do tipo corneta entre as frequências de 8,2 – 12,4 GHz (banda-X), faixa essa muito utilizada para serviços de aplicação espacial e militares.

Esses meios artificiais são modelados a partir de seus parâmetros materiais constitutivos eletromagnéticos, ou seja, a permissividade elétrica e a permeabilidade magnética. Por convenção, as estruturas artificiais podem se inserir em um dos quatro quadrantes que estabelecem os possíveis grupos baseados nos parâmetros eletromagnéticos. Com suas respectivas nomenclaturas, a Fig. 1 apresenta os quadrantes identificados por uma permissividade ( $\epsilon$ ) e uma permeabilidade ( $\mu$ ).

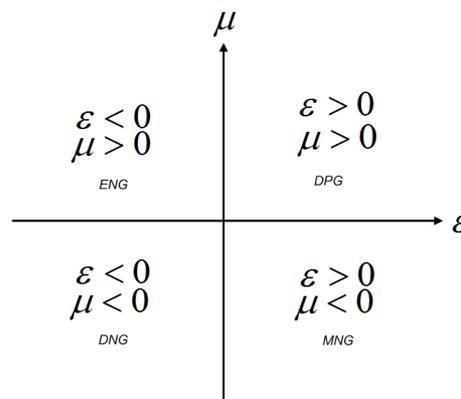


Fig1. Caracterização de meios eletromagnéticos em função dos parâmetros  $\epsilon$  e  $\mu$ .

O quadrante denominado DPS (*Double Positive*) classifica os materiais tradicionais encontrados na natureza, permissividade e permeabilidade ambas positivas, enquanto o quadrante ENG (*Epsilon-Positive*) apresenta a permissividade elétrica negativa, efeito que não se manifesta em meios eletromagnéticos tradicionais. O quadrante MNG (*Mu-Negative*) inclui a permeabilidade magnética negativa. O quadrante DNG (*Double Negative*) apresenta os dois parâmetros eletromagnéticos simultaneamente negativos, assim caracterizando um material puramente artificial. Pode-se ainda destacar materiais que apresentem os parâmetros eletromagnéticos próximos de zero, referidos como meios

ENZ (*Epsilon-Near-Zero*), os quais possibilitam interessantes aplicações principalmente na área de antenas [6]-[8].

A modelagem do meio artificial pode ser implementada por diferentes arranjos periódicos, desde simples estruturas de fios metálicos paralelos, anéis ressoadores até estruturas quírais mais elaboradas.

## II. PROPRIEDADES ELETROMAGNÉTICAS DE MEIOS DIELETRICOS ARTIFICIAIS

Um dos dispositivos de micro-ondas que utilizam materiais dielétricos e apresentam uma ampla faixa de aplicações são as lentes. Lentes são muito utilizadas desde focalização de energia em sistemas ópticos até em sistemas de antenas para alterar a diretividade. Para esses projetos, o material dielétrico deve ser de baixa perda e com um índice de refração inferior a 1,5. Um material muito utilizado é o poliestireno, o qual apresenta um índice de refração de 1,6. Estes casos, no entanto, apresentam a desvantagem de que as estruturas dielétricas são sólidas, de considerável peso e tamanho. Porém Kock [1] em 1948 propôs o uso de dielétrico artificial para compensar e superar tais desvantagens.

Um dielétrico artificial consiste basicamente em uma estrutura periódica que apresenta valores de permeabilidade elétrica e permissividade magnética que podem ser modificados e projetados [2]. A análise de dielétricos artificiais pode ser feita através da ação de um campo elétrico aplicado à estrutura dielétrica em consideração. No caso de estruturas simples formadas por condutores metálicos periódicos tem-se que as cargas de cada condutor deslocam-se de maneira a produzir um campo induzido que pode cancelar o campo aplicado na superfície do condutor. Do efeito combinado de todos esses obstáculos (elementos espalhadores) pode-se então calcular a polarização média de momento do dipolo ( $P$ ) por unidade de volume, ou seja, o deslocamento ( $D$ ) para o campo elétrico ( $E$ ) no meio de obstáculos será

$$D = \epsilon_0 E + P = \epsilon E$$

Em princípio a permissividade elétrica deve ser maior que a do vácuo.

No caso de um campo magnético ( $H$ ) de alta frequência aplicado à estrutura de obstáculos condutores, tem-se que a corrente induzida produz, por sua vez, um campo magnético induzido que pode cancelar a componente normal do campo magnético aplicado à superfície dos obstáculos. Essas correntes induzidas equivalem a um dipolo magnético, e em geral um dielétrico artificial pode exibir polarização por dipolo magnético, assim como polarização por dipolo elétrico. Deve-se notar, contudo, que obstáculos convenientemente orientados com relação ao campo elétrico incidente podem não apresentar dipolo magnético induzido. É o que caracteriza a estrutura não magnética. O índice de refração pode ser calculado diretamente da permeabilidade elétrica e da permissividade magnética

$$n = \left( \frac{\epsilon \mu}{\epsilon_0 \mu_0} \right)^{1/2}$$

Quando  $\mu$  é menor que  $\mu_0$ , a presença de polarização magnética reduz o valor do índice de refração.

Nos casos em que os obstáculos não sejam simetricamente distribuídos, a polarização elétrica e a resposta magnética passam a depender da direção de propagação da onda incidente. A Fig. 2 apresenta duas estruturas artificiais típicas, que são comumente conhecidas como estruturas artificiais 2-D e apresentam efeito indutivo quando o campo elétrico aplicado é paralelo aos fios condutores. Essas estruturas dielétricas são conhecidas como estruturas de avanço de fase.

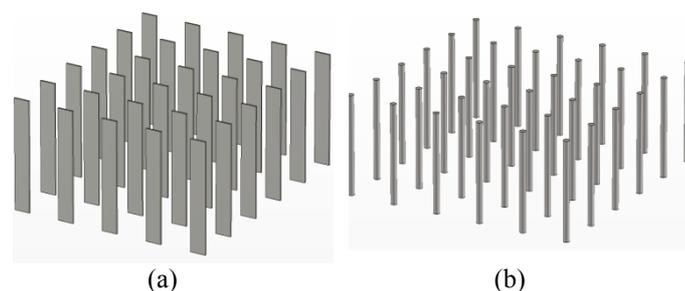


Fig. 2. Estruturas periódicas típicas utilizadas para a realização de estruturas artificiais. (a) modelo em fitas planares metálicas paralelas, (b) modelo em fios metálicos paralelos.

A análise de estruturas dielétricas artificiais envolve basicamente três abordagens. A primeira baseia-se na teoria de Lorentz, desenvolvida originalmente para a descrição de dielétricos clássicos e que considera somente a interação de dipolo entre os obstáculos. Essa teoria produz resultados exatos se a separação entre os obstáculos é menor que  $0,1\lambda_0$ , onde  $\lambda_0$  representa o comprimento de onda no espaço livre. A segunda abordagem considera a solução rigorosa do campo estático da estrutura. Essa solução leva em conta todos os multipolos na expansão dos campos induzidos, diferentemente da primeira abordagem onde é analisada somente a interação dipolo entre os obstáculos. A terceira análise utiliza as equações de Maxwell. Essa abordagem oferece a possibilidade de reduzir o problema para um modelo equivalente utilizando linhas de transmissão carregadas.

### III. ANTENAS CORNETAS CARREGADAS COM ESTRUTURAS ARTIFICIAIS

Para verificar os conceitos eletromagnéticos descritos na seção anterior, fez-se um estudo numérico baseado nos resultados discutidos no trabalho de Golden [9]. Esse trabalho apresenta uma aplicação direta de um meio artificial e analisa os efeitos da radiação de uma antena corneta na banda X através de uma estrutura artificial. No presente estudo, utilizou-se uma antena corneta padrão projetada para a banda X e posicionando-se a estrutura artificial na abertura da antena. A Fig. 3 apresenta as medidas exatas da antena padrão para a banda X.

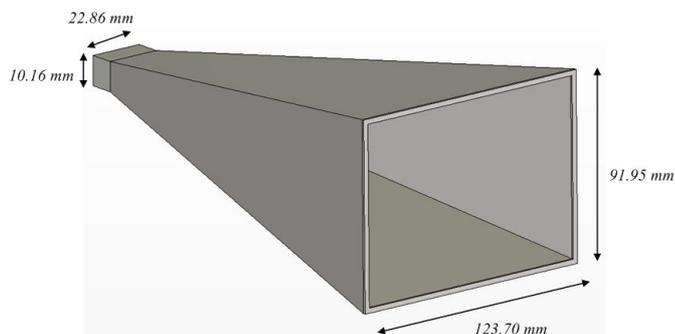


Fig. 3. Antena corneta padrão com suas respectivas medidas.

A Fig. 4 mostra a configuração antena-dielétrico implementada nas simulações eletromagnéticas [10].

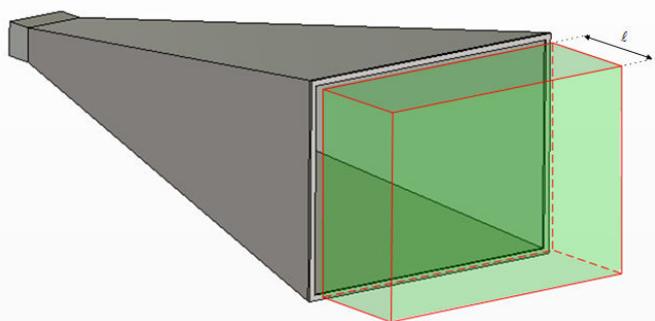


Fig. 4. Configuração da antena corneta e da estrutura artificial detalhando o esquema de simulação.

A estrutura artificial é diretamente acoplada à abertura da antena. Tal configuração (Fig. 4) difere completamente de outros experimentos [5],[8], onde a estrutura dielétrica é inserida no interior da antena. Neste trabalho, o objetivo é analisar o efeito da presença do dielétrico na distribuição de radiação que emerge da antena acoplada com a placa dielétrica. O procedimento de modelagem desse experimento foi todo baseado em simulações eletromagnéticas tridimensionais utilizando o software de simulação específico e de tratamento numérico [10]. O procedimento inicial foi analisar os parâmetros de espalhamento da antena para diferentes tamanhos da placa de material artificial. Conforme já citado, é de interesse obter o índice de refração próximo de

zero, e assim modelou-se um meio ENZ ( $0 < \epsilon < 1$ ). Inicialmente, simularam-se placas dielétricas de diferentes espessuras, onde a princípio adotou-se um material com valor intermediário de permissividade elétrica igual a 0,5. A Fig.5 apresenta o parâmetro de reflexão  $S_{11}$  correspondente à antena carregada com placas dielétricas de diferentes espessuras. Observa-se que o dielétrico com 22,9 mm de espessura apresentou uma relação de compromisso com  $|S_{11}|$  satisfatória para uma permissividade elétrica igual a 0,5. Assim, adotou-se um meio artificial de espessura 22,9 mm para ser instalado na abertura da antena corneta, pois atendeu a banda de frequência de ressonância dentro do desejado na banda X. Um maior valor de espessura resulta em um  $|S_{11}|$  abaixo de -20 dB entre as faixas 7,0 até 10 GHz. Assim, fica claro que para menores espessuras do material artificial com permissividade elétrica de 0,5 tem-se uma ressonância em frequências mais altas, enquanto que para maiores espessuras a banda de ressonância tende a ficar em frequências mais baixas. Como o intuito do trabalho é apresentar uma análise em frequências acima de 10 GHz e ainda dentro da banda X e com um dielétrico artificial que apresente permissividade elétrica acima de 0,5 optou-se em adotar a espessura de 22,9 mm.

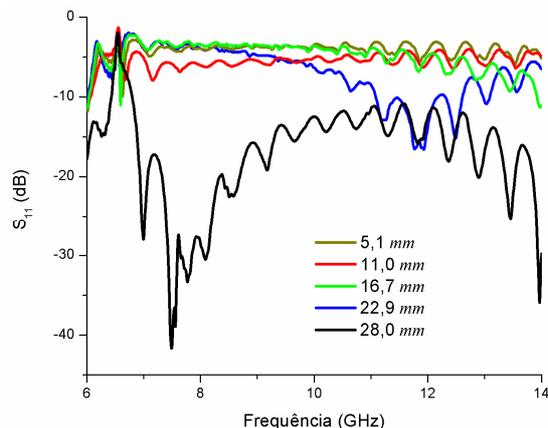


Fig. 5. Magnitude (dB) do parâmetro  $S_{11}$  para diferentes espessuras ( $l$ ) de estrutura artificial com  $\epsilon=0,5$ .

O procedimento seguinte consistiu em variar o valor da permissividade elétrica entre  $0 < \epsilon < 1$  e observar o comportamento do parâmetro  $S_{11}$  da antena. Esse procedimento está diretamente relacionado com a variação do índice de refração na interface de radiação da antena corneta. A Fig.6 mostra os resultados mais relevantes para diferentes permissividades elétricas.

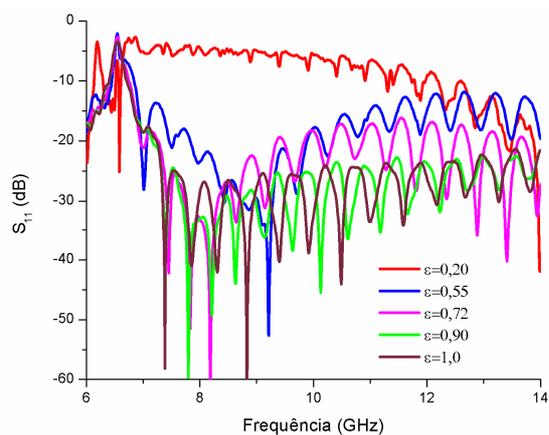


Fig. 6. Magnitude do parâmetro  $S_{11}$ (dB) para diferentes valores de permissividade para uma placa dielétrica de espessura 22,9 mm.

O parâmetro  $|S_{11}|$  referente a um meio com permissividade elétrica de 0,90 ( $n=0,94$ ) apresenta o menor valor em torno de 7,8 GHz. Observa-se que o espectro para  $\epsilon_r=0,90$  acompanha as variações da curva correspondente a  $\epsilon_r=1,0$ . No outro extremo, observa-se um pior desempenho para valores de  $\epsilon_r$  próximos de zero. Esse desempenho pode ser confirmado pelo ganho em função da frequência. A Fig.7 apresenta os ganhos obtidos com diferentes permissividades elétricas e os compara diretamente com o ganho, também simulado, de uma antena corneta padrão. Uma simulação utilizando um meio artificial dielétrico com ( $\epsilon_r=1,0$ ) também foi realizada afim de comparar o desempenho com a antena vazia.

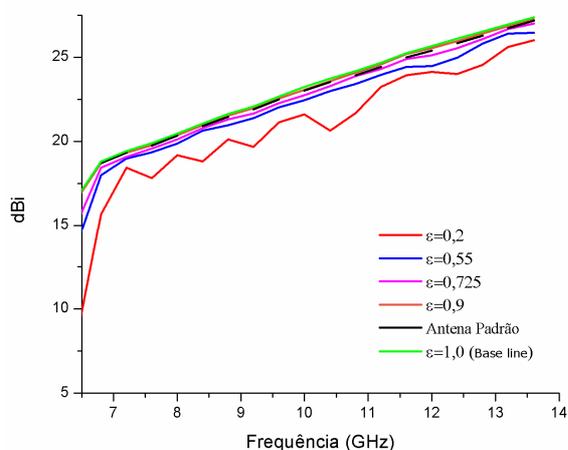


Fig. 7. Ganhos para diferentes valores de permissividade elétrica e comparação com o ganho da antena corneta padrão.

O ganho apresentado pela antena acoplada à estrutura artificial com permissividade elétrica maior que 0,72 é equivalente ao ganho da antena padrão. Esse desempenho pode ser estimado, pois à medida que o índice de refração aproxima-se de 1, a estrutura artificial torna-se um meio transparente, e assim deve apresentar o mesmo desempenho da antena padrão. Em seguida, foram obtidos os diagramas de radiação para algumas frequências na banda X. A Fig.8 apresenta os resultados de simulação para três diferentes

frequências, (a) 8,63 GHz, (b) 10,12 GHz e (c) 11,18 GHz e compara diretamente a antena corneta padrão com antena acoplada à placa dielétrica.

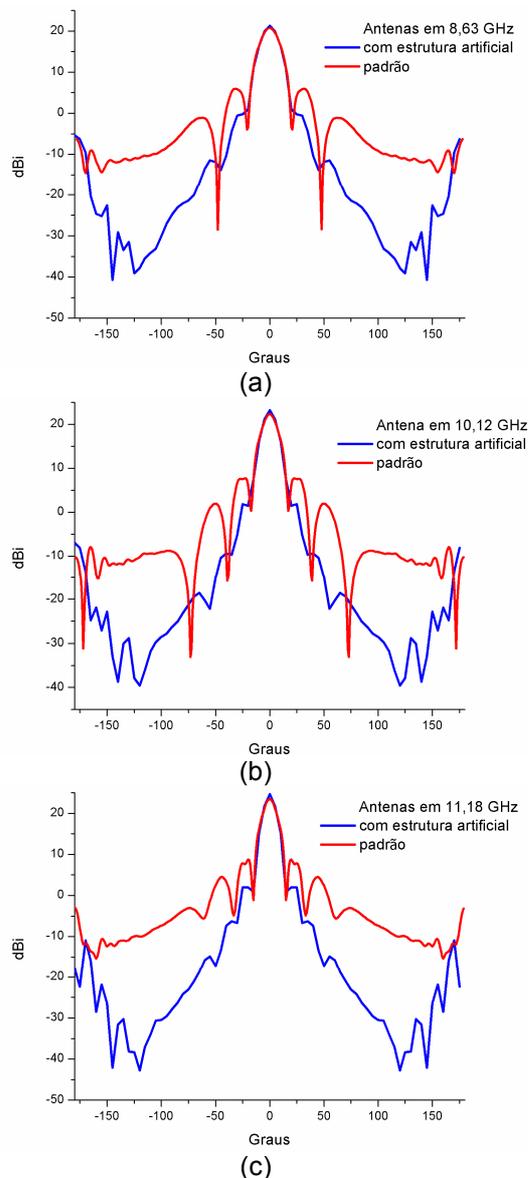


Fig.8. Diagramas de radiação em diferentes frequências na banda X, comparando a antena com a estrutura artificial ( $\epsilon_r=0,72$ ) e a padrão: (a) 8,63 GHz, (b) 10,12 GHz e (c) 11,18 GHz.

O comportamento apresentado para a antena modificada mostra-se semelhante nas três diferentes frequências de operação. Ressalte-se que os lobos laterais são fortemente atenuados quando comparados com uma antena padrão. O nível do lóbulo principal não sofre forte atenuação, permanecendo com o mesmo nível e forma.

#### IV. CONCLUSÕES

Os objetivos principais desse trabalho foram examinar a influência gerada por uma estrutura artificial que apresenta um índice de refração menor que 1, e, em seguida, demonstrar os efeitos desse meio artificial quando acoplado a uma antena do tipo corneta na banda X. Foi observado que o comportamento da antena acha-se diretamente relacionado com o valor da permissividade da placa dielétrica. O conceito de índice de refração foi utilizado na modelagem dos efeitos de um índice  $0 < n < 1$  na propagação da radiação através das interfaces da antena e do meio artificial. Esse efeito manifestou-se diretamente nos diagramas de radiação da antena. O ganho da antena foi fracamente reduzido para baixos valores de permissividade ( $\epsilon_r < 0,5$ ), porém mantendo-se para valores de permissividade elétrica acima de 0,72.

#### REFERÊNCIAS

- [1] W. E. Kock, "Metallic delay lenses", *Bell System Tech. J.*, vol. 27, pp. 58-82, 1948.
- [2] R. E. Collin, "Field theory of guided waves", ch. 12, McGraw-Hill, New York, 1960.
- [3] G. V. Eleftheriades and N. Engheta, "Metamaterials: Fundamentals and applications in the microwave and optical regimes", *Proc. IEEE*, vol. 99, no.10, pp. 1618-1621, Oct. 2011.
- [4] S. Enoch, G. Tayeb, P. Sabouroux, N. Guérin, P. Vicent, "A metamaterial for directive emission", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 89, no. 21, Art. ID 213902, 2002.
- [5] A. Tomaz, J. J. Barroso, P. J. Castro and A. J. F. Orlando, "Experimental investigation on the radiation pattern of a horn antenna loaded by a wire medium", *IEEE International Symposium Antennas and Propagation and National Radio Science Meeting (APS-URSI)*, Orlando, 2013.
- [6] S. Hrabar, "Application of wire media in antenna technology", in S. Zouhdi, A. Sihvola, and A. P. Vinogradov, *Metamaterials and Plasmonics: Fundamentals, Modelling, Applications* (eds.), New York, Springer Netherlands, pp. 139-151, 2009.
- [7] H. Li, L. Zhou, Z. Hang, Y. Zhang, H. Chen, C.T. Chan, "Planar metamaterials and applications in directive antennas", *Asia-Pacific Conference Proceedings*, Suzhou, Dec. 2005.
- [8] A. Tomaz, J. J. Barroso and P. J. Castro, "Experimental measurements of radiation patterns of a wire-medium loaded X-band antenna", *IEEE MTT-S International Microwave & Optoelectronics Conference (IMOC) 2013*, Rio de Janeiro, Ago., 2013.
- [9] K. E. Golden, "Plasma simulation with an artificial dielectric in a horn geometry", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 13, no. 4, pp. 587 - 594, Jul. 1965.
- [10] CST Microwave Studio, Version 2005, CST GmbH, Darmstadt, Germany