

# Filtro de ressonância de modo guiado feito de FSS dielétrica: Caracterização e projeto.

Domingos Marcos Canga e Felipe Beltrán Mejía

**Resumo** — Neste trabalho apresentamos o desenvolvimento de um filtro de ressonância monolítico. O filtro projetado apresenta uma atenuação na ordem de 36 dB na frequência de ressonância de 1.5 GHz e alta transmissão no resto da faixa de frequência. Este filtro também apresenta um bom desempenho quando submetido a potências elevadas. Além disso, o filtro pode ser impresso a baixo custo usando impressoras 3D convencionais.

**Palavras-Chave** — Superfícies seletivas em frequência (FSS), Filtro de ressonância de modo guiado, Projeto do filtro, Análise de tolerância, Estruturas dielétricas.

**Abstract** — In this paper we present the design of a monolithic resonant filter. The proposed stop-band filter exhibits a 36 dB attenuation peak for a 1.5 GHz resonance frequency and high transmittance in the rest of the frequency band. Also, this filter exhibits a good performance when exposed to high power radiation. Furthermore, it is a cost-effective design that can be printed using a conventional 3D printer.

**Keywords** — Frequency selective surfaces (FSSs), Guided mode resonance filters, Filter design, Tolerance analysis, Periodic structures.

## I. INTRODUÇÃO

As superfícies seletivas em frequência (FSS) são estruturas metálicas ou dielétricas compostas por elementos periódicos com a finalidade de filtrar as ondas eletromagnéticas incidentes sobre uma superfície [1, 2]. As FSS são utilizadas em uma ampla margem do espectro eletromagnético, desde as micro-ondas, ondas milimétricas e a faixa óptica. A sua aplicação tem despertado grande interesse, por reduzir sinais interferentes na filtragem ou bloqueio de ondas eletromagnéticas, tais como divisores de feixes ópticos[3], sistemas de identificação por radiofrequência (RFID) [4], lentes [5], construção de radomes [6], sub-refletores para antena Cassegrain multibanda [7] e proteção contra as interferências eletromagnéticas.

A maior parte das FSS são construídas com arranjos metálicos periódicos ou matrizes de dipolos com o objetivo de explorar as interações entre as ondas eletromagnéticas e os metais [8]. Porém, as FSS metálicas apresentam alta absorção quando submetidos a potências elevadas [9]. Para resolver este problema, tem sido criado as FSS dielétricas construídas com materiais de baixas perdas para garantir o seu bom desempenho. Conforme será apresentado na seção seguinte, o desenho de FSS sem o uso de materiais metálicos é baseado na condição de ressonância de modo guiado [1].

Este artigo propõe o projeto do filtro de ressonância de modo guiado, analisa a tolerância de parâmetros e estabelece o ajuste da estrutura dielétrica usando o método de análise rigorosa de ondas acopladas (RCWA) [10]. Devido à sua

eficiência computacional, o método RCWA é utilizado na resolução da dispersão do campo elétrico de estruturas tridimensionais (3D).

Este trabalho foi organizado em cinco seções: a Seção II aborda o filtro de ressonância de modo guiado. A Seção III apresenta o projeto do filtro e a Seção IV a análise de tolerância. Os ajustes necessários são objeto da Seção V e na Seção VI discutem-se as principais conclusões do trabalho.

## II. FILTRO DE RESSONÂNCIA DE MODO GUIADO

Os filtros de ressonância de modo guiado são estruturas planares constituídos por uma grade e um guia de ondas. Estas estruturas são altamente compactas, simples de serem construídas através de materiais dielétricos de baixas perdas de modo a garantir a alta performance [11].

### A. Ressonância de modo guiado

Existem dois mecanismos dependentes que descrevem o comportamento da ressonância de modo guiado [12]. O primeiro consiste na difração de uma onda incidente sobre uma grade conforme ilustrado na Fig. 1, onde a amplitude do campo propagado possui as mesmas variações da grade. Portanto, a partir das equações de Maxwell pode-se calcular a amplitude e a fase de cada modo difratado, e a direção pode ser determinada pela equação da grade [13],

$$n_g \sin \theta_m = n_1 \sin \theta_{\text{inc}} - m \frac{\lambda_0}{\Lambda}, \quad (1)$$

onde  $n_g$  é o índice de refração da grade,  $n_1$  é o índice de refração no vácuo,  $\theta_{\text{inc}}$  é o ângulo da onda incidente,  $\lambda_0$  é o comprimento de onda no vácuo,  $\Lambda$  é o período da grade e  $\theta_m$  é o ângulo que corresponde ao modo  $m$  difratado pela grade.

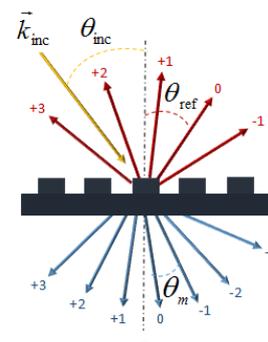


Fig. 1. Modos de difração de uma onda  $\vec{k}_{\text{inc}}$  que incide sobre uma grade de difração, onde  $\theta_{\text{ref}}$  e  $\theta_m$  são ângulos dos modos de reflexão e refração respectivamente.

O segundo mecanismo é o guia de ondas, onde a luz se propaga ao longo de um caminho confinado por reflexão total interna [14]. Portanto, para que a onda seja guiada pelo guia, o índice efetivo do modo guiado deve ser maior ao meio circundante e inferior ao índice de refração do núcleo. Com isto, pode se escrever uma condição para o guiamento das ondas,

$$\max[n_1, n_2] \leq \left| \frac{\beta_m}{k_0} \right| \leq n_g, \quad (2)$$

sendo  $\beta_m$  a constante de propagação do modo  $m$ ,  $n_2$  é o índice de refração do substrato e  $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ . Neste contexto, um modo guiado pode ser considerado como um raio de luz que se propaga com o ângulo  $\theta_m$  [15], tal que,

$$\frac{\beta_m}{k_0} = n_g \sin \theta_m. \quad (3)$$

A ressonância de modo guiado ocorre quando existe uma ordem difratada com o mesmo ângulo de um modo guiado. Portanto, substituindo (3) em (1) tem-se uma nova equação que é substituída em (2). Após isto, obtém-se uma desigualdade que estima a região onde pode ocorrer a ressonância de modo guiado,

$$\max[n_1, n_2] \leq \left| n_1 \sin \theta_{\text{inc}} - m \frac{\lambda_0}{\Lambda} \right| \leq n_g. \quad (4)$$

Com base em (4) foi gerada a Fig. 2, que ilustra as regiões de ressonância em função do ângulo incidente e o comprimento de onda normalizado ( $\lambda_0/\Lambda$ ), onde  $n_1 = 1$ ,  $n_2 = 1.7$  e  $n_g = 2.0$ .

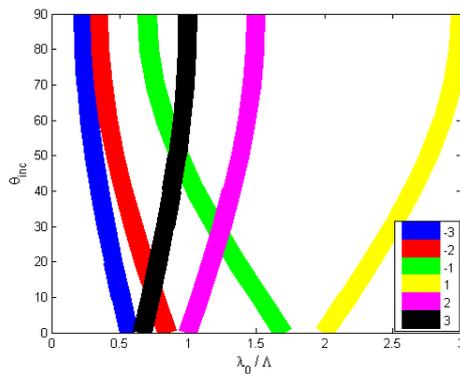


Fig. 2. Região de ressonância do filtro de ressonância de modo guiado.

Os ângulos dos modos difratados dependem da ordem de difração, tipo de material, comprimento de onda e o período da grade [1]. À medida que o período da grade aumenta em relação ao comprimento de onda, o número de ressonância aumenta exponencialmente [12]. Com o auxílio da Fig. 2, obteve-se a expressão que estima o período da grade inicial:

$$\Lambda = 0.7\lambda_0, \quad (5)$$

onde o valor encontrado foi  $\Lambda = 14.0$  cm.

#### B. Análise Rigorosa de Ondas Acoplada (RCWA)

A modelagem do comportamento óptico de dispositivos de ressonância de modo guiado é obtida através de métodos de

simulação no domínio da frequência. Os mais utilizados são diferenças finitas no domínio da frequência (FDFD) [16] e a análise rigorosa de ondas acoplada (RCWA) [10].

Neste trabalho foi utilizado o método RCWA devido à sua eficiência computacional para estruturas tridimensionais (3D). Este é um método semi-analítico que serve para resolver a dispersão do campo elétrico nas estruturas dielétricas periódicas. A estrutura do filtro foi simulada utilizando o software ANSYS HFSS [17] que possui o método RCWA.

### III. PROJETO DO FILTRO

Para desenvolver um filtro de ressonância de modo guiado é necessário a escolha do tipo de material dielétrico e a frequência de ressonância do filtro. A frequência escolhida foi 1.5 GHz por ser consideravelmente baixa para fabricação e manipulação da estrutura. O material escolhido foi Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS), porque é de baixo custo, é fácil de conseguir no formato de filamento para impressora 3D e possui um baixo coeficiente de absorção [18]. A constante dielétrica para este material é  $\epsilon_2 = 2.8$ . Com estes dados, o filtro foi implementado em três etapas.

Primeiro, foi modelada a transmissão de duas camadas para obter a mínima reflexão na banda de interesse utilizando o método da matriz de transferência [19]. Seguidamente, para minimizar a reflexão da estrutura dielétrica, foram determinados os parâmetros constante dielétrica efetiva ( $\epsilon_1$ ), e os parâmetros geométricos  $d_1$  e  $d_2$  usando o método de otimização de mínimos quadrados. Após a aplicação do método foram encontrados os seguintes valores:  $\epsilon_1 = 1.44$ ,  $d_1 = 2.0$  cm e  $d_2 = 5.50$  cm.

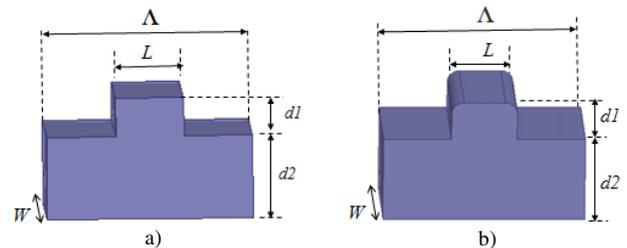


Fig. 3. Dimensões do filtro de ressonância de modo guiado: a) Estrutura com as extremidades retas e b) Estrutura com as extremidades chanfradas.

Segundo, tendo  $\epsilon_1$  é possível determinar o fator de preenchimento da grade a partir da teoria do meio efetivo [1],

$$f = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_{\text{inc}}}{\epsilon_2 - \epsilon_{\text{inc}}}, \quad (6)$$

onde  $\epsilon_{\text{inc}}$  é a constante dielétrica do ar e  $f = L/\Lambda$  é o fator de preenchimento da grade. Logo, o fator de preenchimento encontrado foi de 24.4%.

Terceiro, o período da grade inicial foi determinado utilizando (5). Para ajustar o período da grade na frequência de 1.5 GHz foi aplicado o método RCWA, obtendo  $\Lambda = 16.0$  cm.

### IV. ANÁLISE DE TOLERÂNCIA

Nesta seção do artigo fez-se a comparação dos coeficientes de transmissão e reflexão obtidos na Fig. 4, com os melhores coeficientes encontrados depois de fazer uma variação paramétrica para  $d_1$ ,  $f$  e  $\Lambda$ . Após simular a estrutura da Fig. 3a, obteve-se os parâmetros  $S$  e suas respectivas fases em

função da frequência. Os coeficientes de transmissão ( $S_{21}$ ), reflexão ( $S_{11}$ ) e suas fases correspondentes são ilustrados na Fig. 4 onde  $S_{21} = -7.9$  dB e  $S_{11} = -2.3$  dB para 1.56 GHz. Estes resultados estão longe do esperado, porque o filtro está ressoando fora da frequência desejada e está refletindo 58% da potência incidente e apenas 42% é transmitida pela estrutura. Quando se espera obter uma ressonância em 1.5 GHz e uma boa transmissão no resto da faixa de frequência. Assim, para o funcionamento adequado do filtro, o coeficiente de transmissão ( $S_{21}$ ) deve estar abaixo de -10 dB e a reflexão próxima de zero na frequência definida.

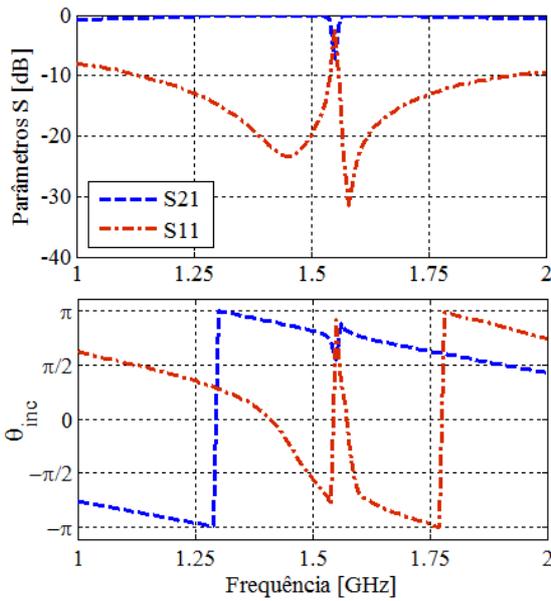


Fig. 4. Parâmetros S e as fases em função da frequência para uma grade com  $d_1 = 2.0$  cm,  $d_2 = 5.50$  cm,  $f = 24.4\%$ ,  $\Lambda = 14.0$  cm e  $L = 3.40$  cm.

Na Fig. 3b trata-se de um cenário real onde as extremidades da estrutura possuem vértices curvos, devido ao processo de fusão por deposição de material (FDM) usado pela impressora 3D. Os parâmetros de transmissão e reflexão obtidos com esta estrutura são respectivamente,  $S_{21} = -12.3$  dB e  $S_{11} = -2$  dB. Houve melhoria nos coeficientes encontrados em relação aos coeficientes obtidos na Fig. 4. Porém, estes coeficientes tendem a piorar à medida que as curvas das extremidades forem acentuadas, degradando assim o campo elétrico transmitido. Por esta razão, resolveu-se utilizar o modelo da Fig. 3a para análises posteriores.

#### A. Variação do parâmetro $d_1$

A alteração deste parâmetro influi diretamente na resposta em frequência da estrutura, onde a espessura da grade ( $d_1$ ) foi variada no intervalo de 2.0 cm a 3.0 cm com passos de 1 mm. Escolheu-se este intervalo, porque espessuras maiores provocam grandes variações na resposta de magnitude do filtro em função da frequência. Porém, observou-se que à medida que varia a espessura da grade, a frequência de ressonância mantém-se constante na faixa de frequência de 1 a 2 GHz. Os coeficientes de transmissão e reflexão variam conforme o aumento da espessura da grade. Sendo que a melhor variação ocorreu em  $d'_1 = 3.0$  cm com os seguintes coeficientes de transmissão e reflexão,  $S_{21} = -16.8$  dB e  $S_{11} = -1.2$  dB. Na Fig. 5 tem-se a comparação entre os coeficientes de transmissão e reflexão com  $d_1 = 2.0$  cm e

$d'_1 = 3.0$  cm. Na Fig. 6 tem-se a comparação entre as fases destes coeficientes em função da frequência. É visível o impacto que este parâmetro causa na magnitude do filtro, mesmo tendo mantido todas as especificações iniciais do filtro. Obteve-se uma melhoria considerável em relação ao encontrado na Fig. 4.

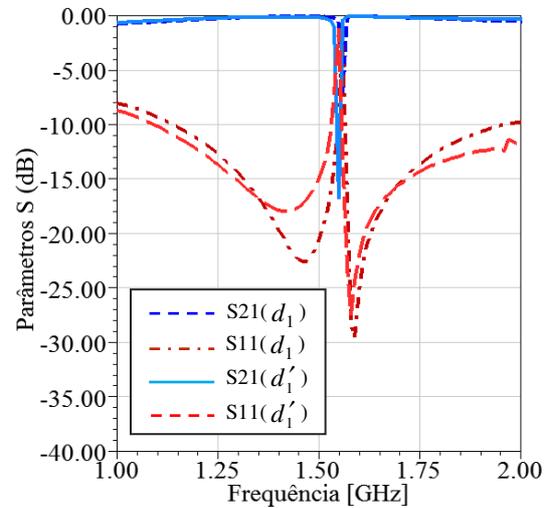


Fig. 5. Comparação dos coeficientes de transmissão e reflexão vs frequência para  $d_1 = 2.0$  cm e  $d'_1 = 3.0$  cm.

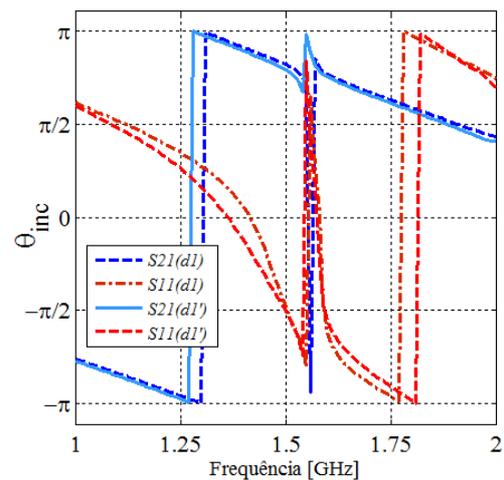


Fig. 6. Comparação de fases vs frequência para  $d_1 = 2.0$  cm e  $d'_1 = 3.0$  cm.

#### B. Variação do parâmetro $f$

O fator de preenchimento foi variado no intervalo de 24% a 40% com incremento de 1%. Intervalos maiores de fatores de preenchimento provocam grandes variações na resposta em frequência. No entanto, à medida que aumenta o fator de preenchimento a frequência de ressonância diminui gradativamente, permitindo o surgimento de novas ressonâncias na estrutura. O melhor resultado obtido foi  $S_{21} = -16.2$  dB e  $S_{11} = -1.5$  dB para  $f = 38\%$  e 1.41 GHz. Na Fig. 7 tem-se a comparação entre os coeficientes de transmissão e reflexão com  $f = 24\%$  e  $f' = 38\%$ . Na Fig. 8 tem-se a comparação entre as fases destes coeficientes em função da frequência. Percebe-se que com a variação deste parâmetro, obtém-se uma ótima resposta de magnitude do filtro em relação ao resultado encontrado na Fig. 4.

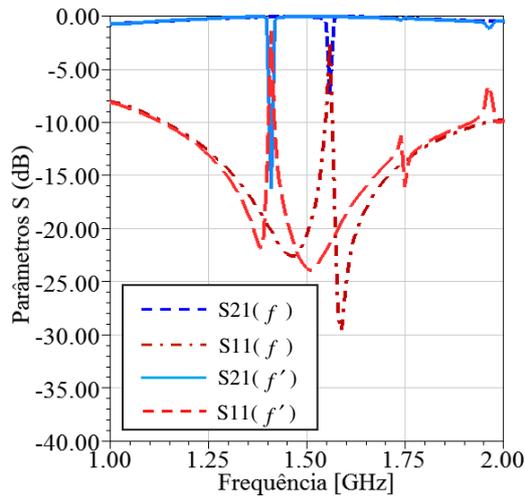


Fig. 7. Comparação dos coeficientes de transmissão e reflexão vs frequência dos fatores de preenchimento:  $f = 24\%$  e  $f' = 38\%$ .

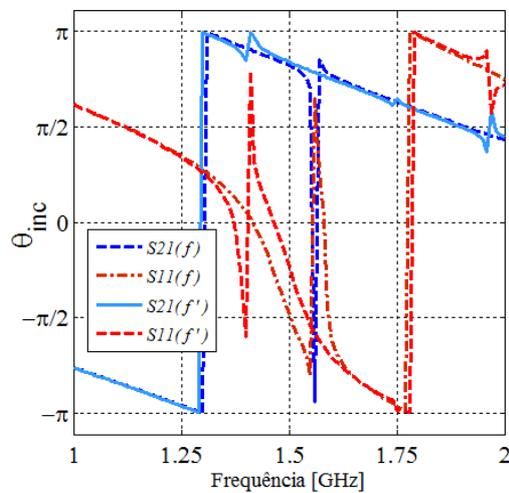


Fig. 8. Comparação de fases vs frequência dos seguintes fatores de preenchimento:  $f = 24\%$  e  $f' = 38\%$ .

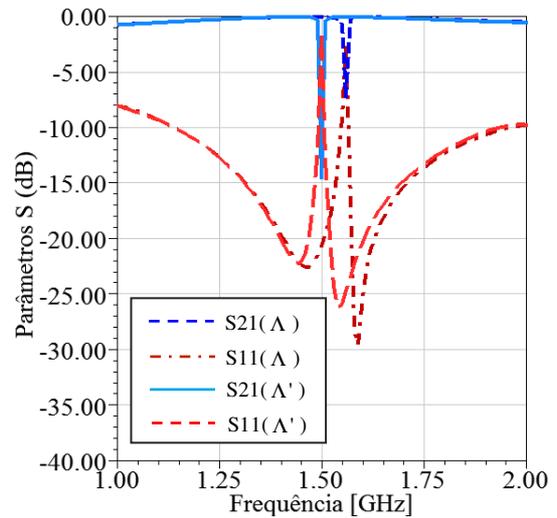


Fig. 9. Comparação dos coeficientes de transmissão e reflexão vs frequência dos seguintes períodos da grade:  $\Lambda = 14.0\text{ cm}$  e  $\Lambda' = 16.10\text{ cm}$ .

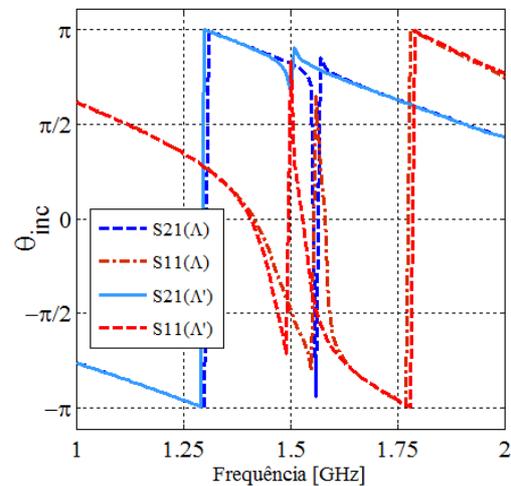


Fig. 10. Comparação de fases vs frequência para  $\Lambda = 14.0\text{ cm}$  e  $\Lambda' = 16.10\text{ cm}$ .

### C. Variação do parâmetro $\Lambda$

A variação deste parâmetro também afeta diretamente o comprimento da grade, onde o período da grade ( $\Lambda$ ) foi variado no intervalo de 14.0 cm a 16.30 cm com passos de 1 mm. Para intervalos maiores de período da grade ocorrem grandes variações na resposta em frequência. À medida que aumenta o período da grade a frequência de ressonância diminui linearmente e os coeficientes de transmissão e reflexão melhoram em alguns pontos. Assim, a melhor variação do período da grade ocorreu em  $\Lambda' = 16.10\text{ cm}$ . Exatamente na frequência de ressonância de 1.5 GHz com os seguintes coeficientes de transmissão e reflexão respectivamente,  $S_{21} = -14.8\text{ dB}$  e  $S_{11} = -1.6\text{ dB}$ . Na Fig. 9 tem-se a comparação entre os coeficientes de transmissão e reflexão com  $\Lambda = 14.0\text{ cm}$  e  $\Lambda' = 16.10\text{ cm}$ . Na Fig. 10 tem-se a comparação entre as fases destes coeficientes em função da frequência. Com a variação deste parâmetro obtém-se uma ótima resposta de magnitude do filtro em relação ao resultado obtido na Fig. 4.

### V. AJUSTE DA ESTRUTURA DIELÉTRICA

Para se obter a ressonância na frequência de 1.5 GHz manteve-se os valores de  $f$  e  $d_1$ . Os valores ajustados foram  $d_2 = 5.59\text{ cm}$ ,  $\Lambda = 16.0\text{ cm}$  e  $L = 3.90\text{ cm}$ . Os coeficientes de transmissão e reflexão podem ser encontrados na Fig. 11, com os respectivos valores  $S_{21} = -36\text{ dB}$  e  $S_{11} = -0.0011\text{ dB}$ . A ressonância do filtro ocorreu na frequência de 1.5 GHz conforme previsto no projeto, permitindo com que a potência incidente seja totalmente refletida para fora da grade, e transmitindo nas demais frequências.

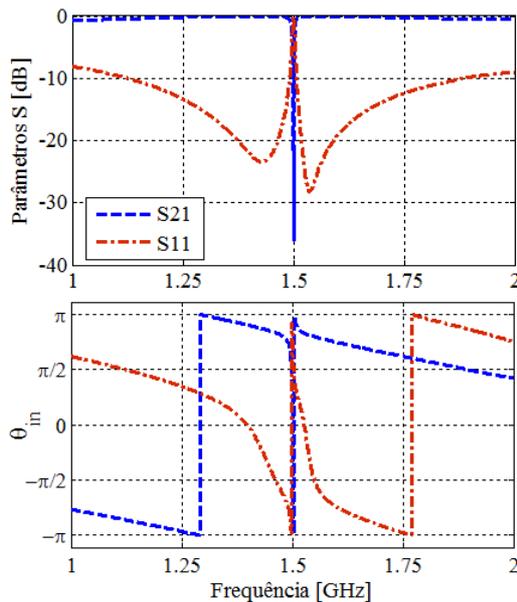


Fig. 11. Parâmetros S e suas fases em função da frequência, com o filtro ressoando na frequência de 1.5 GHz com os seguintes parâmetros:  $d_1 = 2.0$  cm,  $d_2 = 5.59$  cm,  $f = 24.4\%$ ,  $\Lambda = 16.0$  cm e  $L = 3.90$  cm.

## VI. CONCLUSÃO

O filtro de ressonância de modo guiado foi proposto e desenvolvido numericamente. O design obtido, além de ser uma excelente alternativa para substituir os materiais metálicos, apresenta uma forte ressonância na frequência projetada. O filtro apresentou uma atenuação na ordem de 36 dB na frequência de ressonância de 1.5 GHz. Ou seja, fora da ressonância a maior parte da radiação será transmitida e só será refletida a radiação com a frequência projetada, e essa radiação ocorre na direção normal com a polarização TE. A sua largura de banda é aceitável para o comportamento rejeita-faixa de banda estreita esperado. Este filtro pode ser utilizado em sistemas de comunicações que exigem uma forte resposta em frequência. O trabalho futuro será focado no desenvolvimento de dispositivos operando com múltiplas ressonâncias.

## VII. REFERÊNCIAS

- [1] J. H. Barton, R. C. Rumpf, R. W. Smith, C. L. Kozikowski, and P. A. Zellner, "All-dielectric frequency selective surfaces with few number of periods," *Progress In Electromagnetics Research B*, vol. 41, pp. 269–283, 2012.
- [2] B. Munk, "Frequency Selective Surfaces: Theory and Design," Wiley, New York, 2005.
- [3] G. G. Cox, P. J. Russel, and N. Tucker, "Millimeter wave research demonstrator: antenna and optics subsystem.," *Marconi Space System research report*, setembro 1988.
- [4] I. Jalaly and I. D. Robertson, "RF barcodes using multiple frequency bands," *Microwave Symposium Digest*, 2005.
- [5] D. M. Pozar, "Flat lens antenna concept using aperture coupled microstrip patches," *Electronics Letters*, vol. 32, no. 23, pp. 2109–2111, Nov. 1996.
- [6] D. L. Raynes and J. DeLap, "Design of a finite array with a radome incorporating a frequency selective surface," *IEEE 2nd European Conference on Antennas and Propagation*, pp. 1–5, 2007.
- [7] V. Agrawal and W. Imbriale, "Design of a dichroic Cassegrain subreflector," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 27, no. 4, pp. 466–473, Jul. 1979.
- [8] L. B. Wang, K. Y. See, J. W. Zhang, A. C. W. Lu, and S. T. Ng, "Full-wave modeling and analysis of screen printed EMI shield," in *2010 Asia-Pacific Microwave Conference*, 2010, pp. 1348–1351.

- [9] S. Pugh, "Using FSS in HPM applications," *MS Thesis, Air Force Institute of Technology*, 2010.
- [10] M. G. Moharam, T. K. Gaylord, E. B. Grann, and D. A. Pommet, "Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings," *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 12, no. 5, pp. 1068–1076, May 1995.
- [11] S. Tibuleac and R. Magnusson, "Reflection and transmission guided-mode resonance filters," *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 14, no. 7, pp. 1617–1626, Jul. 1997.
- [12] R. C. Rumpf and E. G. Johnson, "Modeling fabrication to accurately place GMR resonances," *Optics Express*, vol. 15, no. 6, pp. 3452–3464, Mar. 2007.
- [13] H. P. Herzing, *Micro-Optics: Elements, Systems And Applications*, (Taylor & Francis, Philadelphia, PA, 1998).
- [14] R. E. Collin, *Field Theory of Guided Waves*, Second ed., IEEE Press, New York 1991.
- [15] K. Okamoto, *Fundamentals of Optical Waveguides - 2nd Edition*, Academic Press, New York 2000.
- [16] R. Rumpf, "Design And Optimization Of Nano-optical Elements By Coupling Fabrication To Optical Behavior," *Electronic Theses and Dissertations*, Jan. 2006.
- [17] ANSYS HFSS. High frequency electromagnetic field simulation. <http://www.ansys.com/Products/Electronics/ANSYS-HFSS>, Acessado em 10/03/2017.
- [18] P. I. Deffenbaugh, R. C. Rumpf, and K. H. Church, "Broadband Microwave Frequency Characterization of 3-D Printed Materials," *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 3, no. 12, pp. 2147–2155, Dec. 2013.
- [19] J. Hao and L. Zhou, "Electromagnetic wave scatterings by anisotropic metamaterials: Generalized 4 x 4 transfer-matrix method," *Phys. Rev. B*, vol. 77, no. 9, p. 94201, Mar. 2008.