

# INVESTIGAÇÃO DO EFEITO DE INSERÇÃO DE GEOMETRIA FRACTAL DE KOCH NO PLANO DE TERRA DE ANTENAS DE MICROFITA

Nathan Bezerra Gurgel  
UFERSA  
Departamento de Engenharia e Tecnologia  
Mossoró, Brazil  
nathan.gurgel@ieee.org

Idalmir de Souza Queiroz Junior  
UFERSA  
Departamento de Engenharia e Tecnologia  
Mossoró, Brazil  
idalmir@ufersa.edu.br

**Resumo** — A proposta deste artigo é investigar o efeito da inserção de Fractal de Koch no plano de terra em antenas de microfita. A utilização de geometria fractal no patch da antena já é conhecida na literatura pela capacidade de miniaturização devido à possibilidade teórica de um aumento infinito do comprimento elétrico compactado à uma área finita, porém não há artigos apresentando o efeito da geometria quando inserida no plano de terra. Os resultados das simulações mostram que existe uma redução progressiva da frequência central de operação com o aumento da ordem de interação da antena, onde foi observado uma redução máxima 20,35%. A confecção e medição das antenas simuladas corroboraram com as simulações.

**Palavras chaves** — Antena de microfita, Fractal, Miniaturização

## I. INTRODUÇÃO

A otimização de dispositivos com capacidade de comunicação sem fio requer uma gestão ótima do tamanho de suas partes constituintes, o que torna componentes menores mais desejáveis. Devido ao seu baixo custo, tamanho compacto e baixo peso [1], antenas de microfita são o tipo mais interessante para esse tipo de aplicação, mesmo assim são uma das maiores peças em *smartphones*, como mostra a Figura 1. Para reduzir o tamanho da antena, pode ser usado materiais de alta constante dielétrica [1], mas devido ao custo e/ou integração com o sistema eletrônico de comunicação esse método não é aplicável [2]. De acordo com [3] para alcançar a miniaturização da antena, a geometria desta possui um papel importante. Existem diversas técnicas de miniaturização da estrutura física da antena na literatura como tocos de curto [4], otimização da geometria [5], estruturas de ondas lentas acopladas ao plano de terra [6], inserção de elementos indutivos nas laterais do *patch* [7] e removendo metal do *patch* [8].

Quanto a otimização da geometria, o modelo fractal foi estudado para antenas planares devido a sua característica particular de possuir perímetro infinito, consequentemente comprimento elétrico infinito [9] enquanto mantém uma área finita. Existem vários modelos de fractais em antenas de microfita como Mandelbrot, Sierpinski, Koch, Apollonius e outros modelos além de formas híbridas ou modificadas destas [2;7;10-25].

O *patch* modelado como um fractal apresenta efeito de miniaturização [2;10-13], ultra banda larga [14-15] e multibanda [16-17]. Além disso, utilizando a geometria fractal no plano é observado efeito de multibanda [18-20], polarização circular [21-23], aumento de ganho [24] e redução de acoplamento mútuo em *array* de antenas [25].

Este trabalho apresenta uma investigação do plano de terra truncado (PTT) baseado no floco de neve de Koch modificado, onde o tamanho do vértice do triângulo inicial do

fractal é dado por  $\lambda_0/N$  onde;  $\lambda_0$  é o comprimento de onda de uma onda eletromagnética no espaço livre para uma dada frequência;  $N$  é uma constante de compactação.

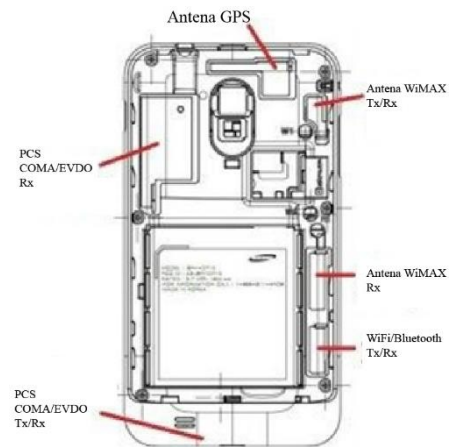


Fig. 1. Localização de antenas em um smartphone. Fonte: [26].

Para dar continuidade é necessário entender as características e projeto de uma antena de microfita.

## II. ANTENAS

A antena pode ser definida como um objeto capaz de radiar ou receber ondas de rádio, ou ainda mais, é o dispositivo de transição entre uma onda guiada e o espaço livre [1].

Existem diversos modelos de antenas, onde cada uma possui características mais apropriadas para determinadas aplicações. O padrão de radiação pode ser definido como a função matemática ou representação gráfica das propriedades de radiação [1]. Geralmente determinada no efeito de campo distante. Alguns parâmetros inerentes à performance da antena são a diretividade, densidade de potência, fase, polarização e eficiência. Além deste, a própria estrutura física da antena deve ser considerada na hora do projeto.

### A. Antenas de Microfita

Uma Antena de Microfita (AnM), ou antena impressa, em sua forma mais simples, é constituída de duas superfícies condutoras separadas por um dielétrico como mostra a Figura 2. A parte metálica superior e inferior é denotada por plaqueta (*patch*) e plano de terra, respectivamente. O dielétrico é constituído por material isolante com permissividade elétrica relativa entre 2,2 e 12 e baixa tangente de perdas para a faixa de microondas, além de uma altura  $h$  muito menor que o comprimento de onda no espaço livre  $\lambda_0$  da frequência de operação da antena ( $0.03\lambda_0 \leq h \leq 0.05\lambda_0$ ) [1]. O *patch* geralmente possui lados  $L$  com valores  $\lambda_0/3 < L < \lambda_0/2$ .

Algumas características das AnMs são: baixo peso, baixo custo, fácil integração com Circuito Integrados Monolíticos de Microondas (CIMM), fácil integração em superfícies planas e não-planas, baixo ganho e alta diretividade, além de possuir uma alta versatilidade. Esse modelo de antena é aplicado a uma variedade de projetos e faixas de frequência como mostra a Tabela 1.

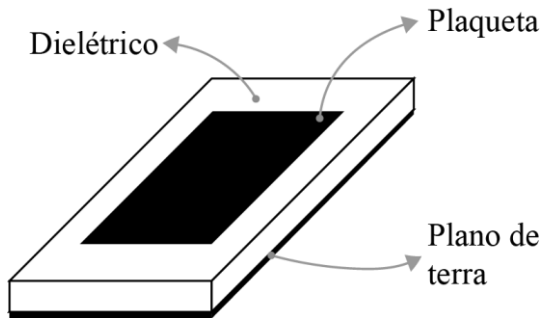


Fig. 2. Modelo simples de antena de microfita. Fonte: Autoria própria.

No projeto de AnM é escolhido dielétrico com permissividade relativa entre 2,2 e 12 sendo substratos com menor permissividade e maior altura mais desejáveis para projetos que é necessária uma boa performance da antena enquanto substratos de menor espessura e maior permissividade são úteis quando a antena está integrada a CIMM para evitar acoplamentos entre os constituintes [1].

Tabela 1. Faixa de frequência e aplicação para antenas de microfita\*.

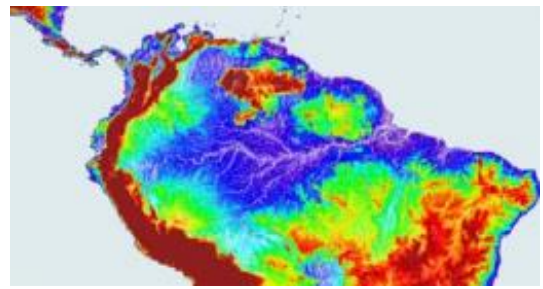
| Aplicações                        | Faixas de frequência       |
|-----------------------------------|----------------------------|
| GPS                               | 1,227-1,575 GHz            |
| Telefonia Celular                 | (0,82-0,85) (0,87-0,9) GHz |
| Sistema de comunicação pessoal    | (1,85-1,99) (2,18-2,2) GHz |
| Redes locais sem fio              | (2,4-2,48) (5,4-5,5) GHz   |
| Vídeo celular                     | 28 GHz                     |
| Satélite para radiodifusão direta | 11,7-12,5 GHz              |
| Radar de aeronaves                | (60) (77) (94) GHz         |
| Redes metropolitanas              | 60 GHz                     |

\*Adaptado de [27].

### B. Comprimento Elétrico e Fractais

O tamanho de uma antena está diretamente relacionado com a sua frequência de operação. De acordo com [1], para uma antena de dipolo que ressoa para um determinado comprimento de onda  $\lambda_0$ , o tamanho da antena deve ser  $\lambda_0/2$  o que, dependendo da frequência de operação, pode significar um tamanho físico considerável.

Para otimizar o uso de espaço, as geometrias fractais são uma solução em potencial. De acordo com [28], uma geometria fractal perpassa o conceito euclidiano de pontos, retas e planos, devido a propriedade do fractal de ser uma reta com a capacidade de preencher um plano. A geometria fractal depende de um processo iterativo baseado em auto-similaridade, ou seja, utiliza-se de uma geometria inicial básica replicada em si mesmo para se desenvolver, assim gerando uma estrutura infinitamente complexa [29]. A estrutura fractal é vista em diversos eventos da natureza como como mostra a Figura 3.



(a)



(b)

Fig 3. Fractalidade presente em (a) Bacia do Rio Amazonas (b) Relâmpagos. Fonte: [29].

A Figura 4 mostra um modelo de geometria fractal utilizando como geometria básica um triângulo equilátero, onde a região escura é a área ocupada. Perceba que, à medida que a iteração aumenta, o perímetro da geometria aumenta enquanto a área ocupada é reduzida. É possível descrever o perímetro e a área pelas Equações 1 e 2, respectivamente, onde:  $P$  é a função do perímetro;  $n$  é a ordem de iteração;  $l$  é o tamanho da aresta do triângulo gerador;  $S$  é a função da área ocupada;  $S_0$  é a área inicial ocupada. Se  $n$  tender ao infinito, o perímetro também tende ao infinito enquanto a área ocupada tende ao zero.

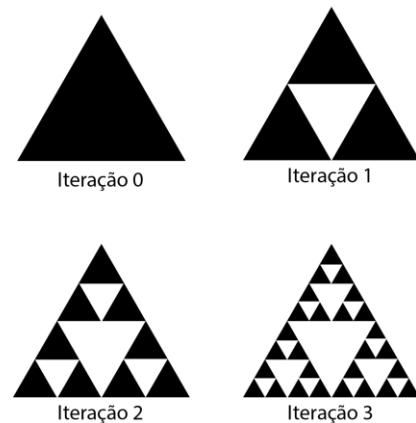


Fig. 4. Fractal triângulo de Sierpinski. Fonte: Autoria própria.

Essa propriedade do fractal foi utilizada para o aumento do comprimento elétrico em [29] para antenas de *loop*, dipolos e microfita, evidenciando o efeito esperado de miniaturização, além do aumento de impedância e modificação da distribuição do ganho para campos distantes.

$$P(n, l) = l \left( 3 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{3^n}{2^n} \right) \quad (1)$$

$$S(n, S_0) = S_0 \left( 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{3^{n-1}}{4^n} \right) \quad (2)$$

### III. PROJETO DE ANTENA DE MICROFITA

Em um projeto de AnM, o interesse é encontrar a largura e comprimento do *patch* que garantam a ressonância do equipamento para a frequência desejada, como mostra a Figura 5. De acordo com [1], os três métodos mais populares são: linha de transmissão; cavidade e onda completa. Foi utilizado o método da linha de transmissão apresentados por [1, 27], apesar do uso de equações empíricas, o desenvolvimento alcança resultados próximos ao real. Esse modelo representa a AnM por duas fendas radiantes separadas por uma linha de transmissão de comprimento  $L$  e impedância  $Z$ .

O projeto é iniciado definindo os 4 parâmetros a seguir:

- Frequência de operação (Hz);
- Constante dielétrica do substrato ( $\epsilon_r$ );
- Altura do substrato ( $H$ );
- Impedância de entrada ( $\Omega$ );

O substrato utilizado foi o Retardante de Fogo 4 (*Fire Retardant 4, FR4*) o qual possui constante dielétrica próxima à 4,4 [30] e 1,57 mm de altura. A escolha desse material se deve ao custo-benefício dele, o qual possui uma tangente de perdas aceitável ( $\tan \delta_e \sim 0.02$ ) a um baixo preço.

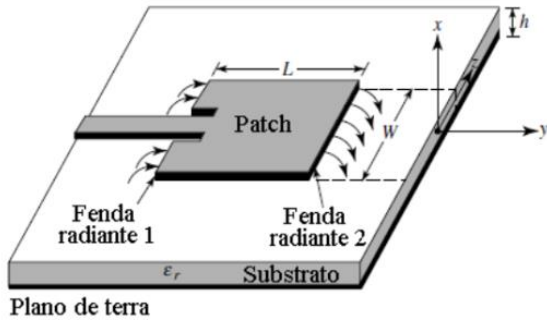


Fig. 5. Modelo de antena de microfita alimentado por linha de alimentação. Fonte: Adaptado de [1].

A frequência central de ressonância foi 2,45 GHz, a escolha dessa frequência se deve a dois motivos:

- Está dentro de um espectro não licenciado para indústria, ciência e medicina (*Industry, Science and Medicine, ISM*) definida pela União Internacional de Telecomunicação [31];
- É necessário relativamente pouco material para sua confecção;
- O equipamento utilizado para medição da perda de retorno ( $S_{1,1}$ ) possui limite de observação máximo de 3 GHz.

A impedância de entrada  $Z_{in}$  é definida por padrão em  $50\Omega$ . Muitos dos dispositivos de radiofrequência são projetados para possuir esse valor de impedância característica [32]. Isso se deve ao fato de que quando elementos acoplados possuem impedâncias características diferentes, parte da potência transmitida é refletida na

interface dos elementos enquanto outra é propagada. Para não haver reflexão, a impedância característica dos dois elementos deve ser igual.

#### A. Cálculos para antena de microfita com patch retangular

Para iniciar o dimensionamento da antena é encontrado a largura do *patch* dada pela Equação 3.

$$W = \frac{\lambda_0}{2} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (3)$$

Em seguida é encontrado o efeito de franjamento da antena dado pela Equação 4.

$$\Delta L = 0,412H \frac{(\epsilon_{rl} + 0,3) \left( \frac{W}{H} + 0,264 \right)}{(e_{rl} - 0,2258) \left( \frac{W}{H} + 0,8 \right)} \quad (4)$$

Onde  $\epsilon_{rl}$  é a permissividade elétrica relativa causada pela interação entre o dielétrico e o espaço externo pela Equação 5, que para este caso, é presumido ar.

$$\epsilon_{rl} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \sqrt{1 + 12 \frac{H}{W}} \quad (5)$$

Com o valor do efeito de franjamento, encontra o comprimento da plaqueta pela Equação 6.

$$L = \frac{\lambda_0}{2\sqrt{\epsilon_{rl}}} - 2\Delta L \quad (6)$$

Finalizada esta parte foi definido qual o método de alimentação. De acordo com [1] os 4 métodos mais conhecidos são: linha de microfita; cabo coaxial; acoplamento por abertura; acoplamento por proximidade. Cada qual possui suas particularidades afetando os modos de excitação, largura de banda, ganho, entre outras características.

Para o projeto foi escolhido a alimentação por linha de microfita por sua simplicidade para confecção, podendo ser produzido juntamente com o *patch*. O tamanho mínimo e a impedância do alimentador são dados pelas Equações 7 e 8, respectivamente.

$$L_i = \frac{\lambda_0}{4\sqrt{\epsilon_{ref}}} \quad (7)$$

$$Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{ref}} \left[ \frac{W_i}{H} + 1,393 + 0,677 \ln \left( \frac{W_i}{H} + 1,44 \right) \right]} \quad (8)$$

Onde:

- $\epsilon_{ref}$ : permissividade relatividade do alimentador;
- $W_i$ : largura do alimentador.

Como dito anteriormente, a impedância padrão é de  $50\Omega$ , então o interesse na Equação 8 é a largura do alimentador, porém não é possível isolar a variável, então é necessário utilizar um método iterativo que encontre um valor para  $W_i$  que aproxime a função ao resultado desejado.

Além disso, o *patch* possui uma impedância dada pela Equação 9. Esse modelo é extraído do circuito equivalente apresentado na Figura 6.

$$Z = \frac{1}{G_1 + G_2} = \frac{1}{2G_1} \quad (9)$$

Onde:

- $G_1$  é a condutância do *slot* do *patch*;

$G_1$  pode ser obtido pela função assintótica descrita na Equação 10.

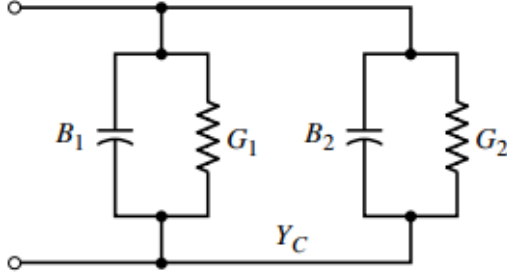


Fig. 6. Circuito equivalente para o *patch* de uma AnM. Fonte: [1].

$$G_1 = \begin{cases} \frac{1}{90} \left( \frac{W}{\lambda_0} \right)^2 & W \ll \lambda_0 \\ \frac{1}{120} \left( \frac{W}{\lambda_0} \right) & W \gg \lambda_0 \end{cases} \quad (10)$$

Com o valor da impedância da antena, foi feito a inserção da linha de alimentação (*inset feed*) no *patch* para aproximar sua impedância da desejada. O comprimento de penetração do alimentador é dado pela Equação 11.

$$y_0 = \frac{L}{\pi} \cos^{-1} \left( \sqrt{\frac{Z_{in}}{Z}} \right) \quad (11)$$

Seguindo o procedimento supracitado, foi encontrado as dimensões da antena apresentadas na Figura 7 e Quadro 1.

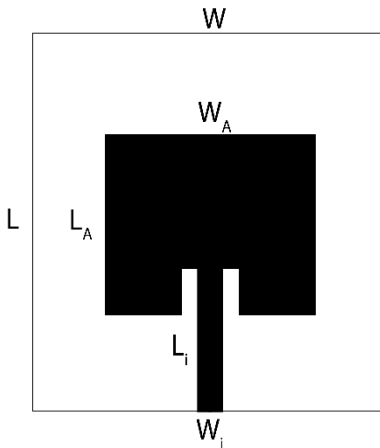


Fig. 7. Circuito equivalente para o *patch* de uma AnM. Fonte: Autoria própria.

Quadro 1. Dimensões da antena de microfita.

| Parâmetro | Valor (mm) | Parâmetro | Valor (mm) |
|-----------|------------|-----------|------------|
| $W_i$     | 3,00       | $L_i$     | 17,76+7,4* |
| $W$       | 61,22      | $L$       | 61,22      |
| $W_A$     | 37,14      | $L_A$     | 28,69      |

\* Valor do *inset feed*

## B. Plano de Terra com Fractal

Como dito na Seção I, a proposta deste trabalho é analisar o efeito que a geometria fractal causa em AnMs. O fractal escolhido foi uma modificação do floco de neve de Koch o qual é desenhado a partir da remoção de metal do plano de terra como visualizado na Figura 8. O triângulo externo da geometria geradora do fractal possui lado  $\lambda_0/N$  e o triângulo interno possui lado  $2\lambda_0/3N$ . Os valores para  $N$  variaram entre 5 e 20. O centro geométrico da estrutura está alinhado com o centro geométrico do *patch*.

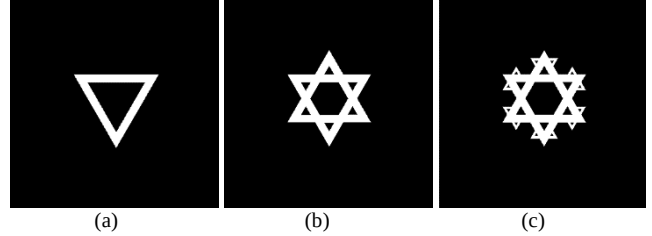


Fig. 8. PTT usando o modelo quasi-fractal do floco de neve de Koch. (a) geração 1. (b) geração 2. (c) geração 3. Fonte: Autoria própria.

## IV. RESULTADOS

Para obter os resultados, foi realizada a simulação no programa *Electronics Desktop* da Ansys com o módulo *High Frequency System Simulator* (HFSS). Foi simulada uma antena com os parâmetros da Seção III.A e sem o truncamento do plano de terra para servir como referência. O modelo proposto na Seção III.B foi implementado e comparado com a antena de referência. Os parâmetros de antena obtidos pela simulação foram: perda de retorno ( $S_{1,1}$ ); frequência central ( $f_c$ ); largura de banda (*Bandwidth*, BW), diagrama de radiação.

A Equação 12 foi utilizada para determinar a BW das simulações.

$$BW = \frac{f_{max} - f_{min}}{f_c} \cdot 100\% \quad (12)$$

Onde:

- $f_{max}$ : limiar superior da banda;
- $f_{min}$ : limiar inferior da banda;

Para determinar os limiares foi considerado o limite de perda de retorno de -10dB, o qual é um modelo padrão da literatura [1-25]. A frequência central foi determinada pela frequência com menor perda de retorno.

O coeficiente de reflexão, frequência central e largura de banda para as antenas simuladas são apresentadas na Figura 9 e na Tabela 2. De acordo com os resultados, para valores menores do fator  $N$  e gerações maiores do fractal há ao mesmo tempo um aumento do  $S_{1,1}$ , redução da  $f_c$  e aumento da BW.

A distribuição do ganho é apresentada na Figura 10, é possível inferir que, à medida que o fator  $N$  é reduzido, a relação *front-to-back* também é reduzida, isso é devido a remoção da parte metálica do plano de terra logo abaixo do *patch*, como a função do plano de terra é refletir os campos desprendidos, sua ausência permite a propagação em todas as direções.

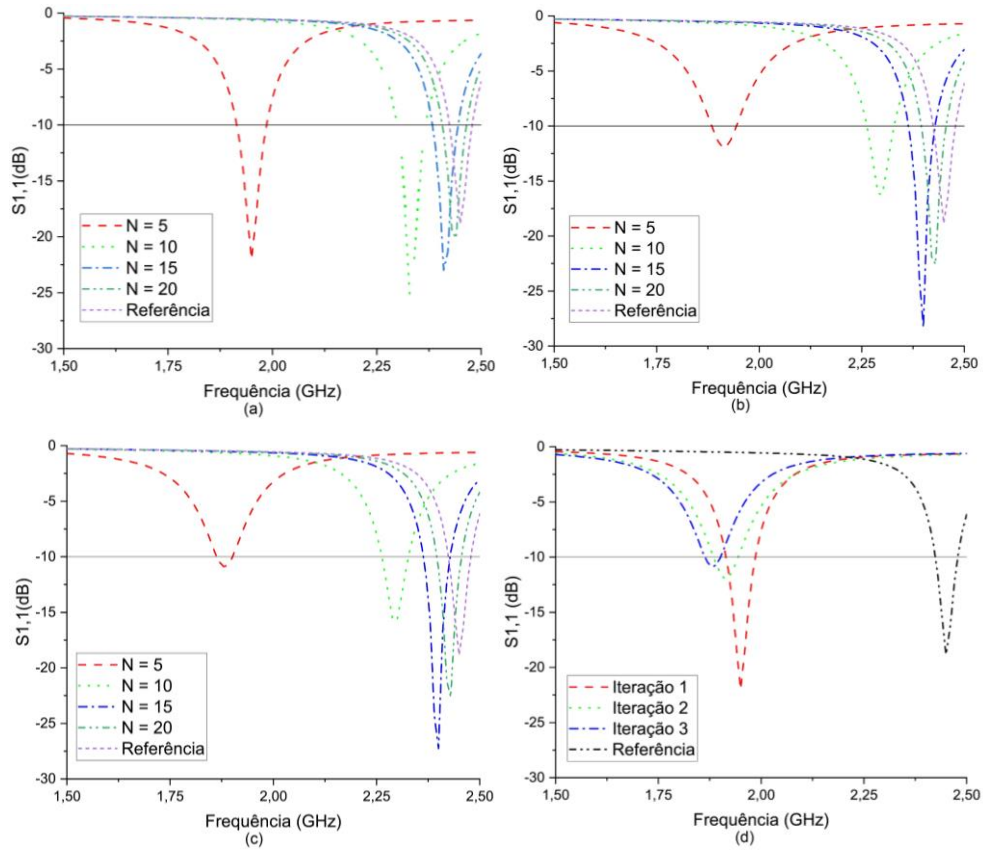


Fig. 9. Perda de retorno da antena com PTT usando o modelo quasi-fractal do floco de neve de Koch variando fator de compactação  $N$  (a) iteração 1 (b) iteração 2. (c) iteração 3 (d) fator  $N$  igual a 5 variando a iteração. Fonte: Autoria própria.

Tabela 2. Frequência central, perda de retorno e largura de banda obtidos em simulação. Fonte: Autoria própria.

|          |                | Fator $N$ |          |          |          |            |
|----------|----------------|-----------|----------|----------|----------|------------|
| Iteração |                | 5         | 10       | 15       | 20       | Referência |
| Primeira | $f_r$ (GHz)    | 1,95      | 2,33     | 2,41     | 2,44     | 2,45       |
|          | $S_{1,1}$ (dB) | -22,0143  | -25,7950 | -22,9932 | -20,1323 | -18,8317   |
|          | $BW$ (MHz)     | 80        | 80       | 70       | 60       | 60         |
| Segunda  | $f_r$ (GHz)    | 1,91      | 2,30     | 2,40     | 2,43     | 2,45       |
|          | $S_{1,1}$ (dB) | -11,8980  | -16,2496 | -28,3044 | -22,5557 | -18,8317   |
|          | $BW$ (MHz)     | 60        | 70       | 70       | 70       | 60         |
| Terceira | $f_r$ (GHz)    | 1,88      | 2,29     | 2,40     | 2,43     | 2,45       |
|          | $S_{1,1}$ (dB) | -10,8871  | -15,7006 | -27,2583 | -22,6246 | -18,8317   |
|          | $BW$ (MHz)     | 40        | 70       | 70       | 60       | 60         |

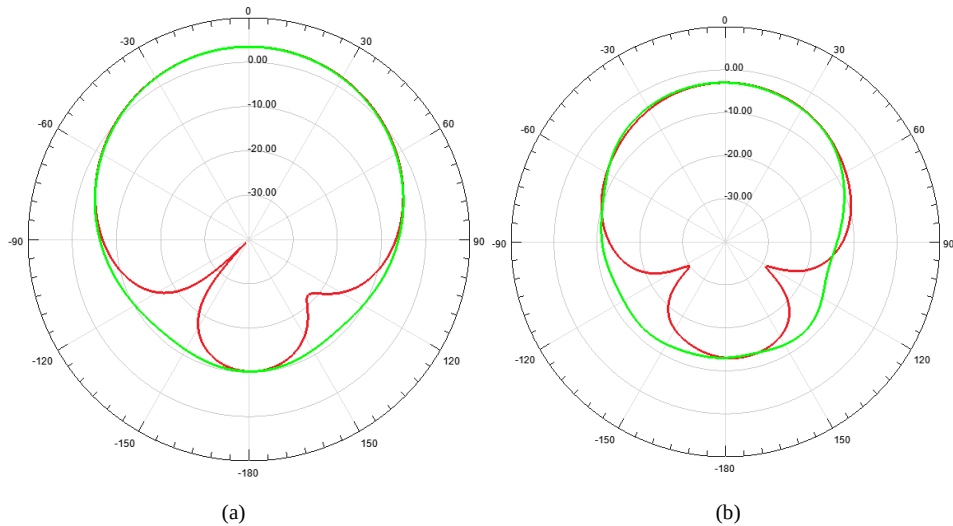


Fig. 10. Plano E (vermelho) e Plano H (verde) para 2,45 GHz da (a) antena de referência (b) antena com fractal de terceira iteração e fator  $N$  igual a 5.



A visualização do vetor da corrente elétrica nas antenas simuladas vide Figura 11 mostra que para a primeira iteração há mudança no padrão de distribuição da corrente, onde a corrente deixa de percorrer caminhos lineares, além de haver uma redução dessa à medida que aumenta a iteração do fractal.

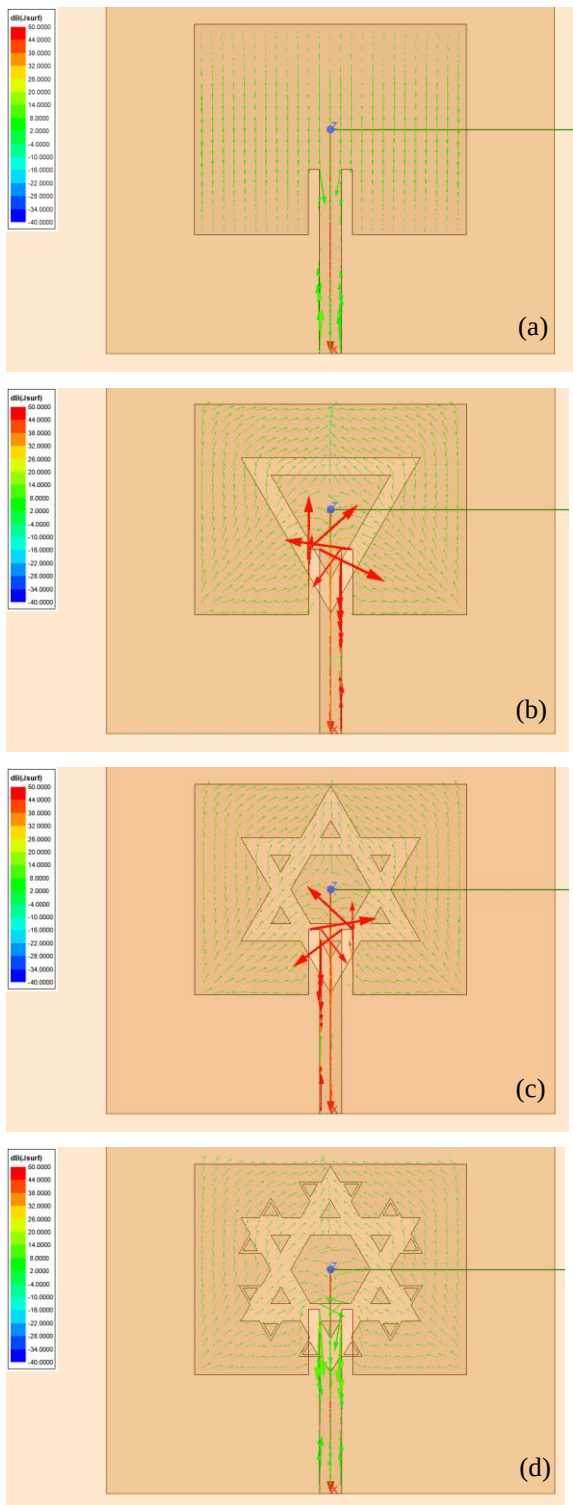


Fig. 11. Distribuição da corrente elétrica no *patch* da antena (a) referência (b) fractal primeira iteração (c) fractal segunda iteração (d) fractal terceira iteração.

Para validar os resultados, foram confeccionadas a antena de referência e três antenas com  $N$  igual a 5 e geração 1, 2 e 3. O processo de fabricação utilizado foi o de circuito

impresso por corrosão, o processo consiste na aplicação de uma camada protetora na superfície que deseja se manter a parte metálica, vide Figuras 12a-b, e submerge a placa em solução corrosiva. Algumas soluções utilizadas para a corrosão são o perclorato de ferro ( $\text{FeCl}_3$ ), persulfato de amônia ( $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ ) e persulfato de potássio ( $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ ). A solução mais comum para corrosão é o perclorato de ferro, devido ao seu baixo preço, porém para esse projeto foi utilizado o persulfato de amônia devido à transparência, permitindo visualizar o progresso da produção como mostra as Figuras 12c-d, e maior velocidade de corrosão. A proporção utilizada foi de 100g de  $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$  para 500mL de água. O resultado do processo de confecção pode ser visualizado nas Figuras 13a-b.

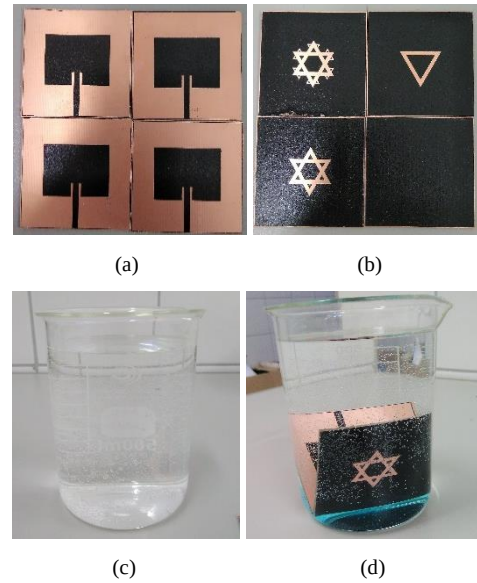


Fig. 12. Processo de fabricação de circuito impresso por corrosão. (a) vista frontal das AnMs antes da corrosão. (b) vista inferior das AnMs antes da corrosão. (c) solução preparada. (d) antenas imersas na solução. Fonte: Autoria própria.

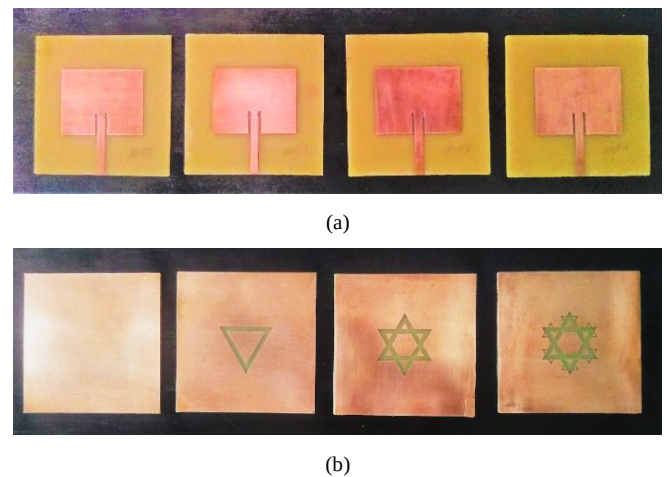


Fig. 13. Antenas com PTT com quasi-fractal confeccionadas para medição. Da esquerda para direita: referência, primeira geração, segunda geração, terceira geração (a) vista frontal (b) vista traseira. Fonte: Autoria própria.

Para a medição da perda de retorno da antena foi utilizado o dispositivo miniVNA Tiny (Fig. 14). Este dispositivo verifica a impedância e perda de retorno a até 3 GHz.



Fig 14. MiniVNA Tiny. Fonte: [33].

O resultado da perda de retorno é apresentado na Figura 15 e Tabela 3. Os resultados mostram que há redução de cerca de 500 MHz, ou 20,35% pela equação 13, quando se insere a estrutura quasi-fractal, porém não houve a redução progressiva com o aumento da iteração do fractal como visualizado nas simulações. Há uma melhora considerável da perda de retorno, indo de -11,54 dB para a primeira iteração, alcançando -30,48 dB na segunda geração e reduzindo para -26,48 na terceira. Além disso, a largura de banda teve um aumento perceptível, onde cresceu 356% da antena de referência para a antena terceira geração, atentando para o caso da segunda e terceira geração, onde mesmo havendo uma pior perda de retorno, a largura de banda da última é maior que a primeira. Essa informação está em consonância com a literatura sobre PTT em AnM [1], onde o aumento do truncamento permite uma maior largura de banda.

$$redução = \frac{|f_{ref} - f_{ant}|}{f_{ref}} \cdot 100\% \quad (13)$$

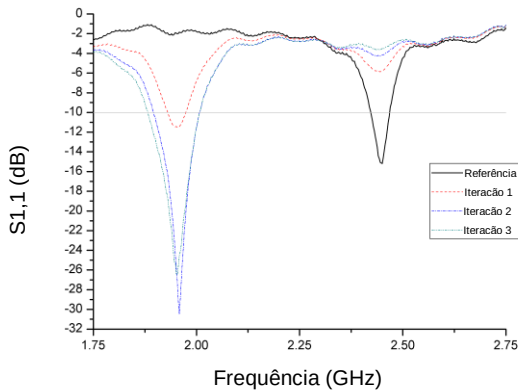


Fig. 15. Perda de retorno das antenas confeccionadas. Fonte: Autoria própria.

Tabela 3. Parâmetros de operação das antenas confeccionadas.

| Iteração | Frequência Ressonante (GHz) | Perda de Retorno (dB) | Frequência inferior (GHz) | Frequência superior (GHz) | BW (%) |
|----------|-----------------------------|-----------------------|---------------------------|---------------------------|--------|
| 0        | 2,4528                      | -11,19                | 2,4238                    | 2,4672                    | 1,77   |
| 1        | 1,9561                      | -11,54                | 1,9320                    | 1,9730                    | 2,10   |
| 2        | 1,9586                      | -30,48                | 1,8959                    | 2,0068                    | 5,66   |
| 3        | 1,9537                      | -26,48                | 1,8838                    | 2,0068                    | 6,30   |

Fonte: Autoria própria.

## V. CONCLUSÃO

Foi investigado o efeito da inserção de estrutura baseada no floco de neve de Koch no plano de terra de antenas de microfita (AnM). Os resultados mostram que é possível utilizar dessa estrutura para obter uma redução considerável da frequência de operação, onde foi obtido uma redução de 20,35% além de uma maior largura de banda. Isso permite a miniaturização das antenas haja vista que para produzir uma AnM padrão, pelo método apresentado na Seção III, que operasse em 1,95 GHz precisaria ter dimensões maiores que a produzida neste trabalho.

Para futuros trabalhos é possível investigar o efeito do truncamento do plano de terra com matrizes de fractais, conexão entre as partes metálicas do plano de terra para geração de efeitos capacitivos/indutivos, conexão entre a região metálica isolada no plano de terra com o patch por meio de perfuração do substrato e aplicação de estrutura fractal no plano de terra e na plaqueta ao mesmo.

## AGRADECIMENTOS

O autor principal gostaria de agradecer ao CNPq, ao prof. Dr. Humberto Dionísio pelas críticas construtivas e discussões que serviram para aprendizado, ao prof. Dr. Idalmir Queiroz Júnior pela confiança depositada.

## REFERÊNCIAS

- [1] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*. New York: Wiley, Second ed., 1997.
- [2] W. Chen, G. Wang and C. Zheng, "Small-Size Microstrip Patch Antennas Combining Koch and Sierpinski Fractal-Shapes", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol.7, pp. 738-741, 2008.
- [3] A. Jamil, M. Yusoff and N. Yahya, "Small Koch fractal antennas for wireless local area network", *2010 IEEE International Conference on Communication Systems*, 2010.
- [4] K.-L. Wong, *Compact and Broadband Microstrip Antennas*. New York: Wiley, 2002, pp. 1-7.
- [5] N. Herscovici and M. F. Osorio *et al.*, "Miniaturization of rectangular microstrip patches using genetic algorithms," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 1, pp. 94-97, 2002.
- [6] Y. D. Lin and T. Itoh, "Frequency-scanning antenna using the crosstieoverlay slow-wave structures as transmission line," *IEEE Trans Antennas Propag.*, vol. AP-39, pp. 377-380, 1991.
- [7] J.-H. Kim, I.-K. Kim, J.-G. Yook, and H.-K. Park, "A slow-wave structure with Koch fractal slot loops," *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 34, no. 2, pp. 87-88, Jan. 2002.
- [8] S. Reed, L. Desclos, C. Terret, and S. Toutain, "Size reduction of a patch antenna by means of inductive loads," *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 29, no. 2, pp. 79-81, Feb. 2001.
- [9] L. Desclos, "Size reduction of patch by means of slots insertion," *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 25, no. 2, pp. 111-113, Feb. 2000.
- [10] D. Minervino, A. D'Assunção and C. Peixeiro, "Mandelbrot fractal microstrip antennas", *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 58, no. 1, pp. 83-86, 2015.
- [11] S. Muthumani, Vallikannu R and H. Patnam, "Compact slot loaded Koch fractal microstrip patch antenna", *2013 IEEE Applied Electromagnetics Conference (AEMC)*, 2013
- [12] L. Singh and M. Kaur, "Review of Microstrip Patch Antenna using Fractal Techniques for Wireless Applications", *International Journal of Engineering Trends and Technology*, vol. 49, no. 7, pp. 409-414, 2017.
- [13] A. Sundaram, M. Maddela and R. Ramadoss, "Koch-Fractal Folded-Slot Antenna Characteristics", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 6, pp. 219-222, 2007.
- [14] U. Keshwala, S. Rawat and K. Ray, "Honeycomb Shaped Fractal Antenna with Defected Ground Structure for UWB Applications", *2019 6th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)*, 2019.

- [15] D. Li, F. Zhang, Z. Zhao, L. Ma and X. Li, "UWB antenna design using patch antenna with Koch fractal boundary", *2012 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT)*, 2012.
- [16] Y. Fu, N. Yuan and G. Zhang, "A novel fractal microstrip PBG structure", *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 32, no. 2, pp. 136-138, 2001.
- [17] C. Elavarasi and T. Shanmuganatham, "SRR loaded CPW-fed multiple band rose flower-shaped fractal antenna", *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 59, no. 7, pp. 1720-1724, 2017.
- [18] S. Kuzu and N. Akcam, "Array Antenna Using Defected Ground Structure Shaped With Fractal Form Generated by Apollonius Circle", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, pp. 1020-1023, 2017.
- [19] J. Gemio, J. Granados and J. Castany, "Dual-Band Antenna With Fractal-Based Ground Plane for WLAN Applications", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 8, pp. 748-751, 2009. Available: 10.1109/lawp.2008.2008111 [Accessed 27 June 2019].
- [20] [T. Hong, S. Gong, Y. Liu and W. Jiang, "Monopole Antenna With Quasi-Fractal Slotted Ground Plane for Dual-Band Applications", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 9, pp. 595-598, 2010.
- [21] K. Wei, J. Li, L. Wang, R. Xu and Z. Xing, "A New Technique to Design Circularly Polarized Microstrip Antenna by Fractal Defected Ground Structure", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 7, pp. 3721-3725, 2017.
- [22] Kumar, A., Kumar, M. and Parmar, G. (2015). Multi band circularly polarized asymmetrical fractal boundary microstrip patch antenna using DGS for (2.58/3.02/5.58/6.44GHZ). *2015 Communication, Control and Intelligent Systems (CCIS)*.
- [23] Rajabloo, H. and Mandali, J. (2019). Microstrip Gasper-Peano fractal antenna for circular polarization applications. *Microwave and Optical Technology Letters*, 61(6), pp.1622-1627.
- [24] T. Hong, S. Yu, W. Jiang and S. Gong, "Gain enhancement of the circularly polarized antenna by fractal technique", *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 55, no. 11, pp. 2656-2659, 2013.
- [25] J. Qiang, F. Xu and W. Fan, "Reducing Mutual Coupling of Millimeter Wave Array Antennas by Fractal Defected Ground Structure", *2018 12th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE)*, 2018.
- [26] Quora. "How many antennas are present on average in smart phones using LTE?" Disponível em: <https://www.quora.com/How-many-antennas-are-present-on-average-in-smart-phones-using-LTE>. Acesso em: 15 nov. 2020
- [27] J. A. Ribeiro. "Engenharia de Antenas – Fundamentos, Projetos e Aplicações". 1.ed. São Paulo, érica, 2012.
- [28] J. P. Gianvittorio, Y. Rahmat-Sahmii. "Fractal Antennas: A Novel Antenna Miniaturization Technique and Applications". *IEEE Antennas and Propagation Magazine*. vol. 44, no. 1. pp. 20-35, 2002.
- [29] T. A. Assis, et. al. "Geometria fractal: propriedade e características de fractais ideais". *Revista Brasileira de Ensino de Física*. Vol. 30, no. 2
- [30] ATMEL. *HF Transmission*. Disponível em: <https://datasheet.datasheetarchive.com/originals/library/Datasheet-02/DSA0019066.pdf>. Acesso em: 14 nov. 2020.
- [31] ITU. "Amateur-Satellite Service". Disponível em: <https://www.itu.int/en/ITU-R/space/AmateurDoc/AmateurSatServiceFreq.pdf>. Acesso em: 14 nov. 2020.
- [32] All About Circuits. "The 50Ω Question: Impedance Matching in RF Design" Disponível em: <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/radio-frequency-analysis-design/real-life-rf-signals/the-50-question-impedance-matching-in-rf-design/>. Aceso em: 14 nov. 2020.
- [33] Mini Radio Solutions. MiniVNA Tiny. Disponível em: <http://miniradiosolutions.com/54-2/>. Acesso em: 15 nov. 2020