

Otimização Geométrica de um Arranjo Refletor Pixelado para Aplicações em Redes Não Terrestres

Lucas de Oliveira Veiga, Danilo Henrique Spadoti, Arismar Cerqueira Sodré Jr. e Ramon Maia Borges

Resumo— Este trabalho apresenta um arranjo refletor pixelado para redes não terrestres (NTN), otimizado via algoritmo genético (AG) integrado ao software HFSS. Além da otimização topológica das células, o projeto emprega uma otimização geométrica com inclinação de $15,1^\circ$ nos quatro vértices do arranjo para assegurar a coerência de fase e a soma construtiva das frentes de onda. Com dimensões de $12,21 \times 12,21$ cm, o protótipo proporciona ganho superior a 20 dBi na faixa de 19,7 a 21,2 GHz.

Palavras-Chave— algoritmo genético, arranjo refletor pixelado, otimização geométrica, redes não terrestres.

Abstract— This work presents a pixelated reflectarray for non-terrestrial networks (NTN), optimized via a genetic algorithm (GA) integrated into HFSS software. In addition to the topological optimization of the cells, the design employs geometric optimization with a 15.1° tilt at the four vertices of the array to ensure phase coherence and constructive interference of the wavefronts. With dimensions of 12.21×12.21 cm, the prototype offers a gain greater than 20 dBi in the 19.7 to 21.2 GHz frequency range.

Keywords— genetic algorithm, geometric optimization, non-terrestrial network, pixelated reflectarray.

I. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por conectividade e taxas de dados tem impulsionado a evolução das gerações de comunicação móvel, que passam a lidar com serviços inovadores e aplicações críticas. Nesse ecossistema, a convergência entre infraestruturas terrestres e redes não terrestres (NTN - *non-terrestrial networks*) aparece com o potencial de assegurar a continuidade de serviços e a mitigação da exclusão digital em regiões geograficamente isoladas. O sucesso de tal integração requer, naturalmente, soluções que viabilizem enlaces com estações-base de alta altitude ou sistemas satelitais [1,2].

Os arranjos refletores correspondem a uma tecnologia promissora para compensar parte das severas perdas de propagação em NTN ao combinar as vantagens operacionais de refletores parabólicos com o baixo perfil e a flexibilidade de apontamento de feixe de arranjos planares. No entanto, o projeto dessas estruturas impõe desafios devido à correlação entre os

parâmetros geométricos dos elementos e sua respectiva resposta eletromagnética, além do acoplamento mútuo intrínseco entre células adjacentes. Estes fatores tornam métodos de projeto convencionais dependentes de intervenção manual e de simulações iterativas de alto custo computacional [3-5].

Inteligência artificial (IA) e algoritmos genéticos (AG) têm proporcionado avanços no projeto e otimização topológica de arranjos refletores, uma vez que contribuem de forma significativa para a resolução de problemas de otimização altamente não lineares e multidimensionais [6-12]. Estudos demonstram, por exemplo, a aplicabilidade de AG na configuração de arranjo refletor de banda dupla [11] e no *design* de arranjo refletor dielétrico fabricado por meio de técnicas de impressão em três dimensões (3D) [8]. Os diversos resultados relatados na literatura indicam que estratégias de otimização orientadas por IA podem melhorar características-chave da antena, como resposta de fase, largura de banda e ganho, além de simplificar o procedimento geral de projeto.

Técnicas de otimização baseadas em IA, especificamente AG, têm sido aplicadas inclusive no desenvolvimento de arranjos refletores pixelados [13,14], abordagem esta que expande o grau de liberdade do projeto ao discretizar a superfície condutora em elementos de subcomprimento de onda. Em estruturas pixeladas, a célula unitária é dividida em *pixels* configuráveis para proporcionar maior controle da resposta eletromagnética. Particularmente, apresentamos em [15] um arranjo refletor pixelado desenvolvido com o apoio de AG para aplicações em NTNs. O estudo direcionou foco na criação e otimização topológica das células unitárias pixeladas, e tomou uma configuração puramente planar para o arranjo refletor composto por tais células. Obteve-se, através de simulações computacionais, a média do coeficiente de transmissão (S_{21}) abaixo de -30 dB na faixa de operação desejada, indicando reflexão do sinal incidente na estrutura refletora.

Este trabalho é uma extensão de [15] e apresenta a otimização geométrica do arranjo refletor pixelado, também baseada em AG, na direção de mitigar a dispersão de fase nas bordas da estrutura e, consequentemente, incrementar o ganho resultante de modo a favorecer aplicações em NTNs. As principais contribuições são: implementação de otimização geométrica no arranjo refletor pixelado, em adição à otimização topológica previamente realizada em [15]; construção do protótipo de dimensões $12,21 \times 12,21$ cm; resultados experimentais apontando ganho superior a 20 dBi na faixa de 19,7 a 21,2 GHz; medidas de diagrama de irradiação.

O artigo está estruturado em quatro seções. A Seção II reúne informações da célula unitária desenvolvida com base em AG e apresenta resultados numéricos da otimização geométrica do arranjo refletor pixelado. A Seção III reporta os resultados experimentais, enquanto conclusões e sugestões para trabalhos futuros são apresentadas na Seção IV.

Lucas de Oliveira Veiga, Danilo Henrique Spadoti e Ramon Maia Borges, Instituto de Engenharia de Sistemas e Tecnologia da Informação, Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Itajubá-MG, e-mails: lucas.oliveiraveiga@outlook.com, spadoti@unifei.edu.br, ramonmb@unifei.edu.br; Arismar Cerqueira Sodré Jr., Laboratório WOCA, Instituto Nacional de Telecomunicações (Inatel), Santa Rita do Sapucaí-MG, e-mail: arismar@inatel.br. Este trabalho foi parcialmente financiado pelo projeto "Redes Ópticas/Sem Fio Convergentes 5G e 6G", apoiado pelo xG-Mobile-Centro de Competência EMBRAPA-Inatel em Redes 5G e 6G (Industrial (XGM-AFCCT-2024-2-15-1)), com recursos financeiros do PPI IoT/Manufatura 4.0 da MCTI, processo nº 052/2023, firmado com a EMBRAPA; parcialmente pela FAPEMIG (RED-00194-23); parcialmente pelo CNPq; parcialmente pela CAPES; e parcialmente pela UNIFEI.

II. OTIMIZAÇÃO GEOMÉTRICA DO ARRANJO REFLETOR

O desenvolvimento do arranjo refletor para aplicações em NTN iniciou-se com a criação da célula unitária pixelada. Tal processo foi conduzido através de simulações no *software* Ansys HFSS, com um fluxo de trabalho totalmente automatizado em Python via biblioteca PyAEDT. Para a otimização topológica da célula pixelada, empregou-se AG cujos fundamentos, parâmetros de evolução e validação da função de aptidão baseada no S_{21} estão detalhados em [15]. Os requisitos primários de projeto incluíam: coeficiente de reflexão (S_{11}) próximo de 0 dB e média do $S_{21} \leq -30$ dB na faixa de frequência entre 19,7 e 21,2 GHz; ganho mínimo de 20 dBi, para amenizar o impacto das severas perdas por propagação inerentes a NTN; dimensões da célula unitária fixadas em 6 mm x 6 mm, na direção de obter periodicidade de subcomprimento de onda e estrutura compacta. Utilizou-se um substrato dielétrico RO3003 (permissividade relativa $\epsilon_r = 3$ e espessura de 0,51 mm), sobre o qual foi definida uma camada metálica discretizada.

A Fig. 1 apresenta a configuração da célula unitária pixelada empregada nas simulações, juntamente com os parâmetros de espalhamento obtidos para a estrutura proposta. A célula, com dimensões totais de 6 mm x 6 mm, foi subdividida em uma matriz de *pixels* de 1 mm x 1 mm, resultando em uma resolução aproximada de $\lambda/14$ na banda K. Essa discretização permite representar de forma mais precisa a distribuição das correntes superficiais, reduzindo erros de quantização e aumentando o grau de liberdade no processo de otimização do elemento. Cada *pixel* atua como um gene em um cromossomo binário, no qual o valor “1” representa a presença de cobre e o valor “0” a sua ausência, possibilitando o controle da resposta eletromagnética da célula em termos de fase e magnitude. O modelo empregado na análise periódica utilizou porta de *Floquet*, técnica tipicamente utilizada para caracterização de células unitárias em arranjos refletores e superfícies seletivas em frequência (FSS).

Os resultados mostram que o parâmetro S_{11} permaneceu próximo de 0 dB em toda a faixa analisada, indicando que praticamente toda a energia incidente é refletida pela estrutura. O S_{21} apresentou um mínimo de -58,2 dB em 19,2 GHz (ponto ótimo de ressonância). Em toda a faixa alvo de operação (19,7 a 21,2 GHz), obteve-se $S_{21} \leq -25$ dB e média calculada para este coeficiente inferior a -30 dB, evidenciando elevada atenuação da potência transmitida através da célula e conformidade com os requisitos do projeto. Nota-se ainda, em função das curvas de S_{11} e S_{21} , um comportamento refletor relevante da célula em faixa larga (17 a 26 GHz).

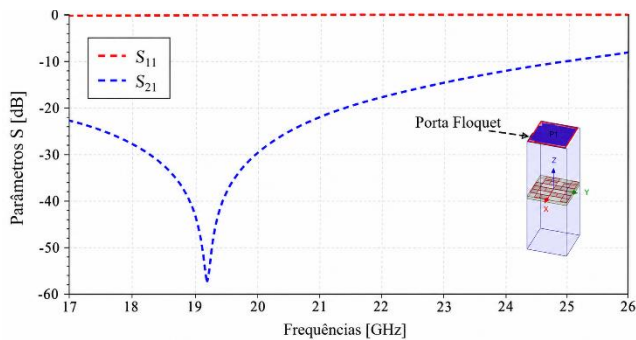


Fig. 1. Célula unitária criada empregando algoritmo genético e parâmetros S simulados [15].

A. Arranjo refletor plano

O arranjo refletor foi primeiramente estruturado em uma configuração puramente planar, composta por uma matriz de 20×20 elementos, totalizando 400 células unitárias pixeladas e dimensões finais de 12,21 x 12,21 cm. Para a presente análise do refletor, utilizou-se um iluminador do tipo antena corneta cônica com ganho de $\approx 12,5$ dBi, posicionado de forma centralizada a uma distância focal (f_d) de 14,34 cm para incidir o sinal diretamente sobre o centro da superfície refletora. A Fig. 2(a) apresenta o *setup* da simulação do arranjo refletor plano, otimizado topologicamente pelo AG.

Os resultados numéricos de ganho para o sistema integrado (alimentador e arranjo refletor) estão reportados na Fig. 3, onde se observam valores de ganho entre 7,55 e 11,13 dBi obtidos com a estrutura planar na faixa de frequência de interesse. Apesar de a estrutura alcançar o critério fixado para S_{21} com as células pixeladas, o ganho total resultante ficou abaixo do ganho oriundo do iluminador, não sendo tal parâmetro incrementado. Este comportamento pode ser explicado pela dispersão de fase introduzida pelo arranjo refletor, efeito que ocorre porque os elementos localizados nas periferias da estrutura apresentam uma distância de percurso espacial distinta em relação ao iluminador, quando comparados aos elementos centrais. Em um arranjo puramente planar, a variação nas trajetórias em relação ao f_d resulta em uma distribuição de fase não uniforme na abertura do refletor. Consequentemente, as ondas refletidas sofrem interferências destrutivas, limitando a capacidade da antena de concentrar a energia irradiada em um feixe estreito e de ganho relevante. Implementou-se então uma otimização geométrica baseada em AG para superar tal questão e incrementar significativamente o ganho resultante, conforme descreve a seção II.B.

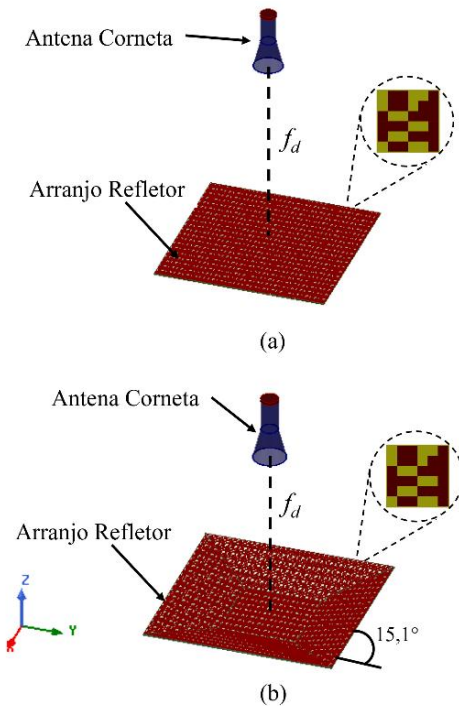


Fig. 2. *Setup* da simulação do arranjo refletor: (a) arranjo plano com otimização topológica [15]; (b) arranjo com otimização topológica e geométrica, incorporando inclinação de $15,1^\circ$ nas bordas.

B. Arranjo refletor otimizado geometricamente

A mitigação da dispersão de fase e a consequente maximização do ganho em arranjos refletores planares podem ser alcançadas por meio de diversas estratégias de projeto que visam melhorar a coerência das frentes de onda refletidas. Entre as abordagens, destacam-se o controle individual da fase em cada célula unitária, através da variação das dimensões geométricas, da rotação dos elementos, da distância entre os elementos ou do uso de múltiplas camadas dielétricas para compensar os atrasos de propagação. Outra maneira é a transição de superfícies planas para geometrias que incorporam curvaturas ou inclinações estruturais, permitindo equilibrar os caminhos elétricos entre o iluminador e os elementos periféricos sem a necessidade de complexas variações individuais em cada célula [16]. Todos esses métodos buscam somar de forma construtiva os campos na direção principal de irradiação.

Este trabalho explora a otimização geométrica aplicada nos vértices do arranjo, com o apoio de AG. A Fig. 2(b) expõe a solução alcançada, que consiste na implementação de uma inclinação de $15,1^\circ$ nas quatro laterais do arranjo refletor. Essa modificação foi projetada para compensar o erro de percurso espacial em relação ao iluminador, mantendo a distância f_d . Ao ajustar mecanicamente a orientação das células periféricas, a inclinação altera o ângulo de incidência do sinal, promovendo uma melhor coerência de fase entre as ondas refletidas e garantindo a soma construtiva das frentes de onda na direção principal de irradiação.

Os resultados obtidos nas simulações para o sistema integrado (alimentador e arranjo refletor) confirmam o incremento do ganho com a solução proposta. Obteve-se ganho realizado superior a 22 dBi entre as frequências de 19,7 e 21,2 GHz ao adicionar a otimização geométrica no projeto do arranjo refletor, conforme mostra a Fig. 3. Este desempenho ao longo da faixa de frequência alvo de operação certifica que a inclinação de $15,1^\circ$ oriunda da otimização geométrica favoreceu a coerência de fase necessária para a soma construtiva das frentes de onda na direção principal de radiação.

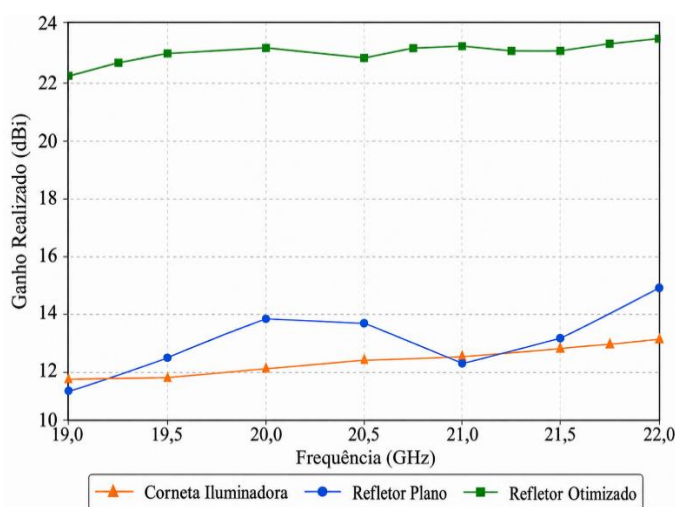


Fig. 3. Simulação de ganho realizado para o arranjo refletor plano e para o arranjo refletor otimizado geometricamente.

III. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O protótipo do arranjo refletor pixelado foi fabricado com dimensões totais de $12,21 \times 12,21$ cm, conforme a Fig. 4. A estrutura física é constituída por uma matriz periódica de 20×20 elementos, totalizando 400 células unitárias de $6 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$. Observa-se a distribuição detalhada dos elementos metálicos de cobre obtidos pelo processo de otimização topológica via AG, em que cada pixel de $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ desempenha a função de um gene condutor. Adicionalmente, destaca-se a inclinação física de $15,1^\circ$ implementada nas quatro laterais periféricas do arranjo. Essa modificação geométrica configura uma superfície tridimensional no formato de pirâmide truncada, projetada com o propósito de compensar a variação do caminho elétrico em relação ao alimentador e assegurar a coerência de fase das ondas refletidas.

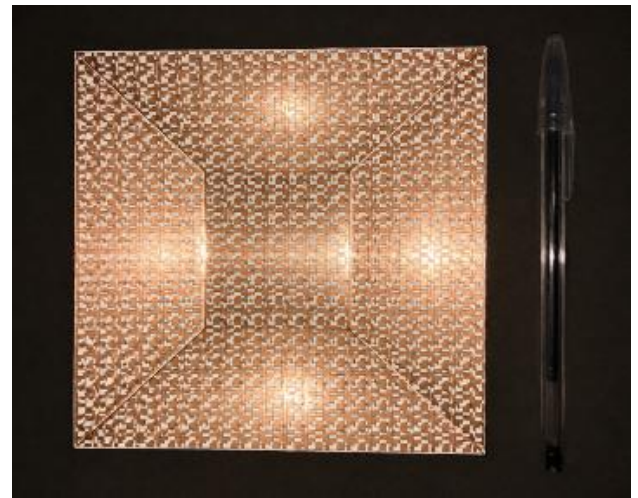


Fig. 4. Fotografia do protótipo do arranjo refletor pixelado.

A caracterização inicial do protótipo envolveu medidas de diagrama de irradiação e de ganho na frequência central de operação (20,5 GHz). Em relação ao iluminador, embora o modelo numérico tenha adotado uma corneta cônica com ganho de 12,5 dBi para fins de avaliação, a investigação experimental utilizou uma *Filtenna* [17] por motivo de disponibilidade em laboratório. Este elemento opera na faixa de 19 a 22 GHz com um ganho realizado variando entre 10,28 e 10,95 dBi, mantendo um comportamento apto para a aplicação proposta.

A avaliação dos padrões de irradiação do sistema completo foi realizada para as polarizações vertical e horizontal, visando quantificar o desempenho de diretividade do arranjo pixelado otimizado geometricamente. Este procedimento experimental é importante para validar a eficácia da inclinação geométrica de $15,1^\circ$ implementada nos vértices da estrutura. A Fig. 5 apresenta os diagramas de irradiação obtidos experimentalmente. Observa-se comportamento diretivo do arranjo refletor pixelado para ambas as polarizações, apresentando consistentemente um lóbulo principal centrado em 0° . O sistema apresentou uma largura de feixe de meia potência (HPBW) de $10,13^\circ$ (vertical) e $13,77^\circ$ (horizontal).

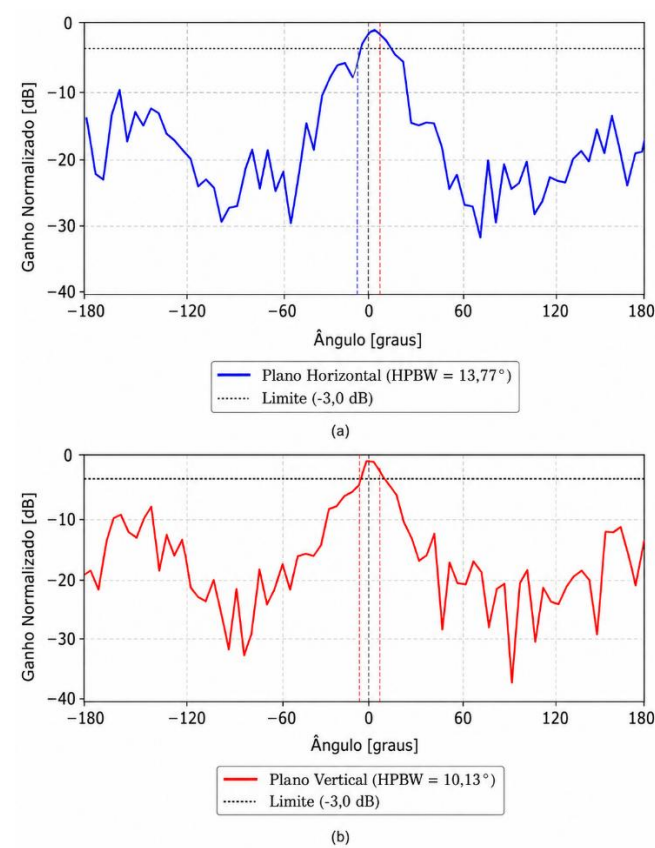


Fig. 5. Padrões de irradiação para a frequência de 20,5 GHz.

Os valores simulados e medidos de ganho na frequência de 20,5 GHz estão reunidos na Tabela I. Para o iluminador isolado, o valor simulado foi de 12,46 dBi, enquanto o ganho experimental foi de 10,62 dBi. Essa diferença decorre da utilização da *Filtenna* no protótipo físico, em substituição à corneta cônica idealizada e adotada no modelo numérico. No caso do refletor isolado, o ganho simulado foi de 10,96 dBi, e o ganho medido alcançou 9,55 dBi. Nota-se correlação entre o modelo computacional e a estrutura fabricada, com variação abaixo de 1,5 dB no parâmetro em questão. Para o sistema integrado, obteve-se experimentalmente o ganho de 20,17 dBi. Embora tal valor esteja abaixo do simulado (23,42 dB) em razão das diferenças de iluminador e de imperfeições na montagem da estrutura mecânica do protótipo, nota-se o incremento significativo do ganho total medido quando comparado ao ganho do iluminador isolado. Nota-se ainda que o ganho total medido superou os 20 dBi, atendendo ao requisito de ganho mínimo pré-estabelecido.

Os resultados do diagrama de irradiação e ganho confirmam o comportamento direcional para o protótipo, evidenciando o impacto positivo direto da otimização geométrica com inclinação de 15,1° aplicada nas bordas da estrutura. Essa modificação física compensou com eficácia a dispersão de fase e os erros de percurso espacial em relação ao iluminador, garantindo a soma construtiva das frentes de onda. Isso ficou comprovado pelos diagramas medidos, que apresentaram um lóbulo principal centrado em 0° para ambas as polarizações. Além disso, o ganho de 20,17 dBi obtido experimentalmente para o sistema integrado na frequência de 20,5 GHz atendeu com sucesso ao requisito de ganho mínimo de 20 dBi. Mesmo com

as perdas decorrentes de imperfeições mecânicas de montagem e da substituição prática do iluminador por uma *Filtenna*, o incremento expressivo de ganho em relação ao alimentador isolado valida a metodologia baseada em AG como uma abordagem robusta para o desenvolvimento de arranjos refletores pixelados no contexto de NTN.

TABELA I. VALORES SIMULADOS E EXPERIMENTAIS DE GANHO NA FREQUÊNCIA DE 20,5 GHZ.

	Ganho [dBi]
Iluminador simulado	12,46
Iluminador experimental	10,62
Arranjo refletor simulado	10,96
Arranjo refletor experimental	9,55
Sistema Total Simulado	23,42
Sistema Total Experimental	20,17

Após o projeto e a caracterização experimental do arranjo refletor, a Tabela II apresenta uma análise comparativa do protótipo desenvolvido frente ao estado da arte da literatura. Essa comparação foca em trabalhos recentes e correlacionados, destacando parâmetros essenciais como a frequência de operação, o tipo de elemento base (com ênfase em estruturas pixeladas), o ganho realizado, o número de camadas dielétricas e a área física total da abertura.

Os trabalhos que operam em múltiplas bandas ilustram o balanço entre complexidade estrutural e desempenho. Ao analisar especificamente o emprego de algoritmos de otimização em superfícies pixeladas, que conferem elevado grau de liberdade ao projeto, observa-se que o protótipo proposto simplifica drasticamente o perfil físico do arranjo. Higashi et al. [18] aplica AG para otimizar um *patch* pixelado de camada única na faixa de 13 a 17 GHz, resultando em uma área de 235,62 cm². Outros projetos pixelados na literatura, como os de Maruyama et al. [19] e Li et al. [23], recorrem a estruturas de dupla camada para viabilizar o controle de fase, o que eleva a complexidade de fabricação e resulta em áreas físicas massivas (de até 25.446,90 cm²).

Malfajani et al. [24] opera em 9,7/19,2 GHz empregando patches circulares para obter ganhos de 27,7 dBi e 31,8 dBi, demandando uma abertura ainda maior, de 706,86 cm². Na mesma direção, Abdollahvand et al. [25] utiliza uma estrutura de camada única com elemento base de dipolo cruzado complexo para operação em 20/30 GHz, alcançando ganhos de 28,5 dBi e 32,25 dBi, porém exigindo uma área física de 324,00 cm².

Nesse cenário, o arranjo proposto neste trabalho destaca-se por sua extrema compactação e eficiência de abertura. Projetado para aplicações em redes não terrestres (NTN) na faixa de 19,7 a 21,2 GHz, o protótipo alcança ganho superior a 20 dBi operando em camada única com uma área física de apenas 149,08 cm² — a menor entre todas as estruturas pixeladas comparadas. Além disso, embora a faixa nominal de projeto seja voltada para a banda K, a célula unitária desenvolvida via AG demonstrou um comportamento refletor relevante em faixa larga (estendendo-se de 17 a 26 GHz), conferindo grande robustez ao sistema. Esse desempenho de banda larga e a otimização

tridimensional de alta precisão validam a metodologia adotada, a qual foi inteiramente desenvolvida em ambiente Python com o suporte da biblioteca PyAEDT para integração e automação das simulações eletromagnéticas.

TABELA II. TABELA COMPARATIVA DE ARTIGOS SOBRE OS ARRANJOS REFLETORES.

Ref.	Freq. (GHz)	Elemento (Camadas)	Ganho (dBi)	Área (cm ²)
[18]	13–17	Patch pixelado	–	235,62
[19]	1,0 / 1,5	Patch pixelado	–	2204,48
[20]	1,47	Patch pixelado	26,7	25446,90
[21]	13,0 / 30,0	Patch pixelado	–	20736,00
[22]	19,5–21,5	Split ring	35,5	1194,59
[23]	10 / 22	Loop quadrado	23,6 / 30,6	400,00
[24]	9,7 / 19,2	Patch circular	27,7 / 31,8	706,86
[25]	20 / 30	Dipolo cruzado	28,5 / 32,25	324,00
Este trabalho	19,7 / 21,2	Patch pixelado	20,84 / 21,00	149,08

IV. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de um arranjo refletor pixelado para aplicações em NTN na faixa de 19,7 a 21,2 GHz. A metodologia de projeto baseou-se no uso de AG para a otimização topológica e geométrica da estrutura. Esta última resultou em uma inclinação de 15,1° nos vértices do protótipo construído, para garantir coerência de fase e soma construtiva das frentes de onda na direção principal de radiação. Resultados numéricos e experimentais validaram o modelo e confirmam a eficácia de algoritmos evolutivos na criação de soluções em antenas para infraestruturas de NTN. Sugestões para trabalhos futuros incluem medidas nas faixas de frequências inicial e final e teste em campo do protótipo.

REFERÊNCIAS

[1] X. Wang, et al., “Bridging terrestrial and non-terrestrial networks: A novel architecture for space-air-ground-sea integration system”, *IEEE Wireless Communications*, v. 32, pp. 20-27, Junho 2025.

[2] S. Zhang, Ozger, et al., “6G for connected sky: Holistic adaptive combined airspace and non-terrestrial network architecture”, *IEEE wireless communications*, v. 32, pp. 204-211, Outubro 2025.

[3] J. Uddin, et al., “The Evolutions of Reflectarray Antennas for Small Satellites: Navigating to Design, Fabrication and Performance Techniques”, *IEEE Access*, v. 13, pp. 156465-156485, Agosto 2025.

[4] J. A. Joy, et al., “Modern reflectarray antennas: A review of the design, state-of-the-art, and research challenges”, *IEEE Access*, v. 12, pp. 46717-46740, Março 2024.

[5] J. Ali, A. Ahmad, D. Y. Choi., “Single-layer metasurface-based reflectarray antenna with H-shaped slotted patch for X-band communication”, *Nanomaterials*, v. 14, pp. 1495, Agosto 2024.

[6] N. Sarker, et al., “Applications of machine learning and deep learning in antenna design, optimization, and selection: A review”, *IEEE Access*, v. 11, pp. 103890-103915, Setembro 2023.

[7] P. Mahouti, “Application of artificial intelligence algorithms on modeling of reflection phase characteristics of a nonuniform reflectarray element”, *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, v. 33, pp. e2689, Outubro 2019.

[8] Li, B. Mei, C. Y. Zhou, Y. Lv Xin, “A 3-D-printed wideband circularly polarized dielectric reflectarray of cross-shaped element”, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, v. 19, pp. 1734-1738, Outubro 2020.

[9] L. O. Veiga, D. H. Spadoti, Arismar Cerqueira S. Jr., R. M. Borges, “Otimização de elemento de FSS baseada em algoritmo genético para aumento da largura de banda”, in *Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica (SBMO)*, Bento Gonçalves, Brasil, 2024. Anais do SBMO 2024.

[10] El Misilmani, M. Hilal e T.T NaousT, “Machine learning in antenna design: An overview on machine learning concept and algorithms”, in *2019 International Conference on High Performance Computing & Simulation (HPCS)*, Dublin, Irlanda, pp. 600-607, Julho 2019.

[11] T. Maruyama, “Design of dual-band reflectarray using genetic algorithm”, in *AIP Conference Proceedings*, Julho 2017.

[12] D. Higashi, H. Deguchi e M. Tsuji, “GA-Optimized reflectarray elements for broadband orthogonal-polarization conversion”, in *2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*, San Diego, Estados Unidos, Julho 2017.

[13] C. Li, S. Xu, F. Yang, e M. Li, “Design and optimization of a mechanically reconfigurable reflectarray antenna with pixel patch elements using genetic algorithm”, in *2019 IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS)*, Guangzhou, China, Maio 2019.

[14] K. Sakagawa, H. Inoue, D. Higashi, H. Deguchi, e M. Tsuji, “Design of a dual-band single layer reflectarray with arbitrarily-shaped elements”, in *2020 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting*, Montreal, Canada, Julho 2020.

[15] L. O. Veiga, D. H. Spadoti, Arismar Cerqueira S. Jr., R. M. Borges, “Arranjo refletor pixelado empregando algoritmo genético para aplicações em redes NTN,” in *XIV Conferência Nacional em Comunicações, Redes e Segurança da Informação (ENCOM)*, Natal, Brasil, 2024. Anais do ENCOM 2024.

[16] Shaker, J., Chaharmir, M. R., & Ethier, J. *Reflectarray antennas: analysis, design, fabrication, and measurement*. Artech House, 2013.

[17] A.A.C. Alves, L.G. da Silva, E. C.V. Boas, D.H. Spadoti, e A. C. S. Junior., “Mechanically tunable horn filtenna for mm-waves”, in *2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Cracóvia, Polónia, Março 2019.

[18] Daichi Higashi, Hiroyuki Deguchi e Mikio Tsuji. “GA-Optimized reflectarray elements for broadband orthogonal-polarization conversion” (2017), pp. 99–100.

[19] Tamami Maruyama. “Design of dual-band reflectarray using genetic algorithm”. *AIP Conference Proceedings*. Vol. 1865. 1. AIP Publishing. 2017.

[20] Chenglei Li et al. “Design and optimization of a mechanically reconfigurable reflectarray antenna with pixel patch elements using genetic algorithm”. *2019 IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS)*. IEEE. 2019, pp. 1–3.

[21] Kotaro Sakagawa et al. “Design of a Dual-Band Single Layer Reflectarray with Arbitrarily-Shaped Elements”. *2020 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting*. IEEE. 2020, pp. 93–94.

[22] Xingliang Zhang et al. “Single-layer reflectarray antenna with independent dual-CP beam control”. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 19.4 (2020), pp. 532–536.

[23] Xi Li e Lin Yang. “Single-layer dual-band wide band-ratio reflectarray with orthogonal linear polarization”. *IEEE Access* 8 (2020), pp. 93586–93593.

[24] R Shamsae Malfajani e B Abbasi Arand. “Dual-band orthogonally polarized singlelayer reflectarray antenna”. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 65.11(2017), pp. 6145–6150.

[25] Mousa Abdollahvand et al. “A 20/30 GHz reflectarray backed by FSS for shared aperture Ku/Ka-band satellite communication antennas”. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 19.4 (2020), pp. 566–570.