

INFLUÊNCIA DE UMA METASUPERFÍCIE NOS PARÂMETROS DE DESEMPENHO DE UMA ANTENA DE MICROFITA

Adelson Menezes Lima (UFRSA Campus Pau dos Ferros) E-mail: adelsonmlima@ufersa.edu.br
Náthalee C. de A. Lima (UFERSA Campus Pau dos Ferros) E-mail: nathalee.almeida@ufersa.edu.br
Humberto Dionísio de Andrade (UFERSA Campus Mossoró) E-mail: humbertodionisio@ufersa.edu.br
Ten. Eng. José Lucas Paiva da Silva (Base Aérea de Natal - BANT) E-mail: lucassilva_jls@hotmail.com

Resumo: Neste artigo, é proposta uma metasuperfície adaptada e inserida sobre uma antena de microfita. A estrutura consiste em um arranjo periódico de células dispostas em uma matriz por 4 x 4 unidades sobre um material dielétrico. Por se tratar de um metamaterial, a metasuperfície proposta modifica as propriedades eletromagnéticas do meio, influenciando os resultados obtidos. Dessa forma, a metasuperfície é capaz de fornecer uma irradiação de ondas eletromagnéticas, mantendo a integridade na alimentação da antena, sem a necessidade de ajustes. Além disso, a antena de microfita utilizada foi projetada para operar em 2,45 GHz. Por fim, observa-se uma boa concordância entre os resultados simulados, nos quais os parâmetros de desempenho analisados apresentam modificações em relação aos valores da antena padrão. Os dados também comprovam que o uso da metasuperfície consegue alterar e melhorar a largura de banda (LB).

Palavras-chave: Metasuperfície; Casamento de impedância; Largura de banda; Antena de microfita; Simulação computacional.

INFLUENCE OF A METASURFACE ON THE PERFORMANCE PARAMETERS OF A MICROSTRIP ANTENNA

Abstract: This article proposes an adapted metasurface inserted onto a microstrip antenna. The structure consists of a periodic array of cells arranged in a 4 x 4 matrix on a dielectric material. Being a metamaterial, the proposed metasurface modifies the electromagnetic properties of the medium, influencing the results obtained. Thus, the metasurface is capable of providing electromagnetic wave radiation while maintaining the integrity of the antenna feed without the need for adjustments. Furthermore, the microstrip antenna used was designed to operate at 2.45 GHz. Finally, a good agreement is observed between the simulated results, in which the analyzed performance parameters show modifications in relation to the values of the standard antenna. The data also confirm that the use of the metasurface can alter and improve the bandwidth (LB).

Keywords: Metasurface; Impedance matching; Bandwidth; microstrip antenna; Computer simulation

1. Introdução

As antenas de microfita (AMA) são amplamente utilizadas em diversos sistemas de comunicação sem fio e móvel, tornando-se um elemento essencial nesses sistemas. Nesse contexto, o desenvolvimento de projetos com estruturas compactas é essencial para atender aos requisitos de alto desempenho e integração em circuitos de micro-ondas na construção do sistema de uma antena ideal) (BALLANIS, 2005) e (AJEWOLE *et al.*, 2023). Um exemplo de tendências que já é aplicada, é a tecnologia 5G, que conecta bilhões de dispositivos à rede de comunicação com latência mínima, exigindo altas taxas de dados e maior confiabilidade (RENTAPALL *et al.*, 2024).

Diante disso, as AMAs apresentam características como estruturas planares, facilidade de produção, tamanho reduzido, baixo perfil, boa resistência mecânica e possibilidade de ajuste de frequência de operação, fatores que proporcionam grandes vantagens em

sistemas de comunicação (BALLANIS, 2005) e (AJEWOLE *et al.*, 2023). Além disso, a miniaturização dessas antenas desempenha um papel fundamental na melhoria de seu desempenho, mantendo sua funcionalidade e otimizando a conexão entre dispositivos. Entretanto, apesar de suas vantagens, as AMAs também apresentam limitações operacionais que despertam grande interesse da comunidade científica, devido aos desafios associados ao seu desempenho. Entre as principais restrições destacam-se a baixa eficiência, os reduzidos níveis de potência transmitida, menor largura de banda, o baixo ganho e os efeitos das ondas de superfície (EM) geradas no substrato (BALLANIS, 2005), (AJEWOLE *et al.*, 2023) e (ANDRADE *et al.*, 2023).

Em relação à largura de banda (LB), a escolha do tipo de antena pode representar um fator limitante dependendo da aplicação desejada. Isso ocorre porque LB fracionada de uma AMA normalmente tem uma variação entre 1% a 5%, sendo, portanto, classificadas como antenas de banda estreita, isto é, com largura de banda inferior a 10% da frequência fundamental. Entretanto, existem arquiteturas de AMAs que apresentam desempenho distinto dos modelos de banda estreita, fornecendo respostas em frequência com LBs fracionadas entre 10% a 50%. Entre essas configurações destacam-se as antenas dipolos, antenas de fenda e antenas de guia de onda tipo corneta (BALLANIS, 2005), (LIMA, 2020) e (ARAÚJO *et al.*, 2023).

Quanto às EM, estas contribuem para a formação de lóbulos secundários que irradiam em direções distintas à do lóbulo principal, consequentemente afetando o desempenho e o ganho da antena (ANDRADE *et al.*, 2023). Adicionalmente, outra característica é a propagação de ondas de superfície que aumenta a polarização cruzada da antena, limitando a sua utilização (ANDRADE *et al.*, 2023).

Dessa forma, com o intuito de minimizar essas limitações e garantir condições adequadas de operação, diferentes técnicas vem sendo empregadas, como uso de ressonadores dielétricos, aumento de espessura do material dielétrico, estruturas com multicamadas, estruturas com banda eletromagnética proibida do inglês *Electromagnetic Band-Gap* (EBG) (ANDRADE *et al.*, 2023). Como alternativa a essas abordagens, destaca-se a utilização de metasuperfícies integradas à geometria da antena. A inserção dessa camada adicional no dispositivo possibilita a otimização de parâmetros importantes, como frequência de ressonância, ganho e largura de banda (ANDRADE *et al.*, 2023). Essa camada pode ser construída com diferentes materiais e geometrias impressas, sempre pensando na eficiência das antenas. Conceitualmente, as metasuperfícies apresentam estruturas baseadas em metamateriais em que ocupam pouco espaço físico, proporcionando menos perdas e aumento de diretividade, devido à composição de dispersores ou aberturas em um padrão bidimensional (KETZAKI & YIOULTSIS, 2013), (ISLAM *et al.*, 2015), (SILVA, 2018), (KRZYSZTOFIK & CAO, 2018), (DAWAR *et al.*, 2019), (SILVA *et al.*, 2019) e (RENTAPALL *et al.*, 2024). Uma característica importante é sua capacidade de atuar como um condutor magnético artificial, proporcionando um aumento da largura de banda (RENTAPALL *et al.*, 2024).

Diante disso, as metasuperfícies têm demonstrado grande potencial na melhoria do desempenho de antenas de microfita, proporcionando avanços em parâmetros como largura de banda, casamento de impedância, eficiência, ganho e razão axial (SILVA, 2018), (SILVA *et al.*, 2019), (ARAÚJO *et al.*, 2023) e (SAHU *et al.*, 2025). Em razão desse benefícios, o uso de metasuperfícies vem ganhando destaque e despertando crescente interesse no desenvolvimento de sistemas de comunicação sem fio.

Neste contexto, este trabalho apresenta uma metasuperfície composta por células adaptadas, integrada a uma antena de microfita de baixo perfil para comunicações sem

fi. Por fim, são investigados os resultados obtidos para os principais parâmetros de desempenho da antena proposta.

2. Materiais e Métodos

Com o objetivo de apresentar a metodologia empregada neste trabalho, a Figura 1 ilustra, de forma resumida, o fluxograma do processo desenvolvido. Na sequência, cada etapa apresentada no fluxograma é descrita detalhadamente nas seções subsequentes. Além disso, conforme a Portaria CNPq nº 2.664/2026, este artigo foi elaborado com o suporte da ferramenta de Inteligência Artificial Gemini, sendo restrito a funções auxiliares e exclusivamente para estruturação do texto e gramatical.

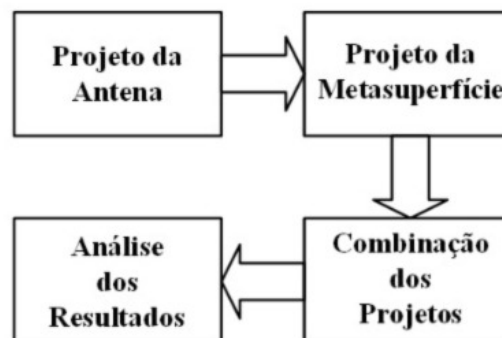


Figura 1 – Fluxograma da metodologia

Inicialmente, este estudo apresenta o projeto da antena de microfita padrão e seus cálculos para operar na frequência desejada de 2,45 GHz (SILVA, 2018) e (SILVA *et al.*, 2019). A partir desses cálculos, são determinados os parâmetros utilizados na modelagem computacional da antena. Em seguida, é proposta a inserção de uma camada dielétrica sobre a antena, composta por uma metasuperfície com células adaptadas, desenvolvida com base nos trabalhos de Silva (2018) e Silva *et al.* (2019). Posteriormente, as estruturas são combinadas respeitando distâncias específicas entre os elementos, com o objetivo de modificar as propriedades eletromagnéticas do sistema e aprimorar o desempenho da antena. Por fim, são apresentados e analisados os resultados obtidos por meio das simulações realizadas.

2.1. Projeto da Antena de Microfita

Uma antena de microfita padrão é constituída, basicamente, por duas superfícies condutoras paralelas separadas por um material dielétrico, denominado substrato. Em uma das faces encontra-se o elemento radiante (*patch*), geralmente confeccionado em cobre (L_p e W_p), disposto sobre o substrato. Na face oposta localiza-se o plano terra, também em cobre, com dimensões (L_g e W_g), conforme ilustrado na Figura 2 (BALLANIS, 2005), (SILVA, 2018) e (SILVA *et al.*, 2019). Além disso, a alimentação da antena é realizada por meio de uma linha de transmissão em cobre, de comprimento (L_0) e largura (W_0). A linha de alimentação constitui um elemento fundamental no projeto de antena de microfita pois é responsável pela conexão com o *patch*, devendo garantir a transferência eficiente das ondas eletromagnéticas entre as partes. Dessa forma, busca-se minimizar as reflexões do sinal de alimentação e maximizar a transferência de potência. Assim, um projeto inadequado da linha de alimentação pode

comprometer o desempenho da antena, alterando significativamente seus parâmetros de resposta (SILVA *et al.*, 2019).

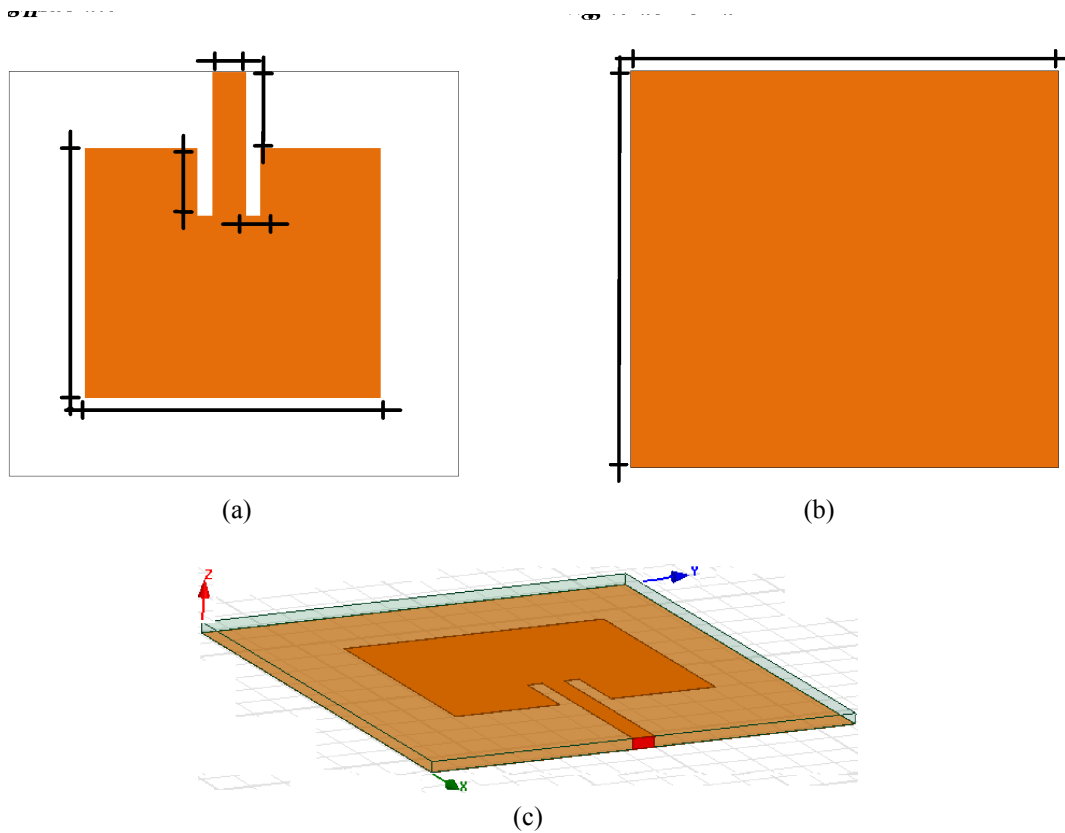


Figura 2 – Antena de microfita e suas dimensões (a) Parte superior, (b) Parte inferior e (c) Visão 3D

Diante disso, a antena foi projetada para aplicações na frequência de 2,45 GHz com substrato da *Rogers Corporation*, modelo RO4350, com permissividade relativa ($\epsilon_r = 3,66$), tangente de perda ($tg\delta = 0,004$) e espessura total de 1,542 mm (SILVA, 2018) e (SILVA *et al.*, 2019). As dimensões da antena foram determinadas a partir das equações disponíveis na literatura, sendo o comprimento (Lp) e a largura (Wp) obtidos a partir de Ballanis (2005), Hosain *et al.* (2010) e Hosain *et al.* (2019).

$$Wp = \frac{c}{2f_0\sqrt{(\epsilon_r + 1)/2}} \tag{1}$$

$$Leff = \frac{c}{2f_0\sqrt{\epsilon_{reff}}} \tag{2}$$

$$\Delta L = \frac{0,412h(\epsilon_{reff} + 0,3)(w_p/h + 0,3)}{(\epsilon_{reff} - 0,258)(w_p/h + 0,8)} \tag{3}$$

$$Lp = L_{reff} - 2\Delta L \tag{4}$$

$$fr = \frac{c}{2L\sqrt{\epsilon_r}} \tag{5}$$

Sendo L_{eff} o comprimento efetivo da antena, ΔL é a variação de comprimento, ϵ_0 é a permissividade elétrica no espaço livre, ϵ_{ref} é a constante dielétrica efetiva, μ_0 é a permeabilidade no espaço livre, v_0 é a velocidade das ondas eletromagnéticas no espaço livre, h a espessura do substrato, fr a frequência de ressonância, c é a velocidade das ondas eletromagnéticas no espaço livre, ϵ_r é a permissividade relativa.

Após a definição das dimensões do *patch*, fendas de alimentação foram inseridas, denominadas *Inset feed* (y_0), cujos parâmetros foram determinados conforme as formulações apresentadas por Ramesh e Yip (2003).

$$y_0 = 10^{-4} (0,001699\epsilon_r^7 + 0,13761\epsilon_r^6 - 6,1783\epsilon_r^5 + 93,187\epsilon_r^4 + 682,69\epsilon_r^3 + 2561,9\epsilon_r^2 - 4043\epsilon_r + 6697) \frac{L_p}{2} \tag{6}$$

Posteriormente, o comprimento (Lg) e a largura (Wg) do plano de terra foram determinados a partir das equações (7) e (8), conforme descrito por Hosain *et al.* (2019) e Lima (2020). Durante a aplicação dessas formulações, as relações de $6h$ e $8h$ foram ajustadas visando à sintonia da frequência de ressonância desejada, de acordo com os parâmetros estabelecidos neste trabalho.

$$Lg = 6h + Lp \tag{7}$$

$$Wg = 8h + Wp \tag{8}$$

Dessa forma, as dimensões obtidas para a antena foram sintetizadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Dimensões da antena de microfitas

Parâmetro	Valor (mm)
Comprimento do <i>patch</i> (Lp)	31,6
Largura do <i>patch</i> (Wp)	40,1
Comprimento do plano de terra (Lg)	65
Largura do plano de terra (Wg)	65,6
Linha de alimentação (L_0)	16,5
Largura da linha (W_0)	3,36
Comprimento do <i>inset feed</i> (y_0)	9,1
Largura do <i>inset feed</i> (g)	2,3

Fonte: Adaptado de Silva (2018) e Silva *et al.* (2019)

2.2. Projeto da Metasuperfície

As metasuperfícies são metamateriais e estruturas planares não encontradas na natureza, ou seja, um material artificial com características eletromagnéticas diferentes que podem modificar localmente a fase, a amplitude e a polarização da luz em transmissão ou reflexão (KETZAKI & YIOULTSIS, 2013), (ISLAM *et al.*, 2015), (DAWAR *et al.*,

2019), (KRZYSZTOFIK & CAO, 2018), (LIMA, 2020) e (RENTAPALL *et al.*, 2024).

Estruturalmente não apresentam espessura igual a zero, mas representam valores de espessura muito menor do que o comprimento de onda (KETZAKI; YIOULTSIS, 2013), (ISLAM *et al.*, 2015), (KRZYSZTOFIK & CAO, 2018) e (DAWAR *et al.*, 2019). Dessa forma, o material com as suas propriedades elétricas e magnéticas se comportam como metamaterial bidimensional (SANTOS, 2016).

No presente trabalho, as células unitárias são compostas por estruturas metálicas laminares em cobre com 0,05 mm de espessura, curvaturas internas de 45° e, formando um arranjo periódico. A partir dessa configuração, as dimensões das células foram modificadas por meio da inserção de chanfros em seus cantos e de um *gap* interno centralizado com dimensão $a = 4,6$ mm, conforme ilustrado na Figura 3 (SILVA, 2018) e (SILVA *et al.*, 2018). As células foram projetadas sobre um material dielétrico (RO4350), mesmo material da antena e, com espessura de 0,762 mm. A distribuição total contém 16 células com espaçamento entre seus centros de 24,5 mm, ocupando uma área de 96,5 mm por 96,5 mm (SILVA, 2018) e (SILVA *et al.*, 2019). A Figura 4 apresenta a distribuição periódica, incluindo vista lateral com a espessura e uma visão 3D sobre o material dielétrico.

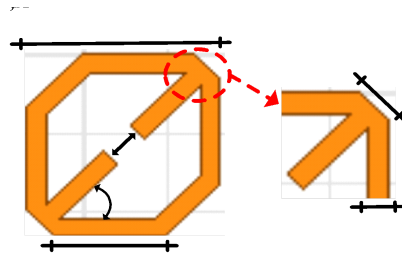


Figura 3 – Célula chanfrada nas extremidades e suas dimensões

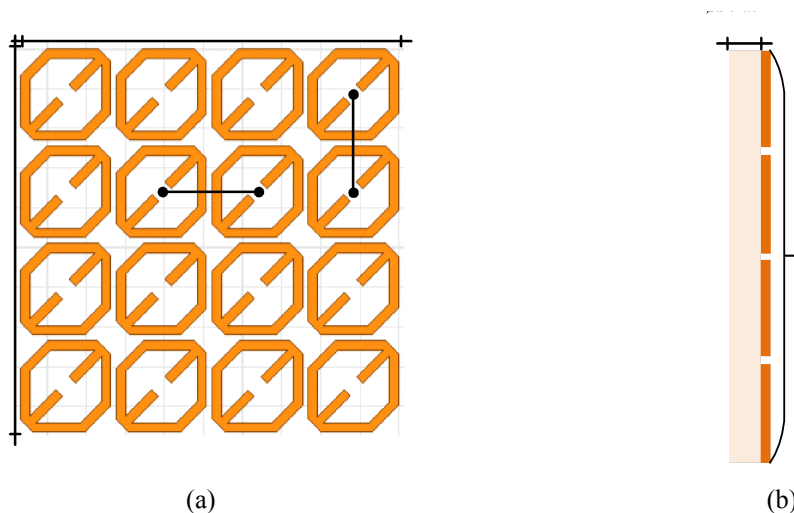


Figura 4 – (a) Conjunto de células distribuídas no material dielétrico e (b) Vista lateral da espessura do material dielétrico

2.3. Combinação dos Projetos

Nesta etapa, com o objetivo de validar a combinação proposta, a metasuperfície foi inserida sobre a estrutura da antena, sendo posicionada de forma alinhada ao centro da antena. A Figura 5 ilustra a configuração simulada computacionalmente, na qual as

estruturas encontram-se separadas por uma distância d . A partir desse arranjo, foram realizadas variações no parâmetro d adotando-se os valores de 15 mm, 16 mm, 17 mm, 18 mm e 19 mm, a fim de analisar a influência desse espaçamento no desempenho da antena.

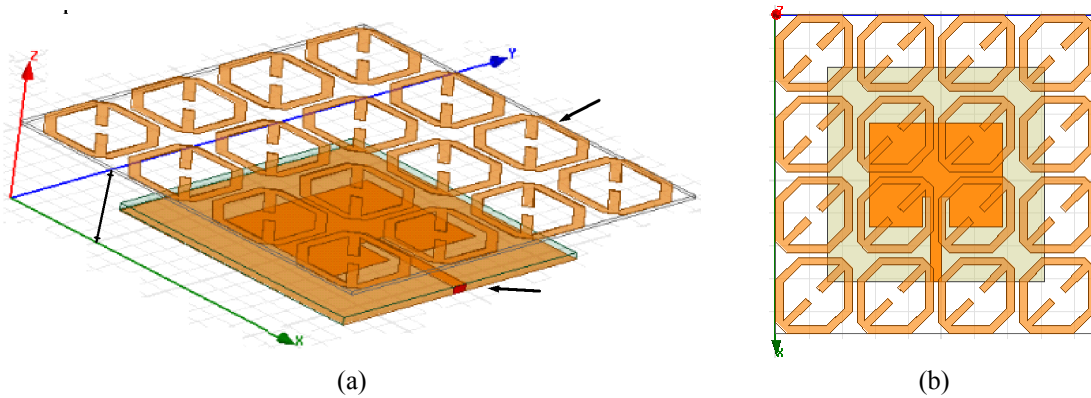


Figura 5 – Combinação da antena com a metasuperfície (a) Visão 3D e (b) Visão superior

3. Resultados e Discussões

Para a análise dos resultados, foram realizadas simulações numéricas utilizando o software ANSYS HFSS HFSS® versão 19.2, baseado no Método dos Elementos Finitos, com o objetivo de avaliar o desempenho da AMA associada à metasuperfície proposta. Os resultados foram validados com valores dentro da faixa de -10 dB, conforme os critérios estabelecidos pela Federal Communication Commission (FCC) para produção comercial.

A Figura 6 mostra as curvas do parâmetro do coeficiente de reflexão (S_{11}), assim como a largura de banda (LB), para as diferentes distâncias entre a AMA e a metasuperfície, ou seja: 15 mm, 16 mm, 17 mm, 18 mm, 19 mm e 20 mm. Inicialmente, realizou-se uma análise da antena padrão sem metasuperfície, obtendo-se um valor de S_{11} iguais a -16,13 dB, uma LB de 40 MHz e uma frequência central de operação de 2,45 GHz, conforme projetado.

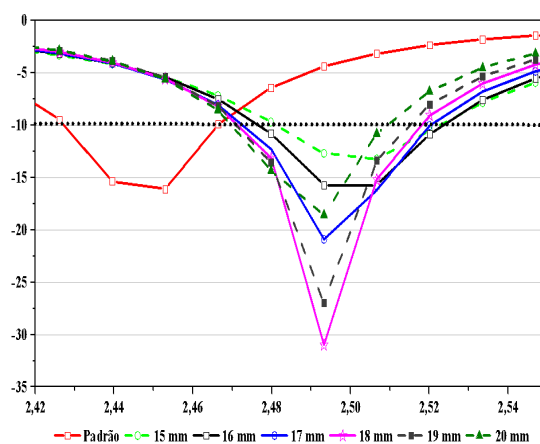


Figura 6 – Coeficiente de reflexão (S_{11}) versus Frequências (GHz)

Em seguida, ao variar as distâncias de posicionamento da metasuperfície, identificou-se um pequeno aumento nas frequências para todas as distâncias testadas, ou seja, aproximadamente 1,6% em relação à frequência de projeto da antena padrão e ao modo

de operação TM_{01} . Diante disso, as novas frequências de operação ficaram em torno de 2,49 GHz. Esse aumento da frequência pode estar associado às alterações nas propriedades eletromagnéticas efetivas do meio provocadas pela presença da metasuperfície. Tais modificações influenciam diretamente a permissividade e a permeabilidade efetivas da estrutura, além de alterarem a interação entre os campos elétricos e a geometria das células durante a propagação das ondas eletromagnéticas. Além disso, a proximidade entre as células e sua geometria metamaterial contribuem para o surgimento de efeitos indutivos e capacitivos, responsáveis pela manipulação da frequência de operação da antena. Resultados semelhantes são observados na literatura, em que estruturas baseadas em metamateriais promovem mudanças na frequência de ressonância e aumento da largura de banda das antenas (KETZAKI & YIOULTSIS, 2013), (ISLAM *et al.*, 2015), (KRZYSZTOFIK & CAO, 2018), (SILVA, 2018), (DAWAR *et al.*, 2019), (LIMA, 2019) e (ARAÚJO *et al.*, 2021).

Ainda analisando o parâmetro S_{11} em função de cada variação d , identificou-se que seu valor ficou significativo em alguns momentos. Para 15 mm, obteve-se um S_{11} igual a -13,26 dB e uma LB de 40 MHz. Já em 16 mm, conseguiu um S_{11} igual a -15,76 dB e uma LB de 50 MHz. Para 17 mm, obteve-se um S_{11} igual a -20,91 dB e uma LB de 60 MHz. Para 18 mm, obteve-se um S_{11} igual a -31,02 dB e uma LB de 50 MHz. Para 19 mm, obteve-se um S_{11} igual a -27,00 dB e uma LB de 50 MHz. E, por fim, para 20 mm, obteve-se um S_{11} igual a -18,57 dB e uma LB de 40 MHz.

Os resultados demonstram que pequenas variações na distância entre a antena e a metasuperfície provocaram mudanças expressivas no parâmetro S_{11} . Em relação ao casamento de impedância, ou seja, melhor transferência de energia, o S_{11} para $d = 18$ mm proporcionou o melhor desempenho, e com o $d = 15$ mm, apresentou o menor desempenho. Com relação às LB apresentadas, observou-se que em 16 mm, 17 mm, 18 mm e 19 mm obtiveram faixas maiores em relação à LB padrão. Dessa forma, evidencia-se que a integração de um metamaterial proporciona um aumento da largura de banda (KETZAKI & YIOULTSIS, 2013), (ISLAM *et al.*, 2015), (KRZYSZTOFIK & CAO, 2018), (SILVA, 2018), (DAWAR *et al.*, 2019), (LIMA, 2019) e (ARAÚJO *et al.*, 2021). Do ponto de vista prático, o aumento da largura de banda permite que o sistema suporte maiores taxas de transmissão de dados, além de proporcionar maior tolerância a pequenas variações na frequência de operação. Dessa forma, a antena mantém seu desempenho dentro de uma faixa aceitável de funcionamento, reduzindo perdas e contribuindo para a estabilidade da comunicação sem fio.

Para os próximos resultados, referentes ao diagrama de radiação e à densidade de corrente, foram consideradas as distâncias para mínimo e máximo desempenho ($d = 15$ mm e $d = 18$ mm).

A Figura 7 apresenta o diagrama 2D de radiação para a AMA padrão, em que apresenta uma característica tradicional de *broadside*, ou seja, o lóbulo principal de radiação é perpendicular ao plano do elemento radiante (*patch*), devido as dimensões do plano de terra serem iguais ao do substrato da AMA.

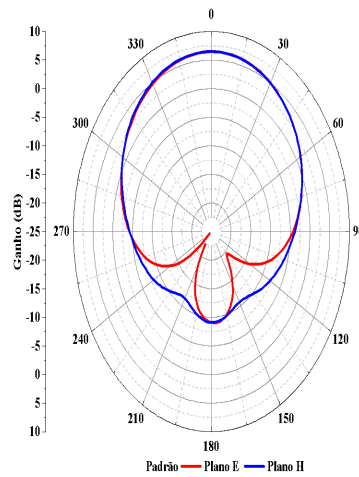


Figura 7 – Ganhos (dB) versus Ângulos (graus)

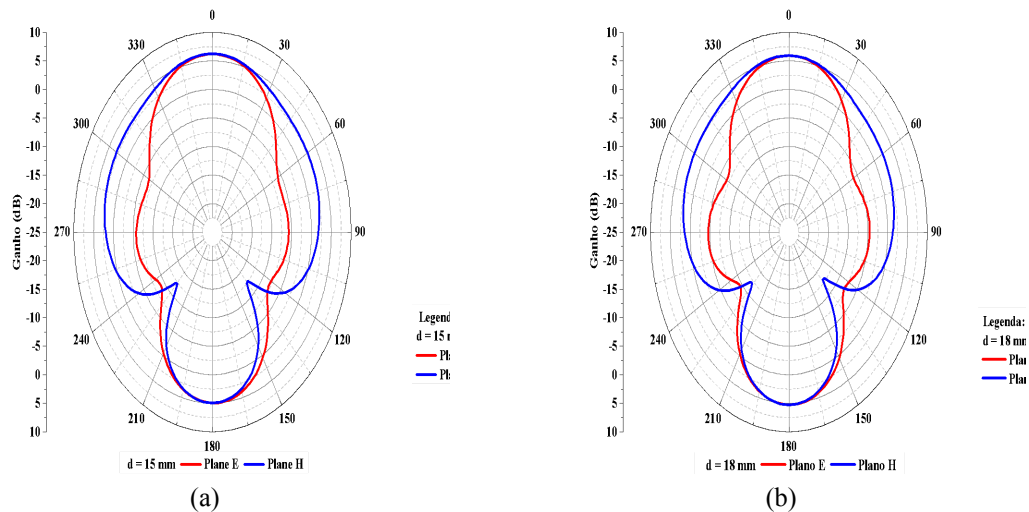


Figura 8 – Ganhos (dB) versus Ângulos (graus)

Na Figura 8, é apresentado o diagrama 2D de radiação para a AMA e a metasuperfície, observando semelhanças com máxima diretividade e transmissão de energia. Entretanto, apesar de não apresentar um plano de terra truncado na AMA, ou seja, sem parte do plano de terra, a radiação se dispersa resultando em lóbulo posterior em relação à direção do lóbulo principal, não apresentando uma característica puramente de *broadside*. Esse efeito pode contribuir para o aumento de perdas por radiação, além de favorecer interferências em sistemas adjacentes e maior suscetibilidade à captação de ruídos eletromagnéticos, fatores que podem comprometer o desempenho global do sistema de comunicação.

Na Figura 9, é verificado a densidade de corrente, em que se observa a distribuição com maior concentração nas células centrais, visto que o feixe principal irradia perpendicularmente ao plano do *patch*. Tal comportamento na superfície influencia diretamente a integridade dos sinais entre os circuitos elétricos dos modelos e o elemento radiante da antena de microfita.

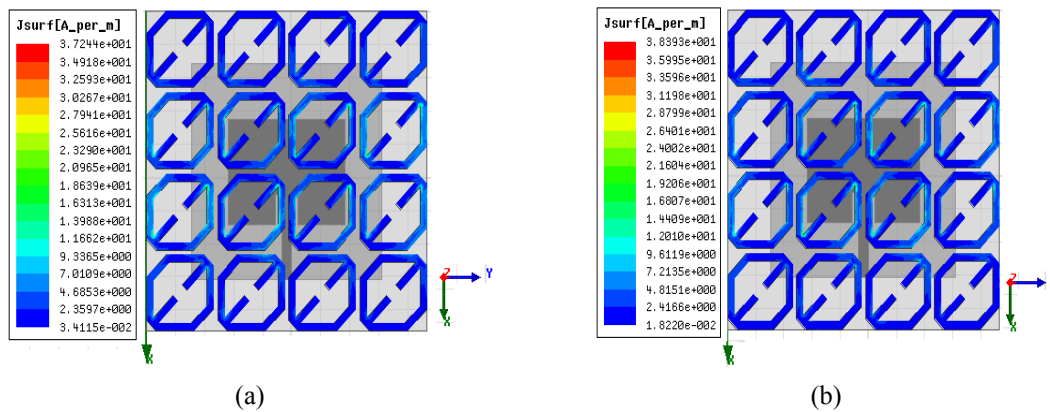


Figura 9 – Densidade de corrente (a) $d = 15$ mm e (b) $d = 18$ mm

4. Conclusão

Neste artigo, foi apresentada uma metasuperfície adaptada acoplada a uma antena de microfita padrão que opera em 2,45 GHz. A metasuperfície proposta é composta por um arranjo de 4x4 células dispostas sobre um material dielétrico. O trabalho teve como objetivo avaliar a influência da distância entre a antena e a metasuperfície na manipulação dos parâmetros de resposta e no desempenho do dispositivo de comunicação.

Os resultados obtidos demonstraram que a variação na distância entre as estruturas influenciou nos parâmetros da frequência de ressonância, na largura de banda e no coeficiente de reflexão. Em comparação com a antena padrão, a estrutura proposta proporcionou maior largura de banda em todas as distâncias analisadas, evidenciando a contribuição da metasuperfície para a melhoria do desempenho do sistema. Entre os casos investigados, a distância de 18 mm apresentou um menor coeficiente de reflexão, enquanto a distância de 15 mm resultou no maior valor desse parâmetro, confirmando a eficiência da metasuperfície na otimização do desempenho da antena. Assim, as modificações propostas na célula para a metasuperfície, evidenciaram uma solução eficiente diante dos resultados obtidos em simulação. Por fim, o ambiente de simulação numérica computacional representa uma etapa de extrema importância para o profissional que projeta dispositivos voltados à comunicação sem fio na faixa de micro-ondas. Esta ferramenta é essencial, pois permite a realização de ajustes precisos para que todos os parâmetros do dispositivo estejam em conformidade com a faixa de operação e os requisitos de serviço estabelecidos.

Agradecimentos

A UFERSA Campus Pau dos Ferros, GEPEAT/UFERSA Campus Mossoró, e ao PPGEE/UFERSA pela licença do *software* comercial (nº 1058710).

Referências

AJEWOLE, B.; KUMAR, P. & AFULLO, T. *A Microstrip Antenna Using I-Shaped Metamaterial Superstrate with Enhanced Gain for Multiband Wireless Systems*. *Micromachines* Vol. 14, n. 2, p. 1-18, 2023. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2072-666X/14/2/412>>. Acesso em: março de 2026.

ANDRADE, H.D.; AZEVEDO, P.L.C.; SOUSA, L.O.; JÚNIOR, I.S.Q.; SOUSA, M.E.T.; SILVA, I.B.T.; LOPES, N.S.O. & FONTGALLAND, G. *Proposta de Antena de Microfita com Utilização de Superstrato do Tipo Stubs Mesh para Aplicação em Comunicações Sem Fio*. *Anais XLI Simpósio*

Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais - SBRT, 2023. Disponível em: <<https://biblioteca.sbrt.org.br/events/27>>. Acesso em: março de 2026.

ARAÚJO, F.F.; CAMPOS, A.L.P.; LIRA, R.V.A.; NETO, A.G. & ASSUNÇÃO, A. G. *Bandwidth Enhancement of Microstrip Patch Antenna Using Metasurface*. Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications, Vol. 20, n. 1, p.105-117, 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/jmoea/a/36ChqmSMSZv3cZ4HyLx4D3N/?format=html&lang=en>. Acesso em: março de 2026.

BALLANIS, C.A. *Antenna Theory Analysis and Design*. Jonh Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2005.

DAWAR, P.; RAGHAVA, N.S. & DE, A. *UWB Metamaterial-Loaded Antenna for C-Band Applications*, *Int. Journal of Ant. and Propagation*, vol. 82, pp. 368-382, 2019. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2019/6087039>. Acesso em: março de 2026.

HOSAIN, M.M.; KUMARI, S. & TIAWAY, A.K. *A Design Rule for Inset-fed Rectangular Microstrip Patch Antenna*. WEAS Transactions on Communications, Vol. 9, n. 1, p. 63-72, 2010. Disponível em: <https://scispace.com/pdf/a-design-rule-for-inset-fed-rectangular-microstrip-patch-34tegpzob3.pdf>. Acesso em: abril de 2026.

HOSAIN, M.M.; KUMARI, S. & TIAWAY, A.K. *Compact Filtenna for WLAN Applications*. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, Vol. 18, n. 1, p. 70-79, 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/jmoea/a/WVQpX7m6jP7M84nSnZKZT7z/?lang=en>. Acesso em: abril de 2026.

ISLAM, M.M.; ISLAM, M.T.; SAMSUZZAMAN, M. & FARUQUE, M.R.I. *Compact Metamaterial Antenna for UWB Applications*, *Electronics Letters*, Vol. 51, n. 16, pp. 1222-1224, 2015. Disponível em: <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1049/el.2015.2131>. Acesso em: março de 2026.

KETZAKI, D.A. & YIOULTSIS, T.V. *Metamaterial-Based Design of Planar Compact MIMO Monopoles*, *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, Vol. 61, pp. 2758-2766, 2013. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6423800/>. Acesso em: abril de 2026.

KRZYSZTOFIK, W.J. & CAO, T.N. *Metamaterial in Application to Improve Antenna Parameters*, *Metamaterial and Metasurfaces*, Interchopen, ch. 4, pp. 63 – 72, 2018. Disponível em: <https://www.intechopen.com/chapters/63993>. Acesso em: abril de 2026.

LIMA, A.M. *Aplicação de Células Metamateriais CLL ao Projeto de Antenas de Microfita Retangulares*. Tese de Doutorado. UFRN, Natal, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/items/5e01f6cf-d986-49c0-9772-d6bf814ae143>. Acesso em: março de 2026

SANTOS, R.C. *Estudo da Interferência de uma Metasuperfície no Desempenho das Antenas de Microfita*. Dissertação de Mestrado. UFRN, Natal, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/items/9611e001-d4a2-459b-a3a2-78692d3e906e>. Acesso em: março de 2026.

RAMESH, M., YIP, K. B. *Design Inset-Feed Microstrip Patch Antennas*. *Microwaves and RF*, 2003. Disponível em: <<http://mwrf.com/components/design-inset-fed-microstrip-patch-antennas>>. Acesso em: abril 2026.

RENTAPALLI, V.R. & ROY, B. *A Low-Profile Wideband Meta-Surface Based Microstrip Antenna for 5G Wireless Communications*. *Results in Engineering*, Vol. 24, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123024014014>. Acesso em: março de 2026.

SAHU, K.A.; SHYAMALA, A. & SURARCHITHA, C. *Design of Microstrip Patch Antenna Using Meta-Surface for Bandwidth Enhancement*. *Journal on Electronic and Automation Engineering*, Vol. 4, n. 2, p. 249-259, 2025. Disponível em: <https://restpublisher.com/wp-content/uploads/2025/06/1.-Design-of-Microstrip-Patch-Antenna-Using-Meta-Surface-for-Bandwidth-Enhancement.pdf>. Acesso em: março de 2026.

SILVA, J.L.P. *Implementação de estruturas EBG em Antenas de Microfitas e Polarização Linear-Circular com Metasuperfície para WLAN*. Tese de Doutorado. UFRN, Natal, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/items/15c2a307-edf2-4b71-ad56-c50a78a97641>. Acesso em: março de 2026.

SILVA, A.N.; CARVALHO, R.G.G.; ASSUNÇÃO, A.G.J.; & ASSUNÇÃO, A.G. *A New Technique Using Axially Slotted Microstrip Line for Antenna Impedance Matching Designs*. *Journal of Microwaves*,

Optoelectronics and Electromagnetic Applications, Vol. 18, n. 2, p. 208-118, 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/jmoea/a/nCctLMbdJwDY8YrJxt3FjrP/?lang=en>. Acesso em: março de 2026.

SILVA, J.L.; SILVA, J.P.; CAMPOS, A.L.P.S. & ANDRADE, H.D. *Using Metasurface Structures as Signal Polarizers in Microstrip Antennas*. IET Microwave, Antennas & Propagation, Vol. 13, n. 1, p.23-27, 2019. Disponível em: <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1049/iet-map.2018.5112>. Acesso em: março de 2026.