

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA JÚLIO DE MESQUITA FILHO
CAMPUS DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

BRUNA DIAS PIRES DE SOUZA

**Diretrizes para redução do nível de lóbulo lateral em arranjos de antenas
ópticas lineares integradas**

São João da Boa Vista

2021

BRUNA DIAS PIRES DE SOUZA

**Diretrizes para redução do nível de lóbulo lateral em arranjos de antenas
ópticas lineares integradas**

Versão original

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - Campus de São João da Boa Vista para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Sinais e Comunicação

Orientador: Prof. Dr. Ivan Aritz Aldaya Garde

Coorientador: Prof. Dr. Rafael Abrantes Penchel

São João da Boa Vista

2021

S729d

Souza, Bruna Dias Pires de

Diretrizes para redução do nível de lóbulo lateral em arranjos de antenas ópticas lineares integradas / Bruna Dias Pires de Souza. -- São João da Boa Vista, 2021

61 f. : il., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Câmpus Experimental de São João da Boa Vista, São João da Boa Vista

Orientador: Ivan Aritz Aldaya Garde

Coorientador: Rafael Abrantes Penchel

1. Antenas (eletrônica). 2. Sistemas de comunicação sem fio. 3.

~~Comunicações ópticas. 4. Fotônica. I. Título.~~

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Câmpus Experimental de São João da Boa Vista. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

*Dedico este trabalho à minha avó, Luisa de Fátima Jesus Dias, que tão cedo nos deixou,
mas que está eternizada em nossos corações.*

Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, à Deus. Ao longo da minha vida Ele me apresentou com grandes oportunidades, me fazendo alcançar conquistas das quais jamais imaginaria desfrutar.

Agradeço à minha família, em especial aos meus pais, Eliseu e Glaucia, que desde criança me incentivaram a buscar meus sonhos e sempre me apoiaram nas minhas escolhas.

Agradeço à todos os professores que um dia passaram pelo meu caminho, desde a minha infância até este momento. Relato aqui minha profunda admiração por todos.

Por fim, agradeço imensamente aos meus orientadores, Prof. Dr. Ivan Aldaya e Prof. Dr. Rafael Penchel. Este trabalho, certamente, é fruto da dedicação dos senhores no meu aprendizado.

Gratidão por esse momento!

”Bem-aventurado o homem que acha sabedoria, e o homem que adquire conhecimento”.

(Provérbios 3:13)

Resumo

SOUZA, Bruna Dias Pires de. **Diretrizes para redução do nível de lóbulo lateral em arranjos de antenas ópticas lineares integradas**. 2021. 61 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual Paulista (UNESP), Campus Experimental de São João da Boa Vista, São João da Boa Vista, 2020.

Antenas ópticas têm atraído uma atenção cada vez maior nos últimos anos, devido às suas aplicações em áreas tão diversas como espectroscopia, comunicações ópticas e detecção e alcance de luz (LIDAR). Semelhante às homólogas de radiofrequência (RF), antenas de arranjo de fase óptica (OPA) foram propostas para melhorar as propriedades de radiação e, simultaneamente, alcançar o controle dinâmico do padrão de radiação. No entanto, em contraste com os arranjos de fase de RF, a maioria das OPAs estão sujeitas a restrições físicas, as quais limitam a distância mínima entre os elementos, o que levam a arranjos denominados esparsos. Este é o caso, por exemplo, de OPAs compatíveis com semicondutores de óxido metálico complementar (CMOS). Arranjos esparsos uniformemente distribuídos apresentam lóbulos laterais fortes que podem causar interferência severa ou até mesmo falhas de segurança. A fim de reduzir o nível do lóbulo lateral (SLL), a distribuição não uniforme dos elementos tem sido amplamente empregada. No entanto, a relação entre o número de elementos, o espaçamento mínimo entre os elementos e a faixa de direcionamento do feixe não foram analisadas sistematicamente em um arranjo esparsos linear sujeito a restrições físicas. Neste trabalho, primeiro foi analisado o efeito do direcionamento do feixe sobre o valor do SLL, mostrando que o SLL aumenta à medida que o feixe é apontado para direções distantes do *broadside*. Posteriormente, os arranjos foram otimizados com diferentes números de elementos, e distâncias médias e mínimas entre os elementos. Essas otimizações revelam vários pontos: primeiro, para a mesma distância média e separação mínima, a redução do SLL é mais proeminente à medida que o número de elementos aumenta. Em segundo lugar, o SLL é altamente dependente da relação entre a distância mínima e a média entre os elementos. Finalmente, quando as restrições físicas são impostas, há uma distância média entre os elementos ótima que resulta em um SLL menor.

Palavras-chaves: Arranjo óptico esparsos linear, nível de lóbulo lateral, direcionamento de feixe.

Abstract

souza, Bruna Dias Pires de. **Design guidelines for side-lobe level reduction in linear integrated optical phased arrays**. 2021. 61 p. Dissertation (Master of Electric Engineering) – São Paulo State University (UNESP), Campus of São João da Boa Vista, São João da Boa Vista, 2020.

Optical antennas has attracted an increasing attention in last years due to its applications in areas as diverse as spectroscopy, optical communications, and light detection and ranging (LIDAR). Similar to the radio-frequency (RF) counterparts, optical phase array (OPA) antennas has been proposed to improve radiation properties and simultaneously achieve dynamical control of the radiation pattern. However, in contrast to RF phased-arrays, most OPAs are subject to physical constraints that limit the minimum distance between elements leading to denominated sparse arrays. This is the case, for instance, of complimentary metal-oxide-semiconductor (CMOS)-compatible OPAs. Uniformly distributed sparse arrays present strong side lobes that may cause severe interference or even security faults. In order to reduce the side-lobe level (SLL), the non-uniform distribution of elements has been extensively employed. However, the relationship between the number of elements, the minimum inter-element spacing, and the beam steering range has not been systematically analyzed in a linear sparse array subject to physical constraints. In this work, we first analyze the effect of beam steering on the value of SLL, showing that the SLL increases as the beam is directed toward directions far from the broadside direction. Afterwards, we optimize arrays with different number of elements, and mean and minimum inter-element distances. These optimizations reveal several points: first, for the same mean and minimum separation, the SLL reduction is more prominent as the number of element increases. Second, the SLL is highly dependent on the relation between the minimum and the mean inter-element distance. Finally, when physical constraints are imposed, there is an optimum mean inter-element distance that result in lowest SLL.

Keywords: Optical sparse linear array, side lobe level, beam steering.

Lista de figuras

Figura 1 – Representação tridimensional de uma OPA (a) no plano ao lado do corte no plano azimutal do padrão de radiação e (b) fora do plano ao lado do corte no plano de elevação do padrão de radiação.	20
Figura 2 – Configuração dos elementos irradiantes incluindo os critérios para os ângulos de elevação e azimutal considerados e a representação gráfica da aproximação para campo distante.	29
Figura 3 – Direcionamento de feixe em antenas de arranjo por médio de controle das fases de alimentação.	30
Figura 4 – Corte do módulo do AF de um arranjo de antenas uniforme com espaçamento $d = \lambda/4$ entre os elementos, operando sob direcionamento de feixe em: (a) $\theta_{BS} = 90$, (b) $\theta_{BS} = 135$ e (c) $\theta_{BS} = 180$	31
Figura 5 – Corte do módulo do AF de um arranjo de antenas uniforme com espaçamento $d = \lambda$ entre os elementos, operando sob direcionamento de feixe em: (a) $\theta_{BS} = 90$, (b) $\theta_{BS} = 135$ e (c) $\theta_{BS} = 180$	32
Figura 6 – Interferência construtiva em diferentes direções dos campos de radiação de arranjos uniformes com elementos idênticos: (a) arranjo de antena compacto e (b) arranjo de antena esparso. O ângulo de elevação θ é referenciado a partir do eixo z.	32
Figura 7 – Aparecimento de lóbulos de grade em um arranjo de antenas uniforme com separação entre os elementos idênticos $d = \lambda/2$, operando (a) sem direcionamento de feixe, (b) sob direcionamento de feixe em $\pi/4$ e (c) sob direcionamento de feixe em $\pi/2$, ambos em relação ao eixo de referência, sob o qual os elementos estão dispostos.	34
Figura 8 – Esquema de um arranjo de antena esparso linear com representação ilustrativa do AF polar e cartesiana indicando a nomenclatura empregada.	35
Figura 9 – Fluxograma dos operadores do algoritmo DE	38
Figura 10 – Evolução da função de custo do melhor elemento da geração para cada subpopulação considerando um ângulo de direcionamento de feixe de 45° para um arranjo de (a) 4 elementos, (b) 8 elementos e (c) 16 elementos.	44

Figura 11 – (a) Posições dos elementos obtidas na otimização do arranjo de 8 elementos, com separação mínima de 2λ e distância média de 6λ , para ângulos de direcionamento de feixe de 90° , $67,5^\circ$ e 45° . (b) SLL em termos de ângulo de direcionamento de feixe, e (c-e) norma do AF em termos do ângulo de direcionamento de feixe e ângulo azimutal θ para os três casos otimizados.	46
Figura 12 – SLL em termos do ângulo de direcionamento de feixe de (a) 90° , (b) $78,75^\circ$, (c) $67,50^\circ$, (d) $56,25^\circ$ e (e) 45° para um arranjo de 8 elementos, com distância média entre os elementos de 4λ sem restrição física, e posteriormente com separação mínima de 2λ	48
Figura 13 – SLL em termos de distância média entre os elementos e faixa de direcionamento de feixe, retratado para diferentes números de elementos radiantes e diferentes distância mínima entre os elementos. (a-c) 4 elementos, (d-f) 8 elementos, e (g-i) 16 elementos, todos apresentados para distâncias mínimas de 1λ , 2λ e 3λ	50
Figura 14 – (a) Distância média ótima entre os elementos e (b) Valor do SLL obtido para as distâncias médias ótimas, para as diferentes combinações de número de elementos e distâncias mínimas de separação entre os elementos.	51
Figura 15 – SLL em termos do comprimento de onda de operação para (a) 4 elementos radiantes com distância mínima de 1λ e distância média ótima de $1,5\lambda$, (b) 8 elementos radiantes com distância mínima de 2λ e distância média ótima de 3λ e (c) 16 elementos radiantes com distância mínima de 3λ e distância média ótima de 5λ	52

Lista de tabelas

Tabela 1 – Parâmetros usados nas otimizações para avaliar o efeito dos parâmetros gerais da OPA.	42
---	----

Lista de abreviaturas e siglas

AF	Fator de Arranjo
CMOS	Semicondutor-Óxido-Metal Complementar
DE	Evolução Diferencial
FSOC	Comunicação Óptica no Espaço Livre
LAN	Rede de Área Local
LIDAR	Detecção e Alcance de Imagem a Laser
LOS	Linha de Visada
OPA	Arranjo de Antena Óptica
RADAR	Detecção e Alcance de radio
RF	Radio Frequência
SLL	Nível de Lóbulo Lateral

Sumário

1	Introdução	14
1.1	<i>Arranjos de Antenas Fotônicas Esparsos</i>	14
1.1.1	Definições de Antenas Fotônicas	14
1.1.2	Tipos de Antenas Fotônicas	15
1.1.3	Aplicações de Antenas Fotônicas	17
1.1.4	Arranjo de Antenas Fotônicas	18
1.1.5	Redução de Lóbulos Laterais em Arranjos Esparsos	21
1.1.6	Definição do Problema e Objetivos	21
1.2	<i>Métodos para Redução dos Lóbulos Laterais em Arranjos Esparsos . .</i>	22
1.2.1	Otimização das Posições dos Elementos em Arranjos Esparsos Lineares	22
1.2.2	Análise dos Efeitos dos Parâmetros de Arranjo no SLL	25
1.3	<i>Contribuições</i>	26
1.4	<i>Organização do trabalho</i>	27
2	Arranjos Esparsos e Lóbulos de Grade	28
2.1	<i>Princípio de Multiplicação de Padrão e Fator de Arranjo</i>	28
2.2	<i>Direcionamento de feixe</i>	29
2.3	<i>Arranjos uniformes</i>	31
2.4	<i>Supressão de lóbulos de grade mediante posicionamento não uniforme</i>	34
3	Evolução Diferencial para Posicionamento dos Elementos de Antena em Arranjos Esparsos Lineares	36
3.1	<i>Métodos de Otimização e Justificativa de Evolução Diferencial</i>	36
3.2	<i>Otimização por Evolução Diferencial</i>	38
3.3	<i>Otimização das Posições dos Elementos de Antena</i>	40
3.3.1	Parâmetros de Controle e Gerais e Variáveis de Otimização	40
3.3.2	Função de Custo	40
3.3.3	Restrições de Otimização	41
3.3.4	Condição de Parada	41
3.4	<i>Configuração das Otimizações</i>	42

4	Resultados	45
4.1	<i>Efeito do Direcionamento de Feixe no SLL</i>	45
4.2	<i>Efeito da Restrição Física no SLL</i>	47
4.3	<i>Efeito dos Parâmetros Gerais da OPA no SLL</i>	47
4.4	<i>Análise de Varredura de Frequência</i>	51
5	Considerações Finais	53
	Referências	54

1 Introdução

Neste primeiro Capítulo inicialmente, na Seção 1.1, será apresentado o problema de pesquisa abordado nesta dissertação. Na Seção 1.2 será apresentada uma revisão bibliográfica descrevendo os principais métodos utilizados para otimizar as posições dos elementos em arranjos esparsos, assim como as principais conclusões destes trabalhos. As principais contribuições do presente trabalho são apresentadas na Seção 1.3 e, finalmente, na Seção 1.4 é descrita a organização do trabalho.

1.1 *Arranjos de Antenas Fotônicas Esparsos*

1.1.1 Definições de Antenas Fotônicas

Conforme a carta escrita por Edward Hutchison Synge destinada a Albert Einstein, o primeiro registro de um experimento de propagação de luz em escala nanométrica foi realizado em abril de 1928 (SYNGE, 1928). Em sua carta, Synge descreve um método microscópio no qual o campo espalhado a partir de uma nanopartícula metálica poderia ser usado como fonte de luz. Nesse experimento, a partícula converteria a radiação óptica de propagação no espaço livre em um campo localizado que interagiria com uma superfície de amostra (BHARADWAJ; DEUTSCH; NOVOTNY, 2009), fazendo com que a nanopartícula funcionasse como uma antena óptica. Assim como neste experimento, nos primeiros trabalhos realizados na área a definição comumente adotada para antenas fotônicas é de um dispositivo que concentra a luz, a fim de obter alta intensidade de luz em uma pequena área (FISCHER; POHL, 1989; MALMQVIST; HERTZ, 1994; INOUE; KAWATA, 1994).

Posteriormente, as antenas fotônicas passaram a ser estudadas para aplicações mais semelhantes das antenas que operam em Rádio Frequência (RF), onde adotou-se uma definição alternativa. Nesta, uma antena fotônica é considerada um dispositivo de interface entre um meio guiado e um meio não guiado (WESSEL, 1985). Ambas as definições de antenas fotônicas são amplamente aceitas pela comunidade. Porém neste trabalho, foi considerada a segunda, a qual é mais consistente com a definição geralmente utilizada em sistemas de telecomunicações (BALANIS, 2005).

As antenas fotônicas operam em frequências compreendidas na faixa visível ou infravermelho do espectro eletromagnético e por isso, esses dispositivos são também denominados de antenas ópticas. Em termos de frequência, a faixa de operação das antenas fotônicas se estende de 300 GHz à 750 THz, o que corresponde a uma faixa de comprimentos de onda entre 1 mm e $0,4 \mu\text{m}$ ¹. Por ter uma frequência de operação muito maior, as antenas fotônicas geralmente apresentam uma banda significativamente maior e um tamanho consideravelmente menor do que as antenas operando a frequências de RF, fazendo deste tipo de antenas uma opção atrativa para sistemas de banda larga compactos.

1.1.2 Tipos de Antenas Fotônicas

As primeiras antenas fotônicas foram implementadas em metal por suportarem ressonâncias plasmônicas (OZBAY, 2006; KRASNOK *et al.*, 2012; BHARADWAJ; DEUTSCH; NOVOTNY, 2009). Em particular, a primeira nano antena foi construída com ouro (WESSEL, 1985). Contudo, as antenas metálicas apresentaram grandes problemas ao operarem em frequências ópticas. Um dos principais desafios são as perdas ôhmicas. A condutividade dos materiais metálicos diminui ao aumentar a frequência, fazendo com que o metal utilizado não possa ser considerado um bom condutor elétrico, o que afeta drasticamente a resposta das antenas ópticas nanométricas (OZBAY, 2006). Além disso, a dificuldade na rede de alimentação e a dependência significativa do padrão de radiação com o comprimento de onda também comprometem a eficiência das nano antenas metálicas operando em frequências ópticas (BHARADWAJ; DEUTSCH; NOVOTNY, 2009).

Como alternativa às antenas metálicas no domínio óptico, surgiram as antenas completamente dielétricas (SUN *et al.*, 2013). Os materiais dielétricos apresentam duas grandes vantagens quando comparados aos metálicos na banda de frequências ópticas. Primeiro, as perdas são menores, e segundo, a alimentação pode conseguir um casamento de impedância mais eficiente. Dentre os materiais dielétricos, o silício é particularmente atrativo para antenas fotônicas. Devido a sua compatibilidade com a tecnologia de processamento padrão de semicondutor-óxido-metal complementar (CMOS - *Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*), a fotônica de silício pode se beneficiar de toda a infraestrut-

¹ Vale ressaltar que não significa que uma antena em particular tenha essa banda de operação, mas que antenas com as suas bandas de operação compreendidas nessa faixa são consideradas antenas fotônicas.

tura de fabricação já consolidada. Além disso, os dispositivos ópticos podem ser integrados diretamente nos circuitos eletrônicos na mesma plataforma, facilitando o processamento de dados (RUIZ *et al.*, 2018).

As antenas ópticas integradas podem ser divididas conforme a direção em que apresentam a máxima transmissão de energia, isto é o lóbulo principal. Assim podemos distinguir o acoplamento no plano e o acoplamento fora do plano (CHROSTOWSKI; HOCHBERG, 2015). No método de acoplamento no plano, o lóbulo principal está orientado em um plano paralelo ao plano do substrato. Esse método só pode ser implementado na borda do dispositivo óptico e, por isso, é também conhecido como acoplamento de borda. Essa forma de acoplamento da luz entre os dispositivos ópticos possui alta eficiência de acoplamento, permite uma grande largura de banda e é pouco sensível à polarização da luz. As principais desvantagem são a baixa tolerância ao desalinhamento entre os dispositivos acoplados, e a limitada flexibilidade por estar localizado na borda do chip. Além disso, essa solução necessita de um cuidadoso pós processamento, como corte e polimento de alta precisão (KASAYA *et al.*, 1993; MITOMI; KASAYA; MIYAZAWA, 1994; DOYLEND; KNIGHTS, 2006; YANG *et al.*, 2009).

No método de acoplamento fora do plano, também chamado de acoplamento de superfície, o lóbulo principal é orientado em um plano ortogonal ao do substrato, com direção inclinada em relação ao substrato. Esse método permite que o dispositivo óptico possa ser implementado em qualquer posição no chip e, por isso, é mais flexível do que o acoplamento no plano. Outra vantagem do acoplamento fora do plano é que não necessita de pós-processamento². Dentre as desvantagens deste método estão a largura de banda mais estreita, a sensibilidade ao estado de polarização da luz e sua menor eficiência (VIVIEN *et al.*, 2006; ACOLEYEN *et al.*, 2009; HECK, 2017). O maior desafio deste tipo de antenas é conseguir mudar a direção da onda incidente no guia de alimentação de forma eficiente. A fim de solucionar este problema existem diversas alternativas, a maioria baseada em grades com períodos menores que o comprimento de onda de operação (TAILLAERT; BOGAERTS; BAETS, 2003; HALIR *et al.*, 2013). Nestas antenas, uma grade de difração é projetada para que todas as contribuições de espalhamento do sinal se interferiram construtivamente na direção desejada.

² Alguns grupos usam pós-processamento para melhorar as propriedades de radiação, mas geralmente não precisam.

Resumindo, a forma mais direta de implementar uma antena é utilizando acoplamento no plano. Porém, ocasionalmente, os requerimentos particulares de uma aplicação específica faz com que o uso de acoplamento fora do plano seja mais factível ou a única possibilidade.

1.1.3 Aplicações de Antenas Fotônicas

Nos últimos anos, as antenas fotônicas tem sido amplamente estudadas devido ao seu papel crítico em aplicações que vão desde espectroscopia (LANGGUTH *et al.*, 2017) e comunicações em espaço livre (ALÙ; ENGHETA, 2010; DING *et al.*, 2015) à detecção e alcance de imagens a laser (LIDAR - *Laser Imaging Detection and Ranging*) (PHARE *et al.*, 2018). Nesta seção serão brevemente tratadas as aplicações mais comuns em que as antenas ópticas desempenham um papel importante e crescente.

A espectroscopia trata da análise do domínio da frequência, geralmente aplicada ao estudo de materiais (HATAB *et al.*, 2010). A fim de atingir a resolução ou sensibilidade requerida (AHMED *et al.*, 2012), as antenas fotônicas desempenham, basicamente, dois papéis dentro da espectroscopia. Por um lado, uma das funções consiste em iluminar uma área bem definida, o que permite ter uma boa resolução espacial. Por outro lado, as antenas fotônicas são usadas, na espectroscopia linear e não-linear, para aumentar a intensidade com que a amostra é iluminada (WUYTENS; SKIRTACH; BAETS, 2017). No caso linear, o aumento da intensidade da luz melhora a relação sinal ruído. No caso não-linear, por exemplo na espectroscopia estimulada Raman, são necessárias altas intensidades de luz, o que pode ser atingido aumentando a potência total radiada, ou reduzindo a área de radiação por meio da utilização de uma antena fotônica (FROMM *et al.*, 2006).

As comunicações ópticas no espaço livre (FSOC - *Free Space Optical Communications*) são sistemas de transmissão de dados por propagação da luz no espaço livre³ em linha de visada (LOS - *Line of Sight*) (MALIK; SINGH, 2015). Os sistemas FSOC consistem em transceptores ópticos, os quais podem ser integrados se tornando uma solução em escala de chip. A alta direcionalidade dos feixes ópticos garante uma comunicação mais segura com relação às tecnologias de transmissão RF e reduz o efeito da interferência eletromagnética (POULTON *et al.*, 2017a). Os sistemas FSOC também possuem a vantagem de ter alta

³ Apesar dos sistemas FSOC não operarem estritamente no espaço livre mas na atmosfera, o termo FSOC é amplamente adotado.

largura de banda e de não necessitar de licença de espectro. Como desvantagem, os sistemas FSOC possuem alta dependência das condições climáticas do meio em que são aplicados. Por exemplo, chuva, névoa ou turbulências atmosféricas podem afetar drasticamente o desempenho da comunicação (FADHIL *et al.*, 2013), fazendo com que o alcance do sinal transmitido sofra variações de centenas de metros até alguns quilômetros. A comunicação FSOC possui diversas aplicações (WILLEBRAND; GHUMAN, 2001), como o acesso na última milha e a extensão de redes metropolitanas. Dado o custo de instalação da fibra óptica, sistemas FSOC são utilizados como alternativa para facilitar a conexão de novas redes. Outro exemplo é a utilização de FSOC em conectividades corporativas. A facilidade de instalação deste sistema favorece a interconexão de segmentos de redes de área locais (LAN - *Local Area Network*).

A tecnologia LIDAR também é uma aplicação das antenas fotônicas bastante relevante. Usando o mesmo princípio de detecção e alcance de rádio (RADAR - *Radio Detection and Ranging*), o LIDAR é um sistema de medição capaz de detectar e localizar objetos usando a luz de um laser (BAUHAHN; FRITZ; KRAFTHEFER, 2009). As antenas fotônicas são usadas para direcionar o feixe na direção desejada fazendo uma varredura para obter um mapa tridimensional da superfície do alvo a detectar (BHARADWAJ; DEUTSCH; NOVOTNY, 2009). Devido ao comprimento de onda das frequências ópticas, o LIDAR oferece uma faixa maior de operação do que o RADAR, além de poder proporcionar melhor resolução e apresentar maior imunidade a interferências eletromagnéticas. Nas tecnologias mais recentes de veículos autônomos e robóticas, o LIDAR tem sido amplamente aplicado (POULTON *et al.*, 2017b). Outra aplicação potencial do LIDAR é em aeronaves, onde, dentre as inúmeras possibilidades, o LIDAR pode ser utilizado para identificar a altura da aeronave em relação ao solo ou evitar colisões (BAUHAHN; FRITZ; KRAFTHEFER, 2009). Todavia, ainda há alguns desafios relacionados às dimensões físicas, custo e estabilidade de fabricação para que essa tecnologia se torne comercializável (MALHOITRE *et al.*, 2018).

1.1.4 Arranjo de Antenas Fotônicas

Um arranjo de antena é formado por um conjunto de antenas operando de forma coerente. No arranjo, as antenas são usualmente chamadas de elementos irradiantes, os quais combinados formam uma única configuração elétrica e geométrica (BALANIS, 2016).

Assim como no domínio RF, o uso de arranjos de antenas ópticas (OPAs - *Optical Phased Arrays*⁴) tem sido proposto para melhorar as características de radiação e permitir o controle dinâmico do diagrama de radiação (MCMANAMON *et al.*, 1996).

Um caso particular de controle dinâmico do diagrama de radiação é o denominado direcionamento de feixe (tradução do inglês *beam steering*). No direcionamento de feixe as fases de alimentação dos diferentes elementos são controladas de forma que os campos emitidos por estes se somem em fase na direção desejada. Em OPAs, as fases de alimentação são controladas usando deslocares de fase que podem ser implementados de diferentes formas. Um dos mecanismos mais amplamente utilizado é o efeito de dispersão de plasma em que o índice de refração de um segmento de guia pode ser modulado por meio da concentração de portadores (PÉREZ-GALACHO *et al.*, 2016). O efeito termo-óptico também tem sido bastante utilizado como mecanismo para deslocar a fase do sinal de alimentação dos elementos (SUN *et al.*, 2013). Ainda outras técnicas mais sofisticadas tem sido propostas e analisadas, como por exemplo, o uso de micro-discos (CARDENAS *et al.*, 2010) e a exploração de efeitos paramétricos em guias de silício (DAI *et al.*, 2009).

A configuração geométrica é um fator determinante ao se projetar um arranjo de antena. As duas principais configurações geométricas mais exploradas na literatura são a linear e a planar. Uma antena de arranjo linear tem uma geometria unidimensional, onde todos os elementos são dispostos ao longo de um único eixo. Já o arranjo planar possui uma configuração bidimensional, com os elementos dispostos em um plano. Comparando as duas configurações, os arranjos lineares apresentam menor complexidade de implementação, possuem uma rede de alimentação, em geral, mais simples e eficiente, e precisam de um menor número de elementos (GROSS; VOLAKIS, 2005; YOSHIMOTO; HECKLER, 2019). Além disso, algumas aplicações requerem a varredura do feixe. Dessa forma, os arranjos lineares tem uma grande área de aplicação, e neste trabalho o estudo foi limitado ao caso destes arranjos. Considerando o caso de antenas fotônicas implementadas em fotônica integrada, pode-se identificar duas arquiteturas: a Figura 1(a) mostra um exemplo de uma OPA linear com emissão no plano, e a Figura 1(b) mostra uma OPA linear composta por elementos irradiantes baseados em grades com emissão fora do plano.

Além da configuração dos elementos em arranjos lineares ou planares, outro fator que afeta significativamente a forma do diagrama de radiação da antena de arranjo é a

⁴ Na literatura podem-se encontrar diversas formas de denominar os arranjos de antenas ópticas. Por analogia com as antenas de RF, um termo amplamente utilizado é OPA.

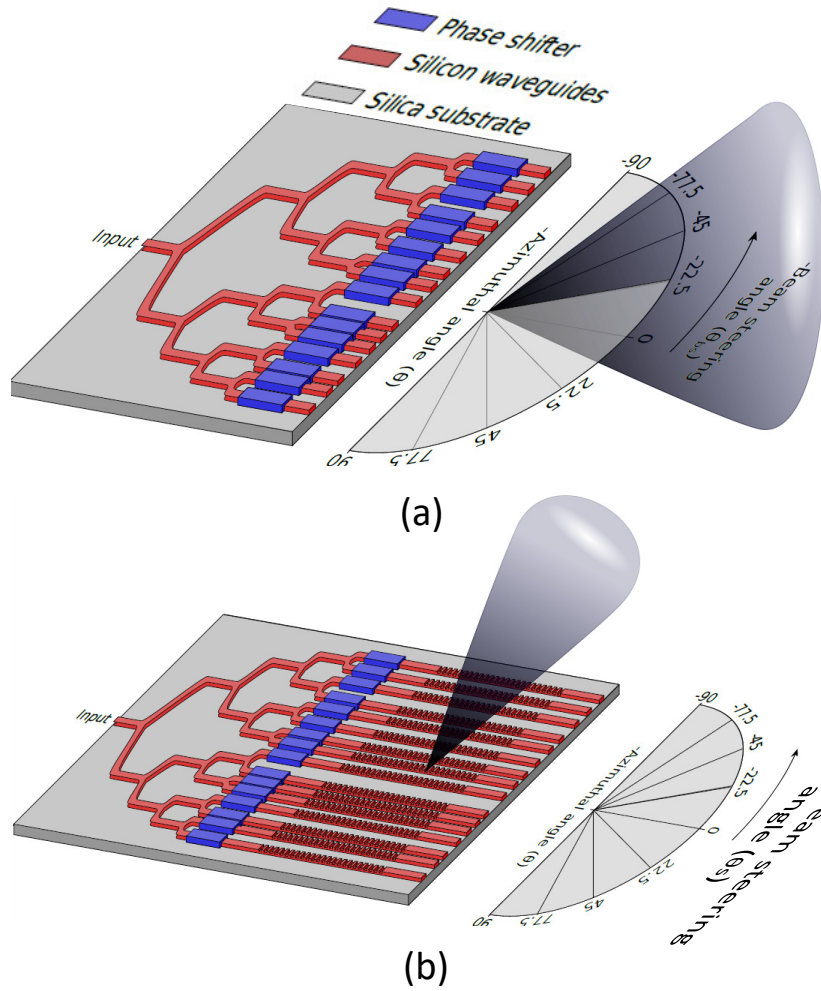


Figura 1 – Representação tridimensional de uma OPA (a) no plano ao lado do corte no plano azimutal do padrão de radiação e (b) fora do plano ao lado do corte no plano de elevação do padrão de radiação.

separação entre os elementos. Este fator é particularmente importante em OPAs integrados por dois motivos (PITA *et al.*, 2017): por um lado, os elementos irradiantes geralmente tem dimensões que excedem amplamente o comprimento de onda de operação. Por outro lado, se a rede de alimentação é implementada no mesmo nível que os elementos radiantes, a separação mínima entre os elementos pode ser ainda maior do que a limitação imposta pelo tamanho dos elementos irradiantes. Consequentemente, a distância mínima entre os elementos irradiantes é geralmente de alguns comprimentos de onda, λ .

1.1.5 Redução de Lóbulos Laterais em Arranjos Esparsos

Os arranjos em que os elementos irradiantes estão espaçados com uma distância mínima de $\lambda/2$ são conhecidos como arranjos esparsos. Como será apresentado no Capítulo 2, os arranjos esparsos apresentam lóbulos secundários de alta intensidade quando os elementos são dispostos de forma uniforme, isto é, quando a separação entre elementos é a mesma. Estes lóbulos secundários, denominados de lóbulos de grade, são extremamente críticos nos sistemas de comunicações, pois representam uma grande perda de eficiência, além de causarem interferência, diafonia e falhas de segurança, uma vez que o sinal é transmitido para direções não desejadas. A solução mais amplamente adotada para suprimir estes lóbulos de grade é a disposição não uniforme dos elementos. Porém, a seleção das posições ótimas dos elementos para a redução do nível de lóbulos laterais (SLL - *Side Lobe Level*) em arranjos esparsos representa um problema complexo que, como será visto na seção seguinte, tem sido amplamente estudado. Mesmo que grande parte dos trabalhos não considerem antenas fotônicas, mas antenas de RF, ou até arranjos de microfones, do ponto de vista matemático o problema constituído é similar. Consequentemente, os métodos de otimização das posições dos elementos em arranjos esparsos genéricos podem ser *a priori* aplicados às OPAs.

1.1.6 Definição do Problema e Objetivos

O uso de métodos de otimização para obter as posições ótimas do arranjo, assim como a determinação dos algoritmos mais eficientes para esta aplicação, são, certamente, problemas de pesquisa importantes a serem explorados. Contudo, outra questão igualmente relevante que este trabalho busca explicar é a dependência do SLL com os parâmetros estruturais do arranjo (número de elementos e distâncias médias e mínimas entre elementos), e com o ângulo de direcionamento de feixe. Neste sentido, formula-se a pergunta de pesquisa nos seguintes termos: qual é o comportamento do SLL em função do número de elementos, distâncias médias e mínimas entre elementos, e do ângulo de direcionamento de feixe? Baseado nessa problemática foram construídas as seguintes hipóteses:

1. A otimização da posição dos elementos em arranjos esparsos na redução do SLL depende do ângulo de direcionamento de feixe;

2. Restringindo a distância mínima entre os elementos do arranjo existe uma distância média ótima;
3. Aumentando o comprimento de onda o valor do SLL diminui (dimensões físicas constantes).

Será considerada a faixa de direcionamento de feixe entre 90° e 45° , partindo do *broadside*, a fim de satisfazer os requisitos de uma ampla gama de aplicações. Cabe enfatizar que, em princípio, a escolha do método de otimização é indiferente para abordar tal questão.

Dessa forma, os objetivos desse trabalho consiste em:

- Analisar e entender melhor o efeito do direcionamento de feixe no SLL em arranjos não uniformes com as restrições aplicadas;
- Quantificar o efeito da distância mínima no SLL;
- Encontrar a distância média ótima para os arranjos propostos; e
- Analisar a dependência do SLL com o comprimento de onda.

1.2 Métodos para Redução dos Lóbulos Laterais em Arranjos Esparsos

Nesta seção serão revisados os diferentes métodos disponíveis na literatura para otimizar as posições dos elementos em arranjos de antenas esparsos, identificando quais consideram operação de direcionamento de feixe e distância mínima entre os elementos. Posteriormente, será discutido as diferentes conclusões que deriva de cada trabalho em relação ao efeito dos parâmetros do arranjo.

1.2.1 Otimização das Posições dos Elementos em Arranjos Esparsos Lineares

Tanto métodos determinísticos como estocásticos tem sido empregados para otimizar a posição dos elementos de antenas em arranjos esparsos. A Tabela 1.1. lista alguns dos trabalhos mais significativos, os quais são discutidos a seguir.

Entre os trabalhos propondo o uso de algoritmos determinísticos cabe citar (CARATELLI; VIGANÓ, 2011) e (SUÁREZ *et al.*, 2012), que utilizam a discretização da integral de radiação para achar as posições dos elementos. Em (SUÁREZ *et al.*, 2012) um SLL de -8 dB é atingido quando o feixe está orientado na direção *broadside*. Em (SANDI; ZULKIFLI; RAHARDJO, 2016) também é utilizado um método determinístico de otimização, onde

partindo de um arranjo uniforme, alguns dos elementos são suprimidos para reduzir o SLL. Neste caso se atingiu um SLL de -13,6 dB, também na direção *broadside*. Outro método determinístico é proposto em (SOUZA *et al.*, 2018), mas neste caso é considerada uma separação entre elementos que aumenta geometricamente, sendo a razão da progressão um parâmetro que pode ser otimizado por busca exaustiva. Com esse método se atingiu uma redução em torno de 5 dB para arranjos operando sob altos ângulos de direcionamento de feixe, onde os feixes são orientados até a direção *end-fire*. Estes métodos determinísticos apresentam um custo computacionalmente baixo mas resultam em desempenhos relativamente baixos. Além disso, é importante ressaltar que, com exceção de (SOUZA *et al.*, 2018), os citados métodos determinísticos não podem considerar uma distância mínima entre os elementos e, conseqüentemente, não são os mais apropriados para projetar OPAs.

Tabela 1.1. Métodos de otimização da posição dos elementos em arranjos esparsos.

Autores	Técnica utilizada	Direcionamento de feixe	Limitações físicas
(CARATELLI; VIGANÓ, 2011)	Discretização da integral de radiação	×	×
(SUÁREZ <i>et al.</i> , 2012)	Discretização da integral de radiação	×	✓
(SANDI; ZULKIFLI; RAHARDJO, 2016)	Conjuntos de Diferença Cíclica	×	×
(SOUZA <i>et al.</i> , 2018)	Espaçamento por progressão geométrica	✓	×
(TRUCCO; MURINO, 1999)	Anelamento	×	✓
(KHODIER; CHRISTODOULOU, 2005)	Enxame de Partículas	×	×
(ZHANG; ZHANG, 2017)	Enxame de Partículas	×	×
(BRAY <i>et al.</i> , 2002)	Algoritmo Genético	✓	✓
(BAROTT; STEFFES, 2008)	Algoritmo Genético	✓	✓
(HAWES; LIU, 2012)	Algoritmo Genético	×	✓
(HAWES; LIU, 2014a)	Algoritmo Genético	×	✓
(HAWES; LIU, 2014b)	Algoritmo Genético	✓	×
(RAJI; ZHAO; MONDAY, 2019)	Algoritmo Genético	×	×
(LI; REN; GUO, 2020)	Algoritmo Genético	×	×
(LI <i>et al.</i> , 2020)	Algoritmo Genético	✓	×
(GOUDOS <i>et al.</i> , 2011)	Evolução Diferencial	×	✓
(ZHANG; JIA; YAO, 2013)	Evolução Diferencial	×	×
(WANG <i>et al.</i> , 2018)	Evolução Diferencial	×	✓

Diferentes métodos estocásticos tem sido propostos e analisados a fim de achar as posições dos elementos para otimizar o SLL. Pode-se citar, por exemplo, (TRUCCO; MURINO, 1999), onde a simulação de anelamento é proposta, atingindo um SLL de -14.45 dB na direção *broadside*. Otimização por enxame de partículas, tanto a versão original (KHODIER; CHRISTODOULOU, 2005) como a versão modificada (ZHANG; ZHANG, 2017), também foram utilizadas para otimizar as posições dos elementos em arranjos esparsos. Na versão original, atingiu-se uma supressão de -5 a -7 dB do SLL convencional. A otimização baseada em algoritmos genéticos tem atraído uma atenção significativa na comunidade. Por exemplo, em (BRAY *et al.*, 2002), (BAROTT; STEFFES, 2008) e (HAWES; LIU, 2012) algoritmos genéticos clássicos são utilizados, enquanto que em (HAWES; LIU, 2014a) e (HAWES; LIU, 2014b) este algoritmo é empregado em combinação com amostragem compressiva e em (RAJI; ZHAO; MONDAY, 2019) e (LI; REN; GUO, 2020) a otimização baseada em algoritmo genético é aprimorada usando funções de Green e explorando a convexidade da função de objetivo, respectivamente. Em (BRAY *et al.*, 2002) obteve-se uma redução de -10 dB com o lóbulo principal orientado a 60° da direção *broadside*. Finalmente, Evolução Diferencial (DE - *Differential Evolution*) tem emergido como alternativa aos algoritmos genéticos. Em (GOUDOS *et al.*, 2011), o desempenho da otimização por algoritmo genético e DE é comparada, concluindo que esta última apresenta um desempenho ligeiramente superior. Todas as variações do algoritmo DE testas nesse trabalho resultaram em um SLL superior a -23 dB. Assim como ocorrido na otimização baseada em algoritmos genéticos, diferentes melhorias tem sido propostas para a DE clássica. Por exemplo, em (ZHANG; JIA; YAO, 2013) DE é aprimorada utilizando procura harmônica e em (WANG *et al.*, 2018), DE é modificado para poder considerar limitações físicas.

1.2.2 Análise dos Efeitos dos Parâmetros de Arranjo no SLL

Grande parte dos trabalhos discutidos na Subsecção 1.2.1 limitam-se a avaliar o desempenho de um determinado algoritmo fixando parâmetros como o número de elementos e distância média entre eles, de forma que não pode ser avaliado o efeito dos parâmetros do arranjo no valor do SLL. Além disso, muitos deles não consideram direcionamento de feixe ou não asseguram uma distância mínima entre os elementos, requerimentos indispensáveis

na otimização de OPAs. Porém, alguns deles exploram parcialmente a dependência do SLL de alguns dos parâmetros do arranjo. Em particular, em (SOUZA *et al.*, 2018), se estuda o efeito do direcionamento do feixe no valor do SLL, mostrando que o valor deste piora conforme o feixe é orientado em direções próximas ao eixo do arranjo. Esta observação vai ao encontro com os resultados apresentados em (BRAY *et al.*, 2002). De fato, neste último trabalho é apresentado não somente a dependência do SLL em relação ao ângulo de direcionamento de feixe, mas também em relação ao número de elementos. Assim, quanto maior for o número de elementos no arranjo melhor é o SLL, o que também pode ser encontrado em (COMAN; LAGER; LIGTHART, 2006). Porém, nestes trabalhos, não são consideradas limitações físicas. As restrições físicas são consideradas em (HAWES; LIU, 2012), mas não é discutido o efeito no SLL.

Finalmente, em (BAROTT; STEFFES, 2008), tanto operação de direcionamento de feixe como limitações físicas são consideradas. Contudo, este trabalho oferece algumas diretrizes mas não considera muitos casos, de forma que não consegue estudar a complexa relação entre os diferentes parâmetros e o efeito combinado no valor de SLL.

1.3 Contribuições

Neste trabalho será estudado o efeito do direcionamento de feixe no SLL em arranjos de antenas com restrições físicas, i.e. distância mínima entre elementos, assim como o efeito tanto do número de elementos como da distância média entre elementos. Para obter os valores de SLL correspondentes, cada configuração será otimizada utilizando DE, por ter demonstrado um bom equilíbrio entre desempenho e custo computacional para otimização neste tipo de problemas (GOUDOS *et al.*, 2011). As principais contribuições do presente trabalho são:

1. Quantificar o efeito do direcionamento do feixe no SLL e, consequentemente, da faixa de direcionamento de feixe desejada; assim como entender a forma do SLL em função do ângulo do direcionamento de feixe;
2. Quantificar o efeito do número de elementos, distância mínima e média entre elementos e ângulo de direcionamento do feixe no SLL de arranjo esparsos;

3. Identificar a existência de uma distância média ótima entre os elementos em função da distância mínima entre eles; e Analisar a dependência do SLL com o comprimento de onda.

Tais contribuições são importantes pois permitem selecionar parâmetros gerais antes de otimizar as posições dos elementos, resultando em um melhor desempenho.

1.4 Organização do trabalho

O restante do documento consiste em mais 4 Capítulos. No Capítulo 2 se introduz a fundamentação teórica, incluindo os conceitos de termo de elemento e fator de arranjo, o efeito das fases de alimentação, a definição matemática do SLL e a aparição de lóbulos de grade em arranjos esparsos uniformes. No Capítulo 3 o algoritmo DE utilizado para calcular os SLL de cada configuração é justificado e seu funcionamento explicado. Os resultados são apresentados e discutidos no Capítulo 4. Finalmente, as principais conclusões do trabalho são apresentadas no Capítulo 5, indicando também algumas possíveis implicações no projeto de OPAs.

2 Arranjos Esparsos e Lóbulos de Grade

Neste Capítulo é desenvolvida a fundamentação teórica relativa aos arranjos esparsos. Usando o princípio de multiplicação de padrão é feita a derivação do fator de arranjo, o qual é particularizado para arranjos uniformes. Em seguida, são estudados os efeitos associados à modificação da separação entre elementos, mostrando o surgimento de lóbulos laterais de alta intensidade, denominados lóbulos de grade, quando a separação é suficientemente grande. Finalmente, discute-se o posicionamento não uniforme como estratégia de mitigação destes lóbulos de alta intensidade.

2.1 Princípio de Multiplicação de Padrão e Fator de Arranjo

Aplicando o princípio da superposição, o campo total radiado na região de campo distante por um arranjo de N elementos irradiantes coerentes pode ser expressado como (BALANIS, 2005):

$$\vec{E}_T(\theta, \phi) = \sum_{n=1}^N \vec{E}_n(\theta, \phi) \exp j(k\hat{r} \cdot \vec{r}_n + \psi_n), \quad (1)$$

sendo $\vec{E}_n$ o campo elétrico irradiado pelo n -ésimo elemento se este estivesse localizado na origem do sistema de coordenadas, ψ_n a fase de alimentação relativa e k o número de onda ($k = 2\pi/\lambda$). $\vec{r}_n$ é o vetor posição do n -ésimo elemento, e $\hat{r}$ é o vetor unitário dado por:

$$\hat{r} = \sin \theta \cos \phi \hat{x} + \sin \theta \sin \phi \hat{y} + \cos \theta \hat{z}, \quad (2)$$

em que θ e ϕ são os ângulos de elevação e azimutal, definidos conforme aos critérios de (BALANIS, 2005) e mostrados na Figura 2.

Para arranjos lineares com elementos irradiantes idênticos (sendo o campo radiado $\vec{E}(\theta, \phi)$) posicionados ao longo do eixo z nas posições z_n , a Equação 1 é simplificada a:

$$\vec{E}_T(\theta, \phi) = \vec{E}(\theta, \phi) \cdot \sum_{n=1}^N \exp j(k z_n \cos \theta + \psi_n), \quad (3)$$

sendo $k z_n \cos \theta$ a defasagem por diferença de percurso (CARDAMA *et al.*, 2004).

O campo descrito pela Equação 3 pode ser expressado como produto de dois termos: o campo radiado pelo elemento irradiante isolado, $\vec{E}(\theta, \phi)$, e um termo correspondente a uma somatória que considera a interferência dos campos gerados pelos N elementos de antenas:

$$\vec{E}_T(\theta, \phi) = \vec{E}(\theta, \phi) \cdot AF(\theta). \quad (4)$$

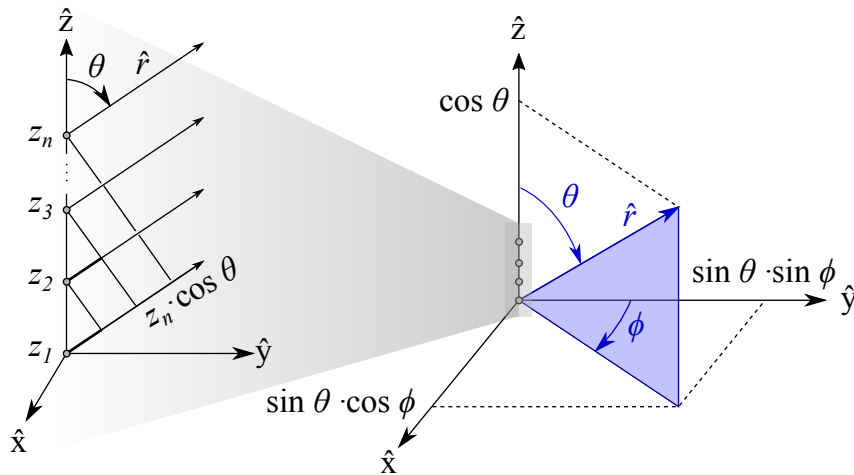


Figura 2 – Configuração dos elementos irradiantes incluindo os critérios para os ângulos de elevação e azimutal considerados e a representação gráfica da aproximação para campo distante.

O termo $AF(\theta)$ é chamado de fator de arranjo (AF - *Array Factor*) e adquire a seguinte forma (BALANIS, 2005):

$$AF(\theta) = \sum_{n=1}^N \exp j(k z_n \cos \theta + \psi_n). \quad (5)$$

Como pode ser observado, o AF leva em consideração a dependência do campo total radiado com a posição dos elementos irradiantes, assim como a alimentação dos mesmos, em particular, a fase de alimentação ψ_n . Cabe destacar que em caso de elementos alinhados na direção do eixo z , o AF tem simetria de revolução em torno a este eixo, não apresentando dependência com o ângulo azimutal ϕ .

2.2 Direcionamento de feixe

Como pode-se observar na Equação 5, o AF considera tanto parâmetros estruturais, i.e. posição dos elementos, como operacionais, i.e. fases de alimentação. Na maioria dos casos, as posições dos elementos não podem ser controladas após a fabricação. As fases de alimentação dos elementos, por outro lado, podem ser modificadas dinamicamente. Assim, o lóbulo principal, também chamado de feixe principal ou simplesmente, feixe, pode ser orientado na direção desejada selecionando os valores apropriados das fases de alimentação, Φ_n . Ao longo deste trabalho denotaremos esta operação como *direcionamento de feixe*¹.

¹ O direcionamento de feixe se traduz em inglês como *beam steering*, termo que muitas vezes é utilizado, mesmo em outras línguas.

Para que o máximo de radiação ocorra na direção θ_{BS} , um plano de fase constante, ortogonal a esta direção, deve ser estabelecido. Em outras palavras, a fase de todos os elementos deve ser a mesma nessa direção. Matematicamente, escreve-se:

$$\Psi = k z_n \cos \theta_{BS} + \psi_n. \quad (6)$$

Ψ é a fase do campo de qualquer um dos elementos do conjunto na direção θ_{BS} a uma distância correspondente a um número inteiro de comprimentos de onda. Cabe lembrar que ψ_n é a fase de excitação do elemento n -ésimo e $k z_n \cos \theta_{BS}$ a desfasagem por diferença de caminho do campo irradiado pelo elemento n -ésimo. A expressão 6 pode ser simplificada se deslocarmos o arranjo de modo que o primeiro elemento esteja posicionado na origem, $z_1 = 0$, e a fase de alimentação do n -ésimo elemento seja referenciada em relação ao primeiro elemento, $\phi_1 = 0$. Desta forma, para a direção de máximo θ_{BS} , temos que:

$$0 = k z_n \cos \theta_{BS} + \psi_n + m \cdot 2\pi \text{ com } m \in \mathbb{Z} \quad (7)$$

e, em consequência, considerando um valor de $m = 0$, as fases de alimentação devem ser:

$$\psi_n = -k z_n \cos \theta_{BS}. \quad (8)$$

A Figura 3 mostra o direcionamento de feixe de um arranjo de antenas mediante controle da fase de alimentação.

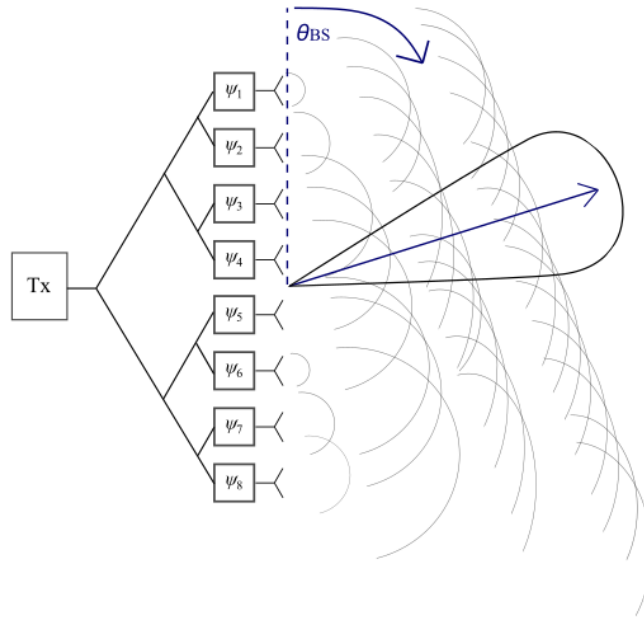


Figura 3 – Direcionamento de feixe em antenas de arranjo por médio de controle das fases de alimentação.

2.3 Arranjos uniformes

A equação 7 adquire uma forma simplificada quando os elementos são distribuídos uniformemente, isto é, quando a separação entre os elementos é a mesma. Este tipo de arranjo é denominado de arranjo uniforme. Definindo a separação entre elementos como d , as posições dos elementos são dadas por $z_n = (n - 1) \cdot d$ e a condição de fase para que todos os elementos interfiram construtivamente na direção θ_{BS} é:

$$0 = k (n - 1)d \cos \theta_{BS} + \psi_n + m \cdot 2\pi \text{ com } m \in \mathbb{Z}. \quad (9)$$

Para esta configuração é fácil ver que a diferença de fase de alimentação entre elementos consecutivos é constante e depende de θ_{BS} , conforme exposto em:

$$\Delta\psi = -k d \cos \theta_{BS} + m \cdot 2\pi. \quad (10)$$

Para os arranjos uniformes o AF é descrito por:

$$AF(\theta) = \frac{\sin \left[\frac{N}{2} (k d \cos(\theta) + \Delta\psi) \right]}{\sin \left[\frac{1}{2} (k d \cos(\theta) + \Delta\psi) \right]}. \quad (11)$$

Na Figura 4 a expressão 11 é representada para um valor de $d = \lambda/4$ e diferentes valores de θ_{BS} . Como pode se observar, o AF apresenta um único lóbulo principal na direção desejada. Se a mesma expressão 11 for representada graficamente, considerando uma separação entre elementos de $d = \lambda$, como apresentado na Figura 5, observa-se um lóbulo na direção desejada, porém, aparecem outros lóbulos em direções não desejadas com a mesma intensidade. Estes lóbulos de alta intensidade são denominados de lóbulo de grade.

A presença de lóbulos de grade pode, alternativamente, ser explicada de um ponto de vista mais físico, a partir da Equação 13, se consideramos valores de m não nulos. Uma

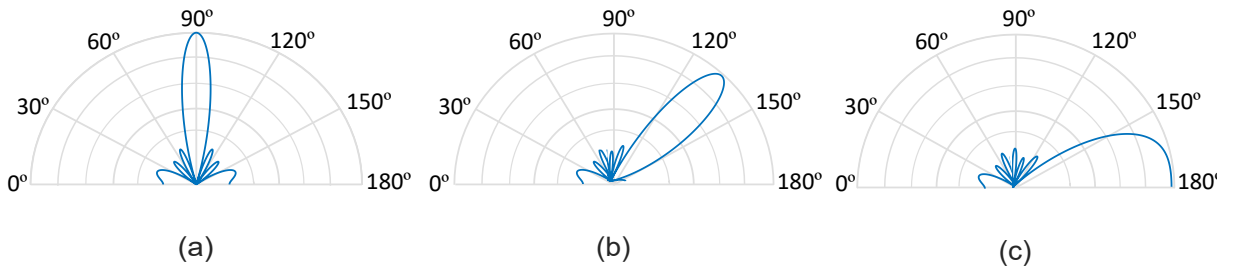


Figura 4 – Corte do módulo do AF de um arranjo de antenas uniforme com espaçamento $d = \lambda/4$ entre os elementos, operando sob direcionamento de feixe em: (a) $\theta_{BS} = 90$, (b) $\theta_{BS} = 135$ e (c) $\theta_{BS} = 180$.

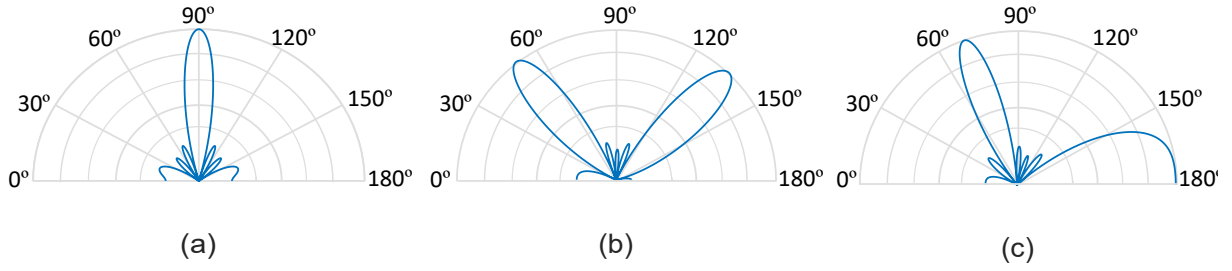


Figura 5 – Corte do módulo do AF de um arranjo de antenas uniforme com espaçamento $d = \lambda$ entre os elementos, operando sob direcionamento de feixe em: (a) $\theta_{BS} = 90$, (b) $\theta_{BS} = 135$ e (c) $\theta_{BS} = 180$.

representação gráfica da interferência construtiva dos diferentes elementos em direções não desejadas é mostrada na Figura 6. Como pode-se observar, em arranjos uniformes com separação entre elementos pequena, Figura 6(a), existe somente uma direção em que os elementos interferem construtivamente. Porém, quando a distancia entre elementos aumenta é possível ocorrer interferência construtiva, não somente em uma, mas em várias direções, pois os campos desfasados por um número inteiro de comprimentos de onda também resultam em interferência construtiva. Desta forma, se as fases da alimentação dos elementos irradiantes forem configuradas para emitir na direção θ_{BS} , nos ângulos θ_{GL} também se verifica a condição de interferência construtiva de todos os elementos:

$$-k d \cos \theta_{GL} = -k d \cos \theta_{BS} + m \cdot 2\pi, \quad (12)$$

$$\theta_{GL} = \arccos \left[\cos \theta_{BS} + \frac{m \cdot 2\pi}{k d} \right]. \quad (13)$$

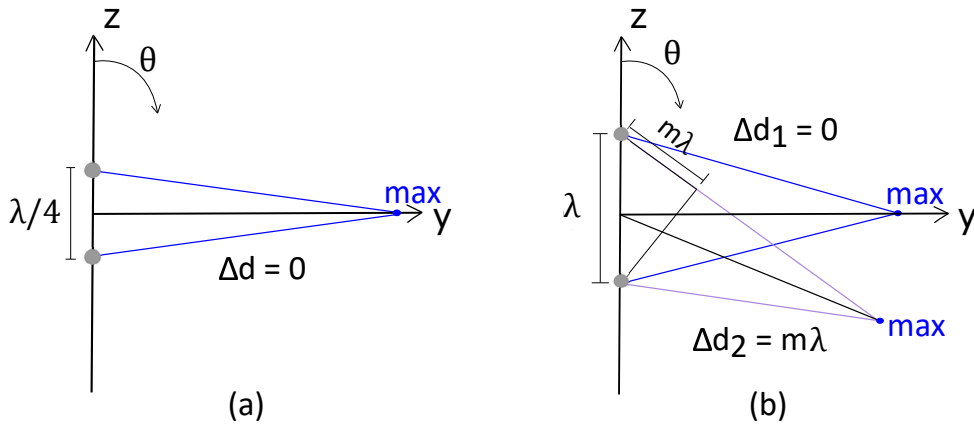


Figura 6 – Interferência construtiva em diferentes direções dos campos de radiação de arranjos uniformes com elementos idênticos: (a) arranjo de antena compacto e (b) arranjo de antena esparsa. O ângulo de elevação θ é referenciado a partir do eixo z.

Para $m = 0$, tem-se a solução trivial, em que $\theta_{GL} = \theta_{BS}$, enquanto que para valores de $m \neq 0$ somente tem-se θ_{GL} reais se:

$$\left| \cos \theta_{BS} + \frac{m \cdot 2\pi}{k d} \right| \leq 1. \quad (14)$$

Alternativamente, pode-se escrever esta inequação em termos do comprimento de onda λ , lembrando que $k = 2\pi/\lambda$ (para sistemas de comunicação no espaço livre, λ assume o valor do comprimento de onda no espaço livre):

$$\left| \cos \theta_{BS} + \frac{\lambda}{d} m \right| \leq 1. \quad (15)$$

Esta expressão é importante porque não somente indica quantos lóbulos de grade aparecem, mas também a dependência deste número com a direção θ_{BS} . Um ponto interessante a ser observado é que quanto maior o valor d em relação à λ , maior número de lóbulos de grade verificarão a condição. Consequentemente, pode-se introduzir d_{max} , o qual indica a máxima distância entre elementos sem que haja lóbulos de grade. Assim, usando $m = 1$, chega-se a:

$$\cos \theta_{BS} + \frac{\lambda}{d_{max}} = \pm 1 \Rightarrow d_{max} = \frac{\lambda}{1 + |\sin \theta_{BS}|}. \quad (16)$$

Observando a expressão 16, podemos identificar diferentes cenários:

- Configuração *end-fire*²: o AF tem o máximo na direção ortogonal ao eixo z , correspondendo a $\theta_{BS} = 0$. Neste caso, o valor de d_{max} corresponde a $\lambda/2$.
- Configuração *broadside*²: o AF tem o máximo na direção do eixo z , correspondendo a $\theta_{BS} = \pi$ e um valor de d_{max} de λ .
- Para casos com o ângulo de direcionamento do feixe entre 0 e $\pi/2$, tem-se um valor de d_{max} que varia entre $\lambda/2$ e λ .

Os arranjos nos quais podem existir lóbulos de grade denominam-se de arranjos esparsos. Considerando o pior caso possível do ponto de vista da presença de lóbulos de grade, i.e. $\theta_{BS} = \pm\pi/2$, os arranjos com distância entre elementos igual ou superior a $\lambda/2$ recebem essa classificação.

Outro ponto importante a ser destacado no comportamento dos arranjos esparsos é que o efeito dos lóbulos de grade é mais significativo na medida em que o feixe é direcionado para ângulos extremos, i.e. $\theta_{BS} = 0$ ou $\theta_{BS} = \pi$. Este comportamento pode ser observado na Figura 7, onde mostra-se a norma do AF para um arranjo uniforme com espaçamento de $d = \lambda/2$ com direcionamento de feixe de (a) 0, (b) $\pi/4$ e (c) $\pi/2$.

² Neste trabalho serão usadas as expressões em inglês, por não haver tradução dos termos bem definidas.

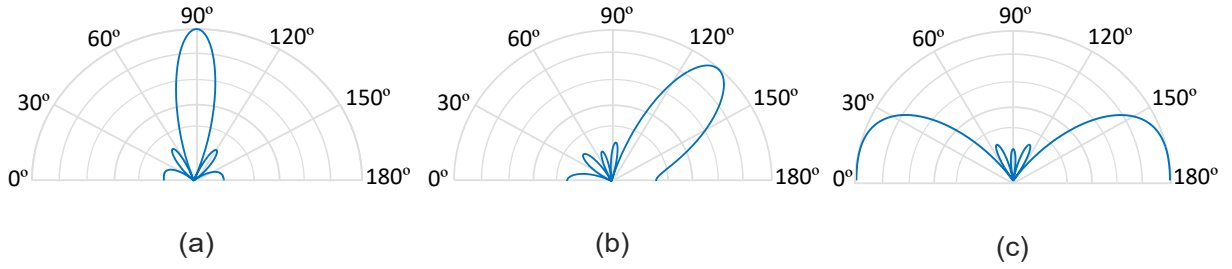


Figura 7 – Aparecimento de lóbulos de grade em um arranjo de antenas uniforme com separação entre os elementos idênticos $d = \lambda/2$, operando (a) sem direcionamento de feixe, (b) sob direcionamento de feixe em $\pi/4$ e (c) sob direcionamento de feixe em $\pi/2$, ambos em relação ao eixo de referência, sob o qual os elementos estão dispostos.

2.4 Supressão de lóbulos de grade mediante posicionamento não uniforme

Uma maneira de evitar os lóbulos de grade é posicionar não uniformemente os elementos do arranjo, isto é, com uma separação entre as antenas que não seja constante. Desta forma, todos os elementos somente interferem de forma construtiva na direção θ_{BS} desejada. Em outras direções tem-se interferência parcialmente construtiva, dando lugar a lóbulos de menor amplitude espalhados em diferentes direções. Uma figura de mérito amplamente utilizada para quantificar o efeito da interferência parcial é o nível de lóbulo lateral (SLL - *Side-Lobe Level*). Em arranjos esparsos o SLL pode ser calculado de formas distintas:

1. Considerando apenas o elemento radiante;
2. Considerando o arranjo como um todo (o que inclui considerar o padrão de radiação do elemento); e
3. Considerando apenas o fator de arranjo.

Neste trabalho foi escolhida a terceira abordagem, pois independe do elemento radiante. Essa abordagem é frequentemente adotada porque torna o processo de otimização independente do elemento de radiação. Além disso, o cálculo do SLL do AF é uma boa aproximação de todo a OPA quando o diagrama de radiação do elemento tem um amplo lóbulo principal. Uma vez escolhida a abordagem, o SLL pode ser calculado da seguinte forma (BALANIS, 2016):

$$SLL = \left| \frac{AF(\theta_{SL})}{AF(\theta_{BS})} \right|, \quad (17)$$

sendo $AF(\theta_{SL})$ e $AF(\theta_{BS})$ os valores de AF na direção do lóbulo lateral de maior intensidade e do lóbulo principal, respectivamente.

O SLL também é comumente utilizado em escala logarítmica, sendo definido como:

$$SLL = 10 \log \left| \frac{AF(\theta_{SL})}{AF(\theta_{BS})} \right|, \quad (18)$$

A intensidade dos lóbulos e, consequentemente, do SLL, depende tanto do posicionamento dos elementos como das suas fases de alimentação. Como o ângulo do direcionamento de feixe depende das fases de alimentação, pode-se inferir que as posições dos elementos que minimiza o SLL dependerá do ângulo do direcionamento θ_{BS} . A Figura 8 mostra de forma gráfica a definição de SLL e sua dependência com o ângulo de direcionamento.

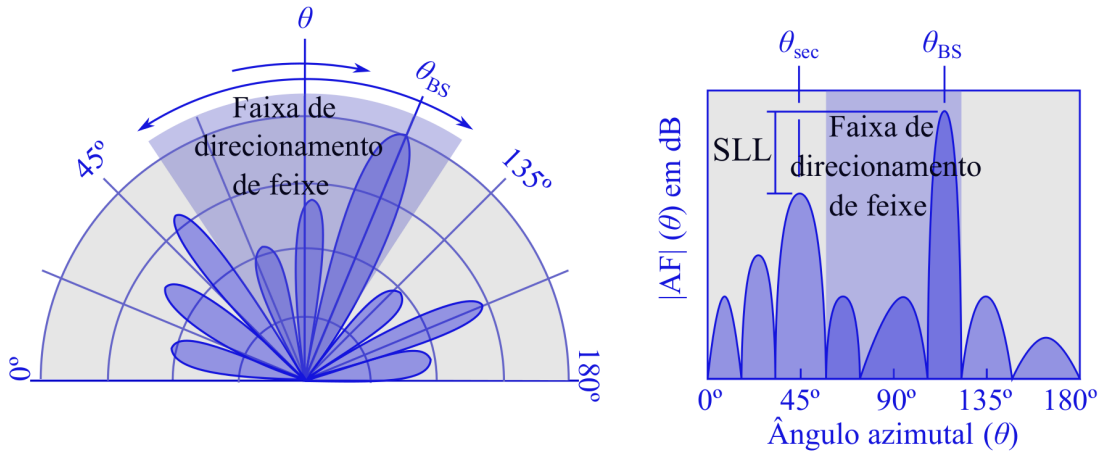


Figura 8 – Esquema de um arranjo de antena esparso linear com representação ilustrativa do AF polar e cartesiana indicando a nomenclatura empregada.

3 Evolução Diferencial para Posicionamento dos Elementos de Antena em Arranjos Esparsos Lineares

O presente Capítulo está dividido em três seções. Na Seção 3.1, introduze-se os diferentes tipos de algoritmos de otimização e justifica-se o uso de DE para otimizar a posição dos elementos em arranjos esparsos. As diferentes etapas do algoritmo DE são apresentadas na Seção 3.2 e, finalmente, as configurações das otimizações são descritas e justificadas na Seção 3.3.

3.1 Métodos de Otimização e Justificativa de Evolução Diferencial

A otimização é o processo de minimizar ou maximar uma função para encontrar o valor ótimo para uma determinada aplicação. A função que se procura otimizar pode ser chamada de função objetivo, função de custo (nos casos de minimização), função de utilidade (nos casos de maximização), ou, em certos campos, função de energia ou energia funcional (MARTINEZ; SANTOS, 1995). Neste trabalho a função a qual se deseja otimizar será tratada como função de custo, uma vez que se busca a sua minimização.

Os métodos de otimização podem ser classificados em duas grandes classes: métodos determinísticos e métodos estocásticos. Os métodos de otimização determinísticos, também conhecidos como clássicos, são métodos em que o algoritmo não tem nenhum componente aleatório. Isto é, dada as condições iniciais, o algoritmo evolui sempre da mesma maneira. Este tipo de algoritmos é útil em problemas onde a função de custo é convexa, contínua e diferenciável (QUING, 2009). Como alternativa aos métodos determinísticos, existem os métodos estocásticos, os quais utilizam alguma variável aleatória ao longo do processo de otimização. Os algoritmos estocásticos são mais adequados para funções de custos descontínuas ou não diferenciáveis, assim como em casos onde a função de custo apresenta múltiplos mínimos locais, i.e. a função não é convexa em todo o domínio de otimização. Comparando as duas classes de algoritmos mencionadas, os métodos determinísticos geralmente requerem um menor custo computacional do que os algoritmos estocásticos. Contudo, os métodos determinísticos tendem a convergir para soluções piores. Além disso, os algoritmos estocásticos são menos sensíveis às condições iniciais, simplificando o processo de inicialização. Dessa forma, os algoritmos estocásticos estão se popularizando na solução de problemas complexos em que a função de custo não verifica as propriedades

de convexidade, continuidade e diferenciabilidade. Este tipo de algoritmos também é adotado quando não se pode verificar que tais propriedades sejam atingidas, ou quando, atingindo-as, o cálculo dos componentes do gradiente é complicado.

Os métodos de otimização estocásticos podem ser divididos em duas sub-classes: os denominados algoritmos físicos e os algoritmos evolutivos. Os algoritmos físicos emulam processos físicos. Dentro dessa sub-classe, os métodos de otimização mais conhecidos são os algoritmos de Montecarlo (LEE; LEE; KIM, 2005; DEISSLER; THIELECKE, 2010; RENGARAJAN; ZAWADZKI; HODGES, 2010) e os algoritmos de simulação de anelamento (GONZALEZ-VALDES *et al.*, 2013; RATTAN; PATTERRH; SOHI, 2009). Por sua vez, os métodos de otimização evolutivos replicam fenômenos evolutivos naturais. Entre os algoritmos evolutivos mais utilizados encontram-se os algoritmos de enxame de partículas (ROBINSON; RAHMAT-SAMII, 2004; KENNEDY; EBERHART, 1995; TAHERI; MALLAHZADEH; FOUDAZI, 2012; TOLFO, 2016; LEMES *et al.*, 2017) e os algoritmos genéticos (HOLLAND *et al.*, 1992; HAUPT, 1994; JOHNSON; RAHMAT-SAMII, 1999; CHEN *et al.*, 2007; DING *et al.*, 2010; SCHLOSSER *et al.*, 2014). Os algoritmos evolutivos se baseiam na evolução das espécies, incluindo no processo de otimização etapas de seleção, mutação e cruzamento. Nas primeiras implementações de algoritmos evolutivos o processo de mutação era binário, denominando-se estes métodos de Algoritmos Genéticos. Posteriormente, estes métodos foram modificados para ter um processo de mutação contínuo e baseado na combinação de três indivíduos. Este tipo de algoritmo se chamou de Evolução Diferencial (DE) e, conforme a vários trabalhos (PANDURO *et al.*, 2009; CHOWDHURY *et al.*, 2010; DEB; ROY; GUPTA, 2014; ROCCA; OLIVERI; MASSA, 2011), apresenta uma convergência mais rápida do que os Algoritmos Genéticos anteriores.

Devido à sua boa relação entre desempenho de otimização e custo computacional, além do número reduzido de parâmetros de controle (QUING, 2009), o algoritmo DE tem sido aplicado em uma vasta gama de problemas. Em (QING, 2009) pode-se encontrar uma extensa revisão de trabalhos que usam DE. Em particular, este método tem sido eficientemente utilizado em problemas de eletromagnetismo, mais concretamente no desenvolvimento de antenas. Em (DEB; ROY; GUPTA, 2014), DE foi utilizado como método de otimização de antenas. O mesmo método foi aplicado em (GOUDOS *et al.*, 2011)(ZHANG; JIA; YAO, 2013)(WANG *et al.*, 2018) para otimizar elementos irradiantes em arranjos esparsos.

Ao longo do tempo diferentes variantes de DE foram implementadas para se adaptar a problemas específicos. De forma geral, estas variações podem ser classificadas em (QUING, 2009): DE Clássica, DE Dinâmica, DE Modificada e DE Híbrida. Neste trabalho foi utilizado um algoritmo de DE Modificada, o qual utiliza múltiplas populações iniciais. O uso de várias populações iniciais é amplamente utilizado quando a função de custo apresenta múltiplos ótimos locais. Além disso, esta alternativa permite a paralelização do processo.

3.2 Otimização por Evolução Diferencial

DE é um algoritmo de otimização multi-objetivo desenvolvido por Rainer Storn e Kenneth Price (STORN; PRICE, 1995; STORN; PRICE, 1997). Na versão clássica de DE, cujo diagrama é mostrado na Figura 9, um conjunto de soluções aleatórias iniciais, geradas aleatoriamente, é sucessivamente refinado até verificar a condição de parada. Desta forma, a cada iteração se produz uma nova geração constituída por um conjunto de soluções tentativas para o qual se realizam as seguintes operações (QING, 2009):

1. **Seleção:** No primeiro passo, o desempenho de cada indivíduo (solução tentativa) é avaliado em termos da função de custo, o que permite selecionar os "melhores" indivíduos. Esta etapa é denominada de "seleção".
2. **Cruzamento:** Após a seleção dos melhores indivíduos, estes são recombinados na etapa de cruzamento, de forma que troquem suas informações genéticas, assim como

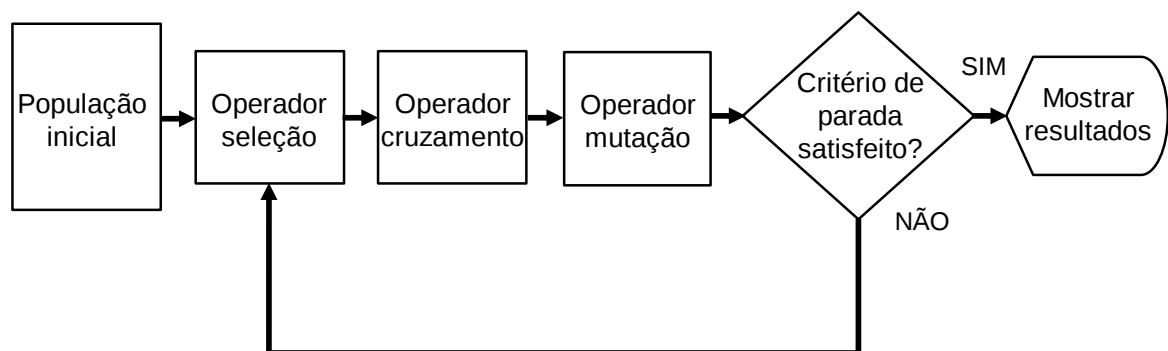


Figura 9 – Fluxograma dos operadores do algoritmo DE

na reprodução animal. A particularidade de DE com relação a Algoritmos Genéticos se estabelece nesta etapa, pois a combinação entre as soluções é realizada usando três pais distintos. Assim, três indivíduos selecionados são escolhidos de forma aleatória e combinados para gerar um filho, isto é, em uma nova solução. A solução obtida só será incorporada à população se ao gerar um número aleatório entre 0 e 1 este for menor que a probabilidade de cruzamento. Caso não seja, o filho não é considerado. Sendo menor do que a probabilidade de cruzamento e obtendo um melhor desempenho em termos da função de custo quando comparado a solução anterior, o filho gerado substitui um dos pais.

3. **Mutação:** Os novos indivíduos gerados na etapa de cruzamento são submetidos ao operador mutação. Nem todos os indivíduos serão submetidos a este operador, só aqueles que atingirem o critério de probabilidade de mutação. Novamente, um número aleatório entre 0 e 1 é gerado. Se este número for menor ou igual a probabilidade de mutação, a mutação ocorre. O operador mutação possibilita o contínuo enriquecimento genético durante o processo de otimização, minimizando a probabilidade de que a população genética fique confinada em um mínimo local. Todos os filhos são testados à condição de mutação.

O algoritmo finaliza o processo de interação quando a geração atinge o critério de parada. Este pode ser absoluto, por exemplo, um determinado valor da função de custo requerido para uma aplicação particular; diferencial, quando se avalia a melhora de nova geração com relação à anterior, ou limitado pelo número de iterações. Neste trabalho o critério de parada é limitado pelo número de iterações.

Como discutido anteriormente, os métodos estocásticos são mais robustos às condições iniciais, porém não significa que estas não tenham efeito no desempenho do algoritmo. No caso particular de DE, a sensibilidade às condições iniciais depende da riqueza genética da população inicial, a qual pode ser melhorada de diferentes formas (QUING, 2009): i) incrementar o tamanho populacional; ii) usar um conjunto seletivo de indivíduos, descartando elementos que são semelhantes e que não agregam muita variação genética; e iii) usar diferentes gerações iniciais aleatórias e realizar vários processos DE paralelos. Esta alternativa é denominada de *subpopulação* e está classificada como DE multi-população que, por sua vez, é considerada um tipo de DE modificada. Neste trabalho foi escolhida a última alternativa, pois é simples de implementar, facilmente paralelizável e permite

monitorar o desempenho das diferentes subpopulações, possibilitando uma estimativa do número destas para um desempenho aceitável.

3.3 Otimização das Posições dos Elementos de Antena

Nesta seção será descrito a configuração do algoritmo DE para otimizar as posições dos elementos de antena em arranjos esparsos, a fim de minimizar o SLL.

3.3.1 Parâmetros de Controle e Gerais e Variáveis de Otimização

Os parâmetros de controle são parâmetros intrínsecos do algoritmo. Em DE, existem três parâmetros de controle: o tamanho da população, N_p , a intensidade de mutação, F_y , e a probabilidade de cruzamento, p_c . Cabe destacar que, mesmo, às vezes, sendo recomendado um valor de N_p correspondente a 10 vezes o número de variáveis de otimização, o tamanho populacional deve ser selecionado conforme os requerimentos do problema, ainda mais no caso de DE multi-populacional (QUING, 2009).

Os parâmetros gerais da OPA são parâmetros do arranjo de antena que não variam ao longo da simulação. Neste trabalho pode-se dividir esses parâmetros em dois. Por um lado, em parâmetros estruturais, que são o número de elementos irradiantes, N , a distância média entre os elementos, $\bar{d}$, e a distância mínima entre os elementos d_{min} . Por outro lado, em parâmetro operacional, que é o ângulo de direcionamento de feixe θ_{BS} .

Finalmente, as variáveis de otimização são as variáveis modificadas ao longo do processo de simulação. Neste trabalho, as variáveis de otimização são as posições dos elementos z_i com $i \in [1, N]$. De fato, estritamente as variáveis de otimização utilizadas foram as distâncias de separação entre elementos sucessivos, isto é, $d_i = z_{i+1} - z_i$ com $i \in [1, N - 1]$.

3.3.2 Função de Custo

A função de custo será o SLL do fator de arranjo, o qual é dado pela Equação 5. Assim, lembrando, podemos escrever a função de custo como:

$$SLL(\theta_{BS}, X) = \left| \frac{AF(\theta_{sec}, X)}{AF(\theta_{BS}, X)} \right|. \quad (19)$$

A otimização do SLL do AF, como já mencionado no Capítulo 2, para ângulos de direcionamento de feixe próximos ao *broadside*, pode ser considerada como o pior caso possível, pois os elementos radiantes geralmente apresentam a direção de máxima transmissão de energia na direção perpendicular ao eixo em que estes elementos estão alinhados.

3.3.3 Restrições de Otimização

A otimização da posição dos elementos está sujeita a duas restrições. Por um lado o comprimento total do arranjo deve corresponder a $L = (N - 1) \cdot \bar{d}$. Esta restrição pode ser escrita alternativamente em termos de distâncias entre elementos como:

$$L = (N - 1) \cdot \bar{d} = \sum_{i=1}^{N-1} d_i. \quad (20)$$

Por outro lado, a segunda restrição é trivial, pois a distância entre elementos tem que ser maior que a distância mínima d_{min} :

$$d_i > d_{min} \text{ com } i \in [1, N - 1]. \quad (21)$$

3.3.4 Condição de Parada

Na hora de decidir a condição de parada, o critério absoluto não é válido pois não se sabe *a priori* o valor do SLL que pode ser atingido. Por outro lado, o comportamento em forma de escada apresentado pela função de custo faz com que o critério diferencial também não seja válido, pois o melhor SLL pode ficar constante por varias iterações antes de reduzir subitamente. Desta forma, o critério adotado é o número de iterações máxima. Simulações preliminares mostraram que o número de iterações para atingir um valor estável do SLL depende principalmente do número de elementos do arranjo. Assim, foi fixado um número de iterações diferente para cada número de elementos.

Tabela 1 – Parâmetros usados nas otimizações para avaliar o efeito dos parâmetros gerais da OPA.

	Parâmetro	Valor
Parâmetros de controle	Tamanho populacional (N_p)	50×40
	Intensidade de mutação (F_y)	0.5
	Probabilidade de cruzamento (p_c)	0.1
Parâmetros gerais da OPA	Número de elementos do arranjo (N)	4, 8, 16
	Distância mínima entre elementos (d_{min})	1λ , 2λ , 3λ
	Distância média entre elementos ($\bar{d}$)	1λ – 4λ
	Ângulo de direcionamento θ_{BS}	90° , 77.5° , 45°
Condição de parada	Número de iterações (N_{iter})	500 (4), 1.000 (8), 3.000 (16)

3.4 Configuração das Otimizações

A fim de avaliar e quantificar o efeito dos parâmetros gerais no valor do SLL, foram realizadas otimizações considerando um tamanho populacional total de 2.000 indivíduos divididos em 50 subpopulações independentes de 40 indivíduos. Essas duas variáveis representam o melhor resultado em relação custo-benefício computacional obtido de otimizações que variaram de 50 a 200 subpopulações individuais, e 10 a 80 indivíduos. A intensidade de mutação, F_y , e a probabilidade de cruzamento, p_c , foram fixadas a 0,5 e 0,1, respectivamente. Uma vez que o interesse deste trabalho é quantificar o efeito dos parâmetros gerais da OPA, assim como a interação entre eles, foram realizadas otimizações de arranjos com 4, 8 e 16 elementos, considerando distâncias mínimas de 1λ , 2λ e 3λ assim como separações médias que variavam desde 1λ até 6λ . Arranjos com 32 e 64 elementos também foram simulados. Porém, para obter uma alta resolução na otimização é necessário um alto custo computacional. Esta análise foi realizada considerando ângulos de direcionamento de feixe partindo da direção *broadside*, i.e. $\theta_{BS} = 90^\circ$, até 45° , representando uma faixa de direcionamento de feixe de 90° ($135^\circ - 45^\circ$). Como já mencionado, a condição de parada está governada pelo parâmetro N_{iter} o qual depende do número de elementos. Assim, para 4 elementos se estabeleceu um número máximo de 500 iterações, para 8 elementos de 1.000 e, finalmente, para 16 elementos se incrementou até 3.000 iterações. A Tabela 1 resume os valores utilizados para os diferentes parâmetros.

Para justificar as configurações adotadas na otimizações, a Figura 10 apresenta a evolução da função de custo do melhor indivíduo da geração de cada subpopulação em cada iteração, para três casos diferentes: (a) 4 elementos radiantes, (b) 8 elementos radiantes e (c) 16 elementos radiantes, todos para $\theta_{des} = 45^\circ$. Assim, cada curva representa a melhor função de custo, para uma determinada sub-população. Como esperado, o melhor SLL decai até convergir para valores que dependem dos indivíduos iniciais de cada sub-população. Em relação ao número de iterações, pode-se observar que após a interação 100, 400 e 1.000, nos arranjos com 4, 8 e 16 elementos, respectivamente, as curvas apresentam uma estabilização. Porém, para garantir uma margem de segurança, o número de iterações N_{iter} foi fixado em 500 para 4 elementos de antena, 1.000 para 8 e 3.000 para 16 elementos.

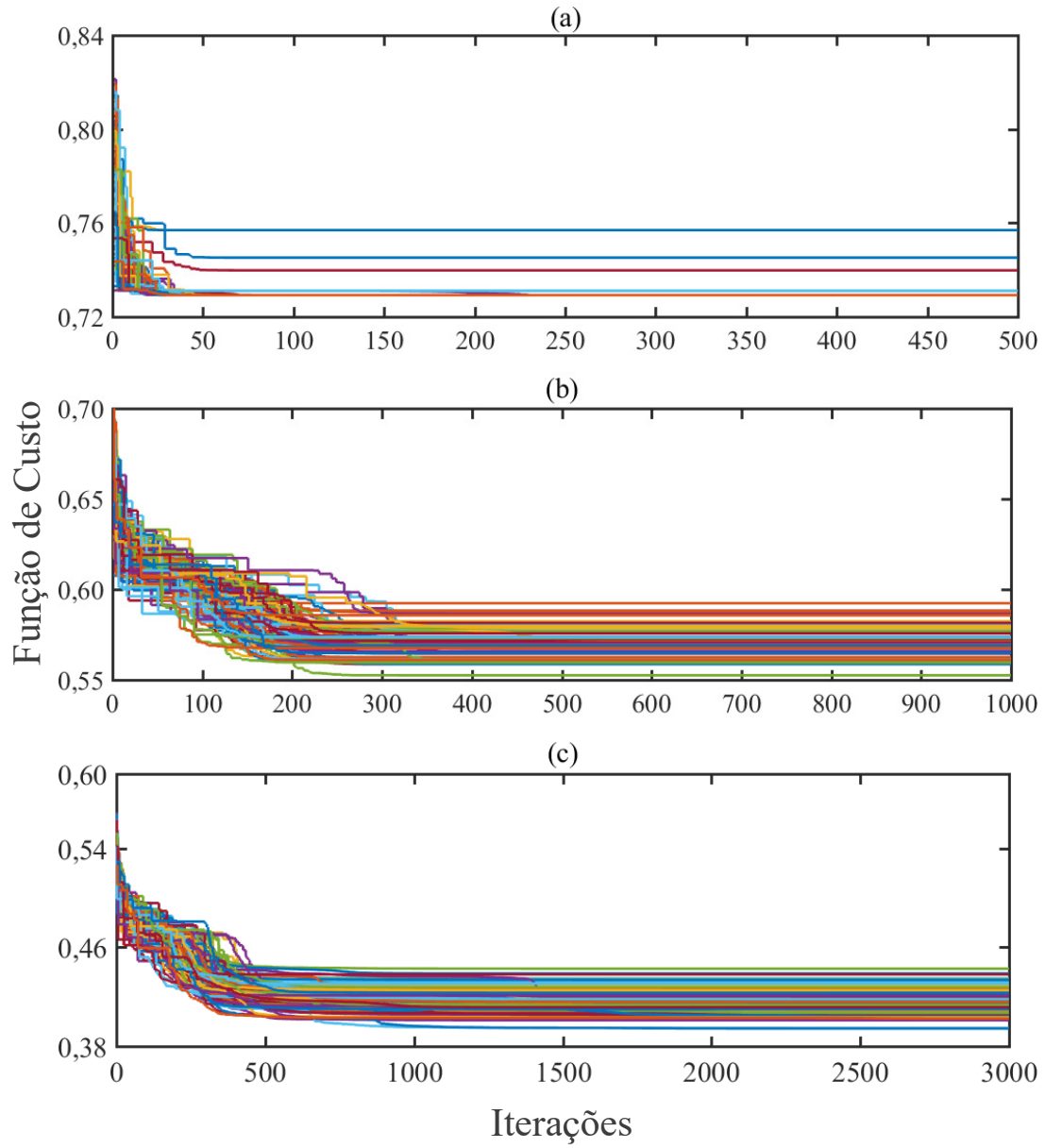


Figura 10 – Evolução da função de custo do melhor elemento da geração para cada subpopulação considerando um ângulo de direcionamento de feixe de 45° para um arranjo de (a) 4 elementos, (b) 8 elementos e (c) 16 elementos.

4 Resultados

No presente Capítulo se apresentam os resultados. Por um lado, na Seção 4.1, foi analisado o efeito do ângulo de direcionamento de feixe no valor do SLL para um determinado número de elementos. Uma vez comprovada a dependência do SLL com relação ao ângulo de direcionamento de feixe, foi apresentado e analisado o valor do SLL quando se varia simultaneamente o ângulo de direcionamento de feixe, o número de elementos e as distâncias mínima e média entre elementos.

4.1 Efeito do Direcionamento de Feixe no SLL

Inicialmente, foi analisado o efeito do direcionamento de feixe no valor do SLL. A Figura 11 (a) mostra as posições dos elementos para um arranjo de 8 elementos, com separação mínima de 2λ e distância média de 6λ entre os elementos, resultando em um comprimento total do arranjo de 42λ . O arranjo foi otimizado para três ângulos de direcionamento de feixe diferentes: 90° , $67,5^\circ$ e 45° . A partir desta figura nota-se que as posições dos elementos para minimizar o nível do SLL de um arranjo dependem do ângulo de direcionamento de feixe para o qual é projetado. A Figura 11(b) mostra o valor do SLL dos arranjos apresentados na Figura 11(a). Em 90° , a configuração otimizada para o ângulo de direcionamento de feixe de 90° supera as configurações otimizadas para os ângulos de direcionamento de feixe de $67,5^\circ$ e 45° . Porém, considerando a faixa compreendida entre 90° e $67,5^\circ$, o arranjo otimizado para o ângulo de direcionamento de $67,5^\circ$ apresenta o melhor desempenho. O mesmo ocorre para a faixa de direcionamento de feixe de 90° até 45° . Vale ressaltar que, conforme previsto, o SLL piora à medida que o ângulo de direcionamento de feixe aumenta. Assim, da Figura 11 pode-se evidenciar que otimizar o arranjo para uma faixa de direcionamento de feixe inteira é equivalente a otimizar para a direção de feixe mais distante de 90° , ou seja, para o valor extremo da faixa de direção projetada. De fato, o SLL apresenta uma forma de escada monotonicamente crescente, que pode ser entendida observando a evolução do diagrama de radiação, Figura 11 (c,e), conforme o ângulo de direcionamento de feixe se separa da direção *broadside*, i.e. 90° . Dessa forma, a otimização para grandes faixas de direcionamento de feixe evita que os lóbulos de alta potência apareçam quando o feixe é direcionado dentro desta faixa. Porém, a redução do SLL é alcançada à custa da presença de lóbulos menores, que resultam

em uma penalidade de desempenho quando comparados ao direcionamento de feixe mais estreitos, com otimização de banda menor.

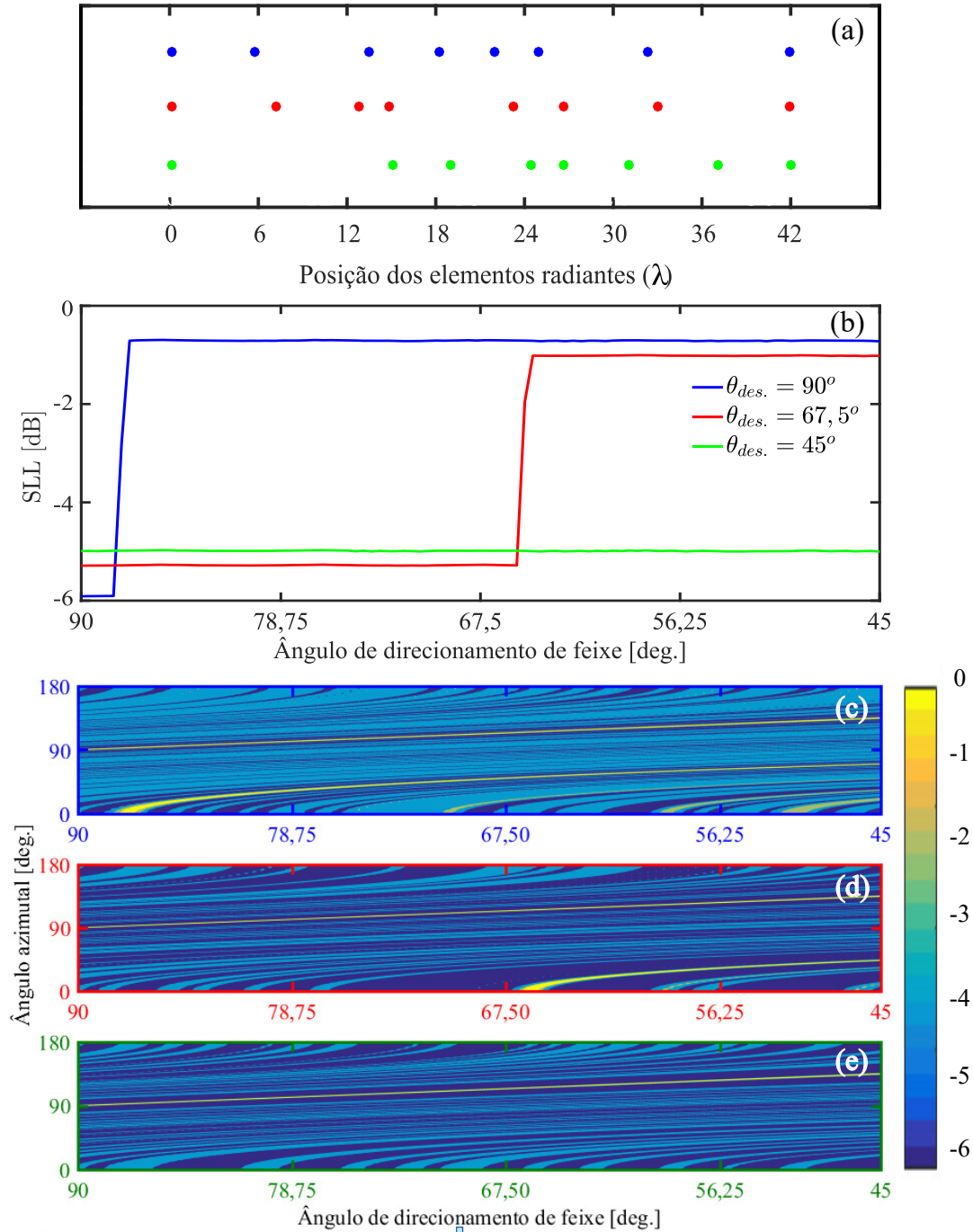


Figura 11 – (a) Posições dos elementos obtidas na otimização do arranjo de 8 elementos, com separação mínima de 2λ e distância média de 6λ , para ângulos de direcionamento de feixe de 90° , $67,5^\circ$ e 45° . (b) SLL em termos de ângulo de direcionamento de feixe, e (c-e) norma do AF em termos do ângulo de direcionamento de feixe e ângulo azimutal θ para os três casos otimizados.

4.2 Efeito da Restrição Física no SLL

A figura 12 apresenta o SLL de um arranjo de 8 elementos, com distância média de separação entre os elementos de 4λ , em termos do ângulos e direcionamento de feixe para dois casos distintos, sem e com restrição física. As linha contínuas representam o arranjo otimizado para os ângulos de direcionamento de feixe na faixa de 90° à 45° sem restrição física, isso é, sem distância mínima de separação entre os elementos. E a linha tracejada mostra o mesmo arranjo otimizado com uma distância mínima de separação entre os elementos de 2λ , sendo este último um arranjo esparso.

Analisando a figura 12 é notório que, na maioria dos ângulos simulados, sem restrição física (linha contínua) o SLL obtido é menor do que quando a restrição física é aplicada. Para o ângulo de direcionamento de feixe desejado de $67,50^\circ$ a diferença de SLL obtida é de cerca de 3 dB, sendo o menor SLL obtido quando não há restrição física aplicada ao arranjo. Para o ângulo de $56,25^\circ$, o arranjo otimizado sem uma distância mínima de separação imposta apresenta uma redução de mais de 5dB em relação ao arranjo com distância mínima de separação entre os elementos de 2λ . Esse comportamento só não ocorre no ângulo de direcionamento de feixe de $78,75^\circ$, onde na direção desejada o arranjo com restrição física apresentou um melhor resultado de SLL, aproximadamente de menos 3 dB em relação ao SLL obtido no caso sem restrição física. Todavia, este é o único caso onde o SLL não tem um aumento expressivo logo após o feixe ser direcionado para um ângulo maior do que o projetado. Neste caso específico, o ângulo de direcionamento projetado é de $78,75^\circ$ e o aumento do SLL ocorre apenas quando o lóbulo principal está sendo direcionamento para um ângulo próximo de 50° . Assim, fica evidente que ao simular um arranjo esparso a distância mínima de separação entre os elementos deve ser estipulada, pois sem aplicar uma restrição física no posicionamento dos elementos os resultados obtidos não serão adequados com o arranjo físico.

4.3 Efeito dos Parâmetros Gerais da OPA no SLL

Uma vez provado que a faixa de direcionamento de feixe tem impacto significativo no valor do SLL do arranjo, foi feita a quantificação do SLL em termos do número de elementos, da distância mínima e da distância média entre os elementos. Foram considerados arranjos

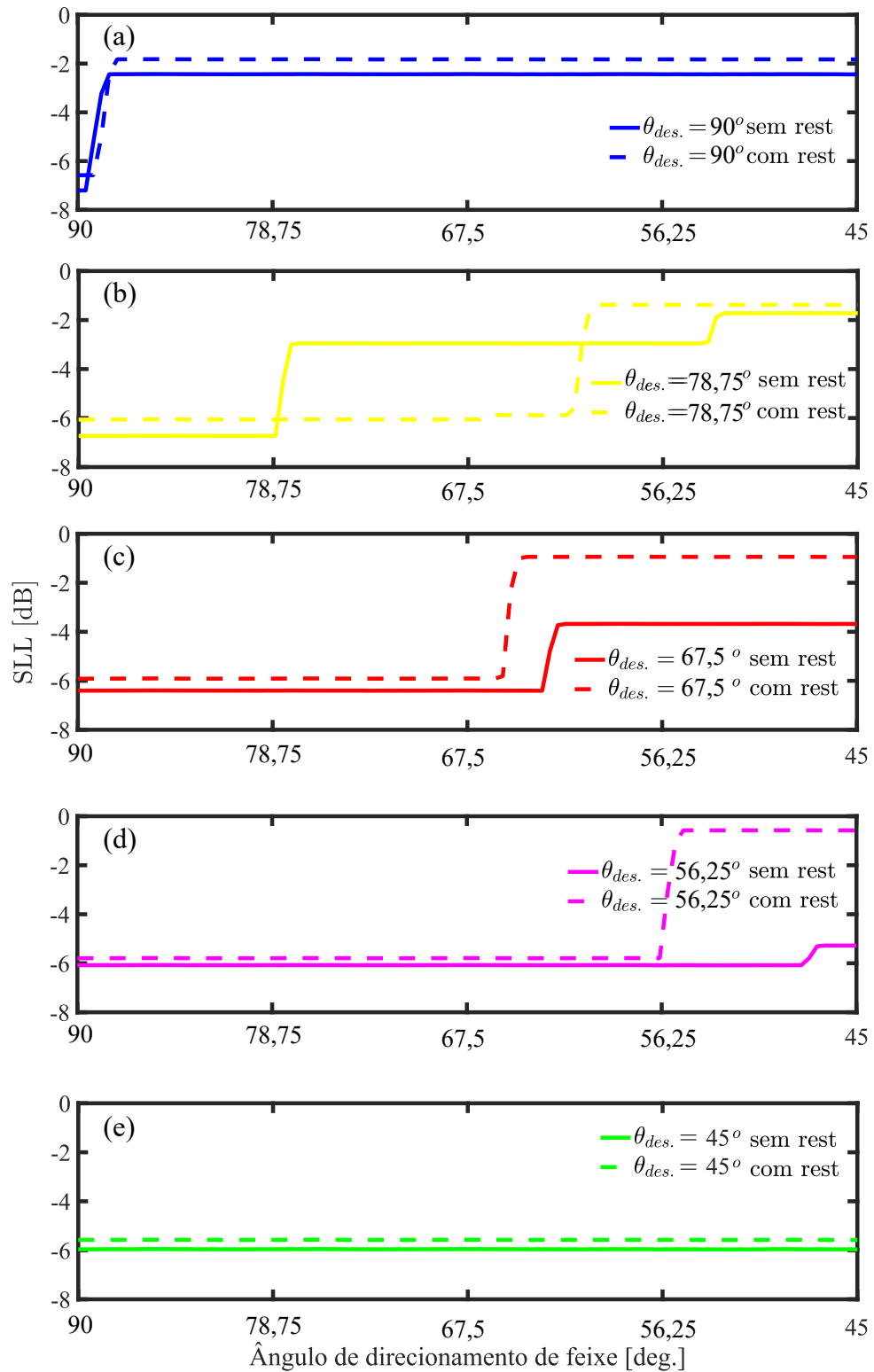


Figura 12 – SLL em termos do ângulo de direcionamento de feixe de (a) 90° , (b) $78,75^\circ$, (c) $67,50^\circ$, (d) $56,25^\circ$ e (e) 45° para um arranjo de 8 elementos, com distância média entre os elementos de 4λ sem restrição física, e posteriormente com separação mínima de 2λ .

com 4, 8 e 16 elementos e separações mínimas de 1λ , 2λ e 3λ . Devido ao elevado número de

parâmetros que interagem entre si, a Figura 13 apresenta diferentes gráficos de contornos do SLL em termos do alcance do direcionamento de feixe e das distâncias mínimas entre os elementos. Cada linha corresponde a um número de elementos: (a-c) são para 4 elementos radiantes, (d-f) são para 8 e (g-h) são para 16, enquanto cada coluna representa uma distância mínima entre elementos: (a, d, g) 1λ , (b, e, h) 2λ , e (c, f, i) 3λ .

Comparando o SLL para diferentes números de elementos e mantendo fixa a separação mínima entre os elementos, pode-se ver que quanto maior o número de elementos, menor é o valor do SLL. Este resultado corrobora o indicado em (COMAN; LAGER; LIGTHART, 2006). Por outro lado, fixando o número de elementos e aumentamos a distância mínima entre eles, nota-se um aumento do valor do SLL. Essa tendência pode ser interpretada em termos do compromisso entre o grau de liberdade na posição dos elementos do arranjo e a limitação física inerente. O grau de liberdade pode ser aumentado incrementando o número de elementos ou a razão entre a distância média e a distância mínima. A mesma argumentação pode ser aplicada para explicar porque para cada configuração existe um valor de distância média que minimiza o SLL. Assim, se a distância média é similar à distância mínima, o grau de liberdade para o posicionamento é pequeno, resultando em um SLL alto. De fato, pode-se notar que quando a distância mínima de separação é igual a distância média, ou seja, em um arranjo uniforme, o SLL obtido é sempre um valor alto, próximo a zero, para toda a faixa de direcionamento de feixe. Por outro lado, se a separação média for muito grande, a maior liberdade no posicionamento dos elementos não compensa a grande separação entre os elementos. Assim, a presença de uma distância média ótima indica que há um comprimento de arranjo ideal para minimizar o SLL. Este comportamento ocorre apenas quando restrições físicas são introduzidas e, segundo o conhecimento dos autores, não foi relatado anteriormente, uma vez que em (BAROTT; STEFFES, 2008) a análise não compara configurações com diferentes distâncias médias e distâncias mínimas.

O comprimento ideal de um arranjo esparso é um parâmetro de projeto importante e, portanto, foi analisado com mais detalhes. Sua dependência dos restantes parâmetros gerais da OPA, i.e. número de elementos, distância mínima entre elementos e ângulo de direcionamento de feixe, é mostrado na Figura 14(a). Como pode ser observado, a distância média ótima depende principalmente da separação mínima entre os elementos, aumentando a medida que esta aumenta, sendo quase independente do número de elementos e do ângulo de direcionamento de feixe. A Figura 14(b) mostra os valores do SLL quando o

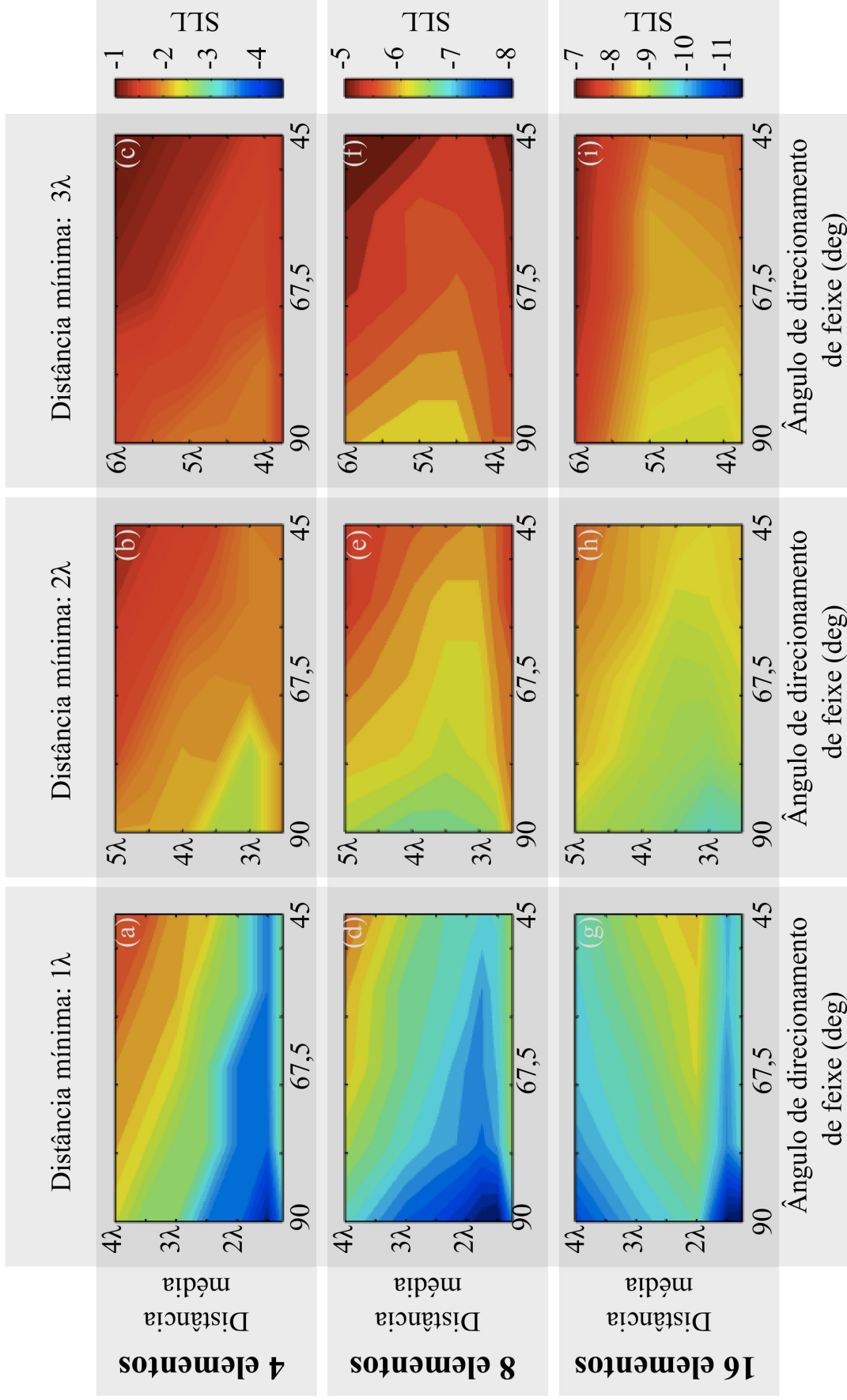


Figura 13 – SLL em termos de distância média entre os elementos e faixa de direcionamento de feixe, retratado para diferentes números de elementos radiantes e diferentes distância mínima entre os elementos. (a-c) 4 elementos, (d-f) 8 elementos, e (g-i) 16 elementos, todos apresentados para distâncias mínimas de 1λ , 2λ e 3λ .

espaçamento entre elementos é ideal para os diferentes números de elementos e separações mínimas, revelando que, em geral, na distância ideal a penalidade do SLL devido à extensão da faixa de direcionamento de feixe é relativamente pequena. No entanto, para o caso particular de uma distância de separação de 1λ , uma deterioração significativa do SLL pode ser observada para faixas de direcionamento de feixe não nulas.

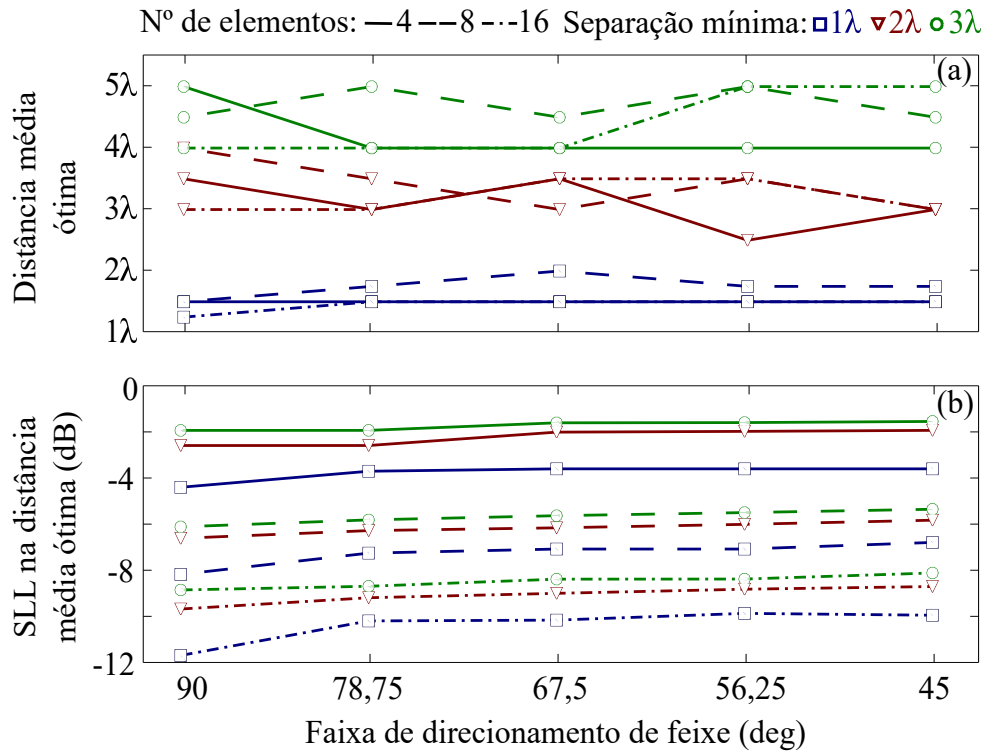


Figura 14 – (a) Distância média ótima entre os elementos e (b) Valor do SLL obtido para as distâncias médias ótimas, para as diferentes combinações de número de elementos e distâncias mínimas de separação entre os elementos.

4.4 Análise de Varredura de Frequência

Por fim, foi analisado como o desempenho do arranjo esparsos linear muda em função da frequência. A Figura 15 apresenta o valor do SLL em termos do comprimento de onda de operação, variando entre $0,5\lambda$ à $1,5\lambda$, para 4, 8 e 16 números de elementos dispostos com distância mínima de separação entre 1λ , 2λ e 3λ e distância média ótima encontrada na análise anterior de $1,5\lambda$, 3λ e 5λ , respectivamente.

Analisando a figura 15, tem-se que quanto menor o comprimento de onda utilizado na projeção do arranjo, maior é o valor do SLL obtido. Isso ocorre porque para um comprimento de onda menor, a distância de separação entre os elementos é maior, e

consecutivamente, o comprimento do arranjo também é maior, acarretando, então, em um SLL maior. A partir dos resultados obtidos na figura 15, entende-se que o comprimento de onda de operação do sistema deve ser maior do que o comprimento de onda utilizado na otimização do arranjo. Se for utilizado um comprimento de onda de operação menor do que o projetado, os resultados em relação a redução do SLL não são obtidos. Por exemplo, para um sistema operando na banda de 1,4 nm à 1,6 nm, o arranjo deve ser otimizado para o comprimento de onda de no mínimo 1,4 nm, o que representa o pior cenário. A figura 15 também mostra que aumentando o ângulo de direcionamento desejado, maior ainda deve ser o comprimento de onda de operação em relação ao comprimento de onda utilizado na otimização do arranjo. Uma vez que as posições dos elementos são obtidas, é possível escala-las de forma que o comprimento de onda também será escalável, o que é importante ao se projetar um sinal *broad band*.

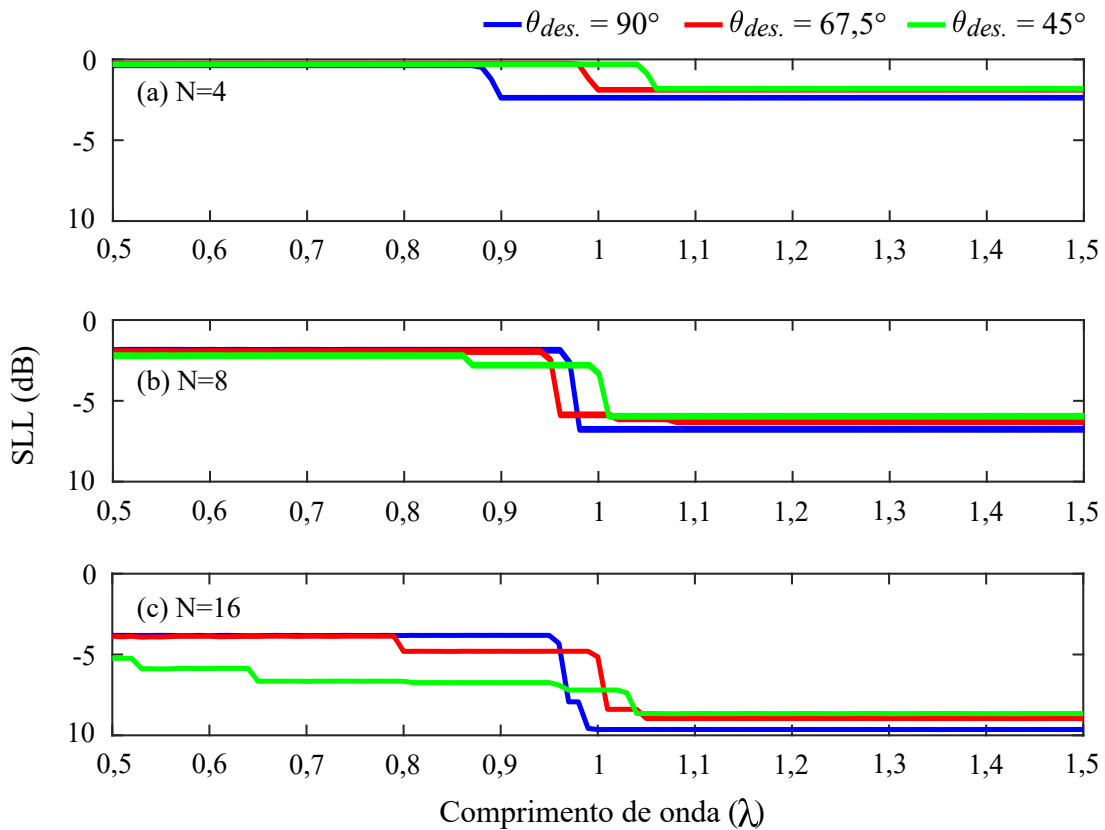


Figura 15 – SLL em termos do comprimento de onda de operação para (a) 4 elementos radiantes com distância mínima de 1λ e distância média ótima de $1,5\lambda$, (b) 8 elementos radiantes com distância mínima de 2λ e distância média ótima de 3λ e (c) 16 elementos radiantes com distância mínima de 3λ e distância média ótima de 5λ .

5 Considerações Finais

Neste trabalho de dissertação foram analisados os efeitos sobre o SLL dos diferentes parâmetros gerais de uma OPA. Em particular, estudaram-se o ângulo de direcionamento, o número de elementos, e as distâncias médias e mínimas entre estes.

Por meio de otimizações das posições dos elementos realizadas usando DE, foi observado que as posições ótimas dos elementos dependem do ângulo de direcionamento de feixe desejado. O valor do SLL também depende do ângulo do direcionamento de feixe pois a intensidade dos lóbulos laterais aumenta a medida que este se desvia da direção *broadside*. De fato, foi comprovado que os arranjos devem ser otimizados para o valor de ângulo de direcionamento de feixe mais distante da direção *broadside*, pois esta representa o pior caso possível.

Por outro lado, foram realizadas otimizações considerando diferentes combinações do número de elementos, separação mínima e média de elementos, assim como do ângulo de direcionamento de feixe. Os resultados revelam que para valores fixos de distâncias e direcionamento de feixe, um maior número de elementos resulta em uma diminuição do SLL. Enquanto ao efeito das distâncias média e mínima, pode-se observar que quanto maior é a distância média, maior é o SLL para um determinado número de elementos. Uma menor distância mínima, porém, resulta em valores de SLL menores. Em particular, pode-se dizer que a razão entre distância mínima e distância média é um parâmetro importante.

Finalmente, a análise sistemática da interação entre os diferentes parâmetros da OPA mostrou que quando são consideradas limitações físicas, i.e. distância mínima entre elementos, existe uma distância média ótima que minimiza o SLL. Cabe destacar que esta distância média ótima depende principalmente da distância mínima de separação, enquanto que é praticamente independente do número de elementos e do ângulo de direcionamento de feixe.

Concluindo, neste trabalho se apresentam algumas diretrizes para a projeção de OPAs lineares com restrições físicas operando sob direcionamento de feixe. Entre as possibilidades para trabalho futuro pode-se mencionar:

- Consideração do padrão de radiação do elemento irradiante e
- Extensão do estudo para arranjos planares.

Referências

- ACOLEYEN, K. V.; BOGAERTS, W.; JÁGERSKÁ, J.; THOMAS, N. L.; HOUDRÉ, R.; BAETS, R. Off-chip beam steering with a one-dimensional optical phased array on silicon-on-insulator. *Optics letters*, Optical Society of America, v. 34, n. 9, p. 1477–1479, 2009. Citado na página 16.
- AHMED, A.; PANG, Y.; HAJISALEM, G.; GORDON, R. Antenna design for directivity-enhanced raman spectroscopy. *International Journal of Optics*, Hindawi, v. 2012, 2012. Citado na página 17.
- ALÙ, A.; ENGHETA, N. Wireless at the nanoscale: optical interconnects using matched nanoantennas. *Physical Review Letters*, APS, v. 104, n. 21, p. 213902, 2010. Citado na página 17.
- BALANIS, C. A. Antenna theory analysis and design, a john wiley & sons. *Inc., Publication*, 2005. Citado 3 vezes nas páginas 14, 28 e 29.
- BALANIS, C. A. *Antenna theory: analysis and design*. [S.l.]: John wiley & sons, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 34.
- BAROTT, W. C.; STEFFES, P. G. Grating lobe reduction in aperiodic linear arrays of physically large antennas. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, IEEE, v. 8, p. 406–408, 2008. Citado 4 vezes nas páginas 24, 25, 26 e 49.
- BAUHAHN, P. E.; FRITZ, B. S.; KRAFTHFER, B. C. *Systems and methods for safe laser imaging, detection and ranging (lidar) operation*. [S.l.]: Google Patents, 2009. US Patent App. 12/112,517. Citado na página 18.
- BHARADWAJ, P.; DEUTSCH, B.; NOVOTNY, L. Optical antennas. *Advances in Optics and Photonics*, Optical Society of America, v. 1, n. 3, p. 438–483, 2009. Citado 3 vezes nas páginas 14, 15 e 18.
- BRAY, M. G.; WERNER, D. H.; BOERINGER, D. W.; MACHUGA, D. W. Optimization of thinned aperiodic linear phased arrays using genetic algorithms to reduce grating lobes during scanning. *IEEE Transactions on antennas and propagation*, IEEE, v. 50, n. 12, p. 1732–1742, 2002. Citado 3 vezes nas páginas 24, 25 e 26.
- CARATELLI, D.; VIGANÓ, M. Analytical synthesis technique for linear uniform-amplitude sparse arrays. *Radio Science*, AGU, v. 46, n. 04, p. 1–6, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 24.
- CARDAMA, Á.; ROBERT, J.; CASALS, J.; ROCA, L.; BORIS, S.; BATALLER, M. Antenas (vol. 3). *Univ. Politèc. de Catalunya*, 2004. Citado na página 28.
- CARDENAS, J.; FOSTER, M. A.; SHERWOOD-DROZ, N.; POITRAS, C. B.; LIRA, H. L.; ZHANG, B.; GAETA, A. L.; KHURGIN, J. B.; MORTON, P.; LIPSON, M. Wide-bandwidth continuously tunable optical delay line using silicon microring resonators. *Optics express*, Optical Society of America, v. 18, n. 25, p. 26525–26534, 2010. Citado na página 19.

CHEN, K.; YUN, X.; HE, Z.; HAN, C. Synthesis of sparse planar arrays using modified real genetic algorithm. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, IEEE, v. 55, n. 4, p. 1067–1073, 2007. Citado na página 37.

CHOWDHURY, A.; GIRI, R.; GHOSH, A.; DAS, S.; ABRAHAM, A.; SNASEL, V. Linear antenna array synthesis using fitness-adaptive differential evolution algorithm. In: IEEE. *IEEE Congress on Evolutionary Computation*. [S.l.], 2010. p. 1–8. Citado na página 37.

CHROSTOWSKI, L.; HOCHBERG, M. *Silicon photonics design: from devices to systems*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2015. Citado na página 16.

COMAN, C. I.; LAGER, I. E.; LIGTHART, L. P. Design considerations in sparse array antennas. In: IEEE. *2006 European Radar Conference*. [S.l.], 2006. p. 72–75. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 49.

DAI, Y.; CHEN, X.; OKAWACHI, Y.; TURNER-FOSTER, A. C.; FOSTER, M. A.; LIPSON, M.; GAETA, A. L.; XU, C. 1 μ s tunable delay using parametric mixing and optical phase conjugation in si waveguides. *Optics express*, Optical Society of America, v. 17, n. 9, p. 7004–7010, 2009. Citado na página 19.

DEB, A.; ROY, J. S.; GUPTA, B. Performance comparison of differential evolution, particle swarm optimization and genetic algorithm in the design of circularly polarized microstrip antennas. *IEEE transactions on antennas and propagation*, IEEE, v. 62, n. 8, p. 3920–3928, 2014. Citado na página 37.

DEISSLER, T.; THIELECKE, J. Uwb slam with rao-blackwellized monte carlo data association. In: IEEE. *2010 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation*. [S.l.], 2010. p. 1–5. Citado na página 37.

DING, X.; WANG, B.-Z.; ZHENG, G.; LI, X.-M. Design and realization of a ga-optimized vhf/uhf antenna with "on-body" matching network. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, IEEE, v. 9, p. 303–306, 2010. Citado na página 37.

DING, Y.; YE, F.; PEUCHERET, C.; OU, H.; MIYAMOTO, Y.; MORIOKA, T. On-chip grating coupler array on the soi platform for fan-in/fan-out of mcfs with low insertion loss and crosstalk. *Optics Express*, Optical Society of America, v. 23, n. 3, p. 3292–3298, 2015. Citado na página 17.

DOYLEND, J.; KNIGHTS, A. Design and simulation of an integrated fiber-to-chip coupler for silicon-on-insulator waveguides. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, IEEE, v. 12, n. 6, p. 1363–1370, 2006. Citado na página 16.

FADHIL, H. A.; AMPHAWAN, A.; SHAMSUDDIN, H. A.; ABD, T. H.; AL-KHAF AJI, H. M.; ALJUNID, S.; AHMED, N. Optimization of free space optics parameters: An optimum solution for bad weather conditions. *Optik*, Elsevier, v. 124, n. 19, p. 3969–3973, 2013. Citado na página 18.

FISCHER, U. C.; POHL, D. Observation of single-particle plasmons by near-field optical microscopy. *Physical review letters*, APS, v. 62, n. 4, p. 458, 1989. Citado na página 14.

FROMM, D. P.; SUNDARAMURTHY, A.; KINKHABWALA, A.; SCHUCK, P. J.; KINO, G. S.; MOERNER, W. *Exploring the chemical enhancement for surface-enhanced Raman scattering with Au bowtie nanoantennas*. [S.l.]: American Institute of Physics, 2006. Citado na página 17.

GONZALEZ-VALDES, B.; ALLAN, G.; RODRIGUEZ-VAQUEIRO, Y.; ALVAREZ, Y.; MANTZAVINOS, S.; NICKERSON, M.; BERKOWITZ, B.; MARTI, J.; LAS-HERAS, F.; RAPPAPORT, C. M. *et al.* Sparse array optimization using simulated annealing and compressed sensing for near-field millimeter wave imaging. *IEEE transactions on antennas and propagation*, IEEE, v. 62, n. 4, p. 1716–1722, 2013. Citado na página 37.

GOUDOS, S. K.; SIAKAVARA, K.; SAMARAS, T.; VAFIADIS, E. E.; SAHALOS, J. N. Sparse linear array synthesis with multiple constraints using differential evolution with strategy adaptation. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, IEEE, v. 10, p. 670–673, 2011. Citado 4 vezes nas páginas 24, 25, 26 e 37.

GROSS, F. B.; VOLAKIS, J. Smart antennas. In: *Smart Antennas for Wireless Communications with MATLAB*. [S.l.]: McGraw-hill, 2005. Citado na página 19.

HALIR, R.; ORTEGA-MONUX, A.; SCHMID, J. H.; ALONSO-RAMOS, C.; LAPOINTE, J.; XU, D.-X.; WANGÜEMERT-PÉREZ, J. G.; MOLINA-FERNANDEZ, I.; JANZ, S. Recent advances in silicon waveguide devices using sub-wavelength gratings. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, IEEE, v. 20, n. 4, p. 279–291, 2013. Citado na página 16.

HATAB, N. A.; HSUEH, C.-H.; GADDIS, A. L.; RETTERER, S. T.; LI, J.-H.; ERES, G.; ZHANG, Z.; GU, B. Free-standing optical gold bowtie nanoantenna with variable gap size for enhanced raman spectroscopy. *Nano letters*, ACS Publications, v. 10, n. 12, p. 4952–4955, 2010. Citado na página 17.

HAUPT, R. L. Thinned arrays using genetic algorithms. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, IEEE, v. 42, n. 7, p. 993–999, 1994. Citado na página 37.

HAWES, M. B.; LIU, W. Location optimization of robust sparse antenna arrays with physical size constraint. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, IEEE, v. 11, p. 1303–1306, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 24, 25 e 26.

HAWES, M. B.; LIU, W. Compressive sensing-based approach to the design of linear robust sparse antenna arrays with physical size constraint. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, IET, v. 8, n. 10, p. 736–746, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.

HAWES, M. B.; LIU, W. Sparse array design for wideband beamforming with reduced complexity in tapped delay-lines. *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, IEEE, v. 22, n. 8, p. 1236–1247, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.

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. Citado na página 16.

HOLLAND, J. H. *et al.* *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. [S.l.]: MIT press, 1992. Citado na página 37.

INOUE, Y.; KAWATA, S. Near-field scanning optical microscope with a metallic probe tip. *Optics letters*, Optical Society of America, v. 19, n. 3, p. 159–161, 1994. Citado na página 14.

- JOHNSON, J. M.; RAHMAT-SAMII, Y. Genetic algorithms and method of moments (ga/mom) for the design of integrated antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, IEEE, v. 47, n. 10, p. 1606–1614, 1999. Citado na página 37.
- KASAYA, K.; MITOMI, O.; NAGANUMA, M.; KONDO, Y.; NOGUCHI, Y. A simple laterally tapered waveguide for low-loss coupling to single-mode fibers. *IEEE Photonics Technology Letters*, IEEE, v. 5, n. 3, p. 345–347, 1993. Citado na página 16.
- KENNEDY, J.; EBERHART, R. Particle swarm optimization. In: IEEE. *Proceedings of ICNN'95-International Conference on Neural Networks*. [S.l.], 1995. v. 4, p. 1942–1948. Citado na página 37.
- KHODIER, M. M.; CHRISTODOULOU, C. G. Linear array geometry synthesis with minimum sidelobe level and null control using particle swarm optimization. *IEEE transactions on antennas and propagation*, IEEE, v. 53, n. 8, p. 2674–2679, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.
- KRASNOK, A. E.; MIROSHNICHENKO, A. E.; BELOV, P. A.; KIVSHAR, Y. S. All-dielectric optical nanoantennas. *Optics Express*, Optical Society of America, v. 20, n. 18, p. 20599–20604, 2012. Citado na página 15.
- LANGGUTH, L.; SZUBA, A.; MANN, S. A.; GARNETT, E. C.; KOENDERINK, G. H.; KOENDERINK, A. F. Nano-antenna enhanced two-focus fluorescence correlation spectroscopy. *Scientific Reports*, Nature Publishing Group, v. 7, n. 1, p. 5985, 2017. Citado na página 17.
- LEE, J.; LEE, Y.; KIM, H. Decision of error tolerance in array element by the monte carlo method. *IEEE transactions on antennas and propagation*, IEEE, v. 53, n. 4, p. 1325–1331, 2005. Citado na página 37.
- LEMES, D. L.; HECKLER, M. V.; GREDA, L. A.; FARIAS, R. L. Analysis of dual-band non-uniformly spaced arrays for mobile communications. In: IEEE. *2017 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*. [S.l.], 2017. p. 1–5. Citado na página 37.
- LI, J.; REN, S.; GUO, C. Synthesis of sparse arrays based on ciga (convex improved genetic algorithm). *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, SciELO Brasil, v. 19, n. 4, p. 444–456, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.
- LI, M.; WEI, H.; ZHAO, J.; TAO, Q.; YOU, Z. A novel linear sparse array with reconfigurable pixel antenna elements. *International Journal of Antennas and Propagation*, Hindawi, v. 2020, 2020. Citado na página 24.
- MALHOITRE, S.; FOWLER, D.; GARCIA, S.; LEMONNIER, O.; TYLER, N.; RABAUD, W. Silicon nitride photonic platform for lidar applications. In: IEEE. *2018 IEEE 15th International Conference on Group IV Photonics (GFP)*. [S.l.], 2018. p. 1–2. Citado na página 18.
- MALIK, A.; SINGH, P. Free space optics: current applications and future challenges. *International Journal of Optics*, Hindawi, v. 2015, 2015. Citado na página 17.

- MALMQVIST, L.; HERTZ, H. Two-color trapped-particle optical microscopy. *Optics letters*, Optical Society of America, v. 19, n. 12, p. 853–855, 1994. Citado na página 14.
- MARTINEZ, J. M.; SANTOS, S. A. Métodos computacionais de otimização. *Colóquio Brasileiro de Matemática, Apostilas*, v. 20, 1995. Citado na página 36.
- MCMANAMON, P. F.; DORSCHNER, T. A.; CORKUM, D. L.; FRIEDMAN, L. J.; HOBBS, D. S.; HOLZ, M.; LIBERMAN, S.; NGUYEN, H. Q.; RESLER, D. P.; SHARP, R. C. *et al.* Optical phased array technology. *Proceedings of the IEEE*, IEEE, v. 84, n. 2, p. 268–298, 1996. Citado na página 19.
- MITOMI, O.; KASAYA, K.; MIYAZAWA, H. Design of a single-mode tapered waveguide for low-loss chip-to-fiber coupling. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, IEEE, v. 30, n. 8, p. 1787–1793, 1994. Citado na página 16.
- OZBAY, E. Plasmonics: merging photonics and electronics at nanoscale dimensions. *science*, American Association for the Advancement of Science, v. 311, n. 5758, p. 189–193, 2006. Citado na página 15.
- PANDURO, M. A.; BRIZUELA, C. A.; BALDERAS, L. I.; ACOSTA, D. A. A comparison of genetic algorithms, particle swarm optimization and the differential evolution method for the design of scannable circular antenna arrays. *Progress In Electromagnetics Research*, EMW Publishing, v. 13, p. 171–186, 2009. Citado na página 37.
- PÉREZ-GALACHO, D.; MARRIS-MORINI, D.; STOFFER, R.; CASSAN, E.; BAUDOT, C.; KORTHORST, T.; BOEUF, F.; VIVIEN, L. Simplified modeling and optimization of silicon modulators based on free-carrier plasma dispersion effect. *Optics Express*, Optical Society of America, v. 24, n. 23, p. 26332–26337, 2016. Citado na página 19.
- PHARE, C. T.; SHIN, M. C.; SHARMA, J.; AHASAN, S.; KRISHNASWAMY, H.; LIPSON, M. Silicon optical phased array with grating lobe-free beam formation over 180 degree field of view. In: OPTICAL SOCIETY OF AMERICA. *CLEO: Science and Innovations*. [S.l.], 2018. p. SM3I–2. Citado na página 17.
- PITA, J. L.; ALDAYA, I.; SANTANA, O. J.; DAINESE, P.; GABRIELLI, L. H. *et al.* Side-lobe level reduction in bio-inspired optical phased-array antennas. *Optics Express*, Optical Society of America, v. 25, n. 24, p. 30105–30114, 2017. Citado na página 20.
- POULTON, C. V.; VERMEULEN, D.; HOSSEINI, E.; TIMURDOGAN, E.; SU, Z.; MOSS, B.; WATTS, M. R. Lens-free chip-to-chip free-space laser communication link with a silicon photonics optical phased array. In: OPTICAL SOCIETY OF AMERICA. *Frontiers in Optics*. [S.l.], 2017. p. FW5A–3. Citado na página 17.
- POULTON, C. V.; YAACOBI, A.; COLE, D. B.; BYRD, M. J.; RAVAL, M.; VERMEULEN, D.; WATTS, M. R. Coherent solid-state lidar with silicon photonic optical phased arrays. *Optics letters*, Optical Society of America, v. 42, n. 20, p. 4091–4094, 2017. Citado na página 18.
- QING, A. *Differential evolution: fundamentals and applications in electrical engineering*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 38.
- QUING, A. *Differential Evolution: Fundamentals and Applications in Electrical Engineering*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2009. Citado 5 vezes nas páginas 36, 37, 38, 39 e 40.

RAJI, M. F.; ZHAO, H.; MONDAY, H. N. Fast optimization of sparse antenna array using numerical green's function and genetic algorithm. *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, Wiley Online Library, p. e2544, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.

RATTAN, M.; PATTERH, M.; SOHI, B. Optimization of circular antenna arrays of isotropic radiators using simulated annealing. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, Cambridge University Press, v. 1, n. 5, p. 441, 2009. Citado na página 37.

RENGARAJAN, S. R.; ZAWADZKI, M. S.; HODGES, R. E. Waveguide-slot array antenna designs for low-average-sidelobe specifications. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, IEEE, v. 52, n. 6, p. 89–98, 2010. Citado na página 37.

ROBINSON, J.; RAHMAT-SAMII, Y. Particle swarm optimization in electromagnetics. *IEEE transactions on antennas and propagation*, IEEE, v. 52, n. 2, p. 397–407, 2004. Citado na página 37.

ROCCA, P.; OLIVERI, G.; MASSA, A. Differential evolution as applied to electromagnetics. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, IEEE, v. 53, n. 1, p. 38–49, 2011. Citado na página 37.

RUIZ, J. L. P. *et al.* Cmos-compatible compact photonic antennas: Antenas fotônicas compactas compatíveis com a tecnologia cmos. [sn], 2018. Citado na página 16.

SANDI, E.; ZULKIFLI, F. Y.; RAHARDJO, E. T. A hybrid technique using combinatorial cyclic difference sets and binomial amplitude tapering for linear sparse array antenna design. *Advanced Electromagnetics*, v. 5, n. 3, p. 73–79, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 24.

SCHLOSSER, E. R.; FARIAS, R. L.; HECKLER, M. V.; MACHADO, R. Optimization of switched-beam arrays for communication systems. In: IEEE. *2014 11th International Symposium on Wireless Communications Systems (ISWCS)*. [S.l.], 2014. p. 579–583. Citado na página 37.

SOUZA, B. D. P. de; JUNIOR, A. E. F.; ABBADE, M. L. F.; ALDAYA, I. Side-lobe level reduction in 1d photonic array antennas. In: IEEE. *2018 SBFoton International Optics and Photonics Conference (SBFoton IOPC)*. [S.l.], 2018. p. 1–4. Citado 3 vezes nas páginas 23, 24 e 26.

STORN, R.; PRICE, K. De-a simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous space. *Technical report*, v. 25, n. 6, p. 95–102, 1995. Citado na página 38.

STORN, R.; PRICE, K. Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of global optimization*, Springer, v. 11, n. 4, p. 341–359, 1997. Citado na página 38.

SUÁREZ, S.; FERNANDEZ, G. L.; ARREBOLA, M.; ONTAÑÓN, L. F. H.; ANDRES, F. L. H. Experimental validation of linear aperiodic array for grating lobe suppression. *Progress In Electromagnetics Research*, EMW Publishing, v. 26, p. 193–203, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 24.

- SUN, J.; TIMURDOGAN, E.; YAACOBI, A.; HOSSEINI, E. S.; WATTS, M. R. Large-scale nanophotonic phased array. *Nature*, Nature Publishing Group, v. 493, n. 7431, p. 195–199, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 19.
- SYNGE, E. Xxxviii. a suggested method for extending microscopic resolution into the ultra-microscopic region. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, Taylor & Francis, v. 6, n. 35, p. 356–362, 1928. Citado na página 14.
- TAHERI, M. S.; MALLAHZADEH, A.; FOUDAZI, A. Shaped beam synthesis for shaped reflector antenna using pso algorithm. In: IEEE. *2012 6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*. [S.l.], 2012. p. 1–5. Citado na página 37.
- TAILLAERT, D.; BOGAERTS, W.; BAETS, R. Efficient coupling between submicron soi-waveguides and single-mode fibers. In: *Proceedings of Symposium IEEE/LEOS Benelux Chapter*. [S.l.: s.n.], 2003. p. 289–292. Citado na página 16.
- TOLFO, S. M. Desenvolvimento de uma ferramenta computacional para síntese de redes de antenas. Universidade Federal do Pampa, 2016. Citado na página 37.
- TRUCCO, A.; MURINO, V. Stochastic optimization of linear sparse arrays. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, IEEE, v. 24, n. 3, p. 291–299, 1999. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.
- VIVIEN, L.; PASCAL, D.; LARDENOIS, S.; MARRIS-MORINI, D.; CASSAN, E.; GRILLOT, F.; LAVAL, S.; FÉDÉLI, J.-M.; MELHAOUI, L. E. Light injection in soi microwaveguides using high-efficiency grating couplers. *Journal of Lightwave technology*, IEEE, v. 24, n. 10, p. 3810–3815, 2006. Citado na página 16.
- WANG, R.-Q.; JIAO, Y.-C.; ZHANG, H.; ZHOU, Z. Synthesis of unequally spaced linear arrays using modified differential evolution algorithm. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, IET, v. 12, n. 12, p. 1908–1912, 2018. Citado 3 vezes nas páginas 24, 25 e 37.
- WESSEL, J. Surface-enhanced optical microscopy. *JOSA B*, Optical Society of America, v. 2, n. 9, p. 1538–1541, 1985. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 15.
- WILLEBRAND, H. A.; GHUMAN, B. S. Fiber optics without fiber. *IEEE spectrum*, IEEE, v. 38, n. 8, p. 40–45, 2001. Citado na página 18.
- 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*, Optical Society of America, v. 25, n. 11, p. 12926–12934, 2017. Citado na página 17.
- YANG, Z.; FANG, N.; WU, A.; CHEN, J.; ZHANG, M.; WANG, X.; ZOU, S. Fabrication and characterization of integrated three-dimensional linear taper on silicon-on-insulator. *Optical Engineering*, International Society for Optics and Photonics, v. 48, n. 3, p. 030503, 2009. Citado na página 16.
- YOSHIMOTO, E.; HECKLER, M. V. Optimization of planar antenna arrays using the firefly algorithm. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, SciELO Brasil, v. 18, n. 1, p. 126–140, 2019. Citado na página 19.

ZHANG, F.; JIA, W.; YAO, M. Linear aperiodic array synthesis using differential evolution algorithm. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, IEEE, v. 12, p. 797–800, 2013. Citado 3 vezes nas páginas 24, 25 e 37.

ZHANG, X.; ZHANG, X. Thinning of antenna array via adaptive memetic particle swarm optimization. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, SpringerOpen, v. 2017, n. 1, p. 1–7, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.