

# Antena de microfita em forma de cruz de alto ganho e polarização dupla para aplicações em 5G

F. S. Borges, A. E. S. Deus, P. L. L. Bertarini, R. A. Penchel, G. S. Rosa, T. C. Pimenta, R. A. Santos

**Resumo**—Este artigo apresenta uma antena de microfita de alto ganho (12,7 dBi) e dupla polarização, destinada a redes 5G na faixa de 3,5 GHz, baseada em um ressonador em forma de cruz operando no modo  $TM_{30}$ -like. Simulações indicam supressão de lóbulos laterais ( $SLL < -18$  dB) e excelente desempenho em termos de isolamento entre portas e polarização cruzada, ambos superiores a 40 dB na banda passante. Um protótipo foi fabricado, apresentando largura de banda de 1,41% (3,52 – 3,57 GHz), com discreto deslocamento de frequência em relação aos resultados simulados (3,48 – 3,52 GHz).

**Palavras-Chave**—5G, Alto ganho, Antena de microfita, Dupla polarização.

**Abstract**—This paper presents a high-gain (12.7 dBi), dual-polarized microstrip antenna designed for 5G networks operating in the 3.5 GHz band. The proposed design is based on a cross-shaped resonator operating in the  $TM_{30}$ -like mode. Simulations demonstrate sidelobe suppression ( $SLL < -18$  dB) and excellent performance in terms of port isolation and cross-polarization discrimination, both exceeding 40 dB within the operational bandwidth. A prototype was fabricated and measured, exhibiting a bandwidth of 1.41% (3.52 – 3.57 GHz), with a slight frequency shift compared to the simulated response (3.48 – 3.52 GHz).

**Keywords**—5G, Dual polarization, High gain, Microstrip antenna.

## I. INTRODUÇÃO

As demandas por maior capacidade de canal impulsionam o desenvolvimento das redes de quinta geração (5G), que prometem desempenho superior em termos de taxas de dados, baixa latência e elevada densidade de conexões [1], [2]. Para atender a esses requisitos, é fundamental a evolução dos dispositivos e sistemas, com destaque para as antenas, componentes centrais na transmissão e recepção de sinais. Nesse cenário, antenas com polarização dupla ganham relevância por possibilitarem a transmissão em duas polarizações ortogonais com alta isolamento, duplicando a capacidade do canal e aumentando a robustez em ambientes sujeitos a múltiplos caminhos de propagação (*multipath fading*) [3], [4], [5].

Dentre as configurações disponíveis, as antenas de microfita (MPAs) destacam-se por serem compactas, de baixo custo e de fácil integração, sendo consideradas soluções promissoras para as redes 5G [5]. As MPAs retangulares, que representam

a configuração mais simples desse tipo de antena, tipicamente operam com polarização linear [6]. Nesse caso, a orientação da polarização está diretamente relacionada ao modo de operação e à posição do ponto de alimentação, o que possibilita o projeto de MPAs com dois sistemas de alimentação para operação em polarização dupla com alta isolamento [7]. No entanto, MPAs convencionais operando no modo fundamental apresentam ganho máximo limitado, o que pode ser um entrave para aplicações em redes 5G, que exigem elevadas taxas de transmissão de dados. De acordo com a teoria da informação de Shannon [8], uma das estratégias para aumentar a capacidade de transmissão é a melhoria da relação sinal-ruído. Nesse contexto, antenas de alto ganho tornam-se altamente desejáveis, sendo a operação das MPAs em modos de ordem superior uma alternativa viável [9], [10], [11].

Trabalhos recentes têm explorado MPAs de dupla polarização operando em modos de alta ordem, com foco em alcançar alto ganho. Em [3], uma configuração nos modos  $TM_{30}/TM_{03}$  apresenta ganho realizável ( $G_R$ ) = 12,47 dBi, isolamento entre portas de 24,8 dB, discriminação de polarização cruzada (XPD) de 18,1 dB e relação entre lóbulo principal e lateral ( $SLL$ )  $\cong -15,0$  dB. Em [5], é apresentada uma MPA nos modos  $TM_{50}/TM_{05}$ , com  $G_R$  = 10,9 dBi, isolamento entre portas de 14,0 dB, XPD de 20,0 dB e  $SLL$  de  $-12,0$  dB. Já em [12], uma antena operando nos modos  $TM_{90}/TM_{09}$  atinge  $G_R$  = 15,5 dBi, isolamento de 27,0 dB, XPD de 20,0 dB e  $SLL$  =  $-11,0$  dB. Destaca-se que essa última antena oferece vantagens como melhor isolamento e menor  $SLL$ , além de uma relação mais eficiente entre ganho e área geométrica.

As antenas apresentadas em [3], [5] e [12] representam excelentes alternativas de antenas com dupla polarização para aplicações em redes 5G. Entretanto, destaca-se que todas foram originalmente projetadas para faixas de frequência distintas daquelas padronizadas para o 5G no Brasil. Assim, considerando as vantagens da MPA apresentada em [3], este artigo propõe o reprojeto dessa geometria para operação na faixa de 3,5 GHz, conforme definido pela Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel) [13].

Este trabalho propõe uma MPA de dupla polarização e alto ganho que opera no modo  $TM_{30}$ -like, caracterizada por uma geometria composta pela sobreposição de dois ressonadores retangulares resultando em uma estrutura em forma de cruz. A remoção estratégica de quatro regiões centrais nesta estrutura permitiu otimizar o padrão de irradiação, reduzindo significativamente os lóbulos laterais. As simulações demonstraram um desempenho com largura de banda de 1,14% (3,48 – 3,52 GHz),  $G_R$  de 12,7 dBi em 3,5 GHz,  $SLL$  melhor que  $-18$  dB, além de apresentarem isolamento entre portas e XPD

F. S. Borges e T. C. Pimenta, Instituto de Engenharia de Sistemas e Tecnologias da Informação – IESTI, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá – MG, e-mail: {d2021103291, tales}@unifei.edu.br; A. E. S. Deus, P. L. L. Bertarini e R. A. Santos, Faculdade de Engenharia Elétrica – FEELT, Universidade Federal de Uberlândia – Campus Patos de Minas, Patos de Minas – MG, e-mail: {andreas.emmanuel, bertarini, renans}@ufu.br; R. A. Penchel e G. S. Rosa, Faculdade de Engenharia de São João – FESJ, Universidade Estadual Paulista – Campus São João da Boa Vista, São João da Boa Vista – SP, e-mail: {rafael.penchel, simon.rosa}@unesp.br.

superiores a 40 dB na banda passante.

Para validação experimental, um protótipo foi fabricado e caracterizado, cujos resultados apresentaram um ligeiro deslocamento na resposta em frequência (3,52 – 3,57 GHz, correspondendo a 1,41% de banda) em relação às simulações, porém mantendo as principais características de desempenho.

Para uma melhor compreensão da MPA proposta, o restante deste artigo está organizado da seguinte forma: a Seção II apresenta a geometria detalhada e o princípio de funcionamento; na Seção III, é descrito o processo de validação experimental, com a análise dos resultados; por fim, as conclusões principais do estudo são sistematizadas na Seção IV.

## II. PROJETO E ANÁLISE

### A. Geometria do Projeto

A evolução do projeto da MPA proposta é ilustrada na Fig. 1. As antenas estão posicionadas no plano  $xy$ , com centro geométrico em  $(0, 0)$ , e suas dimensões otimizadas são apresentadas na Tabela 1. A otimização dos parâmetros foi realizada por meio de simulações no software Ansys Electronics Desktop, utilizando o método dos elementos finitos. Vale destacar que cada um dos modelos apresentados utiliza alimentação por sonda coaxial com impedância característica de  $50 \Omega$ . A posição da alimentação foi definida a uma distância  $d$  do centro do elemento ressonador, de modo a garantir o adequado casamento de impedâncias com a porta de entrada [6]. O substrato utilizado foi o RT/duroid 5880, com permissividade relativa  $\epsilon_r = 2,20 \pm 0,02$ , tangente de perdas  $\tan(\delta) = 0,0009$  e espessura  $h = 1,575$  mm.

TABELA I: Dimensões dos modelos das MPAs.

Modelos	Variáveis [mm]							
	$L$	$W$	$L_d$	$W_d$	$d$	$S$	$W_s$	$W_2$
Modelo 1	93	34,3	130	130	41	–	–	–
Modelo 2	93	34,3	130	130	41	32,8	2,8	–
Modelo 3	93	34,3	130	130	41	32,8	2,8	29,3
Modelo 4	93	34,3	130	130	41	32,8	2,8	29,3

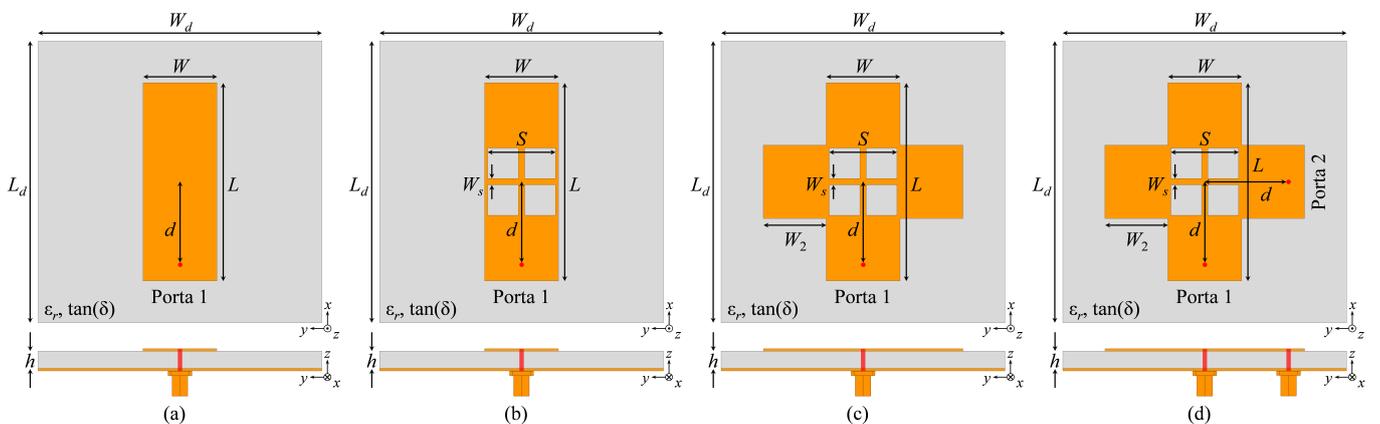


Fig. 1: Configuração da antena de microfita proposta em forma de cruz de alto ganho e polarização dupla. (a) Modelo 1. (b) Modelo 2. (c) Modelo 3. (d) Modelo 4.

A Fig. 1(a) apresenta uma MPA retangular, denominada Modelo 1. Essa antena é composta por um elemento ressonador com dimensões  $L \times W$  e um plano de terra com as mesmas dimensões do substrato  $L_d \times W_d$ . A Fig. 1(b) mostra uma MPA com geometria modificada a partir do Modelo 1, denominada Modelo 2. Nessa versão, quatro seções centrais do ressonador foram removidas (cortes de dimensões  $S \times W_s$ ). A Fig. 1(c) apresenta uma MPA derivada do Modelo 2, denominada Modelo 3. Nessa configuração, um segundo ressonador é adicionado ortogonalmente ao primeiro, compartilhando os cortes centrais. Isso resulta em quatro ressonadores quadrados (lado  $W_2$ ) interconectados por uma estrutura em cruz (dimensões  $S \times W_s$ ). Por fim, a Fig. 1(d) mostra uma MPA derivada do Modelo 3, denominada Modelo 4. Essa antena incorpora uma segunda porta de alimentação, ortogonal à primeira, permitindo operação em dupla polarização.

### B. Princípio de Funcionamento

O Modelo 1 consiste em uma MPA retangular operando no modo  $TM_{30}$ , com frequência de ressonância  $f_r \cong 3,24$  GHz. A excitação desse modo pode ser observada na Fig. 2(a), que apresenta três semicírculos de densidade de corrente superficial ( $J$ ) distribuídos ao longo do ressonador. Nessa condição, conforme mostrado na Fig. 3, a antena apresenta diretividade na direção de máxima irradiação  $D \cong 9,53$  dBi e  $SLL \cong -1,4$  dB no plano  $xz$ . Destaca-se que, no plano  $yz$ , como  $J$  tende a ser aproximadamente constante, não são observados lóbulos laterais significativos.

O Modelo 2, devido à remoção de quatro seções centrais do ressonador, passa a operar em um modo análogo ao  $TM_{30}$ . Nesse caso, como a operação não ocorre em um modo convencional, o modo é denominado  $TM_{30}$ -like [14]. Conforme reportado na literatura [11], [15], modificações na geometria do ressonador provocam um leve deslocamento na frequência de ressonância, sendo que, neste caso, tem-se  $f_r \cong 3,26$  GHz. Tais modificações são utilizadas como estratégia para controlar o comportamento da  $SLL$ , uma vez que as fendas afetam significativamente o semicírculo central da corrente superficial  $J$ , que estava em contra fase, conforme ilustrado na Fig. 2(b).

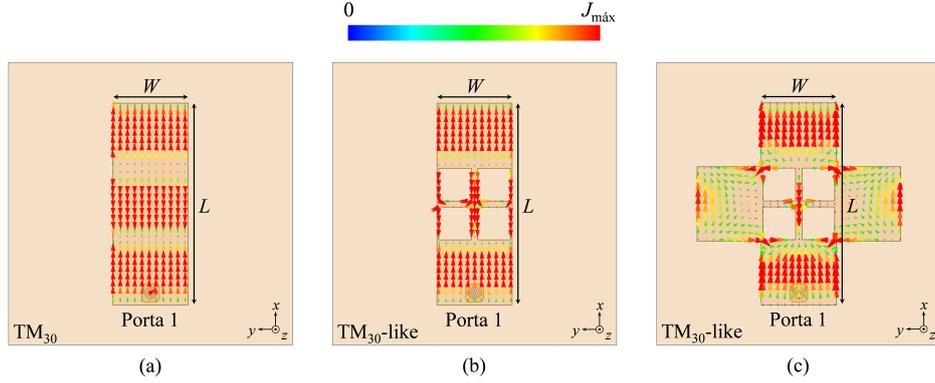


Fig. 2: Densidade superficial de corrente no ressonador. (a) Modelo 1,  $f_r \cong 3,24$  GHz. (b) Modelo 2,  $f_r \cong 3,26$  GHz. (c) Modelo 3,  $f_r \cong 3,5$  GHz.

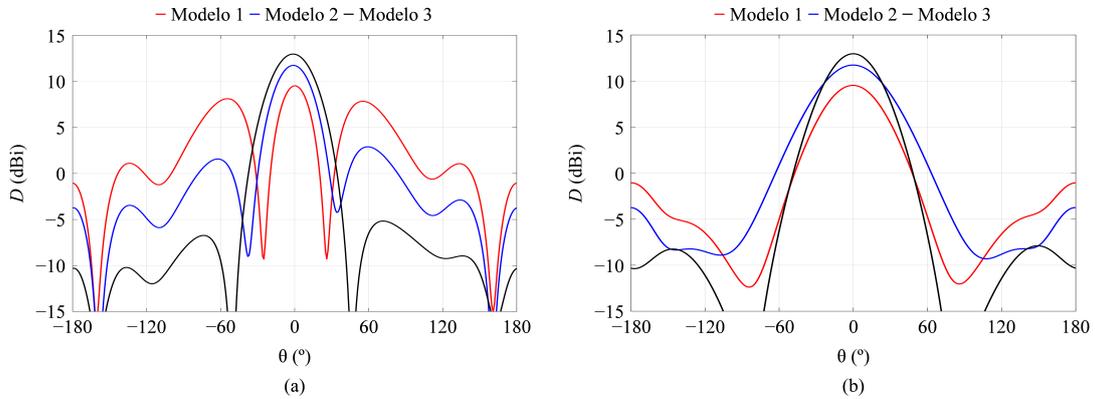


Fig. 3: Diagrama de irradiação de diretividade. (a) Plano  $xz$ ,  $\phi = 0^\circ$ . (b) Plano  $yz$ ,  $\phi = 90^\circ$ .

Assim, a antena passa a se comportar como uma rede de duas MPAs operando no modo  $TM_{10}$ , com separação aproximada de  $\lambda_g/2$ . Nessa condição, conforme mostrado na Fig. 3, a antena apresenta  $D \cong 11,73$  dBi e  $SLL \cong -8,44$  dB no plano  $xz$ , com lóbulos laterais desprezíveis no plano  $yz$ .

O Modelo 3 também pode ser interpretado como uma MPA operando no modo  $TM_{30}$ -like. Nesse caso, o segundo elemento ressonador, que atua como elemento parasita, modifica o comportamento do resquício de  $J$  na região central do ressonador, alinhando parte dessa corrente com a dos outros dois semicírculos. Com isso, a antena passa a operar em  $f_r \cong 3,5$  GHz, apresentando, conforme ilustrado na Fig. 3, diretividade  $D \cong 12,96$  dBi e  $SLL \cong -18,13$  dB no plano  $xz$ , com lóbulos laterais desprezíveis no plano  $yz$ .

O Modelo 4 pode ser interpretado como a disposição ortogonal de duas antenas do Modelo 3, compartilhando o mesmo substrato e plano de terra. Assim, seguindo a orientação do sistema de coordenadas apresentado na Fig. 1, quando a Porta 1 é alimentada, a antena opera no modo  $TM_{30}$ -like em  $f_r \cong 3,5$  GHz (ver Fig. 4(a)); por outro lado, quando a Porta 2 é alimentada, observa-se a operação no modo  $TM_{03}$ -like em  $f_r \cong 3,5$  GHz (ver Fig. 4(b)).

A Fig. 5 apresenta os diagramas de irradiação de diretividade do Modelo 4 para  $f_r \cong 3,5$  GHz. Nesse caso, são analisadas as componentes de polarização direta e cruzada

para as Portas 1 e 2 nos planos  $yz$  (Fig. 5(a)) e  $xz$  (Fig. 5(b)). Quando a Porta 1 é alimentada, observa-se que, no plano  $xz$ , a polarização direta é paralela à  $\hat{\phi}$  e a polarização cruzada é paralela à  $\hat{\theta}$ , enquanto, no plano  $yz$ , a polarização direta é paralela à  $\hat{\theta}$  e a cruzada é paralela à  $\hat{\phi}$ . Quando a Porta 2 é alimentada, observa-se que, no plano  $xz$ , a polarização direta é paralela à  $\hat{\theta}$  e a cruzada é paralela à  $\hat{\phi}$ , enquanto, no plano  $yz$ , a polarização direta é paralela à  $\hat{\phi}$  e a cruzada é paralela à  $\hat{\theta}$ . Assim, os resultados demonstram uma inversão clara entre as componentes de polarização direta e cruzada ao alternar entre as portas, com uma relação de polarização cruzada superior a 40 dB em 3,5 GHz. Adicionalmente, destaca-se que o Modelo 4 apresenta  $D \cong 12,9$  dBi e  $SLL \cong -18,1$  dB no plano  $xz$ , permanecendo sem lóbulos laterais significativos no plano  $yz$ .

### III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a validação experimental do projeto, foi fabricado e caracterizado um protótipo da antena proposta. A Fig. 6 apresenta fotografias do protótipo fabricado, mostrando a vista superior (Fig. 6(a)) e a vista inferior (Fig. 6(b)) da estrutura.

#### A. Parâmetros S

A resposta em frequência dos parâmetros S da MPA proposta é mostrada na Fig. 7. Como a antena possui duas portas de alimentação, analisam-se os coeficientes de reflexão ( $|S_{11}|$

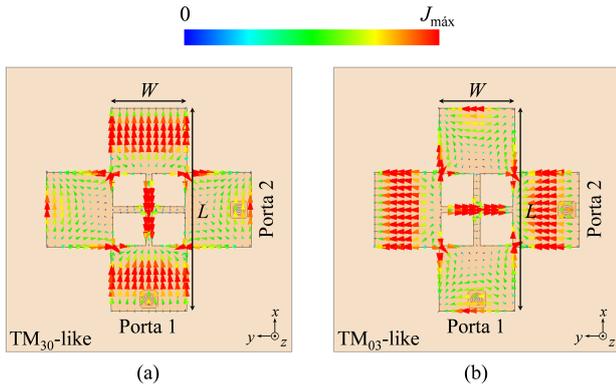


Fig. 4: Densidade superficial de corrente no ressonador para o Modelo 4 em 3,5 GHz. (a) Porta 1 ativada. (b) Porta 2 ativada.

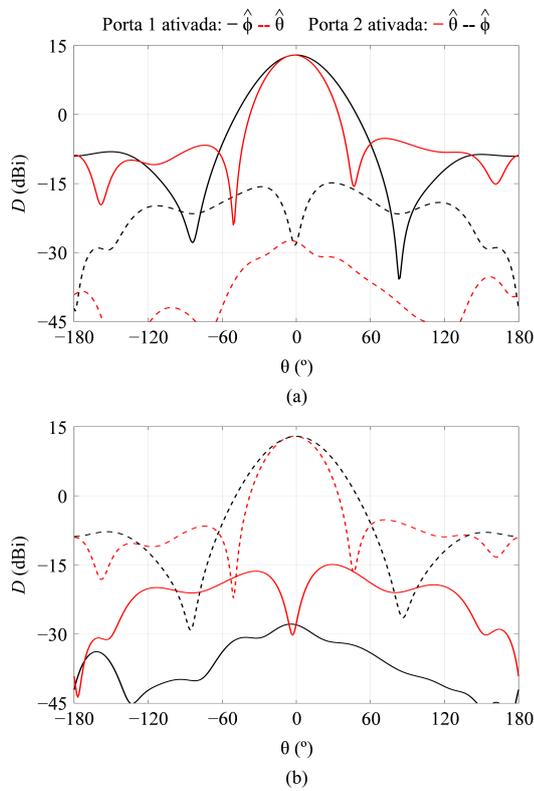


Fig. 5: Diagrama de irradiação de diretividade para o Modelo 4. (a) Plano  $yz$ ,  $\phi = 90^\circ$ . (b) Plano  $xz$ ,  $\phi = 0^\circ$ .

e  $|S_{22}|$ ) e o coeficiente de acoplamento ( $|S_{21}|$ ). Para o modelo simulado, as curvas de  $|S_{11}|$  e  $|S_{22}|$  são idênticas, e indicam que as portas 1 e 2 têm largura de banda de 3,48 a 3,52 GHz para coeficientes de reflexão  $\leq -10$  dB (1,14% em relação à frequência central), e acoplamento ( $|S_{21}|$ ) inferior a  $-40$  dB em toda a faixa — evidenciando alta isolamento entre as portas. Já as curvas medidas do protótipo,  $|S_{11}|$  e  $|S_{22}|$ , indicam uma largura de banda ligeiramente deslocada (3,52 a 3,57 GHz, correspondente a 1,41% de banda relativa), enquanto o  $|S_{21}|$  medido corrobora os resultados esperados, atingindo valor máximo de  $-36,98$  dB ao longo dessa faixa de operação. As discrepâncias entre simulação e medição, especialmente

o deslocamento em frequência, são atribuídas a variações nas propriedades eletromagnéticas do substrato e a imperfeições de fabricação, ainda que dentro de limites aceitáveis.

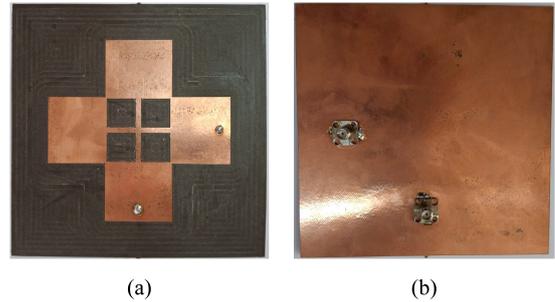


Fig. 6: Fotografias do protótipo. (a) Vista superior. (b) Vista inferior.

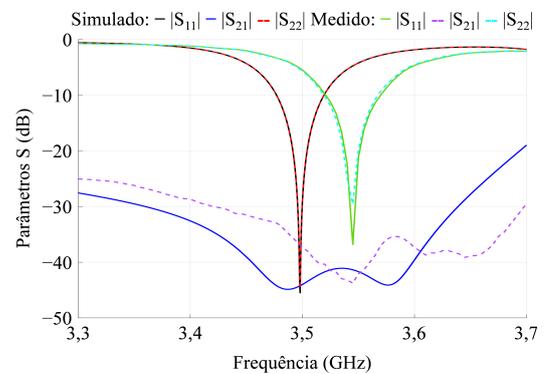


Fig. 7: Parâmetros S simulados e medidos para o Modelo 4.

### B. Desempenho de Irradiação

A Fig. 8 apresenta os diagramas de irradiação simulados do ganho realizável na frequência de 3,5 GHz para o modelo final da MPA. Devido a limitações práticas, não foi possível realizar a medição das características de irradiação a tempo da redação deste manuscrito. Foram analisadas as componentes de polarização direta (co-pol) e cruzada (x-pol) nos planos  $yz$  (Fig. 8(a)) e  $xz$  (Fig. 8(b)). Os resultados demonstram que, ao alternar a excitação entre a Porta 1 e a Porta 2, ocorre a inversão esperada entre as componentes co-pol e x-pol, mantendo uma razão de discriminação de polarização cruzada (XPD) superior a 40 dB. Além disso, o modelo apresenta  $G_R$  de aproximadamente 12,7 dBi na direção de máxima irradiação e nível de lóbulo lateral ( $SLL$ ) em torno de  $-18,1$  dB. Tais resultados comprovam que a antena projetada atinge excelente desempenho em operação com dupla polarização, combinando alto ganho com baixos lóbulos laterais.

### C. Estudo comparativo

Para validar o projeto, a Tabela II apresenta uma análise comparativa com o trabalho de referência [3]. As métricas de avaliação — incluindo diretividade, ganho realizável, largura de banda, relação lóbulo principal/secundários, isolamento entre

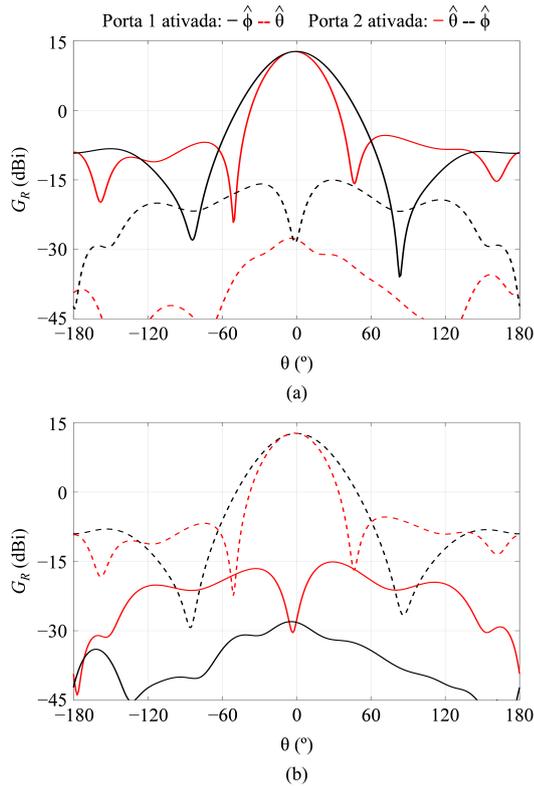


Fig. 8: Diagrama de irradiação de ganho realizável para o Modelo 4. (a) Plano  $yz$ ,  $\phi = 90^\circ$ . (b) Plano  $xz$ ,  $\phi = 0^\circ$ .

portas e discriminação de polarização cruzada — seguem os parâmetros estabelecidos em [3]. Os resultados obtidos demonstram que a antena proposta apresenta desempenho comparável aos resultados experimentais da referência, com vantagem significativa em parâmetros críticos: 17 dB maior na isolamento e 22,8 dB de incremento no XPD. Esta análise confirma que o projeto final supera as metas estabelecidas.

TABELA II: Estudo comparativo com o trabalho de referência.

Modelos	Características					
	$D$ (dBi)	$G_R$ (dBi)	$Bw$ (%)	SLL (dB)	Isolação (dB)	XPD (dB)
[3]	12,93	12,47	1,8	-15,0	24,8	18,1
Modelo 4 (simul.)	12,9	12,7	1,14	-18,1	41,8	40,9
Modelo 4 (med.)	—	—	1,41	—	36,98	—

Traços (—) indicam dados não obtidos.

#### IV. CONCLUSÕES

Neste artigo apresentou-se uma MPA de alto ganho e dupla polarização para redes 5G em 3,5 GHz, baseada em um ressonador em forma de cruz que opera no modo  $TM_{30}$ -like. A remoção estratégica de quatro seções centrais neste arranjo permitiu otimizar simultaneamente o ganho da antena, alcançando 12,7 dBi em 3,5 GHz, e a supressão de lóbulos laterais ( $SLL < -18$  dB). As simulações do projeto final demonstraram largura de faixa de 1,14% (3,48 – 3,52 GHz),

além de isolamento entre portas e XPD superiores a 40 dB na banda passante. A validação experimental por meio de um protótipo fabricado confirmou a eficácia do projeto, mostrando apenas um ligeiro deslocamento na resposta em frequência (3,52 – 3,57 GHz, 1,41% de banda) enquanto mantinha as características essenciais de isolamento entre polarizações. Dessa forma, acredita-se que a MPA proposta representa uma solução potencial para antenas no cenário brasileiro do 5G.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq (Projeto 409146/2021-8) e à FAPEMIG (Projeto APQ-02616-22 e bolsa de estudos 11326 ao autor F. S. Borges) pelo apoio financeiro, bem como à UFU, à UNIFEI e à UNESP pelo suporte institucional.

#### REFERÊNCIAS

- [1] T. -Y. Yan, X. -H. Ding, J. -Y. Yang and J. -X. Chen, "A Low-Cost Compact Dual-Polarized Patch Antenna Array for 5G Massive MIMO Base Station," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 23, no. 4, pp. 1381-1385, Abril 2024.
- [2] N. O. Parchin, J. Zhang, R. A. Abd-Alhameed, G. F. Pedersen and S. Zhang, "A Planar Dual-Polarized Phased Array With Broad Bandwidth and Quasi-Endfire Radiation for 5G Mobile Handsets," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 69, no. 10, pp. 6410-6419, Out. 2021.
- [3] C. Chen, "A Single-Layer Single-Patch Dual-Polarized High-Gain Cross-Shaped Microstrip Patch Antenna," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 22, no. 10, pp. 2417-2421, Out. 2023.
- [4] W. Zhao, X. Li, Z. Qi and H. Zhu, "Broadband and High-Gain Dual-Polarized Antenna Array With Shared Vias Feeding Network for 5G Applications," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 20, no. 12, pp. 2377-2381, Dez. 2021.
- [5] Y. He, Y. Li, W. Sun, Z. Zhang and P. -Y. Chen, "Dual Linearly Polarized Microstrip Antenna Using a Slot-Loaded  $TM_{50}$  Mode," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 17, no. 12, pp. 2344-2348, Dez. 2018.
- [6] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 4th ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2016.
- [7] C. -Y. -D. Sim, C. -C. Chang and J. -S. Row, "Dual-Feed Dual-Polarized Patch Antenna With Low Cross Polarization and High Isolation," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 57, no. 10, pp. 3321-3324, Out. 2009.
- [8] C. E. Shannon, "A mathematical theory of communication," *The Bell System Technical Journal*, vol. 27, no. 3, pp. 379-423, Julho 1948.
- [9] J. Anguera, A. Andújar and J. Jayasinghe, "High-Directivity Microstrip Patch Antennas Based on  $TM_{odd-0}$  Modes," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 19, no. 1, pp. 39-43, Jan. 2020.
- [10] Q. Umar Khan, M. Bin Ihsan, D. Fazal, F. Mumtaz Malik, S. Amin Sheikh and M. Salman, "Higher Order Modes: A Solution for High Gain, Wide Band Patch Antennas for Different Vehicular Applications," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, no. 5, pp. 3548-3554, Maio 2017.
- [11] X. Zhang, L. Zhu and Q. -S. Wu, "Sidelobe-Reduced and Gain-Enhanced Square Patch Antennas With Adjustable Beamwidth Under  $TM_{03}$  Mode Operation," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 4, pp. 1704-1713, Abril 2018.
- [12] Y. He, Y. Li, W. Sun and Z. Zhang, "Dual-Polarized, High-Gain, and Low-Profile Magnetic Current Array Antenna," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 67, no. 2, pp. 1312-1317, Fev. 2019.
- [13] Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), Resolução ANATEL nº 772, 16 Jan. 2025. [Online]. Disponível: <https://informacoes.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2025/2001-resolucao-772> [Acesso em: 1 Mar. 2025].
- [14] J. Zeng, X. Liang, L. He, F. Guan, F. H. Lin and J. Zi, "Single-Fed Triple-Mode Wideband Circularly Polarized Microstrip Antennas Using Characteristic Mode Analysis," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 70, no. 2, pp. 846-855, Fev. 2022.
- [15] J. Wen, D. Xie and L. Zhu, "Bandwidth-Enhanced High-Gain Microstrip Patch Antenna Under  $TM_{30}$  and  $TM_{50}$  Dual-Mode Resonances," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 18, no. 10, pp. 1976-1980, Out. 2019.