

Síntese de Fase Não Uniforme para Diagramas de Radiação Topo-Plano e Isoflux

Pedro A. B. Leão

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Minas Gerais
Av. Antônio Carlos 6627, 31270-901, Belo Horizonte, MG
pedrobessaleao@gmail.com

Fernando J. S. Moreira

Depto. Eng. Eletrônica
Universidade Federal de Minas Gerais
Av. Antônio Carlos 6627, 31270-901, Belo Horizonte, MG
fernandomoreira@ufmg.br

Resumo—Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma técnica de síntese de fase não uniforme aplicada aos diagramas de radiação topo-plano e Isoflux, considerando uma distribuição de amplitude não uniforme sobre a abertura. Utiliza-se, como referência para comparação dos resultados obtidos, a síntese de fase para uma amplitude uniforme. Uma vez definidas as distribuições de campo sobre a abertura, emprega-se o Método da Abertura para o cálculo do diagrama de radiação. Como principal contribuição deste trabalho destaca-se a redução dos níveis de lóbulos secundários dos diagramas de radiação quando a síntese para uma distribuição de amplitude não uniforme é empregada.

Palavras-Chave—Síntese de antenas refletoras, Método da abertura, Antenas de abertura

I. INTRODUÇÃO

Diagramas de radiação topo-plano são caracterizados por uma diretividade constante em determinada região angular. Este tipo de diagrama pode ser aplicado, por exemplo, em sistemas de comunicações móveis [1]. Já diagramas de radiação Isoflux são úteis em aplicações satelitais [2], sendo caracterizados por maior diretividade nas direções de maior percurso até a Terra, compensando as atenuações espaciais.

Existem diversos trabalhos que visam projetar antenas que atendem aos diagramas topo-plano e Isoflux [3], [4] e [5]. Em [3] é discutido o projeto e a construção de uma antena com diagrama de radiação topo-plano com ampla largura de feixe. Em [4] é mostrado o desenvolvimento de uma antena compacta para banda X para satélites em órbita terrestre baixa com diagramas de radiação Isoflux.

Deve-se destacar o trabalho apresentado em [5], onde são apresentadas antenas baseadas nas configurações ADC e ADE que atendem às especificações topo-plano e Isoflux. Nesse trabalho, os refletores são sintetizados com base nas distribuições de campo nas aberturas das antenas. O campo na abertura, por sua vez, é sintetizado por meio da técnica apresentada em [6], onde é desenvolvido um método de síntese de fase não uniforme para aberturas com amplitude de campo uniforme.

A técnica de síntese apresentada em [6] foi desenvolvida para aberturas planares. Estendendo esta análise, em [7] foi investigada a síntese de fase considerando aberturas circulares bloqueadas para diagramas de radiação Isoflux, mas ainda com amplitude uniforme.

O presente trabalho é uma extensão do trabalho apresentado em [7]. Além da distribuição de amplitude uniforme sobre a abertura, é proposta uma distribuição de amplitude não uniforme com o objetivo de reduzir os níveis de lóbulos secundários e oscilações dos diagramas de radiação. Destaca-se que, além do diagrama de radiação Isoflux tratado em [7], investiga-se também o diagrama de radiação topo-plano.

Portanto, a partir dos dois diagramas de radiação (topo-plano e Isoflux) e das duas distribuições de amplitudes (uniforme e não uniforme) calcula-se as respectivas distribuições de fase $\psi(\xi)$ não uniformes sobre a abertura circular.

Uma vez calculadas as distribuições de amplitude e fase, emprega-se o Método da Abertura, com o objetivo de verificar se tais distribuições atendem às especificações de diagrama de radiação. Portanto, por meio do Método da Abertura pode-se constatar a principal contribuição deste artigo, que é a proposta de uma distribuição de amplitude que permita a redução dos níveis de lóbulos secundários dos diagramas de radiação.

Este trabalho está dividido da seguinte forma. Na seção II é apresentada a formulação de síntese de fase não uniforme. Na seção III são mostradas as equações referentes ao Método da Abertura considerando uma abertura circular. Na seção IV são discutidos os resultados deste trabalho. Por último, na seção V são apresentadas as conclusões.

II. SÍNTESE DE FASE NÃO UNIFORME

No método de síntese de fase não uniforme investigado neste trabalho deve-se definir duas funções: $F_{norm}(u)$ e $|\vec{E}_A(\vec{r}_A)|$. A função $F_{norm}(u)$ representa a amplitude do campo radiado desejado e $|\vec{E}_A(\vec{r}_A)|$ representa a amplitude do campo sobre a abertura. A partir da função $|F_{norm}(u)|^2$, calcula-se a densidade de potência radiada $h(u)$, e de $|\vec{E}_A(\vec{r}_A)|^2$ calcula-se a densidade de potência $g(\xi)$ requerida na abertura.

Impondo a conservação de energia, iguala-se $g(\xi)$ a $h(u)$. Desta igualdade, tem-se a função de mapeamento $u(\xi)$, que por sua vez é empregada em uma equação diferencial para o cálculo da distribuição de fase $\psi(\xi)$ na abertura. Esta equação diferencial é oriunda da aplicação do Método de Fase Estacionária na integral de radiação da abertura [6].

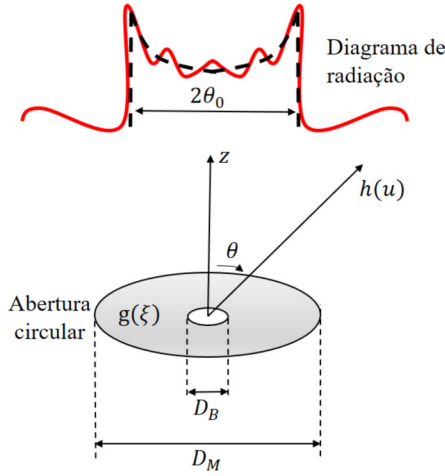


Fig. 1. Representação esquemática de abertura circular.

A abertura circular, as funções $h(u)$ e $g(\xi)$, o diâmetro da abertura D_M , o diâmetro do bloqueio D_B , e o diagrama de radiação estão representados na Figura 1.

Destaca-se que as densidades de potência radiada e na abertura são parâmetros conhecidos. Com base nessas densidades de potência, calcula-se a distribuição de fase não uniforme sobre a abertura. A seguir, são apresentadas as densidades de potência radiada (baseadas nos diagramas topo-plano e Isoflux) e as densidades de potência sobre a abertura (com amplitude uniforme [6] e não uniforme).

A. Densidade de potência radiada

A densidade de potência radiada normalizada $h(u)$ é definida como:

$$h(u) = \frac{\int_0^u |F_{norm}(\tau)|^2 \tau d\tau}{\int_0^1 |F_{norm}(\tau)|^2 \tau d\tau} \quad (1)$$

onde $|F_{norm}(u)|^2$ representa o diagrama de radiação desejado e τ é a variável auxiliar de integração. Para o diagrama de radiação topo-plano, $F_{norm}(u)$ é constante para uma determinada região angular, sendo:

$$F_{norm}(u) = \begin{cases} 1, & 0 \leq u \leq u_0 \\ 0, & u_0 < u \leq 1 \end{cases} \quad (2)$$

onde $u = \sin\theta$ e $u_0 = \sin\theta_0$. O ângulo $2\theta_0$ define a largura de feixe do diagrama de radiação topo-plano, sendo representado na Figura 1. A partir das Eqs. (1) e (2), pode-se determinar a solução analítica para $h(u)$:

$$h(u) = \frac{\int_0^u \tau d\tau}{\int_0^{u_0} \tau d\tau} = \frac{u^2}{u_0^2} \quad (3)$$

Para o diagrama Isoflux, $F_{norm}(u)$ é representada por uma função secante [7]:

$$F_{norm}(u) = \begin{cases} A \sec(\alpha_s u), & 0 \leq u \leq u_0 \\ 0, & u_0 < u \leq 1 \end{cases} \quad (4)$$

onde A é o menor valor dessa diretividade e α_s é expresso por:

$$\alpha_s = \frac{1}{u_0} \sec^{-1}(1/A) = \frac{1}{u_0} \cos^{-1}(A) \quad (5)$$

Com base nas Eqs. (1), (4) e (5), a densidade de potência radiada para o diagrama de radiação Isoflux é dada por:

$$h(u) = \frac{\int_0^u A \sec(\alpha_s \tau) \tau d\tau}{\int_0^{u_0} A \sec(\alpha_s \tau) \tau d\tau} = \frac{\alpha_s u \tan(\alpha_s u) + \ln(\cos(\alpha_s u))}{\alpha_s u_0 \tan(\alpha_s u_0) + \ln(\cos(\alpha_s u_0))} \quad (6)$$

B. Densidade de potência na abertura

Por outro lado, a densidade de potência normalizada na abertura $g(\xi)$ é definida como:

$$g(\xi) = \frac{\int_{\xi_B}^{\xi} G_A \eta d\eta}{\int_{\xi_B}^1 G_A \eta d\eta} \quad (7)$$

sendo $\xi_B = D_B/D_M$, $\xi = 2\rho/D_M$ e G_A o módulo ao quadrado do campo elétrico na abertura ($G_A = |\vec{E}_A(\vec{r}_A)|^2$). Neste trabalho, o método de síntese é desenvolvido considerando duas distribuições de amplitude. A distribuição de amplitude uniforme G_{A1} foi investigada inicialmente em [6] para uma abertura planar. Posteriormente, o estudo considerando G_{A1} foi estendido para aberturas circulares bloqueadas [7]. Já a distribuição de amplitude não uniforme G_{A2} é considerada pela primeira vez neste trabalho.

A função de amplitude uniforme é expressa por:

$$G_{A1} = |\vec{E}_A(\vec{r}_A)|^2 = \begin{cases} 0, & 0 < \xi < \xi_B \\ 1, & \xi_B \leq \xi \leq 1 \end{cases} \quad (8)$$

Neste caso, a solução analítica de $g(\xi)$ é dada por:

$$g(\xi) = \frac{\int_{\xi_B}^{\xi} \eta d\eta}{\int_{\xi_B}^1 \eta d\eta} = \frac{\xi^2 - \xi_B^2}{1 - \xi_B^2} \quad (9)$$

para $\xi_B \leq \xi \leq 1$. A segunda distribuição de amplitude, proposta neste trabalho com o objetivo de reduzir os níveis de lóbulos secundários do diagrama de radiação, é dada por:

$$G_{A2} = |\vec{E}_A(\vec{r}_A)|^2 = \begin{cases} 0, & 0 < \xi < \xi_B \\ \cos(\pi\xi/2), & \xi_B \leq \xi \leq 1 \end{cases} \quad (10)$$

Considerando G_{A2} , pode-se calcular a densidade de potência requerida na abertura $g(\xi)$ da Eq. (7):

$$g(\xi) = \frac{2(\cos(\frac{\pi\xi_B}{2}) - \cos(\frac{\pi\xi}{2})) + \pi(\xi_B \sin(\frac{\pi\xi_B}{2}) - \xi \sin(\frac{\pi\xi}{2}))}{2\cos(\frac{\pi\xi_B}{2}) + \pi(-1 + \xi_B \sin(\frac{\pi\xi_B}{2}))} \quad (11)$$

As distribuições de amplitudes investigadas estão representadas na Figura 2 para $\xi_B = 0$. Destaca-se que a atenuação de G_{A2} na borda da abertura visa a redução dos lóbulos

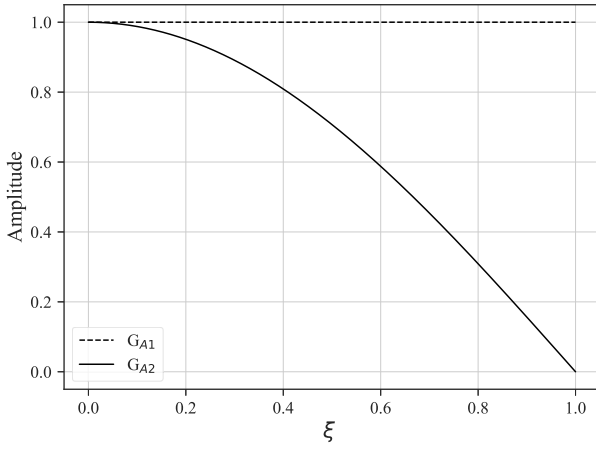


Fig. 2. Distribuições de amplitude investigadas.

secundários e das oscilações no diagrama de radiação, por reduzir os efeitos da difração na borda da abertura, ou seja, na borda da antena refletora.

C. Cálculo de fase não uniforme

Com as funções $h(u)$ e $g(\xi)$ definidas, deve-se impor a conservação de energia através de $h(u) = g(\xi)$. A partir desta igualdade, obtém-se a função de mapeamento $u(\xi)$. Considerando o diagrama de radiação topo-plano da Eq. (3), obtém-se a função de mapeamento correspondente:

$$u(\xi) = u_0 \sqrt{g(\xi)} \quad (12)$$

Para o diagrama de radiação Isoflux da Eq. (6), tem-se:

$$\frac{\alpha_s u(\xi) \tan(\alpha_s u(\xi)) + \ln(\cos(\alpha_s u(\xi)))}{\alpha_s u_0 \tan(\alpha_s u_0) + \ln(\cos(\alpha_s u_0))} = g(\xi) \quad (13)$$

sendo $u(\xi)$ determinado numericamente neste caso.

Neste trabalho consideram-se duas funções $g(\xi)$, sendo uma associada à distribuição de amplitude uniforme (Eq. (9)) e outra associada à distribuição de amplitude não uniforme (Eq. (11)). Portanto, deve-se considerar as duas funções $g(\xi)$ na solução das Eqs. (12) e (13). Por fim, pode-se determinar a função de fase $\psi(\xi)$ na abertura resolvendo numericamente a equação diferencial [6]:

$$\frac{d\psi(\xi)}{d\xi} = -k \frac{D_M}{2} u(\xi) \quad (14)$$

onde $k = 2\pi/\lambda$.

III. MÉTODO DA ABERTURA

O Método da Abertura permite validar a síntese de fase não uniforme investigada neste trabalho. A partir de um diagrama de radiação idealizado (em linhas tracejadas na Figura 1) determinam-se distribuições de campo que visam atender às especificações de diagrama. Com as distribuições de campo calculadas, emprega-se o Método da Abertura para validar as distribuições de amplitude e fase propostas.

Por meio do Princípio da Equivalência, pode-se obter as densidades de corrente elétrica e magnética [8]. Posteriormente, levando em consideração a geometria circular da abertura, as componentes θ e ϕ do campo elétrico na região de campo distante são dadas pelas Eqs. (15) e (16), respectivamente:

$$E_\theta(\vec{r}, \omega) \approx \frac{jk \exp(-jkr)}{2r} (1 + \cos \theta) \cos \phi \times \int_{D_B/2}^{D_M/2} |\vec{E}_A(\xi)| J_0(k\rho' \sin \theta) \exp(j\psi(\xi)) \rho' d\rho' \quad (15)$$

$$E_\phi(\vec{r}, \omega) \approx \frac{jk \exp(-jkr)}{2r} (1 + \cos \theta) (-\sin \phi) \times \int_{D_B/2}^{D_M/2} |\vec{E}_A(\xi)| J_0(k\rho' \sin \theta) \exp(j\psi(\xi)) \rho' d\rho' \quad (16)$$

onde J_0 é a função de Bessel de ordem zero.

IV. RESULTADOS

Neste trabalho, investiga-se a técnica de síntese de fase não uniforme para a obtenção de diagramas de radiação topo-plano e Isoflux. A distribuição de amplitude não uniforme da Eq. (10) foi proposta com o objetivo de reduzir os níveis de lóbulos secundários e oscilações do diagrama de radiação. Então, é feito um estudo comparando os diagramas de radiação obtidos a partir da distribuição de amplitude uniforme com os resultados obtidos a partir da distribuição de amplitude não uniforme proposta na Eq. (10). Para isso, considerou-se quatro configurações de aberturas e diagramas de radiação:

- 1) Abertura circular bloqueada com $D_M = 50\lambda$ e $D_B = 5\lambda$ considerando diagrama de radiação topo-plano para $\theta_0 = 10^\circ$ e $\theta_0 = 40^\circ$.
- 2) Abertura circular sem bloqueio com $D_M = 50\lambda$ e $D_B = 0\lambda$ considerando diagrama de radiação topo-plano para $\theta_0 = 10^\circ$ e $\theta_0 = 40^\circ$.
- 3) Abertura circular bloqueada com $D_M = 50\lambda$ e $D_B = 5\lambda$ considerando diagrama de radiação Isoflux para $\theta_0 = 37,76^\circ$ e $\theta_0 = 62,54^\circ$.
- 4) Abertura circular sem bloqueio com $D_M = 50\lambda$ e $D_B = 0\lambda$ considerando diagrama de radiação Isoflux para $\theta_0 = 37,76^\circ$ e $\theta_0 = 62,54^\circ$.

onde os diâmetros da abertura (D_M) e do bloqueio (D_B), junto com a largura de feixe $2\theta_0$, estão representados na Figura 1.

Em relação ao primeiro caso investigado, ou seja, uma abertura circular bloqueada com $D_M = 50\lambda$ e $D_B = 5\lambda$, a síntese de fase foi realizada para $\theta_0 = 10^\circ$ e $\theta_0 = 40^\circ$. As distribuições de fases obtidas para abertura bloqueada ($\xi_B = 1/10$) são ilustradas na Figura 3. Em vermelho estão representadas as distribuições de fase determinadas para a amplitude G_{A1} da Eq. (8), e em azul estão representadas as distribuições de fases determinadas para a amplitude G_{A2} da Eq. (10). Em linhas contínuas são apresentadas as fases obtidas

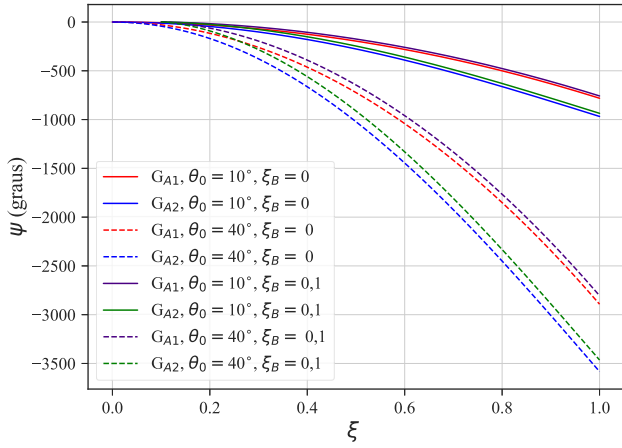


Fig. 3. Distribuições de fase para diagrama de radiação topo-plano.

para $\theta_0 = 10^\circ$ e em linhas tracejadas são mostradas as fases para $\theta_0 = 40^\circ$.

Dadas as distribuições de fase apresentadas na Figura 3 e considerando as respectivas distribuições de amplitude (Eqs. (8) e (10)), pode-se empregar o Método da Abertura para determinar os diagramas de radiação correspondentes. Na Figura 4 são mostrados os diagramas de radiação para o primeiro caso investigado. Percebe-se que a síntese de fase não uniforme para a amplitude G_{A2} (curvas em azul) apresentou menores níveis de lóbulos secundários para os dois valores de θ_0 investigados, como desejado.

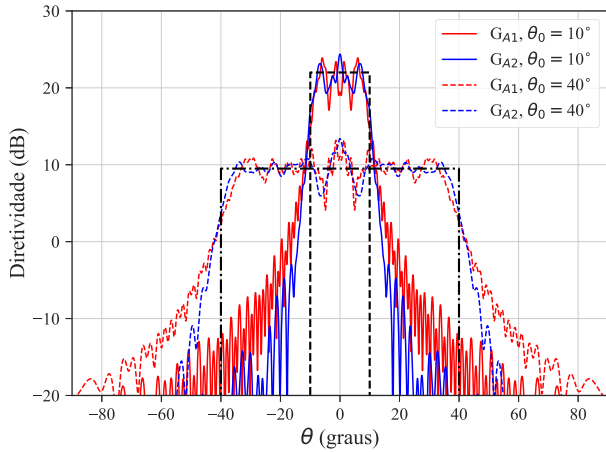


Fig. 4. Diagramas de radiação topo-plano para abertura com bloqueio.

Considerando o segundo caso proposto, ou seja, uma abertura circular sem bloqueio com $D_M = 50\lambda$ e $D_B = 0\lambda$, realizou-se a síntese de fase não uniforme para as distribuições de amplitude G_{A1} e G_{A2} . Considerou-se como objetivo o diagrama de radiação topo-plano para $\theta_0 = 10^\circ$ e $\theta_0 = 40^\circ$. As distribuições de fases obtidas para abertura sem bloqueio ($\xi_B = 0$) são mostradas na Figura 3. Em linhas contínuas

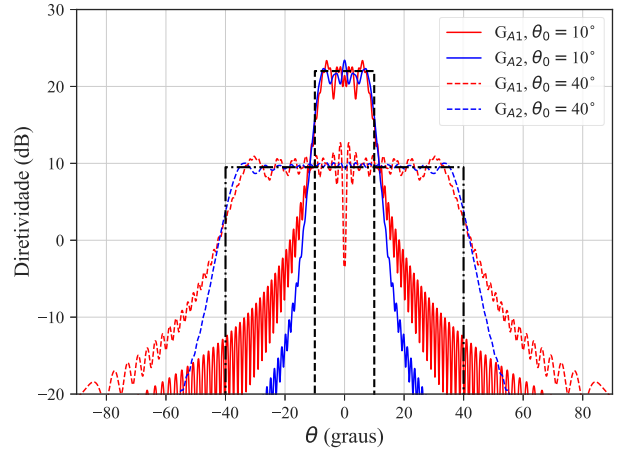


Fig. 5. Diagramas de radiação topo-plano para abertura sem bloqueio.

estão representados os resultados para $\theta_0 = 10^\circ$ e em linhas tracejadas os resultados para $\theta_0 = 40^\circ$.

Aplicando o Método da Abertura, obtém-se os diagramas de radiação apresentados na Figura 5. Por meio desses resultados, observa-se que a síntese envolvendo a distribuição de amplitude G_{A2} , além de apresentar menores níveis de lóbulos secundários, apresentou menores oscilações para $\theta \approx 0$.

Considerando o diagrama de radiação Isoflux, investigou-se inicialmente uma abertura circular bloqueada com $D_M = 50\lambda$ e $D_B = 5\lambda$. Neste caso, considerou-se dois valores de θ_0 : $37,76^\circ$ e $62,54^\circ$. Os resultados de fase obtidos para G_{A1} e G_{A2} , considerando $\xi_B = 1/10$, são mostrados na Figura 6. Em linhas contínuas são mostrados os resultados para $\theta_0 = 37,76^\circ$ e em linhas tracejadas são mostrados os resultados para $\theta_0 = 62,54^\circ$.

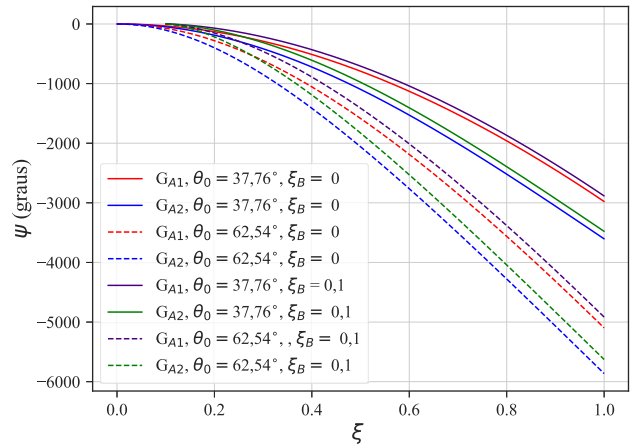


Fig. 6. Distribuições de fase para diagrama de radiação Isoflux.

Aplicando o Método da Abertura para as distribuições de fase mostradas na Figura 6 e com as respectivas amplitudes G_{A1} e G_{A2} , tem-se os diagramas ilustrados na Figura 7. De

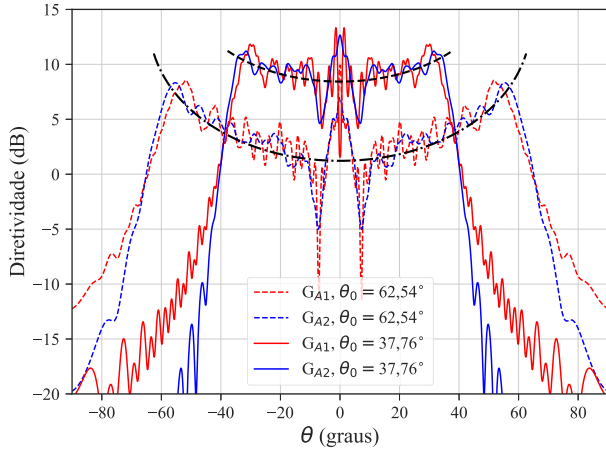


Fig. 7. Diagramas de radiação Isoflux para abertura com bloqueio.

forma análoga aos diagramas topo-plano, obteve-se redução nos níveis de lóbulos secundários para a síntese envolvendo a amplitude G_{A2} para os dois valores de θ_0 investigados.

Por último, no quarto caso investigado considera-se uma abertura circular sem bloqueio com $D_M = 50\lambda$ e $D_B = 0\lambda$. Neste caso, adotou-se diagramas Isoflux com $\theta_0 = 37,76^\circ$ e $\theta_0 = 62,54^\circ$. As fases obtidas para uma abertura sem bloqueio ($\xi_B = 0$) são apresentadas na Figura 6, em linhas contínuas para $\theta_0 = 37,76^\circ$ e em linhas tracejadas para $\theta_0 = 62,54^\circ$.

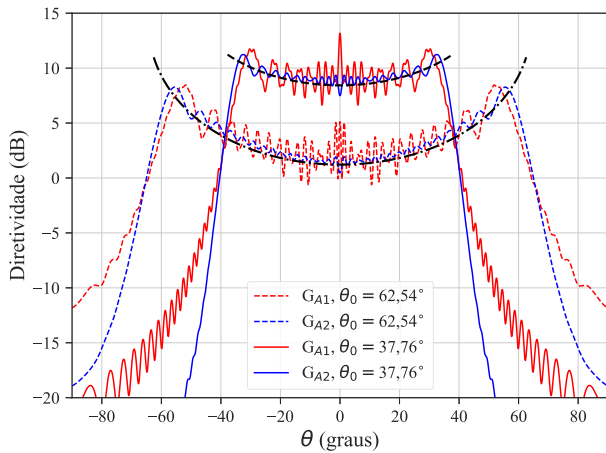


Fig. 8. Diagramas de radiação Isoflux para abertura sem bloqueio.

Aplicando o Método da Abertura para as distribuições de fases e amplitudes do quarto caso, obtém-se os diagramas de radiação apresentados na Figura 8. Destaca-se que a síntese envolvendo a amplitude G_{A2} apresentou, mais uma vez, menores níveis de lóbulos secundários. Além disso, para abertura sem bloqueio, os resultados relacionados a G_{A2} apresentaram menores oscilações no diagrama para $\theta \approx 0$.

Vale destacar também que as linhas tracejadas em preto, nas Figuras 7 e 8, representam a diretividade teórica Isoflux

e foram calculadas de acordo com a formulação apresentada em [7].

De forma geral, pode-se concluir que para todos os casos investigados, seja para diagramas de radiação topo-plano ou Isoflux, a síntese de fase não uniforme apresenta resultados melhores em relação aos níveis de lóbulos secundários quando considera-se a distribuição de amplitude G_{A2} . Em relação a aberturas circulares sem bloqueio, a síntese considerando a amplitude G_{A2} apresentou diagramas de radiação com menores oscilações, inclusive para $\theta \approx 0$, quando comparada com a amplitude G_{A1} .

V. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi investigada a síntese de fase não uniforme baseada em uma distribuição de amplitude não uniforme sobre a abertura, obtendo-se como resultado a redução nos níveis de lóbulos secundários dos diagramas de radiação para todas as configurações investigadas. Na análise, considerou-se diagramas de radiação topo-plano e Isoflux. Destaca-se que, para aberturas circulares sem bloqueio, a síntese de fase, além de apresentar redução dos níveis de lóbulos secundários, apresentou reduções nas oscilações para $\theta \approx 0^\circ$, quando comparada com a síntese envolvendo amplitude uniforme. Como trabalhos futuros, pretende-se investigar formas de reduzir as oscilações para $\theta \approx 0^\circ$ considerando abertura circular bloqueada. Feito isso, esta técnica deverá ser empregada na síntese de antenas duplo-refletores.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado por CNPq (303257/2022-9), FAPEMIG (PPM-00384-18) e CAPES-PROEX.

REFERÊNCIAS

- [1] X. He, Y. Zhang, Z. H. Jiang and W. Hong, "A Generalized Flat-Topped Beam Synthesis Approach for Uniform Linear Array With Arbitrary Beam Directions," in *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, vol. 3, pp. 709-721, 2022.
- [2] E. -c. Choi, J. W. Lee and T. -K. Lee, "Modified S-Band Satellite Antenna With Isoflux Pattern and Circularly Polarized Wide Beamwidth," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 12, pp. 1319-1322, 2013.
- [3] D. M. Nguyen, N. D. Au and C. Seo, "Aperture-Coupled Patch Antenna With Flat-Top Beam for Microwave Power Transmission," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 21, no. 10, pp. 2130-2134, Oct. 2022.
- [4] E. Arnaud et al., "Compact Isoflux X-Band Payload Telemetry Antenna With Simultaneous Dual Circular Polarization for LEO Satellite Applications," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 19, no. 10, pp. 1679-1683, Oct. 2020.
- [5] Faria T. V. B.; Moreira, F. J. S. *New technique for shaping axisymmetric dual-reflector antennas using conic sections to control aperture illumination*. IET Microwaves, Antennas and Propagation, v. 14, n. 12, p. 1310-1315, 2020.
- [6] A. K. Chakraborty, B. N. Das, and G. S. Sanyal, "Determination of phase functions for a desired one-dimensional pattern", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. AP-29, No. 3, pp. 502-506, May 1981.
- [7] P. A. B. Leão, T. V. B. Faria, F. J. S. Moreira, *Síntese de Distribuições de Fase Não Uniforme para Abertura Circular com Diagrama de Radiação Isoflux*, São José dos Campos-SP, Simpósio Brasileiro de Telecomunicações 2023, SBRT2023.
- [8] Balanis, C. A. *Antenna Theory: Analysis and Design* (3rd ed.). New York: Wiley.