

CARACTERIZAÇÃO DE ANTENAS FRACTAIS DE MINKOWSKI COM APLICAÇÕES PARA REDES SEM FIO

Paulo H. da F. SILVA (1); José I. A. TRINDADE (2); Elder E. OLIVEIRA (3)

(1) CEFET-PB/GTEMA, Av Primeiro de Maio, 720. Jaguaribe
CEP: 58015-430, João Pessoa – PB, telefone: 3208 3055, e-mail: henrique@cefetpb.edu.br

(2) UFRN, e-mail: jjat9@hotmail.com

(3) UFRN, e-mail: planckk@yahoo.com.br

RESUMO

Atualmente, as tecnologias de redes sem fio, tais como, Bluetooth, Wi-Fi e WiMAX, reduzem custos de infra-estrutura de comunicações e permite a mobilidade dos usuários dentro de sua área de cobertura. Estas tecnologias sem fio são cada vez mais utilizadas como solução para o problema da ‘última milha’ dos sistemas de comunicação em banda larga. As antenas desempenham um papel fundamental na fabricação de aparelhos de comunicação sem fio, que demandam antenas leves e compactas, com eficiência de irradiação e comportamento multibanda. Este artigo descreve a análise e o projeto de antenas fractais de Minkowski com aplicações para dispositivos de acesso a redes sem fio. A construção iterativa da curva fractal de Minkowski através do sistema L é descrita. As antenas *patch* de Minkowski foram construídas a partir de antenas *patch* retangular em microfita. O programa Ansoft DesignerTM foi utilizado para a análise das características eletromagnéticas das antenas fractais propostas. Os resultados obtidos foram usados para a miniaturização de antenas e para a obtenção de resposta em múltiplas frequências. Alguns protótipos destas antenas foram construídos e suas características geométricas e eletromagnéticas foram medidas a fim de se verificar os resultados teóricos obtidos através de simulação computacional.

Palavras-chave: redes sem fio, antenas *patch*, fractais, antenas fractais

1. INTRODUÇÃO

A Internet é a principal das tecnologias de informação e comunicação utilizada por mais de um bilhão de pessoas, representando cerca de 17% da população mundial. O fluxo de informações que trafega pela Internet é crescente, podendo em algum momento causar colapsos em partes deste aglomerado de redes. Estudos indicam que as estruturas centrais da Internet evoluirão de acordo com a demanda dos usuários, mas a infraestrutura de acesso não evolui na mesma velocidade, o que afetará algumas regiões do mundo a partir de 2010.

As tecnologias disponíveis para acesso a redes sem fio prometem reduzir os custos de infra-estrutura de comunicações, principalmente nas regiões afastadas dos grandes centros. As tecnologias Bluetooth, Wi-Fi e, mais recentemente, o WiMAX, são cada vez mais usadas para a transmissão de dados sem fio (via rádio). Recentemente, as redes sem fio (*wireless*) têm-se popularizado como uma solução alternativa para o problema da “última milha” nos sistemas de comunicação em banda larga. Por exemplo, a tecnologia WiMAX surge como uma evolução dos sistemas Wi-Fi com promessas de cobertura de 8 a 10 Km para distribuição e de até 50 Km para *backhaul*, conforme o padrão IEEE 802.16, em 75 Mbps.

Em particular, a tecnologia *wireless* permite maior flexibilidade aos provedores de acesso à Internet sem fio em uma região bastante abrangente, sem a necessidade de utilização de fios ou cabos. Cada cliente deve possuir uma antena receptora ligada a uma placa de rede sem-fio em seu computador, localizado na área de cobertura da estação rádio base do provedor de Internet.

Neste contexto, não há dúvidas que as antenas desempenham um papel fundamental na fabricação de aparelhos de comunicação portáteis para o uso destas tecnologias. Os dispositivos sem fio modernos demandam por antenas compactas, que apresentem boa eficiência de irradiação e comportamento multibanda. Na linha de pesquisa de antenas compactas/multibanda, este artigo descreve a análise e o projeto de um novo tipo de antena *patch* fractal com aplicações para dispositivos de redes de acesso em telecomunicações: a antena fractal de Minkowski. Esta antena é construída a partir da antena *patch* retangular em microfita (ver Figura 1).

A seção 2 apresenta uma concisa descrição de antenas tipo *patch*, suas vantagens e desvantagens relacionadas a este trabalho. A geometria fractal da curva de Minkowski é abordada na seção 3. O método iterativo de construção da curva fractal de Minkowski (ou curva de Koch quadrática), conhecido como sistema L, também é descrito. A construção das antenas fractais de Minkowski é tratada na seção 4. A seção 5 apresenta os resultados obtidos para a miniaturização de antenas. Os resultados de um protótipo construído para aplicação a dispositivos de redes sem fio são apresentados. A seção 6 traz as conclusões deste trabalho.

2. ANTENAS PATCH

Freqüentemente denominadas como antenas *patch*, uma antena em microfita consiste de uma fina camada metálica, que atua como *patch* radiador, separada do plano terra por uma camada de substrato dielétrico. O *patch* condutor, normalmente feito de cobre, pode assumir qualquer forma geométrica, porém, as formas retangular e circular são as mais utilizadas, por apresentarem geometrias simples e modelos empíricos para análise aproximada (BHARTIA et al., 2001). Sua alimentação pode ser feita de várias formas, sendo as mais comuns por probe coaxial, linha de microfita e acoplamento eletromagnético (BALANIS, 1997).

Apesar das antenas em microfita terem surgido há mais de meio século, elas só começaram a ganhar atenção na década de 70, quando o desenvolvimento foi acelerado devido à disponibilidade de substratos com baixas perdas, propriedades térmicas e mecânicas atrativas, de técnicas de fotolitografia melhoradas e de melhores modelos teóricos. Na Figura 1 apresentamos uma ilustração da geometria de uma antena *patch* retangular com alimentação por linha de microfita.

As antenas em microfita possuem várias vantagens quando comparadas às antenas de microondas convencionais. Algumas vantagens importantes para este trabalho são: peso reduzido, pequeno volume, baixo-perfil, baixo custo de fabricação, viabilizando a produção em larga escala. Contudo, as antenas em microfita também possuem algumas limitações em relação às outras antenas: largura de banda estreita e baixo ganho. Isto reduz a tolerância a erros associados ao processo de fabricação das antenas. Por outro, a maioria das antenas em microfita irradia em meio plano na direção *broadside* (direção z, ver Figura 1). Em algumas aplicações esta característica pode se tornar uma limitação, em outras ela é desejável.

As antenas *patch* em microfita são empregadas em grande escala nas comunicações sem fio. Estas antenas são integradas diretamente nos equipamentos de comunicação, são mais confiáveis e possuem um custo de instalação muito menor. Tendo sido proposta por Deschamps (1953), ainda hoje é extremamente importante o desenvolvimento de estudos a respeito das antenas em microfita, tendo em vista sua importância para os sistemas de comunicações sem fio.

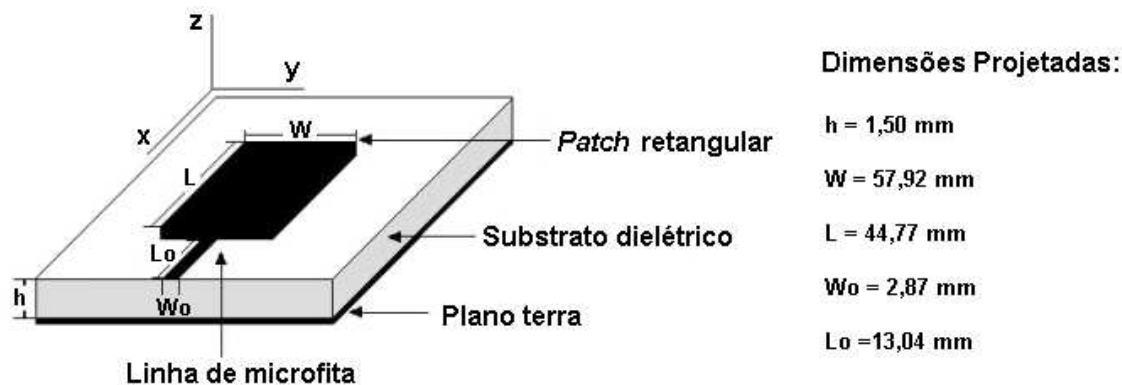


Figura 1 – Antena *patch* retangular com alimentação por linha de microfita

3. FRACTAIS – A CURVA DE MINKOWSKI

3.1. Introdução

O termo fractal foi introduzido em 1975 por Benoit Mandelbrot, matemático polonês que difundiu amplamente a geometria fractal. Os fractais são formas geométricas abstratas de uma beleza incrível. São imagens de objetos imaginários, pois possuem o caráter de ubiquidade – com as características do todo infinitamente multiplicadas dentro de cada parte – escapando assim, da compreensão em sua totalidade pela mente humana. Os fractais possuem padrões que se repetem infinitamente, mesmo limitados a uma área finita. Algumas características dos fractais os destacam de outras geometrias, tais como (FALCONER, 2003):

Auto-similaridade – É a simetria através das escalas. Um objeto possui auto-similaridade quando possui o mesmo aspecto em qualquer escala de observação. Ou seja, cada porção fractal pode ser vista como uma réplica reduzida do todo. Esta característica pode ser vista nas curvas de Minkowski (ver Figura 2).

Complexidade infinita – Nunca conseguiremos representar os fractais completamente. Mesmo após sucessivas ampliações, sempre existirão detalhes cada vez menores.

Dimensão fractal – A dimensão fractal representa o grau da ocupação de um objeto ou figura no espaço, relacionando-se assim com o seu grau de irregularidade.

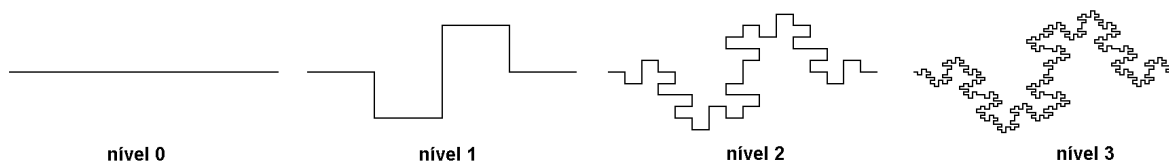


Figura 2 – Curvas fractais de Minkowski

3.2. Sistema L – fractais gerados por cadeia de caracteres

Dentre os métodos usados para a geração e visualização de objetos ou figuras fractais, poucos são tão compactos e elegantes como o “Sistema L”. A letra “L” refere-se a Aristid Lindenmeyer, um biólogo alemão, que introduziu o conceito de autômatos celulares na descrição dos processos de crescimento de organismos celulares. Do ponto de vista matemático, um autômato é uma estrutura que evolui por si mesma, a partir de uma matriz, obedecendo a um conjunto de regras pré-estabelecidas, que determina em uma proliferação como uma célula matriz é substituída por um outro conjunto de células. Cada proliferação é originada aplicando-se as regras formativas a cada célula da proliferação anterior até que se atinja um limite previamente estabelecido (número de iterações). Portanto, um autômato consiste de três elementos: uma matriz, um conjunto de regras formativas e um limite de evolução.

Para a construção de fractais, as células são substituídas por elementos gráficos, representados por letras do alfabeto. As regras formativas são representadas por cadeias de caracteres. Essas cadeias vão armazenar as transformações necessárias para a construção do fractal. A geração/visualização do fractal é feita através da leitura da cadeia de caracteres, transformando cada caractere em um comando gráfico. Na formação da cadeia de caracteres, a seguinte convenção é usada:

- Os segmentos são denotados por letras maiúsculas do alfabeto;
- Um incremento no ângulo, denotado por (+), indica uma mudança de direção no sentido horário;
- Um decremento no ângulo, denotado por (-), indica uma mudança de direção no sentido anti-horário.

Na construção da curva de Minkowski utilizando o Sistema L, um segmento de reta representa a célula matriz, denotada pela letra maiúscula “K”. Considerando um fator de iteração igual a 1/4, este segmento é dividido em quatro partes iguais. Em seguida, uma curva poligonal é formada substituindo os dois segmentos centrais por dois quadrados, um sem a base e outro sem o topo, respectivamente (ver Figura 2). Portanto, a regra de formação da curva de Minkowski é representada no sistema L através da cadeia de caracteres:

“K-K+K+KK-K-K+K”, onde “K” é um segmento e os sinais “+” e “-” indicam rotação de $\pm\pi/2$ rad.

4. ANTENAS FRACTAIS DE MINKOWSKI

O conceito de fractal pode ser usado, por exemplo, para reduzir o tamanho da antena e para o projeto de antenas multibanda ou banda larga. Estas propriedades das antenas fractais estão relacionadas à auto-similaridade dos fractais. As primeiras antenas fractais foram inventadas por Cohen (1995) e Puente et al. (1995). Desde então diversas geometrias fractais têm sido utilizadas em projetos de antenas, tais como: o triângulo de Sierpinski (PUENTE et al., 1998), a curva de Koch (GIANVITTORIO e SAMII, 2002) e a curva de Minkowski (COHEN e HOHFELD, 1996).

Neste trabalho, a antena em microfita consiste de um elemento *patch* montado sobre uma camada dielétrica isotrópica sobre um plano terra. O substrato dielétrico usado (FR-4, fibra de vidro) tem uma espessura de 1,5 mm, permissividade elétrica relativa de 4,4 e tangente de perdas igual a 0,02. Um cabo coaxial conecta a linha de microfita via um conector SMA. Apesar de não ser bem adequado para as frequências de microondas acima de 2 GHz, o substrato FR-4 foi usado neste estudo preliminar devido ao seu baixo custo.

A estrutura da antena fractal proposta é obtida a partir da aplicação de contornos fractais de Minkowski aos três lados vizinhos à porta de entrada da antena *patch* retangular (ver Figura 3). A curva de Minkowski pode ser caracterizada por dois fatores: o fator de iteração e o número de iterações. Quando o número de iterações vale zero, nenhuma iteração fractal foi efetuada, e nós temos a figura geradora, neste caso um *patch* retangular, de comprimento L e largura W, que corresponde à antena fractal de nível 0.

Inicialmente, uma antena *patch* retangular foi projetada para a frequência de 1,575 GHz. As dimensões iniciais desta antena foram obtidas através de modelos empíricos (BARTHIA et al., 2001; BALANIS, 1997). Em seguida, o Ansoft DesignerTM foi utilizado para o ajuste fino das dimensões do elemento radiante para sintonizar a frequência de ressonância desejada. As dimensões finais da antena *patch* retangular estão indicadas na Figura 3(a). Posteriormente foram aplicados os contornos fractais de Minkowski até o nível 3. As dimensões das antenas de Minkowski de níveis 1, 2 e 3, são indicadas na Figura 3(b), 3(c) e 3(d), respectivamente.

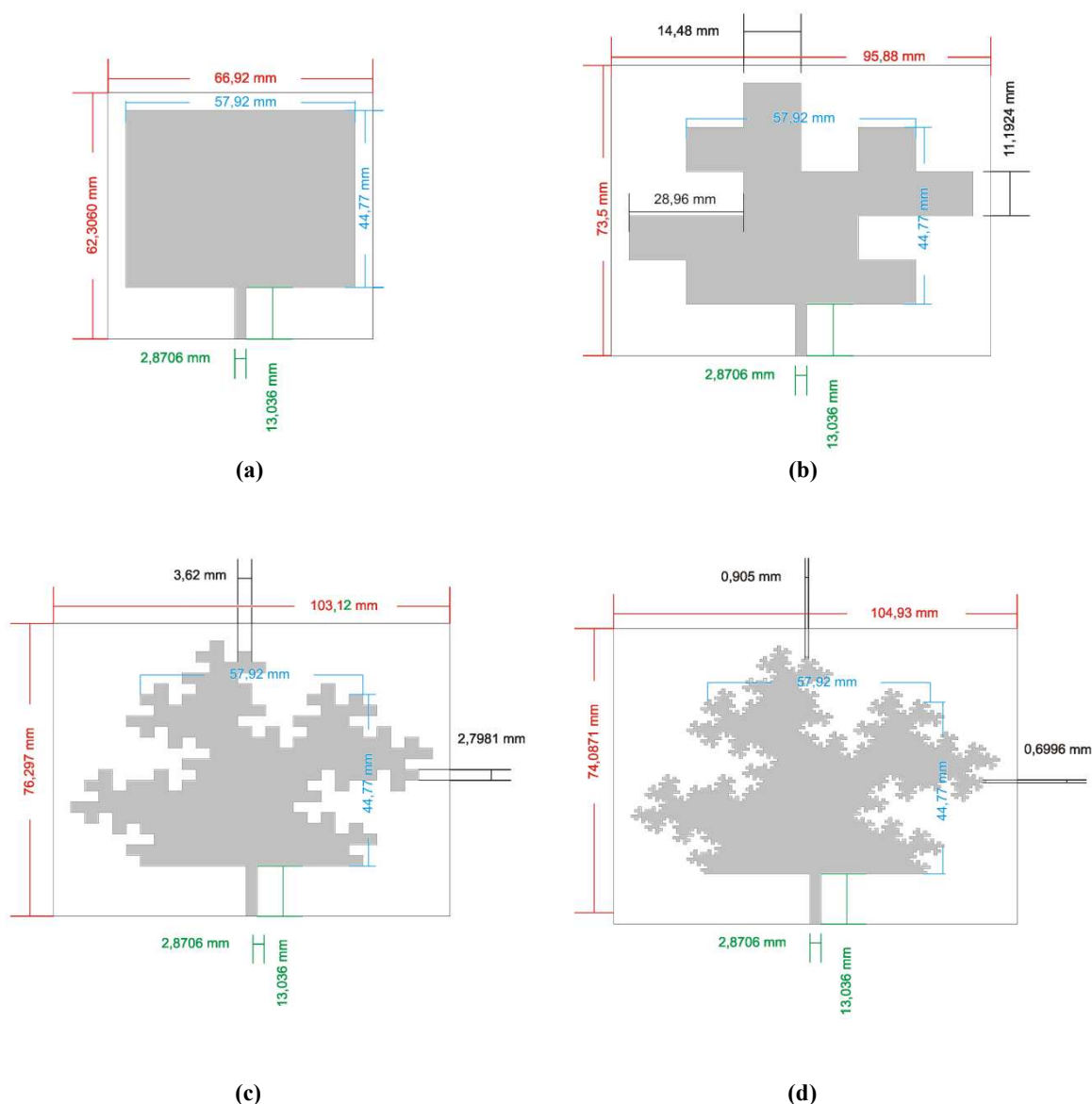


Figura 3 – Dimensões dos protótipos das antenas de Minkowski construídas: (a) nível 0, *patch* retangular projetado para 1,575 GHz; (b) nível 1; (c) nível 2; (d) nível 3

5. CARACTERIZAÇÃO DAS ANTENAS DE MINKOWSKI

No projeto das antenas fractais de Minkowski, algumas ferramentas de CAD (*Computer Aided Design*) foram utilizadas. Em particular, a caracterização das antenas foi auxiliada pela ferramenta de análise Ansoft DesignerTM, que programa o método dos momentos. Para desenhar os leiautes das antenas propostas usamos os programas Autocad e CorelDraw. O programa Matlab auxiliou no projeto da antena *patch* retangular, bem como, na apresentação gráfica dos resultados obtidos. Para a medição das antenas foi utilizado um analisador de redes vetorial modelo HP8757D.

A fim de validar a metodologia usada, os protótipos das antenas ilustradas na Figura 3 foram construídos e medidos. Então, os resultados medidos e simulados das antenas *patch* de Minkowski foram comparados. Por exemplo, na Figura 4 comparamos os resultados para a perda de retorno (dB) da antena geradora (*patch* retangular), com as dimensões indicadas na Figura 3(a). Observamos boa concordância para a primeira frequência de ressonância da antena *patch*: 1,57 GHz (simulado) e 1,58 GHz (medido). Contudo, com as dimensões obtidas a partir dos modelos empíricos (BARTHIA et al., 2001; BALANIS, 1997), a baixa perda de retorno verificada (-11,1 dB) (ver Figura 4) indica um casamento de impedâncias ruim entre a linha de microfita e o *patch* retangular nesta frequência. A Tabela 1 resume os resultados obtidos.

No total, a antena *patch* apresentou quatro ressonâncias na faixa de 0 – 4,5 GHz. Por definição, a largura de banda em torno de cada frequência ressonante é obtida a partir dos pontos em que a perda de retorno apresenta um valor inferior à -10 dB (ver Tabela 1). A maior largura de banda medida (160 MHz) foi obtida em torno da segunda frequência harmônica ($2 \times 1,575 = 3,15$ GHz), que corresponde a 3ª. ressonância da antena *patch* projetada. Em geral, os valores das frequências ressonantes medidas estiveram sempre acima dos valores simulados (ver Figura 4).

Tabela 1 – Resultados obtidos para a antena *patch* retangular

Frequências Ressonantes (GHz) RL (dB) < - 10,0	1ª.	2ª.	3ª.	4ª.
Valores Simulados	1,56 – 1,57	2,42 – 2,46	2,96 – 3,13	4,02 – 4,08
Valores Medidos	1,58	2,47 – 2,51	3,01 – 3,17	4,09 – 4,15

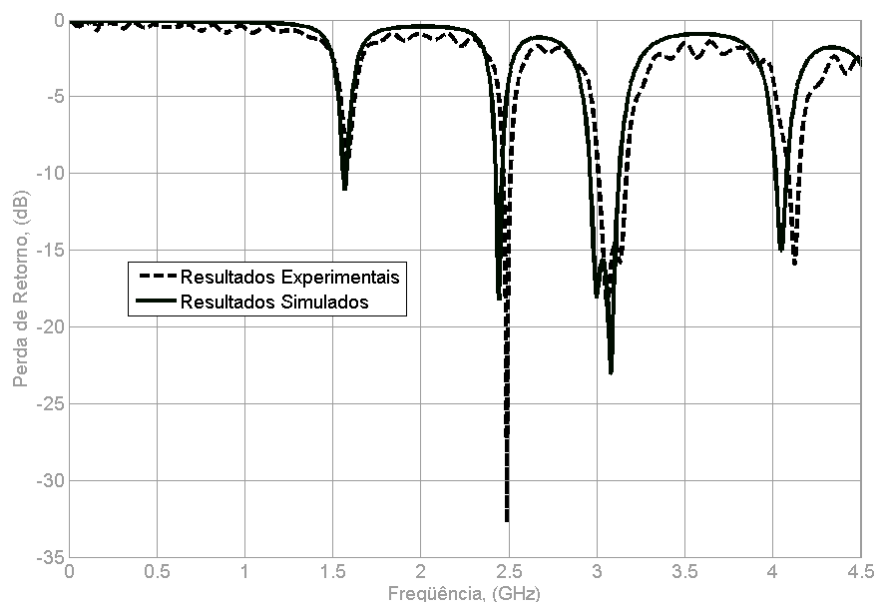
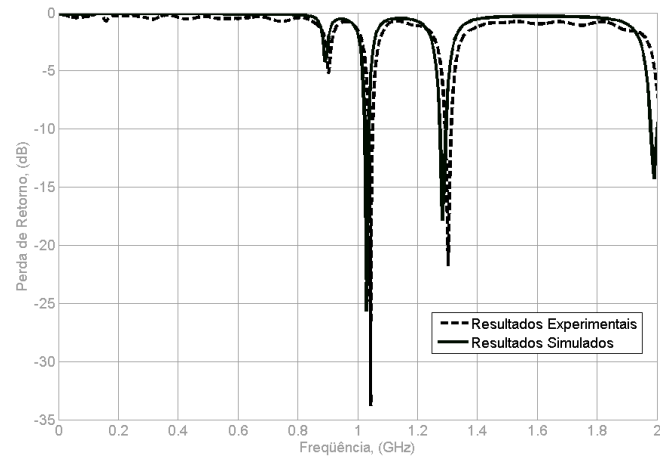


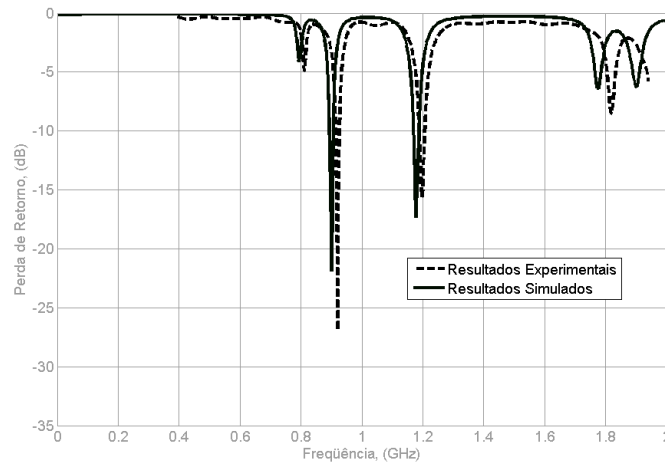
Figura 4 – Comparação entre os resultados medidos e simulados para a antena *patch* retangular em microfita projetada para a frequência de 1,575 GHz

Os resultados obtidos para as antenas fractais de Minkowski até o nível 3 são apresentados na Figura 5 para a faixa de frequências de 0 – 2 GHz. A partir destes resultados, observamos que as antenas de Minkowski apresentam as duas primeiras ressonâncias estreitas e bem próximas uma da outra. Por outro lado, conforme o número de iterações aumenta as frequências ressonantes diminuem. A Figura 5(a), 5(b) e 5(c) mostram os resultados para as antenas *patch* de Minkowski de níveis 1, 2 e 3, respectivamente. Os valores medidos são comparados com os simulados. Novamente, verificam-se os valores das frequências ressonantes medidas acima dos valores simulados, bem como, esta discordância aumenta conforme o nível da antena de Minkowski.

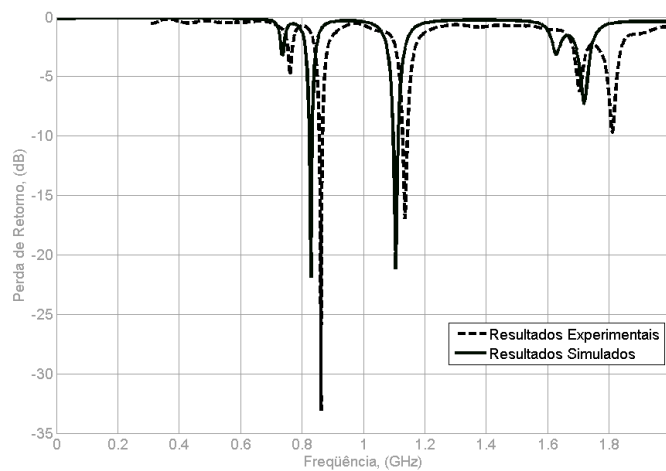
Em relação à antena de Minkowski de nível 0, cuja primeira frequência ressonante medida foi de 1,58 GHz, as antenas de nível 1, 2 e 3 apresentaram os seguintes fatores de compressão de frequência: 1,04 GHz (34,2%), 0,92 GHz (41,8%) e 0,86 GHz (45,6%). Apesar do bom casamento de impedâncias obtido na primeira frequência de ressonância, as antenas de nível 1, 2 e 3 apresentaram uma largura de banda estreita: 15 MHz, 13 MHz e 10 MHz, respectivamente.



(a)



(b)



(c)

Figura 5 – Comparação entre os resultados medidos e simulados para os protótipos de antenas de Minkowski: (a) nível 1; (b) nível 2; (c) nível 3

A obtenção destes bons resultados preliminares para as antenas *patch* de Minkowski motivou uma análise mais aprofundada sobre o comportamento em frequência destas antenas. Em particular, as antenas ilustradas na Figura 3 foram redimensionadas e suas áreas reduzidas em até 50%. A redução das dimensões de cada antena aumenta a sua frequência de ressonância. Os resultados obtidos desta análise estão reunidos na Figura 6. Pode-se constatar a capacidade de miniaturização das antenas de Minkowski propostas, atingindo até 45,6% para a antena de nível 3.

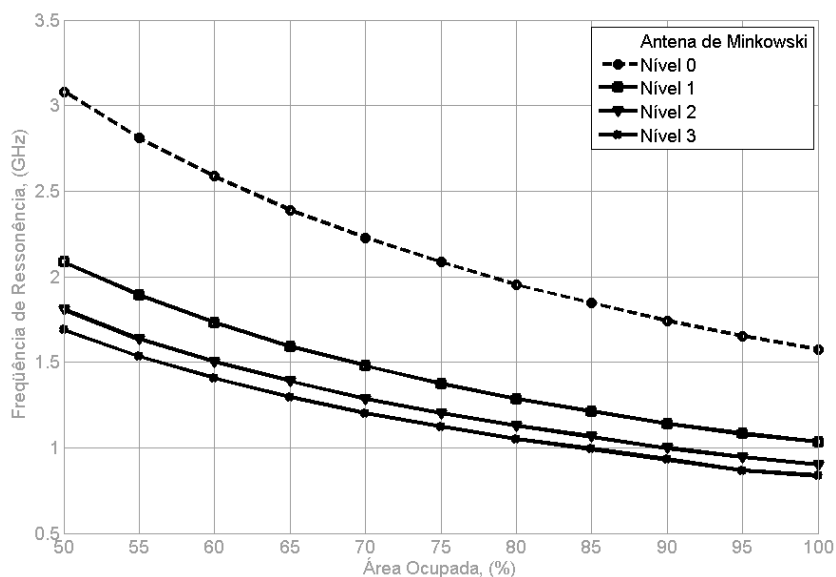


Figura 6 – Primeira frequência de ressonância das antenas de Minkowski de níveis 0, 1, 2 e 3 em função da área ocupada pela antena e do número de iterações fractais

Além da capacidade de miniaturização, outra característica interessante apresentada pelas antenas de Minkowski foi o seu comportamento multibanda. A capacidade de operar em várias faixas de frequências foi explorada no projeto de antenas para operar simultaneamente nas faixas de Wi-Fi e WiMAX. Neste caso, a antena de Minkowski de nível 3 foi utilizada. O leiaute do protótipo construído é mostrado na Figura 7. Os valores simulados da perda de retorno desta antena são mostrados no gráfico da Figura 8(a). A antena de Minkowski de nível três proposta apresentou múltiplas bandas de operação na faixa de 0 – 6 GHz. Além das duas primeiras ressonâncias estreitas e próximas em torno de 1 GHz, outras três faixas foram observadas. A Tabela 2 reúne os resultados medidos e simulados. Os valores das frequências ressonantes medidas foram maiores que os valores simulados. A perda de retorno medida é apresentada na Figura 8(b).

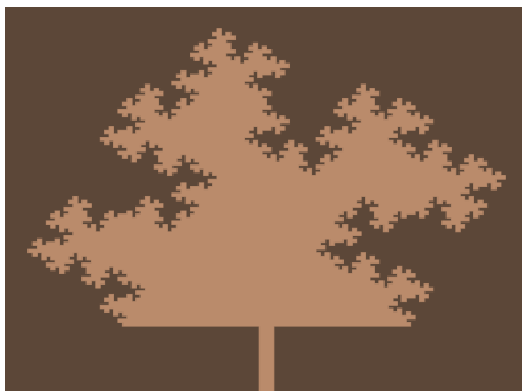
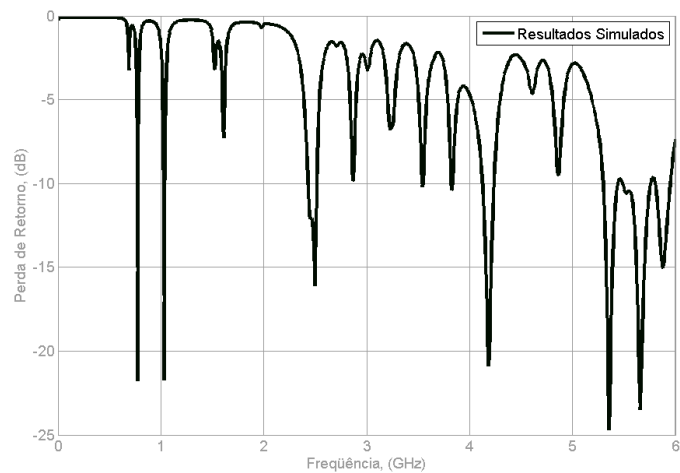


Figura 7 – Leiaute do protótipo construído da antena Minkowski de nível 3

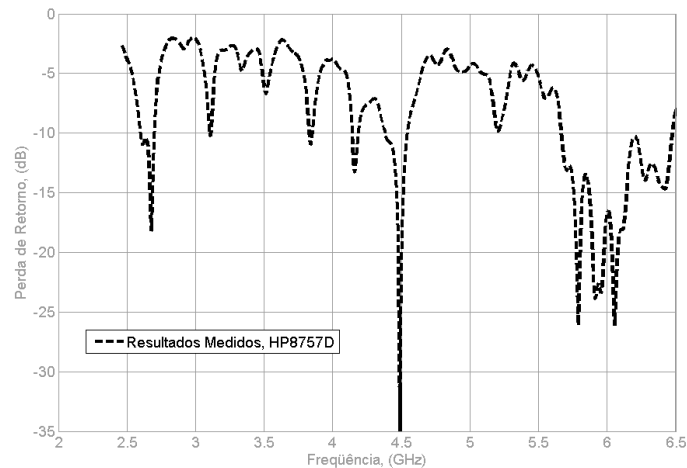
Apesar das diferenças encontradas entre os valores medidos e simulados, o protótipo construído da antena de Minkowski de nível 3 encontra aplicações para a faixa WiMAX 2,620–2,650(GHz) regulamentada pela Resolução Anatel n°. 429 (2006), bem como, para Wi-Fi no padrão IEEE 802.11a 5,725–5,875(GHz). Estas faixas de frequências são abrangidas pelas faixas de operação medidas (ver Tabela 2).

Tabela 2 – Resultados obtidos para a antena *patch* de Minkowski de nível 3

Frequências Ressonantes (GHz) RL (dB) < - 10,0	3 ^a .	4 ^a .	5 ^a .
Valores Simulados	2,43 – 2,52	4,12 – 4,24	5,30 – 5,90
Valores Medidos	2,60 – 2,70	4.38 – 4.54	5,66 – 6,48



(a)



(b)

**Figura 8 –Resultados obtidos para a antena de Minkowski de nível 3 proposta para aplicações Wi-Fi e WiMAX
(a) valores simulados; (b) valores medidos**

6. CONCLUSÕES

Neste artigo investigou-se pela primeira vez as características das antenas *patch* em microfita com contornos fractais de Minkowski. As antenas de Minkowski investigadas foram construídas a partir de uma antena *patch* retangular alimentada por uma linha de microfita. A aplicação dos contornos fractais aumentaram o perímetro do *patch* retangular original, bem como, seu comprimento elétrico, resultando uma redução na frequência de ressonância da antena. Este resultado foi utilizado para a construção de antenas mais compactas. Em relação à antena *patch* retangular e considerando uma mesma frequência de operação, a antena de Minkowski de nível 3 apresentou uma área total 45,6% menor. Além do alto fator de compressão de frequência, outra característica importante verificada para as antenas *patch* de Minkowski foi seu comportamento multibanda. A operação em múltiplas faixas de frequência foi explorada para o projeto de antenas com aplicações para redes sem fio. Um protótipo preliminar foi construído com aplicações para a faixa WiMAX 2,620–2,650(GHz) regulamentada pela Resolução Anatel nº. 429 (2006), bem como, para Wi-Fi no padrão IEEE 802.11a 5,725–5,875(GHz). Os estudos preliminares realizados para a caracterização das antenas *patch* de Minkowski mostraram resultados bastante promissores. Em trabalhos futuros, a fim aumentar a concordância entre os resultados medidos e simulados, pretende-se usar no projeto das antenas fractais de Minkowski um material dielétrico de melhor qualidade para a faixa de microondas.

REFERÊNCIAS

- BALANIS, C. A., **Antenna Theory-analysis and Design**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1997.
- BHARTIA, P., BAHL, I., and ITTIPIBOON, A., **Microstrip Antenna Design Handbook**. Artech House, 2001.
- COHEN, N., **The First Fractal Antenna**. Chicago: Fractal Antenna System, 1995.
- COHEN, N.; HOHFELD, R. G. **Fractal loops and the small loop approximation**. Communications Quarterly, v. 6, p. 77–81, 1996.
- DESCHAMPS, G. A., Microstrip Microwave Antennas. In: III USAF Symposium on Antennas, 1953.
- FALCONER, K. **Fractal geometry: mathematical foundations and application**. 2. ed. Londres: Wiley & Sons, Ltd., 2003. 337p.
- GIANVITTORIO, J. P.; SAMII, Y. R. **Fractal antennas: A novel miniaturization technique and applications**. IEEE Antenna's and Propagation Magazine, v. 44, n. 1, p. 20–36, fev. 2002.
- PUENTE, C. B.; ROMEU, J.; POUS, R.; GARCIA, X. **Antenas fractales o multifractales**. Universitat Politècnica de Catalunya. Oficina Española de Patentes y Marcas. Espanha n. P-9501019, mai. 1995.
- PUENTE, C. B.; ROMEU, J.; POUS, R.; CARDANA, A. **On the behavior of the Sierpinski multiband antenna**. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, v. 46, n. 4, p. 517-524, abr. 1998.
- RESOLUÇÃO ANATEL Nº 419/2006, 13/02/2006. Disponível em: <http://www.anatel.gov.br/biblioteca>. Acesso em: 17 abr 2008.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pelo Programa de Apoio Institucional à Pesquisa do CEFET-PB.