

Análise do Impacto da Inserção de Slots no Desempenho de Antena Tribanda para Aplicações WLAN/WiMAX

Reinan Santana Lima, Thiago Kauan Aragão Vieira, George Victor Rocha Xavier, Elyson Ádan Nunes Carvalho
Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, Brasil
reinanbom@gmail.com, thiago01kauan02@gmail.com, george.xavier@academico.ufs.br,
ecarvalho@academico.ufs.br

Resumo— Este trabalho apresenta o projeto e a análise de uma antena microfita tribanda desenvolvida por meio de uma abordagem incremental orientada por hipóteses físicas. Inicialmente, um *patch* retangular operando em 2,4 GHz foi projetado e, em seguida, modificações sucessivas foram introduzidas, incluindo plano de terra truncado, estrutura com defeito no plano de terra e inserção de *slots*. A análise isolada de cada elemento permitiu compreender sua influência na geração de múltiplas ressonâncias. Os resultados mostram operação em três bandas principais (2,35, 3,8 e 5,6 GHz), com ganho superior a 2 dBi. A abordagem proposta contribui para o entendimento físico e otimização de antenas multibanda.

Palavras-Chave— Antena microfita, antena tribanda, DGS, *slots*, análise incremental.

Abstract— This paper presents the design and analysis of a triband microstrip antenna developed through an incremental, hypothesis-driven approach. A conventional rectangular patch operating at 2.4 GHz is initially designed, followed by successive modifications including a truncated ground plane, defective ground structure, and slot insertion. The isolated evaluation of each modification enables a clear understanding of its impact on resonance generation. The proposed antenna operates at three main bands (2.35, 3.8, and 5.6 GHz) with gain above 2 dBi. The approach contributes to the physical understanding and optimization of multiband antenna design.

Keywords— Microstrip antenna, triband antenna, DGS, *slots*, incremental design.

I. INTRODUÇÃO

Com o avanço das tecnologias de comunicação sem fio, cresce a demanda por dispositivos capazes de operar em múltiplas bandas de frequência. Nesse contexto, antenas multibanda tornam-se importantes para reduzir o número de componentes, otimizar o espaço físico e aumentar a eficiência de sistemas embarcados [1]. Em particular, antenas tribanda têm recebido crescente atenção por sua capacidade de suportar múltiplos serviços em uma única estrutura compacta [2], [3], atendendo simultaneamente padrões como WLAN, WiMAX, Bluetooth e sistemas 5G [4], [5].

Diversas técnicas têm sido empregadas para a obtenção de múltiplas bandas de operação, incluindo o uso de *slots*, *stubs*, elementos parasitas, estruturas com defeito no plano de

terra (DGS, do inglês: *Defective Ground Structures*) e metamateriais [6]–[8]. Essas abordagens possibilitam a excitação de múltiplos modos ressonantes e o controle das frequências de operação. Abordagens mais recentes exploram conceitos avançados, como operação multimodo e polarização circular [9], bem como aplicações em frequências mais elevadas, incluindo bandas milimétricas para 5G [5], [10].

Entretanto, tais soluções frequentemente apresentam maior complexidade estrutural e desafios associados à fabricação e ao controle dos parâmetros eletromagnéticos. Outro aspecto crítico no projeto de antenas multibanda é a miniaturização. Embora técnicas de compactação permitam reduzir significativamente as dimensões físicas, elas geralmente implicam degradação do ganho, eficiência e largura de banda [6], [11]. Além disso, muitos projetos apresentam forte acoplamento entre modos ressonantes ou geometrias complexas, dificultando o ajuste independente das bandas e a interpretação física do comportamento da antena [2], [10]. Diante desse cenário, identifica-se uma lacuna relacionada à ausência de metodologias de projeto que permitam, além da obtenção de múltiplas bandas, a compreensão sistemática da contribuição de cada elemento estrutural na geração dos modos ressonantes.

Nesse contexto, neste trabalho é proposto o desenvolvimento de uma antena tribanda baseada em uma abordagem incremental, na qual modificações geométricas sucessivas são introduzidas e analisadas individualmente. A principal contribuição deste estudo consiste em estabelecer uma correlação direta entre alterações estruturais e o comportamento eletromagnético da antena, permitindo não apenas o projeto eficiente de múltiplas bandas, mas também uma interpretação física clara dos mecanismos de operação.

II. TRABALHOS RELACIONADOS

Antenas multibanda e tribanda têm sido amplamente investigadas utilizando diferentes técnicas de geração de modos ressonantes. Nayak et al. [2] apresentam uma antena tribanda compacta obtida por meio de acoplamento entre elementos, com dimensões reduzidas, porém com picos de ganho inferiores a 2 dBi. De maneira semelhante, Liu et al. [12] propõem uma antena tribanda flexível baseada em grafeno, utilizando três *slots* em formato de U para obtenção das bandas de operação e priorizando a miniaturização da estrutura, embora os ganhos obtidos permaneçam inferiores a 3,5 dBi.

Estratégias de miniaturização, como as apresentadas por Elkorany et al. [11], reduzem significativamente o tamanho da antena, porém com impacto negativo no ganho e na eficiência. Em uma abordagem distinta, Kumar et al. [13] empregam alimentação CPW combinada com stubs para obter operação tribanda destinada a aplicações WLAN/WiMAX, alcançando uma estrutura compacta, porém com ganho máximo de aproximadamente 4,3 dBi. Por outro lado, o uso de estruturas DGS, como proposto por Singh et al. [7], possibilita a obtenção de múltiplas bandas, mas dificulta a análise física dos modos ressonantes e aumenta a complexidade do projeto.

De forma geral, os trabalhos existentes apresentam pelo menos uma das seguintes limitações: elevada complexidade geométrica, dificuldade no controle independente das bandas ou degradação de desempenho associada à miniaturização. Além disso, poucos estudos analisam de forma sistemática a contribuição individual de cada elemento estrutural na formação das bandas de operação.

III. METODOLOGIA

Nesta seção é descrito o processo de desenvolvimento da antena proposta, baseado em uma abordagem incremental e orientada por hipóteses físicas. O objetivo não se restringe somente à obtenção de uma resposta tribanda (2,4 - 3,5 - 5,5 GHz), mas também à compreensão do impacto de cada modificação geométrica no desempenho da estrutura.

A. Modelagem Teórica e Estágio Inicial

O ponto de partida foi o projeto de um elemento irradiante retangular convencional (*patch*) operando na frequência fundamental de 2,4 GHz. O substrato utilizado foi o FR-4 ($\epsilon_r \approx 4,4$) com espessura $h = 1,53$ mm. Também consideramos a altura do cobre de $35\mu m$, que é o mais comum nas placas convencionais com substrato FR-4.

As dimensões iniciais do *patch*, largura (W_p) e comprimento (L_p), foram determinadas a partir das equações a seguir [14]

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

$$\epsilon_{\text{reff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2\sqrt{1 + 12\frac{h}{W_p}}}, \quad (2)$$

$$L_p = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}} - 2\Delta L, \quad (3)$$

em que c representa a velocidade da luz no vácuo.

A alimentação foi realizada por meio de uma linha de microfita com impedância de 50Ω , cuja largura (W_t) foi determinada a partir das aproximações clássicas de [15]. As dimensões do estágio inicial estão apresentadas na Tabela I.

B. Evolução Geométrica e Hipóteses de Projeto

A evolução geométrica da antena proposta, apresentada na Figura 1, foi conduzida com base em uma abordagem investigativa, na qual diferentes mecanismos de geração de múltiplas bandas foram analisados de forma isolada. O objetivo foi compreender a contribuição individual de cada

TABELA I: Dimensões da antena de referência em milímetros.

W_s	L_s	W_p	L_p	L_g	W_t
70	80	38	29,5	30	3
L_t	W_1	L_1	W_2	L_2	
33	13	14,5	18	24	

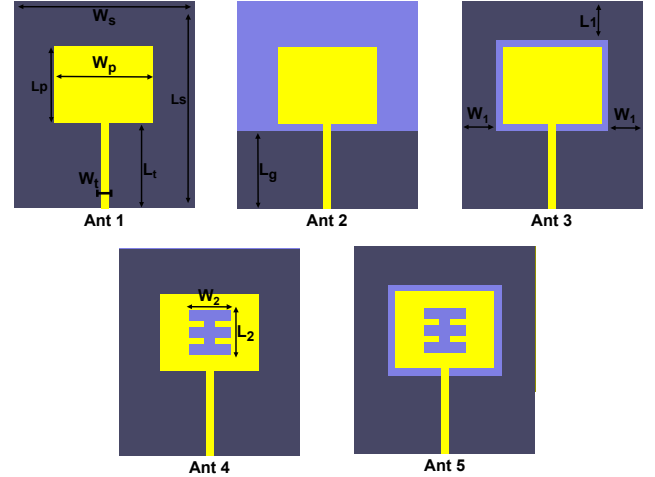


Fig. 1: Evolução geométrica da antena proposta.

modificação estrutural no comportamento eletromagnético da antena. Inicialmente, a Antena 1 corresponde ao *patch* básico projetado para operação em 2,4 GHz, conforme descrito na subseção anterior. Embora o dimensionamento teórico forneça uma estimativa adequada da frequência de ressonância, não se espera necessariamente um casamento de impedância ideal, sendo necessária a introdução de ajustes geométricos.

Na Antena 2, foi introduzido um plano de terra truncado, caracterizado por uma redução geométrica do condutor inferior. Essa modificação pode ser interpretada como uma forma simples de estrutura DGS. O objetivo é investigar sua influência na largura de banda e no acoplamento eletromagnético. A hipótese associada a essa modificação é que a interrupção do plano de terra altera o caminho da corrente de retorno, podendo resultar em ampliação da banda de operação e possível excitação de novos modos ressonantes.

Já na Antena 3, a modificação do plano de terra foi aprofundada por meio da inserção de um recorte localizado, com o objetivo de intensificar os efeitos de perturbação na distribuição de corrente superficial. Essa etapa tem como objetivo avaliar, de forma isolada, o efeito da modificação na distribuição de corrente superficial, uma vez que estruturas DGS são conhecidas por alterar a impedância equivalente da linha de alimentação e introduzir descontinuidades controladas, o que pode resultar na geração de novas ressonâncias.

Por outro lado, na Antena 4 o plano de terra foi restaurado para sua configuração completa, enquanto um *slot* foi inserido no *patch*. Essa modificação tem como objetivo investigar a influência dos *slots* no elemento irradiante. A hipótese considerada é que os *slots* aumentam o caminho elétrico da corrente e atuam principalmente sobre modos de ordem superior, afetando predominantemente as frequências mais elevadas, com impacto reduzido na frequência fundamental.

Por fim, a Antena 5 corresponde à combinação das estratégias investigadas, incluindo o plano de terra modificado e a inserção de *slots* no *patch*. Espera-se que a interação entre esses elementos resulte na geração de múltiplas bandas de operação, com possibilidade de ajuste fino das frequências de interesse.

C. Configuração de Simulação e Procedimentos de Análise

As simulações eletromagnéticas foram realizadas no software ANSYS HFSS, utilizando o método dos elementos finitos (FEM). A antena foi excitada por meio de uma porta do tipo *lumped port modal*, com impedância de referência de 50Ω . A região de simulação foi delimitada por uma caixa de radiação (*radiation box*), cujas dimensões foram definidas adicionando-se uma margem de 100 mm em cada direção em relação ao tamanho do substrato, garantindo a adequada absorção das ondas irradiadas e minimizando reflexões nas fronteiras.

A análise em frequência foi conduzida na faixa de 1 a 6,5 GHz, utilizando varredura discreta (*discrete sweep*) com passo linear de 1 MHz. Essa configuração foi adotada para assegurar maior precisão na identificação das frequências de ressonância e na caracterização das bandas de operação. Inicialmente, foi realizada a análise da influência individual de cada modificação geométrica proposta, conforme descrito na subseção anterior. Em seguida, foi conduzido um processo de otimização paramétrica, no qual parâmetros geométricos como dimensões dos *slots*, comprimento do plano de terra e posição da alimentação foram ajustados iterativamente, com base na análise do coeficiente de reflexão.

D. Fabricação e Caracterização Experimental

Após a etapa de simulação e otimização, a antena proposta foi fabricada utilizando o processo de transferência térmica sobre uma placa de circuito impresso com substrato FR-4, mantendo-se as mesmas características dielétricas consideradas na simulação. O cobre utilizado possui espessura de $35 \mu\text{m}$. A caracterização experimental foi realizada por meio de um analisador vetorial de redes (VNA) Rohde & Schwarz ZNB, calibrado para a faixa de 1 a 7 GHz. As medições do coeficiente de reflexão (S_{11}) foram obtidas utilizando varredura com resolução de 10 kHz.

E. Métricas de Avaliação

O desempenho da antena é avaliado com base em parâmetros eletromagnéticos fundamentais, permitindo uma análise quantitativa e comparativa com trabalhos da literatura. O coeficiente S_{11} foi utilizado para identificar as frequências ressonantes e determinar a largura de banda de operação. O ganho foi avaliado nas frequências de interesse, sendo considerado adequado um valor mínimo de 2 dBi, em concordância com antenas compactas reportadas na literatura [11]. Além do valor máximo, analisou-se a variação do ganho ao longo das bandas para verificar a estabilidade do desempenho.

Os diagramas de radiação foram analisados nos planos principais com o objetivo de verificar a estabilidade direcional da antena nas diferentes frequências de operação. A consistência das bandas também foi avaliada por meio da

continuidade da condição $|S_{11}| \leq -10 \text{ dB}$, observando-se especialmente o comportamento da banda superior, onde a presença de múltiplos modos ressonantes pode resultar em bandas contínuas ou fragmentadas. Por fim, os resultados obtidos foram comparados com trabalhos relevantes da literatura, considerando número de bandas, frequências de operação, ganho e dimensões físicas, permitindo posicionar a antena proposta em relação ao estado da arte.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 apresenta a evolução do coeficiente de reflexão (S_{11}) para as diferentes etapas de projeto, permitindo avaliar de forma direta a influência de cada modificação geométrica proposta. Observa-se que a Antena 1, correspondente à estrutura inicial, já apresenta múltiplas ressonâncias ao longo da faixa analisada. Além da banda em torno de 2,4 GHz, nota-se a presença de outras ressonâncias, com destaque para a região próxima de 3,68 GHz, que apresenta um nível de reflexão profundo, atingindo aproximadamente -25 dB . Esse comportamento indica que, mesmo sem modificações adicionais, o acoplamento entre o *patch* e o plano de terra já permite a excitação de modos superiores.

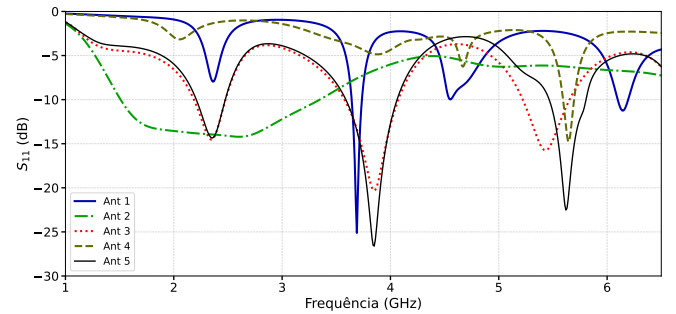


Fig. 2: Comparativo do (S_{11}) ao longo das etapas de projeto.

Com a introdução do plano de terra truncado (Antena 2), observa-se uma mudança na resposta em frequência, resultando em uma banda larga contínua aproximadamente entre 1,5 e 3,3 GHz para $|S_{11}| \leq -10 \text{ dB}$. Esse comportamento confirma a hipótese de que a redução do plano de terra aumenta o acoplamento eletromagnético e altera o caminho da corrente de retorno, favorecendo uma resposta mais larga em baixas frequências, porém com perda da definição das múltiplas ressonâncias. Já na Antena 3, a introdução da estrutura DGS promove o reaparecimento de múltiplas bandas, com ressonâncias bem definidas em aproximadamente 2,35 GHz, 3,8 GHz e 5,4 GHz. Esse resultado destaca que a modificação localizada no plano de terra permite um maior controle das ressonâncias, possibilitando a separação das bandas anteriormente combinadas na resposta larga da Antena 2.

Por outro lado, a Antena 4 apresenta um comportamento distinto, no qual as ressonâncias em baixas frequências são significativamente atenuadas, enquanto a resposta em altas frequências é favorecida. Observa-se que a banda em torno de 5,6 GHz passa a atender o critério de $|S_{11}| \leq -10 \text{ dB}$, enquanto as demais bandas deixam de ser efetivas. Esse resultado reforça a hipótese de que os *slots* inseridos no *patch* atuam predominantemente sobre modos de ordem superior.

Por fim, a Antena 5, que combina as modificações propostas, apresenta novamente três bandas bem definidas, aproximadamente em 2,35 GHz, 3,8 GHz e 5,6 GHz. Nota-se ainda um leve deslocamento da banda superior em relação à Antena 3, indicando a interação entre os efeitos do plano de terra modificado e dos *slots*. Esse comportamento confirma que a combinação das estratégias investigadas permite não apenas a geração de múltiplas bandas, mas também um ajuste mais refinado das frequências de operação.

A geometria final da antena proposta é apresentada na Fig. 3. Observa-se que a configuração combina a alteração do plano de terra com a inserção de *slots* no *patch*, resultando em uma estrutura capaz de suportar múltiplos modos ressonantes com baixa complexidade geométrica.

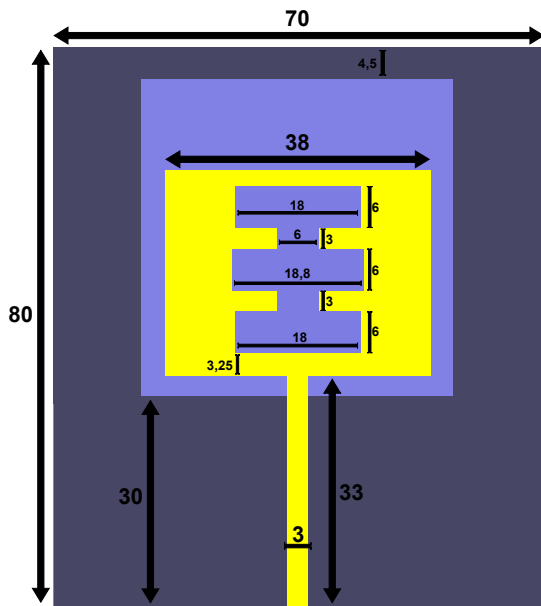


Fig. 3: Geometria final com descrição das dimensões (em mm).

A Fig. 4 apresenta a comparação entre o coeficiente de reflexão obtido por simulação e por medição da antena fabricada. De maneira geral, observa-se boa concordância entre as respostas, sendo preservadas as três principais bandas de operação previstas numericamente. A primeira banda permaneceu centrada próxima de 2,4 GHz, apresentando pequeno deslocamento da frequência de ressonância. Comportamento semelhante foi observado na segunda e terceira bandas, localizadas em torno de 3,3 GHz e 5,4 GHz, respectivamente. Apesar disso, a resposta medida continua apresentando operação dentro das faixas destinadas às aplicações WLAN/WiMAX.

As diferenças observadas entre os resultados simulados e medidos são compatíveis com aquelas normalmente reportadas para antenas de microfitas fabricadas em FR-4. Entre os principais fatores estão as tolerâncias do processo de fabricação por termotransferência, que podem introduzir pequenas variações nas dimensões dos slots e da linha de alimentação, além das incertezas nas propriedades eletromagnéticas do substrato, especialmente na permissividade relativa e na tangente de perdas do FR-4, que variam entre diferentes lotes de fabricação. Além disso, a presença do conector SMA, imperfeições na soldagem, pequenas variações na espessura do cobre e efeitos introduzidos pelo procedimento de medição também

contribuem para alterações no casamento de impedância, particularmente nas bandas de frequência mais elevadas, onde pequenas variações dimensionais produzem mudanças mais significativas na resposta em frequência.

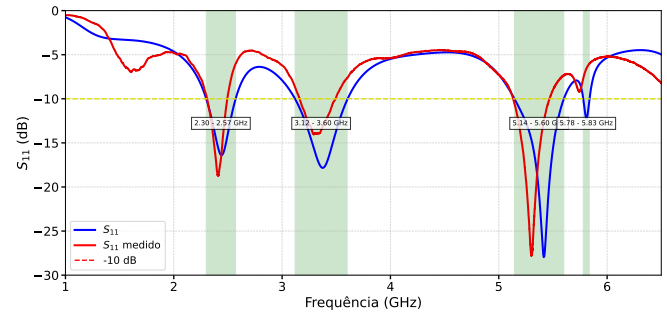


Fig. 4: S_{11} da antena final, destacando as bandas de operação.

Observa-se na região de 5 a 6 GHz a presença de múltiplos mínimos locais, indicando a excitação de modos ressonantes próximos. Esse comportamento resulta em uma banda parcialmente fragmentada, sugerindo que o acoplamento entre esses modos não é suficiente para formar uma banda larga contínua. A explicação física desse comportamento é evidenciada pela distribuição de corrente superficial (J_{surf}) apresentada na Fig. 5. Em 2,43 GHz, a corrente se concentra nas bordas externas do *patch*, caracterizando o modo fundamental. Em 3,36 GHz, há maior participação da região interna, indicando a excitação de um modo intermediário. Já em 5,37 GHz, a corrente se concentra intensamente ao longo dos *slots*, confirmando que esses elementos atuam como ressonadores secundários responsáveis pelas bandas superiores. A antena mantém ganho superior a 2 dBi em todas as bandas de interesse, conforme apresentado na Fig. 6, com pico de aproximadamente 7,3 dBi em 5,4 GHz. Esse aumento está associado à maior diretividade dos modos de ordem superior excitados pelos *slots*.

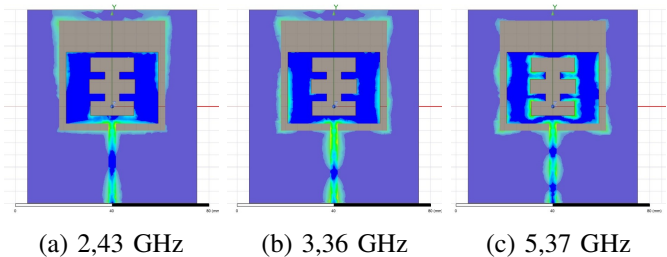


Fig. 5: J_{surf} nas frequências de operação.

A fim de posicionar o desempenho da antena proposta em relação ao estado da arte, na Tabela II é apresentada uma comparação com trabalhos relevantes da literatura que utilizam diferentes técnicas para obtenção de comportamento multi-banda. A análise comparativa evidencia o compromisso existente entre miniaturização, ganho e complexidade estrutural. Os trabalhos de [2], [12] e [13] apresentam áreas inferiores a 1200 mm², correspondendo a aproximadamente um quinto da área da antena proposta. Entretanto, essa redução dimensional é acompanhada por ganhos mais modestos, inferiores a 3,5 dBi em todas as bandas para [2] e [12], e inferiores a 2 dBi nas duas primeiras bandas em [13], atingindo apenas 4,30 dBi na terceira banda. Por outro lado, o trabalho de [11], apesar de

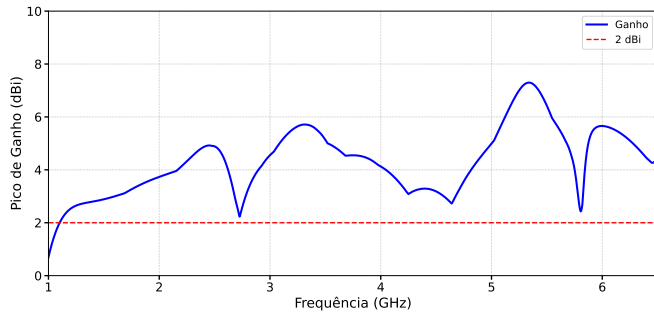


Fig. 6: Pico de ganho da antena em função da frequência.

apresentar uma área intermediária (3000 mm^2), obtém ganho superior a 5 dBi apenas em uma das bandas, enquanto as demais permanecem em torno de 2 dBi ou abaixo desse valor.

 TABELA II: Antena proposta *versus* trabalhos da literatura.

Ref.	Tec.	Dimensões	Área (mm^2)	Ganho (dBi)	Comp.
[2]	Acopl.	40×30	1200	1.30/1.89/1.92	Alta
[11]	Miniatur.	60×50	3000	2.20/5.18/1.81	Méd.
[12]	Slots em U	32×22.5	720	2.20/3.01/3.45	Alta.
[13]	CPW + stubs	40×24.8	992	1.05/1.90/4.30	Méd.
Prop.	Slots	70×80	5600	4.92/5.73/7.32	Baixa

A antena proposta, por sua vez, apresenta ganhos de 4,92, 5,73 e 7,32 dBi nas três bandas de operação, superando os trabalhos comparados em todas as frequências analisadas. Esse resultado indica melhor eficiência de radiação e maior potencial para aplicações que demandam maior alcance. Embora esse desempenho seja obtido com uma área física maior, a estrutura mantém baixa complexidade construtiva, baseada apenas na inserção de slots no elemento irradiador, dispensando técnicas como acoplamento entre elementos, múltiplos *stubs*, materiais especiais ou geometrias altamente elaboradas. Esses resultados evidenciam um *trade-off* entre miniaturização e desempenho, indicando que a antena proposta é uma alternativa particularmente atrativa para aplicações em que o ganho elevado e a simplicidade de fabricação são mais relevantes do que a redução máxima das dimensões físicas.

V. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o projeto e a análise de uma antena de microfita tribanda desenvolvida a partir de uma abordagem incremental baseada em hipóteses físicas. A metodologia adotada permitiu correlacionar diretamente modificações geométricas com o comportamento eletromagnético, evidenciando o papel do *slot* no plano de terra na ampliação de banda e dos *slots* do *patch* na sintonia das frequências superiores.

Os resultados demonstraram operação eficiente nas bandas de 2,4, 3,5 e 5,4 GHz, com ganho superior a 2 dBi em todas as faixas e pico de aproximadamente 7,3 dBi. Os resultados experimentais obtidos com a antena fabricada apresentaram boa concordância com as previsões numéricas, preservando as principais bandas de operação propostas. A análise da densidade de corrente superficial confirmou que os *slots* do *patch* atuam como elementos ressonantes secundários, permitindo o controle das bandas superiores sem aumento das

dimensões físicas. Adicionalmente, verificou-se que a banda superior apresenta múltiplos modos ressonantes parcialmente acoplados, resultando em uma resposta fragmentada. Esse comportamento indica uma oportunidade de otimização futura visando a obtenção de uma banda mais contínua.

Em comparação com os trabalhos da literatura, a antena proposta apresenta os maiores ganhos nas três bandas de operação, atingindo 4,92, 5,73 e 7,32 dBi, mantendo uma configuração estrutural de baixa complexidade. Esse desempenho é obtido ao custo de uma área física maior, aproximadamente 4,7, 5,6, 1,9 e 7,8 vezes superior às áreas reportadas por [2], [13], [11] e [12], respectivamente. Ainda assim, a simplicidade da geometria proposta favorece a fabricação, reduz a sensibilidade a tolerâncias do processo produtivo e torna a antena uma solução robusta para aplicações em sistemas WLAN e WiMAX.

REFERÊNCIAS

- [1] H.-W. Hsieh, Y.-C. Lee, K.-K. Tiong, and J.-S. Sun, "Design of a multiband antenna for mobile handset operations," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 8, pp. 200–203, 2008.
- [2] P. B. Nayak, S. Verma, and P. Kumar, "A novel compact tri-band antenna design for wimax, wlan and bluetooth applications," in *2014 Twentieth National Conference on Communications (NCC)*. IEEE, 2014, pp. 1–6.
- [3] N. Q. A. AlShaikhli, M. A. Neamah, and M. I. Aal-Nouman, "Design of triband antenna for telecommunications and network applications," *Bull. Electr. Eng. Inform.*, vol. 11, no. 2, pp. 1084–1090, 2022.
- [4] M. Sharma, "Design and analysis of multiband antenna for wireless communication," *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 114, no. 2, pp. 1389–1402, 2020.
- [5] S. Ahmad, H. Boubakar, S. Naseer, M. E. Alim, Y. A. Sheikh, A. Ghaffar, A. J. A. Al-Gburi, and N. O. Parchin, "Design of a tri-band wearable antenna for millimeter-wave 5g applications," *Sensors*, vol. 22, no. 20, p. 8012, 2022.
- [6] Y. Cao, S. Cheung, and T. Yuk, "A multiband slot antenna for gps/wimax/wlan systems," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 63, no. 3, pp. 952–958, 2015.
- [7] A. Singh and S. Joshi, "Design of y-shaped tri-band rectangular slot dgs patch antenna at sub-6 ghz frequency range for 5g communication," *J. Eng. Appl. Sci.*, vol. 71, no. 1, p. 144, 2024.
- [8] C. Zhu, T. Li, K. Li, Z.-J. Su, X. Wang, H.-Q. Zhai, L. Li, and C.-H. Liang, "Electrically small metamaterial-inspired tri-band antenna with meta-mode," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 14, pp. 1738–1741, 2015.
- [9] W.-W. Chen, Q.-S. Wu, and X. Zhang, "Unified design of dual-band and triband dual-sense circularly polarized patch antennas under quad-mode operation," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 24, no. 6, pp. 1332–1336, 2025.
- [10] A. Ali, M. E. Munir, M. M. Nasralla, M. A. Esmail, A. J. A. Al-Gburi, and F. A. Bhatti, "Design process of a compact tri-band mimo antenna with wideband characteristics for sub-6 ghz, ku-band, and millimeter-wave applications," *Ain Shams Eng. J.*, vol. 15, no. 3, p. 102579, 2024.
- [11] A. S. Elkorany, A. N. Mousa, S. Ahmad, D. A. Saleeb, A. Ghaffar, M. Soruri, M. Dalarsson, M. Alibakhshikenari, and E. Limiti, "Implementation of a miniaturized planar tri-band microstrip patch antenna for wireless sensors in mobile applications," *Sensors*, vol. 22, no. 2, p. 667, 2022.
- [12] X. Liu, R. Zhang, H. Zu, R. Song, and D. He, "A conformal tri-band band notched antenna for wlan/wimax applications," in *2024 IEEE International Workshop on Radio Frequency and Antenna Technologies (iWRF&AT)*. IEEE, 2024, pp. 315–317.
- [13] H. Kumar, S. Kaushal, K. A. Prasad, and S. K. Singh, "Design and analysis of a compact tri-band cpw-fed antenna for wlan/wimax applications," in *2024 International Conference on Communication, Computing and Energy Efficient Technologies (I3CEET)*. IEEE, 2024, pp. 1638–1641.
- [14] C. A. Balanis, *Antenna theory: analysis and design*. John Wiley & sons, 2016.
- [15] H. Wheeler, "Transmission-line properties of a strip on a dielectric sheet on a plane," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 25, no. 8, pp. 631–647, 1977.