

CAPÍTULO 5

PROJETO DE UM ARRANJO LOG-PERIÓDICO DE ANTENAS DE MICROFITA PARA SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO SEM FIO UTILIZANDO A CURVA FRACTAL DE MINKOWSKI NÍVEL 1

Data de submissão: 24/08/2024

Data de aceite: 01/11/2024

Elder Eldervitch Carneiro de Oliveira

Universidade Estadual da Paraíba
João Pessoa - PB

Pedro Carlos de Assis Júnior

Universidade Estadual da Paraíba
Patos – PB

Tales Augusto Carvalho de Barros

Universidade Federal da Paraíba
Campina Grande – PB

RESUMO: As antenas de microfita proporcionam ao pesquisador um leque grande de possibilidades de projeto de antenas e/ou arranjos de antenas planares e superfícies seletivas em frequência, com capacidade de operar em altas frequências, mantendo sua estabilidade e precisão, favorecendo sua construção em grande escala e para as mais diversas aplicabilidades na faixa que frequência das micro-ondas. A proposta desse artigo consiste no projeto de um arranjo de antenas de microfita log-periódico utilizando a curva fractal de Minkowski em sua 1º interação (nível 1), projetada para a frequência de operação de sistemas Wi-Fi em 2,44 GHz (faixa pertencente

a banda ISM - *industrial, scientific and medical*). Todo o estudo teórico foi realizado por intermédio do simulador comercial *Ansys Designer™*. No arranjo projetado, foi investigado o percentual de redução nas dimensões do protótipo proposto quando comparada com um arranjo com elementos patch retangular funcionando na mesma frequência de operação. O arranjo proposto foi excitado pela técnica de linha de microfita (segundo o modelo da linha de transmissão - TLM) obedecendo a escala logarítmica e teve seus parâmetros de espalhamento (parâmetros S) analisados em um analisador de rede vetorial por meio de medições experimentais. A linha de alimentação possui uma impedância de 50Ω e os parâmetros do arranjo medidos foram: a perda de retorno (RL), diagrama de radiação, impedância de entrada, coeficiente de onda estacionária (VSWR) e sua largura de banda (BW).

PALAVRAS-CHAVE: Arranjo de antenas, Micro-ondas, Comunicação sem fio.

ABSTRACT: Microstrip antennas provide researchers with a wide range of possibilities for designing antennas and/or planar antenna arrays and frequency-selective surfaces, with the capacity to operate at

high frequencies while maintaining stability and precision, favoring their construction on a large scale and for the most diverse applications in the microwave frequency range. The proposal of this article consists of the design of a log-periodic microstrip antenna array using the Minkowski fractal curve in its 1st interaction (level 1), designed for the operating frequency of Wi-Fi systems at 2.44 GHz (band belonging to the ISM band - industrial, scientific and medical). The entire theoretical study was carried out using the commercial simulator Ansys Designer™. In the designed array, the percentage of reduction in the dimensions of the proposed prototype was investigated when compared to an array with rectangular patch elements operating at the same operating frequency. The proposed array was excited by the microstrip line technique (according to the transmission line model - TLM) obeying the logarithmic scale and had its scattering parameters (S parameters) analyzed in a vector network analyzer through experimental measurements. The feed line has an impedance of 50Ω and the array parameters measured were: return loss (RL), radiation pattern, input impedance, standing wave coefficient (VSWR) and its bandwidth (BW).

KEYWORDS: Antenna Array, Microwave, Wireless Communication.

1 | INTRODUÇÃO

A utilização de antenas de microfita em sistemas de telecomunicações vem ganhando muito destaque em virtude das inúmeras aplicações possíveis dessa tecnologia, dentre as quais podemos citar: as redes de telecomunicações 4,5G e 5G, esta última amplamente implementada em território nacional no atual ano de 2024, bem como aplicações relacionadas a internet das coisas IoT (*internet of things*). Para que esses recursos possam funcionar de maneira adequada e de forma eficiente é interessante que os dispositivos transmissores e receptores de ondas eletromagnéticas sejam compactos, leves, que possam se adequar a vários tipos de superfícies e principalmente, que apresente um custo relativamente baixo sem perdas de desempenho.

Essas características vêm motivando e impulsionando as pesquisas envolvendo tecnologia planar e aplicações em altas frequências. Aliado a isso, as simulações computacionais e os mais diversos recursos de Tecnologia da Informação popularizou o uso de softwares comerciais (projetos de CAD – Desenho assistido por computador) poderosos que implementam em sua maioria métodos numéricos de onda completa na análise precisa de diversos dispositivos, auxiliando assim o pesquisador a desenvolver cada vez mais soluções tecnológicas que atendam as demandas científicas, voltando suas análises à aplicações nos mais diversos setores comerciais. (BALANIS, 1997).

Neste contexto, a busca por dispositivos cada vez menores e sem perda de desempenho vem impulsionando as pesquisas na área de telecomunicações e do eletromagnetismo aplicado com novos e melhores projetos de circuitos/dispositivos de micro-ondas aptos a operar em altas frequências.

O arranjo de antenas projetado (denominado de AM1) é capaz de funcionar em altas frequências, mais precisamente na faixa de frequência das micro-ondas em 2,44 GHz. A

análise numérica desses dispositivos foi toda ela realizada utilizando o simulador de onda completa (Ansoft Designer) anteriormente mencionado, que implementa o método dos momentos (MoM) na análise precisa do parâmetro de espalhamento (S11) associado ao arranjo proposto. A faixa de frequência de 2,44 GHz foi escolhida em virtude de pertencer a banda ISM (do inglês *industrial, scientific and medical*), o qual é não licenciada e livre para teste das mais diversas aplicações envolvendo a tecnologia de microfita e demais estruturas planares.

2 | GERAÇÃO DA CURVA FRACTAL DE MINKOWSKI NÍVEL 1

A geometria fractal é um campo fascinante das matemáticas que explora formas e estruturas irregulares, complexas e fragmentadas. Ao contrário das formas geométricas tradicionais, como círculos, triângulos ou quadrados, os fractais têm uma característica especial chamada auto semelhança, ou seja, suas partes replicam o padrão da estrutura inteira em várias escalas. Pesquisada inicialmente pelo matemático francês Benoit Mandelbrot na década de 70, baseado em observações de figuras exóticas encontradas na natureza, onde Mandelbrot explicou que era possível obter novas figuras a partir de outras figuras complexas por meio da auto similaridade (MANDELBROT, 1983).

Principais Características da Geometria Fractal:

Auto-semelhança: Como mencionado, uma das características mais marcantes dos fractais é que suas partes são semelhantes ao todo, independentemente da escala em que são observadas. Isso significa que, se você ampliar uma pequena porção de um fractal, verá a mesma estrutura que observaria em uma visão mais ampla.

Dimensão Fractal: Em geometria clássica, a dimensão de uma linha é 1, de uma superfície é 2, e de um volume é 3. No entanto, fractais podem ter dimensões fracionárias, refletindo sua complexidade. Por exemplo, o conjunto de Cantor, uma linha fractal, pode ter uma dimensão entre 0 e 1, dependendo do método de construção.

Complexidade Infinita: A complexidade de um fractal aumenta à medida que você o examina em escalas cada vez menores. Em outras palavras, não importa o quanto você amplie, sempre haverá mais detalhes. Isso leva a uma beleza intrincada e uma complexidade infinita.

Pesquisadores como Puente, et al. (1998) e COHEN (1997) foram pioneiros no emprego dessa geometria em projetos de antenas de microfita, fazendo uso de suas propriedades atrativas a esse tipo de tecnologia planar.

A curva fractal de Minkowski foi a utilizada no projeto do arranjo log-periódico de antenas de microfita utilizando o fractal de Minkowski nível 1 proposto neste trabalho, onde a mesma pode ser obtida de forma recursiva por meio de 8 (oito) transformações afins $q_i : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$, entre rotação e translação, determinado pela equação (1) (OLIVEIRA, 2008), (MANDELBROT, 1991). As quatro transformações fazem a contração de $1/3$; q_2 faz uma

rotação de $-\pi/2$ rad e uma translação de uma unidade para a direita; q3 faz uma rotação de $\pi/2$ rad, uma translação de $3/2$ unidades para a direita; q4 executa uma translação de 2 unidades para a direita (OLIVEIRA, 2008), dada pela equação (1).

$$qi(x, y) = \frac{1}{4} \begin{pmatrix} \cos(\theta i) & -\sin(\theta i) \\ \sin(\theta i) & \cos(\theta i) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} ei \\ fi \end{pmatrix} \quad (1)$$

3 I METODOLOGIA EMPREGADA E ESTRUTURA DO ARRANJO DE ANTENAS COM O FRACTAL DE MINKOWSKI PROPOSTO

A geometria fractal de Minkowski de nível 1 foi utilizada para projetar um arranjo log-periódico de antenas patch de microfita para a faixa de frequência das micro-ondas em 2,44 GHz (OLIVEIRA, 2008). O arranjo projetado foi denominado de arranjo AM1, consistindo de três elementos patches ressonantes quando excitados por um gerador de micro-ondas em sua porta de entrada por meio de um conector SMA de 50Ω . Para que o projeto do arranjo AM1 fosse possível, inicialmente a curva fractal de Minkowski (ver Figura 1) foi adicionada as margens radiante e não radiante de um arranjo log-periódico nível 0 (AKR0) já projetado e conforme descrito em Costa et al. (2014) e mostrado na Figura 2.

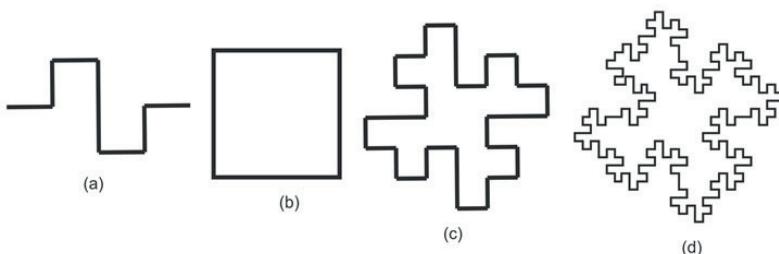


Figura 1 – Geração da curva fractal de Minkowski. (a) curva geradora; (b) elemento inicial (nível 0); (c) Fractal de Minkowski nível 1 e (d) Fractal de Minkowski nível 2.

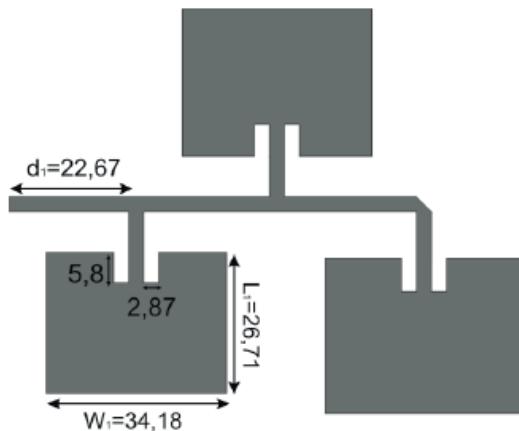


Figura 2 – Arranjo log-periódico nível 0 (AKR0).

Fonte: Costa et al., 2014

Onde o comprimento do elemento patch é dado por W_n , a largura dos elementos patches é dado por L_n e o espaçamento entre eles é dado por d_n . As demais medidas crescem em uma escala logarítmica por um fator constante de 1,05. Toda a estrutura foi construída em um material de baixo custo, neste caso utilizou-se a fibra de vidro (FR4), com uma espessura (h) de 1,5 mm e uma constante dielétrica (ϵ_r) de 4,4. As dimensões iniciais do projeto do arranjo AM1 foram obtidas por meio das equações do modelo da linha de transmissão (TLM) descrito em Balanis (1997), conforme equações (2) – (4).

$$F_r = \frac{c}{2(L + \Delta L)\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (2)$$

$$\Delta L = 0,412 \frac{\epsilon_{eff} + 0,3}{\epsilon_{eff} + 0,3} x \frac{W/h + 0,264}{W/h + 0,8} \quad (3)$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r + 1}{2} x \left(1 + 12 \frac{h}{W}\right)^{-1/2} \quad (4)$$

Onde, F_r é a frequência de ressonância, ΔL é o comprimento Frings e o ϵ_{eff} é a permissividade elétrica efetiva. As dimensões obtidas por meio desse conjunto de equações serviram de ponto de partida para o projeto de um arranjo log-periódico nível 0 e posteriormente após a aplicação da curva Minkowski nível 1. Dessa forma foi possível obter o arranjo log-periódico proposto, conforme mostrado na Figura 3.

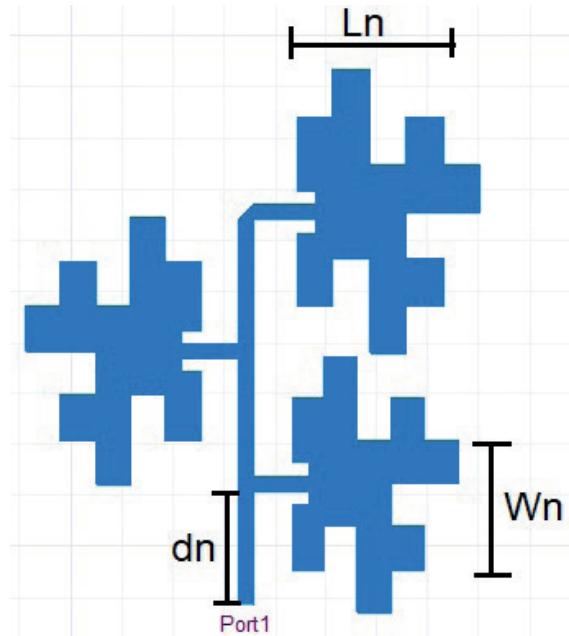


Figura 3 – Estrutura do Arranjo log-periódico fractal de Minkowski nível 1 (AM1).

Esta propriedade do fator de escala R, indicará que o arranjo projetado apresentará as mesmas características de radiação em todas as frequências de ressonâncias que tem como base o fator R. Para a proposta do arranjo log-periódico fractal de Minkowski nível 1, o fator R foi considerado constante e igual 1,05, sendo um arranjo formado por três elementos adjacentes, em um arranjo de antenas log-periódica. Os demais elementos foram dimensionados apresentando por base as dimensões do elemento anterior. Conforme mostra a equação (5).

$$R = \frac{Ln+1}{Ln} + \frac{Wn+1}{Wn} + \frac{dn+1}{dn} \quad (5)$$

Um protótipo de arranjo de antenas fractal nível 1 foi construído (ver Figura 4) e teve seus parâmetros eletromagnéticos medidos em um analisador de rede vetorial (modelo ZVB14 Rohde & Schwarz).

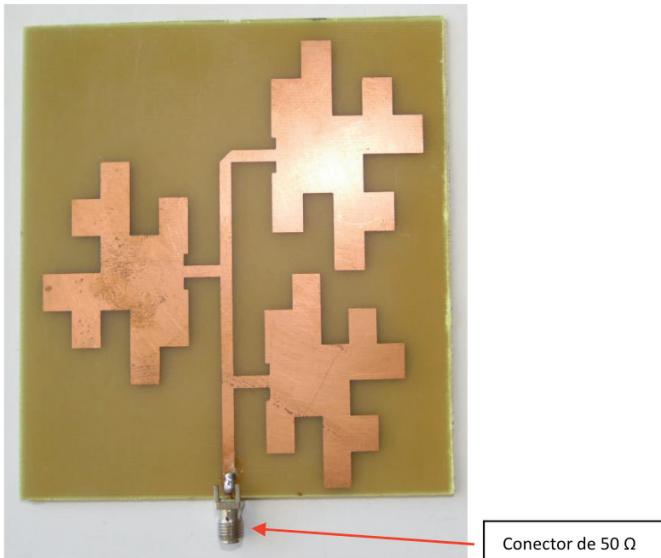


Figura 4 – Estrutura do Arranjo log-periódico fractal de Minkowski nível 1 (AM1) construído.

Um fato observado no projeto do arranjo AM1 é que devido ao uso da curva de Minkowski nível 1 (Figura 1c) acabou por aumentar o comprimento elétrico do arranjo proposto, o que consequentemente segundo a relação física onde $c = \lambda / F$, fez com que a frequência do dispositivo ressoasse em um nível inferior ao desejado que é a frequência em 2,44 GHz, devido a isso se faz necessário um ajuste nas dimensões do arranjo AM1 de modo a trazer a frequência fundamental para a faixa de 2,44 GHz, resultando assim em uma nova estrutura capaz de funcionar na frequência de projeto desejada de 2,44 GHz. Isso é possível de se conseguir ao aplicarmos um fator de compressão (CF) as dimensões do arranjo AM por meio do cálculo desse fator mostrado na equação (6) proposto por

$$CF = 100\% - ((Fr(GHz)/2,44 (GHz)) \times 100\%) \quad (6)$$

O uso do fator de compressão resultou em novas dimensões para o arranjo de antenas AM1 proposto, acarretando dessa forma em um novo dispositivo com dimensões inferiores, o qual denominamos de arranjo log-periódico miniaturizado (AM1 miniaturizado), onde o mesmo foi re-projetado para ressoar na frequência de projeto desejada em 2,44 GHz. Esse arranjo miniaturizado apresentou uma redução em suas dimensões de aproximadamente 45% quando comparada as dimensões do arranjo AM1 inicialmente projetado. As dimensões em milímetros do arranjo AM1 miniaturizado são mostrados na Tabela 1.

Elemento n	Dimensão dn	Dimensão Wn	Dimensão Ln
1	12,5 mm	18,8 mm	14,69 mm
2	13,1 mm	19,73 mm	15,42 mm
3	13,75 mm	20,73 mm	16,19 mm

Tabela 1 - Dimensões do arranjo AM1 log-periódico miniaturizado.

A etapa final do procedimento metodológico empregado no projeto e construção do arranjo log-periódicos de antenas fractais consiste na etapa de medição de seus parâmetros eletromagnéticos (Parâmetros S) que foi realizado no analisador de rede vetorial na faixa de frequência entre 1 – 3 GHz. A faixa de frequência de 2,44 GHz foi a faixa utilizada pois se torna interessante por ser não licenciada e livre para teste em dispositivos de micro-ondas.

As dimensões iniciais obtidas foram: $dn = 22,67$ mm; $Wn = 37,7$ mm e $Ln = 29,9$ mm corresponde as dimensões do arranjo AKR0 proposto em Costa, 2014, o qual serviu de ponto de partida para o projeto de arranjo log-periódico fractal de Minkowski nível 1. O comprimento de dn que corresponde a linha de excitação foi considerado meio comprimento de onda guiado ($\lambda_g / 2$) na frequência de projeto desejada.

4 | RESULTADOS SIMULADOS E MEDIDOS PARA A ANTENA PROPOSTA

O parâmetro de espalhamento S_{11} é um resultado que mostra o poder de acoplamento da energia transmitida na linha de microfita que passa integralmente ao elemento irradiador, denominado patch irradiante. Dessa forma ele é calculado por meio do seu coeficiente de reflexão, dado pela equação (7) (BALANIS, 1997), Garg et al., 2001.

$$RL = -20\log |S_{11}| \quad (7)$$

O primeiro resultado do projeto consiste na medida da relação entre as potências incidentes e refletidas no conector do arranjo de antenas. O resultado da Figura 5 mostra uma comparação entre os resultados numérico e medido obtidos para o arranjo AM1 proposto.

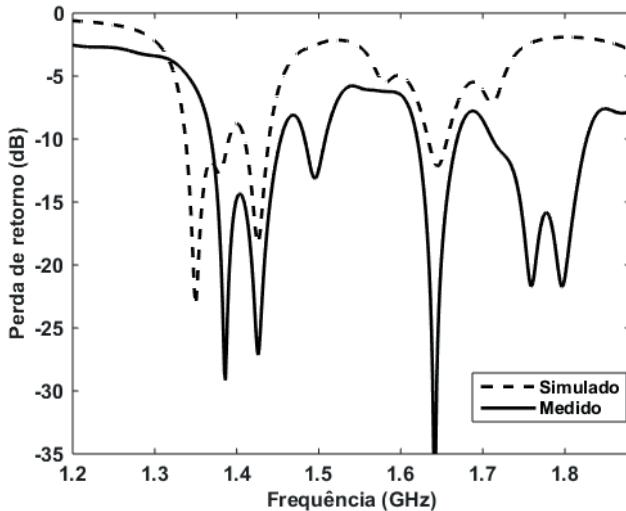


Figura 5 – Resultado de perda de retorno para o arranjo AM1 proposto.

Desse resultado é possível observar um comportamento multi banda, com três regiões de ressonâncias para o arranjo AM1. Uma boa concordância entre os resultados simulado e medido foram alcançados, onde o resultado medido apresentou três ressonâncias em 1,38 GHz, 1,64 GHz e 1,75 GHz, respectivamente.

As faixas de frequência das ressonâncias apresentaram as seguintes larguras de bandas: $BW1 = 80$ MHz; $BW2 = 50$ MHz e $BW3 = 100$ MHz. Os resultados simulados e medido apresentaram uma boa concordância entre si, com baixas perdas de retorno (valor abaixo de -10 dB), o que caracteriza um bom casamento de impedância para a estrutura analisada.

Por sua vez, a Figura 6 mostra o resultado de perda de retorno para o arranjo AM1 miniaturizado após a aplicação do fator de compressão (ver equação 5) com uma redução de 45% nas dimensões do arranjo AM1.

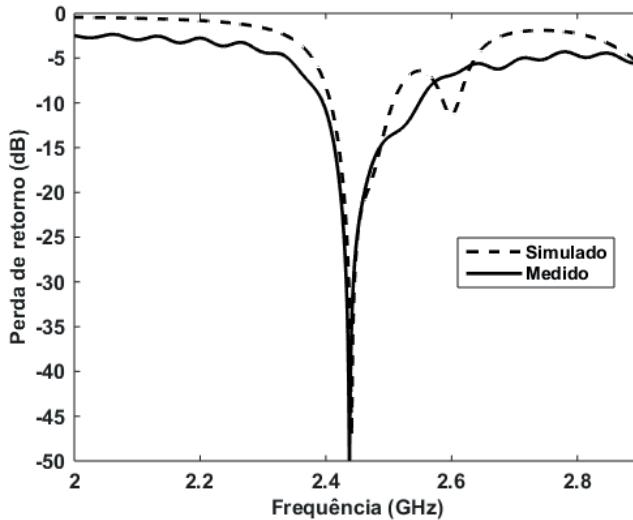


Figura 6 – Resultado de perda de retorno para o arranjo AM1 miniaturizado proposto.

Desse resultado é possível observar uma excelente concordância entre os resultados simulado e medido. A baixa perda de retorno obtida caracteriza um bom casamento de impedância para essa estrutura, onde a mesma apresentou uma frequência de ressonância em 2,44 GHz e uma largura de banda em -10 dB de 100 MHz, ou seja, essa estrutura se mostrou propícia a aplicações em dispositivos móveis para a faixa de 2,44 GHz atingindo o mínimo de largura de banda requerida para aplicações que é de uma largura de banda de 83,5 MHz (ANATEL, 2024).

O diagrama de radiação 2D e 3D para o arranjo AM1 miniaturizado são mostrados da Figura 7, onde é possível observar um diagrama sem deformações e com características diretivas. No diagrama 2D, podemos observar larguras de feixes de meia potência não simétricas (49,04 graus e 46,01 graus), isso aconteceu devido aos dois elementos patches ressonantes da estrutura. Por sua vez, o diagrama de irradiação 3D nos mostra que o arranjo AM1 miniaturizado apresentou um ganho de 5,71 dB na região de máxima radiação (região de campo distante).

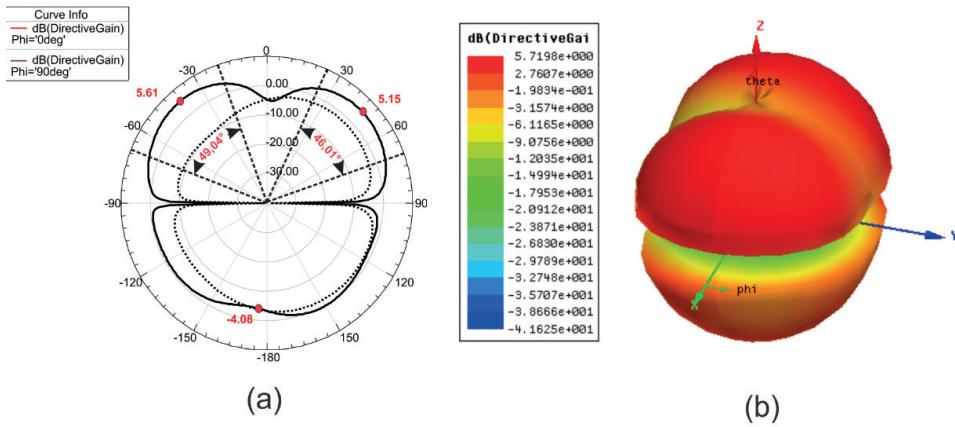


Figura 7 – Diagrama de radiação 2D e 3D para o arranjo AM1 miniaturizado proposto.

A Figura 8 mostra a distribuição de corrente nos patches irradiante da antena AM1 proposta. Devido à natureza não simétrica dos elementos patches baseadas no fractal de Minkowski, foi possível observar um comportamento diferente da energia nos elementos, onde no primeiro elemento patch a radiação se concentrou mais na metade superior do elemento, o que por sua vez, no segundo elemento a concentração da energia se deu na parte inferior do patch.

Outro parâmetro importante na análise de antenas e arranjo de antena de microfita é o coeficiente de onda estacionária (VSWR). Ele consiste na medida da energia que volta a fonte geradora por meio de ondas estacionárias na linha de alimentação, o que muitas vezes acontece entre um descasamento de impedância entre a linha de alimentação e o elemento patch (BALANIS, 1997).

O VSWR é dado pela razão entre os coeficientes de reflexão das ondas incidentes e refletidas no terminal da fonte gerada do sinal de micro-ondas. A Figura 9 mostra o resultado medido do coeficiente de onda estacionária (VSWR) para o arranjo AM1 miniaturizado.

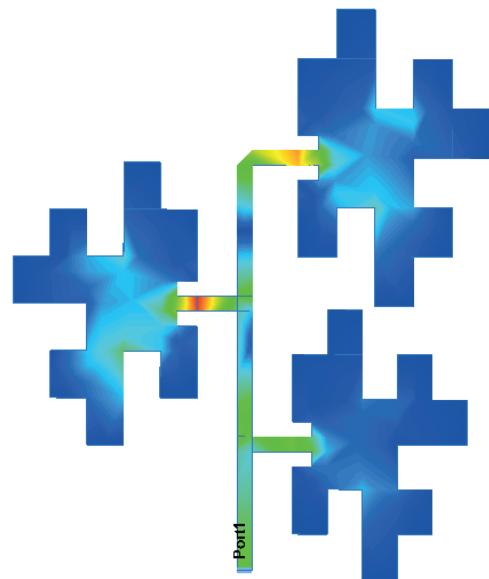


Figura 8 – Distribuição da densidade de corrente de superfície para o arranjo AM1 miniaturizado proposto.

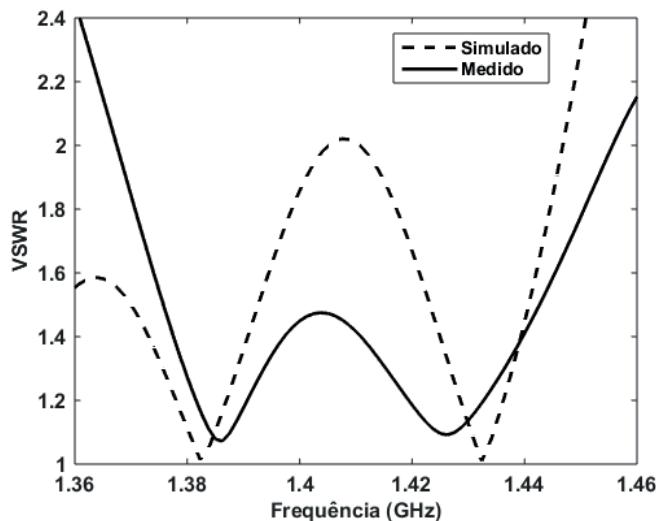


Figura 9 – Resultado da curva de VSWR para o arranjo AM1 miniaturizado.

Desse resultado podemos observar um valor de VSWR igual a 1,02 para o resultado simulado e um valor de 1,08 para o resultado medido. Ambos os valores se encontram abaixo da condição limite para um bom funcionamento da antena, o qual corresponde a um valor de VSWR igual a 2,0 mostrado uma boa concordância entre si. Todos os resultados obtidos para o arranjo de antenas AM1 log-periódico miniaturizado se encontram resumidos na Tabela 2.

Resultados	Arranjo AM1 mini	
	Simulado	Medido
Frequência de ressonância (F_r)	2,44 GHz	2,44 GHz
Perda de retorno (RL)	-47,0 dB	-50,0 dB
Largura de banda (BW)	100 MHz	140 MHz
Largura de banda percentual (BW%)	4,1%	6,15%
VSWR	1,02	1,08
Ganho	5,71 dB	—

Tabela 2 – Resultados simulados e medidos para o arranjo de antenas AM1 log-periódico miniaturizado proposto.

5 | CONCLUSÃO

Neste artigo foi proposta a modelagem e construção de um arranjo de antenas patches de microfita para a faixa de frequência das micro-ondas, mais precisamente para a banda ISM em 2,44 GHz. Para isso foi feito uso da geometria fractal de Minkowski nível 1 no projeto dos elementos irradiantes do arranjo proposto. O arranjo de antenas de microfita foi projetado baseado na escala logarítmica para o espaçamento entre seus elementos irradiantes pelo fator de 1,05 (Costa, 2014). A estrutura como um todo foi excitada pela técnica de linha de microfita e seu elementos patches foram desenhados utilizando a curva de nível 1 do fractal de Minkowski.

O arranjo AM1 miniaturizado teve suas dimensões reduzidas em 45% após o cálculo realizado pelo fator de compressão dado pela equação (5), quando comparado a um arranjo de antenas patches retangulares convencionais, o que é considerado uma ótima redução de dimensão para aplicações em dispositivos móveis. Os resultados mostraram uma ótima concordância entre simulação e medição, validando assim o projeto de arranjo proposto. O arranjo miniaturizado funcionou perfeitamente na frequência de projeto desejada que foi de 2,44 GHz e apresentou uma largura de banda de 140 MHz, muito superior ao mínimo desejado para aplicações em sistema de comunicação sem fio, que é de 83,5 MHz.

REFERÊNCIAS

- BALANIS, C. A. **Antenna theory-analysis and design**, 2nd ed. USA: John Wiley & Sons, 1997.
- Ansoft Designer (part of ANSYS Inc.) [Online]. Available: www.ansoft.com.
- MANDELBROT, Benoit. **The Fractal Geometry of Nature**, New York: W. H. Freeman, 1983.
- 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, pp. 517-524, 1998.
- COHEN, N. **Fractal antenna applications in wireless telecommunications**, Proceedings of Electronics Industries Forum of New England, pp. 43-49, 1997.

OLIVEIRA, E. E. C. **Antenas de Microfita com Patch Quase-Fractal para Aplicações em Redes WPAN/WLAN**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

GARG, R.; BHARTIA, P.; BAHL, I.; ITTIPIBOON, A. **Microstrip Antenna Design Handbook**, Boston, USA: Artech House, Inc., 2001.

COSTA, J. A. S.; VIEIRA, M. S.; OLIVEIRA, E. E. C; ASSUNÇÃO, A. G. **Projeto e Análise de um Arranjo Log-periódico de Antenas Quase-fractais para a Banda 2,44 GHz (IEEE 802.11 b/g)**. 16º SBMO - Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica e 11º CBMag - Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo (MOMAG 2014), 2014.

ANATEL. Agência Nacional de Telecomunicações. Disponível em: <https://www.gov.br/anatel/pt-br/regulado/espectro>. Acesso em: 23 de Ago. 2024.

MORETTI, Isabella. “Regras da ABNT para TCC: conheça as principais normas”. 2017. Disponível em: <<https://viacarreira.com/regras-da-abnt-para-tcc-conheca-principais-normas>>. Acesso em: 23 de Ago. 2024.