UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA

MARCELA THAIANE PIRES DE SOUZA

Efeito do Direcionamento de Feixe na Intensidade dos Lóbulos Secundários em Antenas de Arranjo Planares Esparsos Baseados na Espiral de Fermat

São João da Boa Vista
2024

Marcela Thaiane Pires de Souza

Efeito do Direcionamento de Feixe na Intensidade dos Lóbulos Secundários em Antenas de Arranjo Planares Esparsos Baseados na Espiral de Fermat

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações do Campus de São João da Boa Vista, Universidade Estatual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações .

Orientador: Profº Dr. Ivan Aritz Aldaya Garde

São João da Boa Vista
2024

S729e

Souza, Marcela Thaiane Pires de
Efeito do Direcionamento de Feixe na Intensidade dos Lóbulos Secundários em Antenas de Arranjo Planares Esparsos Baseados na Espiral de Fermat / Marcela Thaiane Pires de Souza. -- São João da Boa Vista, 2024
37 p. : il., tabs.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia de Telecomunicações) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, São João da Boa Vista
Orientador: Ivan Aritz Aldaya Garde

1. Elementos. 2. PSLL. 3. Lóbulos. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, São João da Boa Vista. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

EFEITO DO DIRECIONAMENTO DE FEIXE NA INTENSIDADE DOS LÓBULOS SECUNDÁRIOS EM ANTENAS DE ARRANJO PLANARES ESPARSOS BASEADOS NA ESPIRAL DE FERMAT

Aluno: Marcela Thaiane Pires de Souza
Orientador: Prof. Dr. Ivan Aritz Aldaya Garde

Banca Examinadora:

- Ivan Aritz Aldaya Garde (Orientador)
- Rafael Abrantes Penchel (Examinador)
- Helton Silva Bernardo (Examinador)

A ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no prontuário do aluno (Processo nº 281/2023)

São João da Boa Vista, 15 de julho de 2024

Dedico este trabalho a Deus, pois sem Ele nada disto seria possível. Aos meus queridos pais e irmão, por seu amor, carinho, orações e apoio incondicional ao longo desta jornada. Ao meu amado noivo, pelo carinho, paciência e incentivo nos momentos difíceis. Este trabalho é um reflexo do amor, suporte e apoio de todos vocês.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me conceder força, sabedoria e discernimento ao longo de toda a graduação e na elaboração deste trabalho. Agradeço por nunca ter me desamparado, por me sustentar e iluminar em todos os momentos difíceis. Sua bondade e amor foram a minha guia até este momento.

Aos meus pais, Marcos e Alessandra Souza, por serem meu alicerce e meus apoiadores em todos os momentos da minha vida. Agradeço por todo o amor, carinho, apoio e ajuda ao longo da minha graduação. Cada palavra de incentivo, encorajamento e oração foram fundamentais para que eu pudesse alcançar este sonho. Sou profundamente grato por tudo que fizeram por mim.

Ao meu irmão, Júnior, por ser meu exemplo e incentivador a cursar esta faculdade. Suas brincadeiras e as risadas que me proporcionou, ajudaram-me a relaxar durante os momentos estressantes da graduação.

Ao meu noivo, Gustavo, pela compreensão e paciência nos momentos de ausência, pelo apoio emocional e ajuda nos momentos difíceis. Cada abraço e cada palavra de apoio me acalmaram e me fizeram perceber que tudo daria certo. Sou grata por ter você ao meu lado durante esta jornada.

Às minhas amigas, Ana Júlia Nora e Elígia Simionato, pela ajuda acadêmica e emocional ao longo da graduação. As risadas compartilhadas tornaram os dias na faculdade mais leves e divertidos.

E, finalmente, ao meu orientador, Prof. Dr. Ivan Aldaya, por todo o conhecimento transmitido, pela paciência, dedicação e orientação ao longo dos anos de iniciação científica e elaboração deste trabalho.

Este trabalho contou com o apoio das seguintes entidades:
Processo n°2023/01132-0, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP)
"As opiniões, hipóteses e conclusões ou recomendações expressas neste material são de responsabilidade do(s) autor(es) e não necessariamente refletem a visão da FAPESP."
Processo nº 6394 - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq)

"Não to mandei eu? Esforça-te, e tem bom ânimo;
não pasmes, nem te espantes: porque o Senhor
teu Deus é contigo, por onde quer que andares."
(Josué 1:9)

RESUMO

As antenas são dispositivos que emitem ou captam ondas eletromagnéticas e que podem assumir diferentes formatos. Estes dispositivos não operam apenas nas frequências de rádio, mas também na faixa do espectro visível e infravermelho, sendo então referidas como antenas ópticas. Essas antenas ganharam destaque atualmente devido às diversas aplicações, dentre elas podem ser citadas a espectroscopia e comunicação óptica. Entretanto, para melhorar as propriedades de radiação, foram desenvolvidos arranjos de antenas ópticos compostos por múltiplos elementos de radiação idênticos. Quando a separação elétrica entre esses elementos é maior que $\lambda/2$, o arranjo é denominado esparso. Um dos desafios principais dos arranjos de antenas esparsos é que, se os elementos são uniformemente espaçados, estes apresentam lóbulos laterais de intensidade elevada. Para mitigar esse efeito, uma das soluções mais promissoras, é dispor os elementos conforme a espiral de Fermat. Assim, o trabalho visou analisar as propriedades de radiação por meio de estudos numéricos de arranjos de antenas compostos por vários elementos de radiação idênticos. Nesse sentido, foi estudado o efeito do número de elementos, a separação entre eles e o direcionamento de feixe em duas direções no nível do lóbulo lateral em arranjos de antenas baseados na espiral de Fermat. Dessa forma, o trabalho concentrou-se em arranjos do tipo planares esparsos baseados na espiral de Fermat. Para realizar essa análise, foram empregados métodos como o de cálculo do fator de arranjo (*array factor* - AF) e o nível de lóbulo lateral de pico (*peak side lobe level* - PSLL). Adicionalmente, houve a implementação desses métodos em um código Python para uma melhor visualização gráfica dos resultados. Dessa forma, após realizar diversas análises, concluiu-se que ao diminuir a distância inter-elementos, o nível de lóbulo lateral aumenta. Além disso, observou-se que o PSLL tende a diminuir à medida que o número de elementos aumenta. Por fim, após longas simulações pôde-se concluir que a última análise foi a mais satisfatória, com 8 elementos e 501 pontos pois a melhor região se localizou no centro da figura, resultado que era esperado anteriormente.

PALAVRAS-CHAVE: elementos. PSLL. lóbulos.

ABSTRACT

Antennas are devices that emit or receive electromagnetic waves and can take various forms. These devices operate not only in radio frequencies but also in the visible and infrared spectrum ranges, thus being referred to as optical antennas. These antennas have gained prominence recently due to their various applications, including spectroscopy and optical communication. However, to improve radiation properties, optical antenna arrays composed of multiple identical radiation elements have been developed. When the electrical separation between these elements is greater than $\lambda/2$, the array is termed sparse. One of the main challenges of sparse antenna arrays is that if the elements are uniformly spaced, they exhibit high-intensity sidelobes. To mitigate this effect, one of the most promising solutions is to arrange the elements according to the Fermat spiral. Thus, the work aimed to analyze the radiation properties through numerical studies of antenna arrays composed of several identical radiation elements. In this context, the effect of the number of elements, the separation between them, and beam steering in two directions on the sidelobe level in antenna arrays based on the Fermat spiral was studied. Therefore, the work focused on planar sparse arrays based on the Fermat spiral. To perform this analysis, methods such as the calculation of the array factor (AF) and the peak side lobe level (PSLL) were employed. Additionally, these methods were implemented in a Python code for better graphical visualization of the results. Consequently, after conducting various analyses, it was concluded that decreasing the inter-element distance increases the sidelobe level. Moreover, it was observed that the PSLL tends to decrease as the number of elements increases. Finally, after extensive simulations, it was concluded that the last analysis was the most satisfactory, with 8 elements and 501 points, as the best region was located at the center of the figure, a result that was previously expected.

KEYWORDS: elements. PSLL. lobes.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 Representação da estrutura de uma antena. 12
Figura 2 Lóbulos emitidos por uma antena. 14
Figura 3 Espiral de Fermat. 14
Figura 4 Posição de elementos em arranjos planares baseados na espiral de Fermal com (a-c) 0,01 unidades de comprimento entre elementos e (d-f) 0,1 unidades de comprimento. Os marcadores indicam a posição dos elementos os quais correspondem a uma espiral de Fermat amostrada (a.u. significa *arbitrary units*). . . . 15
Figura 5 Representação da (a) Espiral de Fermat com 32 elementos de antenas e uma separação mínima de 2λ e do (b) módulo do fator de arranjo indicando os critérios dos ângulos diretores na espiral. 18
Figura 6 Fator de arranjo para uma distância de 1λ e 2λ com (a)/(c) 16 elementos e (b)/(d) 32 elementos. Em todos os casos consideramos o sistemas de coordenadas de (a) em que θ varia de 0 a $\pi/2$ e ϕ varia entre 0 e 2π. 20
Figura 7 (a) Corte do fator de arranjo destacando o lóbulo de maior intensidade e os lóbulos laterais e (b) corte do módulo do fator de arranjo no plano que inclui o lóbulo principal e o lóbulo lateral de maior intensidade. 20
Figura 8 Relação entre o número de elementos de antena e o nível de lóbulo lateral de pico em dB para diferentes distâncias mínimas inter-elementos. 21
Figura 9 Análise do direcionamento de feixe para distância de 1λ e 2λ com (a)/(e) $\theta = \phi = 0°$, (b)/(f) $\theta = 45°$ e $\phi = 0°$, (c)/(g) $\theta = \phi = 45°$ e, (d)/(h) $\theta = 45°$ e $\phi = 90°$. 22
Figura 10 Análise do PSLL para 32 elementos com separação entre elementos de 1λ e resolução de 101 pontos. 23
Figura 11 Análise dos quatro pontos da figura anterior. 24
Figura 12 Explicação do erro numérico gerado pelo gráfico onde: (a) deveria encontrar o lóbulo principal, (b) encontrou dois pontos simétricos ao invés do pico. 25
Figura 13 Análise do código para 16 elementos e uma resolução de 101 pontos. 26
Figura 14 Análise do código para 16 elementos e uma resolução de 501 pontos. 27
Figura 15 PSLL para (a) $\phi_{BS} = 0$ e $\theta_{BS} = \pi/2$, (b) $\phi_{BS} = 0,1$ e $\theta_{BS} = 0,1$, (c) $\phi_{BS} = \pi/2$ e $\theta_{BS} = \pi/2$ e (d) $\phi_{BS} = 3 \cdot \pi/16$ e $\theta_{BS} = 5 \cdot \pi/2$. 28
Figura 16 Análise do PSLL para as regiões amarela, verde, azul claro e azul escuro. . . . 30
Figura 17 Análise do código para 8 elementos e uma resolução de 501 pontos. 31
Figura 18 PSLL para (a) $\phi_{BS} = 0,1$ e $\theta_{BS} = 0,1$, (b) $\phi_{BS} = \pi/4$ e $\theta_{BS} = \pi/2$, (c) $\phi_{BS} = 3 \cdot \pi/4$ e $\theta_{BS} = \pi/2$ e (d) $\phi_{BS} = 5 \cdot \pi/3$ e $\theta_{BS} = 3 \cdot \pi/2$. 32
Figura 19 Análise do PSLL para as regiões amarela, verde, azul água e azul. 33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – PSLL para diferentes ângulos de direcionamento de feixe e separação entre elementos de 1λ e 2λ. 23

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AF	*Array Factor*
PSLL	*Peak Side Lobel Level*
RF	Rádiofrequências
LIDAR	*Light Detection And Ranging*
PAA	*Phased Array Antennas*
SOI	*Silicon On Insulator*

LISTA DE SÍMBOLOS

λ	Comprimento de onda
d	Distância mínima entre os elementos de antena
ρ	Distância do centro do arranjo
ψ	Ângulo a partir de um eixo de referência arbitrário
τ	Variável paramétrica continua real
d_0	Distância inicial
N	Número de elementos de antena
θ	Ângulos diretores de azimute
ϕ	Ângulos diretores de direção
A_n	Amplitude de alimentação do n-ésimo elemento
k	Número de onda
x_n	Eixo x das coordenadas cartesianas do n-ésimo elemento
y_n	Eixo y das coordenadas cartesianas do n-ésimo elemento
θ_{BS}	Distância do centro do arranjo pelo qual se orienta o feixe principal
ψ_{BS}	Ângulo a partir de um eixo de referência arbitrário pelo qual se orienta o feixe principal
θ_{SL}	Distância do centro do arranjo em que aparece o lóbulo lateral de maior intensidade
ψ_{SL}	Ângulo a partir de um eixo de referência arbitrário em que aparece o lóbulo lateral de maior intensidade

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 12
1.1 Arranjo de antenas de Fermat 12
1.2 Espiral de Fermat 14
1.3 Fator de arranjo da espiral de Fermat 16
1.4 Justificativa 16
1.5 Objetivo 17
1.6 Estrutura do documento 17

2 MÉTODOS 18
2.1 Cálculo do fator de arranjo 18
2.2 Cálculo do PSLL 19

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES DAS SIMULAÇÕES 21
3.1 Análise do efeito do número de elementos e da distância entre elementos 21
3.2 Análise do PSLL sob operação do direcionamento de feixe 22

4 CONCLUSÕES 34

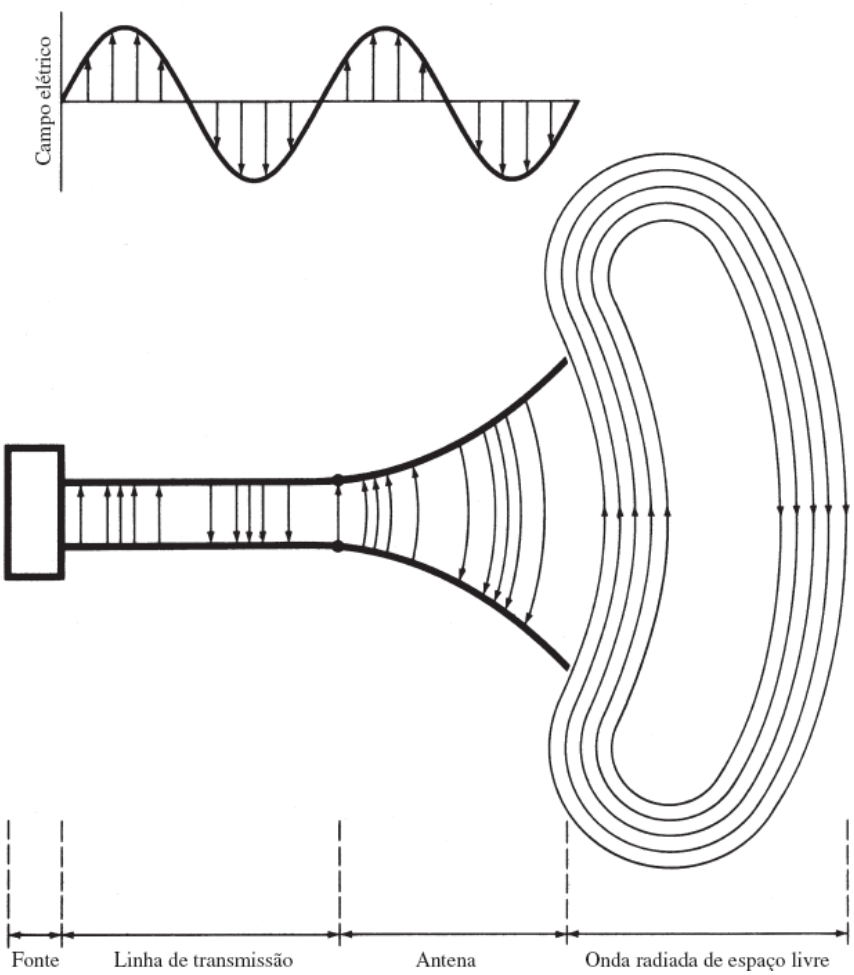
REFERÊNCIAS 35

1 INTRODUÇÃO

1.1 ARRANJO DE ANTENAS DE FERMAT

As antenas funcionam como dispositivos que emitem ou captam ondas eletromagnéticas, atuando como a interface entre um meio não guiado e um meio guiado, como pode ser observado na Figura 1 (BALANIS, 2015). Este meio guiado é responsável por transportar a energia eletromagnética da fonte de transmissão para a antena, intitulada como antena transmissora, ou da antena ao receptor, nomeada como antena receptora. Dependendo da aplicação e do ambiente em que operam, as antenas podem assumir diferentes formatos para emitir ou receber sinais conforme as necessidades específicas (BALANIS, 2015). Portanto, para atender a uma variedade de requisitos, as antenas são projetadas em diversos formatos que permitem direcionar, transmitir ou receber sinais de maneira apropriada. Estes dispositivos não se restringem apenas às frequências de rádio (RF), podendo também ser empregadas na faixa do espectro visível (de 400 nm a 700 nm) e infravermelho (de 700 nm a 1 mm), sendo então referidas como antenas ópticas (BALANIS, 2015). Essas antenas têm atraído cada vez mais interesse nos últimos anos devido à popularização de suas aplicações, incluindo a

Figura 1 – Representação da estrutura de uma antena.



fonte: Retirado de (BALANIS, 2015).

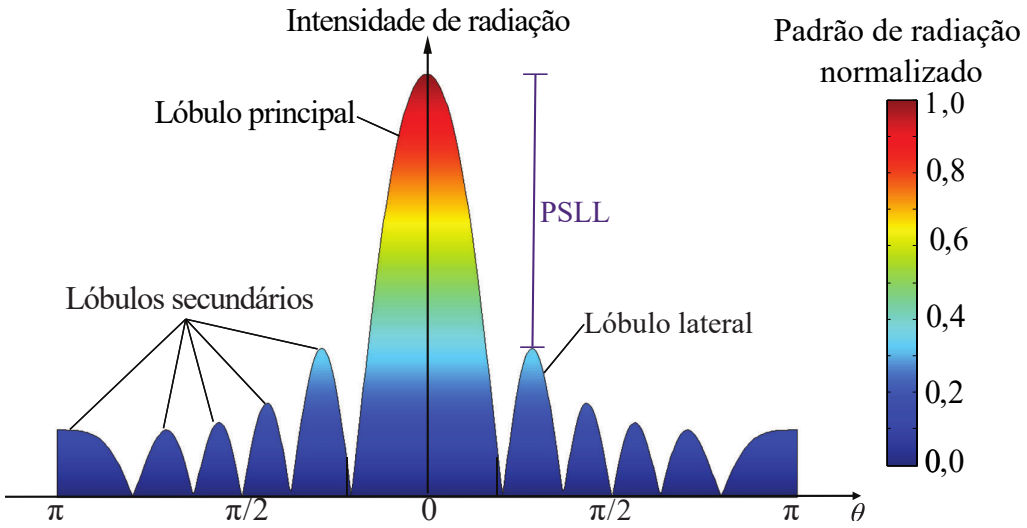
espectroscopia (WUYTENS; SKIRTACH; BAETS, 2017), comunicações ópticas (ALÙ; ENGHETA, 2010) e detecção e alcance por luz (*light detection and ranging* - LIDAR) (POULTON et al., 2017).

Entretanto, para melhorar as propriedades de radiação e oferecer um controle dinâmico do diagrama de radiação, tem-se desenvolvido antenas de arranjos ópticas compostos por múltiplos elementos de radiação idênticos (BALANIS, 2015). Nestas antenas, as fases de alimentação de cada elemento podem ser ajustadas independentemente (HECK, 2017). Em inglês, essas antenas compostas por vários elementos (multi-elementos) são denominadas *phased array antennas* (PAA) [1]. As PAAs têm sido objeto de interesse por diversos grupos de pesquisa, especialmente porque a implementação dessas antenas em frequências ópticas apresenta restrições quanto à distância mínima entre os elementos, o qual não é tão comum em aplicações operando em RF. Esta limitação da distância entre os elementos surge devido ao fato de que, para garantir uma eficiência de radiação adequada, os componentes radiantes, operando em frequências ópticas, geralmente apresentam dimensões de vários comprimentos de onda (λ), resultando em um espaçamento (d) eletricamente grande entre os elementos (PITA et al., 2018; SOUZA, 2018). No caso de que a separação elétrica entre os elementos seja superior a $\lambda/2$, o arranjo é denominado esparso (SOUZA, 2018). Esta particularidade é especialmente crítica em sistemas fotônicos integrados em tecnologia de silício sobre isolante (*silicon on insulator* - SOI). Em PAAs esparsas nas quais os elementos de antena são distribuídos com uma separação uniforme, os campos emitidos por estes geram interferência construtiva não apenas na direção desejada, mas também em outras direções. Como resultado disto, formam-se lóbulos de radiação laterais de alta intensidade, chamados de lóbulos de grade. Estes lóbulos apresentam uma intensidade próxima à do lóbulo principal, o que pode causar problemas de segurança e interferência, assim como deterioração da relação sinal-ruído (SOUZA, 2018). Uma estratégia frequentemente empregada para reduzir a intensidade desses lóbulos é a distribuição não uniforme dos elementos da antena (BALANIS, 2015). Estritamente, o digrama da Figura 2 é de um arranjo não esparso, como se pode observar na periodicidade dos nulos. Esta figura demonstra o padrão de radiação do lóbulo principal e do lóbulo lateral em um arranjo distribuído de forma não uniforme, além de demostrar o cálculo do nível de lóbulo lateral de pico (PSLL - *peak side lobe level*), que mede a diferença entre o pico do lóbulo principal e o pico do lóbulo de grade. Esses lóbulos de grade têm um impacto considerável no desempenho do sistema e, portanto, devem ser minimizados.

Muitos estudos têm se focado em arranjos lineares (SAUDI et al., 2015; DU et al., 2022). No entanto, para aplicações que demandam orientação do feixe em duas direções, os arranjos planares são necessários (BALANIS; IOANNIDES, 2007). No contexto de arranjos planares, a organização dos elementos em conformidade com a espiral de Fermat tem sido proposta como uma alternativa para obter arranjos esparsos com lóbulos laterais de menor intensidade (GABRIELLI; HERNANDEZ-FIGUEROA, 2015). Contudo, algumas questões permanecem sem uma abordagem explícita: por um lado, a relação entre o número de elementos e a distância mínima entre eles, e por outro, se os arranjos de Fermat continuam a exibir lóbulos laterais reduzidos quando o feixe principal é direcionado fora do *broadside*, ou se são afetados, como ocorre nos arranjos lineares não uniformes (SOUZA, 2018). No caso de arranjos planares, os autores em Gabrielli e Hernandez-Figueroa (2015) e Cardoso, Oliveira e

[1] No contexto deste trabalho, será utilizado o termo em inglês devido à ambiguidade em torno da tradução para o português (arranjo de antenas em fase ou antenas de arranjo em fase).

Figura 2 – Lóbulos emitidos por uma antena.



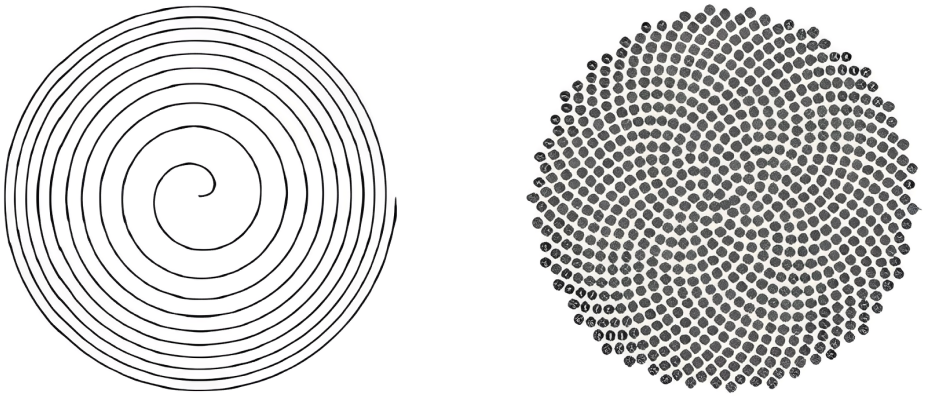
fonte: Modificado a partir de (BALANIS, 2016).

Hernandez-Figueroa (2021) propuseram e analisaram o uso da espiral de Fermat para determinar as posições de elementos que resultem em lóbulos laterais de menor potência.

1.2 ESPIRAL DE FERMAT

A espiral de Fermat é frequentemente encontrada na natureza, por exemplo, na disposição das sementes em girassóis (SEGERMAN, 2010). Na Figura 3 pode-se observar a espiral de Fermat sem elementos e espiral de Fermat condensada, com múltiplos elementos, que possui uma grande semelhança com o miolo da flor margarida.

Figura 3 – Espiral de Fermat.



fonte: Modificado a partir de (PETERSON, 2005).

Uma das características singulares da espiral de Fermat é que, quando discretizada, a separação entre os elementos em qualquer eixo não é uniforme. Isso resulta em arranjos dispostos segundo essa espiral que demonstram níveis reduzidos de lóbulos laterais (GABRIELLI; HERNANDEZ-FIGUEROA, 2015; CARDOSO; OLIVEIRA; HERNANDEZ-FIGUEROA, 2021). A espiral de Fermat

pode ser descrita utilizando coordenadas polares como segue:

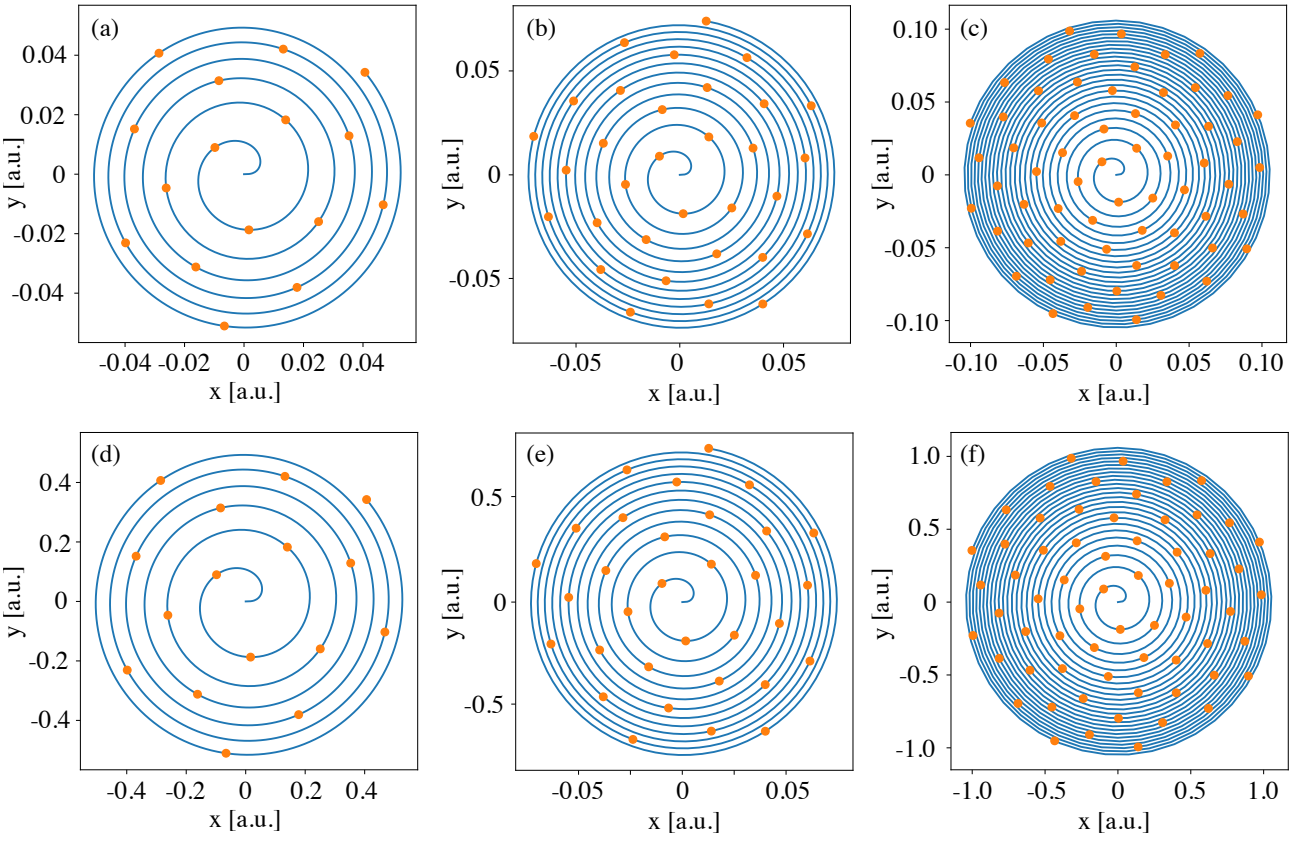
$$\rho = \frac{d}{d_0}\sqrt{\tau} \qquad \text{e} \qquad \psi = \pi\left(3 - \sqrt{5}\right)\tau, \tag{1}$$

em que ρ e ψ são a distância do centro do arranjo e o ângulo a partir de um eixo de referência arbitrário, respectivamente, d é a distância mínima entre os elementos de antena e τ é uma variável paramétrica continua real tal que $\tau \geq 0$. A fim de normalizar, para o caso da espiral de Fermat, d_0 adquire o valor de $\sqrt{3 - 4\cos[3\pi\left(3 - \sqrt{5}\right)]}$ (PITA et al., 2017). Dessa forma, as posições dos N elementos da antena são determinadas discretizando a espiral de Fermat, onde a localização do n-ésimo elemento é dada por:

$$\rho_n = \frac{d}{d_0}\sqrt{n} \qquad \text{e} \qquad \psi_n = n\pi\left(3 - \sqrt{5}\right). \tag{2}$$

Portanto, para facilitar a visualização, a Figura 4 apresenta arranjos planares baseados na espiral de Fermat para diferentes valores de distância mínima d e número de elementos de antena N. Dessa forma, a Figura 4 (a), (b) e (c) correspondem a arranjos com $d = 0,01$ unidades de comprimento e com um número de elementos N de 16, 32 e 64, respectivamente. Enquanto a Figura 4 (d), (e) e (f), representam arranjos com os mesmos números de elementos mas com uma distância mínima $d = 0,1$ unidades de comprimento.

Figura 4 – Posição de elementos em arranjos planares baseados na espiral de Fermal com (a-c) 0,01 unidades de comprimento entre elementos e (d-f) 0,1 unidades de comprimento. Os marcadores indicam a posição dos elementos os quais correspondem a uma espiral de Fermat amostrada (a.u. significa *arbitrary units*).



fonte: Produção da própria autora.

1.3 FATOR DE ARRANJO DA ESPIRAL DE FERMAT

Após determinar as posições dos N elementos da antena, sem considerar o direcionamento de feixe, o fator de arranjo (*array factor*, AF) da antena é expresso por (VISSER, 2006; MAILLOUX, 2017; HANSEN, 2009):

$$AF(\theta,\phi) = \sum_{n=1}^{N} A_n e^{[jx_n \cdot k \cdot \sin(\theta)\cdot\cos(\phi) + jy_n \cdot k \cdot \sin(\theta)\cdot\sin(\phi)]}, \tag{3}$$

onde θ e ϕ representam os ângulos diretores de azimute e de direção, respectivamente, definidos conforme a convenção adotada em (BALANIS, 2015). A_n indica a amplitude de alimentação do n-ésimo elemento, que pode ser assumido por 1, enquanto k corresponde ao número de onda, expresso por $2\pi/\lambda$, em que λ é o comprimento de onda operacional. Por sua vez, x_n e y_n representam as coordenadas cartesianas do n-ésimo elemento, determinadas pelas equações: $x_n = \rho_n \cos(\psi_n)$ e $y_n = \rho_n \sin(\psi_n)$. A Equação 3 pode ser adaptada para levar em consideração o direcionamento do feixe nos ângulos θ_{BS} e ϕ_{BS}, que são os ângulos pelos quais se orienta o feixe principal. Portanto, nesse caso, ao considerar amplitudes de alimentação uniformes, a Equação 3 adota a forma apresentada em (BALANIS; IOANNIDES, 2007):

$$AF_{BS}(\theta,\phi) = \sum_{n=1}^{N} \Phi_n(\theta,\phi), \tag{4}$$

onde

$$\begin{aligned} \Phi_n(\theta,\phi) \;=\; & \exp\big\{ jx_n k \left[\sin(\theta)\cos(\phi) - \sin(\theta_{BS})\cos(\phi_{BS})\right] \\ & + jy_n k \left[\sin(\theta)\sin(\phi) - \sin(\theta_{BS})\sin(\phi_{BS})\right] \big\}. \end{aligned} \tag{5}$$

A partir do fator de arranjo, o nível de lóbulo lateral de pico (PSLL - *peak side lobe level*) pode ser calculado como:

$$PSLL = 20\log_{10}\left|\frac{AF_{BS}(\theta_{SL},\phi_{SL})}{AF_{BS}(\theta_{BS},\phi_{BS})}\right| = 20\log_{10}\left|\frac{AF_{BS}(\theta_{SL},\phi_{SL})}{N}\right| \tag{6}$$

onde $AF_{BS}(\theta_{SL},\phi_{SL})$ é o valor do AF na direção do lóbulo lateral de maior de intensidade e $AF_{BS}(\theta_{BS},\phi_{BS})$ é o valor do AF na direção do *beam steering* (que é o direcionamento do feixe principal, ou seja, em direções diferentes ao *broadside*, onde os elementos da antena estão dispostos em uma linha reta, perpendicular à direção da radiação principal).

1.4 JUSTIFICATIVA

Ao implementar arranjos de antenas esparsos, foi observado que uma distribuição uniforme dos elementos pode resultar na aparição de lóbulos de grade que geram problemas de segurança e interferência tanto na transmissão quanto na recepção de sinais. A estratégia principal para resolver essa adversidade é distribuir os elementos de antena de forma não uniforme. Em particular, a espiral de

Fermat tem sido proposta para determinar as posições adequadas e minimizar a intensidade dos lóbulos de grade (PITA et al., 2017). Porém, o efeito combinado do número de elementos e a separação entre estes ainda não tem sido quantitativamente analisada. Além disso, também não tem sido explorado o efeito do *beam steering* na redução do PSLL.

1.5 OBJETIVO

O principal objetivo do presente trabalho foi realizar uma análise numérica de arranjos com diferentes combinações de números de elementos e separação mínima e, também, avaliar a intensidade dos lóbulos laterais quando os elementos do arranjo são alimentados para direcionar o feixe principal.

1.6 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

O restante deste documento está organizado em seções que compreendem:

- Métodos: descreve os métodos empregados para calcular o PSLL;
- Resultados e discussões das simulações: exibe os resultados e gráficos obtidos a partir das simulações realizadas, juntamente com as análises e discussões dos mesmos;
- Conclusões finais: descreve as observações decorrentes deste trabalho.

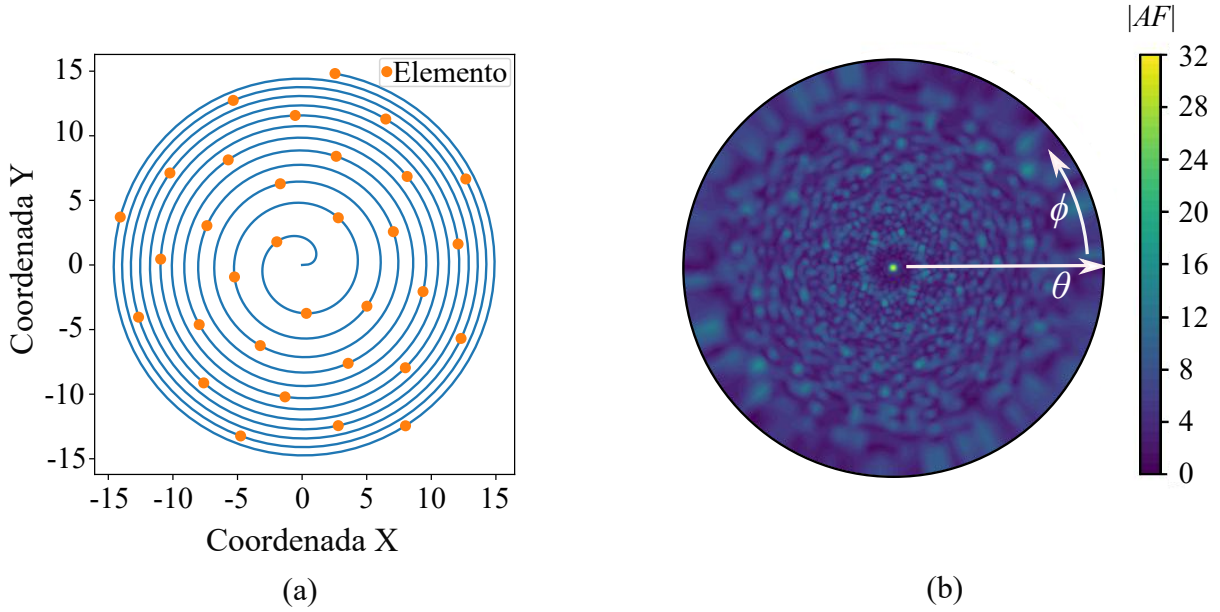
2 MÉTODOS

A análise do impacto do direcionamento de feixe no PSLL foi conduzida por meio de simulações numéricas utilizando a linguagem de programação de alto nível Python. Primeiro calculamos o PSLL e, posteriormente, foram realizadas varreduras dos números de elementos, distância entre elementos e o ângulo de direcionamento de feixe. Além disso, foram elaborados códigos para a visualização dos resultados obtidos.

2.1 CÁLCULO DO FATOR DE ARRANJO

O primeiro passo realizado foi determinar o número de elementos na Espiral de Fermat, sendo escolhida uma espiral com 32 elementos de antenas, conforme ilustrado na Figura 5 (a). Em seguida, foi implementada diretamente a Equação 4 discretizando os ângulos θ e ϕ com 101 valores. Nesse contexto, o fator de arranjo foi inicializado como uma matriz nula, considerando a contribuição de todos os elementos. Dessa maneira, o AF foi armazenado em formato de matriz, onde cada linha representa um valor do ângulo ϕ e cada coluna representa um valor do ângulo θ. Após a implementação no código, foi possível encontrar o AF para esses 32 elementos. Assim, a Figura 5 (b) mostra a norma do fator de arranjo desses elementos, em que a região central corresponde ao lóbulo principal, enquanto as regiões mais claras fora dessa região representam os lóbulos laterais.

Figura 5 – Representação da (a) Espiral de Fermat com 32 elementos de antenas e uma separação mínima de 2λ e do (b) módulo do fator de arranjo indicando os critérios dos ângulos diretores na espiral.



(a) (b)

fonte: Produção da própria autora.

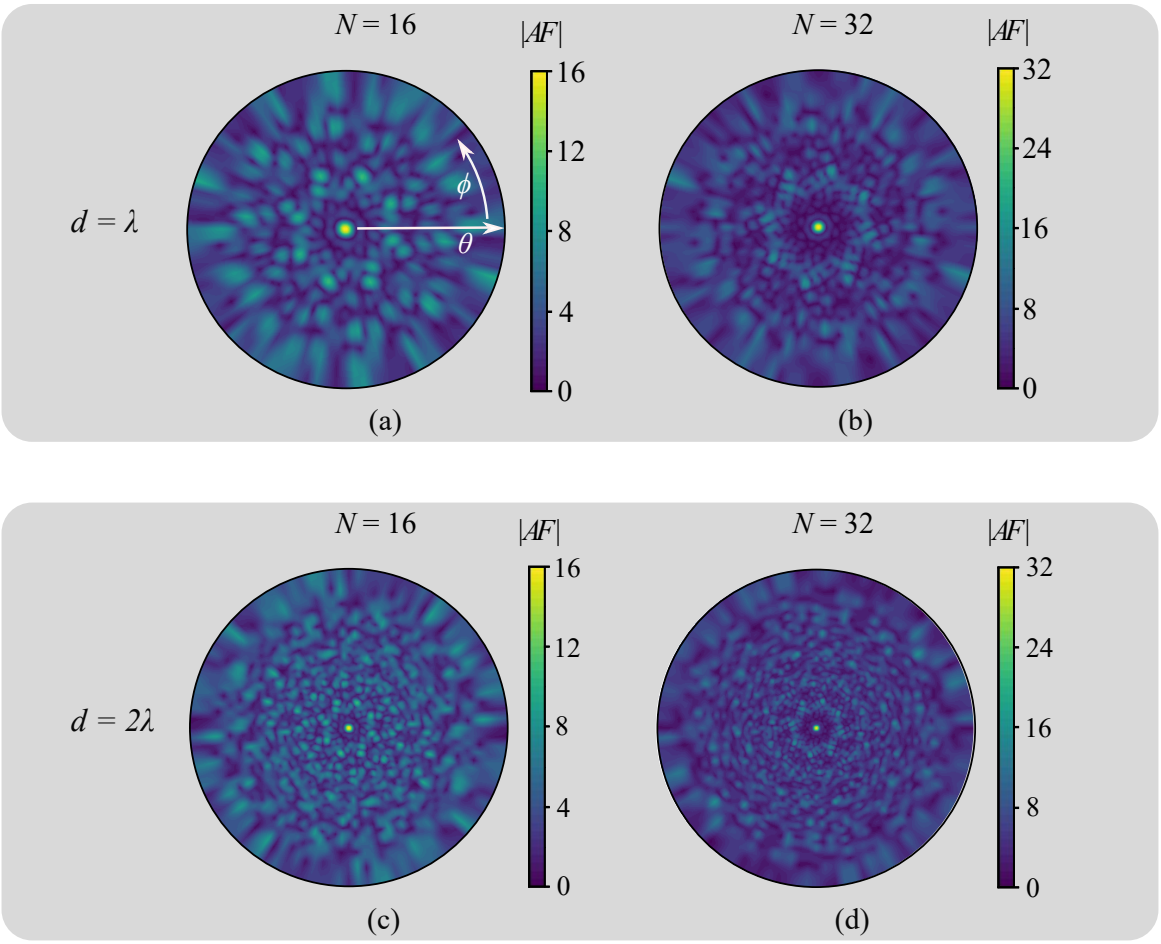
2.2 CÁLCULO DO PSLL

Para examinar o impacto do número de elementos, da distância entre eles e a influência do direcionamento do feixe no nível de lóbulo lateral de pico, inicialmente, foi desenvolvido um código em Python. Esse código gerou uma espiral com um número N de elementos e uma distância d entre eles. Posteriormente, a Equação 4 foi implementada diretamente, com a discretização dos ângulos θ e ϕ utilizando 101 valores. Para isso, o fator de arranjo foi inicializado como uma matriz nula, considerando a contribuição de todos os elementos. Dessa maneira, o AF foi armazenado em formato de matriz, onde cada linha representa um valor do ângulo ϕ e cada coluna representa um valor do ângulo θ.

Assim, empregamos a Equação 4 para determinar o fator de arranjo, considerando variados números de elementos e distintas distâncias entre eles, com o intuito de analisar o impacto no fator de arranjo. Dessa forma, foi gerado a Figura 6 que mostra os AFs dos arranjos de antenas de Fermat com separação mínima de 1λ e 2λ, cada um com 16 e 32 elementos. Em todas as subfiguras, a área central corresponde ao lóbulo principal, enquanto as regiões mais claras, fora dessa região, representam os lóbulos laterais. Portanto, é possível observar que na Figura 6 (a) e (b) indicam que, em um arranjo de 16 elementos, os lóbulos laterais têm uma intensidade relativamente maior em comparação com o arranjo de 32 elementos. Essa mesma relação pode ser observada na Figura 6 (c) e na Figura 6 (d). Logo, pode-se analisar que mesmo tendo diferentes distâncias entre os elementos, quanto menor o número de elementos, maior será a intensidade dos lóbulos laterias. Dessa forma, após essa análise, foi considerado arranjos com 32 elementos para o restante das análises.

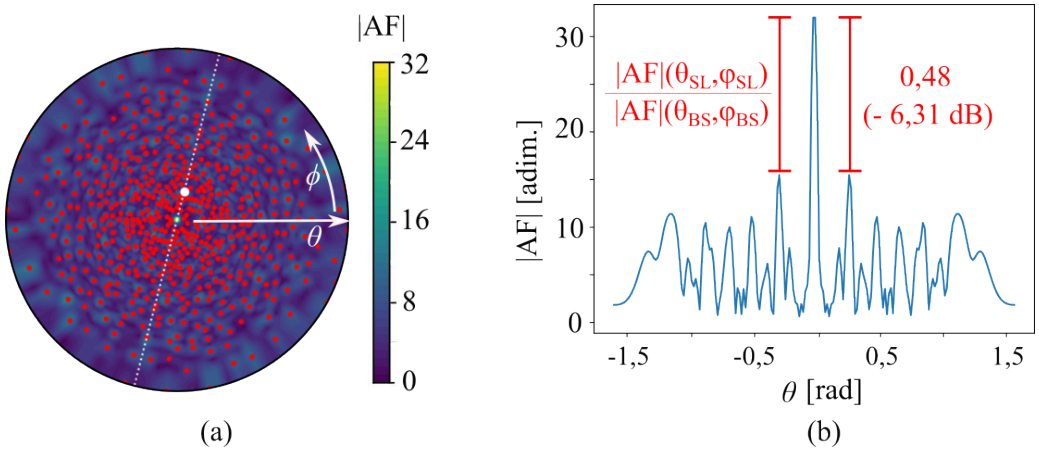
Em seguida, foi conduzido o cálculo do PSLL, o qual exigiu a identificação do lóbulo lateral de maior intensidade. Logo, para isso, foi necessário elaborar um código para detectar os máximos locais na matriz que continha o módulo do AF. Embora exista uma função específica em Python para essa tarefa, sua sintaxe é pouco intuitiva e apresenta problemas com valores máximos nos limites. Como solução alternativa, foi implementada uma máscara de máximo móvel de dimensões 3×3. Dessa forma, se o valor no centro da máscara fosse superior aos elementos vizinhos, esse valor era identificado como um máximo local. Além disso, o código também considera máximos nos limites da matriz considerando máscaras retangulares. Assim, com base nesse código, foi possível identificar o lóbulo mais intenso, representado pelo ponto branco, e os lóbulos laterais, indicados pelos pontos vermelhos, conforme apresentado na Figura 7 (a). Além disso, também é demonstrado a direção dos ângulos diretores de azimute e de direção, θ e ϕ, respectivamente. Posteriormente, foi realizado um corte no valor absoluto do fator de arranjo, representado pela linha tracejada na Figura 7 (a), abrangendo o lóbulo principal e o lóbulo lateral mais intenso, com o intuito de visualizar o PSLL, conforme ilustrado na Figura 7 (b). Em seguida, o valor do PSLL foi calculado. Para essa configuração específica, o PSLL obtido foi de 0,48, correspondente a –6,31 dB.

Figura 6 – Fator de arranjo para uma distância de 1λ e 2λ com (a)/(c) 16 elementos e (b)/(d) 32 elementos. Em todos os casos consideramos o sistemas de coordenadas de (a) em que θ varia de 0 a $\pi/2$ e ϕ varia entre 0 e 2π.



fonte: Produção da própria autora.

Figura 7 – (a) Corte do fator de arranjo destacando o lóbulo de maior intensidade e os lóbulos laterais e (b) corte do módulo do fator de arranjo no plano que inclui o lóbulo principal e o lóbulo lateral de maior intensidade.



fonte: Produção da própria autora.

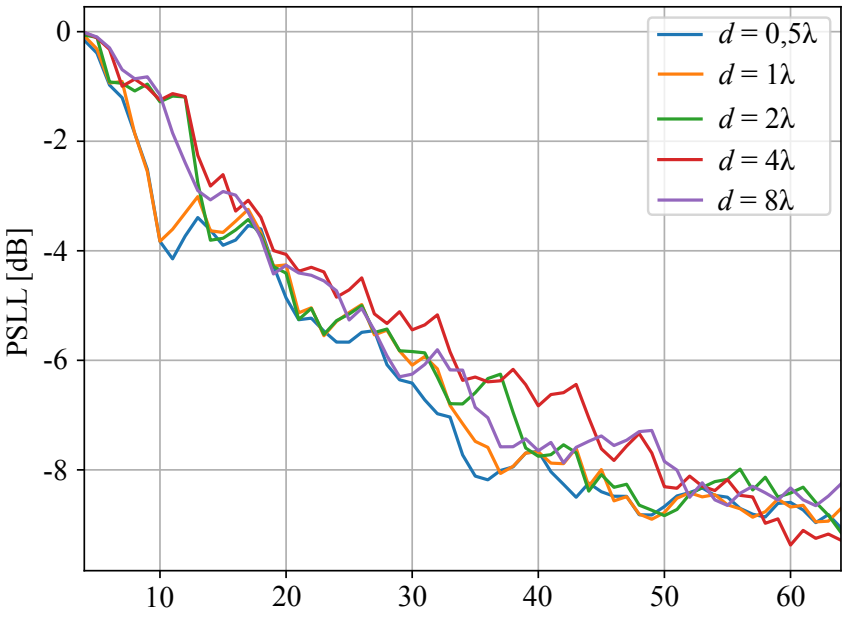
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES DAS SIMULAÇÕES

Esta seção apresenta os resultados obtidos, divididos em duas subseções que abordam a análise do efeito do número de elementos e da distância entre elementos e análise do PSLL sob operação do direcionamento de feixe.

3.1 ANÁLISE DO EFEITO DO NÚMERO DE ELEMENTOS E DA DISTÂNCIA ENTRE ELEMENTOS

Após as análises do número de elementos e a distância entre eles, foi criado um código para usar o fator de arranjo e analisar o PSLL. O valor do PSLL foi determinado ao fazer um corte no fator de arranjo no plano contendo tanto o lóbulo principal quanto o lóbulo lateral mais intenso. Dessa forma, a fim de explorar a relação entre o número de elementos da antena e o nível de PSLL em distintas distâncias, foi realizado um estudo, como ilustrado na Figura 8. Na figura, pode-se compreender que à medida que o número de elementos da antena aumenta, o PSLL tende a diminuir. No entanto, devido à interação complexa entre os elementos e à discretização de seu número, essa redução não segue um padrão monotonamente decrescente. Além disso, à medida que o número de elementos aumenta, as curvas de PSLL para diferentes distâncias mínimas tendem a se aproximar umas das outras, ou seja, tendem a convergir.

Figura 8 – Relação entre o número de elementos de antena e o nível de lóbulo lateral de pico em dB para diferentes distâncias mínimas inter-elementos.

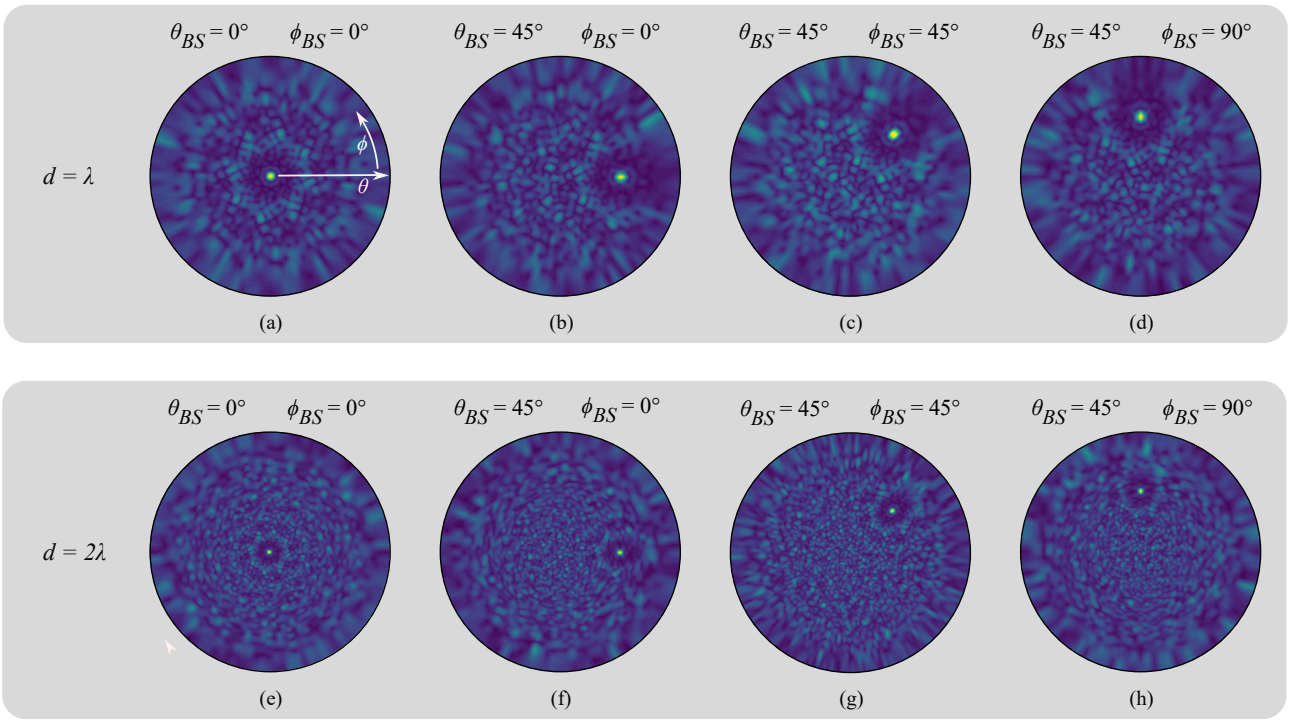


fonte: Produção da própria autora.

3.2 ANÁLISE DO PSLL SOB OPERAÇÃO DO DIRECIONAMENTO DE FEIXE

A análise feita foi um estudo sobre o direcionamento do feixe considerando um arranjo de 32 elementos com distâncias entre elementos médias de 1λ e 2λ. A Figura 9 apresenta os diagramas de radiação para diferentes ângulos diretores de θ_{BS} e ϕ_{BS}, indicando a direção correspondente a esses ângulos. Assim, na Figura 9 (a) e (e), não há direcionamento de feixe, ou seja, o feixe é dirigido na direção *broadside*. Na Figura 9 (b) e (f), o feixe é dirigido em um ângulo de $45°$ na direção θ e $0°$ na direção ϕ. A Figura 9 (c) e (g) mostram o efeito quando os ângulos θ_{BS} e ϕ_{BS} são ambos $45°$. Por fim, na Figura 9 (d) e (h), o ângulo ϕ_{BS} é alterado para $90°$, deixando o valor de $\theta_{BS} = 45°$.

Figura 9 – Análise do direcionamento de feixe para distância de 1λ e 2λ com (a)/(e) $\theta = \phi = 0°$, (b)/(f) $\theta = 45°$ e $\phi = 0°$, (c)/(g) $\theta = \phi = 45°$ e, (d)/(h) $\theta = 45°$ e $\phi = 90°$.



fonte: Produção da própria autora.

Após observar a Figura 9, um aspecto inicial a destacar é que, ao considerar uma separação mínima de 2λ, a largura do feixe principal é reduzida devido ao aumento da área efetiva da antena. É relevante mencionar que, para todas as configurações avaliadas, os feixes principais estão direcionados nas direções desejadas. Adicionalmente, ao direcionar o feixe fora do ângulo *broadside*, não são observados lóbulos laterais significativos, o que indica que, de maneira qualitativa, o PSLL não sofre uma degradação considerável. Para quantificar o efeito no PSLL, na Tabela I estão apresentados os valores obtidos para as diferentes separações e ângulos de direcionamento. Conforme antecipado ao analisar os diagramas de radiação, a redução no PSLL é inferior a 1dB.

Dessa forma, ao examinar a tabela, nota-se uma leve variação no PSLL ao modificar a distância entre os elementos. Além disso, observa-se um aumento desse valor quando é aplicado o direcionamento do feixe. Essas observações sugerem que tanto a distância entre os elementos quanto o direcionamento do feixe exercem influência sobre o PSLL. No entanto, é importante destacar que, devido à geometria da espiral de Fermat, essa dependência não é consideravelmente significativa.

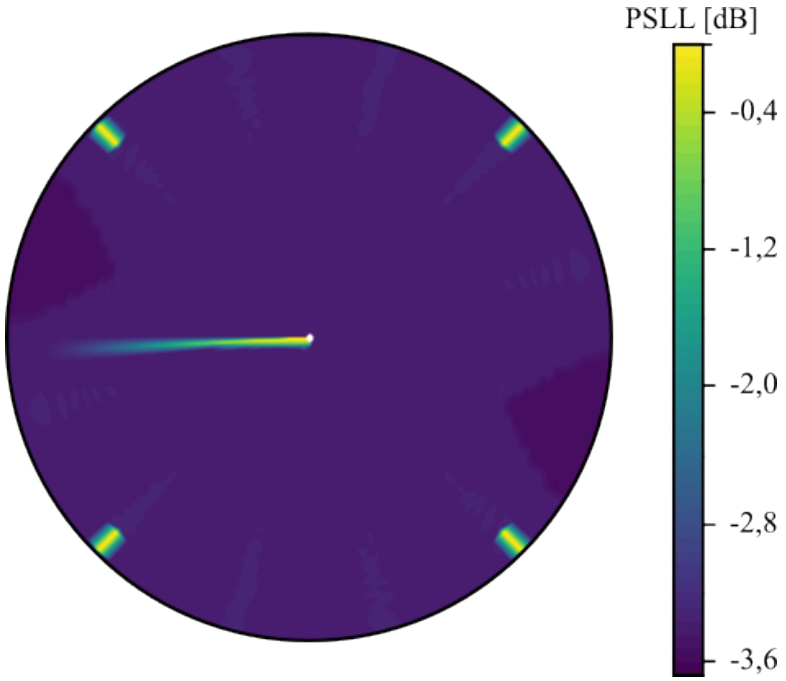
Tabela 1 – PSLL para diferentes ângulos de direcionamento de feixe e separação entre elementos de 1λ e 2λ.

Ângulo de direcionamento (graus)		**Nível de lóbulo lateral de pico (dB)**	
θ_{BS}	ϕ_{BS}	$d = \lambda$	$d = 2\lambda$
0	0	–6,20	–6,38
45	0	–5,51	–5,68
45	45	–5,51	–5,04
45	90	–5,51	–5,51

fonte: Produção da própia autora.

Para realizar um estudo mais detalhado, a seguinte analise considera uma dupla varredura dos ângulos de direcionamento de feixe. Assim, deu-se início a uma análise utilizando 16 elementos, com uma separação entre eles de 1λ e uma resolução de 101 pontos. Essa análise foi conduzida utilizando o mesmo código desenvolvido anteriormente, com uma matriz de ângulos de direção de feixe variando θ e ϕ em todo o intervalo. O resultado dessa simulação é apresentado na Figura 10.

Figura 10 – Análise do PSLL para 32 elementos com separação entre elementos de 1λ e resolução de 101 pontos.

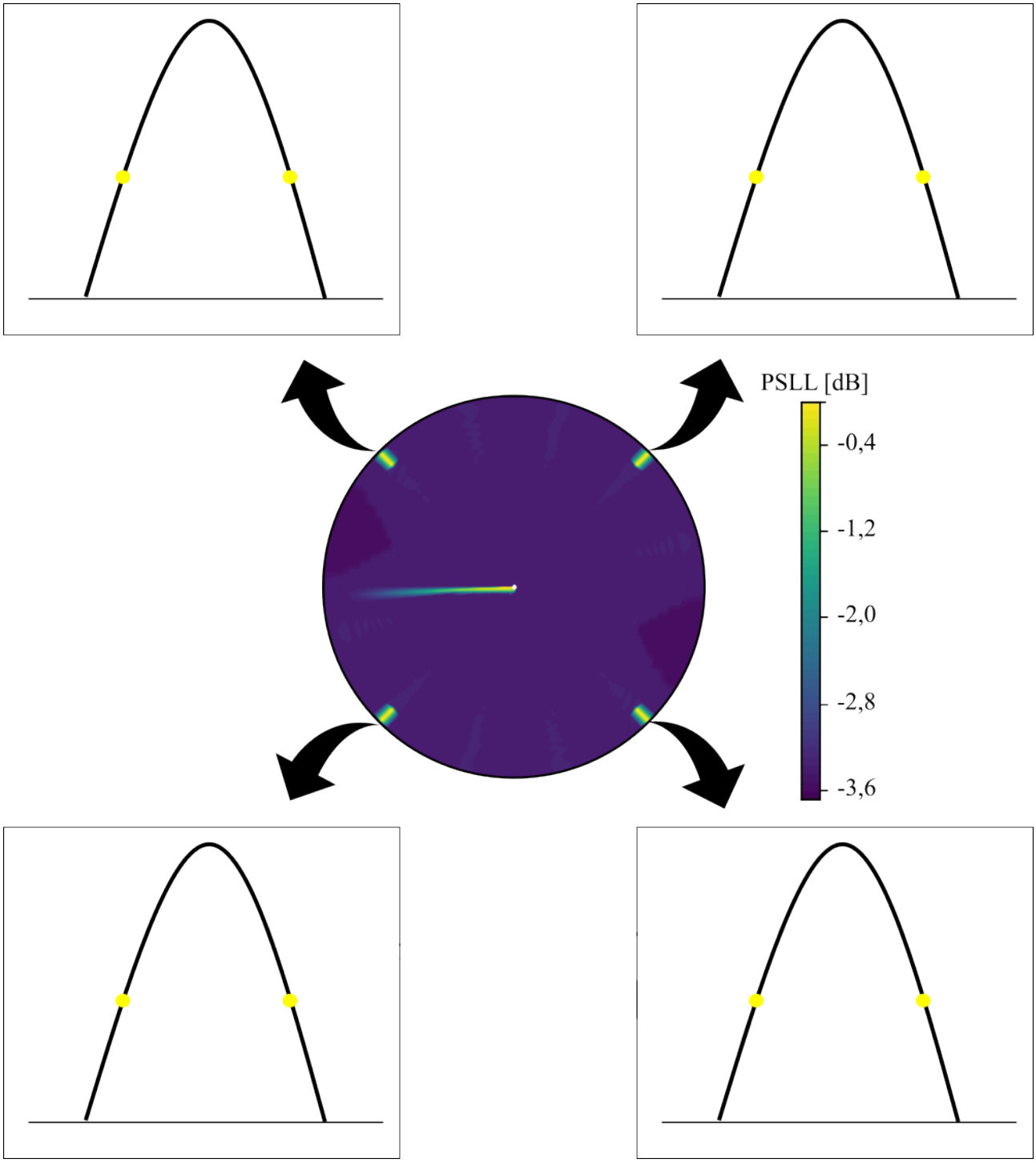


fonte: Produção da própria autora.

A partir dessa imagem, é possível notar um erro numérico no centro da mesma. Após uma análise detalhada desse efeito, observou-se que esse erro era causado por um problema de resolução no feixe principal, o que dava como resultado uma redução do valor estimado da sua intensidade. Entretanto, ficou evidente a presença de quatro pontos mais luminosos na imagem que não correspondiam aos resultados esperados. Por conseguinte, foi necessário examinar o PSLL para cada um desses pontos. Desse modo, foi crucial determinar os valores de θ_{BS} (θ com direcionamento do feixe) e ϕ_{BS} (ϕ com direcionamento do feixe) em um desses pontos para identificar e resolver o problema. Assim, foram encontrados $\theta_{BS} = 0,024543°$ e $\phi_{BS} = 4,074253°$, aproximadamente. No entanto, ao calcular o PSLL para esses valores, o resultado do PSLL foi baixo, indicando que o problema não era no

ponto. Por conseguinte, foi necessário selecionar o penúltimo ponto que não correspondia aos valores de $\phi_{BS} = \pi/4$ e $\theta_{BS} = \pi/2$, onde $\theta_{BS} = 1.54625263°$. Nesse ponto, o PSLL foi calculado como aproximadamente $5,987 \times 10^{-5}$ dB, o que era consideravelmente alto. Dessa forma, percebeu-se que o código não estava identificando o pico mais elevado, mas sim dois pontos próximos ao máximo do lóbulo principal. Isso resultou na geração de dois lóbulos com o mesmo nível de intensidade, ao invés de detectar apenas um lóbulo com o pico máximo (o lóbulo principal). Este efeito é demostrado de forma qualitativa na Figura 11.

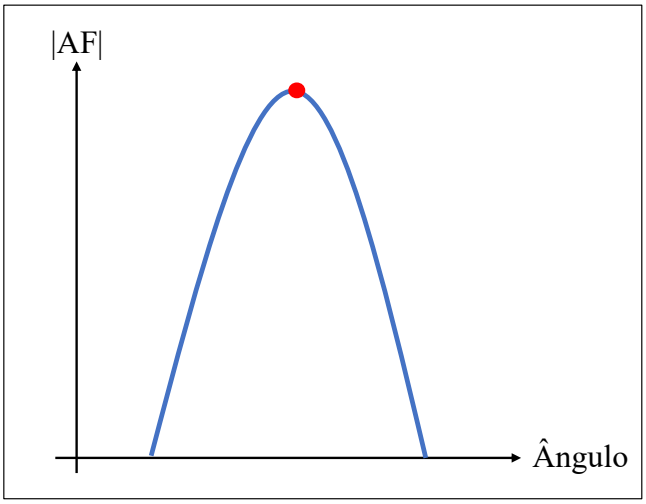
Figura 11 – Análise dos quatro pontos da figura anterior.



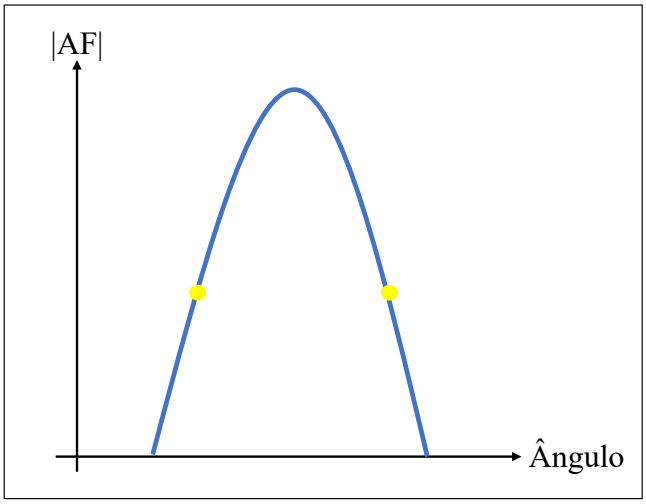
fonte: Produção da própria autora.

Na referida figura, é possível observar que o pico do lóbulo principal não foi detectado nos quatro pontos mencionados anteriormente, mas o código identificou os pontos amarelos, gerando dois lóbulos. Para uma melhor compreensão do processo, a Figura 12 (a) apresenta o lóbulo principal e seu pico representado pelo ponto vermelho. Este ponto era o esperado que o código detectasse. Por outro lado, na Figura 12 (b) o código identifica dois pontos idênticos, ao invés do pico. Dessa forma, o problema do código é que ele não conseguia achar o valor correto para colocar na equação, fazendo com que a amplitude considerada do lóbulo principal se reduza e, consequentemente, aumenta o PSLL.

Figura 12 – Explicação do erro numérico gerado pelo gráfico onde: (a) deveria encontrar o lóbulo principal, (b) encontrou dois pontos simétricos ao invés do pico.



(a)



(b)

fonte: Produção da própria autora.

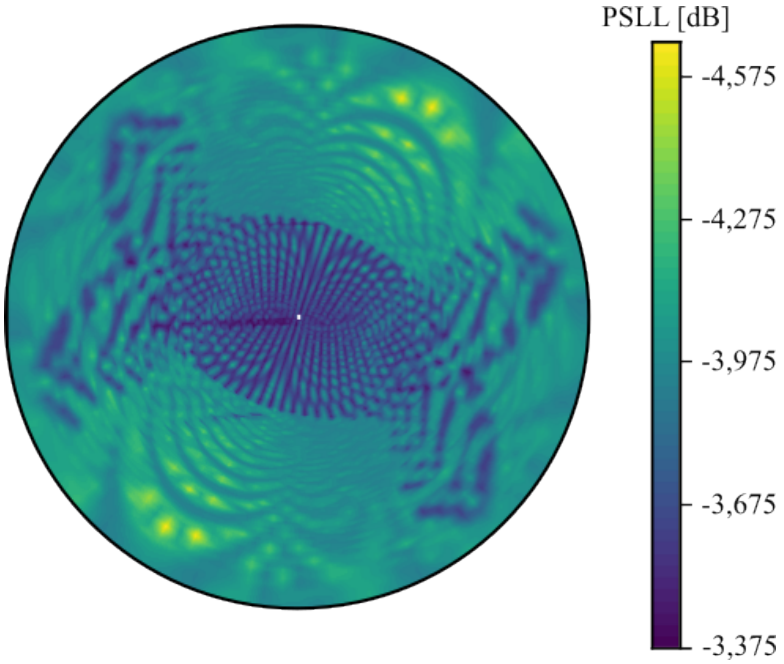
Após alterar o código para resolver esse problema, foi necessário validar essa abordagem de maneira mais rápida e, devido às limitações computacionais, foi mantido baixo o número de pontos. Consequentemente, a segunda simulação foi realizada com 16 elementos e 101 pontos de resolução.

Em continuação as alterações indicadas acima, o código também foi modificado para que o θ_{BS}

correspondesse ao θ. Dessa forma, o θ_{BS} foi direcionado para um dos θ e depois seria direcionado para o outro θ. Como fixou o θ_{BS} para que correspondesse a cada ângulo, o código possui 5 vezes mais ângulos em cada direção, logo, o número de iterações foi multiplicado por uma potência de 4.

Assim, como dito anteriormente, para determinar se o código estava calculando o lóbulo principal corretamente após essas mudanças e se o erro numérico havia sido resolvido, o número de pontos foi mantido em 101 pontos. Então, utilizando um computador com processador AMD Ryzen 9 3900X 12-Core Processor 3,79GHz e 32,0 GB de RAM instalada, foi necessário 7 dias para que apresentasse o resultado mostrado na Figura 13.

Figura 13 – Análise do código para 16 elementos e uma resolução de 101 pontos.



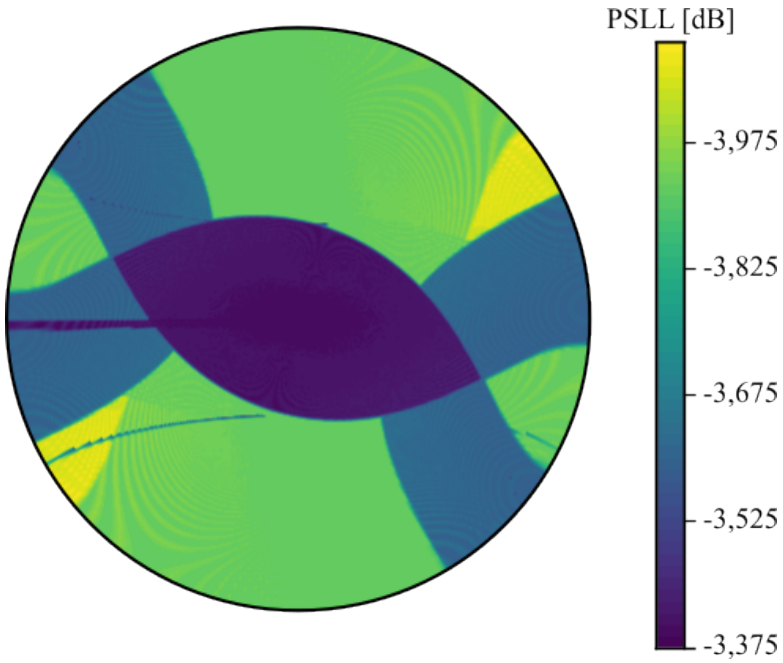
fonte: Produção da própria autora.

O resultado obtido por meio dessa figura mostra que há pontos de mais alto *side lobe level*, representados pelos pontos amarelos e que há uma variação de 1,2 dB entre o melhor e o pior caso. Também é possível observar que ainda há um erro numérico no centro da imagem, o qual não foi possui eliminar com as alterações feitas. Além disso, notasse que com 101 pontos há um padrão que não se pode concluir nessa etapa se é real para o tipo de antena utilizada ou se é causado devido a baixa resolução. Assim, não se pode concluir ainda se o PSLL está sendo calculado corretamente. Dessa forma, foi necessário aumentar a resolução para 501 pontos para determinar qual era o real problema presente nas simulações. Entretanto, pode-se concluir que essas antenas não possuem um tamanho muito grande e já apresenta problemas, logo para 3D já seria muito mais difícil obter um resultado correto.

Com o aumento do número de pontos para 501, as iterações ficaram maiores, pois para cada iteração foi calculado 501 pontos por 501 pontos. Dessa forma, o código apresentou um resultado após 4 semanas de espera devido ao grande custo computacional demandado pelo código. A Figura 14 mostra o resultado obtido para essa análise. Nela pode-se observar que ainda aparecem alguns problemas numéricos, mas de forma geral é possível observar 4 regiões bem definidas (amarelo, verde, azul claro e azul escuro). As regiões amarelas possuem o menor PSLL, logo possuem o melhor resultado.

Entretanto, não era esperado que os melhores pontos estivessem nas bordas na figura. Dessa forma, foi necessário analisar cada uma dessas regiões. E, para isso, foi utilizado o código gerado anteriormente para identificar o PSLL em cada uma dessas regiões por meio da seleção de alguns pontos de *beam steering*. Assim, foi necessário identificar essas áreas através da escolha de ϕ_{BS} e θ_{BS}. Logo, a primeira configuração utilizada foi de $\phi_{BS} = 0$ e $\theta_{BS} = \pi/2$, gerando a Figura 15 (a) com PSLL = – $3,5965$ dB, aproximadamente. Já a segunda configuração foi feita utilizado $\phi_{BS} = 0,1$ e $\theta_{BS} = 0,1$, gerando a Figura 15 (b) com PSLL = – $3,39$ dB, aproximadamente. Para a terceira configuração foi escolhido $\phi_{BS} = \pi/2$ e $\theta_{BS} = \pi/2$, gerando a Figura 15 (c) com PSLL = – $3,9164$ dB, aproximadamente. E, a quarta configuração foi gerada com $\phi_{BS} = 3 \cdot \pi/16$ e $\theta_{BS} = 5 \cdot \pi/2$, gerando a Figura 15 (d) com PSLL = – $4,0353$ dB, aproximadamente.

Figura 14 – Análise do código para 16 elementos e uma resolução de 501 pontos.

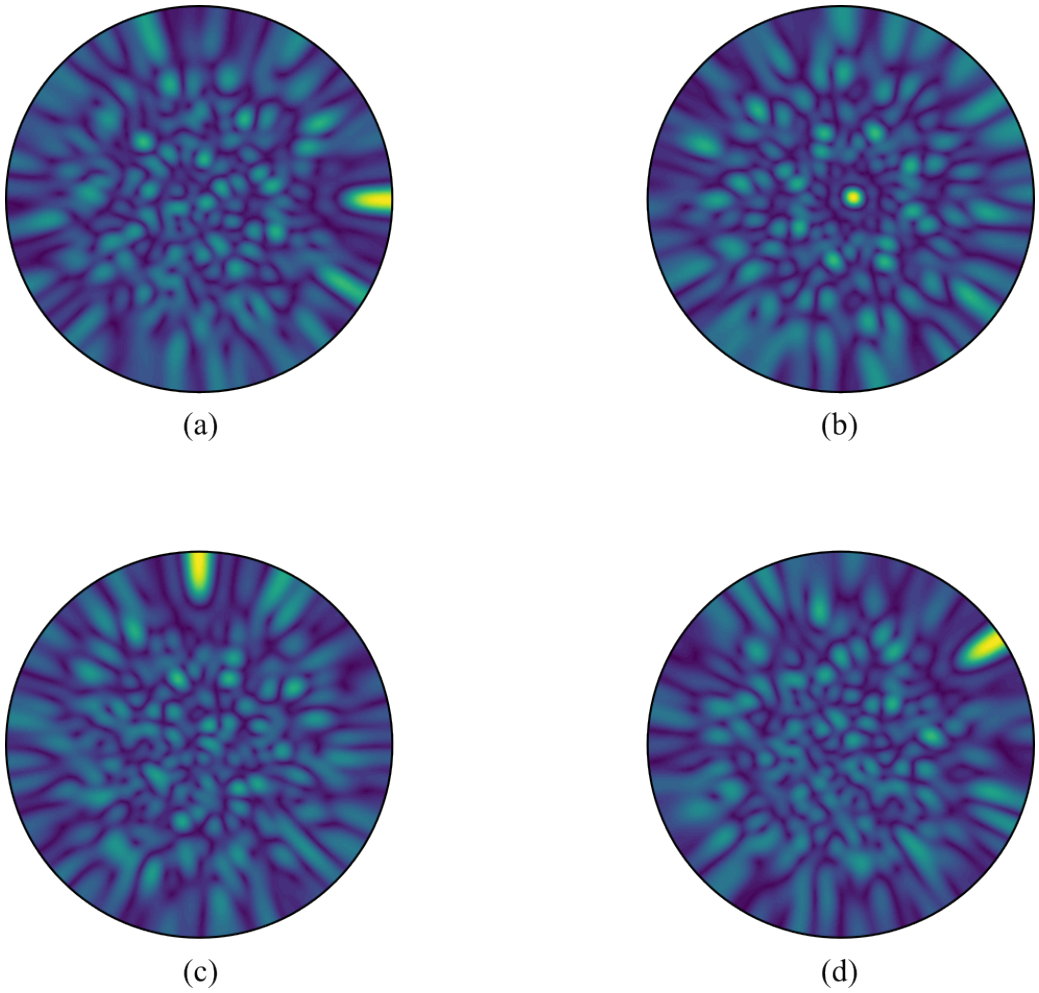


fonte: Produção da própria autora.

Após isso, para uma melhor compreensão, as subfiguras de (a) a (d) da Figura 15, foram analisadas de acordo com os PSLL calculados para cada uma delas e comparadas com a Figura 14. Dessa forma, para uma melhor visualização e compreensão da análise para cada região, a Figura 16 apresenta um exemplo do PSLL para cada uma das regiões (amarela, verde, azul claro e azul escuro). A partir dessa figura, pode-se observar que o PSLL está sendo bem calculado em cada região e, também, demonstra o motivo das regiões estarem na borda na imagem, pois o pico mais elevado foi encontrado nas bordas de cada região. Logo, pode-se concluir que o código calculou corretamente todas as regiões.

Inicialmente, a ideia era analisar o PSLL para um número maior de antenas e com diferentes separações entre os elementos, entretanto, devido ao alto custo computacional, não foi possível realizar essa análise, pois, para utilizar outros valores de λ, os lóbulos ficariam mais estreitos e, dessa forma, seria necessário utilizar mais pontos, ou seja, uma maior resolução, fazendo com que demorasse meses para serem calculados. Considerando isto, foi decidido diminuir o número de elementos para ver o comportamento do PSLL.

Figura 15 – PSLL para (a) $\phi_{BS} = 0$ e $\theta_{BS} = \pi/2$, (b) $\phi_{BS} = 0,1$ e $\theta_{BS} = 0,1$, (c) $\phi_{BS} = \pi/2$ e $\theta_{BS} = \pi/2$ e (d) $\phi_{BS} = 3 \cdot \pi/16$ e $\theta_{BS} = 5 \cdot \pi/2$.



fonte: Produção da própria autora.

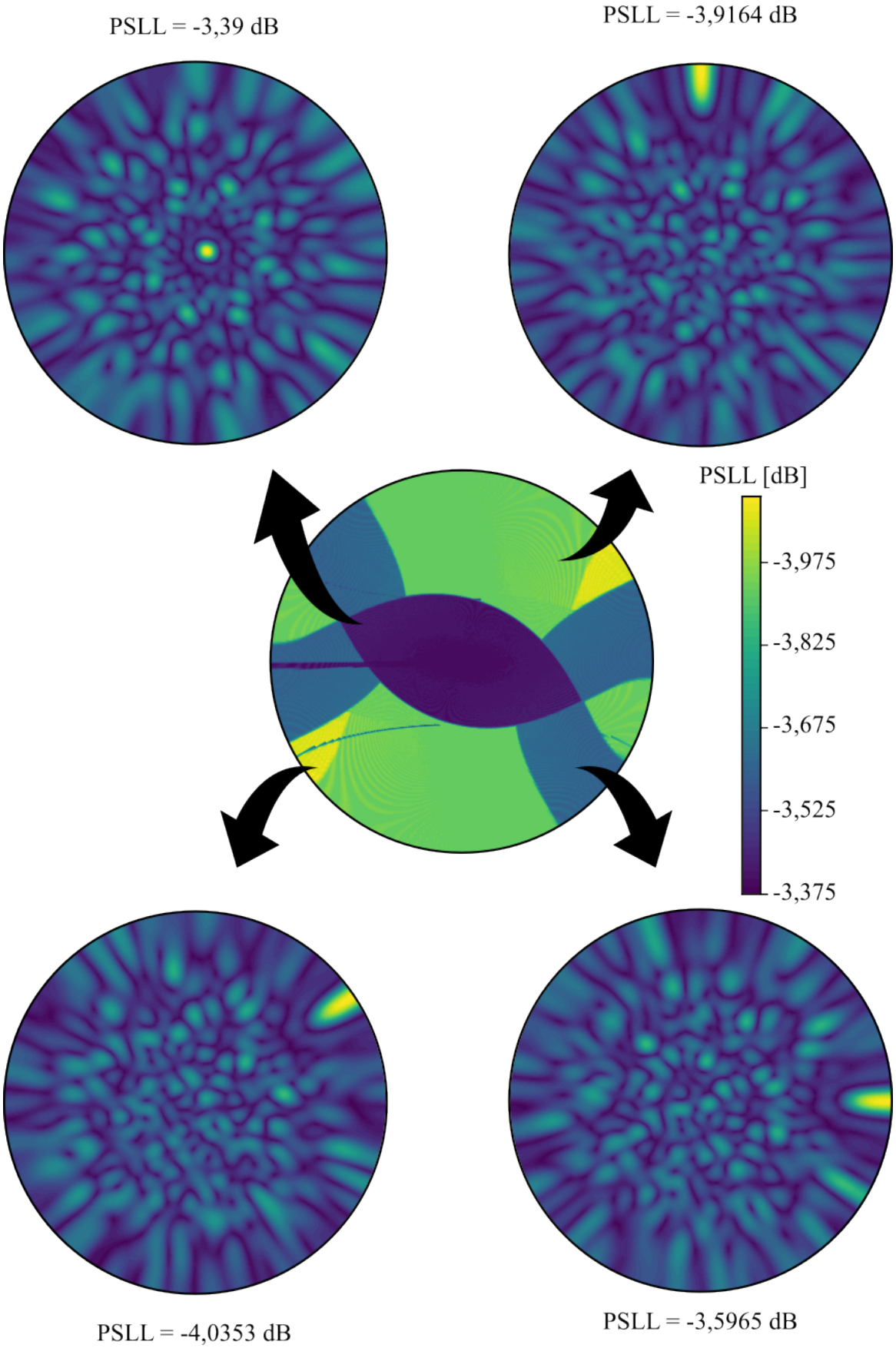
Sendo assim, a última análise realizada nesta pesquisa foi para observar o comportamento do PSLL quando o número de elementos diminui. Dessa forma, foi gerado outra figura utilizando o mesmo código das análises anteriormente alterando apenas de 16 elementos para 8 elementos com 501 pontos de resolução. O resultado gerado pelo código é apresentado na Figura 17. Nela podemos observar que ainda aparecem erros numéricos que não conseguiram ser eliminados, entretanto, pode-se visualizar que novamente tem-se quatro regiões bem definidas (amarela, verde, azul água e azul), sendo a região amarela a que possui menor PSLL. Além disso, esta figura apresenta resultados melhores do que a Figura 16, pois o melhor resultado, o menor PSLL representado pela cor amarela, está localizado no centro.

Como feito na análise anterior, foi realizado novamente uma análise para cada uma das regiões. Para isso, utilizou-se o mesmo código dito anteriormente para identificar o PSLL em cada uma das regiões por meio da seleeção de alguns pontos de *beam steering* Assim, foi necessário identificar essas áreas através da escolha de ϕ_{BS} e θ_{BS}. Logo, a primeira configuração utilizada foi de $\phi_{BS} = 0,1$ e $\theta_{BS} = 0,1$, gerando a Figura 18 (a) com PSLL = – $1,8029$, aproximadamente. Já a segunda configuração foi feita utilizado $\phi_{BS} = \pi/4$ e $\theta_{BS} = \pi/2$, gerando a Figura 18 (b) com PSLL = – $1,6572$, aproximadamente. Para a terceira configuração foi escolhido $\phi_{BS} = 3 \cdot \pi/4$ e $\theta_{BS} = \pi/2$, gerando a Figura 18 (c) com

PSLL = – $1,3283$, aproximadamente. E, a quarta configuração foi gerada com $\phi_{BS} = 5 \cdot \pi/3$ e $\theta_{BS} = 3 \cdot \pi/2$, gerando a Figura 18 (d) com PSLL = – $1,075$, aproximadamente.

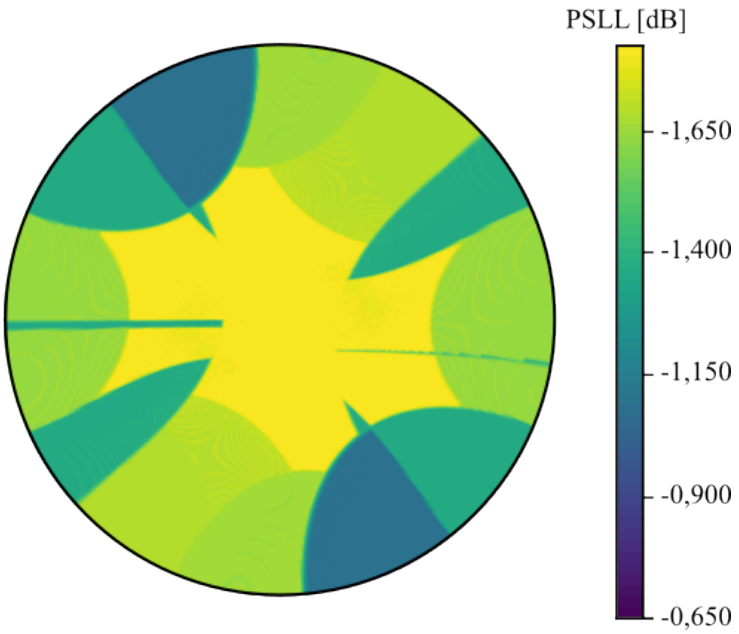
Novamente, para uma melhor visualização e compreensão do PSLL em cada área, as subfiguras da Figura 18 (a) a Figura 18 (d) apresentadas anteriormente foram analisadas de acordo com os PSLL calculados para cada área e comparadas com a Figura 17. Assim, para uma melhor visualização e compreensão da análise para cada região, a Figura 19 apresenta um exemplo do PSLL para cada uma das regiões (amarela, verde, azul água e azul). Dessa forma, pode-se visualizar mais uma vez que ao diminuir o número de elementos, os lóbulos secundários ficam mais intensos, gerando problemas discutidos anteriormente. Além disso, pode-se observar que o melhor PSLL continua sendo da região amarela, no centro da figura e, o pior é a região em azul, pois aparecem lóbulos secundários de alta intensidade.

Figura 16 – Análise do PSLL para as regiões amarela, verde, azul claro e azul escuro.



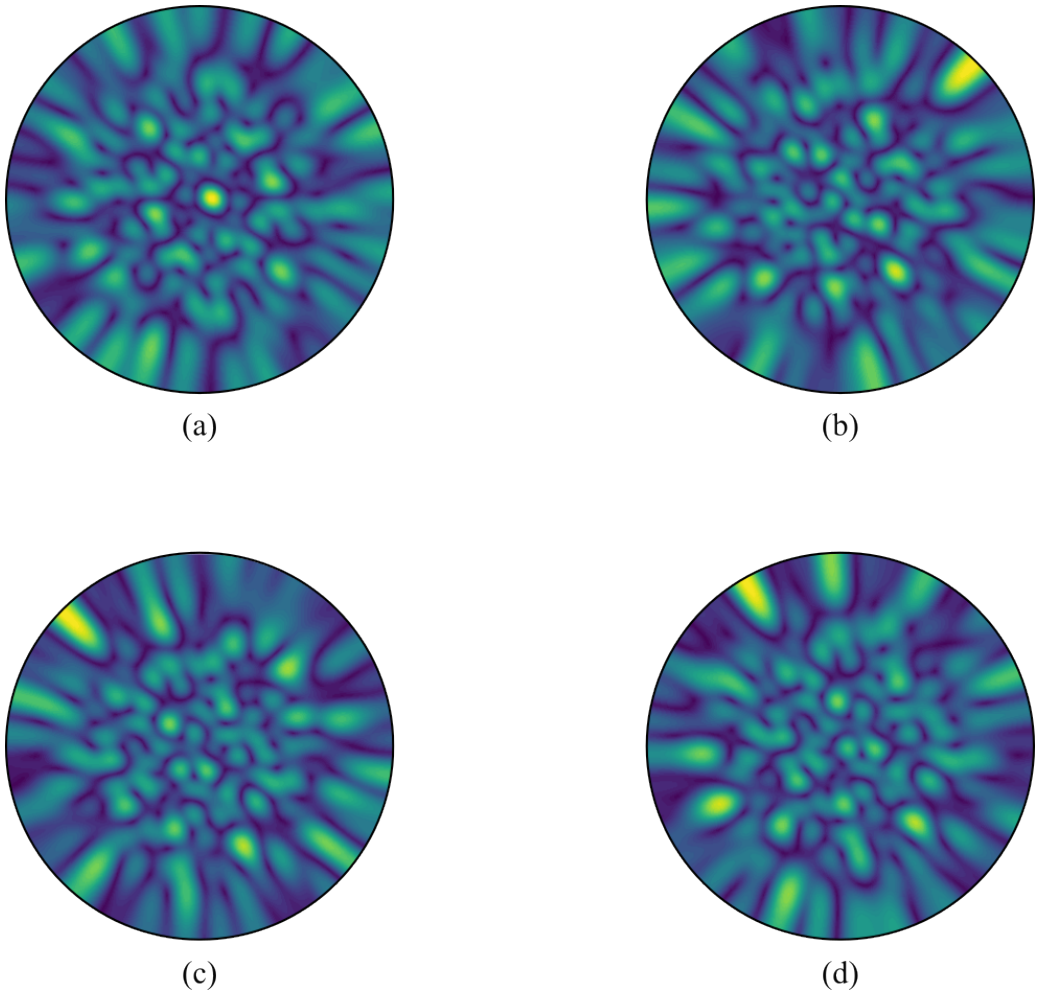
fonte: Produção da própria autora.

Figura 17 – Análise do código para 8 elementos e uma resolução de 501 pontos.



fonte: Produção da própria autora.

Figura 18 – PSLL para (a) $\phi_{BS} = 0,1$ e $\theta_{BS} = 0,1$, (b) $\phi_{BS} = \pi/4$ e $\theta_{BS} = \pi/2$, (c) $\phi_{BS} = 3 \cdot \pi/4$ e $\theta_{BS} = \pi/2$ e (d) $\phi_{BS} = 5 \cdot \pi/3$ e $\theta_{BS} = 3 \cdot \pi/2$.

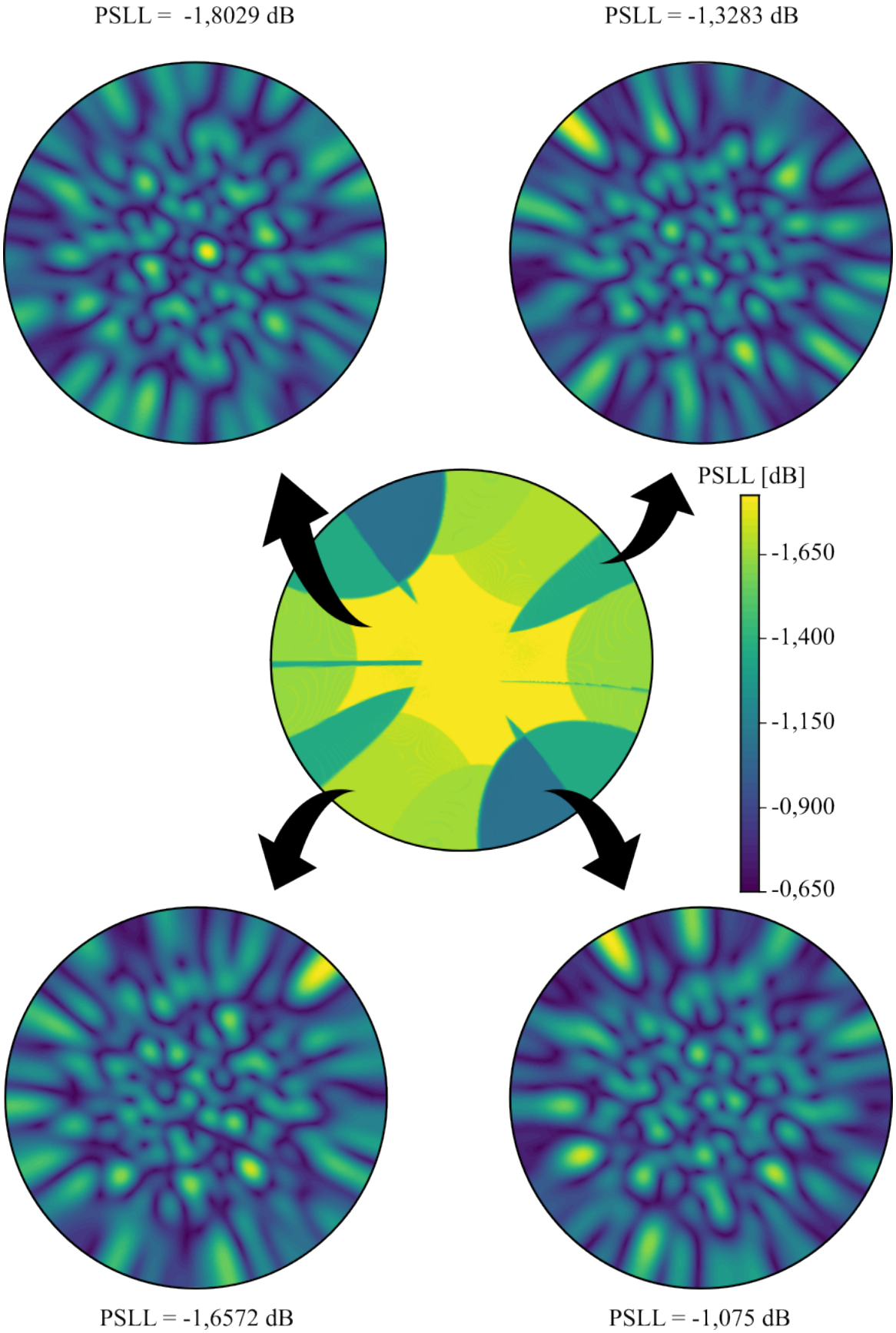


(a) (b)

(c) (d)

fonte: Produção da própria autora.

Figura 19 – Análise do PSLL para as regiões amarela, verde, azul água e azul.



fonte: Produção da própria autora.

4 CONCLUSÕES

Primeiramente, foi realizado um estudo que investigou o impacto do número de elementos, do espaçamento entre eles e do direcionamento do feixe no PSLL. Os resultados obtidos numericamente indicam que o PSLL tende a diminuir à medida que o número de elementos aumenta. No entanto, a variação na distância de separação entre os elementos, entre 0,5λ e 8λ, não exerce um efeito significativo no PSLL. No que diz respeito ao direcionamento do feixe, a avaliação numérica de arranjos com um ângulo de direcionamento de feixe de até 45° sugere que essa configuração permite o direcionamento do feixe sem degradar significativamente o valor do PSLL.

Em seguida, foi possível analisar o PSLL para diferentes números de elementos e de resoluções. O primeiro resultado obtido foi a partir da matriz de ângulos de feixe para $\theta = 64°$ e $\phi = 129°$. Entretanto, a primeira observação realizada foi que haviam erros numéricos e, ao direcionar para esses ângulos, o código não conseguiu identificar o pico do lóbulo. Por conta disso, foi necessário utilizar os ângulos θ_{BS} e ϕ_{BS}, fixando uma direção para que os problemas fossem solucionados. Após obter o segundo resultado, percebeu-se que os erros números no centro da imagem (o traço) continuaram aparecendo, porém, o resultado obtido demonstrou que os problemas anteriores foram solucionados mas havia um padrão ma figura que não era possível concluir se o problema era com o tipo de antena utilizada ou se era apenas uma baixa resolução. Dessa forma, foi necessário aumentar a resolução para determinar a causa real do problema. Logo, com o terceiro resultado para 16 antenas foi possível concluir que o problema era a resolução. Mesmo tentando solucionar o problema numérico, não foi possível eliminá-lo, logo, os ângulos com os erros matemáticos foram desconsiderados.

No planejamento inicial, haveria simulações para outros números de elementos e diferentes separações entre eles, porém, devido ao alto custo computacional demandado pelo código, não foi possível alterar a separação entre eles, pois os lóbulos iriam se estreitar e necessitaria de uma resolução ainda mais alta, sendo que com 501 pontos, o resultado gerado demorou mais de 4 semanas para ficar pronto. Dessa forma, para uma melhor análise do comportamento dessas antenas e do PSLL, o número de elementos foi diminuído para 8. Assim, o último resultado obtido foi o mais satisfatório pois era esperado que o melhor resultado ficasse no centro da figura, que é a região amarela, que possui o melhor PSLL. Além disso, demonstrou que o código está correto pois mostra que a região de menor PSLL, região azul, é realmente o pior resultado por apresentar lóbulos secundários de alta intensidade.

REFERÊNCIAS

ALÙ, A.; ENGHETA, N. Wireless at the nanoscale: optical interconnects using matched nanoantennas. **Physical review letters**, APS, v. 104, n. 21, p. 213902, 2010.

BALANIS, C. A. **Antenna theory: analysis and design**. [S.l.]: John wiley & sons, 2015.

BALANIS, C. A. **Antenna theory: analysis and design**. [S.l.]: John wiley & sons, 2016.

BALANIS, C. A.; IOANNIDES, P. I. **Introduction to smart antennas**. [S.l.]: Morgan & Claypool Publishers, 2007.

CARDOSO, R. S.; OLIVEIRA, L. P.; HERNANDEZ-FIGUEROA, H. E. Assessment of Fermat's spiral arrays for photonic dielectric antennas. In: IEEE. **2021 15th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)**. [S.l.], 2021. p. 1–4.

DU, K. et al. Design of a sparse array for a one-dimensional non-uniform optical phased array. **JOSA B**, Optica Publishing Group, v. 39, n. 4, p. 1141–1146, 2022.

GABRIELLI, L. H.; HERNANDEZ-FIGUEROA, H. E. Aperiodic antenna array for secondary lobe suppression. **IEEE Photonics Technology Letters**, IEEE, v. 28, n. 2, p. 209–212, 2015.

HANSEN, R. C. **Phased array antennas**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2009.

HECK, M. J. Highly integrated optical phased arrays: photonic integrated circuits for optical beam shaping and beam steering. **Nanophotonics**, De Gruyter, v. 6, n. 1, p. 93–107, 2017.

MAILLOUX, R. J. **Phased array antenna handbook**. [S.l.]: Artech House, 2017.

PETERSON, I. **Fermat's Natural Spirals**. 2005. Disponível em <https://www.sciencenews.org/article/fermats-natural-spirals>.

PITA, J. L. et al. Design of a compact cmos-compatible photonic antenna by topological optimization. **Optics express**, Optical Society of America, v. 26, n. 3, p. 2435–2442, 2018.

PITA, J. L. et al. Side-lobe level reduction in bio-inspired optical phased-array antennas. **Optics Express**, Optica Publishing Group, v. 25, n. 24, p. 30105–30114, 2017.

POULTON, C. et al. Coherent solid-state lidar with silicon photonic optical phased arrays. **Optics Letters**, Optical Society of America, v. 42, n. 20, p. 4091–4094, 2017.

SAUDI, E. et al. A hybrid technique linear sparse array antenna design approach. In: IEEE. **2015 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)**. [S.l.], 2015. p. 1–3.

SEGERMAN, H. The sunflower spiral and the Fibonacci metric. In: **Proceedings of Bridges 2010: Mathematics, Music, Art, Architecture, Culture**. [S.l.: s.n.], 2010. p. 483–486.

SOUZA, B. D. P. d. **Redução do nível de lóbulos laterais em arranjo de antenas 1D**. Dissertação (Mestrado) — Unesp, 2018.

VISSER, H. J. **Array and phased array antenna basics**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2006.

WUYTENS, P. C.; SKIRTACH, A. G.; BAETS, R. On-chip surface-enhanced raman spectroscopy using nanosphere-lithography patterned antennas on silicon nitride waveguides. **Optics Express**, Optica Publishing Group, v. 25, n. 11, p. 12926–12934, 2017.