

Projeto e Análise de Antenas *Patch* Compactas com Contornos Fractais de Koch

Paulo Henrique da Fonseca Silva¹

CEFET-PB/GTEMA – Av. 1º de Maio, 720 Jaguaribe

CEP: 58015-430 – João Pessoa, PB, Brasil

E-mail: henrique@cefetpb.edu.br

Elder Eldervitch C. de Oliveira e Sandro Gonçalves da Silva

UFRN/GEMA – Campus Universitário

CEP: 59072-970 – Natal, RN, Brasil

E-mail: planckk@yahoo.com.br e sandro@ct.ufrn.br

Resumo: Este artigo apresenta uma proposta para a miniaturização de antenas em microfita, do tipo inset-fed patch retangular, através da aplicação de curvas fractais de Koch aos seus contornos retilíneos. Em comparação com as antenas em microfita convencionais, as antenas patch com contornos fractais apresentam frequências de ressonância inferiores, possibilitando a fabricação de estruturas ainda mais compactas. A técnica inset-fed é investigada pela primeira vez para o casamento de impedâncias das antenas fractais, que são alimentadas através de linhas de microfita com reentrâncias. Na fase de projeto, as dimensões das antenas foram otimizadas com o auxílio do software Ansoft Designer™, usado para a análise precisa do comportamento eletromagnético das antenas através do método dos momentos. A partir destas simulações, vários protótipos de antenas foram construídos através da aplicação de dois tipos de contornos fractais de Koch: triangular e retangular. Para a validação da metodologia empregada, um estudo comparativo dos resultados medidos e simulados foi realizado. As simulações indicaram que as antenas fractais propostas apresentam diagramas de radiação do tipo 'broadside', que são similares ao de um patch retangular. Em relação à área ocupada por uma antena patch retangular, verificou-se que: para uma mesma frequência de operação, a antena fractal de Koch triangular ocupa uma área até 28,6% menor, enquanto a antena fractal de Koch retangular ocupa uma área até 40,8% menor.

Palavras Chave: Antenas patch fractais, curva de Koch, Miniaturização, Casamento de Impedâncias.

Abstract: This paper presents a proposal for the miniaturization of inset-fed rectangular patch microstrip antennas, through the application of fractal Koch curves to their rectilinear contours. Comparing to the conventional microstrip antennas, the patch antennas with fractal contours present lower resonant frequencies, enabling the fabrication of more compact structures. It is the first time that the inset-fed technique is investigated for the impedance matching of fractal antennas, which are fed through microstrip lines with reentrances. At the design step, the size of such antennas have been optimized with the aid of the Ansoft Designer™ software, used for an accurate analysis of their electromagnetic behavior, based on the method of moments. From these simulations, several antenna prototypes were fabricated by the application of two types of fractal Koch contours: triangular and rectangular. In order to validate the methodology used, a comparative study of simulated and measured results was performed. The simulations indicated that the proposed fractal antennas present radiation patterns of the type broadside, which are similar to that of a rectangular patch. Regarding to the area occupied by a rectangular patch antenna, it was found that: for the same cutoff frequency, the fractal Koch triangular antenna occupies an area smaller than 28.6%, while the fractal Koch rectangular antenna presents an area smaller than 40.8%.

Key-words: Fractal patch antennas, Koch curve, Miniaturization, Impedance matching.

1. Introdução

Os sistemas de comunicação sem fio (*wireless*) experimentaram um crescimento considerável nos últimos anos, exercendo um papel cada vez mais importante na vida das pessoas ao redor do mundo. Estes sistemas necessitam de dispositivos portáteis, com baixo perfil, e têm despertado bastante interesse por parte dos pesquisadores. Não restam dúvidas de que a miniaturização e a operação em várias faixas de frequências (multibanda) são requisitos desejáveis aos aparelhos de comunicação modernos.

Neste mercado competitivo, o surgimento de novas tecnologias sem fio resulta em demandas crescentes por antenas compactas/multibanda, que permitam, por exemplo, a união de diferentes tecnologias sem fio num único dispositivo portátil. De fato, para a fabricação de um dispositivo sem fio de baixo perfil, baixo custo, ainda menor e mais leve que os atuais, o tamanho da antena ainda é crítico.

Várias técnicas de miniaturização têm sido propostas e aplicadas a antenas *patch* em microfita, tais como: o uso de substratos dielétricos de alta permissividade elétrica (LO et al., 1997); a aplicação de cargas resistivas ou reativas (SAINATI, 1996); e o aumento do comprimento elétrico da antena por meio de otimização de sua geometria (WANG; LANCASTER, 1999).

A aplicação da geometria fractal a estruturas de antenas convencionais otimiza a forma da antena em relação ao seu comprimento elétrico, que resulta numa redução do seu tamanho total (KIM et al., 2002). Por apresentarem duas propriedades em comum, o preenchimento de espaço e a auto-similaridade, as geometrias fractais aplicadas a elementos de antenas apresentam as propriedades: banda larga (MAYES, 1992), multibanda (PUENTE et al., 1998), redução do tamanho da antena etc.

Este artigo descreve a miniaturização de antenas do tipo *inset-fed patch* retangular, alimentadas por linhas de microfita com reentrâncias, através da aplicação de curvas fractais de Koch aos seus contornos retilíneos. As propriedades destas antenas *patch* fractais são investigadas pela primeira vez.

A seção 2 descreve a antena *inset-fed patch* retangular, estrutura geradora das antenas fractais propostas. O modelo empírico aproximado e o procedimento de otimização usado no cálculo de suas dimensões são apresentados. Na seção 3, descrevem-se os aspectos básicos da geometria fractal e a geração das curvas de Koch. A seção 4 apresenta as antenas fractais propostas. A caracterização das antenas fractais e os resultados obtidos através de simulação e de medição são apresentados na seção 5. Na seção 6, as principais conclusões retiradas deste trabalho são apresentadas.

Nomenclatura

c = velocidade da luz no vácuo, m/s

f_r = frequência de ressonância, Hz

G_1 = condutância da abertura radiante, S

G_2 = condutância mútua entre aberturas, S

h = espessura do substrato dielétrico, m

L = comprimento do path, m

R_{in} = resistência de entrada do patch, Ω

W = largura do patch, m

w_0 = largura da linha de microfita, m

x_0 = largura do inset, m

y_0 = comprimento do inset, m

Símbolos gregos

ϵ_r = permissividade elétrica relativa

ϵ_{reff} = permissividade elétrica relativa efetiva

2. Antena *Inset-Fed Patch* Retangular

As antenas em microfita possuem características atrativas, tais como: baixo peso, baixo perfil e baixo custo. Elas são mecanicamente robustas, de fácil fabricação, podem ser prontamente integradas a outros dispositivos de radiofrequência, além de permitirem operações em múltiplas frequências.

A antena *inset-fed patch* retangular, estrutura geradora das antenas fractais, é ilustrada na Fig. (1). Ela consiste basicamente de duas placas condutoras, paralelas, separadas por um substrato dielétrico, sendo uma das placas o elemento radiante (*patch*) e a outra o plano de terra.

As antenas *patch* retangulares possuem algumas limitações, destacando-se: largura de banda estreita, baixo ganho, baixa eficiência, excitação de ondas de superfície, irradiação externa nas linhas e junções, bem como são diretamente afetadas pelas alterações climáticas (BALANIS, 1997).

Levando-se em conta as características do substrato dielétrico, a frequência de operação e a impedância do sistema de comunicação, o projeto de uma antena *patch* pode ser dividido em duas partes: (i) projeto da linha de alimentação; (ii) projeto do *patch* retangular radiante.

Neste trabalho, a linha de alimentação em microfita foi projetada com 1/8 do comprimento onda, enquanto a sua largura foi calculada conforme o modelo empírico descrito por (HAMMERSTAD, 1975), obtendo-se um valor de $w_0 = 2,8 \text{ m}$ para um sistema de 50Ω e um substrato de fibra de vidro.

As dimensões iniciais (L , W) de uma antena *inset-fed patch* retangular foram calculadas através das expressões analíticas, Eq. (1)-(4).

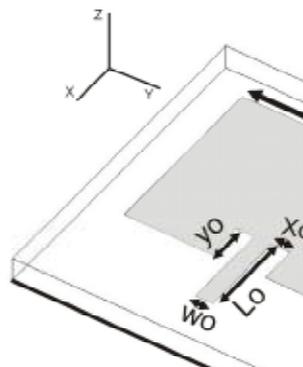


Figura 1. Antena tipo *inset-fed patch* retangular.

$$W = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (1)$$

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 2 \frac{h}{W} \right]^{-1/2} \quad (2)$$

$$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(\epsilon_{reff} + 0.300) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{reff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.813 \right)} \quad (3)$$

$$L = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_r}} - 2\Delta L \quad (4)$$

A largura da reentrância (*inset*) foi considerada igual à largura da linha de microfita, $x_0 = w_0$, enquanto o valor inicial de seu comprimento foi calculado através de expressões aproximadas, Eq. (5)-(6) (BALANIS, 1997).

$$y_0 = \frac{L}{\pi} \arccos \left(\sqrt{\frac{\theta}{R_{in}(0)}} \right) \quad (5)$$

$$R_{in}(0) = \frac{1}{2(G_1 \pm G_2)} \quad (6)$$

Em que, $R_{in}(0)$ é a resistência de entrada na frequência de ressonância, G_1 é a condutância da abertura radiante e G_{12} é a condutância que leva em conta os efeitos mútuos entre as duas aberturas radiantes da antena *patch* retangular. O cálculo destas condutâncias foi feito através de avaliação numérica das expressões integrais dadas por Balanis (1997), utilizando o método da quadratura de Lobatto.

A partir do projeto inicial de cada antena *inset-fed patch*, o *software* Ansoft Designer™ foi usado para otimizar as dimensões do *patch* L e y_0 . O procedimento de otimização visa ajustar a frequência de ressonância, enquanto mantém-se a impedância de entrada da antena em torno de 50 Ω . As dimensões de uma antena *inset-fed patch* projetada para 2,45 GHz são dadas na Fig. 3. Os detalhes de construção são descritos na seção 4.

3. Geometria Fractal – Curva de Koch

O termo fractal foi introduzido pelo matemático Benoit Mandelbrot (1982), referindo-se a objetos construídos recursivamente, onde um aspecto do objeto limite é infinito e outro é finito. Por exemplo, a curva de Koch possui um comprimento infinito, mas ocupa uma área finita, Fig. (2). A dimensão fractal, a auto-semelhança, o preenchimento de espaço e a construção iterativa são propriedades comuns aos fractais (FALCONER, 2003).

Atualmente, os fractais são aplicados em muitos ramos da ciência e tecnologia, desde a biologia até a engenharia. Por exemplo, a união entre o eletromagnetismo e a geometria fractal originou a área de pesquisa denominada eletrodinâmica fractal. Nesta área, as propriedades únicas

da geometria fractal mostram-se úteis para a construção de filtros, superfícies seletivas em frequência e antenas, possibilitando soluções práticas para uma variedade de aplicações na faixa de microondas.

Uma das linhas de pesquisa mais promissoras da eletrodinâmica fractal dedica-se ao estudo de antenas de formato fractal. Assim, a geometria fractal e a teoria de antenas formam a base para o estudo das antenas fractais.

Puente et al. (1998) e Cohen (1997) foram os pioneiros no desenvolvimento de antenas com elementos fractais. Estes e diversos estudos posteriores verificaram as relações entre as propriedades dos fractais e o comportamento elétrico das antenas: a auto-similaridade está relacionada às respostas multibanda das antenas fractais, enquanto que, o preenchimento do espaço é o responsável pela redução das dimensões das antenas fractais, uma vez que as formas retorcidas dos fractais aumentam o comprimento elétrico das antenas.

A geometria fractal usada neste trabalho foi baseada na curva de Koch, nome dado em homenagem ao matemático Helge Von Koch. Este fractal tem sido usado para projetar vários tipos de antenas com diferentes comportamentos Gianvittorio & Sammi (2002); Puente et al. (2000); Vinoy et al. (2003).

A curva de Koch é caracterizada por dois parâmetros: o fator de iteração e o número de iterações (KIM et al., 2002). Inicialmente, quando o número de iterações vale zero, nós temos a forma geradora inicial: neste caso um retângulo com duas reentrâncias (ver Fig. 1). Assim, a construção de cada um contorno fractal de Koch começa com uma linha reta, correspondendo à iteração ou nível zero do fractal (Fig. 2).

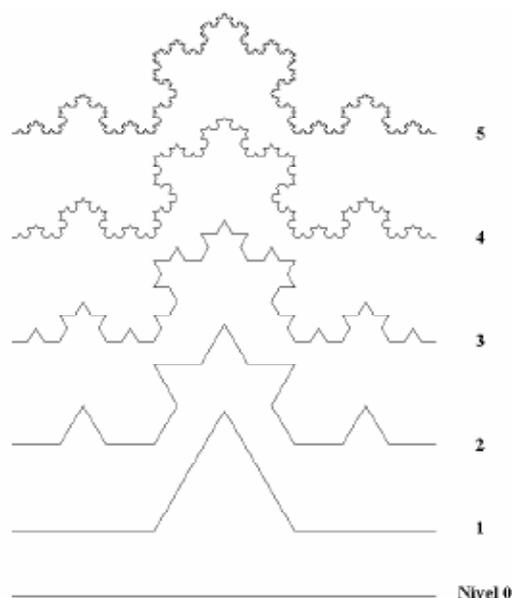


Figura 2. Etapas da geração da curva de Koch.

Os fractais podem ser construídos a partir de diferentes

métodos. Um desses métodos é o Sistema Iterativo de Funções (IFS, *Iterated Function System*), introduzido pelo matemático inglês Michael Barnsley (1986), um dos pioneiros da ciência dos fractais. O IFS é um método para a geração de fractais através de transformações afins.

A curva de Koch, ilustrada na Figura (2), é obtida a partir de uma reta através de quatro transformações afins $w_i : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$, da forma:

$$w_i \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_i \\ f_i \end{pmatrix} \quad (7)$$

As variáveis θ_i , e_i e f_i assumem os valores dados na Tab. (1).

Tabela 1 – Valores constantes das transformações para obtenção da curva de Koch triangular.

| i | θ_i | e_i | f_i |
|---|------------|-------|--------------|
| 1 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | $\pi/3$ | 1 | 0 |
| 3 | $-\pi/3$ | 3/2 | $\sqrt{3}/2$ |
| 4 | 0 | 2 | 0 |

Estas quatro transformações fazem uma contração de 1/3 unidades; w_2 faz uma rotação de 60° e uma translação de uma unidade na direção x ; w_3 faz uma rotação de -30° , uma translação de 3/2 unidades na direção x e $\sqrt{3}/2$ na direção y ; w_4 faz uma translação de duas unidades na direção x .

4. Estrutura das Antenas Propostas

As antenas em microfita abordadas consistem de um elemento radiante tipo *patch* montado sobre uma camada dielétrica isotrópica e sobre o plano de terra. O substrato dielétrico usado é o feito de fibra-de-vidro (FR-4), tem 1,5 mm de espessura e uma permissividade relativa de 4.4. Para a alimentação da antena, um cabo coaxial de 50Ω é conectado à linha de microfita via um conector SMA.

As antenas com contornos fractais de Koch foram construídas a partir de um retângulo com a curva de Koch aplicada a cada contorno não-radiante e ao contorno radiante, oposto à porta de entrada da antena *inset-fed patch*. Portanto, os contornos fractais são aplicados a três lados da antena; o quarto lado fica reservado à aplicação dos *insets*, cuja finalidade é o casamento de impedâncias. Contudo, ressaltamos que esta regra não foi aplicada à antena *patch* fractal de Koch de nível 2 com contornos retangulares. Neste caso, os contornos fractais foram aplicados aos quatro lados da antena geradora.

O projeto tem início com um *patch* retangular de comprimento L , largura W , e dois *insets* idênticos de comprimento y_0 e largura x_0 , que corresponde à antena

fractal de Koch de nível 0. Estes parâmetros geométricos estão indicados na Fig. (1).

Os dois tipos de contorno fractal aplicados às antenas *patch*, através das curvas de Koch retangular e triangular, são descritos em seguida.

4.1 Antenas *Inset-Fed Patch* com Contornos Fractais Triangulares

A geometria das antenas fractais com contornos de Koch triangulares é ilustrada na Fig. (3). As dimensões indicadas referem-se às antenas que foram obtidas a partir da antena *inset-fed patch* projetada para uma frequência de 2,45 GHz.

Para maximizar o efeito de miniaturização, os fatores de iteração (1/3 para o comprimento L e 1/3 para a largura W) foram escolhidos entre uma variedade de valores investigados. Quando o número de iterações tende ao infinito, o fractal de Koch ideal é obtido. Contudo, devido às limitações impostas na etapa de fabricação, apenas duas iterações fractais são consideradas nesta abordagem. As antenas fractais com contornos triangulares de níveis 1 e 2 são mostradas na Fig. (3).

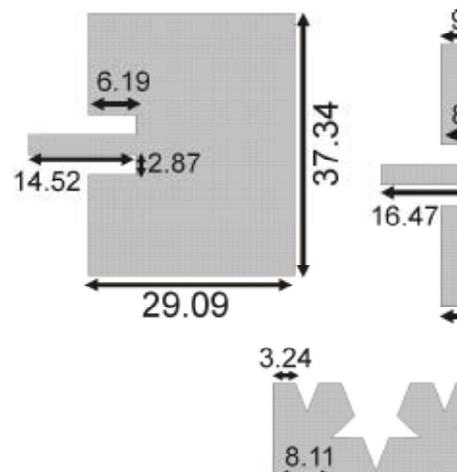


Figura 3. Antenas *inset-fed patch* com contornos fractais de Koch triangulares: níveis 0, 1 e 2.

4.2 Antenas *Inset-Fed Patch* com Contornos Fractais Retangulares

A geometria da antena *patch* fractal de Koch com contornos retangulares é ilustrada na Fig. (4). O método de construção descrito na seção 4.1 foi utilizado, mas com fatores de iteração de 1/3 para o comprimento L e 1/4 para a largura W .

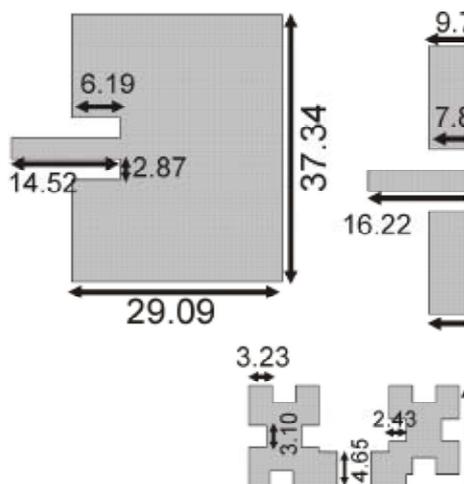


Figura. 4 Antenas *inset-fed patch* com contornos fractais de Koch retangulares: níveis 0, 1 e 2.

5. Resultados Simulados e Experimentais

Nesta seção, os efeitos dos diferentes elementos radiantes fractais sobre o desempenho das antenas são caracterizados. Para efetuar este estudo, a ferramenta de análise de onda completa Ansoft Designer™ foi utilizada. Além de uma antena *inset-fed patch* retangular projetada para 2,45 GHz, quatro elementos fractais diferentes foram considerados. Os resultados são usados para tornar as antenas em microfita mais compactas.

A Fig. (5) apresenta os resultados de simulação da perda de retorno obtida para as antenas fractais cujas dimensões estão indicadas nas Fig. (3)-(4). Estes resultados são resumidos nas Tab. (2)-(3).

A simulação de perda de retorno fornece a frequência de ressonância e a largura de banda de cada antena fractal, permitindo o cálculo do fator de compressão de frequência, que está diretamente relacionado com a capacidade de miniaturização da antena. A partir destes resultados, pode-se observar que as antenas com contornos fractais retangulares apresentaram os maiores fatores de compressão. Portanto, estas antenas são mais compactas do que as antenas com contornos fractais triangulares.

Contudo, em relação à antena de nível 0, com uma largura de banda de 60 MHz, a análise feita indicou que a aplicação dos contornos fractais provoca uma redução da largura de banda.

Tabela 2 – Resultados de simulação para a antena de Koch com contornos triangulares.

| | Nível 0 | Nível 1 | Nível 2 |
|----------------------------------|---------|---------|---------|
| Frequência de Ressonância, (GHz) | 2,45 | 1,81 | 1,75 |
| Largura de Banda, (MHz) | 60 | 29 | 27 |
| Perda de Retorno, (dB) | -47,0 | -27,5 | -30,8 |
| Fator de Compressão, (%) | – | 26,1 | 28,6 |

Tabela 3 – Resultados de simulação para a antena de Koch com contornos retangulares.

| | Nível 0 | Nível 1 | Nível 2 |
|----------------------------------|---------|---------|---------|
| Frequência de Ressonância, (GHz) | 2,45 | 1,78 | 1,45 |
| Largura de Banda, (MHz) | 60 | 29 | 21 |
| Perda de Retorno, (dB) | -47,0 | -28,7 | -24,5 |
| Fator de Compressão, (%) | – | 27,3 | 40,8 |

Com base nestes resultados preliminares, as dimensões das antenas fractais de níveis 1 e 2 foram reduzidas usando os fatores de compressão de frequência obtidos. Os resultados simulados para a perda de retorno das estruturas de nível 2, redimensionadas para a frequência de 2,45 GHz, são mostrados na Fig. (6).

Com estas novas dimensões reduzidas, a antena fractal de nível 2 e com contorno retangular apresentou uma frequência de ressonância de 2,46 GHz, perda de retorno de $-50,7$ dB e uma largura de banda de 35 MHz aproximadamente.

Para a antena fractal de nível 2 com contorno triangular, obteve-se uma frequência de ressonância igual a 2,47 GHz, perda de retorno de $-49,5$ dB e uma largura de banda de 40 MHz. Os valores obtidos para as perdas de retorno indicam um excelente casamento de impedâncias.

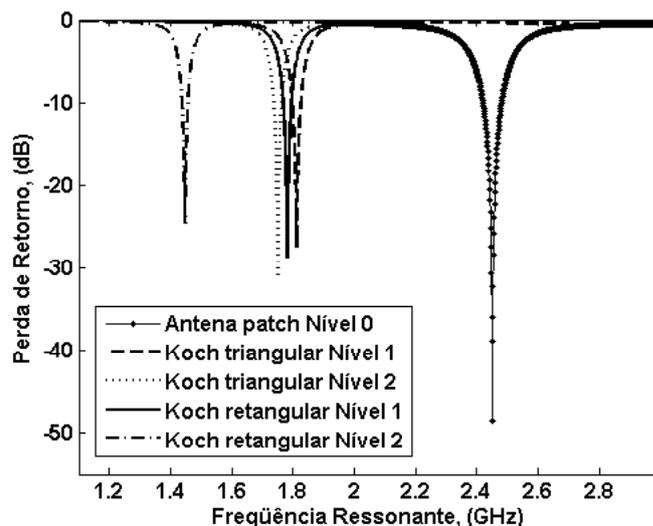


Figura 5. Resultados de simulação para as antenas projetadas, vide Fig. (3) e (4).

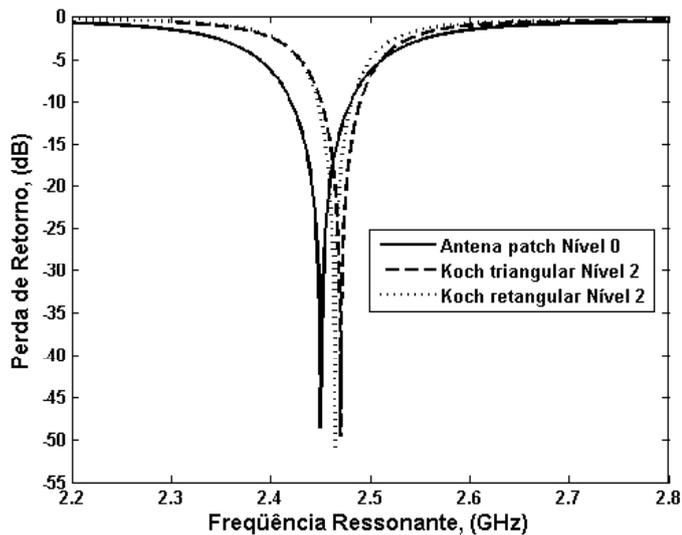


Figura 6. Simulação da perda de retorno das antenas fractais redimensionadas de nível 2.

Após uma série de simulações, alguns protótipos foram construídos com a finalidade de validar os resultados simulados. O equipamento utilizado nas medições foi o analisador de rede vetorial modelo HP8757D. A Figura (7) apresenta uma foto ilustrativa de alguns protótipos fabricados. A Figura (8) apresenta as curvas obtidas com os valores simulados da frequência de ressonância em função das dimensões de cada antena e do nível do contorno fractal retangular e triangular, respectivamente. Os resultados medidos também são sobrepostos a estas curvas. A boa concordância entre os resultados simulados e medidos apontam para a validação da metodologia de projeto/otimização utilizada, bem como dos procedimentos experimentais realizados durante a medição das antenas.

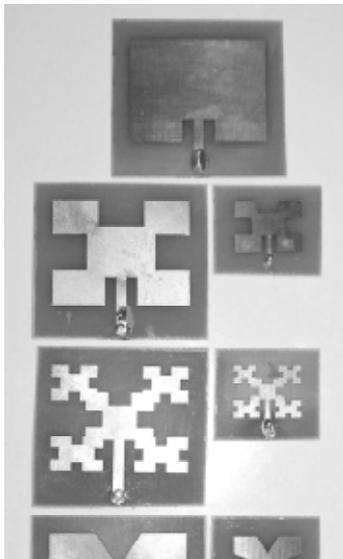
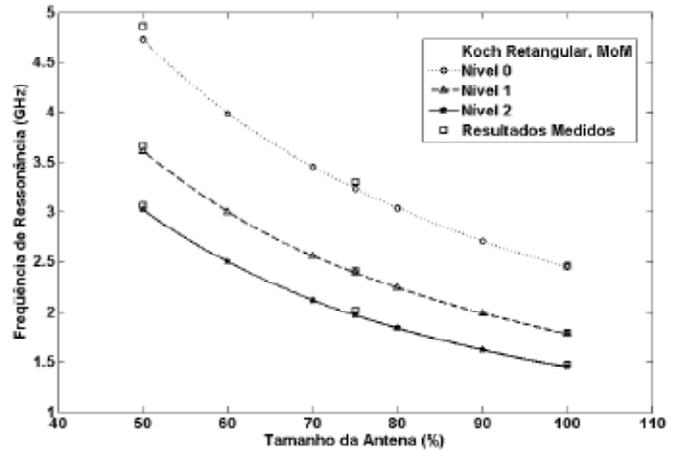
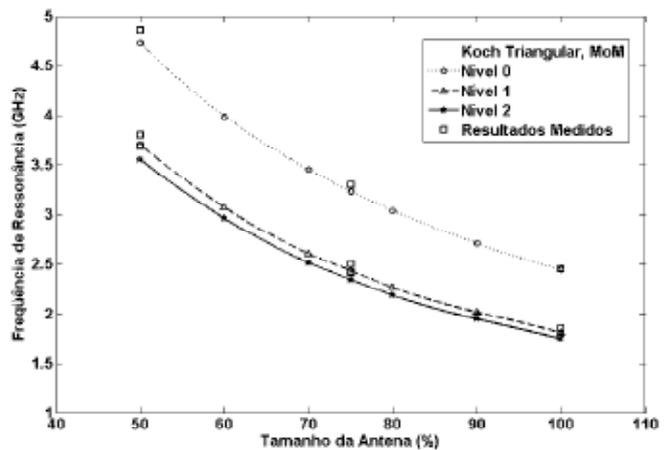


Figura 7 Protótipos fabricados: antena *inset-fed* patch geradora (nível 0) e antenas fractais de níveis 1 e 2, com tamanhos de 100% e 50%.



(a)



(b)

Figura 8. Frequência de ressonância em função do tamanho das antenas fractais de Koch com contornos: (a) retangulares; (b) triangulares.

As Figuras (9)-(13) apresentam os resultados simulados e medidos da perda de retorno das antenas construídas com as dimensões apresentadas nas Fig. (3) e (4), cujos resultados de simulação foram dados nas Tab. (2) e (3), respectivamente. Em geral, obteve-se boa concordância entre os resultados simulados e medidos. As pequenas diferenças entre os valores medidos e simulados podem ser atribuídas ao processo de fabricação das antenas. Os resultados medidos são sumarizados nas Tab. (4) e (5).

Para ilustrar o excelente casamento de impedâncias obtido com o uso da técnica *inset-fed*, as Fig. (14a)-(14b) apresentam as cartas de Smith para as antenas *patch* fractais de nível 2 com contornos de Koch triangular e retangular, nas faixas de frequências de 1,72-1,83 GHz e 1,39-1,51 GHz, respectivamente. Os valores das impedâncias medidas com o analisador de redes HP8757D, também estão indicados nas Fig. (14a)-(14b).

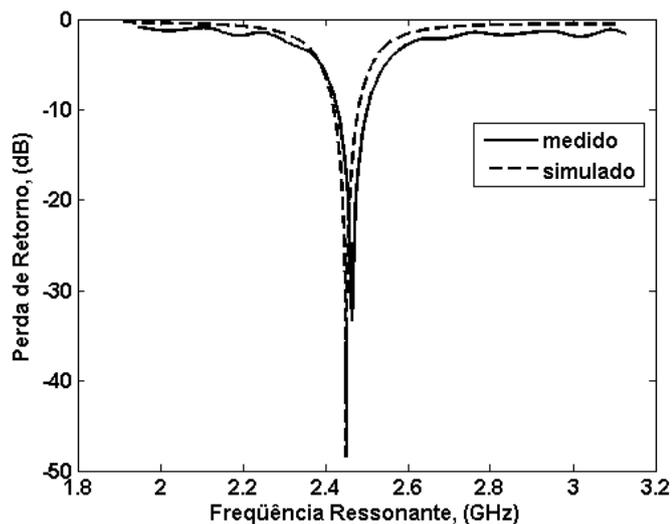


Figura 9. Comparação entre os resultados simulados e medidos, antena *inset-fed patch*.

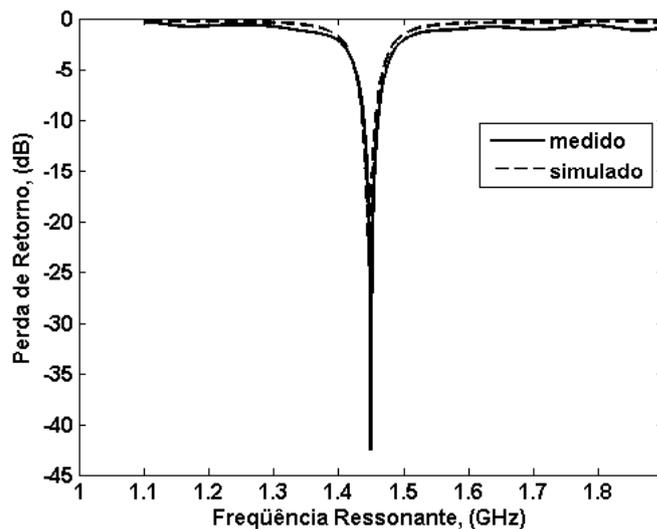


Figura 11. Perda de retorno da antena fractal de Koch de nível 2 com contornos retangulares.

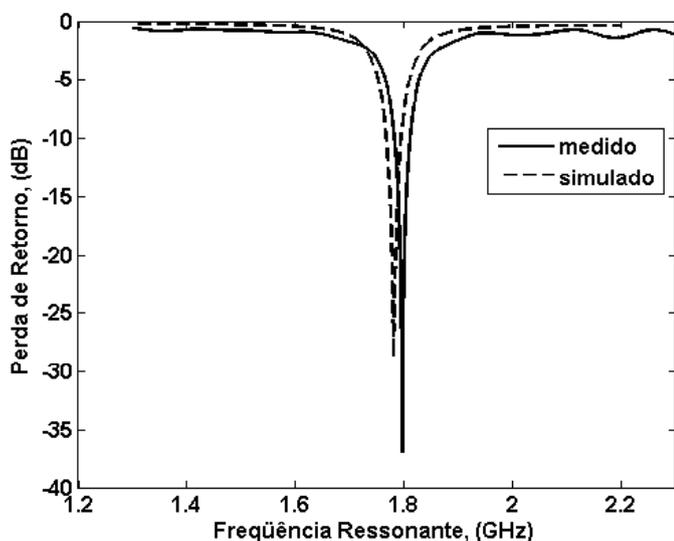


Figura 10. Perda de retorno da antena fractal de Koch de nível 1 com contornos retangulares.

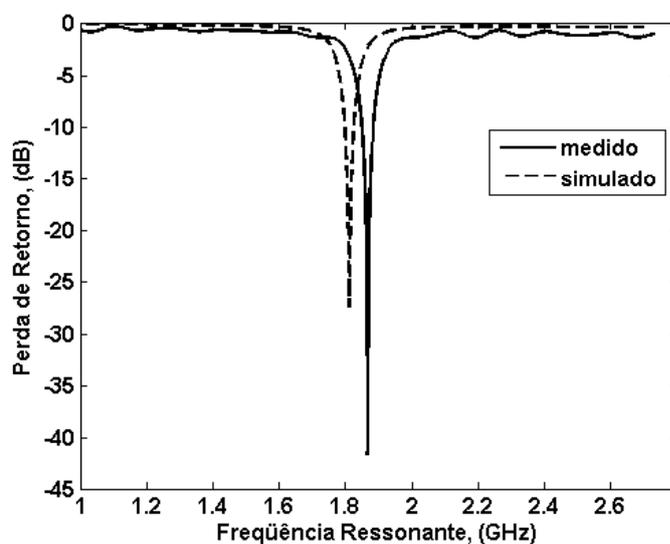


Figura 12. Perda de retorno da antena fractal de Koch de nível 1 com contornos triangulares.

Tabela 4 – Resultados de medição para a antena de Koch com contornos triangulares.

| | Nível 0 | Nível 1 | Nível 2 |
|----------------------------------|---------|---------|---------|
| Frequência de Ressonância, (GHz) | 2,46 | 1,86 | 1,78 |
| Largura de Banda, (MHz) | 76 | 35 | 30 |
| Perda de Retorno, (dB) | -33,0 | -40,0 | -50,7 |

| | Nível 0 | Nível 1 | Nível 2 |
|----------------------------------|---------|---------|---------|
| Frequência de Ressonância, (GHz) | 2,46 | 1,79 | 1,45 |
| Largura de Banda, (MHz) | 76 | 30 | 23 |
| Perda de Retorno, (dB) | -33,0 | -36,4 | -43,4 |

Tabela 5 – Resultados de medição para a antena de Koch com contornos retangulares.

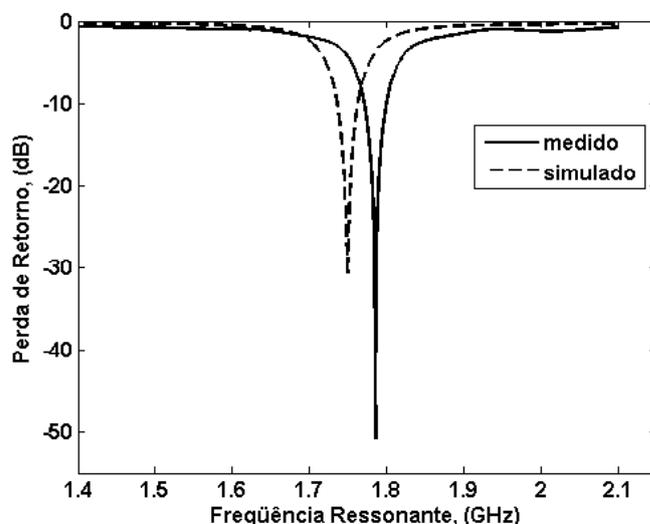
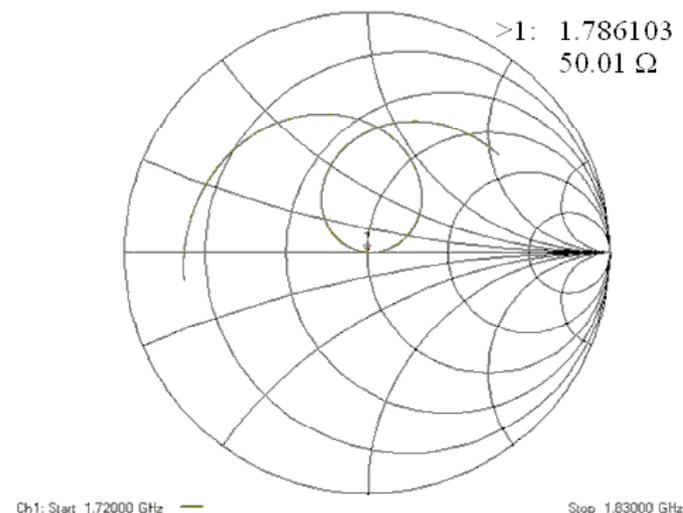
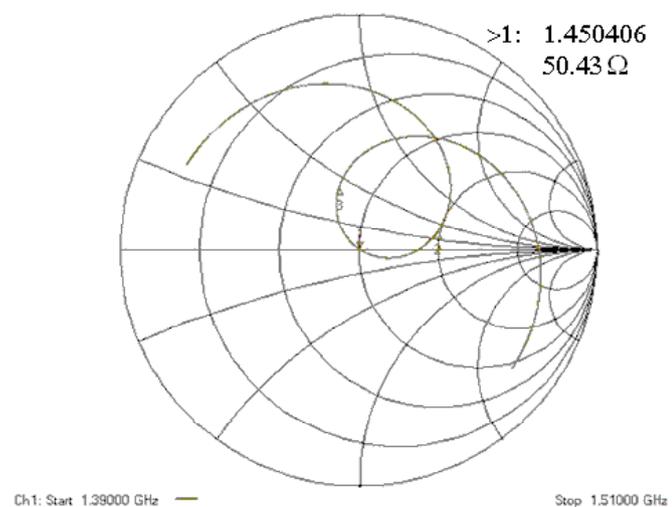


Figura 13. Perda de retorno da antena fractal de Koch de nível 2 com contornos triangulares.

A Figura 15 mostra os resultados de simulação dos diagramas de radiação 3D das antenas *patch* fractais de nível 2, que são similares ao de uma antena *patch* retangular convencional, em que o máximo do diagrama ocorre na direção perpendicular ao elemento irradiante (*broadside*). A Figura 16 apresenta os resultados de simulação das distribuições de corrente nos elementos radiantes das antenas fractais de nível 2.



(a)



(b)

Figura 14. Cartas de Smith indicando a variação da impedância de entrada das antenas fractais de Koch de nível 2: (a) com contornos triangulares; (b) com contornos retangulares.

6. Conclusões

Neste artigo, descreve-se o uso inédito da curva fractal de Koch para a miniaturização de antenas em microfita do tipo *inset-fed patch* retangular. Verificou-se que a aplicação de contornos fractais a este tipo de antena possibilita uma redução considerável em seu tamanho total: de 28,6%, utilizando o contorno de Koch triangular; de 40,8% utilizando o contorno Koch retangular. Os resultados obtidos mostraram que a antena com contorno retangular,

cujo perímetro é maior em relação à antena com contorno triangular, apresenta um comprimento elétrico maior, bem como um maior fator de compressão de frequência, aumentando assim a sua capacidade de miniaturização. As antenas fractais de Koch propostas mostraram-se bastante compactas, podendo também ser uma boa escolha para aplicação em dispositivos *handset*. Os diagramas de irradiação obtidos para as antenas fractais são similares ao de uma antena *patch* convencional, indicando que não houve a degradação dos mesmos. O uso da técnica *inset-fed* permitiu a obtenção de excelente casamento de impedâncias, como pode ser visto nos resultados medidos das cartas de Smith. Contudo, a aplicação dos contornos fractais às antenas em microfita ocasionou uma redução indesejável de suas larguras de banda. Para trabalhos futuros, propõe-se investigar as soluções para o aumento da largura de banda, bem como a operação multibanda das antenas *patch* com contornos fractais, visando a sua aplicação aos sistemas sem fio.

Figura 15. Diagramas de radiação 3D das antenas fractais de Koch de nível 2.

Figura 16. Distribuição de corrente nas antenas fractais de Koch de nível 2.

7. Referências

- BALANIS, C. A., **Antenna Theory-analysis and Design**. New York: John Wiley & Sons, 2nd ed. 1997. 941 p.
- BARNESLEY, M. F. **Fractals Everywhere**. Academic Press Inc., Atlanta, 1988.
- COHEN, N. **Fractal Antenna Applications in Wireless Telecommunications. Proceedings of Electronics Industries Forum of New England**, p. 43-49, 1997.
- FALCONER, K., **Fractal Geometry – Mathematical Foundations and Applications**. New York: John Wiley & Sons, 1990. 337 p.

GIANVITTORIO, J. P., SAMMI, Y. R., **Fractal antennas: A novel miniaturization technique and applications?** *IEEE Antenna's and Propagation Magazine*, v. 44, p. 20-36, 2002.

HAMMERSTAD, E. O., **Equations for Microstrip**

Design. PROCEEDINGS OF FIFTH EUROPEAN MICROWAVE CONFERENCE, p. 268-272, 1975.

KIM, I. K., YOON, J. G., PARK, H. K., Fractal-Shape Small Size Microstrip Patch Antenna, **Microwave and Optical Technology Letters**, v. 34, p.15 – 17, 2002.

LO, T. K., HO, C., HWANG, Y., LAM, E. LEE, B. Miniature aperture-coupled microstrip antenna of very high permittivity. **Electronic Letters**, v. 33, p. 9-10, 1997.

MAYES, P. E., Frequency-independent antenna and broad-band derivatives thereof, **Proceedings of the IEEE**, v. 80, p.103–112, 1992.

PUENTE, C. B., ROMEU, J., POUS, R., CARDAMA, A. On the Behavior of the Sierpinski Multiband Fractal Antenna. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, v. 46, p. 517-524, 1998.

PUENTE, C. B. ROMEU, J., POUS, R., CARDAMA, A. "The Koch monopole: a small fractal antenna". **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, v. 48, p.1773-1781, 2000.

RAMESH, M., KB, Y. Design Formula for Inset Fed Microstrip Patch Antenna. **Journal of Microwaves and Optoelectronics**, v. 3, p. 5-10, 2003.

SAINATI, R. A., CAD of Microstrip Antennas for Wireless Applications, Artech House, Norwood, MA, 1996.

VINOY, K. J., ABRAHAM, J. K., VARADAN, V. K., On the Relationship Between Fractal Dimension and the Performance of Multi-Resonant Dipole Antennas Using Koch Curves. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, v. 51, p. 2296-2303, 2003.

WANG, H. Y. E LANCASTER, M. J., Aperture-coupled thin-film superconducting meander antennas, **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, v.47, p. 829–836, 1997

WATERHOUSE, R. B. Small Microstrip Path Antenna. **Electronic Letters**, v. 31, p. 604-605, 1995.

Responsabilidade de autoria

As informações contidas neste artigo são de inteira responsabilidade de seus autores. As opiniões nele emitidas não representam, necessariamente, pontos de vista da Instituição e/ou do Conselho Editorial.