

Síntese e Análise de Antenas de Duplo-Refletores Clássicos para Cobertura Omnidirecional

Wilson de Carvalho Jr., Giuliano F. Soares, Fernando J. S. Moreira

GAPTEM, Depto. Engenharia Eletrônica, UFMG - Av. Pres. Antônio Carlos 6627 - Belo Horizonte, MG - CEP 31270-901

José R. Bergmann

CETUC, PUC-Rio - Av. Marquês de São Vicente 225 - Rio de Janeiro, RJ - CEP 22453-900

Resumo—Este trabalho apresenta a síntese e a análise de antenas com dois refletores clássicos axialmente simétricos para cobertura omnidirecional. São discutidas duas configurações distintas: *axis-displaced Cassegrain* (ADC) e *axis-displaced ellipse* (ADE). Fórmulas para a definição das cônicas geratrizes das superfícies refletoras de revolução são apresentadas, permitindo a criação de procedimentos interativos para a síntese clássica destas antenas. Também é apresentada a formulação básica para a determinação do campo da ótica geométrica na abertura da antena, o que permite uma análise baseada no método da abertura. Dois exemplos práticos são discutidos e os resultados comparados com técnica de análise baseada no método dos momentos.

Palavras Chave—Antenas refletoras, cobertura omnidirecional.

I. INTRODUÇÃO

Antenas refletoras são tipicamente utilizadas em enlaces de comunicação ponto-a-ponto na faixa de microondas. Na última década, porém, ocorreu um aumento no interesse por configurações de antenas refletoras para coberturas omnidirecionais [1]–[4], de forma que tais antenas possam operar em rádio-bases de enlaces ponto-multiponto. A vantagem inerente da aplicação de antenas refletoras para tal cobertura é a largura de faixa oferecida, permitindo o atendimento de serviços que demandem elevadas taxas de transmissão. As desvantagens típicas são os custos envolvidos com a fabricação e instalação, já que tais antenas devem possuir dimensões mínimas da ordem de dez comprimentos de onda para que as superfícies refletoras possam redirecionar satisfatoriamente a energia proveniente da fonte de alimentação. Logo, há um forte interesse na síntese de configurações compactas.

Porém, sendo tais configurações compactas, ocorre um forte acoplamento eletromagnético entre os refletores e o alimentador, o que requer a utilização de técnicas numéricas de análise que considerem tais acoplamentos. A técnica mais indicada nestes casos é aquela baseada em equações integrais de superfície avaliadas pelo método dos momentos (MoM). Porém, tal técnica demanda um enorme esforço computacional.

É neste âmbito que o presente trabalho investiga a síntese e a análise baseadas nos princípios da ótica geométrica (GO)

de configurações com dois refletores clássicos axialmente simétricos para cobertura omnidirecional. A GO não é capaz de considerar os efeitos associados a difrações e acoplamentos eletromagnéticos; porém ela é extremamente simples e permite a criação de procedimentos interativos para uma rápida investigação inicial do sistema duplo-refletor de interesse. Sínteses e análises mais precisas (incluindo o possível modelamento das superfícies refletoras) podem então ser posteriormente conduzidas, na busca de antenas mais eficientes.

O trabalho é basicamente dividido em três partes. Inicialmente as duas configurações de interesse—*axis-displaced Cassegrain* (ADC) e *axis-displaced ellipse* (ADE)—são discutidas. Fórmulas para a obtenção das superfícies refletoras clássicas são apresentadas. Posteriormente, é rapidamente apresentado o procedimento para a obtenção do campo da GO na abertura de tais antenas, o que permite a análise da radiação baseada no método da abertura. São então estudadas duas configurações (uma ADC e outra ADE) para ilustrar o procedimento da síntese clássica. Os diagramas de radiação destas antenas são então obtidos através do método da abertura e também pelo MoM, quando poderá ser verificado que o método da abertura, embora aproximado, permite uma estimativa razoável do comportamento do lóbulo principal e da eficiência da antena (nos exemplos a serem apresentados a abertura possui dimensão da ordem de dez comprimentos de onda).

II. SÍNTESE CLÁSSICA DAS CONFIGURAÇÕES ADC E ADE PARA COBERTURA OMNIDIRECIONAL

As configurações ADC e ADE são antenas com dois refletores axialmente simétricos gerados por cônicas (configurações clássicas). As superfícies são especificadas através de conceitos da GO, de forma a transformar a distribuição esférica da radiação emanada do foco principal (ponto O) em uma distribuição cilíndrica de fase uniforme sobre a abertura da antena (veja Fig. 1). Além disso, uma restrição extra imposta neste trabalho é a localização do foco principal exatamente no centro da abertura central do refletor principal, de forma a melhor acomodar o alimentador (que no presente caso será uma corneta coaxial para a obtenção de uma polarização vertical) e evitar espalhamentos indesejáveis provenientes da parede externa da corneta.

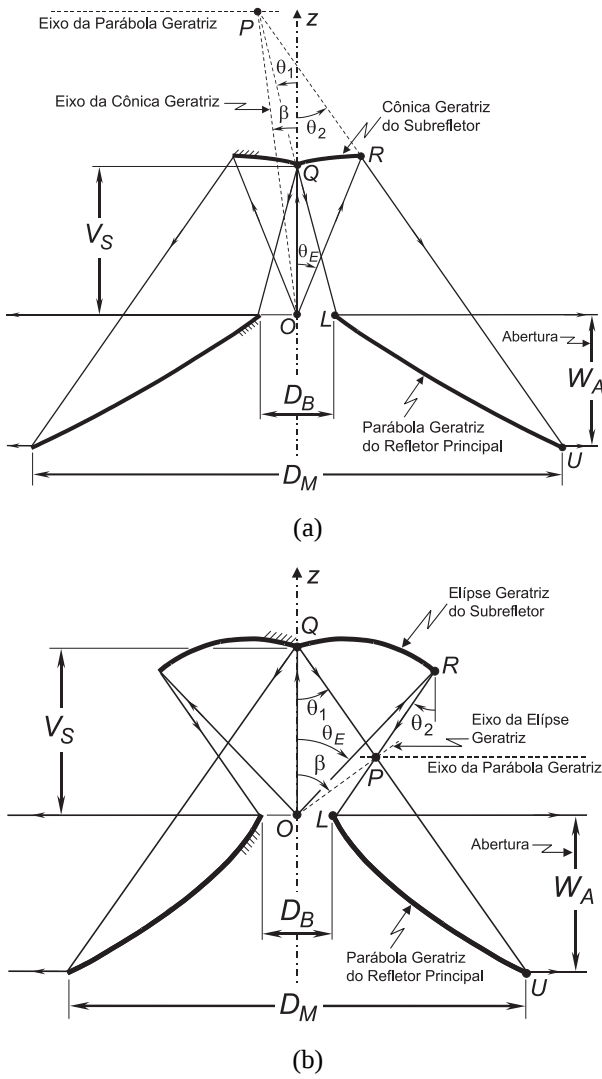


Fig. 1. Parâmetros geométricos das configurações (a) ADC e (b) ADE.

Dadas tais imposições, uma configuração será especificada de forma única através da determinação de quatro parâmetros das cônicas geratrizes: a distância focal (F) da parábola geratriz do refletor principal, a excentricidade (e) e a distância interfocal ($2c$) da cônica geratriz do subrefletor e o ângulo (β) entre o eixo de simetria do sistema refletor e o eixo da cônica geratriz do subrefletor (veja Fig. 1). No entanto, como tais parâmetros não são interessantes para a inicialização de uma síntese, utilizaremos quatro: o diâmetro do refletor principal (D_M), o diâmetro da abertura central deste refletor (D_B), a largura da abertura cilíndrica da antena (W_A) e a distância entre o foco principal e o vértice do subrefletor (V_S), como ilustrado na Fig. 1. Os parâmetros das cônicas geratrizes serão obtidos destes quatro parâmetros de entrada, através de procedimento e notação semelhantes aos de [5].

A diferença básica entre as configurações ADC e ADE é a localização da cáustica anular dos raios refletidos pelo subrefletor, definida pela rotação do foco P comum às cônicas geratrizes em torno do eixo de simetria da antena (veja Fig. 1). Para a ADC tal cáustica é virtual, podendo estar localizada acima

do subrefletor, como ilustrado na Fig. 1(a), ou abaixo do refletor principal, quando sua parábola geratriz torna-se convexa. No primeiro caso a cônica geratriz do subrefletor será uma hipérbole, enquanto que no segundo caso ela será uma elipse. Em ambos os casos tal cônica tende para uma parábola na medida que a cáustica tende para o infinito. Para a ADE tal cáustica é real, como indicado na Fig. 1(b). Neste caso a cônica geratriz do subrefletor será uma elipse e haverá uma inversão da iluminação proveniente do alimentador (o raio principal é mapeado na borda inferior da abertura da antena).

Para simplificar o procedimento de obtenção dos parâmetros das cônicas, são definidos dois ângulos auxiliares θ_1 e θ_2 , conforme ilustrados na Fig. 1. Ângulos serão considerados positivos se forem indicados nas figuras com o sentido horário. Por exemplo, na Fig. 1(a) apenas θ_E é positivo, enquanto que na Fig. 1(b) apenas θ_1 é negativo. Começaremos com a definição da configuração ADC, sempre com o auxílio da Fig. 1(a). Do triângulo OQL ($\triangle OQL$) obtêm-se

$$\tan \theta_1 = -D_B / (2V_S) \quad (1)$$

e, consequentemente, o valor de θ_1 . Da equação da parábola geratriz do refletor principal pode-se provar que

$$\frac{D_M - D_B}{2W_A} = \frac{1 - \tan(\theta_1/2) \tan(\theta_2/2)}{[1 + \tan(\theta_1/2)][1 + \tan(\theta_2/2)]}, \quad (2)$$

de onde obtemos o valor de θ_2 . Aplicando a lei dos senos aos $\triangle OPQ$ e $\triangle OPU$ obtêm-se, respectivamente,

$$2c \sin(\beta - \theta_1) = -V_S \sin \theta_1, \quad (3)$$

$$2c \sin(\beta - \theta_2) = W_A \sin \theta_2 + (D_M/2) \cos \theta_2 \quad (4)$$

e os valores de $2c$ e β . A excentricidade é definida com o auxílio da equação da cônica geratriz do subrefletor. Por exemplo, tomando a trajetória do raio principal do alimentador:

$$2c/e = V_S - 2c \sin \beta / \sin \theta_1. \quad (5)$$

Finalmente, da equação da parábola geratriz obtém-se

$$F = \frac{W_A [1 + \tan(\theta_1/2)][1 + \tan(\theta_2/2)]}{4[\tan(\theta_1/2) - \tan(\theta_2/2)]}. \quad (6)$$

O procedimento para a configuração ADE segue passos similares, ocorrendo porém uma inversão na definição dos ângulos θ_1 e θ_2 , como ilustrado na Fig. 1(b). Agora θ_1 é definido com o auxílio do $\triangle OQU$,

$$\tan \theta_1 = -D_M / [2(V_S + W_A)], \quad (7)$$

enquanto θ_2 continua sendo obtido de (2). As equações necessárias para a obtenção de $2c$ e β partem da aplicação da lei dos senos aos $\triangle OPQ$ e $\triangle OPL$. Do primeiro chega-se novamente à (3), enquanto que do segundo:

$$2c \sin(\beta - \theta_2) = (D_B/2) \cos \theta_2. \quad (8)$$

A excentricidade e da elipse geratriz continua sendo dada por (5), enquanto que a distância focal F da parábola é dada por

$$F = \frac{W_A [1 + \tan(\theta_1/2)][1 + \tan(\theta_2/2)]}{4[\tan(\theta_2/2) - \tan(\theta_1/2)]}, \quad (9)$$

similar à (6) a menos da inversão entre θ_1 e θ_2 .

Dois parâmetros geométricos relevantes na comparação entre as configurações ADC e ADE são o diâmetro do subrefletor (D_S) e o semi-ângulo de borda do subrefletor (θ_E), os quais podem ser obtidos da lei dos senos aplicada ao $\triangle OPR$ para as duas configurações:

$$\frac{2c}{\sin(\theta_E - \theta_2)} = \frac{D_S/(2 \sin \theta_E)}{\sin(\beta - \theta_2)} = \frac{2c/e - D_S/(2 \sin \theta_E)}{\sin(\beta - \theta_E)} \quad (10)$$

É interessante ressaltar que o procedimento apresentado anteriormente é semelhante ao de [5], aonde foi demonstrado que há quatro famílias distintas de antenas com dois-refletores axialmente simétricos—além da ADC e da ADE há também a *axis-displaced Gregorian* (ADG) e a *axis-displaced hyperbola* (ADH). Na presente situação, além do redirecionamento dos raios provenientes do refletor principal na direção perpendicular ao eixo de simetria, foi imposta também a condição (extra) da localização do foco principal O no centro da abertura central do refletor principal. Desta forma, ao invés de cinco parâmetros de entrada, como em [5], necessitamos de apenas quatro. A consequência prática é que, no presente, a ADG (ADH) passa a ser um caso particular da ADC (ADE) quando $\theta_E < 0$. Ou seja, quando (10) retornar $\theta_E > 0$ teremos uma ADC ou ADE; caso contrário será uma ADG ou ADH, respectivamente. As configurações ADG e ADH são ilustradas na Fig. 2 e, por serem casos particulares das outras duas no âmbito deste trabalho, não serão aqui discutidas em separado.

Uma vez definidos os parâmetros das cônicas geratrizes e conhecido o campo radiado pelo alimentador, temos toda a informação necessária para obter as superfícies refletoras e o campo da GO na abertura cilíndrica.

III. CAMPO DA ÓTICA GEOMÉTRICA NA ABERTURA

Conhecidas as superfícies do sistema duplo-refletor e o campo do alimentador, a obtenção do campo da GO na abertura cilíndrica é relativamente trivial. Para tal a Fig. 3 nos auxiliará na definição dos principais parâmetros geométricos e, particularmente, das curvaturas das frentes de onda. No presente estudo deseja-se investigar antenas para coberturas omnidirecionais apresentando polarização vertical. Por este motivo utiliza-se uma corneta coaxial excitada pelo modo fundamental TEM do guia correspondente. A partir do princípio da equivalência para aberturas sobre planos condutores elétricos perfeitos, o campo radiado pelo alimentador será representado pelo seguinte modelo [6]:

$$\vec{E}_F = F(\theta_F) (e^{-jk r_F} / r_F) \hat{\theta}_F, \quad (11)$$

onde

$$F(\theta_F) = [J_0(k R_b \sin \theta_F) - J_0(k R_a \sin \theta_F)] / \sin \theta_F, \quad (12)$$

J_0 é a função de Bessel de ordem zero, r_F é a distância entre o foco (O) e o subrefletor (S) ao longo da trajetória correspondente a θ_F (tal que $0 \leq \theta_F \leq \theta_E$) e R_a e R_b são os raios externo e interno da abertura da corneta coaxial, respectivamente (tais que $2R_b < 2R_a < D_B$).

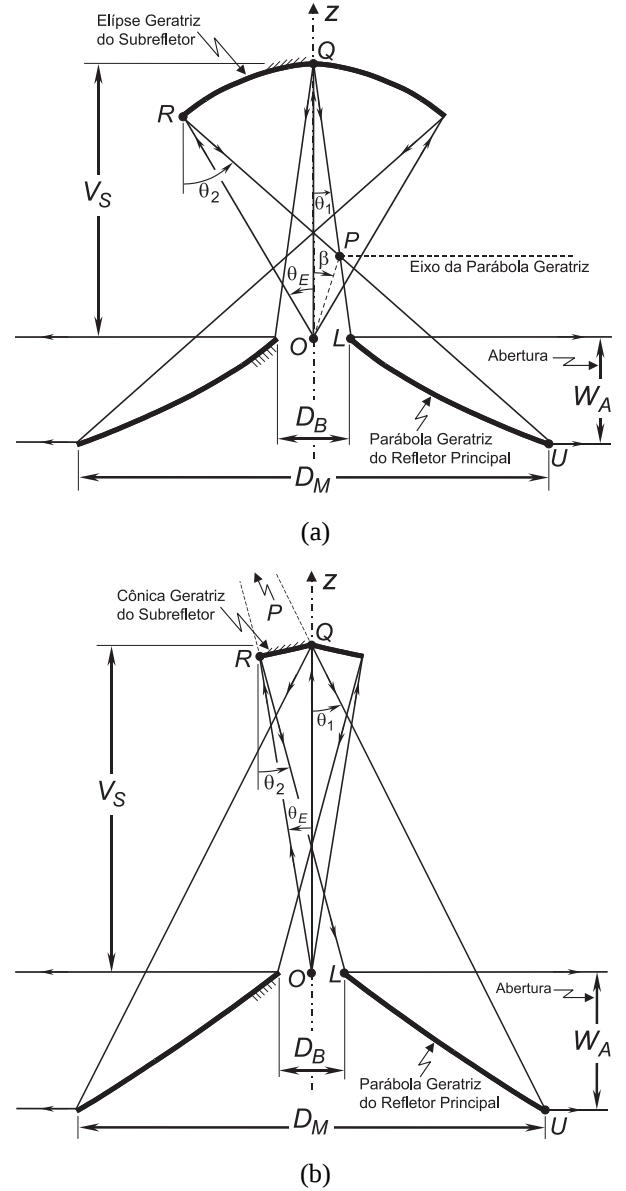


Fig. 2. Configurações (a) ADG e (b) ADH: casos particulares da ADC e ADE, respectivamente, quando $\theta_E < 0$.

Tal campo proveniente do alimentador será refletido até a abertura de acordo com os princípios da GO, resultando em

$$\vec{E}_A(z_A) = -F(\theta_F) A_1 A_2 A_3 e^{-jk\ell} \hat{z}, \quad (13)$$

onde $\vec{E}_A$ é o campo da GO na abertura, z_A localiza o ponto A sobre a abertura, ℓ é o percurso constante do foco até a abertura ($\ell = r_F + \overline{SM} + \overline{MA}$) e $A_{1,2,3}$ são os fatores de atenuação associados às frentes de onda desde o foco O até A . O termo A_1 corresponde à frente de onda esférica imediatamente antes da reflexão em S , ou seja,

$$A_1 = 1/r_F. \quad (14)$$

O termo A_2 refere-se à frente de onda astigmática após a reflexão em S :

$$A_2 = \sqrt{\rho_1/(\rho_1 + \overline{SM})} \sqrt{\rho_2/(\rho_2 + \overline{SM})}, \quad (15)$$

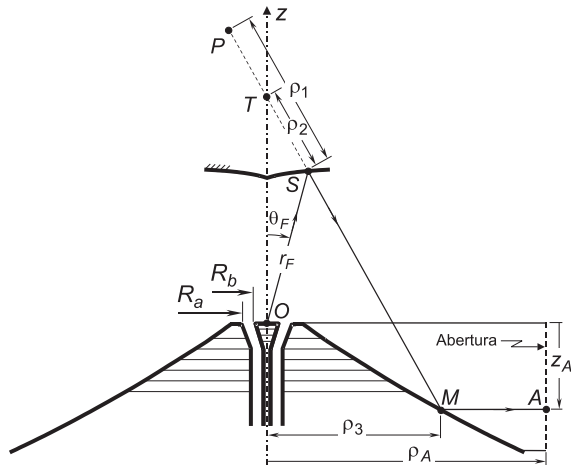


Fig. 3. Parâmetros da ótica geométrica para o campo na abertura.

onde ρ_1 e ρ_2 são os raios principais de curvatura imediatamente após S , correspondentes às cústicas anular (P) e linear (T), respectivamente. Se a cústica estiver localizada acima (abaixo) do subrefletor, o raio ρ correspondente será positivo (negativo). Finalmente, o termo A_3 refere-se à frente de onda cilíndrica após a reflexão em M :

$$A_3 = \sqrt{\rho_3 / (\rho_3 + \overline{MA})} = \sqrt{\rho_3 / \rho_A}, \quad (16)$$

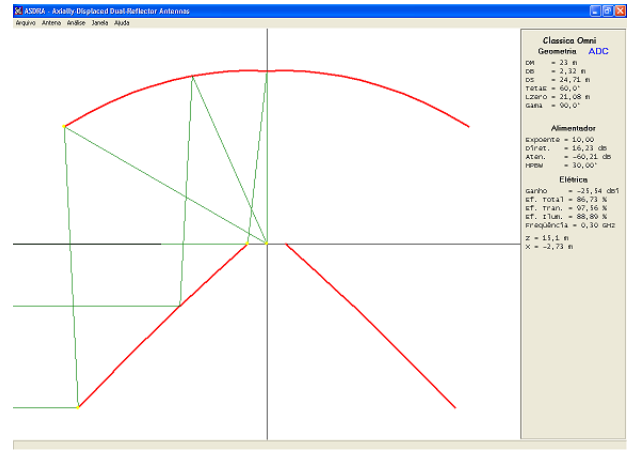
onde ρ_A é o raio do cilindro sobre o qual encontra-se a abertura. Todos estes parâmetros são diretamente obtidos a partir das equações das cônicas geratrizes, inclusive a relação entre θ_F (direção do raio que parte de O) e z_A (posição de A). Dada a simetria circular não há variação azimutal.

Uma vez obtido o campo sobre a abertura, este pode ser integrado para a obtenção da radiação na região de campo distante e, consequentemente, das principais características elétricas da antena, técnica esta denominada método da abertura. Um parâmetro importante na comparação entre as diferentes configurações é a eficiência de radiação da antena. Esta é definida pela combinação entre a eficiência de transbordamento pelo subrefletor e a eficiência de iluminação da abertura, relativa a uma abertura cilíndrica uniformemente iluminada e com as mesmas dimensões W_A e ρ_A . Na próxima seção demonstraremos que o método da abertura, embora aproximado, é capaz de estimar com uma razoável precisão a eficiência e, consequentemente, o ganho destas antenas, desde que W_A seja maior do que dez comprimentos de onda.

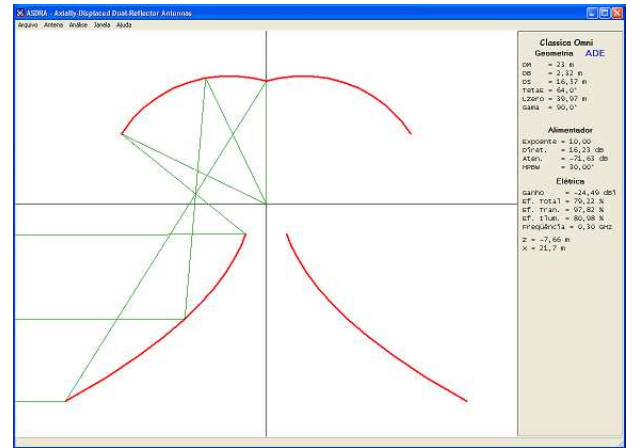
IV. EXEMPLOS DE SÍNTESE E ANÁLISE

Com o auxílio da formulação discutida anteriormente foi desenvolvido um algoritmo que permite a síntese das configurações clássicas de forma semi-interativa, seguindo a filosofia apresentada em [7] para antenas convencionais (direcionais). Para demonstrar a síntese e, em particular, as limitações da análise baseada no método da abertura, são aqui estudadas duas configurações práticas, sendo uma ADC e a outra ADE.

Para a ADC foram escolhidos os seguintes parâmetros de entrada: $W_A = 10\lambda$, $D_M = 23\lambda$, $D_B = 2.322\lambda$ e $V_S =$



(a)



(b)

Fig. 4. Antenas (a) ADC e (b) ADE investigadas.

10.51λ , onde λ é o comprimento de onda. A antena é aquela ilustrada na Fig. 4(a). Aplicando tais valores às (1)–(6) obtêm-se $\theta_1 = -6.30^\circ$, $\theta_2 = 2.86^\circ$, $\beta = 172.73^\circ$, $2c = 68.099\lambda$, $e = 0.76476$ e $F = -30.25\lambda$. O valor negativo de F indica que o foco P comum às cústicas geratrizes encontra-se abaixo do refletor principal [veja Fig. 4(a)]. Neste caso, o subrefletor é gerado por uma elipse e a parábola geratriz do refletor principal é convexa. Finalmente, a (10) fornece $D_S = 24.71\lambda$ e $\theta_E = 60^\circ$. Para a ADE os parâmetros de entrada foram os mesmos, exceto $V_S = 8.33\lambda$. A antena é ilustrada na Fig. 4(b). Neste caso, as (2), (3), (7)–(10) fornecem $\theta_1 = -32.10^\circ$, $\theta_2 = 60.86^\circ$, $\beta = 68.08^\circ$, $2c = 4.498\lambda$, $e = 0.27796$, $F = 3.23\lambda$, $D_S = 18.57\lambda$ e $\theta_E = 64^\circ$.

Tais antenas foram analisadas tanto pelo método da abertura (MA) como pelo método dos momentos (MoM). Para a análise via MoM o alimentador utilizado foi a mesma corneta coaxial empregada em [3] e [4]. Na abertura da corneta, $R_a = 0.9\lambda$ e $R_b = 0.45\lambda$ (veja Fig. 3). Ela possui uma flange com diâmetro de 2.322λ ($= D_B$) e entre a borda da abertura coaxial e a borda da flange foi colocada uma corrugação (*choke*) de quarto de onda para minimizar a radiação do alimentador para $\theta_F > 70^\circ$. Para a análise através do MA, a excitação foi pro-

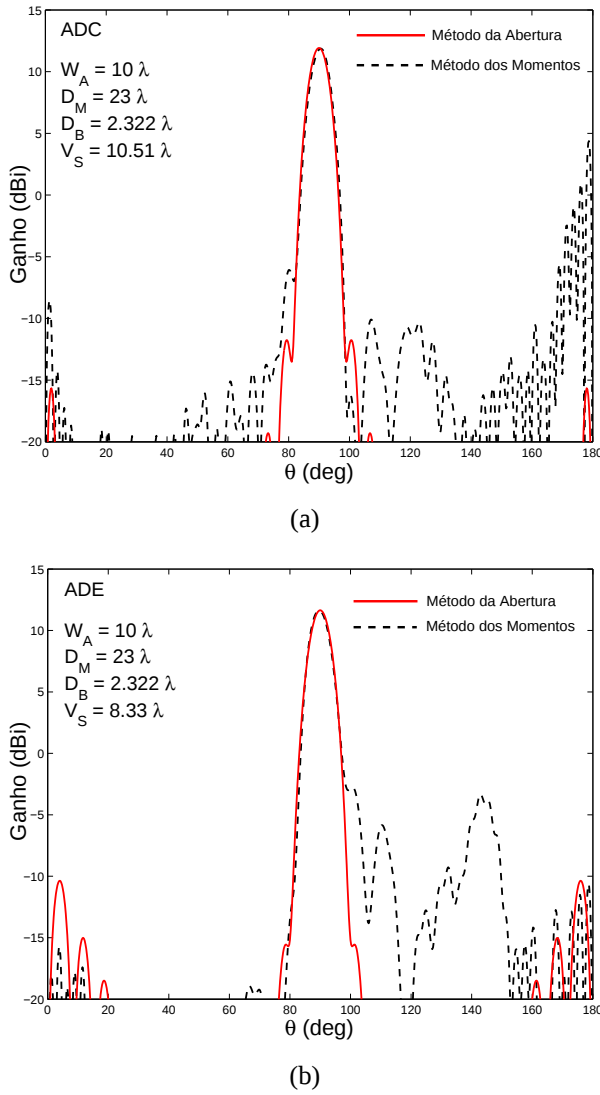


Fig. 5. Diagramas de radiação das antenas (a) ADC e (b) ADE investigadas.

videnciada pelo modelo das (11) e (12) com os valores de R_a e R_b indicados acima.

Os diagramas de radiação de ambas as antenas, obtidos a partir do MA e do MoM, são apresentados na Fig. 5. Como esperado, as análises baseadas no MA não são capazes de estimar com precisão os níveis dos lóbulos secundários, em particular aqueles associados ao transbordamento de energia pelo refletor principal e à radiação em $\theta = 180^\circ$, intensificada pela difração na borda do refletor principal. Porém, como se tratam de aberturas com $W_A = 10\lambda$ (ou seja, $W_A/\lambda \gg 1$) e livres de bloqueio, o MA é capaz de estimar com uma razoável precisão o comportamento do pico de radiação do lóbulo principal ($\theta \approx 90^\circ$). Dos diagramas de radiação de antena ADC em questão [veja Fig. 5(a)], o MA prevê um ganho máximo de 11.93 dBi em $\theta = 90^\circ$, correspondendo a uma eficiência de radiação (considerando apenas as eficiências de transbordamento do subrefletor e de iluminação da abertura cilíndrica) de 77.9%. Já a análise baseada no MoM indica um ganho de 11.87 dBi para $\theta \approx 90.5^\circ$, o que corresponde a uma eficiên-

cia de aproximadamente 76.9%. Ambos os métodos prevêem uma largura de meia potência de aproximadamente 6.8° . Para a antena ADE [veja Fig. 5(b)], o ganho máximo em $\theta = 90^\circ$ estimado pelo MA é de 11.65 dBi (72.3% de eficiência), enquanto que o MoM indica um ganho máximo de 11.62 dBi em $\theta \approx 89.7^\circ$ (71.8% de eficiência). Ambos prevêem uma largura de meia potência de aproximadamente 7.3° .

Embora o MA possa estimar os ganhos máximos e as eficiências com razoável precisão, seus resultados indicam pequenas discrepâncias em relação à direção de máximo do lóbulo principal. Isto porque o MA considera uma distribuição com fase uniforme sobre a abertura cilíndrica, acarretando num diagrama de radiação simétrico em relação a $\theta = 90^\circ$. Na realidade, a radiação proveniente da corneta e incidente sobre o subrefletor não é exatamente esférica. A consequência final é a perturbação da fase do campo na abertura da antena, praticamente linear na região correspondente à máxima intensidade de campo. Isto acarreta no leve deslocamento do máximo de radiação observado nas análises do MoM, além dos efeitos sobre os ombros do lóbulo principal (de um lado sobe e do outro desce, dada a inversão das fases correspondentes). Tais efeitos aparecem invertidos na ADE (em relação à ADC) devido à inversão da iluminação do alimentador causada pela presença da cáustica anular entre os dois refletores.

V. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou fórmulas para a síntese (baseada em conceitos da ótica geométrica) e a análise (baseada no método da abertura) de antenas com dois refletores clássicos axialmente simétricos para cobertura omnidirecional. A formulação abrange as configurações clássicas ADC e ADE, permitindo a criação de algoritmos semi-iterativos para a síntese e análise de tais antenas. Os diagramas de radiação de duas antenas típicas foram analisados pelo método da abertura e comparados a resultados mais precisos obtidos de análises baseadas no método dos momentos, tendo sido demonstrado que o método da abertura pode ser utilizado com razoável sucesso para estimar o comportamento do lóbulo principal, ganho máximo e eficiência de radiação destas antenas, desde que a abertura cilíndrica da antena tenha largura maior do que 10λ .

REFERÊNCIAS

- [1] M. Orefice and P. Pirinoli, "Dual reflector antenna with narrow broad-side beam for omnidirectional coverage," *Electronics Letters*, vol. 29, pp. 2158–2159, 1993.
- [2] A. G. Pino, A. M. A. Acuña, and J. O. R. Lopez, "An omnidirectional dual-shaped reflector antenna," *Microwave Opt. Tech. Lett.*, vol. 27, no. 5, pp. 371–374, 2000.
- [3] J. R. Bergmann, F. J. V. Hasselmann, and M. G. C. Branco, "A single-reflector design for omnidirectional coverage," *Microwave Opt. Tech. Lett.*, vol. 24, no. 6, pp. 426–429, 2000.
- [4] J. R. Bergmann and F. J. S. Moreira, "An omnidirectional ADE reflector antenna," *Microwave Opt. Tech. Lett.*, vol. 40, no. 3, pp. 250–254, 2004.
- [5] F. J. S. Moreira and Aluizio Prata, Jr., "Generalized classical axially symmetric dual-reflector antennas," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 49, pp. 547–554, 2001.
- [6] R. F. Harrington, *Time-Harmonic Electromagnetic Fields*, McGraw Hill, NY, 1961, Ch. 3.
- [7] T. C. D. Silva, M. A. S. Mayrink and F. J. S. Moreira, "Projeto interativo de antenas com duplo-refletores clássicos axialmente simétricos," *IX Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica (SBMO 2000)*, João Pessoa, PB, pp. 218–222, Agosto 2000.