

Arranjo de Antena em Guia de Onda Fendido de Alto Ganho para 5G

Evandro C. V. Boas¹, Raj Mittra² e Arismar Cerqueira S. Jr¹

Resumo— Este trabalho apresenta os resultados iniciais do desenvolvimento de um arranjo de antenas em guia de onda fendido de alto ganho para redes 5G, operando na faixa de ondas milimétricas. O arranjo é composto por 27 fendas inclinadas e posicionadas longitudinalmente na face maior de um guia de onda comercial WR/28, além de seis pares de ranhuras metálicas dispostas simétrica e paralelamente às suas fendas. O desempenho do arranjo foi avaliado utilizando o programa ANSYS HFSS[®]. Obteve-se banda fracionária de 5,36 % (25,41–26,81 GHz), ganho de 28 dBi para a faixa de operação e relação frente-costa superior a 30 dB.

Palavras Chave—5G, antenas, arranjo de antenas, ondas milimétricas.

Abstract— This work describes the preliminary results of the development of a high-gain slotted waveguide antenna array for the future 5G networks, operating in millimeter waves. The array is composed by 27-sloped slots positioned onto the WR28 waveguide broadside wall, as well as by six pairs of metal grooved-structures placed parallel to the array axis. The array performance has been evaluated using ANSYS HFSS[®] software. It has been obtained fractionary bandwidth of 5.36 % (from 25.41 to 26.81 GHz), gain of 28 dBi over the entire bandwidth and front-to-back ratio greater than 30 dB.

Keywords — 5G, antennas, antenna array, millimeter waves.

I. INTRODUÇÃO

A evolução das redes de telefonia móvel é resultado da demanda por sistemas com maior capacidade e uso eficiente de recursos e do espectro eletromagnético. Entretanto, serviços e tecnologias emergentes exigirão maior flexibilidade para as futuras redes de telefonia móvel de quinta geração (5G) [1-3]. As redes 5G devem atender aos pré-requisitos de três principais cenários: comunicações massivas entre máquinas (mMTC, *massive machine type communications*), comunicações móveis com altas taxas de transmissão (eMBB, *extreme mobile broadband*), e comunicações ultra confiáveis de baixa latência (URLLC, *ultra-reliable low latency*). As primeiras redes 5G atenderão os serviços eMBB e devem operar em diferentes faixas de frequência [4]. A *World Radio Conference 2015* (WRC-15) especificou três potenciais faixas de frequências para o desenvolvimento de sistemas 5G, sendo frequências baixas (400–3000 MHz), médias (3–6 GHz) e altas (24–86 GHz) [5]. Dentre elas, a faixa de frequência em ondas milimétricas possui limitações em cobertura devido à intensificação dos fenômenos de atenuação, apesar de apresentar maior disponibilidade de espectro [6-8]. Para mitigar os efeitos da atenuação nessa faixa, os sistemas 5G dispõem de algumas técnicas como uso de arranjos de antenas de alto ganho [2,3].

Os arranjos de antenas para ondas milimétricas tipicamente utilizam elementos impressos [9-11], guias de onda integrados ao substrato (SIW, *Substrate integrate waveguide*) [12-14] ou antenas em guias de onda fendido [15-20]. Estruturas de alto ganho formadas por irradiadores impressos ou SIW são complexas devido ao uso de uma ou múltiplas portas atreladas à rede de alimentação para excitação de seus elementos. Arranjos de antenas em guia de onda fendido (SWAA, *Slotted waveguide antenna array*) são excitados por uma única transição guia/coaxial. Todavia, a associação longitudinal das fendas prove diagrama diretivo em apenas um dos planos. Logo, o aumento efetivo de ganho no plano transversal ao das fendas ocorre somente com a associação de dois ou mais SWAAs. Isso resulta no uso de múltiplas transições ou uma única transição associada a divisores de potência [21].

O uso de ranhuras ou sulcos, cujas dimensões são menores que um comprimento de onda, em superfícies metálicas ou dielétricas permite obter fontes de irradiação secundárias. Essas estruturas re-irradiam a energia, proveniente de ondas de superfície, em fase com o campo elétrico irradiado pela fonte primária [22, 23]. Portanto, obtém-se estruturas de alto ganho e menor complexidade. Este trabalho apresenta resultados preliminares do desenvolvimento de um SWAA, visto na Fig. 1, composto por 27 fendas inclinadas e seis pares de ranhuras metálicas, cujas dimensões foram 124 x 260 mm². O arranjo utiliza um guia de onda padrão comercial WR/28 de dimensões 7,11 x 3,56 mm². A Seção II apresenta o projeto e os resultados numéricos do arranjo, obtidos por meio do programa ANSYS HFSS[®]. Na Seção III, introduz-se o princípio de funcionamento das estruturas em ranhuras, aplicando-as à estrutura do SWAA para aumento de ganho. As conclusões e trabalhos futuros são abordados na Seção IV.

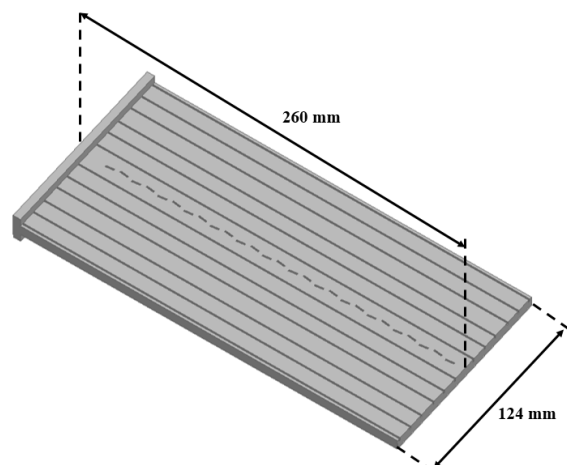


Fig. 1. SWAA com fendas inclinadas e ranhuras metálicas.

¹Evandro C. V. Boas e Arismar Cerqueira S. Jr, Instituto Nacional de Telecomunicações (INATEL), Santa Rita do Sapucaí- MG, Brasil; E-mails: evandro.cesar@inatel.br, arismar@inatel.br.

² Raj Mittra, Universidade do Estado da Pensilvânia (Pennsylvania State University), EUA E-mail: rajmittra@ieee.org.

Este trabalho foi parcialmente financiado pela RNP, com recursos do MCTIC, sob o projeto Centro de Referência em Radiocomunicações (CRR) do Instituto Nacional de Telecomunicações – Inatel, Brasil; pela CAPES, CNPq, MCTI e FAPEMIG.

II. ARRANJOS DE ANTENAS EM GUIA DE ONDA FENDIDO

Arranjos de antenas em guia de onda fendido (SWAAs) são compostos por fendas fresadas ao longo das paredes de um guia de onda retangular ou circular preenchido por ar ou material dielétrico [15-20]. Para os guias retangulares, as fendas podem ser posicionadas longitudinalmente em sua face maior ou menor para a formação de diagramas transversais e diretivos. Em guias de onda circulares, as fendas são arranjadas ao longo de sua periferia radial e tem-se diagramas omnidirecionais em determinado plano. Os SWAAs podem apresentar estruturas em ondas vazadas ou em ondas estacionárias [15,19]. Para a excitação de ondas estacionárias, a terminação do guia de onda é curto-circuitada posicionando o centro da última fenda a determinada distância da extremidade final do guia de onda, resultando em uma estrutura ressonante. Os SWAAs em ondas vazadas são projetados em guias de onda terminados com cargas ou materiais absorvedores de RF. Essas estruturas dissipam a energia não irradiada pelas fendas e provêm arranjos com maior largura de banda se comparados aos SWAAs ressonantes [21]. Todavia, a inserção de cargas ou materiais absorvedores de RF contribui para o aumento de perdas dentro do guia de onda e redução da eficiência de irradiação. Logo, este trabalho considerou o projeto de um SWAA excitado por ondas estacionárias. O guia de onda retangular utilizado é o modelo comercial WR/28.

Os SWAAs ressonantes e constituídos por guias de onda retangular apresentam frequência de ressonância e amplitude e fase de campo irradiado dependentes das dimensões e espaçamento das fendas [24, 25]. Em guias de onda preenchidos por ar, as fendas devem apresentar comprimento elétrico (L) e espaçamento centro a centro (d) aproximadamente iguais a meio comprimento de onda no espaço livre ($\lambda_0/2$) e meio comprimento de onda guiado ($\lambda_g/2$) para a frequência de projeto, respectivamente. O centro da última fenda é posicionado a distância de aproximadamente um quarto do comprimento de onda guiado ($\lambda_g/4$ ou $d/2$) da extremidade do guia. O ponto de excitação e o centro da primeira fenda também devem obedecer a esse espaçamento para minimizar reflexões [24, 25]. A distância centro a centro de $\lambda_0/2$ entre fendas adjacentes introduz uma diferença de fase entre componentes de campo elétrico de 180° . Por conseguinte, tais fendas são deslocadas em relação ao centro da face do guia por uma distância z para introduzir uma segunda diferença de fase de 180° entre as mesmas componentes de campo elétrico, resultando em diferença de fase total de 360° entre fendas.

O SWAA foi projetado para a frequência de 26,5 GHz e é composto por 27 fendas posicionadas na face maior do guia de ondas WR/28. O arranjo é alimentado por uma transição guia/coaxial capaz de excitar o modo fundamental TE_{10} . Seu desempenho foi analisado por meio do programa ANSYS HFSS® e suas dimensões finais foram $L = 5,55$ mm, $d = 8,85$ mm, $z = 0,5$ mm e largura das fendas $w = 1$ mm. As fendas foram inclinadas de 7° em relação aos seus respectivos centros para prover maior largura de banda, como demonstrado em [19]. O arranjo apresentou banda fracionária de 4,86 % (25,46 – 26,73 GHz), limitada a valores de coeficiente de reflexão iguais ou inferiores a -10 dB, como visto na Fig. 2. A inclinação das fendas contribuiu para o deslocamento da banda de operação da antena para frequências inferiores, cuja central é igual a 26 GHz.

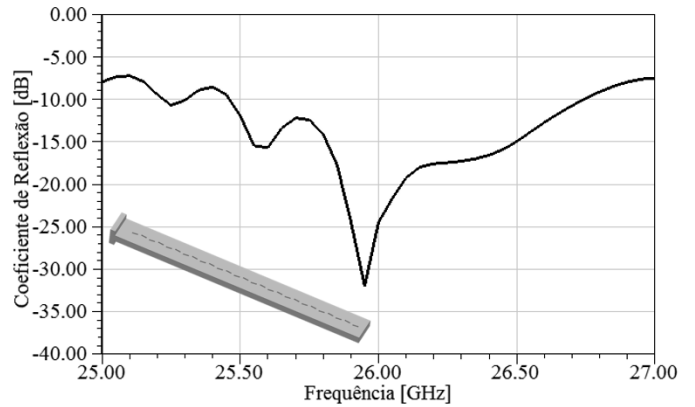


Fig. 2. Coeficiente de reflexão simulado do SWAA com 27 fendas inclinadas.

O SWAA apresentou ganho de 19,86 dBi em 26 GHz e variação de ganho entre 19,34 e 19,86 dBi para a banda de operação, como visto na Fig. 3(a). Os níveis de lóbulos secundários foram inferiores a 9,6 dB. A Fig. 3(b) apresenta o diagrama de irradiação tridimensional em 26 GHz. As aberturas de feixe de meia potência (HPBW, *half power beam width*) em azimute e elevação são iguais a $2,5^\circ$ e $130,6^\circ$, respectivamente. O diagrama é setorial no plano yz e direcional no plano xy e sua irradiação é transversal ao plano das fendas, cuja a polarização é vertical. Como reportado em [19], a inclinação das fendas corrobora para o aumento dos níveis de polarização cruzada. Entretanto, o arranjo apresentou valores inferiores a -20 dB na direção do lóbulo principal em azimute e elevação.

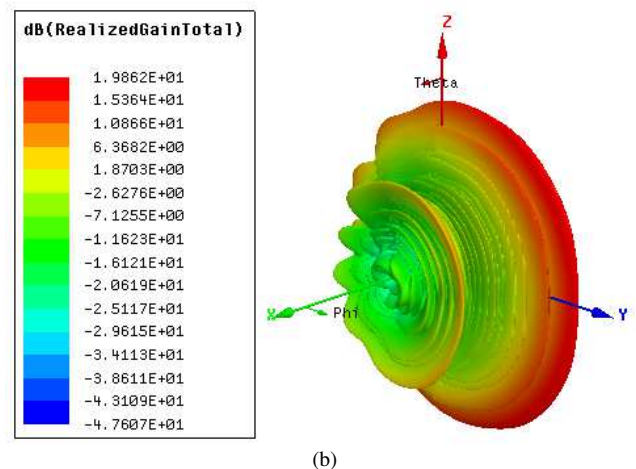
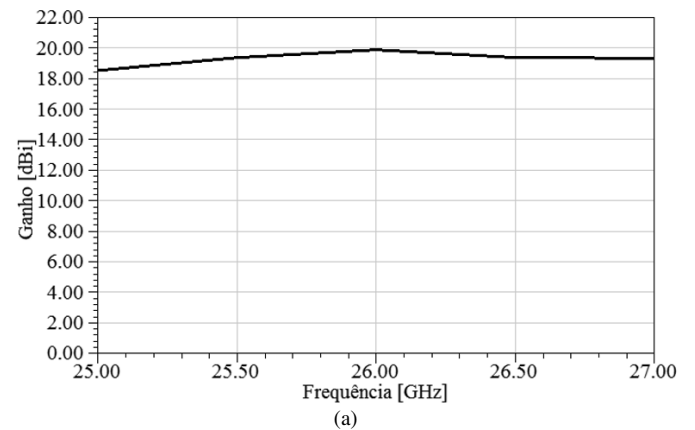


Fig. 3. (a) Ganho simulado e (b) diagrama de irradiação tridimensional em 26 GHz para a SWAA com 27 fendas.

III. ARRANJO DE ANTENAS EM GUIA DE ONDA FENDIDO DE ALTO GANHO

O arranjo, apresentado na Seção II, teve suas laterais estendidas e ranhuras introduzidas simetrica e paralelamente a direção longitudinal das fendas, como visto na Fig. 4. Tais estruturas intensificam a transmissão e atuam como fontes de irradiação secundárias que contribuem para o aumento de ganho (diretividade) [22, 23]. Basicamente, as ondas de superfície, oriundas de uma fonte de irradiação primária, excitam as estruturas em ranhuras que ressonam e re-irradiam sua energia em fase com o campo elétrico irradiado pela fonte primária. As ranhuras devem ter largura muito pequena em relação a λ_0 ($w_r \ll \lambda_0$) e profundidade (h_r) aproximadamente igual a um múltiplo inteiro de $\lambda_0/4$. A distância entre a primeira ranhura e a fonte primária e entre ranhuras adjacentes é próxima de λ_0 [23, 26].

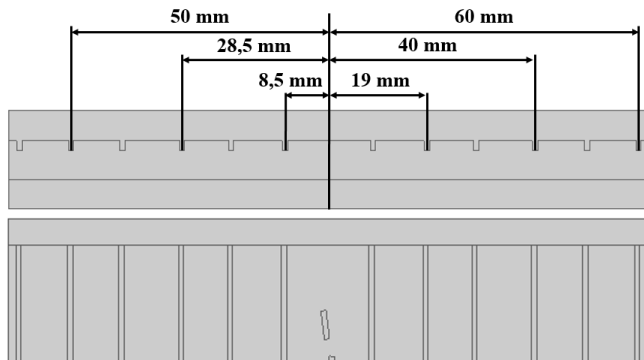


Fig. 4. Posição dos pares de ranhuras em relação ao centro da face maior do guia de onda utilizando no projeto da SWAA.

As ranhuras foram parcialmente aplicadas ao SWAA e suas variáveis ajustadas para prover máxima diretividade. A Fig. 4, apresenta os espaçamentos finais de cada par de ranhuras em relação ao centro da face maior do guia de onda. Esses valores são gradualmente distintos, porém necessários para prover a correção de fase do campo elétrico irradiado. Elas são idênticas em relação a sua largura e profundidade, cujos valores finais são $w_r = 1$ mm e $h_r = 2$ mm. A resposta em frequência para o SWAA sem ranhuras e com 6 pares de ranhuras é apresentada na Fig. 5. A integração dessas estruturas ao SWAA resultou em aumento de largura de banda de 10,23 %. Portanto, o SWAA apresentou banda fracionária de 5,36 % (25,41 – 26,81 GHz).

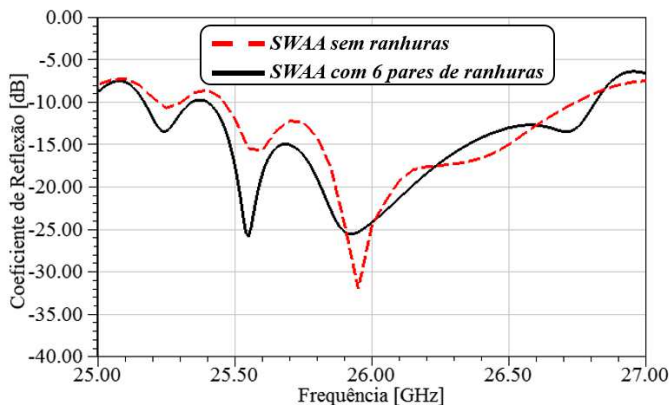
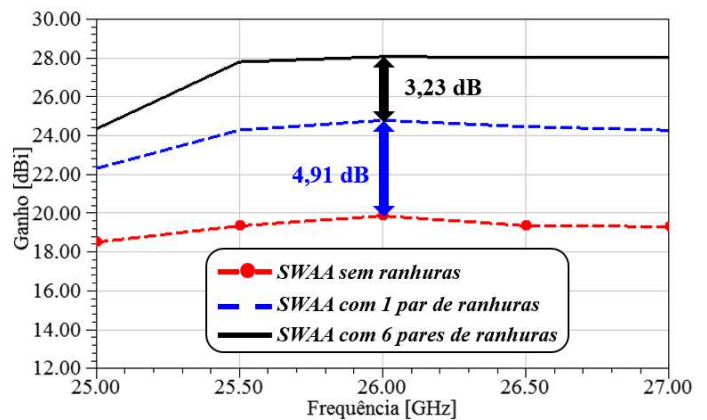


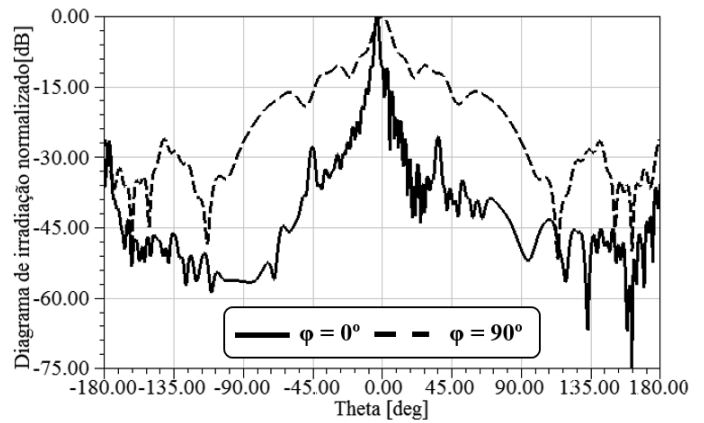
Fig. 5. Coeficiente de reflexão simulado do SWAA sem ranhuras (curva vermelha tracejada) e com 6 pares de ranhuras (curva preta contínua).

A Fig. 6(a) apresenta uma análise do ganho em função do número de ranhuras. O primeiro par de ranhuras proveu

incremento de ganho da ordem de 4,91 dB. Esse fenômeno ocorre devido à maior intensidade das ondas de superfície que atingem o primeiro par de ranhuras. Para os demais pares, o aumento de ganho foi menor, porém totalizou 3,23 dB com a inserção do sexto par de ranhuras. Ensaiou-se o acréscimo de um sétimo par, entretanto não houve aumento efetivo de ganho. Por conseguinte, o SWAA final apresentou ganho em torno de 28 dBi para toda a faixa de operação. A Fig. 6(b) apresenta o diagrama de irradiação retangular em 26 GHz para $\phi = 0^\circ$ (curva contínua) e $\phi = 90^\circ$ (curva tracejada), cujos HPBW's são iguais a 2° e 10° , respectivamente. O uso das ranhuras culminou em um diagrama de irradiação direcional em ambos os planos. Os níveis de lobos secundários se mantiveram inferiores a 9,6 dB. O arranjo apresentou relação frente-costa superior a 30 dB e variação angular de 3° em relação ao apontamento do lóbulo principal de seu diagrama de irradiação referente ao plano $\phi = 0^\circ$, porém dentro dos limites de abertura de feixe de meia potência.



(a)



(b)

Fig. 6. (a) Ganho simulado em função da frequência para o SWAA sem ranhuras (curva vermelha tracejada com círculos), SWAA com um par de ranhuras (curva azul tracejada) e SWAA com 6 pares de ranhuras (curva preta contínua) e (b) Diagrama de irradiação retangular em 26 GHz para $\phi=0^\circ$ (curva preta contínua) e $\phi=90^\circ$ (curva preta tracejada).

IV. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou os resultados preliminares de um arranjo de antenas em guia de onda fendido de alto ganho para aplicações em redes 5G, operando na faixa de ondas milimétricas. Inicialmente, projetou-se um SWAA com 27 fendas com ganho de aproximadamente 19,5 dBi. Posteriormente, posicionou-se seis pares de ranhuras metálicas

adjacentes às fendas, provendo aumento de ganho de 8,14 dBi. O SWAA com dimensões finais iguais a 124 x 260 mm² é capaz de prover banda fracionária de 5,36 % (25,41 – 26,81 GHz), ganho de 28 dBi e relação frente-costa superior a 30 dB. O arranjo proposto é potencial para diversas aplicações em ondas milimétricas, principalmente em sistemas 5G que requerem altas taxas de vazão. Além disso, a sua estrutura é simples e de baixo perfil, quando comparada aos arranjos ou antenas de alto ganho convencionais. Trabalhos futuros compreendem a fabricação e caracterização do SWAA em termos de coeficiente de reflexão, ganho e diagrama de irradiação, assim como a sua aplicação em um enlace de comunicação sem fio em ondas milimétricas, utilizando o transceptor 5G nacional, previamente desenvolvido pela equipe de Pesquisa do Inatel [27].

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pela RNP, com recursos do MCTIC, processo No 01250.075413/2018-04, sob o projeto Centro de Referência em Radiocomunicações (CRR) do Instituto Nacional de Telecomunicações – Inatel, Brasil e pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Autores também agradecem o suporte financeiro do CNPq, MCTI e FAPEMIG e suporte técnico de Keysight e ESSS-ANSYS.

REFERÊNCIAS

- [1] Study on Scenarios and Requirements for Next Generation Access Technologies, document 3GPP TR 38.913 v14.1.0, Jan. 2017.
- [2] C. Wang *et al.*, "Cellular Architecture and Key Technologies for 5G Wireless Communication Networks," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 2, pp. 122-130, February 2014.
- [3] W. H. Chin, Z. Fan e R. Haines, "Emerging Technologies and Research Challenges for 5G Wireless Networks," in *IEEE Wireless Communications*, vol. 21, no. 2, pp. 106-112, April 2014.
- [4] 5G Americas, White Paper on 5G Spectrum Recommendation, 2017.
- [5] WRC-15 Documents and Proposals. [Online]. Disponível em: < <https://www.itu.int/en/ITU/conferences/wrc/2015/Pages/docsandprops.aspx> >.
- [6] T. S. Rappaport *et al.*, "Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work!," in *IEEE Access*, vol. 1, pp. 335-349, 2013.
- [7] S. Rangan, T. S. Rappaport e E. Erkip, "Millimeter-Wave Cellular Wireless Networks: Potentials and Challenges," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 102, no. 3, pp. 366-385, March 2014.
- [8] Y. Niu *et al.*, "A Survey of Millimeter Wave Communications (mmWave) for 5G: Opportunities and Challenges," in *Wireless Network*, vol. 21, no. 8, pp. 2657-2676, November 2015.
- [9] S. F. Jilani e A. Alomainy, "A Multiband Millimeter-Wave 2-D Array-Based on Enhanced Franklin Antenna for 5G Wireless Systems," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, pp. 2983-2986, 2017.
- [10] Q. X. Chu, X. R. Li e M. Ye, "High-Gain Printed Log-Periodic Dipole Array Antenna With Parasitic Cell for 5G Communication," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 12, pp. 6338-6344, Dec. 2017.
- [11] S. X. Ta, H. Choo e I. Park, "Broadband Printed-Dipole Antenna and Its Arrays for 5G Applications," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, pp. 2183-2186, 2017.
- [12] W. El-Halwagy *et al.*, "Investigation of Wideband Substrate-Integrated Vertically-Polarized Electric Dipole Antenna and Arrays for mm-Wave 5G Mobile Devices," in *IEEE Access*, vol. 6, pp. 2145-2157, 2018.
- [13] B. Yang *et al.*, "Compact Tapered Slot Antenna Array for 5G Millimeter-Wave Massive MIMO Systems," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 12, pp. 6721-6727, Dec. 2017.
- [14] S. J. Park, D. H. Shin e S. O. Park, "Low Side-Lobe Substrate-Integrated-Waveguide Antenna Array Using Broadband Unequal Feeding Network for Millimeter-Wave Handset Device," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 64, no. 3, pp. 923-932, March 2016.
- [15] Arismar Cerqueira Jr. *et al.*, "Waveguide-Based Antenna Arrays for 5G Networks," in *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2018, Article ID 5472045, 10 pages, 2018.
- [16] I. da Costa *et al.*, "Optically Controlled Reconfigurable Antenna Array for mm-wave Applications," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, no.99, pp.1-1,2017.
- [17] H. R. D. Filgueiras *et al.*, "Mechanically Reconfigurable Slotted-Waveguide Antenna Array for 5G Networks," 2017 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), Águas de Lindóia, 2017, pp. 1-5.
- [18] H.R.D. Filgueiras *et al.*, "A Novel Approach for Designing Omnidirectional Slotted-Waveguide Antenna Arrays," 2018 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA), Colombia, 2018.
- [19] E. C. Vilas Boas e Arismar Cerqueira S. Jr., "Arranjo de Antenas em Guia de Onda Fendido Faixa Larga para Redes 5G," MOMAG 2018 - 18º SBMO - Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica e o 13º CBMag - Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, 2018. Anais do MOMAG 2018.
- [20] H.R.D. Filgueiras *et al.*, "Mechanically Controlled Circular Slotted-Waveguide Antenna Array for 5G Networks," 18 SBMO - Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica e 13 CBMAG - Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo (MOMAG 2018), Santa Rita do Sapucaí, 2018, 2018.
- [21] D. Oueslati1, R. Mittra e H. Rmili, "Wideband Low-Profile Aperture Antenna for 5G Applications Comprising of a Slotted Waveguide Array and an Integrated Corporate Feed," 13th European Conference on Antennas and Propagation, Cracóvia, 2019.
- [22] A. P. Hibbins, J. R. Sambles e C. R. Lawrence, "Gratingless Enhanced Microwave Transmission Through a Subwavelength Aperture in a Thick Metal Plate," in *Applied Physics Letters*, 81, 4661, 2002.
- [23] M. Beruete *et al.* "Enhanced Microwave Transmission and Beaming using a Subwavelength Slot in Corrugated Plate," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 3, pp. 328-331, 2004.
- [24] R. Elliott, "An Improved Design Procedure for Small Arrays of Shunt Slots," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 31, no. 1, pp. 48-53, Jan 1983.
- [25] R. Elliott e L. Kurtz, "The Design of Small Slot Arrays," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 26, no. 2, pp. 214-219, Mar 1978.
- [26] F. J. García-Vidal e L. Martín-Moreno, "Transmission and Focusing of Light in One-dimensional Periodically Nanostructured Metals," in *Phys. Rev. B*, vol. 66, no. 155 412, Oct. 2002.
- [27] R. M. Borges *et al.*, "Integration of a GFDM-Based 5G Transceiver in a GPON Using Radio Over Fiber Technology," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 36, no. 19, pp. 4468-4477, Oct.1, 2018.