

Controle de Polarização de Micro-ondas Usando uma Superfície Seletiva em Frequência com Espiral de Fibonacci

Nickson S. O. Lopes, Maciel Alves de Oliveira, Alexandre J. R. Serres e Antonio Luiz P. de S. Campos

Resumo — Este trabalho apresenta o projeto, simulação, fabricação e caracterização experimental de uma Superfície Seletiva em Frequência (FSS) baseada em uma geometria inspirada na espiral de Fibonacci para controle de polarização em micro-ondas. A estrutura proposta apresenta comportamento de rejeição em múltiplas bandas, com resposta dependente da polarização da onda incidente. Resultados simulados indicam duas ressonâncias para polarização vertical em 1,65 GHz e 2,45 GHz, e uma ressonância para polarização horizontal em 3,50 GHz. Os resultados medidos confirmam elevada seletividade de polarização, evidenciada pelos altos valores do coeficiente de polarização (PC), validando o potencial da estrutura para aplicações em sistemas que empregam multiplexação por divisão de polarização e superfícies inteligentes reconfiguráveis.

Palavras-Chave — FSS, espiral de Fibonacci, controle de polarização, multiplexação por divisão de polarização, micro-ondas.

Abstract — This work presents the design, simulation, fabrication, and experimental characterization of a Frequency Selective Surface (FSS) based on a geometry inspired by the Fibonacci spiral for microwave polarization control. The proposed structure exhibits multi-band rejection behavior, with a response dependent on the polarization of the incident wave. Simulated results indicate two resonances for vertical polarization at 1.65 GHz and 2.45 GHz, and one resonance for horizontal polarization at 3.50 GHz. Measured results confirm high polarization selectivity, evidenced by the high values of the polarization coefficient (PC), validating the structure's potential for applications in systems employing polarization division multiplexing and reconfigurable smart surfaces.

Keywords — FSS, Fibonacci spiral, bias control, bias-division multiplexing, microwaves.

I. INTRODUÇÃO

As superfícies seletivas em frequência (*Frequency Selective Surfaces* – FSS) têm sido investigadas há décadas devido às suas inúmeras aplicações, incluindo espectros de frequência de micro-ondas, ondas milimétricas e terahertz, que variam desde aplicações mais tradicionais em sistemas de antenas de banda dupla, foguetes, mísseis e radomes de antenas [1], [2], até aplicações mais recentes, como identificação por radiofrequência (RFID) [3], lentes [4] e proteção contra interferência eletromagnética (EMI) [5].

As FSS tornaram-se uma tecnologia apropriada para manipulação de ondas eletromagnéticas em uma ampla faixa do espectro [6], [7]. A capacidade de controlar as ondas eletromagnéticas abriu um novo caminho para aplicações que exigem precisão, como comunicações sem fio [8], filtros seletivos [9], sensoriamento [10], dentre outros.

Em particular, FSS tem um bom potencial para auxiliar as comunicações sem fio em sistemas de superfícies inteligentes reconfiguráveis (*Reconfigurable Intelligent Surface* – RIS) para

contornar limitações como cobertura, eficiência energética, eficiência espectral e reconfigurabilidade do canal [11].

Essas propriedades das FSS podem auxiliar sistemas de comunicação que empregam a técnica de multiplexação por divisão de polarização (*Polarization Division Multiplexing* – PDM). A PDM se baseia na capacidade de manipular e manter estados de polarização ortogonais, ou seja, ondas linearmente polarizadas (LP) (polarização vertical (v-pol) e polarização horizontal (h-pol)) para transmitir múltiplos fluxos de dados independentes na mesma banda de frequência e tempo, dobrando a eficiência espectral e a capacidade do sistema [12].

As FSS podem controlar dinamicamente e separar espacialmente estados de polarização ortogonais, permitindo não apenas o controle de polarização em tempo real, mas também a distribuição espacial de canais de polarização independentes em diferentes regiões do espaço [13]. Essa capacidade permite que os sistemas baseados em PDM atendam a vários usuários simultaneamente com alta eficiência espectral e interferência mínima.

Na literatura, diversos estudos investigaram o uso de estruturas periódicas para controle avançado de polarização. Por exemplo, metassuperfícies reconfiguráveis e anisotrópicas demonstraram manipulação dinâmica de estados de polarização para direcionamento de feixe e modelagem de frente de onda [14]. Outros trabalhos propuseram transmissão ou reflexão dependente da polarização usando geometrias quirais ou assimétricas [15]. Além disso, metassuperfícies bifuncionais capazes de modular independentemente ondas LP foram relatadas para divisão de feixe de polarização e filtragem seletiva [16]. Uma metassuperfície composta por células unitárias em espiral de Fibonacci com fendas, construídas sobre uma lâmina de cobre sobre um substrato é capaz de controlar a reflexão e a transmissão de micro-ondas linearmente polarizadas (LP) [17].

Este trabalho apresenta uma FSS com espiral de Fibonacci. A célula unitária consiste em uma sequência de Fibonacci. A progressão da sequência no sentido anti-horário permite que a FSS acople ressonantemente ondas LP em distintas regiões espectrais. Como prova de conceito, demonstramos o conceito em frequências de micro-ondas e analisamos a resposta espectral em função das ondas verticalmente e horizontalmente polarizadas. A FSS exibe filtragem rejeita banda com seletividade em frequência que difere para ondas incidentes polarizadas verticalmente e horizontalmente, resultando em altos níveis de separação dependente da polarização nos sinais transmitidos e refletidos.

II. PROJETO DA FSS

Uma representação esquemática da FSS em forma de espiral proposto é mostrada na Fig. 1. A célula unitária é composta por

uma espiral que é um padrão amplamente observado na natureza e que exemplifica a sequência de Fibonacci [18]. A espiral de Fibonacci pode ser gerada a partir da equação polar como:

$$r = ae^{(b\theta)} \quad (1)$$

em que r é o raio de cada volta da espiral, a e b são constantes arbitrárias que dependem da espiral específica e θ é o ângulo de rotação da curva espiralada [19]. Para o projeto da FSS considera-se um material dielétrico de fibra de vidro, especificamente FR4, com uma permissividade relativa de 4,4, uma tangente de perda de 0,02 e uma espessura $h = 1,6$ mm.

A largura da fita da espiral é $w = 0,3$ mm, enquanto a periodicidade é $P = 35$ mm. Para este tamanho de célula, as constantes a e b são 1,8 e 0,155, respectivamente, com θ variando até 5π . Fig. 2 ilustra a geometria proposta. Estas dimensões físicas foram determinadas por meio de uma extensiva análise paramétrica, envolvendo mais de 200 simulações, nas quais todos os parâmetros foram variados.

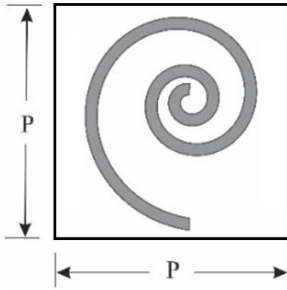


Fig. 1: Geometria da célula unitária.

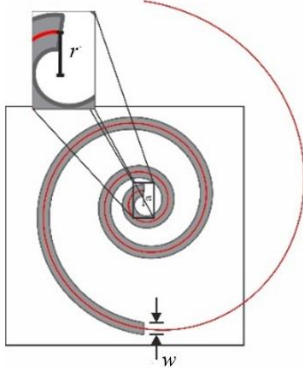


Fig. 2: Detalhes da espiral de Fibonacci.

Todas as simulações foram feitas no software comercial Ansys HFSS. Inicialmente, foi realizada uma simulação da FSS bioinspirada com uma única camada, compreendendo uma única espiral tanto para polarização vertical quanto horizontal.

A análise paramétrica envolveu mais de 200 simulações variando diferentes constantes da espiral. O aumento do valor de a resulta em uma espiral de maior tamanho físico, o que eleva a indutância da estrutura e reduz a frequência de ressonância. Esse parâmetro foi variado de 0,5, com passo de 0,1, até 1,9. O parâmetro k também aumenta a indutância da espiral, provocando uma redução na frequência de ressonância. Esse parâmetro foi variado de 0,1 a 0,16, com passo de 0,01. Por fim, foi variada a largura da fita w . Diferente dos demais, o aumento da espessura da fita metálica da espiral causa um aumento na frequência de ressonância principal. Esse parâmetro foi variado de 0,2 a 0,7 mm, com passo de 0,1 mm. Esses resultados

permitiram a escolha final das dimensões da estrutura proposta, otimizando o desempenho para aplicações em bandas como ISM e 5G NR. Após essa extensiva análise paramétrica, foram escolhidos os valores de $a = 1,8$, $b = 0,165$, $r = 1,5$ mm, $w = 0,3$ mm e $P = 35$ mm. Esse valor de periodicidade é inferior a $\lambda/2$ para a menor frequência de ressonância (1,6 GHz), o que evita os lóbulos de gradeamento.

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Fig. 3 ilustra os resultados simulados da transmissão para as polarizações horizontal e vertical. Para a polarização horizontal (h-pol.), uma ressonância é observada em 3,5 GHz com uma largura de banda de 270 MHz, enquanto para a polarização vertical (v-pol.), duas ressonâncias são observadas. A primeira ressonância ocorre em 1,65 GHz com uma largura de banda de 70 MHz e a segunda ressonância ocorre em 2,45 GHz com uma largura de banda de 200 MHz.

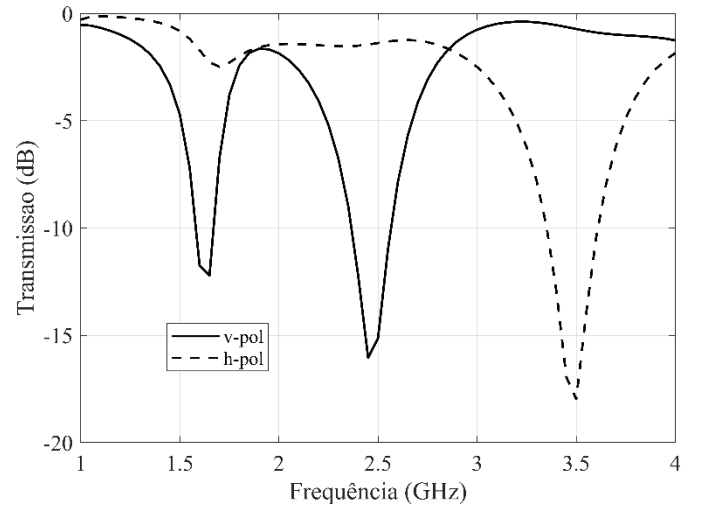


Fig. 3: Resultados simulados da transmissão para polarizações horizontal e vertical.

As diferenças observadas entre as ondas transmitidas para as polarizações ortogonais podem ser usadas para determinar o desempenho da seletividade de polarização quantificado como [17]:

$$PC_{h,v} = T^v - T^h \quad (2)$$

Os superescritos v e h denotam a transmissão (T) para as polarizações vertical e horizontal das ondas incidentes, respectivamente. Além disso, para dar suporte às ressonâncias multibanda, a FSS exibe seletividade de polarização pronunciada, como evidenciado pelos altos valores de PC, em 1,60 GHz, 2,45 GHz e 3,50 GHz. O PC atinge $-10,03$ dB e $-14,60$ dB para a polarização vertical e $17,25$ dB para a polarização horizontal, como ilustrado em Fig. 4.

Para validar os resultados numéricos, um protótipo da FSS projetada foi construída, em um arranjo de 6×6 elementos (36 ao todo). Uma foto da FSS fabricada é mostrada em Fig. 5. A estrutura proposta foi medida usando o método de espaço livre. A configuração de medição compreendeu um analisador de redes vetorial (VNA, analisador de redes de duas portas Keysight modelo N5071C), duas antenas cornetas de banda ultralarga (modelo SAS-571 da A. H. Systems, com banda de 700 MHz a 18 GHz) e uma janela de medição. A distância das

antenas para a FSS é de aproximadamente 1,3 m, para garantir que ela esteja na região de campo distante. Fig. 6 ilustra o setup de medição.

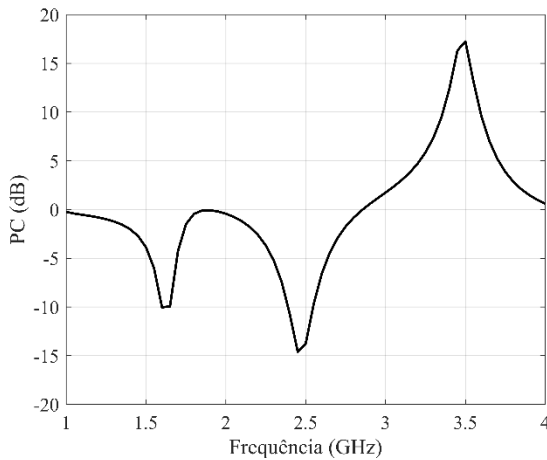


Fig. 4: Resultados simulados do PC.



Fig. 5: Protótipo construído.

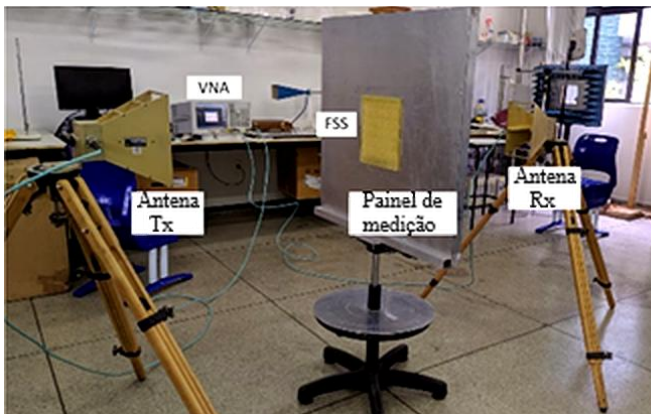


Fig. 6: Setup de medição da FSS.

A medição da transmissão através da FSS foi realizada para polarização vertical, com incidência normal e a comparação com os resultados simulados e medidos é mostrada em Fig. 7. De acordo com a simulação, a primeira ressonância ocorre em 1,65 GHz, com a banda de rejeição de -10 dB estendendo-se de 1,60 GHz a 1,67 GHz. A segunda ressonância é observada em 2,45 GHz, com a banda de rejeição de -10 dB indo de 2,37 GHz a 2,57 GHz. Por outro lado, os resultados experimentais indicam que a primeira ressonância ocorre em 1,70 GHz, com largura de banda de rejeição de 1,64 GHz a 1,71 GHz, enquanto a segunda

ressonância ocorre em 2,46 GHz, com largura de banda de rejeição de 2,35 GHz a 2,58 GHz. Pode-se observar uma boa concordância entre os resultados.

A segunda medição envolve a transmissão através da FSS para polarização horizontal. Fig. 8 apresenta a comparação entre os resultados da simulação e os resultados experimentais. De acordo com a simulação, há uma ressonância em 3,50 GHz, com largura de banda de rejeição de 3,35 GHz a 3,62 GHz. Os resultados experimentais indicam uma ressonância em 3,50 GHz, com largura de banda de rejeição de 3,36 GHz a 3,66 GHz. Mais uma vez, observa-se uma boa concordância entre os resultados.

Para comprovar a seletividade de polarização da FSS os resultados medidos da transmissão foram usados para calcular o PC medido. Fig. 9 ilustra a comparação entre o PC simulado e medido. Os resultados simulados mostram altos valores de -10,03 dB e -14,60 dB em 1,60 GHz e 2,45 GHz, respectivamente, para a polarização vertical e de 17,25 dB em 3,50 GHz para a polarização horizontal. Para os valores medidos, os resultados mostram altos valores de -13,13 dB e -10,94 dB em 1,70 GHz e 2,46 GHz, respectivamente, para a polarização vertical e de 15,78 dB em 3,50 GHz para a polarização horizontal, confirmando seletividade de polarização da FSS.

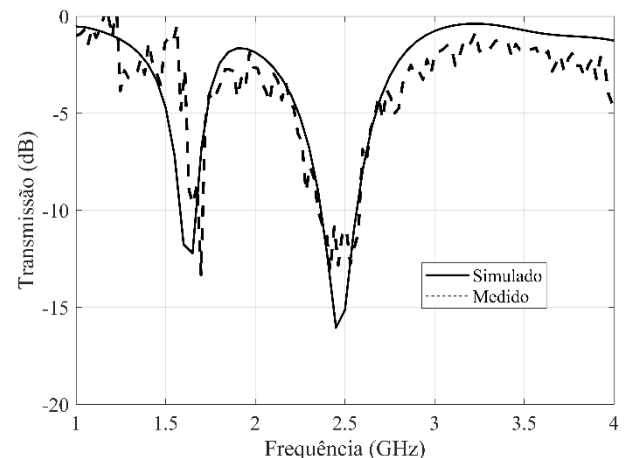


Fig. 7: Comparação entre resultados simulados e medidos para polarização vertical.

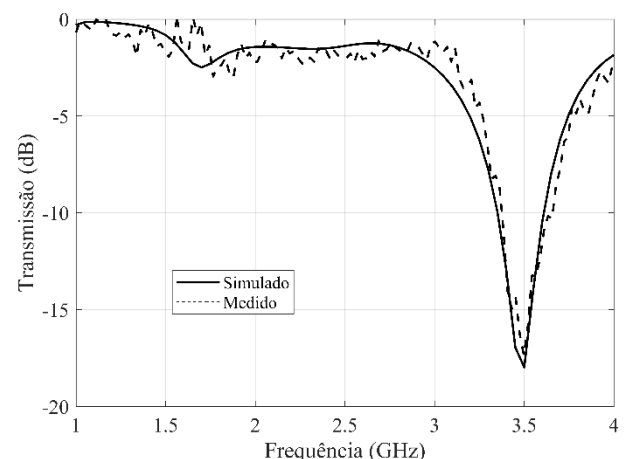


Fig. 8: Comparação entre resultados simulados e medidos para polarização horizontal.

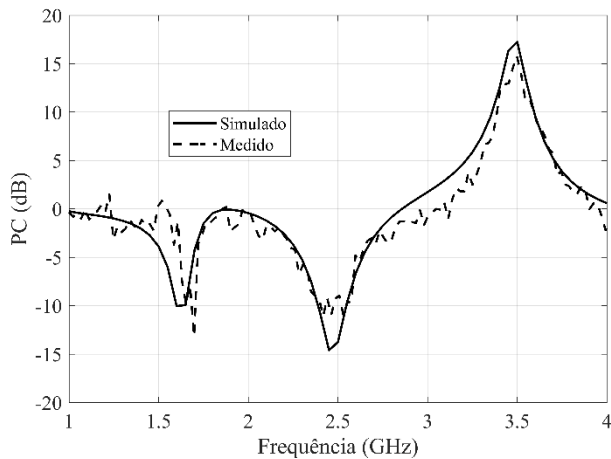


Fig. 9: Comparação entre resultados simulados e medidos para o PC.

IV. CONCLUSÕES

Este trabalho demonstrou que uma FSS baseada em espiral de Fibonacci pode ser eficazmente empregada para controle seletivo de polarização em frequências de micro-ondas. A estrutura proposta apresentou comportamento multibanda com resposta espectral distinta para polarizações vertical e horizontal, resultando em elevada seletividade de polarização.

Os resultados experimentais mostraram boa concordância com as simulações numéricas, com pequenas variações nas frequências de ressonância atribuídas a tolerâncias de fabricação e incertezas de medição. Os valores medidos do coeficiente de polarização confirmaram a capacidade da FSS em diferenciar eficientemente estados ortogonais de polarização.

A geometria inspirada na sequência de Fibonacci demonstrou ser uma alternativa promissora para o desenvolvimento de dispositivos compactos com resposta dependente da polarização, podendo ser aplicada em sistemas de multiplexação por divisão de polarização, filtros seletivos, controle de propagação eletromagnética e, potencialmente, em superfícies inteligentes reconfiguráveis. Trabalhos futuros podem explorar versões reconfiguráveis da estrutura, bem como a investigação sob incidência oblíqua e integração com sistemas RIS.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao CNPq pelo apoio parcial à pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] B. A. Munk, *Frequency Selective Surfaces – Theory and Design*, New York: John Wiley and Sons, Inc., 2000.
- [2] M. Li, L. Zhou and Z. Shen, "Frequency Selective Radome with Wide Diffusive Bands," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 21, no. 2, pp. 327-331, Feb. 2022.
- [3] F. Costa, S. Genovesi, A. Monorchio and G. Manara, "A Robust Differential-Amplitude Codification for Chipless RFID," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 25, no. 12, pp. 832-834, Dec. 2015.
- [4] D. Sánchez-Escuderos, H. C. Moy-Li, E. Antonino-Daviu, M. Cabedo-Fabrés and M. Ferrando-Bataller, "Microwave Planar Lens Antenna Designed with a Three-Layer Frequency-Selective Surface," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, pp. 904-907, 2017.
- [5] D. Li, T. -W. Li, E. -P. Li and Y. -J. Zhang, "A 2.5-D Angularly Stable Frequency Selective Surface Using Via-Based Structure for 5G EMI

- Shielding," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 60, no. 3, pp. 768-775, June 2018.
- [6] J. Ge *et al.*, "Optically Transparent Metasurface with Multispectral-Compatible Camouflage and Millimeter-Wave Transmission Window," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 73, no. 9, pp. 5686-5695, Sept. 2025, doi: 10.1109/TMTT.2025.3526833.
- [7] Y. Chen, F. Huang, B. Liang, H. Su, X. Ju and X. Wang, "A Frequency-Tunable Terahertz Bandpass Filter for Future Communication Systems," in *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 15, no. 3, pp. 481-486, May 2025, doi: 10.1109/TTHZ.2025.3542289.
- [8] X. Huang *et al.*, "A Narrowband Energy-Selective Surface With High-Selectivity for 5G Wireless Communications," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 73, no. 6, pp. 3388-3400, June 2025, doi: 10.1109/TMTT.2024.3495818.
- [9] Y. Li, Y. Ma, P. Ren, B. Xu, R. Xu and Z. Xiang, "Design of Angle-Selective Surface with Narrow-Angle Filtering for Variable Frequency," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 24, no. 6, pp. 1487-1491, June 2025, doi: 10.1109/LAWP.2025.3540930.
- [10] J. R. F. Guerra, A. L. P. S. Campos, H. D. Andrade, "A microwave system for measuring moisture of hollow concrete blocks," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 323, no. 1, 112657, 2021, , doi: 10.1016/j.sna.2021.112657.
- [11] F. Bilotti, M. Barbuto, Z. Hamzavi-Zarghani, M. Karamirad, *et al.*, "Reconfigurable intelligent surfaces as the key-enabling technology for smart electromagnetic environments," *Adv. Phys.: X*, vol. 9, no. 1, p. 2299543, 2024.
- [12] Z. Yuan, Y. Wang, H. Fan, X. Liu, M. Cheng, Q. Yang, M. Tang, D. Liu, and L. Deng, "Multichannel parallel mode order converter for on-chip reconfigurable PDM-MDM transmission," *Laser Photonics Rev.*, vol. 19, no. 9, p. 2401689, 2025.
- [13] X. Tan, R. Yang, S.-L. Chen, K. F. Chan, B. J. Chen, *et al.*, "Highly integrated full-space coding metasurface for LP and CP waves manipulation spanning millimeter-wave and sub-THz bands," *J. Lightw. Technol.*, vol. 43, no. 1, pp. 288-298, 2025.
- [14] H. Yang, X. Cao, F. Yang, J. Gao, *et al.*, "A programmable metasurface with dynamic polarization, scattering and focusing control," *Sci. Rep.*, vol. 6, no. 1, pp. 35692, 2016.
- [15] B. Yang, M. Ouyang, H. Ren, J. Wu, Y. Zhang, and Y. Fu, "Polarization-dependent absorption and transmission metasurfaces for linearly and circularly polarized light in terahertz band," in *Photonics*, vol. 10, no. 2. MDPI, 2023, pp. 100.
- [16] Z. Shen and D. Huang, "A review on metasurface beam splitters," *Nanomanufacturing*, vol. 2, no. 4, pp. 194-228, 2022.
- [17] W. O. F. Carvalho, "Slotted Fibonacci Spiral Metasurfaces for Microwaves Polarization Control", *Annals of the XLIII Brazilian Symposium on Telecommunications and Signal Processing - SBRT 2025*, Natal, RN, 2025.
- [18] E. H. Lockwood, *Book of Curves*, Cambridge: Cambridge University Press, 1961.
- [19] D. J. Darling, *The universal book of mathematics: from Abracadabra to Zeno's paradoxes*, John Wiley and Sons. pp. 188, 2004.