

ANÁLISE DE DESEMPENHO DO MODELO BASEADO NO FRACTAL DE FIRAT APLICADO A ANTENA DE MICROFITA DE GEOMETRIA CIRCULAR

Mirelli S. da Silva¹, Isaac B. T. da Silva²

¹Centro de Ciências Exatas e Naturais, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, Brasil

²Centro de Engenharias, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, Brasil

Resumo: Este artigo investiga o desempenho de uma antena usando a modelagem fractal circular baseada em Firat. É apresentada uma descrição matemática circular adequada ao modelo fractal de Firat, com base em estudos anteriores. A frequência escolhida para estudo foi de 2 GHz com 4 iterações aplicadas no *patch* da antena de referência. Por meio de simulações, o trabalho tem como objetivo analisar o coeficiente de reflexão, fator de miniaturização, diagrama de radiação, ganho, diretividade e eficiência entre as iterações. O fator de miniaturização apresentou o valor máximo de 20,874%. No diagrama de radiação, a mudança de ganho mais considerável foi de 3,22 dB entre as iterações, tanto no plano E como no plano H. Além disso, o maior ganho observado foi de 1,74 dB, na iteração 4. No caso da diretividade, o melhor resultado analisado entre as iterações foi na terceira iteração, de 6,65 dB. Por fim, os resultados de eficiência também foram relevantes para o estudo, com um valor máximo de 58,35% na iteração 2.

Palavras-chave: fractal baseado em Firat; polarização de antenas; miniaturização de antenas.

1. INTRODUÇÃO

O termo fractal foi proposto inicialmente pelo matemático Benoit Mandelbrot [1] para descrever uma família de formas complexas que possuem uma autossimilaridade, ou auto afinidade, presente em uma estrutura geométrica. Ou seja, os fractais são caracterizados pela repetição de padrões auto semelhantes em diferentes escalas, que pode trazer uma aparência complexa, entretanto organizada. Contudo, a geometria fractal pode ser retratada por meio de algoritmos geradores que permitem a geração de estruturas com alta complexidade espacial a partir da substituição de cada parte do elemento base pelo elemento gerador completo [2]. Em consequência, essa particularidade torna os fractais interessantes para aplicações em projeto de antenas de microfita [3].

Dessa forma, a utilização de geometrias fractais em antenas permite a criação de estruturas compactas, com alto grau de miniaturização e características eletromagnéticas únicas, melhorando o desempenho eletromagnético sem comprometer a performance do sistema [4, 5]. Além disso, outros benefícios podem ser analisados, como o aumento da largura de banda [6], característica multibanda [7], e uma melhor eficiência de radiação [8]. Vale ressaltar que essas características são possíveis graças à distribuição eficiente de corrente proporcionada pelas formas fractais, que permite um melhor casamento de impedância, mesmo em dimensões reduzidas. Dessa forma, o uso de fractais em antenas de microfita se mostra uma estratégia promissora para atender às crescentes demandas por dispositivos de comunicação compactos [9].

Diversos estudos na literatura têm explorado a aplicação de diferentes geometrias fractais em antenas de microfita, destacando seus benefícios. Por exemplo, em um estudo realizado por Shrestha et al. [10], um *patch* baseado no fractal Sierpinski promoveu uma redução da área do *patch* sem afetar o desempenho, perda de retorno, padrão de radiação e casamento de impedância da antena. Enquanto, em um trabalho elaborado por Yu [11], foi utilizado o fractal baseado em Koch, floco de neve, que permitiu a redução da área da antena, enquanto possibilitou um aumento do ganho e da eficiência.

Entre os vários modelos fractais propostos na literatura, destaca-se o Firat Fractal, apresentado por Tuncer, Dogan e Subasi [12]. Originalmente, a proposta tinha como finalidade analisar sinais de eletroencefalograma (EEG) com foco no reconhecimento de emoções, então o modelo do fractal não foi inicialmente planejado para aplicações eletromagnéticas ou dispositivos planares, como antenas de microfita e superfícies seletivas em frequência. No entanto, a estrutura geométrica do Firat Fractal apresenta características que o tornam atraente para a engenharia de antenas, especialmente em relação a sua capacidade de miniaturização e controle sobre o comportamento da radiação. A Figura 1 mostra o logotipo da Universidade Firat, localizada na Turquia, que foi usado como inspiração para o modelo do fractal.



Figura 1. Logo da Universidade Firat. (Silva et al. [13])

Dessa forma, Silva et al. [13] adaptaram a metodologia do uso do Firat fractal ao contexto das antenas de microfita, desenvolvendo assim uma descrição matemática da estrutura e aplicando-a ao projeto de uma antena com *patch* retangular. O estudo, por meio de simulações, revelou que a geometria fractal permite uma redução significativa do tamanho do *patch* sem comprometer os parâmetros de desempenho da antena. Além dessa pesquisa, os autores também apresentaram resultados experimentais em [14,15], validando o modelo tanto em geometrias retangulares como também em circulares.

Diante do exposto, o presente trabalho tem como objetivo estender a aplicação do Fractal Firat ao projeto de uma antena microfita de geometria circular. A análise proposta foi conduzida por meio da investigação de parâmetros de desempenho como: coeficiente de reflexão (S_{11}), fator de miniaturização, razão axial, diagrama de radiação, ganho, diretividade e eficiência de radiação, por meio de simulações.

2. DESENVOLVIMENTO

Nesse tópico será apresentada a fundamentação teórica para compreensão da análise que foi realizada nos parâmetros da antena de microfita baseada no fractal de Firat. Logo, no tópico seguinte, será exposta a metodologia utilizada no presente trabalho. Por fim, serão discutidos os resultados e suas contribuições para alcançar os objetivos propostos.

2.1. Fundamentação teórica

2.1.1. Matriz de espalhamento

A matriz de espalhamento, ou também chamada de matriz S , é uma ferramenta matemática que pode ser utilizada na modelagem de dispositivos de radiofrequência e micro-ondas, incluindo antenas. Essa matriz relaciona as ondas incidentes, refletidas e transmitidas, nas portas de um sistema, que pode ser representado por uma caixa-preta com um circuito equivalente contendo alguns componentes idealizados. Para sistemas de duas portas, a matriz S é composta por quatro parâmetros principais sendo: S_{11} , S_{12} , S_{21} e S_{22} . A Figura 2 apresenta detalhadamente o que cada parâmetro S representa. Logo, o parâmetro S_{11} representa o coeficiente de reflexão na porta de entrada, e sua magnitude em dB indica o nível de acoplamento da antena à linha de alimentação [16].

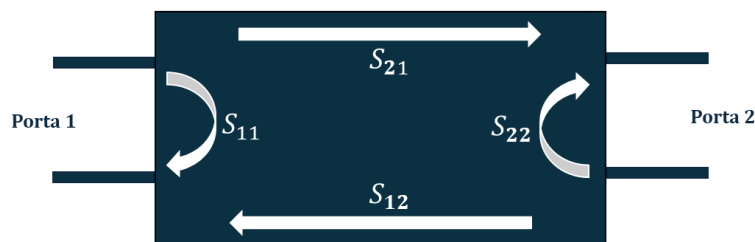


Figura 2. Matriz de espalhamento. (Autoria própria)

No contexto de antenas, o parâmetro S_{11} está relacionado a análise da largura de banda e ao casamento de impedância do sistema. Um valor de S_{11} inferior a -10 dB é, em geral, considerado aceitável para indicar que pelo menos 90% da potência incidente está sendo utilizada, em vez de refletida [17]. Assim, a análise da matriz de espalhamento permite avaliar a eficácia do acoplamento entre a antena e a rede de alimentação, e obter a frequência

de ressonância da antena, sendo assim um parâmetro importante para análise de um projeto de sistema de comunicação.

2.1.2. Polarização

A polarização de uma onda pode ser definida em termos da onda transmitida ou recebida, e é classificada entre linear, circular ou elíptica, dependendo da trajetória descrita pelo vetor do campo elétrico no tempo. Geralmente, quando a figura descrita pelo campo elétrico é uma elipse, o campo é dito como elipticamente polarizado. Observa-se na Figura 3 os eixos maior e menor, como também o campo em forma de elipse. Contudo, a polarização linear e circular são considerados como casos especiais da condição da polarização elíptica, que podem ser atingidas quando o desenho se torna uma linha reta, para linear, ou um círculo perfeito, para a polarização circular [18].

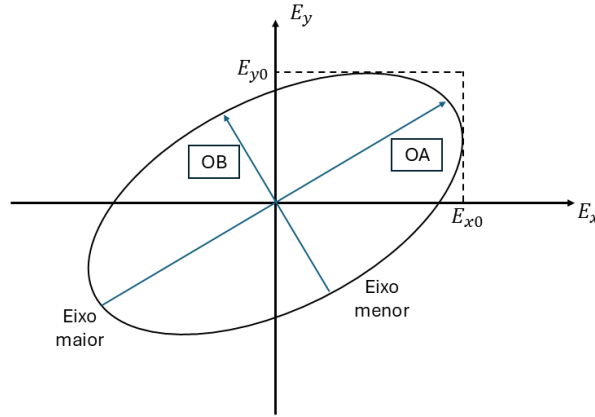


Figura 3. Elipse de polarização. (Autoria própria)

A determinação do tipo de polarização pode ser efetuada através do cálculo de razão axial, sendo definida como a divisão entre as magnitudes dos eixos maior e menor da elipse descrita pelo vetor do campo elétrico, que pode variar de 1 a ∞ . Quando a razão axial é igual a 1, ou 0 dB, a polarização é considerada perfeitamente circular, quando houver valores muito altos, tendendo a ∞ , será classificada como um segmento de reta e resultados entre isso, possui polarização elíptica. Todavia, na prática, um resultado de até 3 dB é usualmente aceito na literatura como indicativo de polarização circular [19]. As Equações de 1 a 3 demonstram como pode ser obtido o valor da razão axial, eixo maior e menor.

$$RA = \frac{OA}{OB} \quad (1)$$

$$OA = \left[\frac{1}{2} \left\{ E_{x0}^2 + E_{y0}^2 + [E_{x0}^4 + E_{y0}^4 + 2E_{x0}^2 E_{y0}^2 \cos(2\Delta\phi)]^{1/2} \right\} \right]^{1/2} \quad (2)$$

$$OB = \left[\frac{1}{2} \left\{ E_{x0}^2 + E_{y0}^2 - [E_{x0}^4 + E_{y0}^4 + 2E_{x0}^2 E_{y0}^2 \cos(2\Delta\phi)]^{1/2} \right\} \right]^{1/2} \quad (3)$$

Na Equação 1, RA equivale a razão axial, OA representa o eixo maior e OB ao eixo menor. Nas Equações 2 e 3, E_{x0} e E_{y0} são as magnitudes máximas do campo elétrico sobre os eixos x e y , respectivamente, como são mostrados na Figura 3, além disso, $\Delta\phi$ representa a diferença de fase no tempo entre as duas componentes ortogonais do campo elétrico. Dessa maneira, por meio da análise da razão axial é possível verificar que tipo de polarização da energia radiada está presente na antena.

2.1.3. Ganho, diretividade e eficiência

O desempenho de uma antena pode ser analisado por diversas métricas, entre as quais se destacam ganho, diretividade e eficiência. A diretividade quantifica a capacidade da antena de concentrar energia em uma direção específica em relação a uma antena isotrópica, que radia uniformemente em todas as direções. Ou seja, trata-se de uma medida que descreve o quão bem um elemento radiador direciona a energia em uma determinada direção. Enquanto o ganho relaciona a diretividade com as perdas internas do sistema, como perdas dielétricas, condutivas e por desacoplamento. Assim, o ganho representa a capacidade real de radiação útil da antena em uma direção específica. Já a eficiência, é definida como a razão entre o ganho e a diretividade da antena. Alta eficiência significa que a maior parte da energia entregue ao sistema está sendo efetivamente convertida em radiação eletromagnética

[18,20]. As Equações de 4 a 6 são apresentadas a seguir, sendo as Equações 5 e 6 adaptações das equações utilizadas no software de simulação, *Ansys® HFSS*, versão 19.0, para obter os resultados de ganho, diretividade e da eficiência.

$$e = \frac{G(\theta, \phi)}{D(\theta, \phi)} \quad (4)$$

$$G(\theta, \phi) = \frac{2\pi|E|^2 r^2}{P_{acc}\eta_0} \quad (5)$$

$$D(\theta, \phi) = \frac{2\pi|E|^2 r^2}{P_{rad}\eta_0} \quad (6)$$

Na Equação 4, o e representa a eficiência da antena o $G(\theta, \phi)$ equivale ao ganho, enquanto o $D(\theta, \phi)$ a diretividade. Nas Equações 5 e 6, E é a magnitude do campo elétrico, o r é a distância entre a antena e o campo distante, em metros, já o η_0 é a impedância intrínseca do espaço livre, P_{acc} é a potência aceita na entrada da antena e P_{rad} é a potência irradiada.

Esses três parâmetros estão diretamente interligados e são importantes para a avaliação das antenas de microfita, principalmente com a geometria fractal, onde o objetivo é atingir o máximo de desempenho em uma estrutura compacta e, muitas vezes, de difícil modelagem.

2.2. Metodologia

Com a finalidade de alcançar o propósito deste estudo, foi realizada primordialmente uma pesquisa bibliográfica sobre o uso do modelo fractal baseado em Firat. Posteriormente, foi escolhida referências de aplicações desta modelagem em antenas de microfita. Logo, possuindo todas as informações necessárias para execução do projeto, a frequência desejada para aplicação da modelagem para a antena foi selecionada, que foi de 2 GHz. Utilizando o método do modelo de cavidade no *patch* circular, e na linha de transmissão usando o modelo de linha de transmissão de [16,18], foi possível obter a antena de referência, descritas pelas Equações 7 a 10.

$$Z_c = \sqrt{\epsilon_e} \left[\frac{W_{LT}}{h} + 1,393 + 0,667 \ln \left(\frac{W_{LT}}{h} + 1,444 \right) \right] \quad (7)$$

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{12h}{W_{LT}} \right)^{-1/2} \quad (8)$$

$$a_e = c \frac{X'_{mn}}{2\pi f_r \sqrt{\epsilon_r}} \quad (9)$$

$$a_e = a \left\{ 1 + \frac{2h}{a\pi\epsilon_r} \left[\ln \left(\frac{a\pi}{2h} \right) + 1,7726 \right] \right\}^{1/2} \quad (10)$$

Na Equação 7, Z_c é a impedância característica, e definindo a impedância de entrada com 50Ω é possível descobrir o valor de W_{LT} , que é a largura da linha de transmissão. Na Equação 8, ϵ_e é a permissividade efetiva, devido ao efeito de borda que considera o franjamento das linhas de campo elétrico, enquanto ϵ_r se refere a permissividade relativa do substrato e h é a espessura do substrato. Na Equação 9, a_e equivale ao raio efetivo, f_r é a frequência de ressonância, além disso a constante c representa a velocidade da luz no espaço livre e o termo X'_{mn} é a raiz da derivada da função de Bessel de primeira ordem, sendo 1,8412 para o modo TM_{110}^Z . Por fim, o a que é o raio real, pode ser encontrado numericamente seu valor igualando as Equações 9 e 10. Foi utilizado uma rotina com método numérico para obter as dimensões desejadas e os valores foram otimizados utilizando o *Ansys® HFSS*, versão 19.0, para melhoria do casamento de impedância.

A partir da modelagem da antena de referência, o modelo fractal baseado em Firat pode ser aplicado. Um sistema matemático para geometria circular, conforme proposto por Araújo et al. [15], é descrito nas Equações 11 a 14, que foram aplicadas na antena de referência.

$$\begin{bmatrix} C \\ C_{f1} \\ C_{f2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x^2 + y^2 = r^2 \\ (x + r_n)^2 + (y - r_n)^2 = r_n^2 \\ (x - r_n)^2 + (y + r_n)^2 = r_n^2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$r_n = \frac{2r}{5t} \quad (12)$$

$$t = \begin{cases} 1, & n = 1 \\ 2(n-1), & n = 2, 3, \dots, k \end{cases} \quad (13)$$

$$C_{f_{rac}} = C - e^{j\pi(n-1)}(C_{f_1} + C_{f_2}) \quad (14)$$

Na Equação 11, o C representa o círculo da antena de referência, $n = 0$, enquanto C_{f_1} e C_{f_2} os pares de círculos que podem ser subtraídos ou adicionados ao *patch* de referência, que tem um raio de r_n , de acordo com o número de iteração n , que é obtido pela Equação 12. Na Equação 13, t representa o fator de redução proporcional aplicado ao raio. Em seguida, a Equação 14 define a geometria resultante conforme o número de iterações aplicadas. A Figura 4 apresenta a antena de microfita com quatro iterações aplicadas, incluindo uma visualização ampliada destacando cada raio e sua iteração correspondente.

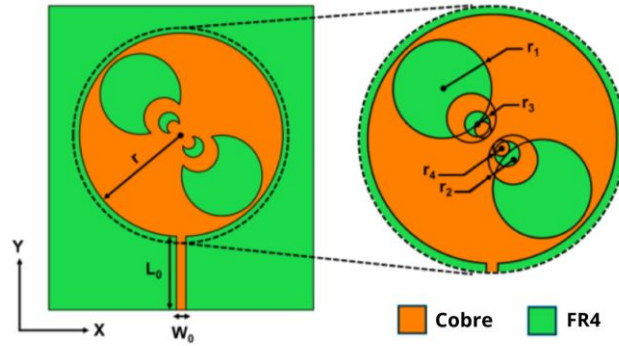


Figura 4. Modelo com 4 iterações. (Adaptado de Araújo et al. [15])

Conforme os resultados já analisados em estudos anteriores [13-15], é esperado um deslocamento da frequência de ressonância para a esquerda com o aumento da quantidade de iterações, indicando uma miniaturização da antena. O fator miniaturização (γ) pode ser calculado pela Equação 15, que é descrita em [13-15]. Em que A_r é a área do *patch* da antena de referência e A_f é o valor da área do *patch* com o raio projetado de acordo com a nova frequência obtida quando aplicada a modelagem, sendo calculada com as mesmas dimensões da linha de transmissão da antena de referência.

$$\gamma = \left| \frac{A_r - A_f}{A_r} \right| 100\% \quad (15)$$

Em síntese, as modelagens e as simulações foram realizadas usando o software *Ansys® HFSS*, versão 19.0, simulando de 1 a 4 GHz, com 451 pontos, na antena de referência e das antenas da primeira à quarta iteração. A próxima seção, apresentará os resultados: coeficiente de reflexão, fator de miniaturização, razão axial, padrões de radiação, ganho, diretividade e eficiência de radiação.

2.3. Resultados e Discussões

Os resultados da aplicação das Equações 7 a 10 são descritos na Tabela 1, que apresenta as dimensões da antena de referência. O substrato aplicado foi o FR4 e de dimensão quadrada, então os valores da largura e comprimento são iguais. A Tabela 2 mostra os resultados dos raios de cada iteração obtido pela Equação 12, que corresponde a formação da geometria da Figura 4.

Tabela 1. Dimensões da antena de referência. (Autoria própria).

Patch		Substrato		Linha de transmissão	
Raio (mm)	Área (cm ²)	Dimensão (mm)	Espessura (mm)	W ₀ (mm)	L ₀ (mm)
21	1,32	71,5	2	0,75	16

Tabela 2. Valores dos raios das iterações. (Autoria própria).

Iteração (n)	Raio (mm)
1	8,40
2	4,20
3	2,10
4	1,40

Na Figura 5, são apresentados os resultados das simulações do coeficiente de reflexão mostrados de acordo com cada iteração. A Tabela 3 expõe os valores do coeficiente de ressonância, largura de banda, primeiro modo da frequência de ressonância e fator de miniaturização, para cada iteração.

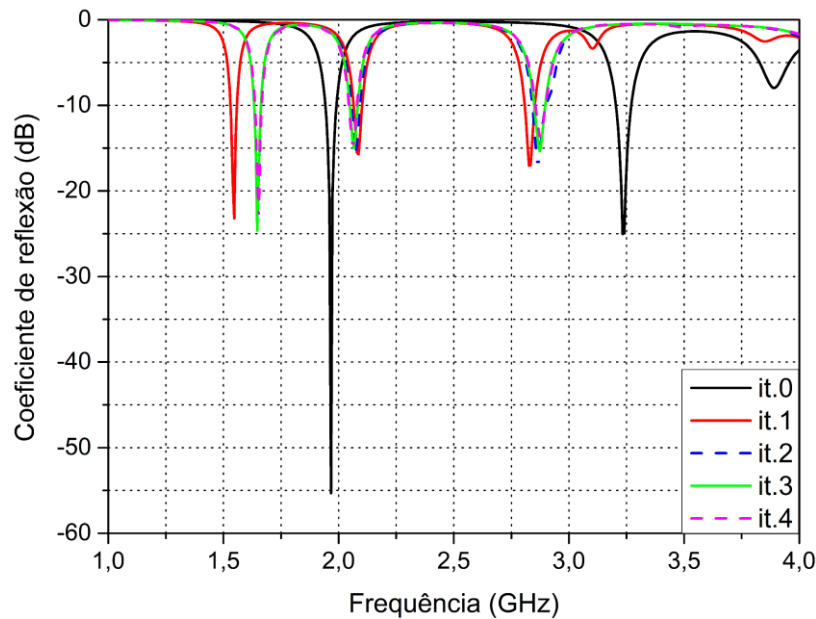


Figura 5. Coeficiente de reflexão. (Autoria própria).

Tabela 3. Parâmetros de desempenho e miniaturização. (Autoria própria).

Iteração (n)	Coeficiente de reflexão (dB)	Largura de banda (GHz)	Frequência de ressonância (GHz)	γ (%)
0	-55,31	0,44	1,96	-
1	-23,22	0,23	1,54	20,874
2	-24,64	0,25	1,64	15,628
3	-24,64	0,25	1,64	15,628
4	-23,16	0,25	1,65	15,117

De acordo com a Figura 5, houve um aumento do coeficiente de reflexão quando aplicado o método do fractal, entorno de 31 dB, como também pode ser observado nos resultados da Tabela 3. Além disso, ocorreu uma diminuição de aproximadamente de 0,2 GHz na largura de banda. Também, houve um deslocamento da frequência ressonância para valores de frequência mais baixo, esse comportamento era esperado [13-15], e se sucedeu devido a uma variação na impedância de entrada. E tal variação ocorre devido a modificação do *patch* da antena, por este motivo também foi analisado o fator de miniaturização comparando com valores teóricos de raios. Na quinta coluna da Tabela 3, foi aplicado a Equação 15 para obter o fator de miniaturização para as diferentes iterações. O maior valor de fator de miniaturização ocorreu na primeira iteração, apresentando um valor de 20,874%. Isso

aconteceu, pois a iteração 1 obteve o menor valor de frequência devido a maior retirada de cobre no *patch* quando aplicado a modelagem do Firat, como pode ser observada na representação da Figura 4.

A Figura 6 apresenta os dados simulados da razão axial na largura de banda, da antenna de referência e dos demais resultados de cada iteração, sendo indicado por meio das setas a qual o eixo y pertence, para a leitura de dados.

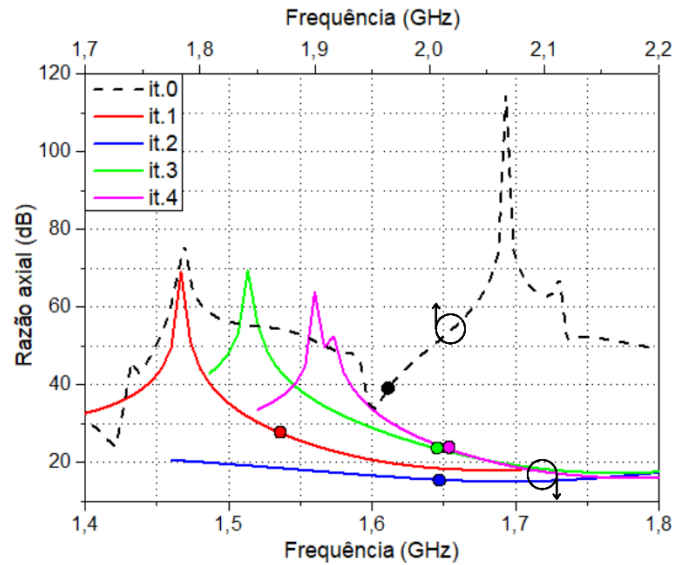


Figura 6. Razão axial. (Autoria própria).

Pelos resultados apresentados na Figura 6, o resultado da razão axial da antenna de referência possui valores muito altos então pode ser considerado uma polarização linear [18]. E nas iterações em que houve a aplicação do fractal, ocorreu uma diminuição na razão axial, principalmente na iteração 2, mas excedem os 3 dB [19] indicando que a polarização das antenas é elíptica tendendo a linear em algumas frequências. O diagrama de radiação das antenas foi simulado e é apresentado na Figura 7 para o Plano E e Plano H, respectivamente.

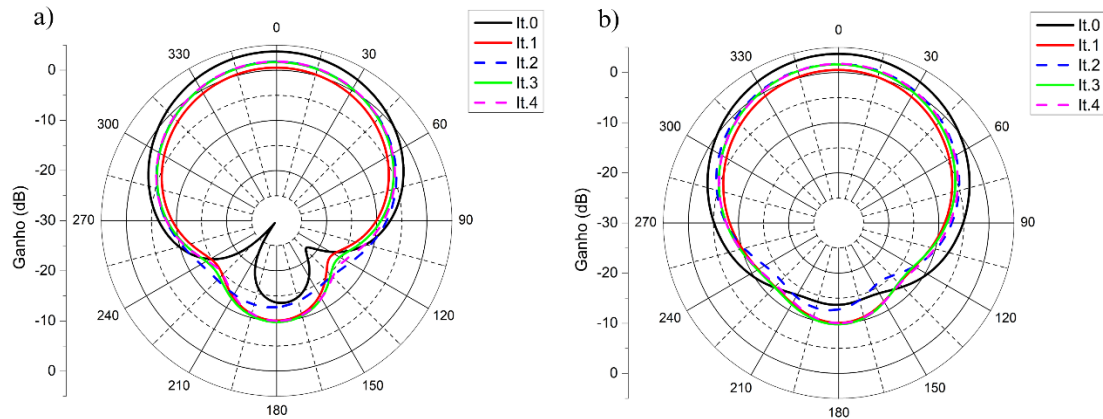


Figura 7. Diagrama de radiação do a) Plano E e b) Plano H. (Autoria própria).

Verificando as diferenças do ganho em $\theta = 0^\circ$ é possível observar que tanto no plano E como no plano H, a maior alteração ocorreu entre o valor da antenna de referência e a iteração 1, em que houve uma diferença de 3,22 dB em ambos os diagramas. Além disso, o ganho do lóbulo lateral, que é a radiação que ocorre em direções diferentes do lóbulo principal [18], quando comparadas com a antenna de referência houve um aumento no plano

E sendo entorno de 4 dB nas iterações 1, 3 e 4, e no plano H mudanças mais sucintas foram examinadas. Na Figura 8 são apresentados os valores de ganho, diretividade e eficiência.

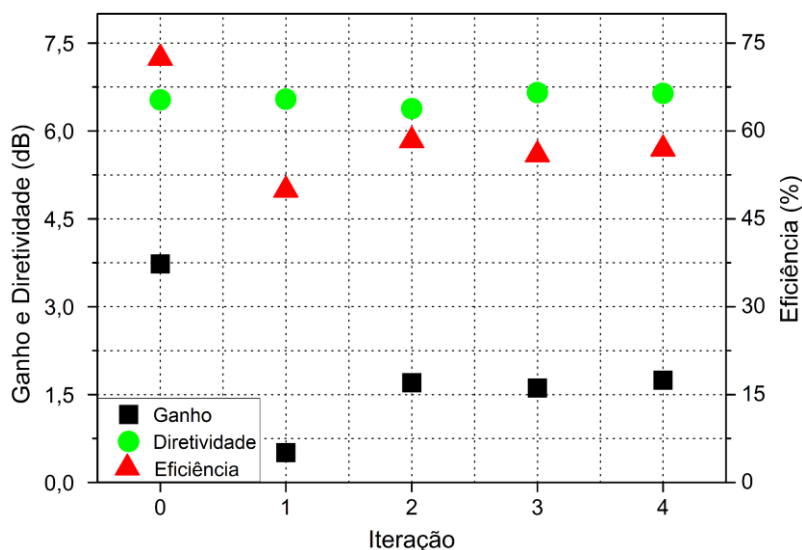


Figura 8. Ganho, diretividade e eficiência. (Autoria própria)

De acordo com a Figura 8, a antena de referência, indicada como $n = 0$, apresenta os valores mais elevados de ganho e eficiência em comparação com as outras iterações, por causa da ausência da remoção de cobre no *patch*. A diretividade permaneceu quase constante com valor próximo de 6,5 dB, indicando que a antena manteve seu padrão de radiação na mesma direção, apesar do aumento da complexidade do fractal, mas o melhor resultado observado foi de 6,65 dB na iteração 3. O ganho diminuiu significativamente, com uma queda na iteração 1 de 3,72 dB para 0,5 dB, que consequentemente causou uma queda na eficiência, a qual teve seu valor decrescido levemente, porém o maior resultado de ganho quando aplicado o método do fractal, ocorreu na iteração 4 com valor de 1,74 dB. Enquanto, a eficiência se manteve constante a partir da iteração 2, e a mesma teve o resultado máximo de eficiência depois da modelagem com 58,35%.

3. CONCLUSÕES

No presente artigo foi projetada uma antena de 2 GHz, aplicado uma modelagem fractal baseada no Firat e realizado a simulação de quatro iterações na estrutura. Em seguida, foram apresentados os resultados da simulação, verificando coeficiente de reflexão, fator de miniaturização, razão axial, diagrama de radiação, ganho, diretividade e eficiência. Além disso, foi analisado que o fator de miniaturização teve um resultado significativo, sendo o maior valor de 20,874% na primeira iteração, destacando assim o potencial do modelo fractal como alternativa viável e eficiente para o desenvolvimento de antenas compactas em sistemas de comunicação modernos. Também, foi possível verificar que, no diagrama de radiação, a mudança mais considerável foi de 3,22 dB entre as iterações tanto no plano E como no plano H. O melhor resultado da diretividade analisado entre as iterações, foi de 6,65 dB na iteração 3. No caso do ganho, o maior resultado foi observado na iteração 4, com um valor de 1,74 dB. E por fim, os resultados de eficiência também foram relevantes para o estudo, com um valor máximo de 58,35% na iteração 2. Dessa forma, os resultados indicam que o uso de fractais baseados em Firat se mostra promissor para projetos de antenas de microfitas. Em vista disso, pela análise dos resultados obtidos recomenda-se a fabricação da antena com a nova modelagem apresentada e compará-la com os resultados medidos e simulados.

4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CHAVKA G.G. Beauty of fractals design of fractal antennas. 2007 6th International Conference on Antenna Theory and Techniques, Sevastopol, Ukraine, 2007, pp. 76-81, doi: 10.1109/ICATT.2007.4425120.
- [2] WERNER D.H.; GANGULY S. An overview of fractal antenna engineering research. IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 45, no. 1, pp. 38-57, Feb. 2003, doi: 10.1109/MAP.2003.1189650.
- [3] WERNER D.H.; HAUPT R.L.; WERNER P.L. Fractal antenna engineering: the theory and design of fractal antenna arrays. IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 41, no. 5, pp. 37-58, Oct. 1999, doi: 10.1109/74.801513.
- [4] ORAIZI H.; HEDAYATI S. Miniaturization of Microstrip Antennas by the Novel Application of the Giuseppe Peano Fractal Geometries. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 60, no. 8, pp. 3559-3567, Aug. 2012, doi: 10.1109/TAP.2012.2201070.
- [5] GURGEL N. et al. Miniaturização de antenas patch microstrip usando geometria fractal de Koch no plano de terra. 2021 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC) Fortaleza,

Brasil, 2021, pp. 1-3, doi: 10.1109/IMOC53012.2021.9624798.

- [6] AZARI A. A New Super Wideband Fractal Microstrip Antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 59, no. 5, pp. 1724-1727, May 2011, doi: 10.1109/TAP.2011.2128294.
- [7] YU Y.H.; JI C.P. Research of fractal technology in the design of multi-frequency antenna. 2011 China-Japan Joint Microwave Conference, Hangzhou, China, 2011, pp. 1-4.
- [8] CETER E.M.; POYRAZOGLU G. Optimization of Fractal Antennas for RFID and Wireless Communication. 2024 5th International Conference on Communications, Information, Electronic and Energy Systems (CIEES), Veliko Tarnovo, Bulgaria, 2024, pp. 1-5, doi: 10.1109/CIEES62939.2024.10811142.
- [9] SABBAN A. New Fractal Compact Printed Antennas. 2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, San Diego, CA, USA, 2017, pp. 2197-2198, doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2017.8073141.
- [10] SHRESTHA S. et al. Design of modified Sierpinski fractal based miniaturized patch antenna. The International Conference on Information Networking 2013 (ICOIN), Bangkok, Thailand, 2013, pp. 274-279, doi: 10.1109/ICOIN.2013.6496389.
- [11] YU Z. et al. An improved Koch snowflake fractal broadband antenna for wireless applications. 2017 IEEE 5th International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC-Beijing), Beijing, China, 2017, pp. 1-5, doi: 10.1109/EMC-B.2017.8260462.
- [12] TUNCER T.; DOGAN S.; SUBASI A. A new fractal pattern feature generation function based emotion recognition method using EEG. *Chaos, Solitons & Fractals*, vol. 144, 2021.
- [13] SILVA I. B. T. Silva et al. Miniaturization Effect of Firat Fractal on a Rectangular Microstrip Patch Antenna. In 20th Brazilian Symposium on Microwaves and Optoelectronics, 2022.
- [14] ARAÚJO A. L. M. et al. Firat Fractal Applied as Miniaturization Technique on Rectangular Microstrip Patch Antenna. 2023 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC). IEEE, 2023.
- [15] ARAÚJO A. L. M. et al. Firat-Based Circular Fractal: A Mathematic Description on Microstrip Patch Antenna. In 21th Brazilian Symposium on Microwaves and Optoelectronics, Bento Gonçalves, Sep. 2024.
- [16] POZAR, D. M., *Microwave Engineering*, 4th ed. John Wiley & Sons, United States of America, 2011.
- [17] ALA-LAURINATO J. et al. Reflection coefficient method for antenna radiation pattern measurements. 2015 European Radar Conference (EuRAD), Paris, France, 2015, pp. 285-288, doi: 10.1109/EuRAD.2015.7346293.
- [18] BALANIS, C. A. *Antenna Theory: Analysis and Design*. 3rd edn. John Wiley, Hoboken, 2005.
- [19] RAHMAN N.A.A. et al. Review of Circularly Polarized Dielectric Resonator Antennas: Recent Developments and Applications. 2022. *Micromachines* 2022, 13, 2178. <https://doi.org/10.3390/mi13122178>.
- [20] ZABIHI R.; VAUGHAN R. G. Practical accuracy of directivity, efficiency and gain from the spherical near field. 2016 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE), Vancouver, BC, Canada, 2016, pp. 1-5, doi: 10.1109/CCECE.2016.7726732.