

Utilização De Estrutura PBG Quase-Periódica Baseada Em Azulejo De Penrose No Projeto De Antenas De Microfita

Sebastião Ferreira Baracho Neto
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica e de Computação
Universidade Federal do Rio Grande do
Norte
Natal, Brasil
sebastiao.baracho.017@ufrn.edu.br

José Patrocínio da Silva
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica e de Computação
Universidade Federal do Rio Grande do
Norte
Natal, Brasil
jose.patrocinio@ufrn.edu.br

Idalmir De Souza Queiroz Júnior
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica
Universidade Federal Rural do Semi-
Árido
Mossoró, Brasil
idalmir@ufersa.edu

Resumo — Este artigo apresenta o projeto e a análise de uma antena de microfita com estrutura PBG (Photonic Band Gap) baseada no padrão quase periódico de Penrose. A antena foi projetada em substrato FR4 ($\epsilon_r = 4,4$) e utiliza furos de ar no substrato para obter melhores resultados nos parâmetros da antena. O uso de um PBG quase periódico inspirado em Penrose trouxe melhoras na resposta do coeficiente de reflexão, alteração na concentração de campo elétrico, na distribuição das correntes de superfície, uma melhora no ganho da antena, além de obter atenuação nos modos ressonantes superiores.

Palavras-Chave — Azulejo de Penrose, PBG, Antena de Microfita, Padrão Quase-periódico

I. INTRODUÇÃO

Em 1987, Yablonovitch reportou que estruturas com variações espaciais periódicas no índice de refração poderiam, em certas condições, apresentar uma faixa de frequências na qual não haveria propagação de ondas eletromagnéticas. A essa faixa foi denominada de Photonic Band Gap (PBG) [1]. As estruturas PBG são redes artificiais que atuam como bandas de energia existentes em átomos de rede cristalina e, ajustando as dimensões da estrutura cristalina, pode-se controlar a propagação de modos eletromagnéticos. Essa característica torna possível projetar novos tipos de antenas e outros dispositivos para uso em sistemas de comunicação na frequência de micro-ondas [2].

O uso de redes de furos periódicas é demonstrado por [2] e [3]. Em [4], o uso do PBG é trabalhado em conjunto com a aplicação de diferentes materiais, como a poliamida, em furos no substrato, com o objetivo da melhora do ganho da antena. Já no estudo apresentado por [5], estruturas quase periódicas, baseadas no azulejo de Penrose, foram aplicadas em fibras ópticas, as quais demonstraram uma alta sensibilidade, possibilitando o uso dessas em detecção plasmática.

De forma a contribuir com o campo de pesquisa, esse trabalho se propõe a desenvolver um PBG baseado no azulejo de Penrose, introduzindo furos no substrato da antena e preenchendo com ar para trazer atenuação nos modos ressonantes superiores em uma antena de microfita de patch retangular.

II. DESENVOLVIMENTO DA ANTENA

A. Dimensionamento do Patch

Com o auxílio do *software ANSYS High Frequency Structure Simulator (HFSS)*, Release 2024.1, foi simulada uma antena de microfita na faixa de frequência de 2,45 GHz. Para o dimensionamento do *patch* foram então aplicadas as fórmulas conhecidas na literatura para os patches, considerando a frequência de projeto que esperava-se atingir de 2,45 GHz. As equações (1) e (2) se referem ao método da linha de transmissão para o cálculo dos parâmetros da antena retangular.

$$W = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (1)$$

$$L = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_r}} \quad (2)$$

Onde W representa a largura do patch, L é o comprimento do patch, c é a velocidade da luz no espaço livre e f_r é a frequência de ressonância desejada, e ϵ_r a permissividade relativa do substrato. As dimensões geradas foram de $W = 38,04$ mm e $L = 30,94$ mm. Para realizar o casamento de impedância foram adicionadas inserções no patch, utilizando-se de uma técnica bastante difundida na literatura, conhecida como *inset feed* (inserção de alimentação). Para obter uma impedância de entrada igual a 50Ω , as inserções tiveram profundidade de $y_o = 7,98$ mm e largura de $g = 3,6$ mm. A linha de alimentação teve comprimento $L_f = 15,50$ mm e largura $W_f = 3,10$ mm. A largura e comprimento do plano de terra foram respectivamente $L_g = 60$ mm e $W_g = 60$ mm. O modelo pode ser visto na Fig. 1.

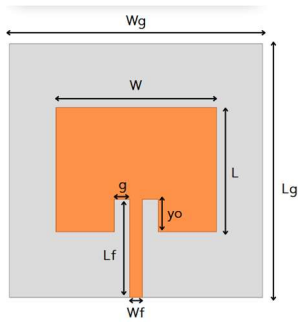


Fig. 1 – Antena de Microfita

B. Configuração da Simulação

No ambiente de simulação do ANSYS *High Frequency Structure Simulator* (HFSS), *Release 2024.1*, a antena foi excitada por uma porta de alimentação de 50Ω posicionada na extremidade da linha de microfita, para isso foi utilizada a porta tipo *Lumped Port*. As fronteiras externas do domínio computacional foram definidas como *Radiation Boundary*, de modo a representar a propagação em espaço livre e minimizar reflexões artificiais, para isso foi construída uma caixa posicionada a $\lambda/4$ de onda da antena. Para o substrato utilizado foi o FR4, com permissividade relativa $\epsilon_r = 4,4$, espessura de 1,6 mm e tangente de perdas $\tan\delta = 0,02$, para a parte metálica foi utilizada cobre com espessura de 35 μm . Todas as simulações foram realizadas na faixa de 1 GHz a 5 GHz.

III. AZULEJO DE PENROSE

A utilização de uma estrutura quase periódica no substrato de uma antena de microfita altera o coeficiente de reflexão, a largura de banda, os modos ressonantes superiores e o ganho. A distribuição de furos circulares no substrato, inspirada no azulejo de Penrose, gera padrões quase periódicos com simetria de ordem cinco, favorecendo propriedades eletromagnéticas únicas devido ao espalhamento de Brillouin.

Neste projeto, os furos foram organizados em camadas circulares concêntricas, explorando a complexidade geométrica e as simetrias locais da geometria. A estrutura apresenta simetria rotacional de ordem cinco e simetria de reflexão, o que pode favorecer modos eletromagnéticos específicos, abrir bandgaps ou aumentar o acoplamento entre modos. A Fig. 2 ilustra essa distribuição quase periódica e sua simetria radial.

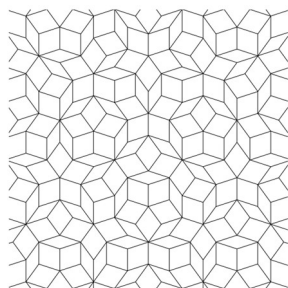


Fig 2 – Parte de um azulejo de Penrose [5]

Para configurar adequadamente a estrutura inspirada no azulejo de Penrose, é fundamental que ela não apresente simetria translacional, ou seja, não deve existir um vetor de translação que a torne idêntica a si mesma. Em vez disso, a

estrutura deve ser auto similar, de modo que os mesmos padrões geométricos se repitam em diferentes escalas espaciais. Além disso, é essencial que ela exiba simetria rotacional, particularmente de ordem cinco, ao longo de toda a sua extensão, uma característica marcante do azulejo de Penrose [6]. A geometria proposta foi construída a partir de um pentágono regular de raio igual a 5 mm. Em cada um dos cinco vértices foi posicionado um furo circular com diâmetro de 2,2 mm, estabelecendo a primeira camada da estrutura quase-periódica. Em seguida, foi construído um segundo pentágono regular concêntrico com raio de 15 mm, rotacionado em relação ao primeiro de forma a formar um pentágono invertido, preservando a simetria rotacional de ordem cinco característica das estruturas inspiradas no azulejo de Penrose. A partir dessa configuração inicial, novos furos foram adicionados por meio de operações sucessivas de rotação e reflexão, respeitando a distribuição radial da geometria. Os furos pertencentes às camadas externas foram definidos com diâmetro de 2,6 mm, resultando em um arranjo final composto por 45 furos distribuídos de forma quase-periódica sobre o substrato da antena, conforme ilustrado na Fig. 3.

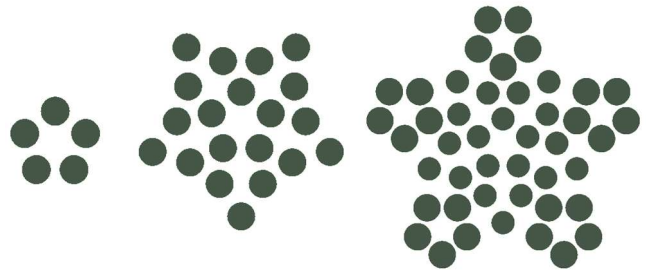


Fig. 3 – Construção do azulejo de Penrose

Para o posicionamento da rede de furos no substrato foi utilizada a ferramenta *Optimetrics* do HFSS para definir a melhor posição da rede. O objetivo da otimização foi minimizar o coeficiente de reflexão em 2,45 GHz variando a rede de furos em relação ao *inset feed*, o centro da rede coincidiu com o centro do *inset feed*. Como resultado, obteve-se uma malha composta por 36 furos circulares, os furos que não estavam dentro do substrato foram desconsiderados. Os furos do interior têm diâmetro de 2,2 mm e os furos exteriores com um diâmetro de 2,6 mm, distribuídos em um arranjo concêntrico e não periódico, conforme ilustrado na Fig. 4. Essa geometria visa induzir efeitos específicos na resposta eletromagnética da antena, explorando os benefícios das estruturas quase periódicas.

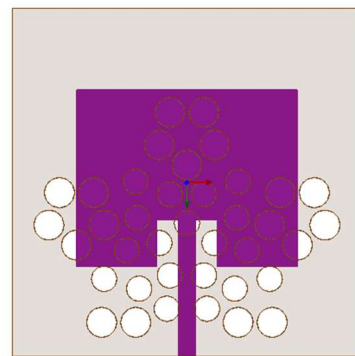


Fig. 4 – Rede de furos inspiradas no azulejo de Penrose

IV. RESULTADOS

A antena de microfita projetada inicialmente tem frequência de ressonância principal em 2,33 GHz com um coeficiente de reflexão (S_{11}) de -16,01 dB, o segundo modo ressonante opera em 3,74 GHz com -15,49 dB, o terceiro modo em 4,33 GHz com -13,65 dB e o quarto modo em 4,96 GHz com -18,86 dB. Com a aplicação do PBG inspirado nos *azulejos* de Penrose, a frequência de ressonância opera em 2,45 GHz e S_{11} de -34,71 dB, o segundo modo ressonante opera em 4,09 GHz com -21,08 dB. Ou seja, a aplicação do PBG trouxe uma melhora no valor de S_{11} na frequência principal e a filtragem de dois modos superiores como é demonstrado na Fig. 5.

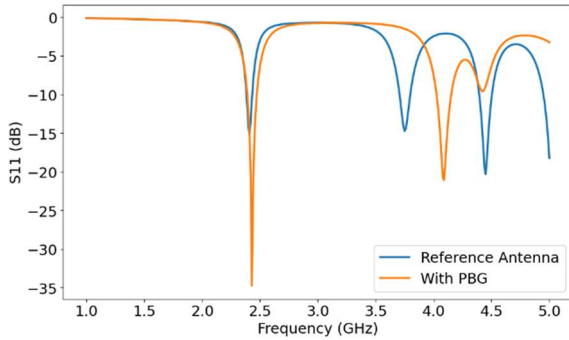


Fig. 5 – Coeficiente de reflexão (S_{11}) simulado

Além da resposta do coeficiente de reflexão, foram comparados também os valores do campo elétrico no patch, Fig. 6, corrente de superfície no patch, Fig. 7, e o ganho da antena, Fig. 8, com e sem a presença da estrutura PBG.

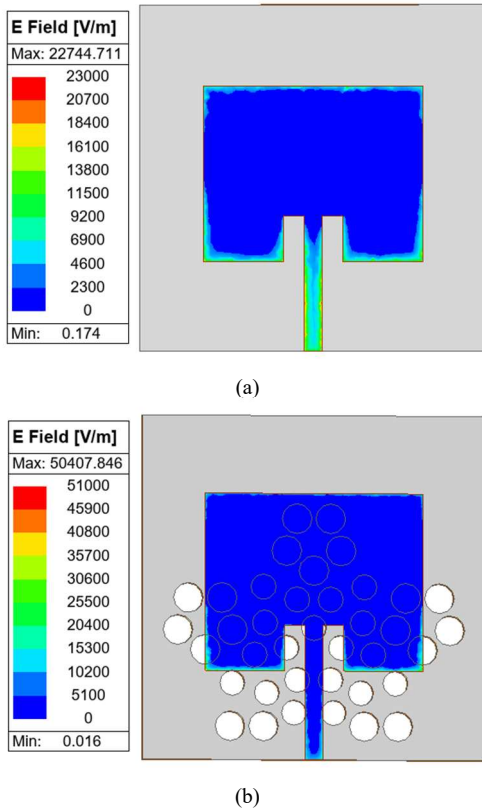


Fig. 6 – Campo elétrico (a) sem PBG e (b) com PBG

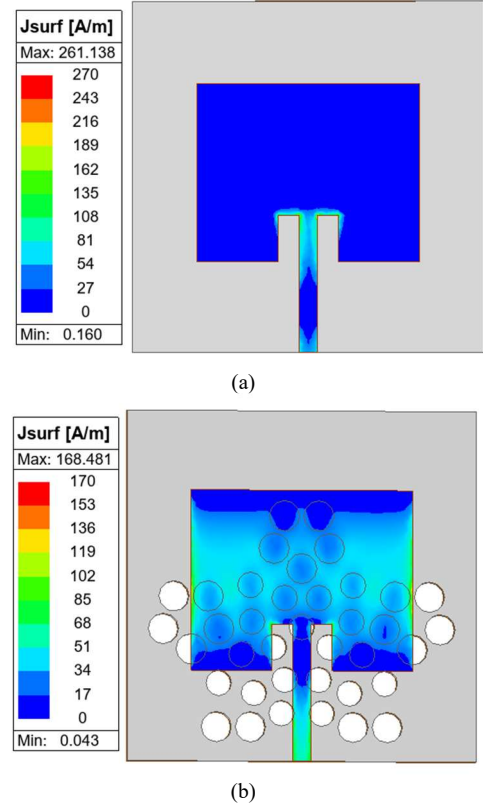


Fig. 7 – Corrente de superfície (a) sem PBG e (b) com PBG

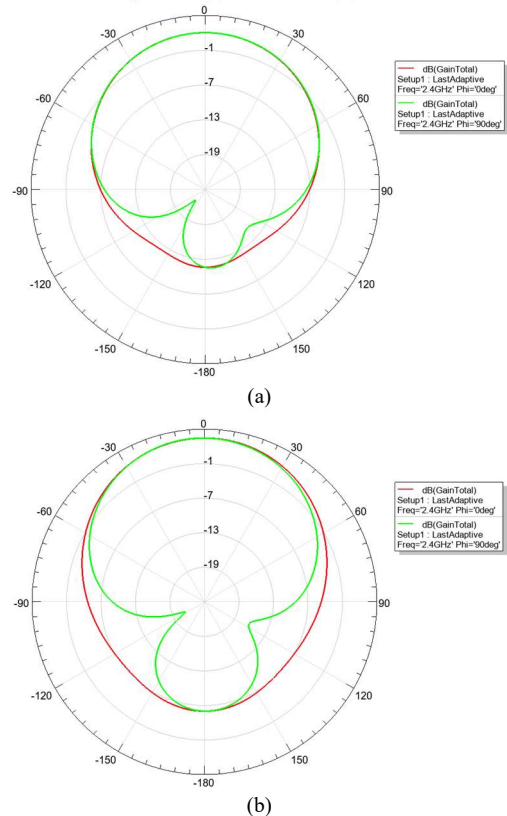


Fig. 8 – Ganho da antena (a) sem PBG e (b) com PBG

A remoção periódica do material dielétrico reduz localmente a permissividade efetiva do substrato, reduzindo a propagação de ondas superficiais e promovendo regiões de bloqueio parcial da propagação de ondas superficiais em determinadas frequências, comportamento característico de

estruturas do tipo PBG. A distribuição quase periódica favorece a atenuação seletiva de modos ressonantes superiores e o confinamento da energia irradiada na frequência fundamental. Como resultado, observa-se melhoria no coeficiente de reflexão e aumento do ganho da antena, indicando maior eficiência na radiação eletromagnética da estrutura proposta, sendo observado uma melhora no ganho da antena, na antena de referência o ganho era de 1,3 dBi, com a presença do PBG o ganho aumentou para 3,64 dBi.

Duas antenas foram construídas, uma com e uma sem o PBG, para isso foi utilizado uma CNC tipo Fresadora para obter os furos em uma placa de FR4. Após os furos, uma folha de cobre foi colocada sobre os furos, a placa foi corroida para que fique apenas a parte impressa do patch e a linha de microfita. Com o auxílio de um *Portable Vector Network Analyzer (LiteVNA)*, 50 kHz – 6,3 GHz, foi medido o coeficiente de reflexão (S_{11}) para verificar se a antena estava ressoando. Foi utilizada a faixa de 1 GHz a 5 GHz. A antena construída é demonstrada na Fig. 9. O coeficiente de reflexão comparando os valores é ilustrado na Fig. 10.

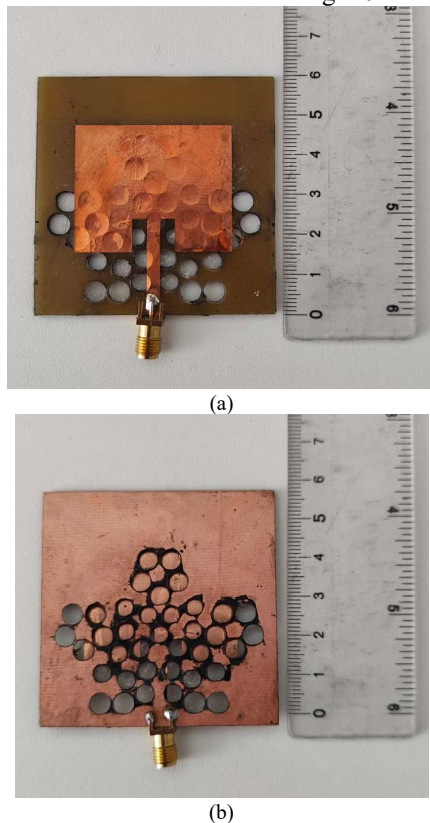


Fig. 9 – Antena com PBG construída (a) frente e (b) parte de trás

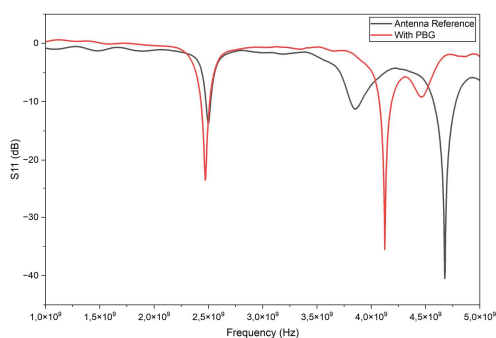


Fig. 10 - S_{11} do PBG construído

Para o modelo de antena de referência foi construída uma antena de *patch* retangular padrão sem o PBG. Com a inserção do PBG, a antena passou a ressoar em 2,47 GHz, com coeficiente de reflexão de -24,7 dB, e em 4,12 GHz, com -35,46 dB. Observa-se boa concordância com os resultados de simulação, além de uma melhora significativa na resposta da frequência de ressonância principal. Em relação à simulação, nota-se ainda uma melhora no parâmetro S_{11} no segundo modo ressonante, enquanto a frequência principal apresentou valores maiores de S_{11} .

V. CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi realizada uma análise de uma antena de microfita com introdução de defeitos no substrato, implementados na forma de furos circulares. A distribuição desses furos seguiu um arranjo quase periódico, inspirado no azulejo de Penrose, conhecido por sua autossimilaridade e simetria rotacional de ordem cinco. O objetivo principal da proposta foi aumentar a eficiência da antena, com ênfase na redução do coeficiente de reflexão e na atenuação de modos espúrios que impactam negativamente o desempenho eletromagnético da estrutura. A geometria otimizada permitiu a atenuação significativa de dois modos de ressonância superiores e reduziu o coeficiente de reflexão na frequência de 2,45 GHz para -24,7 dB, indicando excelente casamento de impedância nesse ponto de operação. Além disso a presença da geometria trouxe alterações nas distribuições de campo elétrico e corrente de superfície no patch, e uma melhora no ganho na antena. Esses achados reforçam o potencial da modelagem baseada nos padrões geométricos de Penrose para aplicações em antenas de alto desempenho e sensores eletromagnéticos, especialmente em contextos que demandam controle rigoroso sobre a resposta em frequência e supressão de interferências.

REFERÊNCIAS

- [1] YABLONOVITCH, E. **Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics**. Physical Review Letters, v. 58, n. 20, p. 2059–2062, May 1987.
- [2] PEREIRA, J. P. P. et al. **Microstrip antennas design based in periodic and quasiperiodic PBG symmetries**. Microwave and Optical Technology Letters, v. 57, n. 12, p. 2914–2917, 26 set. 2015.
- [3] FRANCISCO; SILVA. **Harmonic suppression using optimised hexagonal defected ground structure by genetic algorithm**. IET Microwaves Antennas & Propagation, v. 12, n. 10, p. 1645–1648, 10 abr. 2018.
- [4] LI, G. et al. **Design of a High-Gain and Tri-Band Terahertz Microstrip Antenna Using a Polyimide Rectangular Dielectric Column Photonic Band Gap Substrate**. Photonics, v. 11, n. 4, p. 307, 27 mar. 2024.
- [5] Jia, P. Yang, J. Yang, H. Ebendorff-Heidepriem, H. **Quasiperiodic Nanohole Array Plasmonic Sensors on Optical Fibers**. 2017, 4, SPIE Vol. 103323 103235X-1.
- [6] Hof A. **Percolation on Penrose Tilings**. Canadian Mathematical Bulletin. 1998;41(2):166-177. doi:10.4153/CMB-1998-026-0.
- [7] MONTEIRO, Francisco Magno Monteiro Sobrinho. **Estudo da Aplicação de Estruturas Quase Periódicas em Antenas de Microfita Baseada na Simetria de Penrose**. 2018. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural do Semiárido, Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação. Mossoró, 2018.