

ANÁLISE E PROJETO DE SUPERFÍCIES SELETIVAS EM FREQUÊNCIA UTILIZANDO A GEOMETRIA FRACTAL DE GOSPER

Albanisa F. dos SANTOS; Marieliton M. BARBOSA; Paulo H. da F. SILVA; Rossana M. S. CRUZ

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB), Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado, Av. 1º de Maio, 720, Jaguaribe, CEP: 58015-430, e-mails: albanisafelipo@gmail.com, mmb.lete@gmail.com, henrique@ifpb.edu.br, mscrossana@gmail.com

RESUMO

Este artigo apresenta uma nova proposta de superfícies seletivas em frequência (FSSs) atuando como filtros espaciais rejeita-faixa de banda dupla. As estruturas foram projetadas utilizando a geometria fractal de Gosper, em três níveis de iteração. A geometria fractal tem por finalidade ajustar a frequência de operação e a largura de banda da estrutura periódica sem alterar seu tamanho original. Os coeficientes de transmissão das FSSs foram simulados com o *software* comercial Ansoft DesignerTM v3.5. Quatro protótipos de FSS com *patches* fractais de Gosper foram fabricados e medidos nos laboratórios do IFPB. Os resultados experimentais comprovaram o desempenho das estruturas como filtros espaciais com banda dupla de rejeição. A sintonia das frequências de ressonância das FSSs de Gosper através de um parâmetro fractal (número de iterações) também é uma contribuição inovadora deste trabalho.

Palavras-chave: superfícies seletivas em frequência, geometria fractal, FSS fractais, análise, projeto.

1 INTRODUÇÃO

As Superfícies Seletivas em Frequência (FSSs – *Frequency Selective Surfaces*) são estruturas periódicas bidimensionais utilizadas em uma grande variedade de aplicações (ARAÚJO, 2009; CRUZ et al., 2009; OLIVEIRA et al., 2009a) de sistemas de radiofrequência (RF) e micro-ondas, com especificações de filtros rejeita-faixa ou passa-faixa, dependendo do tipo de elemento do arranjo (*patch* ou abertura, respectivamente). Além disso, podem ser definidas como estruturas de anteparo fino ou espesso, dependendo da espessura do elemento; as estruturas convencionais de anteparo fino são fabricadas utilizando a técnica de circuito impresso, enquanto as de anteparo espesso são obtidas através de guias de onda empilhados (CAMPOS, 2009).

Desta forma, uma FSS é capaz de selecionar os sinais desejáveis em uma faixa de frequências de interesse. Com o intuito de atender aos requisitos das aplicações atuais das comunicações sem fio, os filtros de RF/micro-ondas são continuamente otimizados em busca de melhor desempenho, dimensões compactas e baixo custo. A Figura 1 mostra a configuração básica de uma estrutura de FSS.

Os fractais são formas geométricas cuja complexidade aumenta com o aumento das repetições de padrões pré-definidos, de acordo com a geometria utilizada. O projeto de uma FSS com elementos fractais é uma solução bastante competitiva, uma vez que as características inerentes à geometria fractal permitem o desenvolvimento de filtros espaciais compactos e, com desempenho superior em relação a estruturas convencionais (REED et al., 2001). Atualmente, os fractais são aplicados em várias áreas da ciência e tecnologia. Na Engenharia de Micro-ondas, o interesse está na possibilidade de ajuste dos parâmetros eletromagnéticos dos dispositivos de RF/micro-ondas, tais como, frequência de ressonância (f_r) e largura de banda (BW) em – 10 dB (CRUZ et al., 2009; OLIVEIRA et al., 2009b).

Sendo assim, este trabalho tem como objetivo a análise e projeto de filtros espaciais através de estruturas periódicas de FSSs com elementos fractais de Gosper (SMIERZCHALSKI et al., 2010; WERNER et al., 2003), para aplicações em sistemas de comunicações sem fio, especialmente nas faixas de frequências características das bandas X (8–12 GHz) e Ku (12–18 GHz). Para isto, foi realizada uma série de simulações no *software* comercial Ansoft Designer™ v3.5, caracterizando um estudo paramétrico para a escolha do elemento gerador da geometria fractal. Foi escolhido um elemento do tipo *patch* hexagonal, com ressonâncias em 10,5 GHz e 14 GHz, aproximadamente, ressaltando o comportamento de banda dupla. A partir deste elemento, foram efetuados três níveis de iteração fractal para gerar os elementos de Gosper, com os quais é possível ajustar a frequência de ressonância e a largura de banda de cada estrutura periódica. Quatro protótipos de FSS foram selecionados para fabricação e medição nos laboratórios do IFPB, para comprovação da análise realizada. Os resultados experimentais validaram o desempenho das estruturas funcionando como filtros espaciais rejeita-faixa de banda dupla.

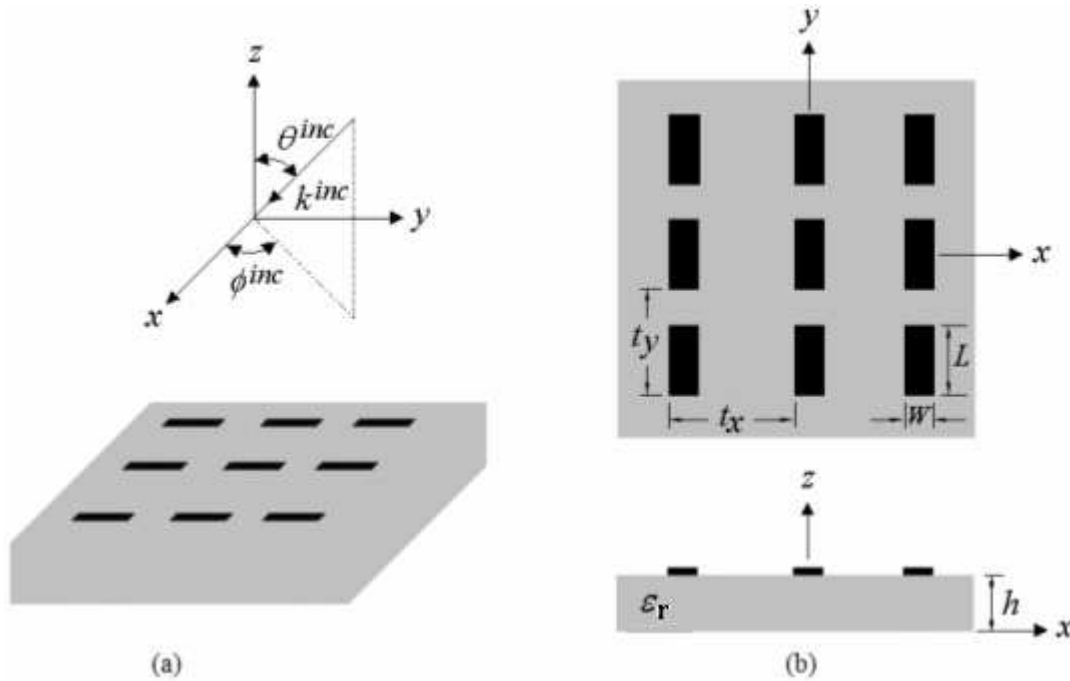


Figura 1 - Configuração básica de uma estrutura de FSS: (a) visão em 3D; (b) vista superior e lateral

2 A GEOMETRIA FRACTAL DE GOSPER

O termo fractal foi originalmente proposto por Mandelbrot (1983) para descrever um conjunto de formas irregulares, que apresentam a propriedade de auto-similaridade em sua construção geométrica. Desde a sua descoberta, uma grande variedade de aplicações foram realizadas em muitos ramos da ciência e engenharia. Uma dessas áreas é denominada Eletrodinâmica Fractal (JAGGARD, 1995; JAGGARD, 1997; WERNER, 1995). Na Eletrodinâmica Fractal, a geometria fractal é combinada com a teoria eletromagnética, para solucionar problemas complexos de antenas, propagação e espalhamento de sinais.

Os arranjos periódicos formados por elementos fractais de Gosper propostos neste trabalho foram projetados a partir de um arranjo periódico convencional de *patches* hexagonais. A Figura 2 ilustra a célula unitária de uma FSS fractal de Gosper. A periodicidade dos elementos é dada por $t_x = t_y = T = 22$ mm; o lado do hexágono é dado por $L = 9$ mm e H é a altura, dada por:

$$H = L\sqrt{3} \quad [\text{Eq. 01}]$$

A Figura 3 ilustra os três níveis de iteração fractal (k) analisados neste trabalho. A lei de formação de um fractal de Gosper, baseado em uma geometria hexagonal, é expressa pela [Eq. 02]:

$$L(k) = \frac{L(k-1)}{\sqrt{7}} \quad [\text{Eq. 02}]$$

em que, $k = 1, 2$ e 3 , representando o primeiro, segundo e terceiro níveis de iteração. Para o elemento gerador, apresentado na Figura 2, considera-se $k = 0$.

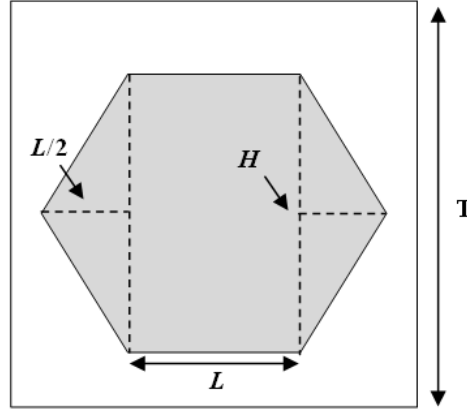


Figura 2 – Célula unitária da FSS fractal de Gosper: elemento gerador

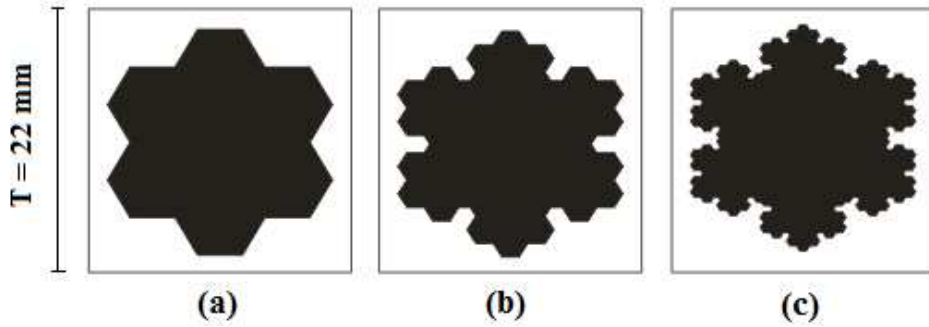


Figura 3 – Células unitárias (*patches*) com três níveis de iteração fractal: (a) $k = 1$; (b) $k = 2$; (c) $k = 3$

Em particular, foi considerado o substrato de fibra de vidro FR-4, com constante dielétrica $\epsilon_r = 4,4$, espessura $h = 1,5$ mm e tangente de perdas $\tan \delta = 0,02$.

3 RESULTADOS

Para todos os resultados apresentados nesta seção, foi considerada a incidência normal de uma onda plana uniforme com polarização TE, referente ao caso em que o campo elétrico é perpendicular a maior dimensão do *patch*.

A Figura 4 mostra os resultados simulados obtidos com o uso do *software* comercial Ansoft DesignerTM, v3.5, referentes às estruturas de FSS com elementos fractais de Gosper projetadas. É observado o comportamento do coeficiente de transmissão (em dB) em função da frequência (em GHz) para o elemento gerador ($k = 0$) e as três iterações fractais ($k = 1, 2$ e 3).

Verifica-se que, com a introdução da geometria fractal, os arranjos periódicos passam a apresentar um comportamento de banda dupla, com dois valores de frequência de ressonância. Para cada iteração, observa-se que ambas as ressonâncias apresentam uma perda inferior a -10 dB, o que significa uma forte rejeição, tornando possível sua aplicação como filtros rejeita-faixa nas faixas de frequência de interesse.

Uma característica do projeto de FSSs com fractais de Gosper é a sua flexibilidade. De fato, o comportamento destas estruturas periódicas com elementos fractais permite ajustar as frequências de

ressonância e a largura de banda das estruturas sem modificar o tamanho original da estrutura. Isto é possível porque com o aumento do número de iterações fractais há uma diminuição dos valores de f_r e BW . Consequentemente, esta característica da estrutura proposta facilita a sintonização do filtro FSS para uma dada aplicação.

Foram escolhidas 4 (quatro) estruturas de FSS para fabricação e posterior medição. As medições foram realizadas nos laboratórios do IFPB, com o auxílio de um analisador de redes vetorial (N5230A, *Agilent Technologies*), que abrange a faixa de frequências de 300 kHz a 13,5 GHz, além de duas antenas cornetas, cabos, conectores e outros acessórios. Foi adotado nas medições, uma distância de separação de no mínimo 9 (nove) cm entre as antenas, equivalente a dois comprimentos de onda na sua frequência de corte (6,8 GHz),..

A Figura 5 apresenta uma fotografia dos quatro protótipos construídos, um para cada iteração fractal. A Figura 6 apresenta os resultados das medições realizadas. Pode-se verificar o mesmo comportamento de banda dupla das simulações (ver Figura 4). As Figuras 7, 8, 9 e 10 apresentam as comparações realizadas entre os resultados medidos e simulados, para $k = 0$, $k = 1$, $k = 2$ e $k = 3$, respectivamente. Em geral, há um erro médio de 10% entre os resultados medidos e simulados dos coeficientes de transmissão. Em particular, os erros observados nas respostas foram maiores para a segunda banda de rejeição. Para os protótipos de FSS com elementos fractais de Gosper de níveis 2 e 3 houve uma boa concordância entre os resultados para a primeira banda de rejeição.

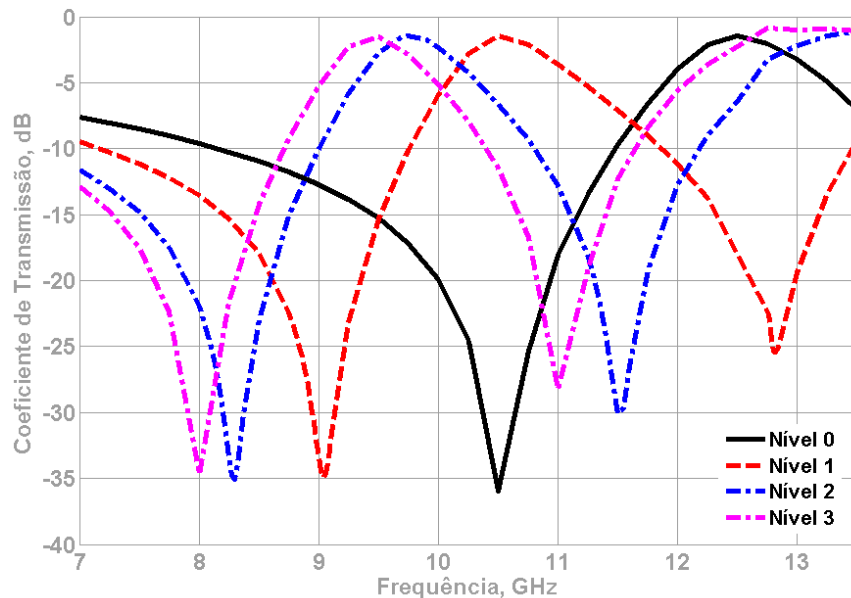


Figura 4 – Resultados simulados para as FSSs com elementos fractais de Gosper projetadas

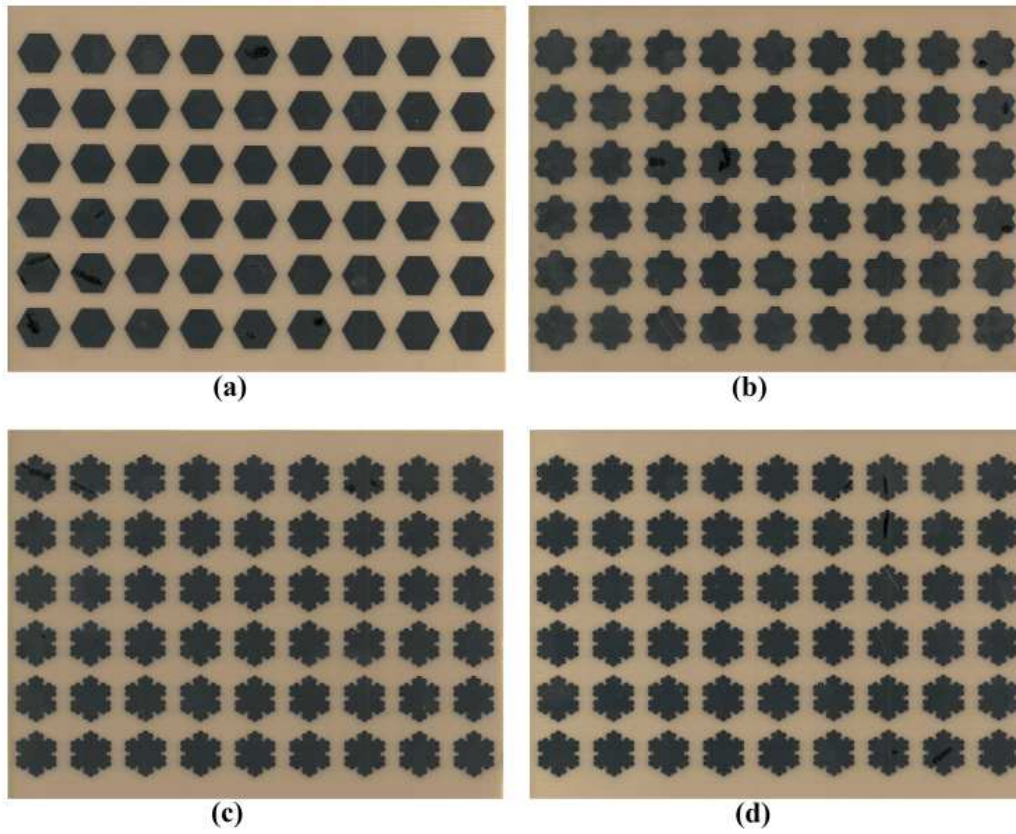


Figura 5 – Fotografia dos quatro protótipos de FSS construídos: (a) $k = 0$; (b) $k = 1$; (c) $k = 2$; (d) $k = 3$

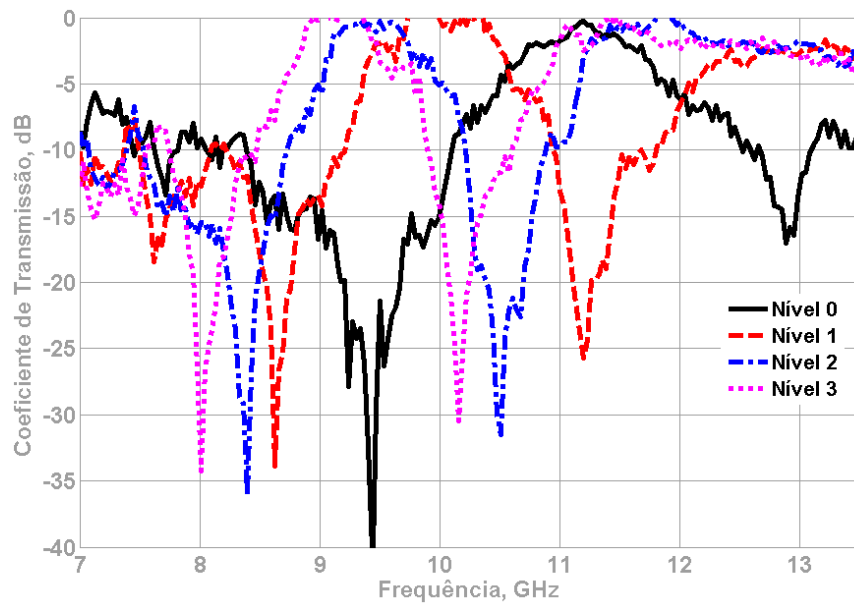


Figura 6 – Resultados medidos para as FSSs com elementos fractais de Gosper projetadas

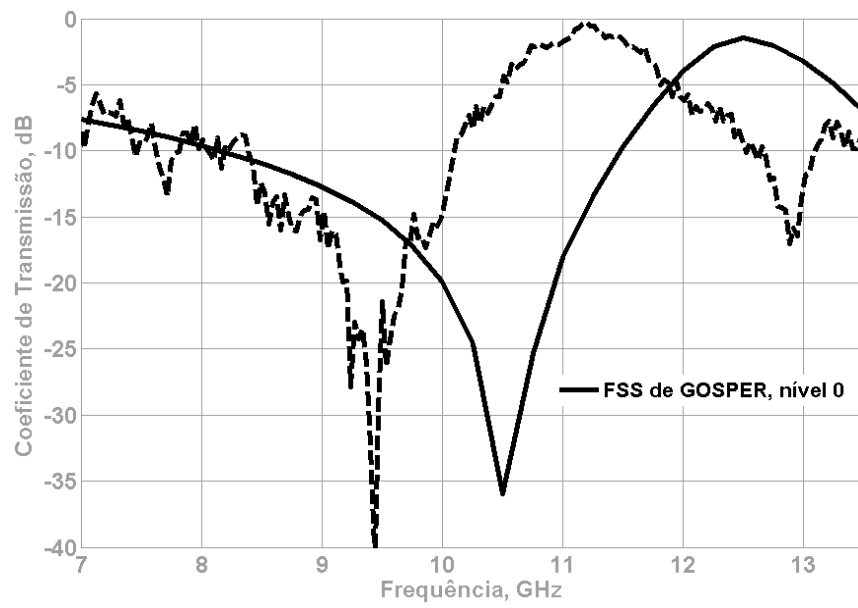


Figura 7 – Comparação entre os resultados medido e simulado para $k = 0$

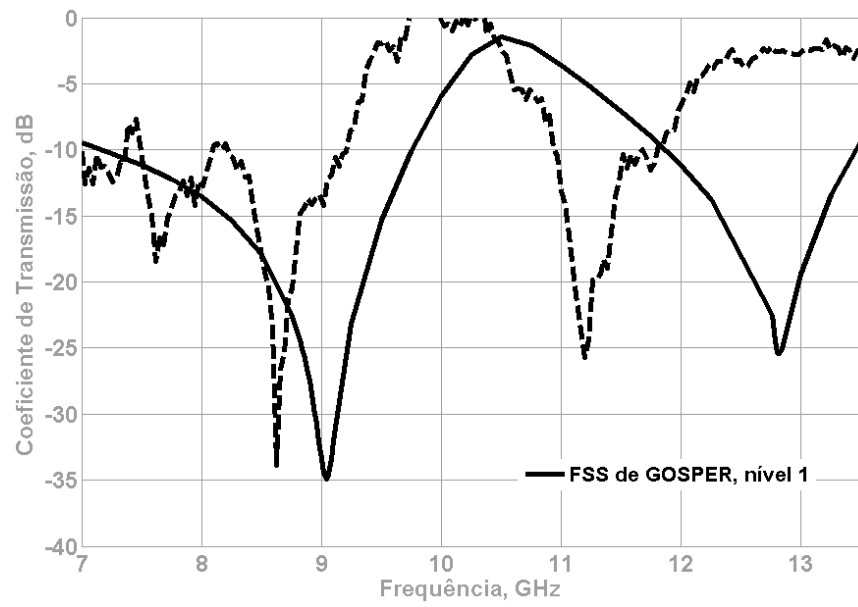


Figura 8 – Comparação entre os resultados medido e simulado para $k = 1$

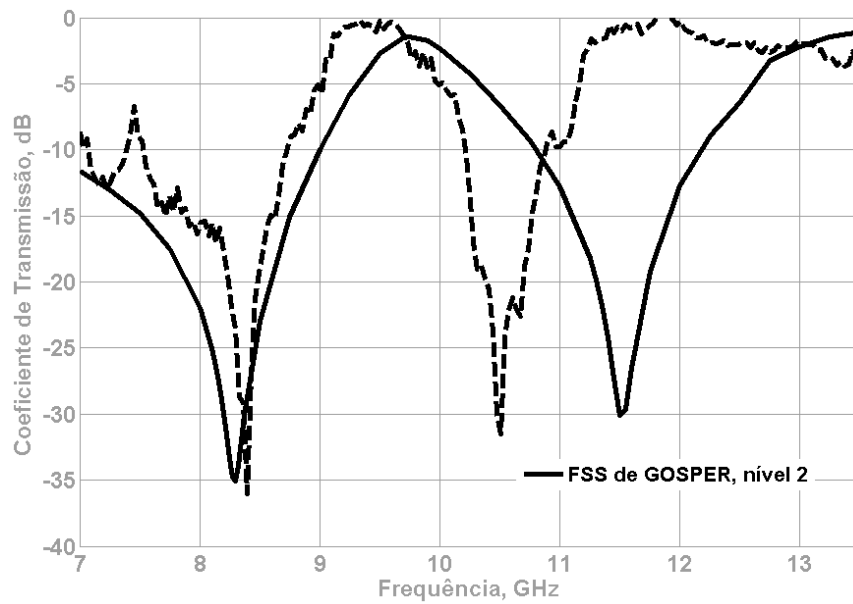


Figura 9 – Comparação entre os resultados medido e simulado para $k = 2$

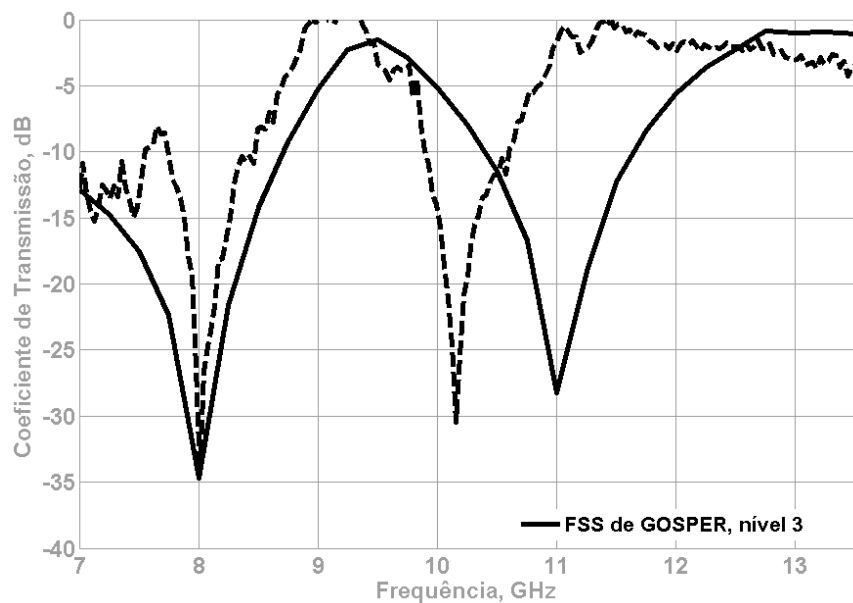


Figura 10 – Comparação entre resultados medido e simulado para $k = 3$

4 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma nova proposta de superfícies seletivas de frequência atuando como filtros rejeita-faixa, com comportamento de banda dupla, para aplicações em sistemas de comunicações sem fio, especialmente nas faixas de frequências características das bandas X (8–12 GHz) e Ku (12–18 GHz). As estruturas foram projetadas utilizando a geometria fractal de Gosper, em três níveis de iteração, a partir de um arranjo periódico de *patches* hexagonais. Foi considerada apenas uma camada fina do substrato dielétrico de fibra de vidro sobre a qual as estruturas foram impressas. A análise foi realizada através de simulações no *software* Ansoft DesignerTM e medições de quatro protótipos fabricados.

O projeto de uma FSS com elementos fractais mostrou ser uma solução bastante atrativa, uma vez que as características inerentes à geometria fractal permitiram o desenvolvimento de filtros espaciais compactos e, com desempenho superior em relação a estruturas convencionais. O funcionamento das estruturas periódicas projetadas com elementos fractais permitiu ajustar seus parâmetros eletromagnéticos (f_r e BW) sem modificar

seu tamanho original. Isto foi possível porque com o aumento do número de iterações fractais há uma diminuição dos valores de f_r e BW . De fato, esta característica da estrutura proposta facilitou a sintonização do filtro FSS para as bandas X e Ku. Além disso, os resultados medidos validaram a proposta apresentada. As fontes dos erros responsáveis pelas diferenças verificadas entre os resultados medidos e simulados neste estudo serão abordadas em trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, L. M. **Análise teórica e experimental de superfícies seletivas de frequência e suas aplicações em antenas planares**. 2009. 85 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009.

CAMPOS, A. L. P. de S. **Superfícies seletivas em frequência: análise e projeto**. Natal, IFRN: 2009. 198 p.

CRUZ, R. M. S.; SILVA, P. H. da F.; D'ASSUNÇÃO, A. G. **Neuromodeling stop band properties of Koch Island patch elements for FSS filter design**. *Microwave and Optical Technology Letters*, v. 51, pp. 3014-3019, 2009.

JAGGARD, D. L. Fractal electrodynamics: from super antennas to superlattices. *In: J. L. VEHEL, E. LUTTON, AND C. TRICOT (eds.). Fractals in engineering*. New York, Springer-Verlag: 1997. pp. 204-221.

JAGGARD, D. L. Fractal electrodynamics: wave interactions with discretely self-similar structures. *In: C. BAUN AND H. KRITIKOS (eds.). Electromagnetic symmetry*. Washington DC, Taylor and Francis Publishers: 1995. pp. 231-281.

OLIVEIRA, E. E. C.; CAMPOS, A. L. P. S.; SILVA, P. H. da F. **Miniaturization of frequency selective surfaces using fractal Koch curves**. *Microwave and Optical Technology Letters*, v. 51, pp. 1983-1986, 2009a.

_____. **Overall size antenna reduction using fractal elements**. *Microwave and Optical Technology Letters*, v. 51, pp. 671-675, 2009b.

MANDELBROT, B. B. **The fractal geometry of nature**. New York, Freeman: 1983.

REED, S.; DESCLOS, L.; TERRET, C.; TOUTAIN, S. **Patch antenna size reduction by means of inductive slots**. *Microwave and Optical Technology Letters*, v. 29, 2001.

SMIERZCHALSKI, M.; KURGAN, P.; KITLINSKI, M. **Improved selectivity compact band-stop filter with Gosper fractal-shaped defected ground structures**. *Microwave and Optical Technology Letters*, v. 52, pp. 227-229, 2010.

WERNER, D. H. An overview of fractal electrodynamics research. *In: 11th ANNUAL REVIEW OF PROGRESS IN APPLIED COMPUTATIONAL ELECTROMAGNETICS (ACES), VOLUME II. Proceedings...* Monterey, CA: Naval Postgraduate School, 1995. pp. 964-969.

WERNER, D. H.; HAIPT, R. L.; WERNER, P. L. **Fractal antenna engineering: the theory and design of fractal antenna arrays**. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, v. 41, pp. 37-59, 1999.

WERNER, D. H.; KUHIRUN, W.; WERNER, P. L. **The Peano-Gosper fractal array**. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, v. 51, pp. 2063-2072, 2003.