

# SIMPLIFICAÇÃO DA GEOMETRIA DE ESTRUTURAS FRACTAIS

**Alfredo GOMES (1); Alison LIMA (2); André NASCIMENTO (3);  
Fábio PONTES (4); Iuri SANTOS (5)**

(1) Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, IFPB;  
AV. 1º de Maio, 720, João Pessoa, PB, CEP: 58015-430; [alfredogomesjpa@gmail.com](mailto:alfredogomesjpa@gmail.com)

(2) IFPB; [alisonall@hotmail.com](mailto:alisonall@hotmail.com)

(3) IFPB; [andrenascimento.pet.ee.ifpb@gmail.com](mailto:andrenascimento.pet.ee.ifpb@gmail.com)

(4) IFPB; [fabiopontes123@gmail.com](mailto:fabiopontes123@gmail.com)

(5) IFPB; [santos.iuri@gmail.com](mailto:santos.iuri@gmail.com)

## RESUMO

Numerosos são os processos de análise na área de micro-ondas, em busca de estruturas que atuem em diversas faixas de frequência e que acompanhem a disponibilidade dos recursos computacionais, particularmente em aplicações sem fio como filtros e antenas. Com crescentes procedimentos a procura de novas respostas para estas estruturas tem-se observado construções geométricas complexas, o que nos remete a pesquisa da possibilidade de simplificação destas estruturas sem alterar as respostas da mesma. Através da utilização de uma superfície seletiva em frequência empregando motivos fractais de Koch pretende-se analisar as características de uma estrutura original tais como seu campo elétrico. Propõem-se algumas simplificações na construção da mesma verificando as eventuais consequências que estas alterações causariam a frequência de ressonância, para a análise numérica é utilizado o método das ondas. Este estudo permitiu observar a possibilidade de consideráveis simplificações nas estruturas geométricas utilizadas, admitindo assim, facilitações de projeto e de fabricação.

**Palavras-chave:** fractais, geometria simplificada, WCIP, FSS

## 1 INTRODUÇÃO

O constante desenvolvimento das tecnologias de comunicação, em especial aplicações de comunicação sem fio compreendendo diversas faixas de frequência têm estabelecido aos desenvolvedores em micro-ondas uma maior atenção à concepção de estruturas tais como filtros e antenas capazes de atender as características demandadas por tal evolução. A origem de novas técnicas são constantes devido às indispensáveis reavaliações de procedimentos adequados a serem empregados às modificações determinadas pelo progresso das tecnologias sem fio. Uma largura de banda adequada, dimensões reduzidas, seletividade são algumas das características avaliadas para se encontrar uma estrutura moldada as mais variadas aplicações destes tipos de mecanismo. Paralelo a necessidade por novas soluções estão os artifícios computacionais existentes para simulações em micro-ondas facilitando a origem de respostas adequadas às precisões tecnológicas, entretanto após inúmeros processos tais recursos também acarretam em estruturas com geometrias complexas. Partindo da análise dessas geometrias, avaliam-se quais as reais consequências que este grau de detalhes iria interferir nas respostas almejadas na construção da estrutura.

São indicadas neste trabalho facilitações na construção de estruturas em micro-ondas quanto a sua geometria a fim de torná-la mais simples, otimizando assim seu processo de fabricação. As simplificações são propostas ponderando que a variável resultante de importância é a frequência de ressonância, estas simplificações são fundamentadas a partir de uma superfície seletiva em frequência (FSS), utilizando geometria com motivos Koch.

Através da análise das características da estrutura original tais como seu campo elétrico, inicia-se a comparação do comportamento das respostas e após algumas simplificações em sua estrutura geométrica, verifica-se que os resultados estimulam novas averiguações a fim de convergir tal estrutura a uma construção mais simples, sem que estas resultem em grandes prejuízos em sua frequência de ressonância original. Para análise numérica da estrutura é empregado o Método das Ondas, *Wave Concept Iterative Procedure*, WCIP, [1], [2], sendo apresentados resultados para uma estrutura fractal de ordem 2 e fator de iteração 7.

## 2 DESENVOLVIMENTO

### 2.1 Estruturas com motivos fractais de Koch

A estrutura com motivos fractais traz como ponto bastante interessante a redução das dimensões [3], [4], [2], outro ponto relevante é a utilização da geometria fractal de Koch, homenagem a Helge Von Koch, na miniaturização de vários tipos de filtros e antenas [3], [5], esta geometria é distinguida por dois fatores básicos: o fator de iteração,  $a$ , e a ordem do fractal,  $k$ , figura 1. O fator fractal concebe a lei de concepção da geometria e a ordem do fractal sugere quantas vezes a iteração é reproduzida (1).

$$l_k = \begin{cases} \frac{l_{k-1}}{a}, & \text{se } k = 1 \\ \frac{(l_{k-2} - l_{k-1})}{2a}, & \text{se } k = 2, 3, \dots \end{cases} \quad (1)$$

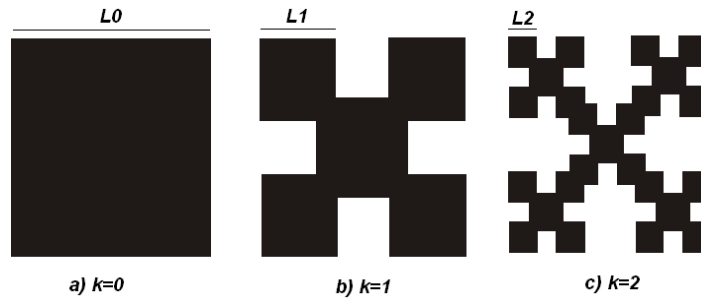


Figura 1 - Geometria fractal de Koch com  $a=4$ ,  $k=0$ ,  $k=1$  e  $k=2$

### 2.2 Superfícies seletivas em frequência, FSS

As superfícies seletivas em frequência, *frequency selective surfaces* (FSS), figura 2, podem ser descritas com sendo um arranjo periódico do tipo *patch* ou abertura apta a filtrar certas frequências, dependendo do material, das dimensões físicas, e da geometria, podem ser divididas em filtros passa-baixas, passa-altas, passa-faixa ou rejeita-faixa, [6], [7] [8]. A possibilidade de ser aplicada sobre superfícies planas e curvas possibilita sua utilização nas mais diversas aplicações tais como, radomes, mísseis, blindagens eletromagnéticas e LANs.

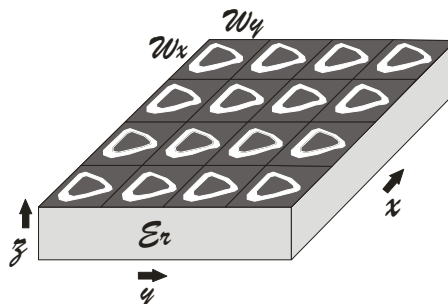


Figura 2 - Superfície seletiva em frequência, FSS

### 2.3 Método das ondas, *Wave Concept Interactive Procedure*, WCIP

O WCIP é um método de onda completa, um artifício para análise do comportamento de ondas inseridas transversalmente sobre uma superfície e no espalhamento da mesma. O método das ondas, WCIP, opera através da discretização de uma superfície  $S$  através de uma malha de  $n_x \times n_y$  pontos, originando assim uma malha de  $(n_x-1) \times (n_y-1)$  pixels,  $\Delta_x \times \Delta_y$ , figura 3, que será interpretada como uma célula unitária, e nesta será descrita a estrutura a ser analisada.

Cada pixel é qualificado pelo relativo operador de espalhamento de acordo com as características naturais da interface tais como, superfície metálica, superfície magnética, interface dielétrica, fonte ou carga. De acordo com algumas categorias iniciais dá-se início a procedimentos de múltiplas reflexões até que a convergência seja obtida. Dois operadores regem procedimentos de interação entre as ondas incidentes e ondas refletidas no domínio espacial,  $S_{xy}$ , e no domínio espectral,  $\Gamma$ . Através da transformada de Fourier e de sua inversa obtêm-se o enlace entre os domínios espectral e espacial.

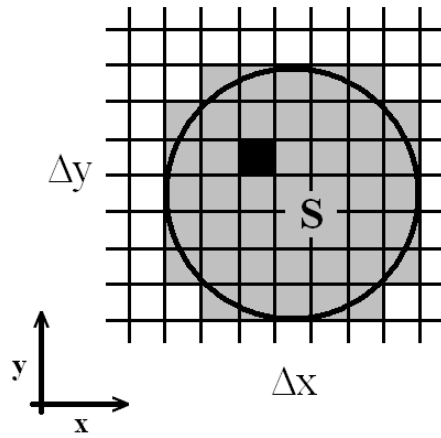


Figura 3 – Superfície S

Após obter-se a tendência na superfície  $S$ , o campo elétrico tangencial é dado por (2) e a densidade superficial de corrente por (3).

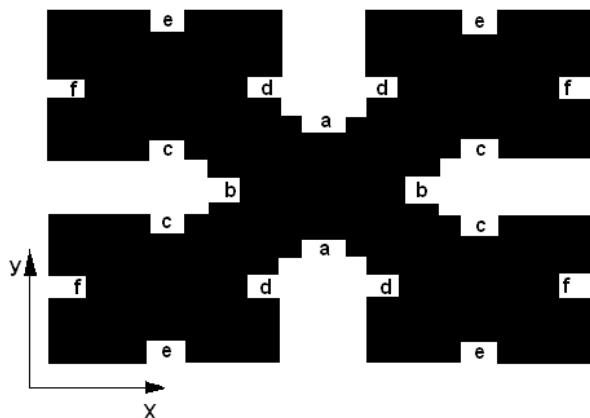
$$\mathbf{E} = \sqrt{Z_0}[\mathbf{A} + \mathbf{B}] \quad (2)$$

$$\mathbf{I} = \frac{1}{\sqrt{Z_0}}[\mathbf{A} - \mathbf{B}] \quad (3)$$

O Processo Iterativo de Conceito de Onda, WCIP, está detalhado em [2], [9] e [10].

### 2.4 Resultados e discussões

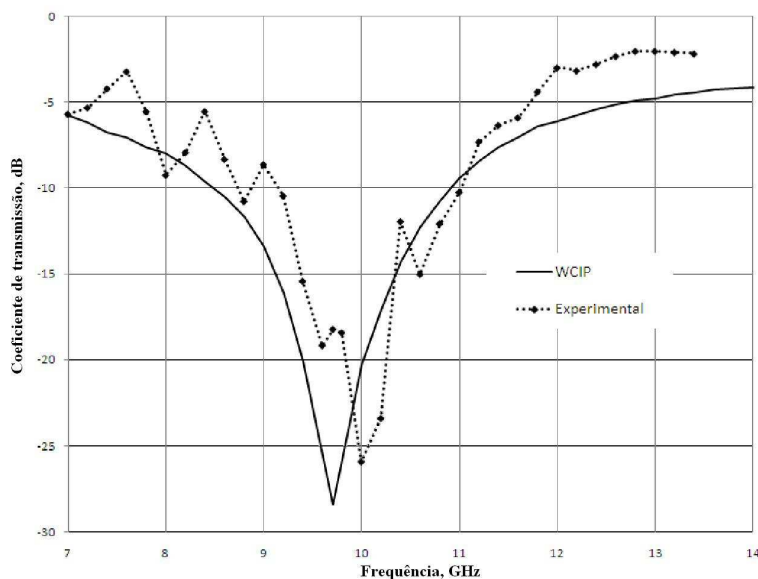
Neste trabalho foi dimensionada uma estrutura seletiva em frequência (FSS) de  $250 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ , fabricada em um substrato de baixo custo, com altura  $h = 1,5 \text{ mm}$  e constante dielétrica  $\epsilon_r = 4,4$ . A FSS é composta por 288 células unitárias de dimensões  $20,5 \text{ mm} \times 16,45 \text{ mm}$ ,  $k = 2$  e  $a = 7$ , figura 4.



**Figura 4 – Célula unitária**

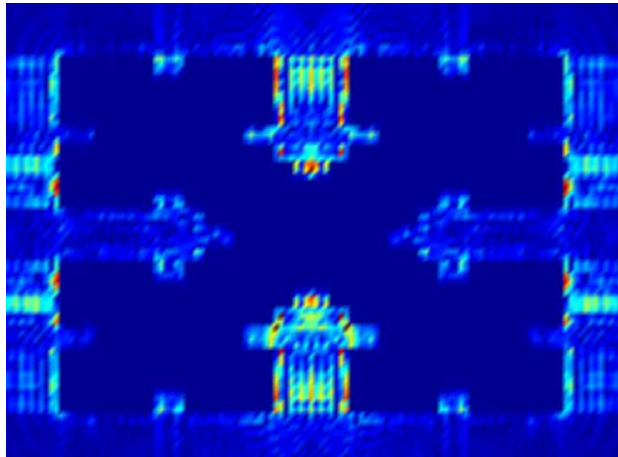
Para validar os resultados numéricos obtidos utilizando o Método das Ondas, foi caracterizada experimentalmente a FSS descrita. A caracterização experimental foi realizada no Laboratório de Medidas em Micro-ondas do GTEMA/IFPB, sendo utilizado um analisador de redes modelo N5230A Agilent e duas antenas tipo corneta para a banda X. São ainda utilizados cabos, adaptadores de coaxial para guia de ondas, guias de ondas, suportes, etc. Entre as duas antenas é estabelecida uma distância fixa de maneira a assegurar que a FSS esteja na região de campos distantes. O campo elétrico apresenta polarização x [11].

Nas simulações numéricas foi utilizado um programa computacional implementado em linguagem FORTRAN, executado em um computador pessoal, com processador dual, relógio de 2 GHz e memória RAM de 4 MB. Para descrever a célula unitária foram utilizados  $151 \times 101$  pontos, sendo considerado que a convergência é alcançada com 500 iterações. O resultado obtido para o módulo do coeficiente de transmissão é apresentado na figura 5, observando-se uma boa concordância entre a frequência de ressonância obtida pelo Método das Ondas, 9,7 GHz, e frequência de ressonância medida, 10,0 GHz. A diferença de 3% pode ser atribuída às diferenças entre as dimensões simuladas e as dimensões reais da FSS [11].



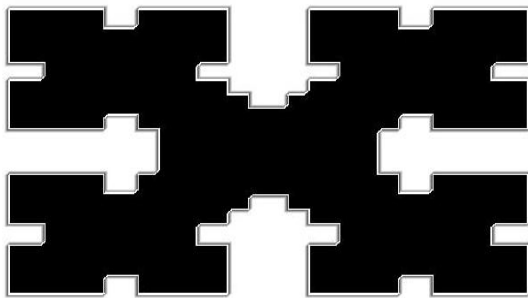
**Figura 5 - Comparação entre experimental e WCIP**

Analisando a influência do campo elétrico na célula unitária, é possível observar que em determinadas fendas o campo elétrico é mais forte, isso pode ser observado pelas cores mais quentes em algumas partes da ilustração, figura 6.

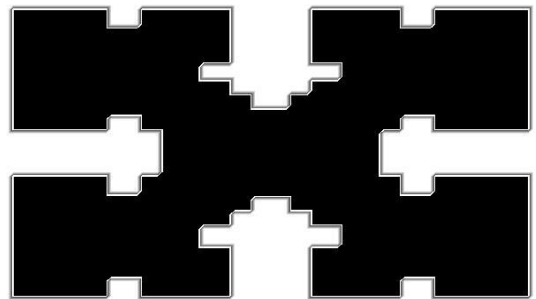


**Figura 6- Distribuição do módulo do campo elétrico na célula unitária para a frequência de ressonância de 10,6 GHz**

Baseado nesta análise, as fendas foram retiradas gradativamente. Inicialmente foram retiradas as fendas denominadas como ‘b’, figura 7. Na sequência as denominadas como ‘f’, figura 8.

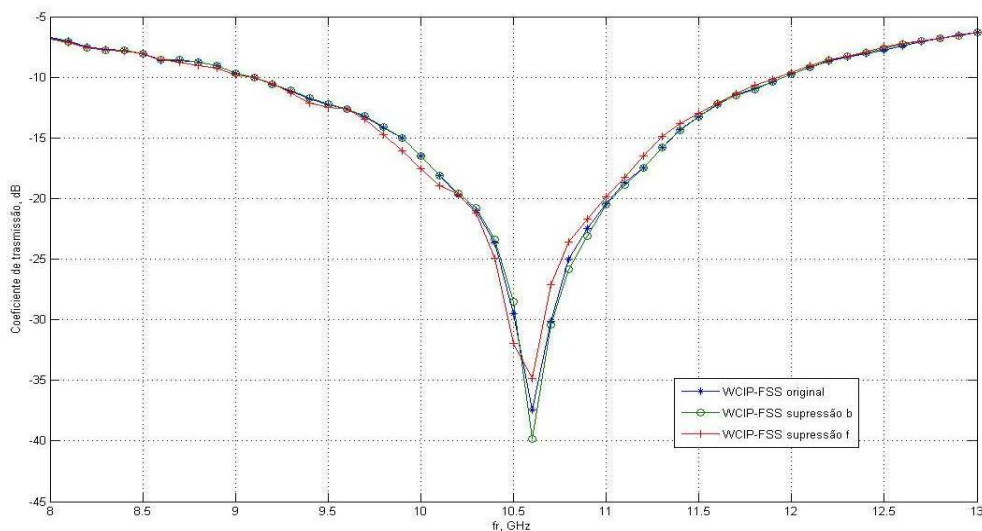


**Figura 7 - supressão de b**



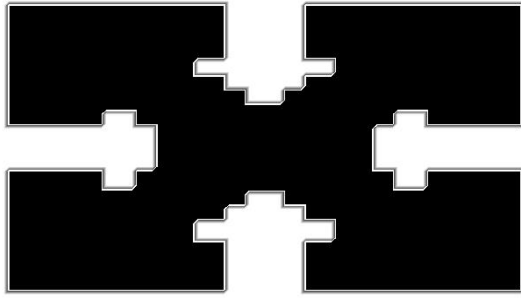
**Figura 8 - supressão de f**

Foi observado que a influência destas fendas na frequência de ressonância na célula original era mínima, ou seja, elas praticamente não contribuíam para seleção da frequência e por isso poderiam ser retiradas sem prejuízo algum. Na figura 9 é observada a comparação da frequência de ressonância da célula original e das células com a supressão das fendas ‘b’ e ‘f’.

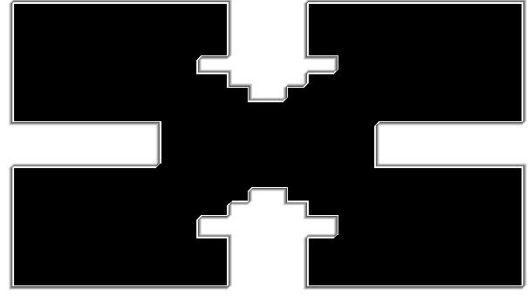


**Figura 9 – FSS original, FSS com supressão das fendas b, FSS com supressão das fendas f**

Seguindo com o processo de retirada das fendas baseado na análise da influência do campo elétrico, foram retiradas as fendas denominadas como ‘e’, figura 10, posteriormente as fendas denominadas como ‘c’, figura 11.

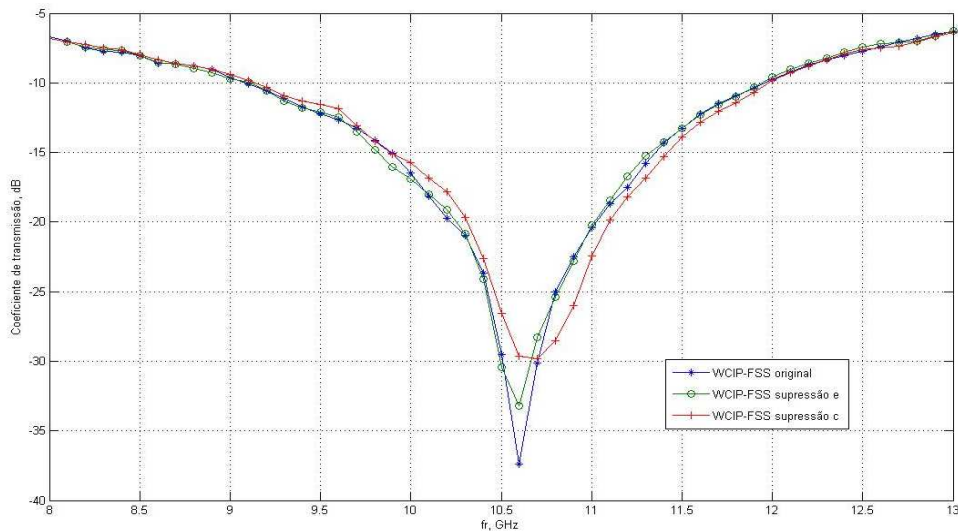


**Figura 10- supressão de e**



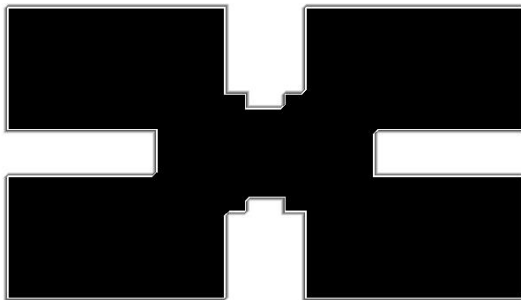
**Figura 11 - supressão de c**

Novamente foi verificado que a influência destas fendas era mínima e suas retiradas não iriam ser relevantes para seleção da frequência de ressonância, como pode ser visto na figura 12.

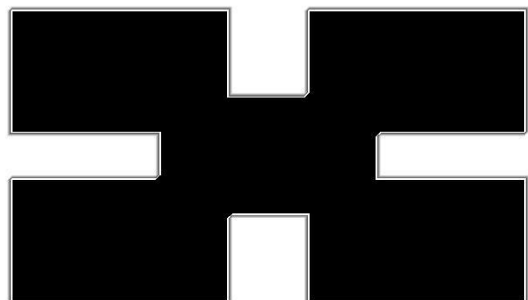


**Figura 12 – FSS original, FSS com supressão das fendas e, FSS com supressão das fendas c**

Dando continuidade ao processo de eliminação, foram retiradas as fendas denominadas como 'd', figura 13, e como 'a', figura 14.



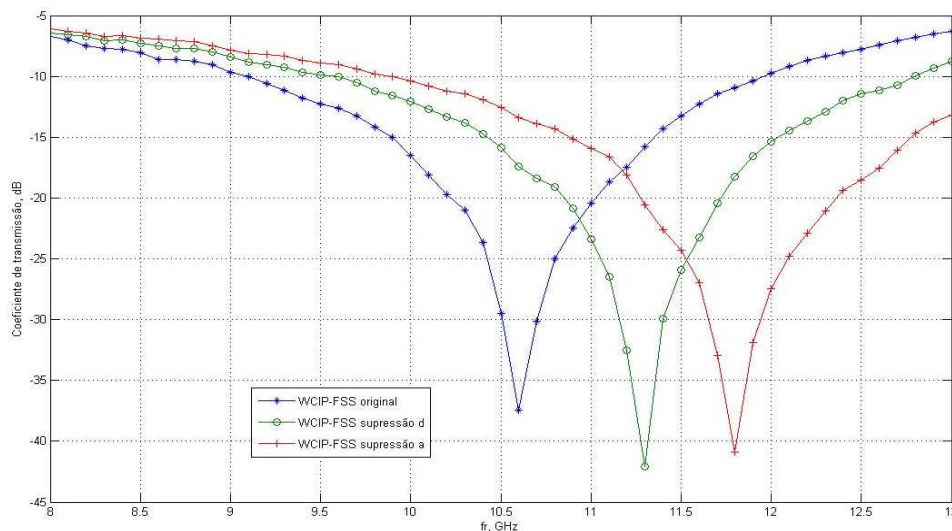
**Figura 13 - supressão de d**



**Figura 14 - supressão de a**

Ao contrario das outras retiradas de fendas, desta vez a supressão das fendas foi de grande prejuízo com relação frequência de ressonância da configuração original, como pode ser observado na figura 15.

Isso pode ser explicado pela grande concentração de campo elétrico no espaço denominado por estas fendas, como pode ser visto na figura 6.



**Figura 15 – FSS original, FSS com supressão das fendas d, FSS com supressão das fendas a**

Diante dos resultados mostrados é possível notar que grande parte das subdivisões de um fractal de Koch influenciam pouco na alteração de frequência de ressonância da estrutura original. Podendo assim reduzir de forma considerável a complexidade destas estruturas, facilitando o seu processo de fabricação.

É importante ressaltar que toda essa análise de campo elétrico foi feita usando sua polarização em x, caso essa polarização fosse feita em y, os resultados das fendas influentes para seleção da frequência de ressonância poderiam ser diferentes.

### 3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho é proposto um procedimento para a simplificação da fabricação das FSS que utilizam elementos fractais. Para isto foi necessário a análise do comportamento do campo elétrico nos detalhes da estrutura inicial, estes resultados foram obtidos com a utilização do Método das Ondas, WCIP, método que satisfaz a aplicação em estruturas com motivos fractais.

Foi observado que a complexidade da geometria das células das FSS que utilizam motivos fractais de Koch pode ser reduzida consideravelmente, gerando assim o mínimo de influência na resposta da ressonância. Os resultados comprovam também a influência da polarização da fonte no comportamento da FSS. Destaca-se ainda que esse procedimento também pode ser utilizado como mais uma variável na elaboração do projeto.

Vale ressaltar que a utilização desse procedimento não se aplica somente as FSS, também pode ser usado em filtros, antenas e outras estruturas planares, ainda com o uso do WCIP.

### REFERÊNCIAS

- [1] A. Gomes Neto, Fábio M. Pontes, Jefferson C. Silva, Paulo Henrique da F. Silva, A. Gomes D'Assunção, "Analysis of FSS with Koch island patch elements Using the wave concept iterative procedure," 2010 Conference on Electromagnetic Field Computation, USA, 2010.
- [2] M. Titaouine, A. Gomes Neto, H. Baudrand, and F. Djahli, "WCIP Method Applied to Active Frequency Selective Surfaces," *Journal of Microwave and Optoelectronics*, Vol. 6, No. 1, pp. 1-16, June 2007.
- [3] IlKwon Kim, N. Kingsley, Matt Morton, R. Bairavasubramanian, J. Papapolymerou, M. M. Tentzeris, , Jong-Gwan Yook, "Fractal-shaped microstrip coupled-line bandpass filters for suppression of second harmonic," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 53, no. 9, pp. 2943-2948, Sep. 2005

- [4] R.M. S. Cruz, P. H. da F. Silva and A. G. D'Assunção, "Neuromodeling Stop Band Properties of Koch Island Patch Elements for FSS Filter Design," *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 51, No. 12, pp. 3014-3019, December 2009.
- [5] S. R. Best, "On the performance properties of the Koch fractal and other bent wire monopoles," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 51, no. 6, pp. 1292-1300, Jun. 2003.
- [6] Ben A. Munk, *Frequency Selective Surface - Theory and Design*, Wiley, 2000.
- [7] Antônio Luiz P. de S. Campos, *Superfícies Seletivas em Frequência – Análise e Projeto*, IFRN Editora, 2009.
- [8] Antônio Luiz P. S. Campos: Análise de Espalhamento em Superfícies Seletivas em Frequência com Multicamadas Dielétricas Anisotrópicas, Tese de Doutorado, UFCG, Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2002
- [9] D. Bajon, S. Wane, M. Titaouine, H. Baudrand, Alfrêdo Gomes Neto, "Resolução de problemas eletromagnéticos usando wqip - parte I: formulação teórica," Anais do MOMAG 2006, em CD-ROM, Belo Horizonte, MG, agosto, 2006.
- [10] Alfrêdo Gomes Neto, *Relatório CAPES/COFECUB, Projeto 374/03, Processo BEX1337/04*, Brasília, jan., 2006
- [11] Alison L. de Lima, André N. da Silva, Fábio M. Pontes, Iuri S. de Araújo, Alfredo Gomes Neto, "Redução da Complexidade Geométrica de Estruturas Fractais", MOMAG 2010.