

Controle Eficiente do Roll-Off do Subrefletor em Configurações Cassegrain e Gregorian

Fernando J. S. Moreira*

Universidade Federal de Minas Gerais, Depto. Engenharia Eletrônica
Av. Pres. Antônio Carlos 6627, Pampulha - Caixa Postal 209 - 30161-970 Belo Horizonte, MG

Aluizio Prata, Jr.

University of Southern California, Dept. Electrical Engineering - Electrophysics
Los Angeles, CA 90089-0271, USA

Resumo — Este trabalho visa o projeto de antenas de duplo-refletores axialmente simétricas, do tipo Cassegrain e Gregorian, com baixas perdas de transbordamento. Estas perdas são reduzidas através da especificação de um elevado roll-off para a radiação proveniente do subrefletor (baixo transbordamento traseiro), associado a uma iluminação altamente atenuada da borda do subrefletor (baixo transbordamento dianteiro). Fórmulas simples e eficientes são derivadas da Teoria Uniforme da Difração, permitindo que o roll-off desejado seja diretamente obtido pelo modelamento das superfícies refletoras (iluminadas por um alimentador com alta diretividade) através da Ótica Geométrica. A teoria é aplicada no projeto de uma configuração Cassegrain e os resultados verificados através de uma análise numérica baseada no Método dos Momentos.

Palavras Chave — Antenas refletoras, teoria uniforme da difração, método dos momentos, teoria eletromagnética aplicada.

I. INTRODUÇÃO

Antenas de duplo-refletores possuem como maior atrativo a obtenção de altas eficiências de radiação utilizando-se simples aparatos eletrônicos. Este fato deve-se basicamente às propriedades de colimação da radiação eletromagnética através das superfícies refletoras do sistema. Porém, neste processo, parte da energia radiada pelo alimentador não ilumina o subrefletor (transbordamento dianteiro), e parte da restante ultrapassa o refletor principal (transbordamento traseiro). Estas perdas por transbordamento acarretam não apenas em uma redução da eficiência da antena, mas também no aumento indesejado dos lóbulos laterais. A redução do transbordamento dianteiro pode ser alcançada utilizando-se um alimentador com alta diretividade, consequentemente diminuindo-se a iluminação da borda do subrefletor. O transbordamento traseiro, por sua vez, pode ser reduzido através do aumento do roll-off da radiação proveniente do subrefletor.

Manuscrito recebido no dia 20 de Março de 1998.
F. J. S. Moreira, Tel. +5531-4994861, FAX +5531-4994850,
fernando@eee.ufmg.br. A. Prata, Jr., prata@hertz.usc.edu.
Os estudos do Dr. Moreira foram possíveis através do CNPq.

O objetivo deste trabalho é apresentar fórmulas simples para o projeto de antenas de duplo-refletores com baixas perdas por transbordamento. Por simplicidade, o estudo é dirigido para geometrias axialmente simétricas do tipo Cassegrain e Gregorian. Porém, os conceitos utilizados são gerais o suficiente para serem aplicados a outras configurações. A Teoria Uniforme da Difração (UTD) [1] é usada na obtenção de uma expressão analítica relacionando a derivada do campo elétrico na fronteira de reflexão do subrefletor (*roll-off*) com parâmetros da Ótica Geométrica (GO) da onda refletida e com a radiação do alimentador. Esta expressão permite um melhor entendimento sobre o *roll-off* do subrefletor e de como aumentá-lo de forma eficiente.

Uma vez determinados os fatores necessários para a obtenção do *roll-off* desejado, os princípios da GO são aplicados na formulação de uma relação direta entre os campos do alimentador e na abertura da antena (em geral, parâmetros especificados no modelamento e/ou otimização do sistema refletor). Esta relação permite o modelamento das superfícies refletoras acarretando em uma antena com baixas perdas de transbordamento dianteiro e traseiro, simultaneamente. A teoria é demonstrada no projeto de uma antena Cassegrain axialmente simétrica, cujas características elétricas são rigorosamente analisadas através do Método dos Momentos (MoM), levando-se em conta os acoplamentos entre alimentador, subrefletor e refletor principal.

II. ANÁLISE DO ROLL-OFF DO SUBREFLETOR

As antenas são supostas axialmente simétricas, do tipo Cassegrain ou Gregorian (Figs. 1 e 2, respectivamente). A formulação analítica para o controle do *roll-off* do subrefletor é derivada da UTD [1], a ser aplicada em torno da fronteira de reflexão do subrefletor (segmento $\overline{BU}$ nas Figs. 1 e 2). O campo elétrico radiado pelo subrefletor é decomposto em uma componente relacionada ao campo refletido (existente apenas na região de reflexão do subrefletor) e outra correspondente ao

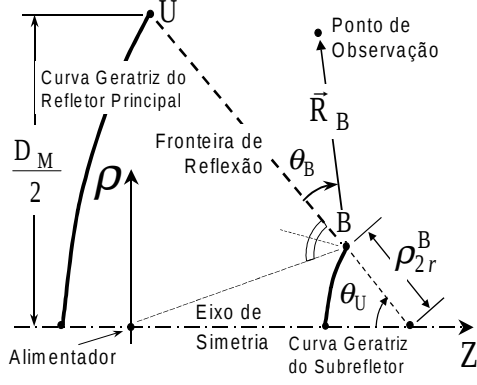


Fig. 1: Configuração Cassegrain.

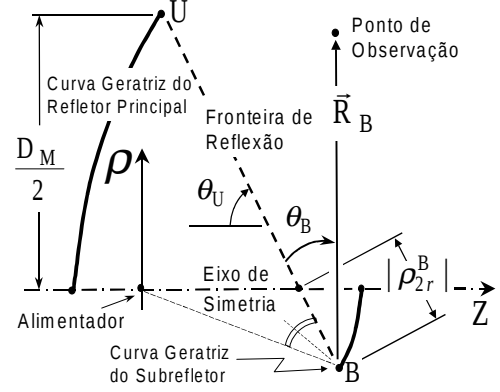


Fig. 2: Configuração Gregorian.

campo difratado, sendo representado por

$$\vec{E}_T(R_B, \theta_B \approx 0) \approx \vec{E}_R(R_B, \theta_B \approx 0) + \vec{E}_D(R_B, \theta_B \approx 0), \quad (1)$$

onde $\vec{E}_R$ e $\vec{E}_D$ são as componentes refletida e difratada, respectivamente, e as coordenadas R_B e θ_B localizam o ponto de observação no plano de incidência, conforme ilustrado pelas Figs. 1 e 2. $\vec{E}_R$ é calculado através dos princípios da GO, enquanto que $\vec{E}_D$ é derivado da UTD. Devido à simetria axial do subrefletor e ao interesse em se analisar os campos apenas em torno da fronteira de reflexão ($\theta_B \rightarrow 0$), as contribuições mais relevantes para os campos refletido e difratado vêm dos mecanismos de radiação provenientes do ponto B na borda do subrefletor [1] (Figs. 1 e 2).

O roll-off da radiação do subrefletor corresponde à derivada do campo elétrico em relação a θ_B . O cálculo desta derivada em torno da fronteira de reflexão simplifica-se devido à simetria axial da antenna. Neste caso, demonstra-se que, no limite em que $\theta_B \rightarrow 0$ e para um alimentador circularmente simétrico, a orientação do campo elétrico espalhado pelo subrefletor não possui uma variação significativa [2]. O problema pode então ser simplificado e tratado escalarmente:

$$\frac{\partial}{\partial \theta_B} E_T(R_B, \theta_B \approx 0) \approx \frac{\partial}{\partial \theta_B} E_R(R_B, \theta_B \approx 0) + \frac{\partial}{\partial \theta_B} E_D(R_B, \theta_B \approx 0). \quad (2)$$

Para todos os efeitos necessários, a derivada de E_R é simplesmente representada como

$$\frac{\partial}{\partial \theta_B} E_R(R_B, \theta_B) = E_R(R_B, \theta_B = 0) D_R(R_B, \theta_B) \times \left[\frac{1 - \text{Sgn}(\theta_B)}{2} \right], \quad (3)$$

onde o termo D_R é assumido contínuo através da fronteira de reflexão. A discontinuidade existente é levada em consideração pela função $\text{Sgn}(\theta_B)$, onde $\text{Sgn}(\theta_B) = -1$ ou $+1$ quando $\theta_B \leq 0$ ou $\theta_B > 0$, respectivamente. A determinação da derivada de E_D não é discutida em detalhes neste trabalho, mas, baseando-se na UTD, pode-se demonstrar que [2]

$$\frac{\partial}{\partial \theta_B} E_D(R_B, \theta_B) \approx -E_R(R_B, \theta_B = 0) \times \left[\sqrt{\frac{j R_B \rho_{1r}^B / \lambda}{R_B + \rho_{1r}^B}} - \frac{R_B \text{Sgn}(\theta_B)}{4 (R_B + \rho_{2r}^B) \tan \theta_U} \right], \quad (4)$$

onde λ é o comprimento de onda e θ_U ($\theta_U < 0$ por definição) é o ângulo entre a fronteira de reflexão e o eixo de simetria (eixo z , ver Figs. 1 e 2). Os raios principais de curvatura ρ_{1r}^B e ρ_{2r}^B (no plano de incidência e no plano perpendicular a este, respectivamente) referem-se à frente de onda refletida pelo ponto B do subrefletor. Devido à simetria axial do problema, ρ_{2r}^B (representado nas Figs. 1 e 2) é determinado pela interseção do raio refletido com o eixo de simetria, sendo positivo ou negativo se a cáustica correspondente for virtual ou real, respectivamente.

Observa-se das equações anteriores uma esperada discontinuidade na expressão da derivada de E_T , já que a UTD garante apenas a continuidade dos campos [1] (a combinação das componentes refletida e difratada produz um campo contínuo). Esta discontinuidade, obviamente, não representa o comportamento físico real do problema. Porém, como as aproximações da UTD reconhecidamente proporcionam resultados acurados em aplicações de antenas refletoras (especialmente para refletores com elevadas dimensões elétricas), a derivada de E_T é aproximada pela média geométrica de (4) nos dois lados da fronteira de reflexão. Desta forma, e sabendo que $|E_T| \approx |E_R|/2$

quando $\theta_B \rightarrow 0$ [1],

$$\frac{\partial}{\partial \theta_B} |E_T(R_B, \theta_B \approx 0)| \approx |E_T(R_B, \theta_B \approx 0)| \times \left[D_R(R_B, \theta_B) - \sqrt{\left| \frac{2 R_B \rho_{1r}^B / \lambda}{R_B + \rho_{1r}^B} \right|} \right]. \quad (5)$$

De (5) pode-se determinar os fatores necessários para a obtenção de um elevado *roll-off* para a radiação do subrefletor. Em princípio, isto pode ser obtido de três maneiras distintas. Como (5) varia linearmente com $|E_T|$, uma possibilidade é o aumento da iluminação da borda do subrefletor (ponto B) pelo alimentador. Contudo, isto invariavelmente aumentará o transbordamento dianteiro. Outra forma, assumindo que o termo D_R é bem comportado, seria obter $-\rho_{1r}^B \rightarrow R_B$. Porém, isto significa que o ponto de observação está próximo a uma cáustica da frente de onda refletida pelo subrefletor, o que invalida as aproximações da UTD neste ponto [1]. O terceiro e mais apropriado método é modelar o subrefletor de forma que a condição $|\rho_{1r}^B| \rightarrow \infty$ seja satisfeita (já que R_B é, geralmente, suficientemente grande), o que é discutido na próxima seção.

III. OBTENÇÃO DE BAIXOS TRANSBORDAMENTOS

Como discutido anteriormente, a forma ideal para o aumento do *roll-off* do subrefletor e a consequente diminuição do transbordamento traseiro é o modelamento das superfícies refletoras da antena de modo que $|\rho_{1r}^B| \rightarrow \infty$. Como ρ_{1r}^B é um parâmetro geométrico da frente de onda refletida pelo subrefletor, seu controle é obtido através de um modelamento baseado nos princípios da GO.

Assumindo que o campo na abertura da antena possui uma distribuição de fase uniforme (para a obtenção de um ganho elevado) e utilizando os princípios da GO, a seguinte relação entre os campos do alimentador e na abertura é derivada [1],[2]:

$$\left| \vec{E}_A^{GO}(\rho_A = D_M/2) \right| = \left| \vec{E}_F(B^-) \right| \sqrt{\left| \frac{\rho_{1r}^B}{R_{BU} + \rho_{1r}^B} \right|} \times \sqrt{\left| \frac{\rho_{2r}^B}{R_{BU} + \rho_{2r}^B} \right|}, \quad (6)$$

onde $\vec{E}_A^{GO}$ é o campo elétrico na abertura da antena, ρ_A é a coordenada radial de um ponto localizado na abertura, D_M é o diâmetro do refletor principal, $\vec{E}_F(B^-)$ é o campo elétrico radiado pelo alimentador imediatamente antes do ponto B , e R_{BU} é a distância entre os pontos B e U (Figs. 1 e 2). Aplicando a

condição $|\rho_{1r}^B| \rightarrow \infty$ em (6) obtem-se

$$\left| \vec{E}_A^{GO}(\rho_A = D_M/2) \right| \approx \left| \vec{E}_F(B^-) \right| \times \sqrt{\left| \frac{\rho_{2r}^B}{R_{BU} + \rho_{2r}^B} \right|}. \quad (7)$$

Equação (7) fornece a relação necessária entre $\vec{E}_A^{GO}(\rho_A = D_M/2)$ e $\vec{E}_F(B^-)$ de forma a produzir um baixo transbordamento traseiro. A obtenção simultânea de baixo transbordamento dianteiro ocorrerá através da utilização de um alimentador com alta diretividade ($|\vec{E}_F(B^-)|$ suficientemente pequeno). A implementação de (7) em um processo de modelamento e/ou otimização baseado em GO é praticamente imediata, já que os campos do alimentador e na abertura da antena são geralmente parâmetros especificados.

A utilização de (7) requer que os valores de R_{BU} e ρ_{2r}^B sejam previamente conhecidos, o que só é possível após a determinação da geometria dos refletores. Porém, a simples inspeção das Figs. 1 e 2 indica que estes valores podem ser facilmente estimados. Neste sentido (e partindo do princípio de que todo o projeto de antenas refletoras deve ser iniciado de geometrias clássicas, onde as superfícies refletoras são geradas a partir de seções cônicas), as geometrias clássicas são de grande valia na estimação dos parâmetros em questão. Fórmulas eficientes para o projeto de antenas de duplo-refletores clássicos com simetria axial foram recentemente desenvolvidas de forma generalizada [2],[3], o que facilita enormemente a estimação de R_{BU} e ρ_{2r}^B .

IV. PROJETO DE CONFIGURAÇÃO CASSEGRAIN COM BAIXAS PERDAS POR TRANSBORDAMENTO

A formulacção apresentada anteriormente foi aplicada no projeto de uma antena Cassegrain axialmente simétrica, atendendo as recomendações 465-5 e 580-5 do ITU para estações terrestres operando com comunicação via satélite [4] e visando o máximo ganho possível. O diâmetro do refletor principal é fixado em 100λ . A alimentação da antena é gerada por uma corneta corrugada cônica, com semi-ângulo de abertura de 8° e diâmetro de abertura de 3λ . O ganho deste alimentador é de 18 dBi, com uma elevada atenuação de 27,7 dB ($-9,7$ dBi) em seu campo distante na direção $\theta = 35^\circ$ (a coordenada esférica θ refere-se ao ponto de observação no campo distante). Esta direção corresponde à iluminação da borda do subrefletor a ser utilizado, de forma que o transbordamento dianteiro não gera lóbulos secundários superiores ao envelope recomendado pelo ITU (aproximadamente $-6,6$ dBi para $\theta = 35^\circ$) [4].

O projeto iniciou-se pela determinação de uma geometria clássica axialmente simétrica do tipo

Cassegrain. Fórmulas generalizadas (baseadas na GO) para o projeto e para o campo na abertura de configurações clássicas de duplo-refletores com simetria axial são apresentadas em [2] e [3]. Estas fórmulas possibilitam a escolha da geometria clássica de maior eficiência (calculada a partir do campo da GO na abertura). De acordo com os procedimentos de projeto de [2] e [3], a geometria clássica escolhida tem como parâmetros de entrada os diâmetros do refletor principal, subrefletor e bloqueio de 100λ , 15λ e 15λ , respectivamente, o semi-ângulo do cone (vértice no foco principal da antena) definindo a borda do subrefletor de 35° e o caminho óptico do foco principal até a abertura da antena (localizada no plano contendo o foco principal) de 60λ . Sua geometria é ilustrada em escala na Fig. 3a. Desta configuração clássica, os parâmetros R_{BU} e ρ_{2r}^B foram aproximadamente estimados em $44,2\lambda$ e $7,8\lambda$, respectivamente. Com estes valores e conhecido $|\vec{E}_F(B^-)|$ das características de radiação do alimentador, utilizando (7) o valor de $|\vec{E}_A^{GO}(\rho_A = 50\lambda)|$ foi calculado em 15 dB abaixo do valor máximo do campo na abertura. Este resultado foi utilizado na determinação da distribuição de amplitude do campo desejado para a abertura da antena, ilustrada na Fig. 4 (a distribuição de fase é constante). Esta distribuição de campo visou também a obtenção da máxima eficiência de radiação possível (sem violar as especificações do ITU). Uma vez determinado o campo desejado na abertura, as superfícies refletoras foram modeladas por um processo baseado na GO [2]. A geometria final é apresentada em escala na Fig. 3b. Para esta antena, o diâmetro de bloqueio foi aumentado para 20λ , a fim de diminuir a iluminação proveniente do refletor principal sobre o subrefletor. Detalhes deste projeto são discutidos em [2]. Vale apenas ressaltar que para a geometria final, os valores de R_{BU} e ρ_{2r}^B são virtualmente os mesmos previamente estimados e ρ_{1r}^B possui um valor elevado ($\rho_{1r}^B \approx 275\lambda$), conforme desejado.

As características elétricas destas antenas foram analisadas através do MoM. A fim de diminuir o esforço computacional, as corrugações da corneta do alimentador foram simuladas através de impedâncias anisotrópicas de superfície [2], sem prejuízo para a determinação de suas características de radiação. As Figs. 5 e 6 mostram os campos distantes radiados pelo conjunto alimentador/subrefletor das antenas clássica e modelada, respectivamente. A direção $\theta = 0$ corresponde ao feixe principal das antenas. Da Fig. 6 pode-se observar que o elevado *roll-off* ($\theta = 106^\circ$) e o reduzido transbordamento dianteiro ($\theta = 35^\circ$) contribuem de forma clara para o atendimento das recomendações do ITU, conforme esperado. Os campos distantes das antenas, agora incluindo também os respectivos refletores principais, são ilustrados pelas

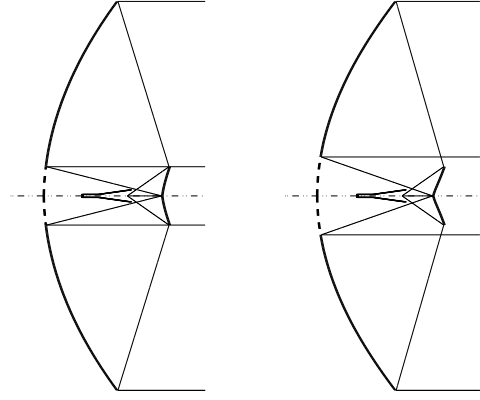


Fig. 3: Geometrias das Antenas: (a) Clássica e (b) Modelada.

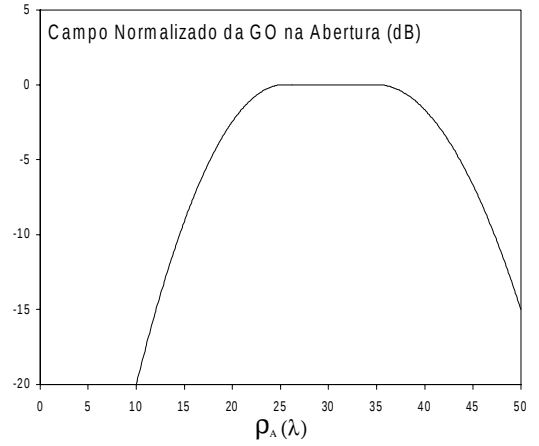


Fig. 4: Campo Normalizado na Abertura.

Figs. 7 e 8 (configurações clássica e modelada, respectivamente). A abertura central nas superfícies destes refletores foi convenientemente fechada (linhas tracejadas na Fig. 3) visando o aumento da razão frente/verso das antenas. O ganho obtido pela geometria clássica é de 47,6 dBi (Fig. 7), correspondendo a uma eficiência de 59%. Com o modelamento das superfícies refletoras, foi possível aumentar o ganho da antena para 49,0 dBi (Fig. 8), o que significa uma eficiência de 80% para uma abertura com 100λ de diâmetro. Simultaneamente, as especificações do ITU foram atendidas em mais de 90% do diagrama de radiação (Fig. 8).

V. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma formulação eficiente para o controle simultâneo das perdas por transbordamento dianteiro e traseiro em antenas Cassegrain e

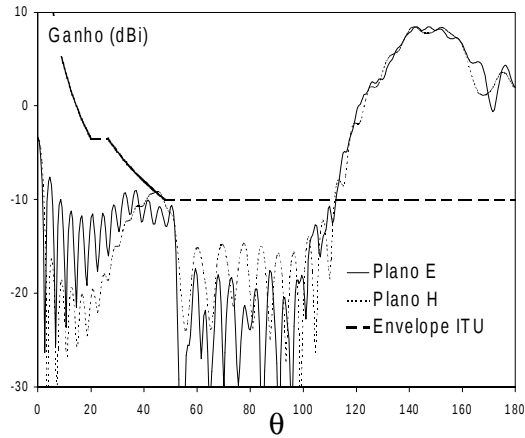


Fig. 5: Campo Distante do Conjunto Alimentador/Subrefletor da Geometria Clássica.

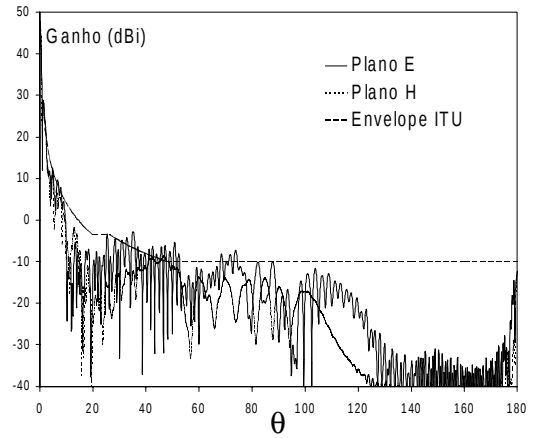


Fig. 7: Campo Distante da Geometria Clássica.

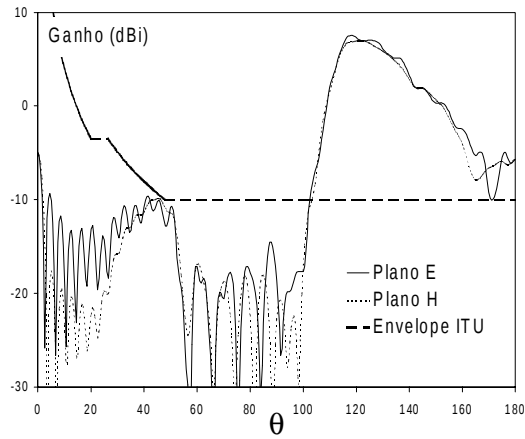


Fig. 6: Campo Distante do Conjunto Alimentador/Subrefletor da Geometria Modelada.

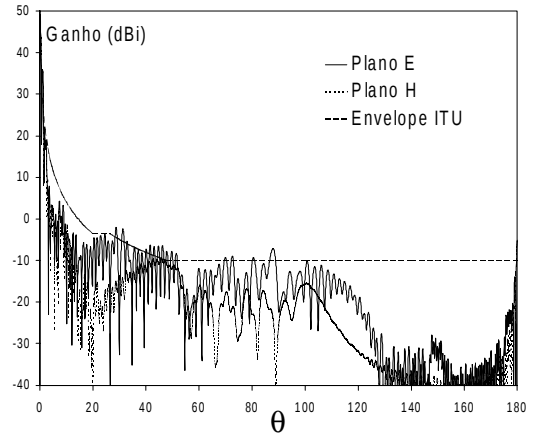


Fig. 8: Campo Distante da Geometria Modelada.

Gregorian axialmente simétricas. Os conceitos utilizados são gerais e podem, em princípio, ser utilizados em configurações offset. A técnica foi utilizada no projeto de uma configuração Cassegrain com simetria axial, objetivando as recomendações do ITU para estações terrestres operando em enlaces via satélite. Esta antena foi analisada pelo MoM, incluindo os acoplamentos entre alimentador, subrefletor e refletor principal. Constatou-se uma eficiência de 80% para um diâmetro de abertura de 100λ .

REFERÊNCIAS

[1] - R.G. Kouyoumjian e P.H. Pathak, "A Uniform Geometrical Theory of Diffraction for an Edge in a Perfectly Conducting Surface," Proc. IEEE, **62**, No. 11, pp. 1448-1461, November 1974.

[2] - F.J.S. Moreira, "Design and Rigorous Analysis of Generalized Axially-Symmetric Dual-Reflector Antennas," Ph.D. dissertation, Univ. Southern California, Los Angeles, August 1997.

[3] - F.J.S. Moreira e A. Prata, Jr., "Generalized Classical Axially-Symmetric Dual-Reflector Antennas," 1997 IEEE AP-S Internat. Symp. Digest, Montreal, Canada, pp. 1402-1405, July 1997.

[4] - International Telecommunication Union - Radio-communication (ITU-R), *S Series Recommendations - Fixed Satellite Service*.