

## **CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE FSS SINTONIZÁVEIS USANDO ANÉIS COM CAPACITÂNCIAS ACOPLADAS**

**Alfrêdo GOMES NETO (1); Emanuele da Silva RODRIGUES (2)**

(1) CEFET-PB/João Pessoa, Avenida 1º de Maio, 720, Jaguaribe, 83-3208-3000, fax: 83-3208-3004,  
e-mail: [alfredogomes@ieee.org](mailto:alfredogomes@ieee.org)

(2) CEFET-PB/João Pessoa, e-mail: [manu.aps@hotmail.com](mailto:manu.aps@hotmail.com)

### **RESUMO**

As Superfícies Seletivas em Frequência, FSS, são estruturas periódicas em uma ou duas dimensões, que, dependendo do material, da geometria e das dimensões físicas, podem ser divididas em filtros passa-baixas, passa-altas, passa-faixa ou rejeita-faixa. Atualmente suas aplicações envolvem, entre outras, radomes, mísseis, blindagens eletromagnéticas e LANs. O considerável aumento na demanda por estruturas cada vez mais compactas e com requisitos específicos de banda passante, tem motivado diversos grupos de pesquisa a estudar novas estruturas. Neste trabalho são apresentados resultados experimentais obtidos na caracterização de FSS sintonizáveis usando anéis com capacitâncias acopladas, sendo discutidos os efeitos do comprimento da região acoplada e da polarização nas frequências de ressonância, suas vantagens e desvantagens. A faixa de frequência considerada é de 7GHz a 13.5GHz. Concluindo, são consideradas possíveis aplicações dos resultados obtidos, principalmente o aumento da banda de rejeição e da obtenção de estruturas multi-banda, sendo propostas novas estruturas tipo FSS quase-periódica.

**Palavras-chave:** FSS, caracterização experimental, microondas, telecomunicações.

## 1. INTRODUÇÃO

As superfícies seletivas em frequências, *frequency selective surfaces*, FSS, são estruturas periódicas em uma ou duas dimensões, Fig. 1, que, dependendo das dimensões físicas, do material e da geometria, podem ser divididas em filtros passa-baixas, passa-altas, passa-faixa ou rejeita-faixa, Fig. 2, [1], [2]. A partir dos anos 60 as FSS passaram a ser extensivamente estudadas, sendo inicialmente as aplicações concentradas no seu uso em sub-refletores tipo Cassegrain de antenas parabólicas. Atualmente as aplicações envolvem, entre outras, radomes, mísseis, blindagens eletromagnéticas e LANs.

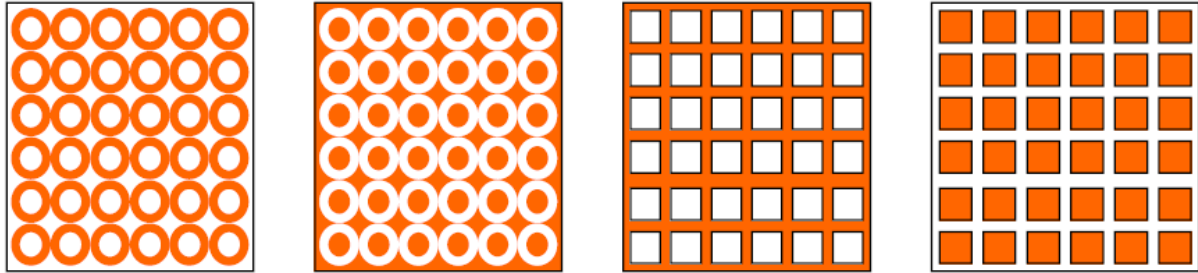


Fig. 1 – Exemplos de FSS

Um dos primeiros métodos utilizados na análise de FSS foi o casamento modal. Associado ao casamento modal surgiram os circuitos equivalentes, possibilitando a avaliação inicial do comportamento das FSS [1]. Com o avanço dos recursos computacionais, outros métodos foram utilizados, citando-se o método das diferenças finitas no domínio do tempo, FDTD, o método dos elementos finitos, FEM, o método dos momentos, MoM, o método do vetor potencial de Hertz [1]-[3]. Em conjunto com esses modelos, podem ser utilizadas técnicas como, por exemplo, as redes neurais [4].

O FDTD e o FEM apresentam a vantagem da flexibilidade na forma da FSS. Entretanto, requerem um esforço computacional elevado. Por outro lado, métodos como MoM e o do vetor potencial de Hertz, que não requerem tanto esforço computacional, apresentam limitações quanto a forma da FSS. Estruturas como as apresentadas em Fig. 3, não são analisadas por esses métodos.

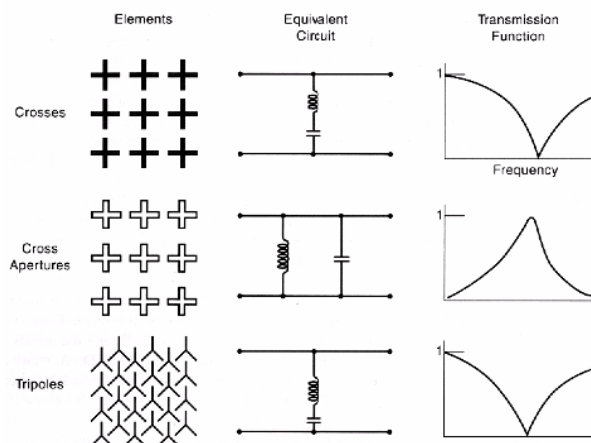


Fig. 2 – Filtros utilizando FSS

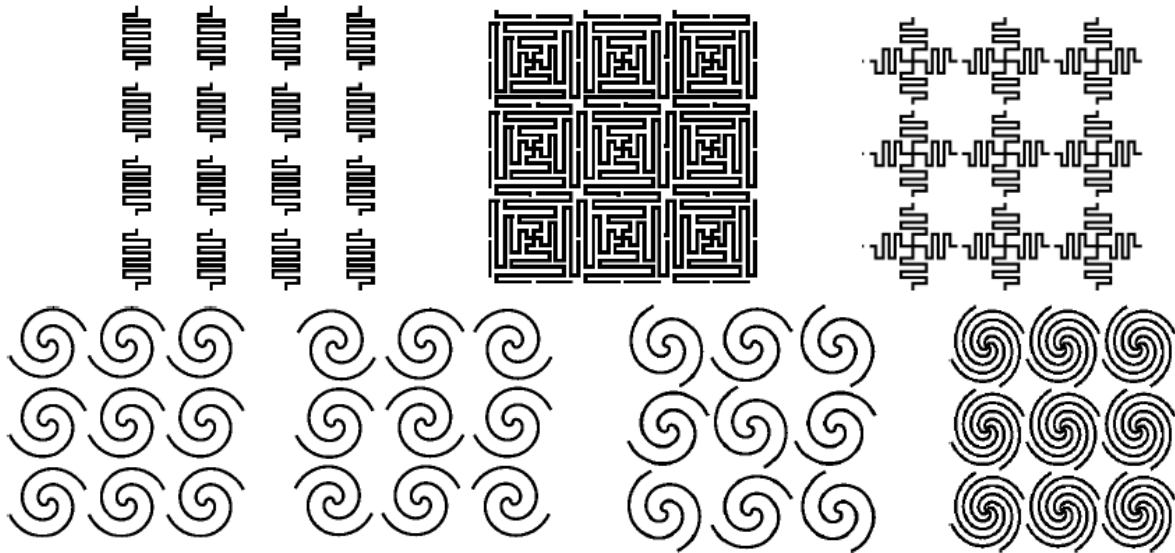


Fig. 3 – FSS de geometria complexa

A partir de meados dos anos 90 foi desenvolvido o Método das Ondas, um processo iterativo, mais conhecido na literatura por *Wave Concept Interactive Procedure*, WCIP, baseado em princípios relativamente simples e com diversas aplicações [5]-[13]. A necessidade relativamente reduzida de recursos computacionais e a flexibilidade quanto à forma da estrutura planar são características do WCIP, o que torna a sua aplicação particularmente interessante na análise de FSS.

Mais recentemente, principalmente com a expansão dos serviços de comunicação sem fio, aumentou consideravelmente a demanda por estruturas cada vez mais compactas e com requisitos específicos de banda passante [14], o que tem motivado diversos grupos de pesquisa a estudar novas estruturas.

Neste artigo são apresentados resultados experimentais para FSS sintonizáveis usando anéis com capacitâncias acopladas, Fig. 4, sendo proposto um circuito equivalente e discutidas possíveis aplicações.

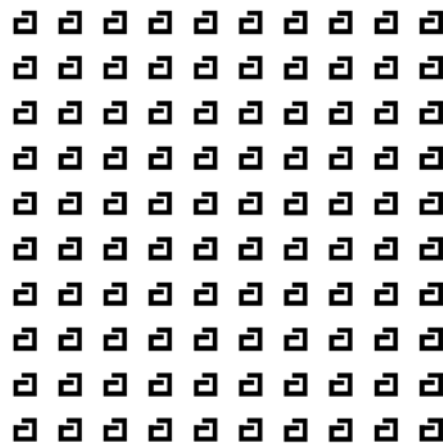
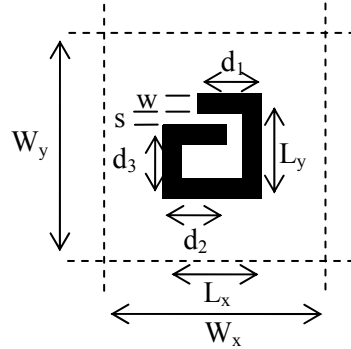


Fig. 4 – FSS sintonizável usando anéis com capacitância acoplada

## 2. FSS SINTONIZÁVEIS USANDO ANÉIS COM CAPACITÂNCIA ACOPLADA

As FSS sintonizáveis usando anéis com capacitância acoplada são estruturas relativamente simples, Fig. 4, construídas a partir de uma célula básica, Fig. 5, sendo fabricadas sobre um substrato dielétrico de altura  $h$  e constante dielétrica  $\epsilon_r$ . A sua frequência de ressonância está relacionada com o comprimento efetivo da

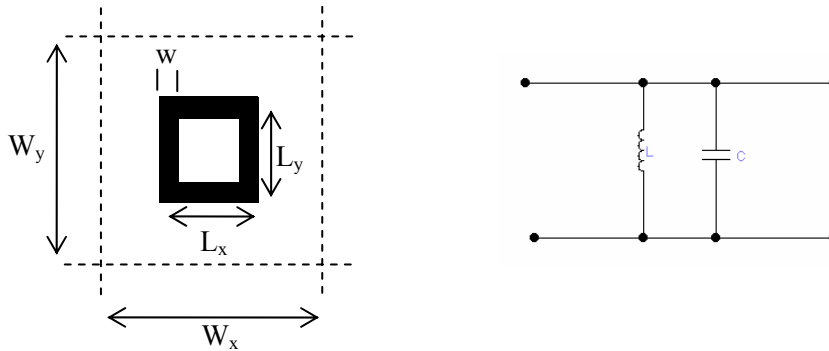
célula básica,  $L_{ef}$ , e com a constante dielétrica efetiva,  $\epsilon_{ref}$ . Para  $h \ll \lambda$ , o efeito do dielétrico pode ser bastante reduzido e  $\epsilon_{ref} \approx 1$ .



**Fig. 5 – FSS sintonizáveis usando anéis com capacitância acoplada – célula básica**

Não há uma expressão exata para o cálculo do comprimento efetivo da célula básica com capacitância acoplada. Para uma célula básica quadrada, Fig. 6, uma aproximação é o comprimento médio, dado pela [eq. 1].

$$L_{ef} = 2L_x + 2L_y - 4w \quad [eq. 1].$$



**Fig. 6 – FSS – célula básica quadrada e circuito equivalente**

Como para as frequências de ressonância o comprimento de onda é igual a múltiplos inteiros do comprimento efetivo da célula básica,

$$f_{res} = \frac{n \cdot 3 \times 10^8}{L_{ef} \sqrt{\epsilon_{ref}}} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad [eq. 2].$$

Os valores obtidos para a FSS com célula básica quadrada serão utilizados como referência neste trabalho. Destaque-se que embora essas equações não apresentem respostas com grande precisão, os seus resultados servem como uma primeira aproximação para projetos.

### 3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A determinação das frequências de ressonância foi realizada no GTEMA/CEFET-PB, a partir da medição do módulo coeficiente de transmissão,  $|S_{21}|$ , utilizando um analisador de redes vetorial, VNA, com duas antenas tipo corneta, banda X, na faixa de frequência de 7GHz a 13.5GHz, Fig. 7. As FSS foram confeccionadas em um substrato de fibra de vidro,  $\epsilon_r = 4,5$  e  $h = 1,5mm$ . A dimensão total da placa é de aproximadamente  $200mm \times 200mm$  e para cada célula básica  $W_x = W_y = 20mm$  e  $w = 2mm$ , Fig. 8.

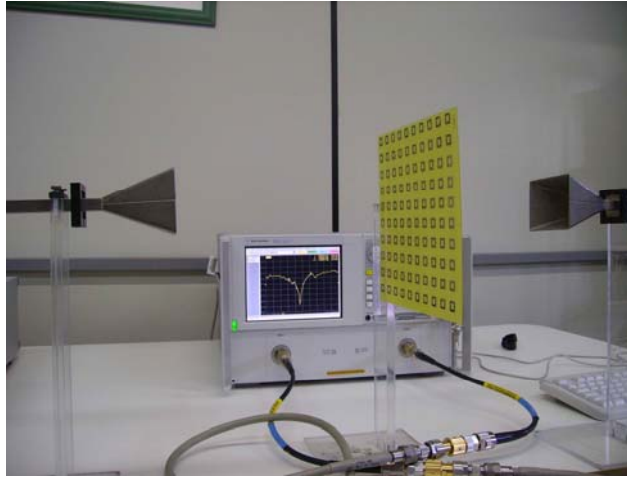


Fig. 7 – Esquema de medição

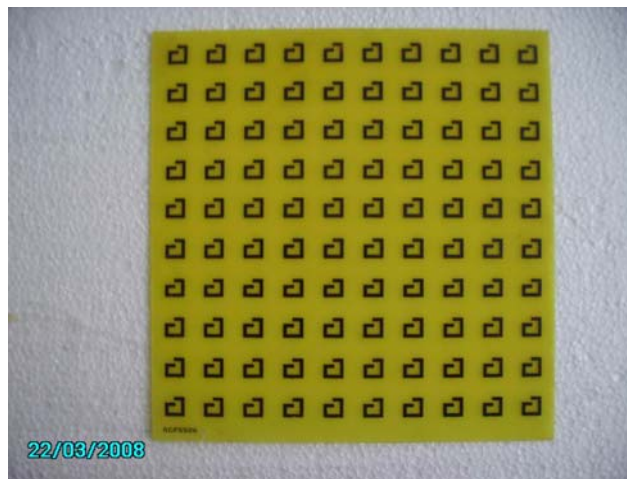


Fig. 8 – FSS sintonizável usando anéis com capacitância acoplada

Na Fig. 9 é apresentado o resultado para uma FSS com célula básica quadrada, com  $L_x = L_y = 9,8mm$ . Neste caso, a frequência de ressonância não depende da polarização do campo elétrico em relação à FSS. Usando as equações [eq. 1] e [eq. 2] obtém-se  $L_{ef} = 32mm$  e  $f_{res} = 9,38GHz$ , dentro da ordem de grandeza esperada.

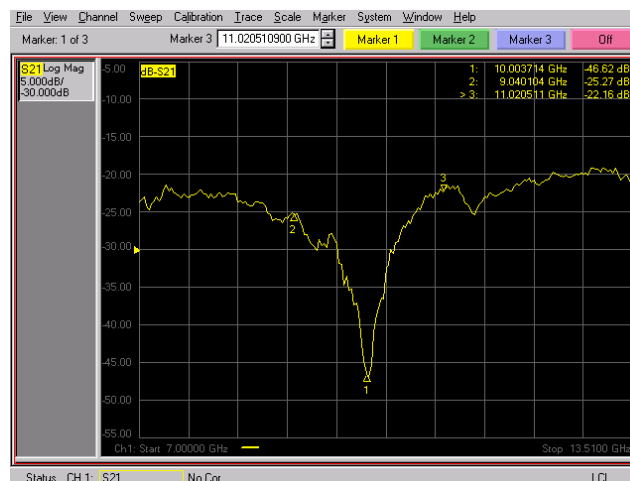
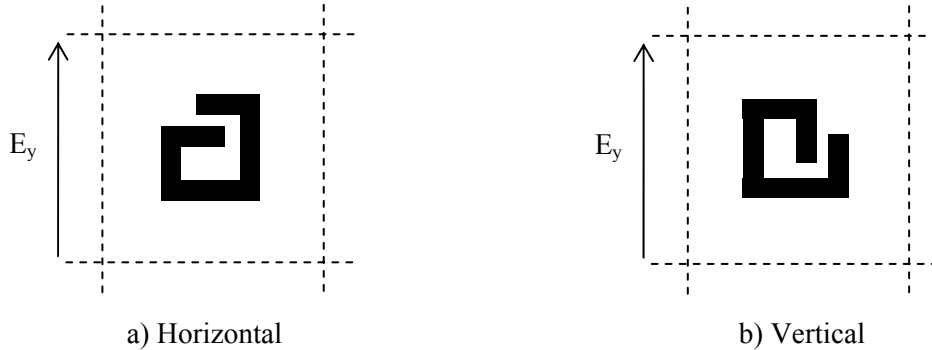


Fig. 9 – FSS – célula básica quadrada -  $|S21| \times$  frequência -  $f_{res(medida)} = 10,00GHz$ ,  $f_{res(calc)} = 9,38GHz$

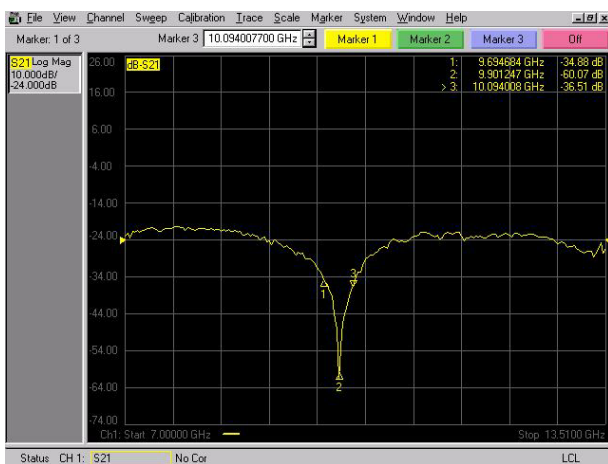
As FSS sintonizáveis usando anéis com capacitância acoplada apresentam um comportamento que depende da polarização do campo elétrico em relação à seção de linhas acopladas. Para os resultados apresentados neste artigo o campo elétrico está sempre polarizado na vertical e o que muda é a orientação da FSS, sendo considerada horizontal, com o campo elétrico perpendicular às linhas acopladas, Fig. 10.a, e vertical, com o campo elétrico paralelo às linhas acopladas, Fig. 10.b.



**Fig. 10 – Orientação da FSS – a) Horizontal b) Vertical**

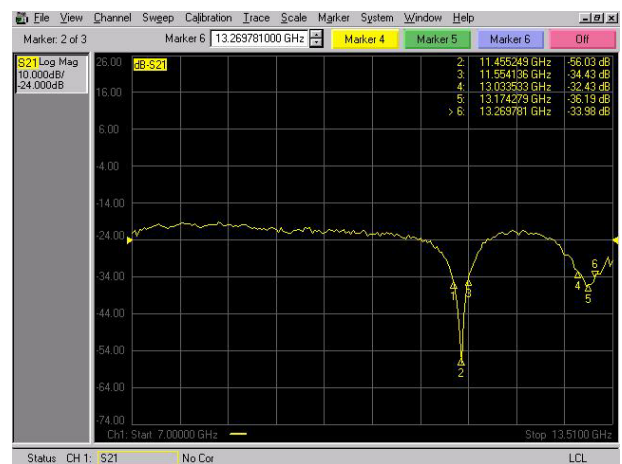
Nas Figuras 11-14 são apresentados os resultados para FSS com diferentes valores de região acopladas. Para uma orientação horizontal observa-se uma redução gradativa da frequência de ressonância a partir da frequência de ressonância da FSS quadrada, Fig. 15. A presença da região de acoplada funciona como uma capacitância em paralelo, cujo valor aumenta com a frequência.

Para uma orientação vertical observa-se que a primeira frequência de ressonância reduz gradativa, partindo de um valor superior ao da frequência de ressonância da FSS quadrada, Fig. 16. A presença da região de acoplada funciona como uma capacitância em série, cujo valor diminui com a frequência. Além disso, verifica-se o surgimento de uma segunda frequência de ressonância na mesma faixa de frequência de medição, com um comportamento semelhante ao da primeira, Fig. 17. Entretanto, seria interessante comparar o comportamento dessa frequência de ressonância com a segunda frequência de ressonância da FSS com célula básica quadrada, o que não foi possível por essa está fora da faixa de frequência dos equipamentos disponíveis no GTEMA/CEFET-PB.



a) Horizontal,

$$f_{res(medida)} = 9,90GHz$$

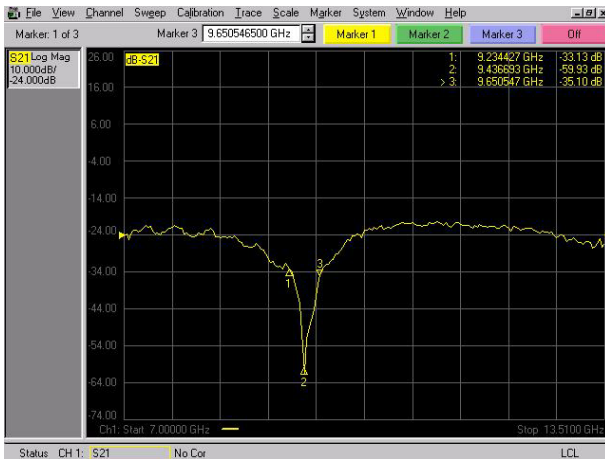


b) Vertical,

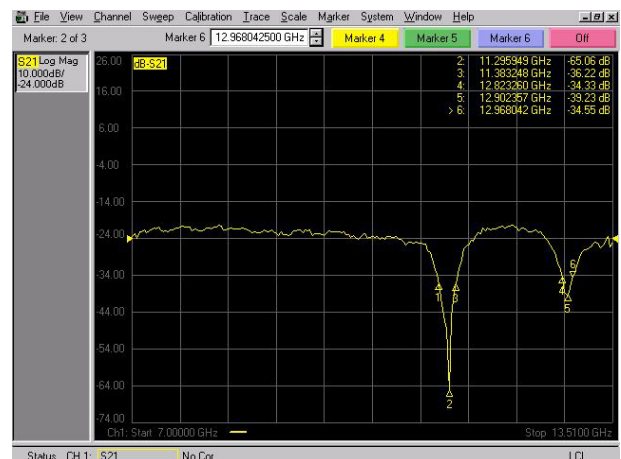
$$f_{res1(medida)} = 11,46GHz, f_{res2(medida)} = 13,17GHz$$

$$L_x = L_y = 10mm, s = 1mm, d_1 = d_2 = 5,0mm, d_3 = 7,0mm$$

**Fig. 11 – FSS sintonizável com capacitância acoplada**



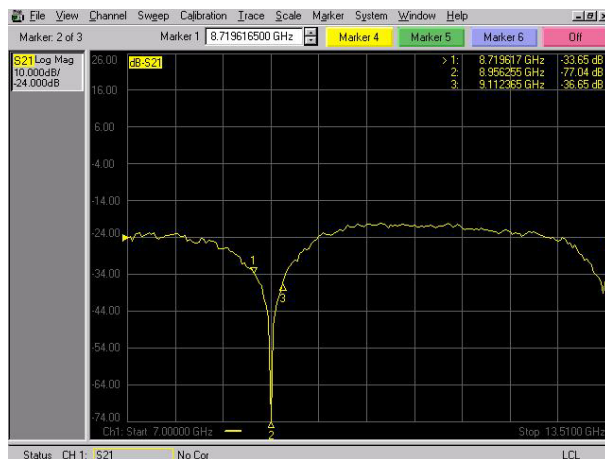
a) Horizontal,  
 $f_{res(medida)} = 9,43GHz$



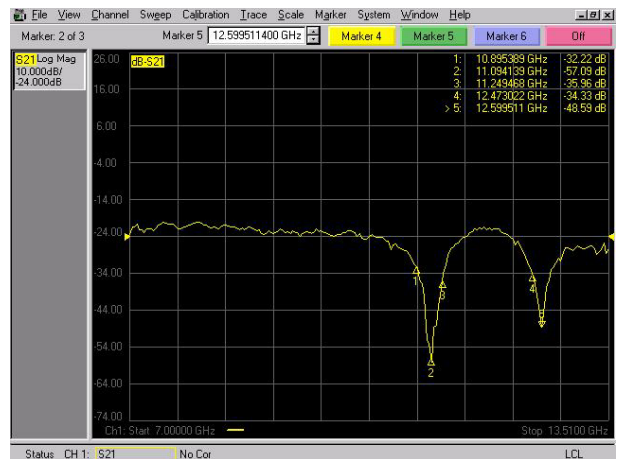
b) Vertical,  
 $f_{res1(medida)} = 11,30GHz$ ,  $f_{res2(medida)} = 12,90GHz$

$$L_x = L_y = 10mm, s = 1mm, d_1 = d_2 = 5,5mm, d_3 = 7,0mm$$

Fig. 12 – FSS sintonizável com capacitância acoplada



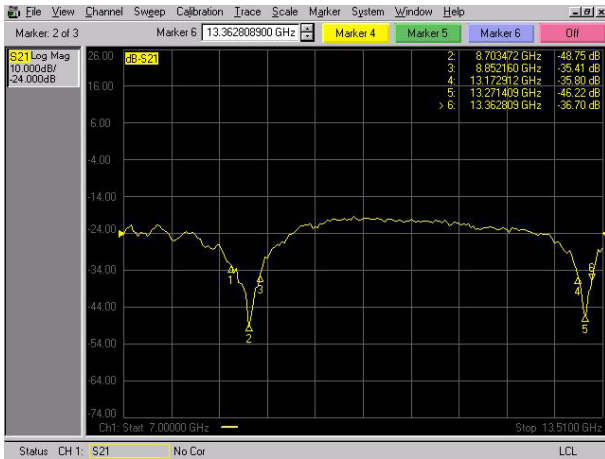
a) Horizontal,  
 $f_{res(medida)} = 8,96GHz$



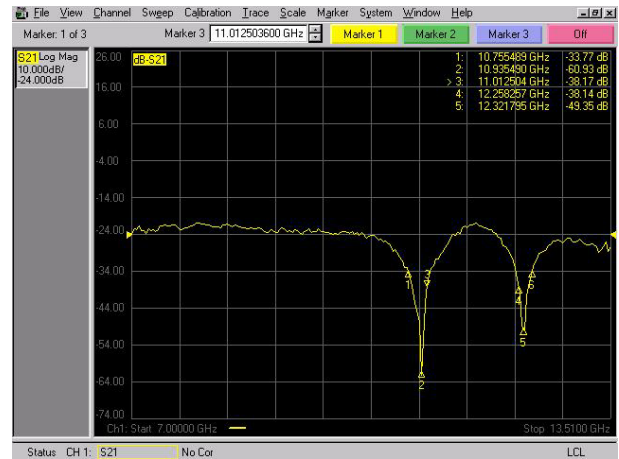
b) Vertical,  
 $f_{res1(medida)} = 11,09GHz$ ,  $f_{res2(medida)} = 12,60GHz$

$$L_x = L_y = 10mm, s = 1mm, d_1 = d_2 = 6,0mm, d_3 = 7,0mm$$

Fig. 13 – FSS sintonizável com capacitância acoplada



a) Horizontal,  
 $f_{res(medida)} = 8,70GHz$



b) Vertical,  
 $f_{res1(medida)} = 10,94GHz$ ,  $f_{res2(medida)} = 12,32GHz$

$$L_x = L_y = 10mm, s = 1mm, d_1 = d_2 = 6,5mm, d_3 = 7,0mm$$

Fig. 14 – FSS sintonizável com capacitância acoplada

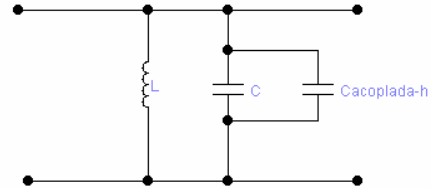
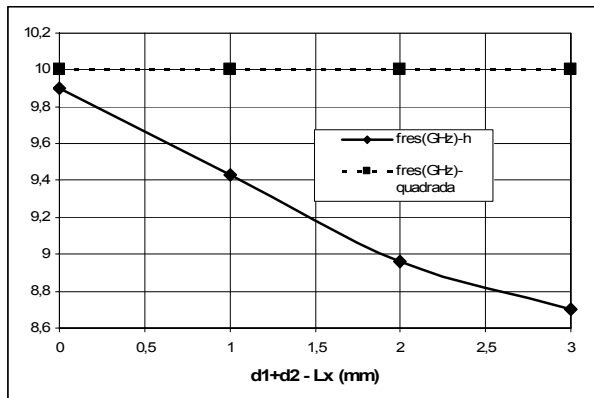


Fig. 15 – Variação da frequência de ressonância com a dimensão da região acoplada - horizontal

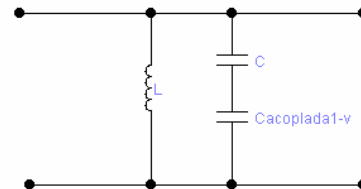
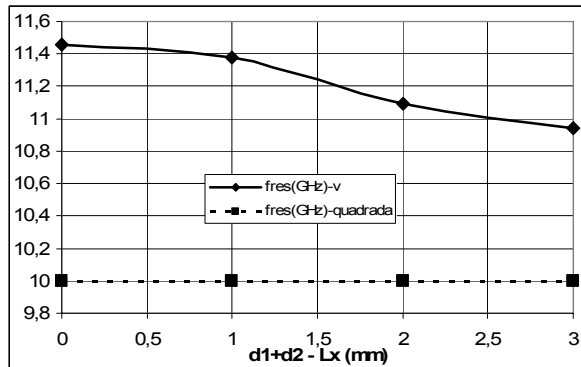


Fig. 16 – Variação da primeira frequência de ressonância com a dimensão da região acoplada - vertical



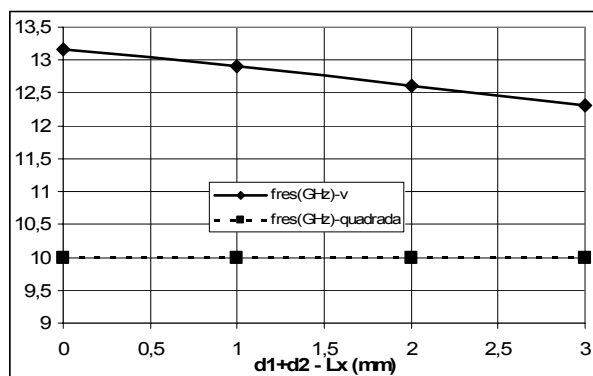


Fig. 17 – Variação da segunda frequência de ressonância com a dimensão da região acoplada - vertical

Portanto, dos resultados experimentais apresentados, observa-se que é possível fazer o ajuste da frequência de ressonância, assim como a introdução de novas ressonâncias a partir do ajuste das dimensões da região acoplada e da polarização.

#### 4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada a caracterização experimental de FSS sintonizáveis com capacitância acoplada, descrevendo a variação da frequência de ressonância com a região acoplada e com a polarização. A partir desses resultados é possível propor uma investigação a respeito de estruturas multi-banda, principalmente com a utilização de arranjos quase-periódicos. Atualmente, com a utilização da técnica WCIP, vem sendo desenvolvida no GTEMA a caracterização numérica de FSS. Dessa forma, espera-se contribuir para o avanço da pesquisa neste instigante campo de investigação.

#### REFERÊNCIAS

- [1] MIAS, C; TSAKONAS, C; OSWALD, C: **An Investigation into the Feasibility of Designing Frequency Selective Windows Employing Periodic Structures** (Ref. AY3922), Final Report, The Nottingham Trent University, Nottingham, U.K.
- [2] CAMPOS, Antônio Luiz P. S.: **Análise de Espalhamento em Superfícies Seletivas em Frequência com Multicamadas Dielétricas Anisotrópicas**, Tese de Doutorado, UFCG, Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2002
- [3] CAMPOS, Antônio Luiz P. S.; D'ASSUNÇÃO, Adaildo Gomes; GOMES NETO, Alfrêdo: "Scattering characteristics of FSS on two anisotropic layers for incident co-polarized plane waves", *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 33, nº 1, April, 2002
- [4] SILVA, Patric Lacouth; D'ASSUNÇÃO, Adaildo Gomes: "Modelamento de superfícies seletivas de frequência e antenas de microfita utilizando redes neurais artificiais", Anais do MOMAG 2006, em CD-ROM, Belo Horizonte, MG, agosto, 2006
- [5] N'GONGO, R.S; and BAUDRAND, H.: "Application of wave concept iterative procedure in planar circuit", **Recent Res. Devel. Microwave Theory and Technique**, 1999, vol. 1, pp.187-197
- [6] COHEN, M. Ludovic : **Contribution a L'étude et a la Modelisation de Circuits Coplanaires Multicouches par une Methode Iterative**, in french, Doctor Thesis, ENSEEIHT, Toulouse, France, Jui. 2002

- [7] BAJON, D; WANE, S ; TITAOUINE, M; BAUDRAND, H; GOMES NETO, Alfrêdo: “Resolução de problemas eletromagnéticos usando WCIP - Parte I: Formulação teórica”, Anais do MOMAG 2006, em CD-ROM, Belo Horizonte, MG, agosto, 2006
- [8] BAJON, D; WANE, S ; TITAOUINE, M; BAUDRAND, H; GOMES NETO, Alfrêdo: “Resolução de problemas eletromagnéticos usando WCIP - Parte II: Aplicações”, Anais do MOMAG 2006, em CD-ROM, Belo Horizonte, MG, agosto, 2006
- [9] GOMES NETO, Alfrêdo: Relatório CAPES/COFECUB, Projeto 374/03, Processo BEX1337/04, Brasília, jan., 2006
- [10] TITAOUINE, Mohammed, GOMES NETO, Alfredo, BAUDRAND, Henri, DJAHILI, Farid: “Analysis of Metallic Ring Frequency Selective Surfaces Using WCIP Method”, In: Le 19eme Colloque International "Optique Hertzienne et Dielectriques", 2007, Valence. Proceedings of 19eme Colloque International "Optique Hertzienne et Dielectriques", 2007
- [11] TITAOUINE, Mohammed, GOMES NETO, Alfredo, BAUDRAND, Henri, DJAHILI, F: “WCIP Method Applied to Active Frequency Selective Surfaces”. *Journal of Microwaves and Optoelectronics*, v.6, p.1 - 16, 2007.
- [12] TITAOUINE, Mohammed, GOMES NETO, Alfredo, BAUDRAND, Henri, DJAHILI, Farid: “Analysis of Frequency Selective Surface on Isotropic/Anisotropic Layers Using WCIP Method”, *Etri Journal Electronics And Telecommunications Research Institute* , v.29, p.36 - 44, 2007
- [13] TITAOUINE, Mohammed, GOMES NETO, Alfredo, BAUDRAND, Henri, DJAHILI, F: “Determination of metallic ring FSS scattering characteristics using WCIP method”, *Microwave and Optical Technology Letters* , v.50, p.1324 - 1328, 2008
- [14] BEKHEIT, Maged; AMARI, Smain; MENZEL, Wolfgang: “Modeling and Optimization of Compact Microwave Bandpass Filters”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, pp. 420-430, vol. 56, No. 2, February, 2008

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado através do **Programa Institucional de Bolsas Pesquisador, CEFET-PB**, Edital N° 001/2008, projeto: “CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE FSS SINTONIZÁVEIS USANDO ANÉIS COM CAPACITÂNCIAS ACOPLADAS”.