

## MINIATURIZAÇÃO DE ANTENAS TIPO *PATCH* RETANGULAR EM MICROFITA UTILIZANDO A CURVA FRACTAL DE KOCH

Elder Eldervitch C. de OLIVEIRA (1); Paulo H. da F. SILVA (2); Sandro G. da SILVA (3)

(1) Centro Federal de Educação Tecnológica da Paraíba  
GTEMA – Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado  
Av. 1º de Maio, 720 Jaguaribe, CEP: 58015-430, João Pessoa - PB, Brasil  
e-mail: [planckk@yahoo.com.br](mailto:planckk@yahoo.com.br)

(2) CEFET-PB/GTEMA, e-mail: [henrique@cefetpb.edu.br](mailto:henrique@cefetpb.edu.br)

(3) UFRN, e-mail: [sandro@ct.ufrn.br](mailto:sandro@ct.ufrn.br)

### RESUMO

Aliado à tecnologia wireless, a miniaturização e a operação em várias faixas de frequências são características chaves no mercado dos aparelhos de comunicação modernos. O surgimento de diferentes tecnologias sem fio resulta em demandas crescentes por antenas compactas/multibanda, que possibilitem, por exemplo, a união destas tecnologias num único aparelho sem fio portátil. Este artigo apresenta uma proposta de miniaturização de antenas tipo *patch* retangular em microfita a partir da aplicação da curva fractal de Koch aos contornos destas antenas. Em comparação com as antenas *patches* convencionais, as antenas fractais propostas apresentam frequências de ressonância inferiores. O casamento de impedâncias de antenas fractais através de linhas de microfita de alimentação com ranhuras (*inset-fed*) é investigado pela primeira vez. Os projetos das antenas foram auxiliados através de simulações com o *software* Ansoft Designer™, que implementa o método dos momentos. A partir destas simulações, vários protótipos de antenas foram construídos. Com o intuito de validar os resultados obtidos, foram feitas comparações entre os resultados medidos e simulados. Assim, verificou-se uma redução de até 28,6% na área das antenas projetadas com contornos fractais através da curva de Koch.

**Palavras-chave:** antena *patch* retangular, curva de Koch, casamento de impedâncias, miniaturização.

## 1. INTRODUÇÃO

O avanço dos sistemas de comunicação sem fio (*wireless*) e o crescimento de suas aplicações nos últimos anos, tornaram o uso de antenas compactas multibanda/banda larga um grande atrativo e de suma importância em aplicações comerciais e militares. Os exemplos mais comuns são encontrados na variedade de aparelhos de comunicação sem fio portátil, tais como: telefones celulares, *handsets*, *palmtops*, *laptops*, entre outros. O surgimento de diferentes tecnologias sem fio, a exemplo do GSM (sistema global para comunicações móveis), RFID (identificação por rádio frequência), *bluetooth*, Wi-Fi e WiMAX, tem servido de motivação para impulsionar as pesquisas na busca por dispositivos mais leves, compactos e de custo reduzido, como é o caso das antenas planares em microfita. A construção de antenas com estas características, possivelmente sem perdas de desempenho, ainda é um desafio aos pesquisadores. Este artigo aborda o conceito de fractal e como ele pode ser usado para reduzir o tamanho de antenas em microfita ou para se obter respostas em frequência multibanda.

Em particular, uma análise sobre a miniaturização de antenas *patch* com contorno fractal triangular através da curva de Koch é investigado pela primeira vez. A seção 2 apresenta um estudo a respeito de antenas em microfita, a qual é a estrutura geradora das antenas fractais propostas. A geometria fractal utilizada neste trabalho é descrita na seção 3, situando-a no contexto histórico e descrevendo as suas propriedades e o mecanismo de geração da curva de Koch. A estrutura da antena proposta e o processo de construção dessas estruturas são apresentados nas seções 4 e 5 respectivamente. Na seção 6 apresentam-se os resultados das simulações e medições realizadas para os protótipos construídos. Por fim a seção 7 apresenta as conclusões finais desse trabalho.

## 2. ANTENA *PATCH* RETANGULAR EM MICROFITA

Inicialmente proposta por Deschamps et al. (1953), antenas em microfita têm-se tornado bastante popular devido principalmente à facilidade com que é construída e ao baixo custo de fabricação, associado a sua capacidade de integração com outros circuitos e módulos multicamada. Conforme ilustra a Figura 1, uma antena *patch* em microfita consiste basicamente de duas placas condutoras, paralelas, separadas por um substrato dielétrico, sendo uma das placas o elemento irradiante (*patch*) e a outra o plano de terra.

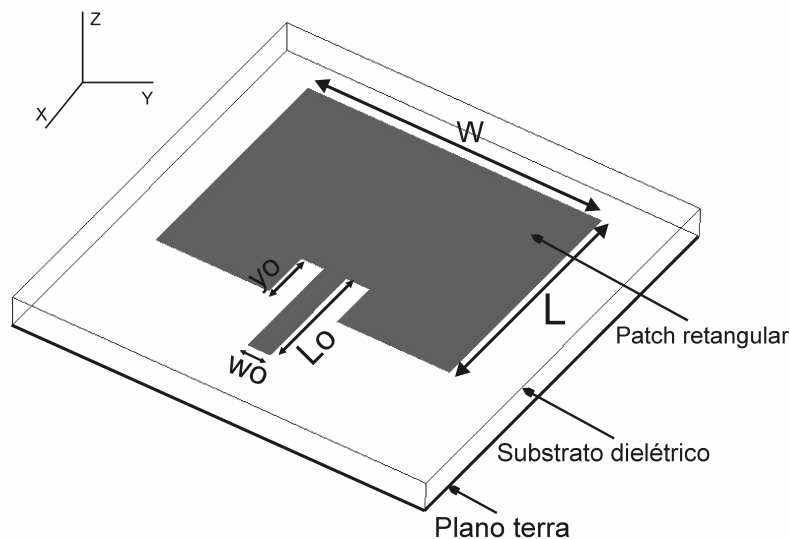


Figura 1 – Antena construída em microfita do tipo *patch* retangular

Em geral o elemento *patch* alimentado por meio de uma linha de microfita é feito de cobre, podendo assumir várias formas geométricas, contudo as de uso mais comum são as formas retangular e circular. Além de apresentar baixo custo de fabricação e dimensões reduzidas, como citado anteriormente, inúmeras são as vantagens de uma antena em microfita em relação a outras antenas para a faixa de microondas, tais como:

- Compatibilidade com sistemas embarcados, a exemplo os aparelhos celulares, *paggers*, entre outros.
- Antenas em microfita podem se ajustar a superfícies onduladas, o que torna possível aplicação em fuselagens de aviões e mísseis.

- A faixa de frequências de operação das antenas em microfita se estende aproximadamente de 100 MHz a 50 GHz e apresentam ganho chegando a aproximadamente 6 dB, além de apresentarem largura de feixe entre 70 e 90 graus.
- Perfil planar baixo e conformidade a vários tipos de estruturas.
- Suporte a polarização circular e linear.
- Facilidade de conexão a circuitos integrados de microondas.

Porém existem ainda algumas desvantagens com relação às antenas em microfita, são elas:

- Largura de banda estreita.
- Baixa eficiência.
- Baixo ganho.
- Irradiação externa nas linhas e junções.
- Baixa capacidade de manejo de potência.
- Excitação de ondas de superfície.
- São suscetíveis a alterações climáticas.

### 3. GEOMETRIA FRACTAL

O conceito de fractal como uma nova geometria data do século passado, sendo introduzido em 1982 pelo matemático polonês Benoit Mandelbrot. O termo fractal refere-se a objetos construídos recursivamente, onde um aspecto do objeto limite é infinito e outro é finito, e onde em qualquer interação, algum pedaço do objeto é uma versão em escala reduzida do objeto na iteração anterior. Puente et al. (1998) e Cohen et al. (1997) foram os pioneiros nos estudos e desenvolvimento de antenas com elementos fractais, reduzindo as dimensões da antena sem, no entanto degenerar seu desempenho. Diferente da geometria Euclidiana, a geometria fractal apresenta duas propriedades comuns que a caracteriza, são elas: o preenchimento do espaço e a auto-similaridade. A propriedade de auto-similaridade pode ser usada para projetar antenas fractais multibanda, por sua vez, a propriedade de preenchimento do espaço, é responsável pela miniaturização das dimensões da antena.

A dimensão fractal é um parâmetro importante de um fractal. De acordo com a propriedade de auto-similaridade, a dimensão fractal ou dimensão auto-similar é definida por:

$$D = \frac{\log(N)}{\log(r)} \quad [\text{Eq. 01}]$$

em que,  $N$  é o número total de cópias distintas do elemento original e  $r$  é o fator de escala de redução.

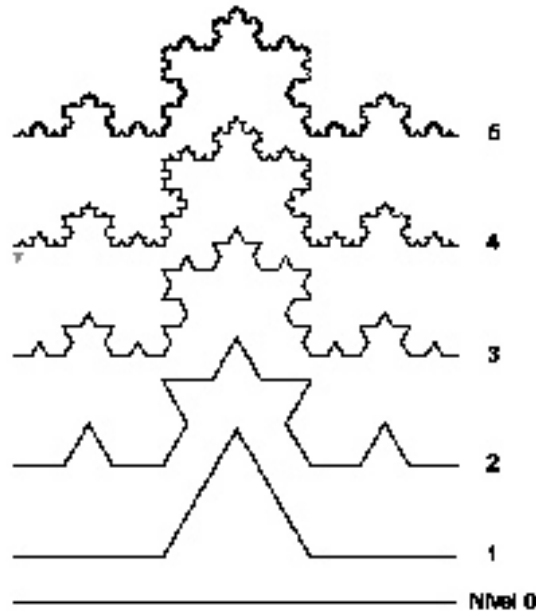
A geometria fractal utilizada neste trabalho para o projeto e construção das antenas foi a curva de Koch, designação dada em homenagem ao pesquisador Helge Von Koch, quem primeiro estudou este fractal. Conforme ilustra a Figura 2, a obtenção da curva de Koch se dá através da aplicação infinita de um processo iterativo a uma figura inicial (nível 0), neste caso um segmento de reta.

Inicialmente tem-se um segmento de reta que representa o nível zero da curva de Koch. Dividindo esse segmento em três partes iguais e substituindo o segmento intermediário por um triângulo sem a base, obtém-se o nível 1 desta curva. O passo seguinte, consiste em subdividir cada segmento da curva de Koch em três partes iguais e substituir cada segmento intermediário por um triângulo sem a base, obtendo-se assim o nível 2. Este processo iterativo se repete para a obtenção dos demais níveis.

### 4. ESTRUTURA DA ANTENA PROPOSTA

No projeto das antenas fractal de Koch com contorno triangular, o passo inicial consistiu em um projeto de uma antena *patch* retangular convencional conforme os procedimentos descritos em (BALANIS, 1997) para

a frequência de operação 2,45 GHz. As dimensões iniciais (L, W) de uma antena *patch* retangular foram calculadas através das expressões analíticas, [Eq. 02] - [Eq. 05].



**Figura 2 – Processo iterativo de geração da curva fractal de Koch**

$$W = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad [\text{Eq. 02}]$$

$$\epsilon_{\text{reff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[ 1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2} \quad [\text{Eq. 03}]$$

$$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(\epsilon_{\text{reff}} + 0.300) \left( \frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{\text{reff}} - 0.258) \left( \frac{W}{h} + 0.813 \right)} \quad [\text{Eq. 04}]$$

$$L = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_r}} - 2\Delta L \quad [\text{Eq. 05}]$$

em que,  $f_r$  é a frequência de ressonância,  $c$  é a velocidade da luz,  $\epsilon_r$  é permissividade relativa,  $\epsilon_{\text{reff}}$  é permissividade efetiva relativa,  $h$  é a espessura do substrato,  $\Delta L$  é o comprimento *fringe*,  $W$  é a largura do *patch*,  $L$  é o comprimento da antena *patch*. A geometria desta antena (ver Figura 1) serviu como geradora das antenas fractais propostas. 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 fórmulas aproximadas [Eq. 06] - [Eq. 07].

$$y_0 = \frac{L}{\pi} \arccos \left( \sqrt{\frac{50}{R_{\text{in}}(0)}} \right) \quad [\text{Eq. 06}]$$

$$R_{\text{in}}(0) = \frac{1}{2(G_1 \pm G_{12})} \quad [\text{Eq. 07}]$$

em que,  $R_{\text{in}}(0)$  é a resistência de entrada na frequência de ressonância,  $G_1$  é a condutância na abertura radiante,  $G_{12}$  é a condutância mútua entre os *slots* de radiação.

A Figura 3 apresenta a geometria das antenas com contornos fractais propostas e as respectivas dimensões físicas (em mm) associadas. A partir da antena geradora do tipo *patch* retangular, designada como nível zero, as antenas fractais propostas foram elaboradas aplicando a curva de Koch ao contorno da antena *patch* nível 0, obtendo dessa maneira as antenas *patches* fractal Koch triangular de níveis 1 e 2 respectivamente. Pode-se observar que o contorno fractal foi aplicado em apenas três dos quatro lados da antena *patch* nível 0. O lado que não contém contorno fractal é justamente utilizado para realizar a alimentação através de uma linha de microfita e conector. A fim de se evitar reflexões indesejáveis, o casamento de impedâncias entre a linha de microfita e o *patch* foi alcançado com o uso de duas fendas no *patch*, cada uma com a largura da linha de alimentação. O comprimento  $y_0$  destas fendas, parâmetro geométrico associado ao casamento de impedâncias, foi otimizado por meio de simulações precisas das antenas propostas com o *software* Ansoft Designer<sup>TM</sup>.

## 5. FABRICAÇÃO DAS ANTENAS

As antenas *patches* foram construídas com substrato FR4 (fibra de vidro) revestida com duas camadas finas de cobre em face dupla, cuja permissividade elétrica relativa é igual a 4.4 e cuja espessura vale 1.5mm. As dimensões do *patch* retangular de nível 0 valem  $W = 29.094\text{ mm}$  e  $L = 37.2343\text{ mm}$ . As antenas foram simuladas através do método dos momentos implementado no Ansoft Designer<sup>TM</sup>. As medições de seus parâmetros elétricos foram realizadas com um analisador de redes vetorial HP8757D. O processo de fabricação de cada antena envolveu quatro etapas (ver Figura 4): (i) elaboração precisa do leiaute com auxílio de um *software* de CAD (neste caso usou-se o CorelDraw<sup>TM</sup>); (ii) preparação da placa de FR4 e confecção de máscara adesiva com os respectivos leiautes de impressão; (iii) corrosão das faces de cobre, descobertas pela máscara de impressão, por imersão da placa de FR4 em solução de percloroeto de ferro; (iv) instalação e soldagem dos conectores.

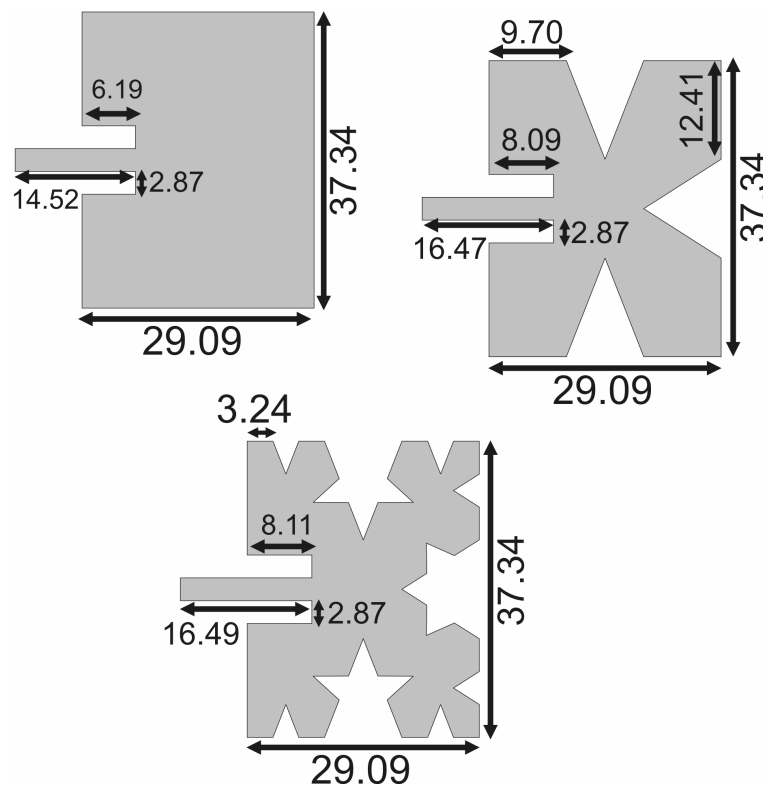


Figura 3 – Geometria das antenas *patch* propostas com contornos fractais de níveis 0, 1 e 2

## 6. RESULTADOS SIMULADOS E EXPERIMENTAIS

Os primeiros resultados obtidos foram simulados no *software* Ansoft Designer<sup>TM</sup> baseado no método dos momentos para análise das estruturas modeladas. A Figura 5 ilustra os resultados obtidos para a perda de retorno das três antenas mostradas anteriormente (ver Figura 3). Estes resultados são resumidos na Tabela 1.

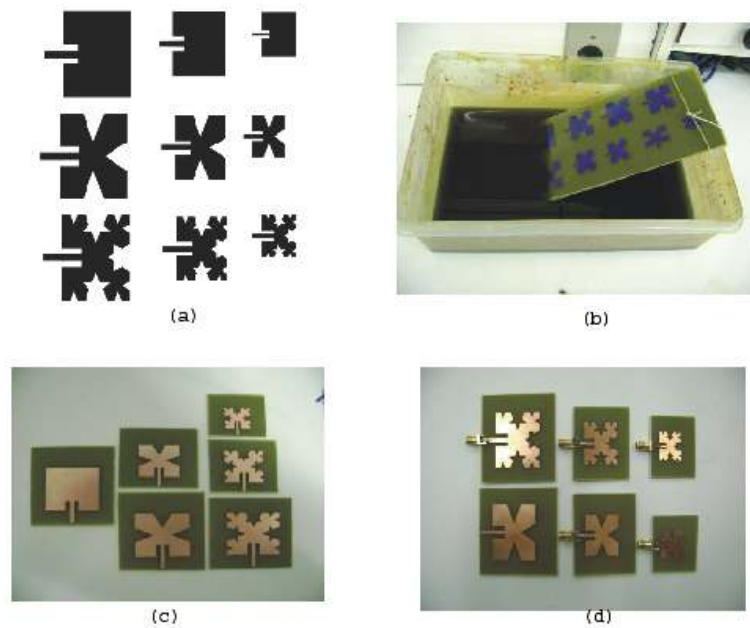


Figura 4 – (a) Leiautes das máscaras de impressão das antenas *patch* projetadas. (b) Imagem da placa de FR4 durante a imersão em solução corrosiva. (c) Imagem das antenas após a corrosão e o corte. (d) Imagem das antenas *patch* com contornos fractais após a instalação dos conectores

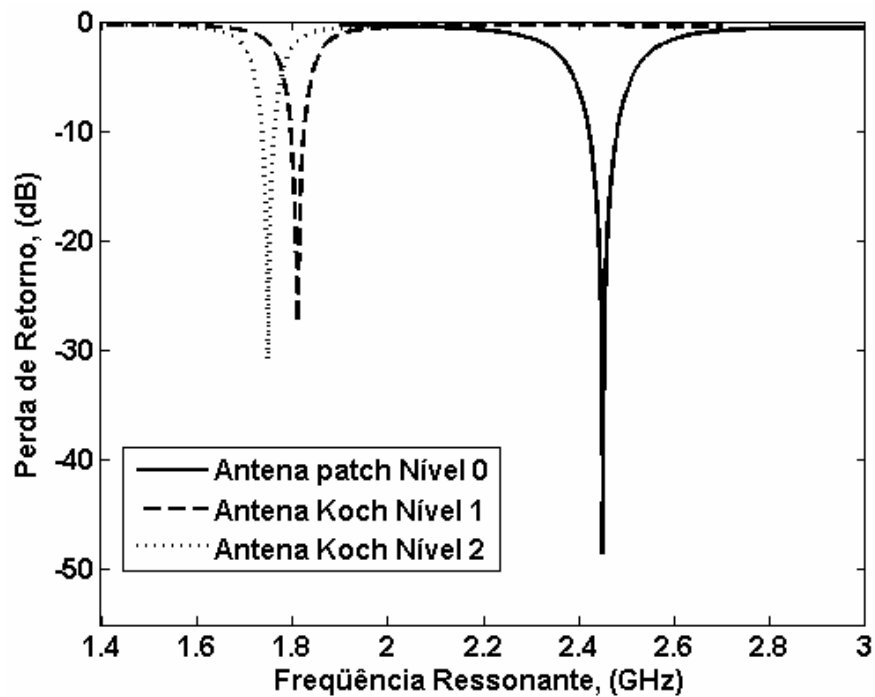


Figura 5 – Resultados simulados para a perda de retorno (dB) em função da frequência ressonante (GHz)

Tabela 1 – Resultados simulados para as antenas *patch* com contorno Koch triangular

	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	-27,5	-30,8
Fator de Compressão, (%)	—	26,1	28,6

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. Pode-se observar claramente o efeito que o contorno fractal causou ao ser aplicado ao projeto da antena *patch* retangular. A diminuição considerável na frequência de ressonância da antena *patch* Koch triangular nível 1 é responsável por uma miniaturização de até aproximadamente 26,1% no tamanho da antena do projeto original para atuar em uma frequência de 2.45 GHz. Por sua vez, a antena *patch* Koch triangular nível 2 apresentou uma frequência de ressonância ainda menor, o que caracteriza uma redução de aproximadamente 28.6% no tamanho da antena *patch* com o tamanho original de projeto. 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, o que é indesejável. A figura 6 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 triangular. 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. Com o resultado esboçado na curva, percebe-se claramente que para uma mesma frequência de ressonância a antena *patch* nível 2 apresentou as menores dimensões.

Após uma série de simulações os protótipos das respectivas antenas projetadas 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 ilustra uma comparação entre os resultados simulados e os resultados medidos para a antena *patch* nível 0, cujo resultado simulado é mostrado na Tabela 1. O resultado medido pelo analisador de rede apresentou uma frequência de ressonância de 2.46 GHz com uma perda de retorno de -33dB e uma largura de banda de 76 MHz. A Figura 8 ilustra uma comparação entre o resultado simulado e o resultado medido para a antena *patch* fractal nível 1. Novamente observa-se uma boa concordância entre o resultado simulado e medido. O resultado simulado é dado na Tabela 1, enquanto que o resultado medido apresentou uma frequência de ressonância de 1.84 GHz com uma perda de retorno de -42 dB e largura de banda de 36 MHz. A Figura 9 ilustra uma comparação entre o resultado simulado e o resultado medido para a antena *patch* fractal nível 2. Pode-se observar uma boa concordância entre o resultado simulado e medido. O resultado simulado é mostrado na Tabela 1 e o resultado medido apresentou uma frequência de ressonância de 1.78 GHz com uma perda de retorno de -53 dB e largura de banda de 29 MHz. Claramente se observa uma pequena diferença na largura de banda obtida e alguma discrepância com relação à perda de retorno entre os resultados obtidos.

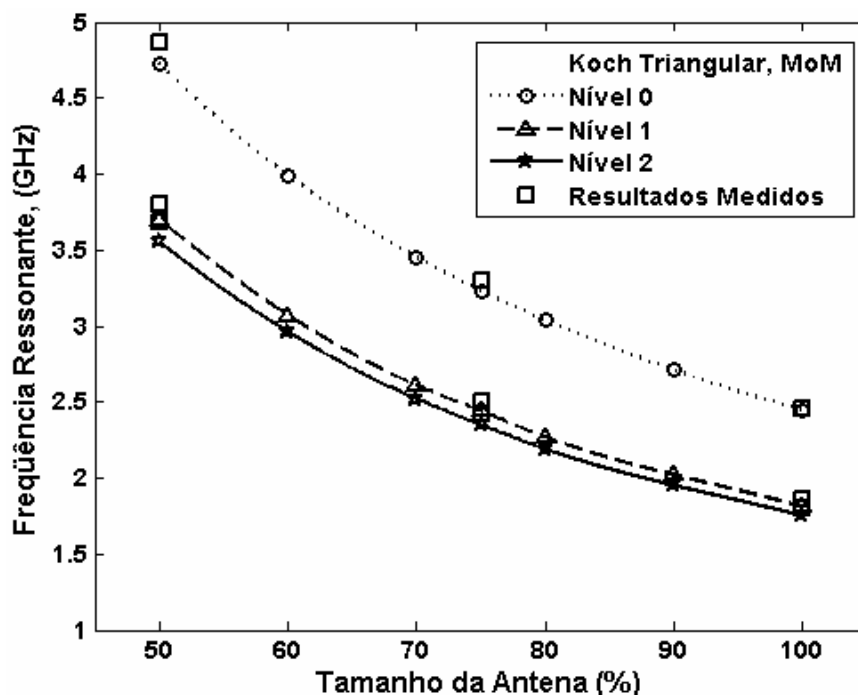


Figura 6 – Frequência ressonante em função do percentual de redução das antenas

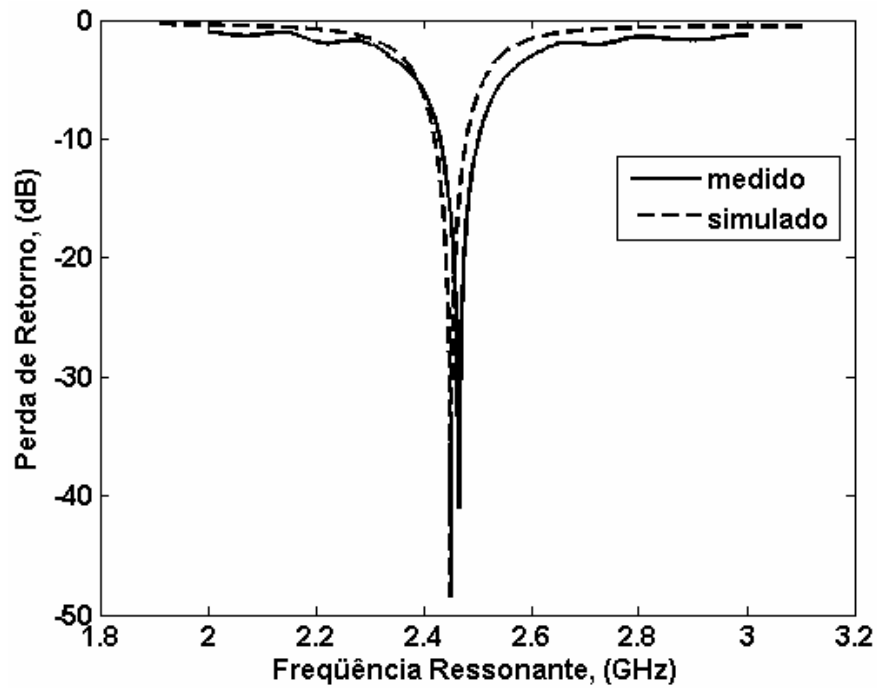


Figura 7 – Comparação entre os resultados de simulação e medido para a antena *patch* nível 0

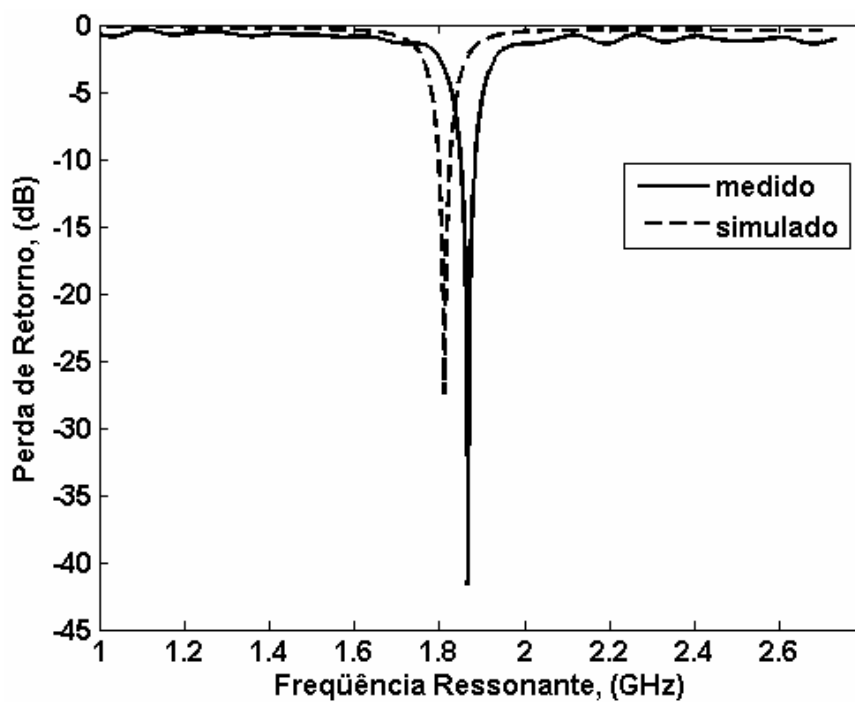


Figura 8 – Comparação entre os resultados de simulação e medido para a antena *patch* de nível 1

As Figuras 10 e 11 mostram respectivamente os resultados simulados do diagrama de radiação 3D e da distribuição de corrente na antena *patch* de nível 2. Observa-se um diagrama de radiação semelhante ao de uma antena *patch* retangular convencional, em que o máximo da radiação no campo distante ocorre na direção perpendicular ao elemento radiante (*broadside*).



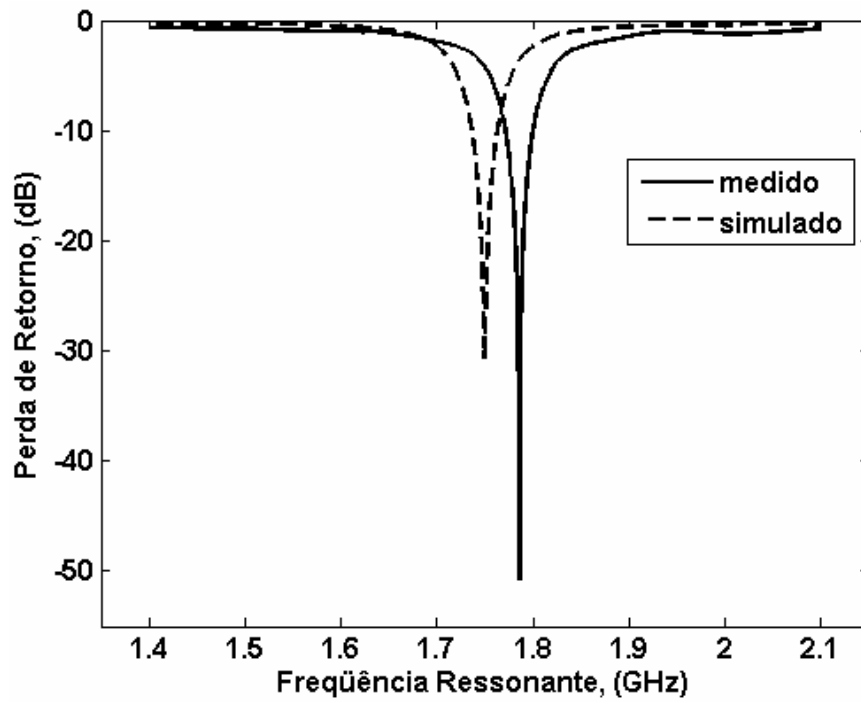


Figura 9 – Comparação entre os resultado de simulação e medido para a antena *patch* nível 2

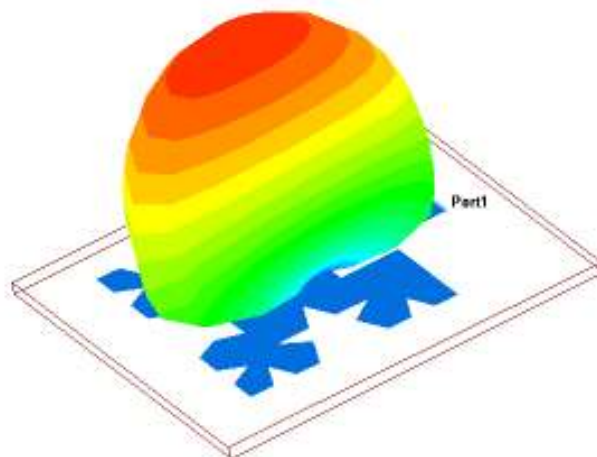


Figura 10 – Diagrama de radiação 3D de uma antena *patch* com contorno fractal de nível 2

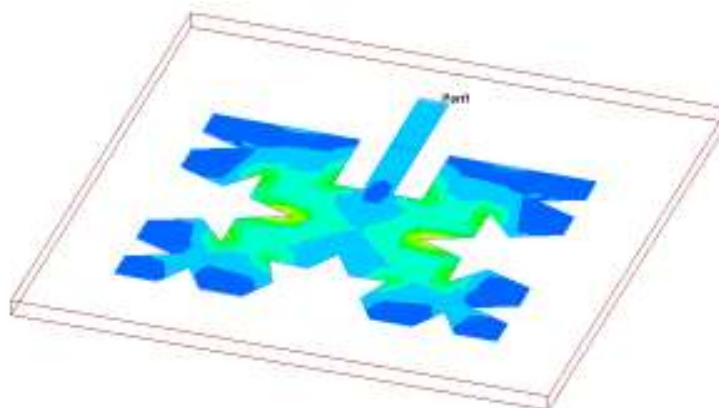


Figura 11 – Distribuição de corrente em uma antena *patch* com contorno fractal de nível 2

## 7. CONCLUSÃO

Este trabalho reuniu a tecnologia em microfita associada à geometria fractal para o projeto e construção dos protótipos de antenas planares para a faixa de microondas. A antena tipo *patch* com contornos fractais através da curva de Koch foi descrita pela primeira vez, mostrando-se bastante útil para a miniaturização de antenas em microfita, a consequência dessa miniaturização é em virtude das antenas com contornos fractais apresentarem um comprimento elétrico maior que o *patch* retangular, com isso apresentando uma frequência de ressonância menor. Por outro lado, a concordância obtida entre os resultados medidos e simulados aponta algumas características interessantes dessas antenas: facilidade de construção, ótimo casamento de impedâncias, verificado pela baixa perda de retorno obtida, também se constatou pouca degradação do diagrama de irradiação. Uma vez que as antenas fractais de níveis 1 e 2 projetadas com o contorno de Koch apresentaram frequências de ressonância inferiores em relação à antena *patch* retangular de nível 0, elas demonstraram uma capacidade de miniaturização de até 28,6% a área de uma antena *patch* retangular correspondente. Este fator de redução mostra que a antena *patch* com contornos fractais de Koch pode ser uma boa escolha para aplicações a dispositivos portáteis, que requerem antenas compactas, ou a sistemas *wireless* que necessitem de baixo perfil.

## REFERÊNCIAS

- BALANIS, C. A., **Antenna Theory-analysis and Design**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1997.
- COHEN, N. **Fractal Antenna Applications in Wireless Telecommunications**. Proceedings of Electronics Industries Forum of New England, p. 43-49, 1997.
- DESCHAMPS, G. A., **Microstrip Microwave Antennas**. In: III USAF Symposium on Antennas, 1953.
- HANSEN, R C. **Fundamental Limitations in Antennas**. Proceedings of IEEE, Vol. 69, No. 2, 1981.
- HARRINGTON, R. F. **Effect of antenna size on gain, bandwidth and efficiency**. J. Res. Nat. Bureau Standards-D, Radio Propagation, Vol. 64D, p. 1-12, 1960.
- LIEBENDORFER, M. and DERSCH, U. **Wireless LAN diversity antenna system for PCMCIA card integration**, IEEE Vehicle Technology Conference, p. 2022-2026, 1997.
- LO, T. K. HO, C. HWANG, Y. LAM E. and LEE, B. **Miniature aperture-coupled microstrip antenna of very high permittivity**. Electronic Letters, Vol.33, No. 1, p. 9-10, 1997.
- PUENTE, C. ROMEU, J. POUS, R. CARDAMA, A. **On the Behavior of the Sierpinski Multiband Fractal Antenna**. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 46, No. 4, p. 517-524, 1998.
- SZE, J. and WONG, L. **Slotted rectangular microstrip antenna for bandwidth enhancement**. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 48, p. 1149-52, 2000.
- TARCÍLIO, C.; RIBEIRO, M.; SILVA, P. Uma contribuição ao estudo de filtros e antenas de microondas usando os fractais de Sierpinski. In: II CONGRESSO DE PESQUISA E INOVAÇÃO DA REDE NORTE NORDESTE DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA, 1., 2007, João Pessoa. **Anais ...** João Pessoa: CEFET-PB. 1 CD-ROM.
- WATERHOUSE, R. B. **Small microstrip patch antenna**, Electronic Letters, Vol. 31, No 8, p. 604- 605, 1995.