

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**OTIMIZAÇÃO, SELEÇÃO E APONTAMENTO  
DE ARRANJOS LINEARES DE ANTENAS  
ATRAVÉS DA TÉCNICA DE OTIMIZAÇÃO  
POR ENXAME DE PARTÍCULAS**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Victoria Dala Pegorara Souto**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2017**

**OTIMIZAÇÃO, SELEÇÃO E APONTAMENTO DE ARRANJOS  
LINEARES DE ANTENAS ATRAVÉS DA TÉCNICA DE  
OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS**

**Victoria Dala Pegorara Souto**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Área de Concentração em  
Processamento de Energia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM,  
RS),

como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Mestre em Engenharia Elétrica**

**Orientador: Prof. Dr. Alexandre Campos**

**Coorientador: Prof. Dr. Natanael Rodrigues Gomes**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2017**

Dala Pegorara Souto, Victoria

Otimização, Seleção e Apontamento de Arranjos Lineares de Antenas Através da Técnica de Otimização por Enxame de Partículas / por Victoria Dala Pegorara Souto. – 2017.

125 f.: il.; 30 cm.

Orientador: Alexandre Campos

Coorientador: Natanael Rodrigues Gomes

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, RS, 2017.

1. Antenas. 2. Otimização. 3. Otimização Por Enxame de Partículas. 4. Arranjos de Antenas. I. Campos, Alexandre. II. Rodrigues Gomes, Natanael. III. Título.

---

© 2017

Todos os direitos autorais reservados a Victoria Dala Pegorara Souto. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail: victoria.souto@gmail.com

**Universidade Federal de Santa Maria  
Centro de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,  
aprova a Dissertação de Mestrado

**OTIMIZAÇÃO, SELEÇÃO E APONTAMENTO DE ARRANJOS  
LINEARES DE ANTENAS ATRAVÉS DA TÉCNICA DE OTIMIZAÇÃO  
POR ENXAME DE PARTÍCULAS**

elaborada por  
**Victoria Dala Pegorara Souto**

como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Mestre em Engenharia Elétrica**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

**Alexandre Campos, Dr.**  
(Orientador)

**Natanael Rodrigues Gomes, Dr.**  
(Coorientador)

**Renato Machado, Dr. (UFSM)**

**Bartolomeu Ferreira Uchôa Filho, Dr. (UFSC)**

Santa Maria, 24 de Fevereiro de 2017.

*Dedico este trabalho a minha mãe e aos meus avós...*

---

# AGRADECIMENTOS

À minha mãe Elaine que me deu suporte para chegar até aqui.

Aos meus avós Deolinda e Willy, que mesmo sem estarem presentes contribuíram para que eu pudesse chegar até aqui e alcançar meus objetivos.

Ao meu orientador Prof. Alexandre Campos pela oportunidade e ao meu coorientador Prof. Natanael Rodrigues Gomes, por sua prontidão no esclarecimento das mais distintas dúvidas e apoio na elaboração deste trabalho.

À Universidade Federal de Santa Maria e ao PPGEE pela confiança depositada e por ter me concedido a oportunidade de cursar a pós-graduação.

Enfim, agradeço a todas as pessoas que de alguma maneira contribuíram para a realização deste trabalho e me apoiaram no decorrer deste processo.

*"Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar.  
Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota."*

— MADRE TERESA DE CALCUTA

---

# RESUMO

Dissertação de Mestrado  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica  
Universidade Federal de Santa Maria

## **OTIMIZAÇÃO, SELEÇÃO E APONTAMENTO DE ARRANJOS LINEARES DE ANTENAS ATRAVÉS DA TÉCNICA DE OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS**

AUTOR: VICTORIA DALA PEGORARA SOUTO

ORIENTADOR: ALEXANDRE CAMPOS

COORIENTADOR: NATANAEL RODRIGUES GOMES

Local da Defesa e Data: Santa Maria, 24 de Fevereiro de 2017.

A Técnica de Otimização por Enxame de Partículas tem sido amplamente estudada pela comunidade científica, pois apresenta-se como um processo de otimização estocástico com alta aplicabilidade em diversas áreas, como por exemplo no Eletromagnetismo. Inúmeras pesquisas já foram realizadas qualificando a Otimização por Enxame de Partículas para otimização de problemas eletromagnéticos, pois os mesmos podem não apresentar soluções analíticas praticáveis. Devido a isto, este trabalho utilizou a técnica de Otimização por Enxame de Partículas para realizar a otimização de um Arranjo Linear de Antenas composto por fontes puntiformes. Tal otimização foi realizada com o objetivo de obter a redução do Nível dos Lóbulos Secundários e Ângulo de Meia Potência de um Arranjo Linear de Antenas, além de realizar o apontamento do feixe principal para direções pré-determinadas e selecionar as antenas do arranjo que devem estar ligadas/desligadas para obter o padrão de radiação desejado. Os casos de otimização apresentados utilizam variáveis contínuas e discretas, por este motivo neste trabalho foi proposta uma nova versão da técnica de Otimização por Enxame de Partículas, a qual considera variáveis contínuas e discretas, simultaneamente.

**Palavras-chave:** Antenas. Otimização. Otimização Por Enxame de Partículas. Arranjos de Antenas.

---

# ABSTRACT

Master Thesis  
Graduate Program in Electrical Engineering  
Federal University of Santa Maria

**OPTIMIZATION, SELECTION AND BEAMFORMING FOR LINEAR ANTENNA  
ARRAYS BY USING PARTICLE SWARM OPTIMIZATION TECHNIQUE**

**AUTHOR: VICTORIA DALA PEGORARA SOUTO**

**ADVISOR: ALEXANDRE CAMPOS**

**COADVISOR: NATANAEL RODRIGUES GOMES**

Defense Place and Date: Santa Maria, February 24<sup>th</sup>, 2017.

The Particle Swarm Optimization Technique has been widely studied by researchers, since they act as a stochastic optimization process which can be applied in many areas, for instance in electromagnetism. Researches have evaluated Particle Swarm Optimization in electromagnetic problems, since those usually are very complex and do not present practical analytical solutions. This work employs the Particle Swarm Optimization Technique to perform the optimization of a Linear Antennas Array composed of punctiform sources. This optimization aims to obtain a reduction in the Side Lobes Levels and Half Power Beamwidth of a Linear Array, besides having the main lobe pointed to specific directions. To this end, the antennas of the array must be turned on/off to obtain the desired radiation pattern must be selected. The optimization cases presented in this work use continuous and discrete variables, so in this work a new version of the Optimization by Particle Swarm Optimization technique was proposed, which considers continuous and discrete variables simultaneously.

**Keywords:** Antennas, Optimization, Particle Swarm Optimization, Antenna Array.

---

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Exemplo de diagramas normalizados de campo (em escala linear), de potência (em escala linear) e de potência (em dB).....	26
Figura 2.2 – Lóbulos de radiação do diagrama de radiação de uma antena.....	27
Figura 2.3 – Regiões de Campo de Antenas. ....	28
Figura 2.4 – Exemplo de diagrama de potência e representação da Largura de Feixe de Meia Potência e Largura de Feixe Entre Nulos. ....	33
Figura 2.5 – Geometria de um arranjo linear de antenas com dois elementos .....	34
Figura 2.6 – Arranjo linear de antenas com $N$ elementos .....	35
Figura 2.7 – Arranjo transversal ou <i>Broadside</i> .....	36
Figura 2.8 – Diagrama de radiação de um arranjo transversal ou <i>Broadside</i> .....	37
Figura 2.9 – Arranjo Longitudinal ou <i>End-Fire</i> .....	38
Figura 2.10 – Diagrama de radiação de um arranjo Longitudinal ou <i>End-Fire</i> .....	38
Figura 2.11 – Arranjo de Antenas Simétrico com $N$ par e ímpar. ....	39
Figura 2.12 – Triângulo de Pascal para um Arranjo de Antenas com $N = 10$ . ....	42
Figura 2.13 – Diagramas de Radiação de um Arranjo Uniforme com 6, 10, 16 e 20 elementos linearmente espaçados de $\lambda/4$ , $\lambda/2$ e $3\lambda/4$ . ....	44
Figura 2.14 – Diagrama de Radiação de um Arranjo de Dolph-Tschebyscheff com 6, 10, 16 e 20 elementos linearmente espaçados de $\lambda/4$ , $\lambda/2$ e $3\lambda/4$ . ....	45
Figura 2.15 – Diagrama de Radiação de um Arranjo Binomial com 6, 10, 16 e 20 elementos linearmente espaçados de $\lambda/4$ , $\lambda/2$ e $3\lambda/4$ . ....	46
Figura 2.16 – Diagrama de Radiação de um Arranjo de Hamming com 6, 10, 16 e 20 elementos linearmente espaçados de $\lambda/4$ , $\lambda/2$ e $3\lambda/4$ . ....	47
Figura 2.17 – Diagrama de Radiação de um Arranjo de Blackman com 6, 10, 16 e 20 elementos linearmente espaçados de $\lambda/4$ , $\lambda/2$ e $3\lambda/4$ . ....	48
Figura 3.1 – Fluxograma da Técnica de Otimização por Enxame de Partículas. ....	52
Figura 4.1 – Fluxograma do PSO. ....	59
Figura 4.2 – Otimização do RSSL, considerando como variável a amplitude dos elementos de um arranjo linear de antenas com: (a) $N = 6$ ; (b) $N = 10$ ; (c) $N = 16$ ; (d) $N = 20$ . ....	63
Figura 4.3 – Otimização do RSSL, considerando como variável a distância entre os elementos de um arranjo linear de antenas com: (a) $N = 6$ ; (b) $N = 10$ ; (c) $N = 16$ ; (d) $N = 20$ . ....	63

Figura 4.4 – Otimização do RSSL, considerando como variáveis a amplitude de excitação e a distância entre os elementos de um arranjo linear de antenas com 6, 10, 16 e 20 elementos .....	64
Figura 4.5 – Otimização do HPBW, considerando como variável de otimização a amplitude dos elementos de um arranjo de antenas com: (a) N = 6; (b) N = 10; (c) N = 16; (d) N = 20. ....	67
Figura 4.6 – Otimização do HPBW, considerando como variável de otimização a distância entre os elementos de um arranjo de antenas com: (a) N = 6; (b) N = 10; (c) N = 16; (d) N = 20.....	67
Figura 4.7 – Otimização do HPBW, considerando como variáveis de otimização a amplitude de excitação dos elementos e a distância entre os elementos de um arranjo de antenas com 6, 10, 16 e 20 elementos.....	68
Figura 4.8 – Otimização do RSSL e HPBW, considerando como variável de otimização a amplitude dos elementos de um arranjo de antenas com: (a) N = 6; (b) N = 10; (c) N = 16 e (d) N = 20. ....	72
Figura 4.9 – Otimização do RSSL e HPBW, considerando como variável de otimização a distância entre os elementos de um arranjo de antenas com: (a) N = 6; (b) N = 10; (c) N = 16 e (d) N = 20. ....	73
Figura 4.10 – Otimização do RSSL e HPBW, considerando como variáveis de otimização a amplitude de excitação dos elementos e a distância entre os elementos de um arranjo de antenas com 6, 10, 16 e 20 elementos. ....	73
Figura 5.1 – Apontamento do Feixe Principal, considerando um Arranjo Linear de Antenas, com $d = \lambda/4$ e (a) N = 6; (b) N = 10; (c) N = 16; (d) N = 20. ....	81
Figura 5.2 – Apontamento do Feixe Principal, considerando um Arranjo Linear de Antenas, com $d = \lambda/2$ e (a) N = 6; (b) N = 10; (c) N = 16; (d) N = 20. ....	82
Figura 5.3 – Apontamento do Feixe Principal e Otimização do RSSL, considerando como variáveis de otimização a amplitude e fase de excitação de um Arranjo Linear de Antenas, com $d = \lambda/4$ e $d = \lambda/2$ para: (a) N = 6; (b) N = 10; (c) N = 16; (d) N = 20.....	85
Figura 5.4 – Apontamento do Feixe Principal e otimização do RSSL, considerando como variáveis de otimização o ângulo de excitação de fase e a distância entre os elementos de um arranjo linear de antenas com: (a) N = 6; (b) N = 10; (c) N = 16 e (d) N = 20.....	87
Figura 5.5 – Apontamento do Feixe Principal e otimização do RSSL, considerando como variáveis de otimização a amplitude e fase de excitação dos elementos e a distância entre os elementos de um arranjo linear de antenas com 6, 10, 16 e 20 elementos .....	88
Figura 5.6 – Apontamento do Feixe Principal e Otimização do HPBW, considerando como variáveis de otimização a amplitude e fase de excitação de um Arranjo Linear de Antenas, com $d = \lambda/4$ e $d = \lambda/2$ para: (a) N = 6; (b) N = 10; (c) N = 16; (d) N = 20.....	91
Figura 5.7 – Apontamento do Feixe Principal e Otimização do HPBW, considerando como variáveis de otimização o ângulo de excitação de fase e a distância entre os elementos de um Arranjo Linear de Antenas com: (a) N = 6; (b) N = 10; (c) N = 16; (d) N = 20.....	93

Figura 5.8 – Diagramas de Radiação obtidos através do PSO implementado considerando como variáveis de otimização a amplitude e fase de excitação e a distância entre os elementos de um arranjo de antenas com: (a) $\theta_0 = 60^\circ$ ; (b) $\theta_0 = 45^\circ$ e (c) $\theta_0 = 30^\circ$ .....	94
Figura 5.9 – Diagramas de radiação obtidos através do apontamento do feixe principal e otimização do RSSL e HPBW, considerando como variáveis de otimização amplitude e o ângulo de excitação de fase de cada elemento de um arranjo linear de antenas com (a) N = 6; (b) N = 10; (c) N = 16; (d) N = 20.....	99
Figura 5.10 – Apontamento do Feixe Principal e Otimização do RSSL e HPBW, considerando como variáveis de otimização o ângulo de excitação de fase de cada elemento e a distância entre os elementos de um Arranjo Linear de Antenas com: (a) N = 6; (b) N = 10; (c) N = 16; (d) N = 20. ....	100
Figura 5.11 – Diagramas de radiação obtidos através do apontamento do feixe principal e otimização do RSSL e HPBW, considerando como variáveis de otimização a distância entre os elementos do arranjo e a amplitude e ângulo de excitação de fase de cada elemento de um arranjo linear de antenas com (a) N = 6; (b) N = 10; (c) N = 16; (d) N = 20.....	101
Figura 6.1 – Diagramas de Radiação Obtidos Através da Síntese de um Arranjo Linear de Antenas via PSO, considerando (a) $\theta_0 = 90^\circ$ ; (b) $\theta_0 = 60^\circ$ ; (c) $\theta_0 = 45^\circ$ ; (d) $\theta_0 = 30^\circ$ .....	107
Figura 6.2 – Fluxograma representando o funcionamento do PSO-Binário. ....	109
Figura 6.3 – Diagramas de Radiação Obtidos pelo PSO Binário, para cada diagrama obteve-se: (a) N = 10, com 1 Antena Desligada; (b) N = 10, com 2 Antenas Desligadas; (c) N = 10, com 2 Antenas Desligadas; (d) N = 10, com 2 Antenas Desligadas. ....	111
Figura 6.4 – Fluxograma representando o funcionamento do PSO-Híbrido. ....	112
Figura 6.5 – Diagramas de Radiação Obtidos Através do PSO Híbrido, para cada caso obteve-se: (a) N = 10, com 5 Antenas Desligadas; (b) N = 10, com 3 Antenas Desligadas; (c) N = 16, com 9 Antenas Desligadas ; (d) N = 10, com 5 Antenas Desligadas ....	114
Figura A.1 – Interface Simulador PSO.....	124

---

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Tabela de Condutividade Elétrica .....	25
Tabela 2.2 – Valores de RSSL e HPBW obtidos para um Arranjo Uniforme. ....	43
Tabela 2.3 – Valores de RSSL e HPBW obtidos para um Arranjo de Dolph-Tschebyscheff. ....	44
Tabela 2.4 – Valores de RSSL e HPBW obtidos para um Arranjo Binomial. ....	45
Tabela 2.5 – Valores de RSSL e HPBW obtidos para um Arranjo de Hamming. ....	46
Tabela 2.6 – Valores de RSSL e HPBW obtidos para um Arranjo de Blackman. ....	47
Tabela 4.1 – Otimização do RSSL, valores de RSSL e HPBW obtidos considerando como variável de otimização a amplitude de excitação de cada elemento do arranjo. ....	62
Tabela 4.2 – Otimização do RSSL, valores de RSSL e HPBW obtidos considerando como variável de otimização a distância entre os elementos do arranjo. ....	62
Tabela 4.3 – Otimização do RSSL, valores de RSSL e HPBW obtidos considerando como variáveis de otimização a distância e a amplitude dos elementos do arranjo. ....	62
Tabela 4.4 – Otimização do HPBW, valores de RSSL e HPBW obtidos considerando como variável de otimização a amplitude de excitação de cada elemento do arranjo. ....	65
Tabela 4.5 – Otimização do HPBW, valores de RSSL e HPBW obtidos considerando como variável de otimização a distância entre os elementos do arranjo. ....	66
Tabela 4.6 – Otimização do HPBW, valores de RSSL e HPBW obtidos considerando como variáveis de otimização a distância e a amplitude dos elementos do arranjo. ....	66
Tabela 4.7 – Otimização do RSSL e HPBW, valores de RSSL e HPBW obtidos considerando como variável de otimização a amplitude de excitação de cada elemento do arranjo. ....	70
Tabela 4.8 – Otimização do RSSL e HPBW, valores de RSSL e HPBW obtidos considerando como variável de otimização a distância entre os elementos do arranjo. ....	70
Tabela 4.9 – Otimização do RSSL e HPBW, valores de RSSL e HPBW obtidos considerando como variáveis de otimização a distância e a amplitude dos elementos do arranjo. ....	71
Tabela 5.1 – Apontamento do Feixe Principal, valores de RSSL e HPBW obtidos para $\theta_0 = 60^\circ$ . ....	78

Tabela 5.2 – Apontamento do Feixe Principal, valores de RSSL e HPBW obtidos para $\theta_0 = 45^\circ$ . . . . .	79
Tabela 5.3 – Apontamento do Feixe Principal, valores de RSSL e HPBW obtidos para $\theta_0 = 30^\circ$ . . . . .	80
Tabela 5.4 – Apontamento do Feixe Principal e a otimização do RSSL, valores de RSSL e HPBW obtidos considerando como variáveis de otimização a amplitude e a fase de excitação de cada elemento. . . . .	84
Tabela 5.5 – Apontamento do Feixe Principal e a otimização do RSSL, valores de RSSL e HPBW obtidos considerando como variáveis de otimização a distância entre os elementos e a fase de excitação de cada elemento. . . . .	86
Tabela 5.6 – Apontamento do Feixe Principal e a otimização do RSSL, valores de RSSL e HPBW obtidos considerando como variáveis de otimização a distância entre os elementos, a amplitude e a fase de excitação de cada elemento. . . . .	88
Tabela 5.7 – Apontamento do Feixe Principal e a otimização do HPBW, valores de RSSL e HPBW obtidos considerando como variáveis de otimização a amplitude e a fase de excitação de cada elemento. . . . .	90
Tabela 5.8 – Apontamento do Feixe Principal e a otimização do HPBW, valores de RSSL e HPBW obtidos considerando como variáveis de otimização a distância entre os elementos e o ângulo de excitação de fase de cada elemento. . . . .	92
Tabela 5.9 – Apontamento do Feixe Principal e a otimização do HPBW, valores de RSSL e HPBW obtidos considerando como variáveis de otimização a distância entre os elementos, a amplitude e a fase de excitação de cada elemento. . . . .	94
Tabela 5.10 – Apontamento do Feixe Principal e a otimização do RSSL e HPBW, valores de RSSL e HPBW obtidos considerando como variáveis de otimização a amplitude e o ângulo de excitação de fase de cada elemento do arranjo. . . . .	97
Tabela 5.11 – Apontamento do Feixe Principal e a otimização do RSSL e HPBW, valores de RSSL e HPBW obtidos, considerando como variáveis de otimização a distância entre os elementos do arranjo e o ângulo de excitação de fase de cada elemento do arranjo. . . . .	97
Tabela 5.12 – Apontamento do Feixe Principal e a otimização do RSSL e HPBW, valores de RSSL e HPBW obtidos considerando como variáveis de otimização a amplitude de excitação e ângulo de excitação de fase de cada elemento do arranjo e a distância entre eles. . . . .	98
Tabela 6.1 – Valores de RSSL, HPBW e Número de Elementos obtidos para os diagramas de radiação apresentados na Figura 6.1. . . . .	108
Tabela A.1 – Opções de Otimização Apresentadas no Simulador. . . . .	125

---

# LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
GA	<i>Genetic Algorithm</i>
RSL	<i>Relative Side Lobe Level</i>
HPBW	<i>Half Power Beamwidth</i>
LFMP	<i>Largura de Feixe de Meia Potência</i>
FNBW	<i>First Null Beamwidth</i>
LFEN	<i>Largura de Feixe Entre Nulos</i>
FA	Fator de Arranjo

---

# LISTA DE SÍMBOLOS

<b>E</b>	Intensidade de Campo Elétrico
<b>H</b>	Intensidade de Campo Magnético
<b>D</b>	Densidade de Fluxo Elétrico
<b>B</b>	Densidade de Fluxo Magnético
<b>J</b>	Densidade de Carga
<b>D</b>	Diretividade da Antena
<b>G</b>	Ganho da Antena
<b>W</b>	Vetor de Poynting Instantâneo
<b>N</b>	Número de Elementos do Arranjo
$U(\theta, \phi)$	Intensidade de Radiação
$d$	Distância entre um par de elementos do arranjo
$\theta$	Vetor Coordenada da posição $\theta$
$\phi$	Vetor Coordenada da posição $\phi$
$\lambda$	Comprimento de Onda
$\mu$	Permeabilidade do Meio
$\epsilon$	Permissividade do Meio
$\sigma$	Condutividade do Meio
$\eta$	Impedância Intrínseca do Meio
$k$	Número de Ondas
$\beta$	Ângulo de Excitação de Fase
$w$	Frequência Angular
$f$	Frequência
$p_{best}$	Melhor Posição da Partícula
$g_{best}$	Melhor Posição do Enxame

---

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	19
<b>1.1 Objetivos</b> .....	20
<b>1.2 Organização do Trabalho</b> .....	21
<b>2 ARRANJO DE ANTENAS</b> .....	22
<b>2.1 Introdução</b> .....	22
<b>2.2 Fundamentos de Antenas</b> .....	23
2.2.1 Equações de Maxwell.....	23
2.2.2 Diagrama de Radiação .....	25
2.2.3 Regiões de Campo de Antenas .....	26
2.2.4 Densidade de Radiação .....	27
2.2.5 Intensidade de Radiação .....	30
2.2.6 Diretividade e Ganho .....	31
2.2.7 Largura de Feixe .....	32
<b>2.3 Conceitos Básicos Sobre Arranjos de Antenas</b> .....	32
2.3.1 Arranjo Linear de Antenas com Dois Elementos .....	33
2.3.2 Arranjo Linear de Antenas com $N$ Elementos .....	34
2.3.2.1 Arranjos Co-Lineares .....	35
2.3.2.2 Arranjo Transversal .....	36
2.3.2.3 Arranjo Longitudinal .....	37
2.3.3 Arranjos Simétricos .....	38
<b>2.4 Técnicas de Determinação do Vetor de Amplitudes de um Arranjo de Antenas</b> ...	40
2.4.1 Dolph-Tschebyscheff .....	40
2.4.2 Binomial .....	41
2.4.3 Blackman .....	42
2.4.4 Hamming .....	42
<b>2.5 Resultados Obtidos Através de Técnicas de Determinação do Vetor de Amplitudes</b>	43
<b>3 OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS</b> .....	49
<b>3.1 Introdução</b> .....	49
<b>3.2 Conceitos Básicos e Terminologia</b> .....	50
<b>3.3 Versão Básica do PSO</b> .....	51
3.3.1 Codificação das Variáveis .....	54
3.3.2 Critérios de Parada .....	54
<b>3.4 Parâmetros de Aplicação do PSO</b> .....	55
<b>3.5 Técnica de Otimização por Enxame de Partículas Binária</b> .....	56

<b>4 OTIMIZAÇÃO DE ARRANJOS LINEARES DE ANTENAS .....</b>	<b>57</b>
4.1 Introdução .....	57
4.2 Otimização da Máxima Amplitude dos Lóbulos Secundários .....	58
4.3 Otimização do Ângulo de Meia Potência .....	64
4.4 Otimização da Máxima Amplitude dos Lóbulos Secundários e do Ângulo de Meia Potência .....	68
4.5 Conclusões .....	72
<b>5 APONTAMENTO DO FEIXE PRINCIPAL DE UM ARRANJO LINEAR DE ANTENAS.....</b>	<b>75</b>
5.1 Introdução .....	75
5.2 Apontamento do Feixe Principal de um Arranjo Linear de Antenas .....	76
5.3 Apontamento do Feixe Principal e Otimização da Máxima Amplitude dos Lóbulos Secundários .....	83
5.4 Apontamento do Feixe Principal e Otimização do Ângulo de Meia Potência .....	89
5.5 Apontamento do Feixe Principal e Otimização do Nível dos Lóbulos Secundários e Ângulo de Meia Potência .....	95
5.6 Conclusões .....	101
<b>6 SELEÇÃO DE ANTENAS EM UM ARRANJO LINEAR DE ANTENAS.....</b>	<b>104</b>
6.1 Introdução .....	104
6.2 Síntese de um Arranjo Linear de Antenas .....	105
6.3 Seleção de Antenas .....	108
6.4 PSO Híbrido .....	110
6.5 Conclusões .....	114
<b>7 CONCLUSÃO .....</b>	<b>116</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>123</b>

---

---

# 1

---

## INTRODUÇÃO

A técnica de conformação do feixe (do inglês, *beamforming*) tem sido muito utilizada para solucionar diversos problemas na área de engenharia, tais como: telecomunicações (RAYLEIGH e CIOFFI, 1998), controle de tráfego aéreo (BARTON, 1980), sistemas de comunicação (KIM et. al, 2016) e redes ad-hoc (XU e LEI LEIA, 2016).

Visando realizar a conformação de feixe são utilizados arranjos de antenas cuja finalidade é transmitir e/ou receber sinais provenientes de uma determinada direção, ao mesmo tempo deve-se rejeitar os sinais interferentes provenientes de direções indesejadas. A aplicação prática desta técnicas encontra inúmeros obstáculos, tais como a necessidade de um processador digital adequado e um algoritmo adaptativo apropriado, o qual deve apresentar implementação simples e complexidade computacional reduzida.

Assim como a técnica de conformação de feixe, a técnica Otimização por Enxame de Partículas (*Particle Swarm Optimization - PSO*), possui alta aplicabilidade em diversas áreas da engenharia (FU et al., 2016; MAINKAR e MULAY, 2016), como por exemplo no eletromagnetismo (ROBINSON E RAHMAT-SAMII, 2004).

A técnica de Otimização por Enxame de Partículas foi proposta por Kenedy e Eberhart em 1995 (KENNEDY e EBERHART, 1995). Esta técnica é similar aos algoritmos de computação evolutiva, apesar de não ser baseada no conceito de seleção natural e sim em uma dinâmica de partículas. O PSO apresenta uma implementação simples e um baixo tempo de processamento computacional, diferentemente dos GAs. Esta técnica é um tipo de inteligência de enxame inspirada no comportamento de bandos de pássaros, que surgiu com o objetivo de tratar problemas de otimização contínuos e não-lineares.

Nesta dissertação, foi utilizado um arranjo linear de antenas em conjunto com a técnica de otimização por enxame de partículas para realizar a conformação do feixe para direções determinadas e reduzir a interferência provenientes de outras fontes. Neste caso, considerou-se como parâmetros de otimização o Ângulo de Máxima Radiação ( $\theta$ ), o Nível dos Lóbulos Secundários (*Relative Side Lobe Level - RSSL*) e o Ângulo de Meia Potência (*Half Power Beamwidth - HPBW*). Tais otimizações foram realizadas com o objetivo de obter um melhor aproveitamento do sinal de interesse, reduzir interferências e aumentar o ganho de um arranjo linear de antenas.

Além disso, foi proposta e desenvolvida uma nova versão do PSO, a qual considera uma codificação híbrida, ou seja, trata problemas de otimização com variáveis contínuas e discretas, simultaneamente. Esta versão do PSO foi utilizada para realizar a seleção de antenas e a conformação do feixe, a partir da variação das correntes de alimentação do arranjo de antenas, visando obter o padrão de radiação desejado e reduzir o número de antenas selecionadas. Portanto, o PSO implementado deve procurar uma configuração dos elementos que o compõe, de modo que esta seja a mais econômica, e que possa atingir os requisitos de desempenho do sistema.

Para finalizar, todos os casos de otimização apresentados no decorrer deste trabalho e a versão proposta do PSO foram utilizados na construção de um simulador, através do qual é possível realizar a otimização de um arranjo linear de antenas de forma flexível, visando a sua utilização em pesquisas na área de otimização de antenas e como ferramenta de ensino de antenas.

## 1.1 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é realizar a otimização de Arranjo Lineares de Antenas através da Técnica de Otimização por Enxame de Partículas. Este trabalho além do objetivo mencionado também tem como objetivo:

- Otimizar o Nível dos Lóbulos Secundários e do Ângulo de Meia Potência de um Arranjo Linear de Antenas;
- Realizar o Apontamento do Feixe Principal de um Arranjo Linear de Antenas;
- Realizar a Seleção de Antenas de um Arranjo Linear.
- Comparar e analisar os resultados obtidos através da Técnica de Otimização por Enxame de Partículas, com resultados obtidos através de técnicas clássicas presentes na literatura. Visando validar a técnica de otimização proposta.
- Desenvolver uma nova versão da Técnica de Otimização por Enxame de Partículas, a

qual pode ser utilizada na resolução de problemas contínuos e discretos, simultaneamente.

- Construção de um simulador, o qual deverá integrar todos os casos de otimização apresentados.

## 1.2 Organização do Trabalho

Esta dissertação é composta, além deste capítulo, de outros seis capítulos organizados da seguinte forma:

- O Capítulo 2 apresenta uma breve introdução a arranjos de antenas, descrevendo os principais parâmetros de antenas e as características de um arranjo de antenas.
- O Capítulo 3 apresenta uma introdução a Técnica de Otimização por Enxame de Partículas, descrevendo conceitos e características importantes para a implementação desta técnica.
- O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos na otimização de Arranjos Lineares de Antenas através da Técnica de Otimização por Enxame de Partículas. Estas otimizações foram realizadas com o objetivo de reduzir o Nível dos Lóbulos Secundário e o Ângulo de Meia Potência do arranjo.
- O Capítulo 5 apresenta os resultados obtidos através do Apontamento do Feixe Principal de um Arranjo Linear de Antenas em conjunto com a otimização da Máxima Amplitude dos Lóbulos Secundários e do Ângulo de Meia Potência do arranjo.
- O Capítulo 6 apresenta os resultados encontrados na seleção de antenas de um Arranjo Linear de Antenas através da Técnica de Otimização por Enxame de Partículas Binária. Além disso, este capítulo apresenta os detalhes da versão Híbrida proposta neste trabalho.
- O Capítulo 7 apresenta as conclusões realizadas no decorrer deste trabalho e propostas de trabalhos futuros.
- O Anexo A apresenta o Simulador desenvolvido e a lista de otimizações que podem ser realizadas com o auxílio deste simulador.

---

---

## 2

---

# ARRANJO DE ANTENAS

Este capítulo apresenta uma introdução a arranjos lineares de antenas, descrevendo os principais parâmetros de antenas e as características de um arranjo linear de antenas, além das equações de campo elétrico e magnético que determinam as suas características de radiação.

### 2.1 Introdução

Uma antena pode ser considerada um dispositivo que atua como transição ou casamento entre a fonte e a onda no espaço (ESTEVEZ, 1980). Portanto, pode-se definir uma antena como "um dispositivo que atua na transmissão e/ou recepção de ondas de rádio"(IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas – IEEE Std 145-19831), sendo primordial em qualquer sistema de comunicação.

Além de realizar a transmissão e/ou recepção de ondas eletromagnéticas, uma antena deve ser capaz de otimizar a sua potência de radiação em determinadas direções e suprimir em outras. Desta forma, uma antena deve, também atuar como um dispositivo direcional. Para isso, uma antena pode assumir diferentes formas (fio condutor, abertura, *path*, arranjo, entre outras) visando atender as especificações de projeto (BALANIS, 1982).

Para compreender os princípios básicos nos quais se fundamenta o funcionamento de uma antena, é fundamental fazer uma análise de inúmeros conceitos, os quais são empregados para determinar as características de radiação de uma antena. Estes conceitos são apresentados neste capítulo juntamente com uma revisão sobre arranjos de antenas.

## 2.2 Fundamentos de Antenas

### 2.2.1 Equações de Maxwell

As equações de Maxwell, assim denominadas para homenagear James Clerk Maxwell (1831-1879) descrevem os fenômenos eletromagnéticos. Na formulação apresentada, considera-se que os campos variam harmonicamente no tempo, podendo ser representados por funções do tipo  $e^{j\omega t}$ , onde  $\omega$  representa a frequência angular e é dada por,  $\omega = 2\pi f$ , sendo  $f$  a frequência da onda eletromagnética.

As quatro quantidades de interesse são os vetores intensidade de campo elétrico  $\mathbf{E}(V/m)$ , intensidade de campo magnético  $\mathbf{H}(A/m)$ , densidade de fluxo elétrico  $\mathbf{D}(C/m^2)$  e densidade de fluxo magnético  $\mathbf{B}(Wb/m^2)$ . Estas juntamente com as suas fontes, a densidade de corrente  $\mathbf{J}(A/m^2)$  e a densidade de carga  $\rho(C/m^3)$ , estão relacionadas pelas seguintes equações de Maxwell na sua forma diferencial (KRAUS, 1983; BALANIS, 1982).

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.4)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (2.5)$$

Considerando a variação temporal dos campos elétrico e magnético, as equações de Maxwell podem ser representadas na forma fasorial pelas equações (KRAUS, 1983; BALANIS, 1982):

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega \mathbf{B} \quad (2.6)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = j\omega \mathbf{D} + \mathbf{J} \quad (2.7)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (2.8)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.9)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = -j\omega\rho \quad (2.10)$$

Em adição às equações de Maxwell, existem três relações constitutivas envolvendo os campos e as características do meio no qual eles existem. Tais relações são representadas pelas seguintes equações (KRAUS, 1983; BALANIS, 1982):

$$\mathbf{D} = \epsilon\mathbf{E} \quad (2.11)$$

$$\mathbf{B} = \mu\mathbf{H} \quad (2.12)$$

$$\mathbf{J} = \sigma\mathbf{E} \quad (2.13)$$

Onde,  $\sigma$  é a condutividade do meio,  $\mu$  representa a permeabilidade do meio e  $\epsilon$  a permissividade do meio. No espaço livre as relações constitutivas são representadas por (KRAUS, 1983; BALANIS, 1982):

$$\mathbf{D} = \epsilon_0\mathbf{E} \quad (2.14)$$

$$\mathbf{B} = \mu_0\mathbf{H} \quad (2.15)$$

$$\mathbf{J} = 0 \quad (2.16)$$

Na equação (2.11) apresenta-se a relação do campo elétrico ( $\mathbf{E}$ ) com a densidade de fluxo elétrico ( $\mathbf{D}$ ), onde  $\epsilon$ , a permissividade do meio é constante, ou seja, é independente da magnitude e direção do campo elétrico e é expressa em (*Farad/metro*). A permissividade elétrica no espaço livre é dada por:

$$\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \simeq \frac{1}{36\pi \times 10^9} \quad F/m \quad (2.17)$$

Para um meio qualquer a permissividade elétrica pode ser definida como  $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_o$ , onde  $\epsilon_r$  é denominada permissividade relativa do meio. Da mesma forma, em (2.13) apresenta-se a relação do campo elétrico com a densidade de corrente, a qual é expressa em  $(A/m^2)$ , onde  $\sigma$  representa a condutividade elétrica do meio. Valores típicos de condutividade podem ser verificados na Tabela 2.1 (VAN VLACK, 1970).

Tabela 2.1 – Tabela de Condutividade Elétrica

Material	Condutividade Elétrica $[(\Omega - m)^{-1}]$
Prata	$6,8 \times 10^7$
Cobre	$6,0 \times 10^7$
Ouro	$4,3 \times 10^7$
Alumínio	$3,8 \times 10^7$
Latão	$1,6 \times 10^7$
Ferro	$1,0 \times 10^7$
Platina	$0,94 \times 10^7$

Na equação (2.12) apresenta-se a relação do campo magnético (**H**) com a densidade de fluxo magnético (**B**), onde  $\mu$  representa a permeabilidade magnética do meio, expressa em  $(Henry/metro)$ , cujo valor no espaço livre é dado por:

$$\mu_o = 4\pi \times 10^{-7} \quad H/m \quad (2.18)$$

Para um meio qualquer a permeabilidade do meio pode ser definida como  $\mu = \mu_r \mu_o$ , onde  $\mu_r$  representa a permeabilidade magnética relativa do meio.

A compreensão das equações de Maxwell é de extrema importância para o estudo de técnicas no uso de antenas, pois estas equações são utilizadas para determinar os principais parâmetros de antenas. Tais parâmetros são encontrados com maiores detalhes em (KRAUS, 1983; BALANIS, 1982; FUSCO, 2006).

### 2.2.2 Diagrama de Radiação

O diagrama de radiação de uma antena é definido como a representação gráfica que descreve as propriedades de radiação de uma antena em função de coordenadas espaciais. Tais propriedades incluem densidade de fluxo de potência, intensidade de radiação, intensidade de campo, diretividade e polarização (BALANIS, 1982). O diagrama de radiação apresenta a amplitude de campo distante ou da potência radiada em função dos ângulos  $\theta$  e  $\phi$ . Geralmente, o diagrama de radiação de uma antena é representado através de uma figura tridimensional ou

bidimensional, considerando planos de corte vertical e horizontal.

Em outras palavras, o diagrama de radiação representa uma função ou uma descrição gráfica de uma propriedade direcional da antena. Tal diagrama pode ser uma função do campo elétrico ou magnético. Neste caso ele é denominado diagrama de campo e é representado em escala linear. Caso o diagrama seja baseado em uma função de intensidade de radiação este é denominado diagrama de potência e é representado em escala linear ou em decibéis (BALANIS, 1982). A Figura 2.1 apresenta os três tipos de diagramas.

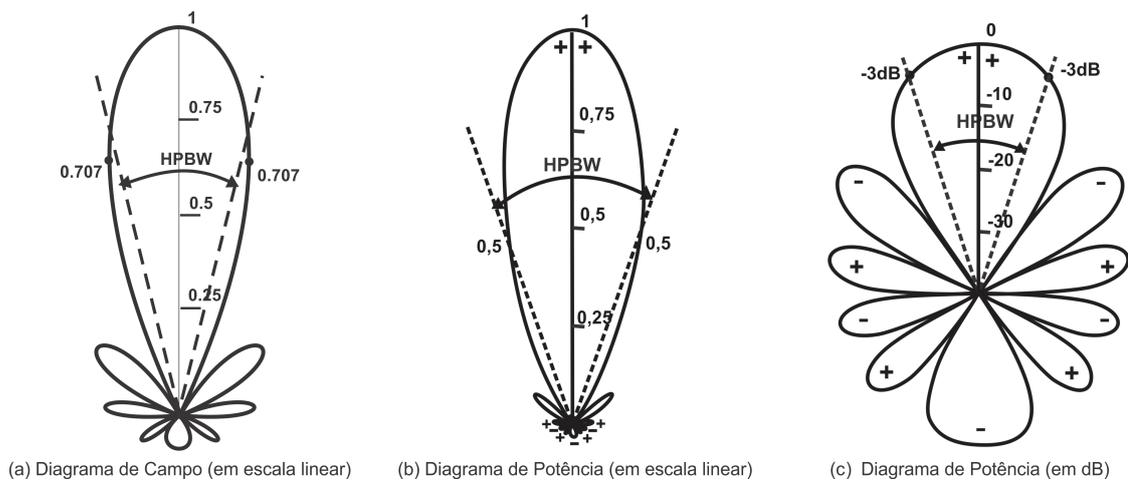


Figura 2.1 – Exemplo de diagramas normalizados de campo (em escala linear), de potência (em escala linear) e de potência (em dB).

Através da análise do diagrama de radiação de uma antena é possível verificar a existência de lóbulos de radiação, os quais apresentam-se delimitados por regiões de baixa intensidade de radiação. Tais lóbulos podem ser classificados como principal, laterais, secundários e traseiros. O lóbulo principal representa a região do diagrama de radiação com máxima intensidade de radiação e conseqüentemente o maior ganho. Os demais lóbulos representam regiões do diagrama que apresentam radiação em direções indesejadas e devem ser minimizados. A Figura 2.2 apresenta um diagrama de radiação polar com os lóbulos indicados e classificados.

### 2.2.3 Regiões de Campo de Antenas

Considerando a distância entre a antena e o ponto onde os campos são avaliados é possível definir três regiões distintas. Nas proximidades da antena, existe uma região onde a energia radiada pela antena é armazenada e devolvida à antena, ou seja, nesta região predomina o campo reativo. Esta região é denominada *Região de Campo Próximo Reativo*. Conforme aumenta a distância da antena observa-se uma segunda região, denominada *Região de Campo Próximo*

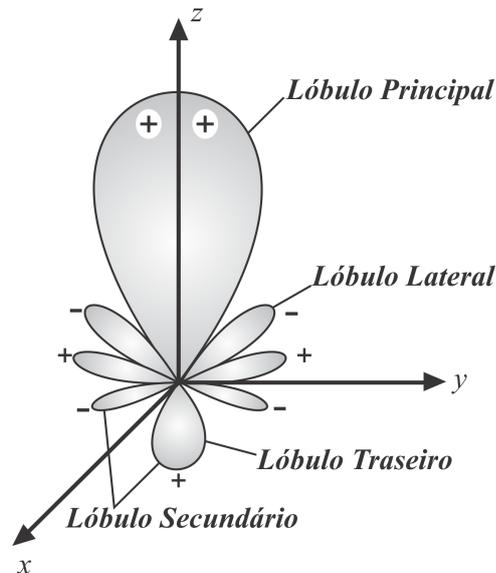


Figura 2.2 – Lóbulos de radiação do diagrama de radiação de uma antena.

*Radiante ou Região de Fresnel*, esta região é caracterizada pelo fato dos campos radiados dominarem os campos reativos e a distribuição angular do campo radiado depender da distância da antena. Caso o tamanho máximo da antena seja muito menor que o comprimento de onda ( $\lambda$ ) esta região pode não existir (BALANIS, 1982).

A terceira região de campo da antena e a mais importante, denomina-se *Região de Campo Distante ou Região de Fraunhofer*, nesta região não apenas os campos radiados predominam, mas também a sua distribuição angular é independente da distância da antena. Nesta região, o vetor de campo elétrico e o vetor de campo magnético são perpendiculares à direção do observador  $r$  e perpendiculares entre si. Esta região é considerada para determinar os principais parâmetros de uma antena (BALANIS, 1982).

Para cada região de campo existe uma fronteira. Esta fronteira é definida pela relação do tamanho máximo da antena ( $D_{antena}$ ) com o comprimento de onda ( $\lambda$ ). A Figura 2.3 apresenta as regiões de campo de uma antena e suas fronteiras.

#### 2.2.4 Densidade de Radiação

O campo eletromagnético irradiado por uma antena propaga-se no espaço livre podendo ser interceptado por uma ou várias antenas receptoras. Tal campo é utilizado para transportar informação de um ponto a outro no espaço livre. Consequentemente, pode-se concluir que existe potência e energia associadas a ondas eletromagnéticas (BALANIS, 1982). Portanto, a medida do fluxo de densidade de potência emitida pela antena é representada pelo vetor de

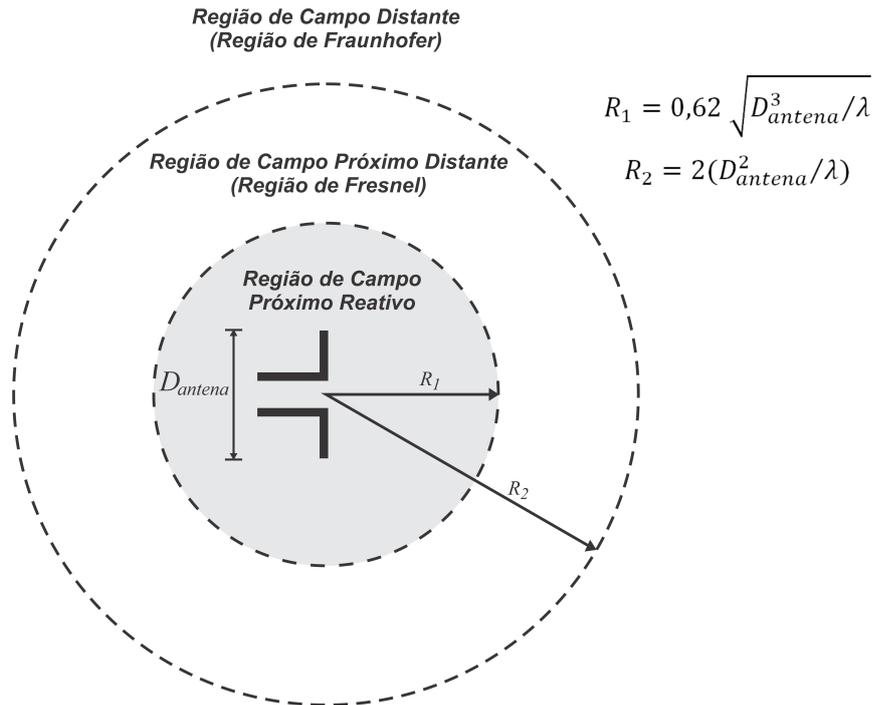


Figura 2.3 – Regiões de Campo de Antenas.

*Poynting* e é dada por:

$$\mathbf{W} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} \quad (2.19)$$

Onde:

- $\mathbf{W}$  = Vetor de *Poynting* instantâneo ( $W/m^2$ );
- $\mathbf{E}$  = Intensidade de campo elétrico instantâneo ( $V/m$ );
- $\mathbf{H}$  = Intensidade de campo magnético instantâneo ( $A/m$ ).

Através da equação (2.19) determina-se a direção da densidade de potência radiada, a qual é definida através da regra da mão direita. Visando explicar de forma detalhada a densidade de potência, utiliza-se as equações de campo elétrico e magnético dadas por:

$$\mathbf{E}_\theta = \frac{E_0}{r} e^{-j\omega t} \theta \quad (2.20)$$

$$\mathbf{H}_\phi = \frac{E_0}{\eta r} e^{-j\omega t} \phi \quad (2.21)$$

Onde:

- $\mathbf{E}_\theta$  = Vetor campo elétrico ( $V/m$ );
- $\mathbf{H}_\phi$  = Vetor campo magnético ( $A/m$ );
- $\eta$  = Impedância intrínseca do meio.
- $\mathbf{r}$  = Vetor posição;
- $\theta$  = Vetor posição da coordenada  $\theta$ ;
- $\phi$  = Vetor posição da coordenada  $\phi$ .

Para determinar a densidade média de potência é necessário calcular o vetor de *Poynting* instantâneo variante no tempo. Desta forma, através das equações (2.20) e (2.21) e utilizando a equação de Euler tem-se:

$$\mathbf{E}(r, t) = Re\left\{\frac{E_0}{r}e^{j(\omega t - kr)}\theta\right\} = \frac{E_0}{r} \cos(\omega t - kr)\theta \quad (2.22)$$

$$\mathbf{H}(r, t) = Re\left\{\frac{E_0}{\eta r}e^{j(\omega t - kr)}\phi\right\} = \frac{E_0}{\eta r} \cos(\omega t - kr)\phi \quad (2.23)$$

Substituindo as equações (2.22) e (2.23) na equação (2.19) do vetor de *Poynting* obtém-se:

$$\mathbf{W}(r, t) = \frac{E_0^2}{2\eta r^2} [1 + \cos(2\omega t - 2kr)] \mathbf{r} \quad (2.24)$$

Analisando a equação (2.24) verifica-se que a primeira parte desta equação não é variante no tempo, representado assim, a densidade média de potência radiada. A densidade média de potência representa a parte da potência que não se propaga. Portanto, fica armazenada nos campos elétrico e magnético presentes na região de campo próximo da antena.

A média temporal do vetor de *Poynting* é dada por:

$$\mathbf{W}_{Medio}(r, t) = \frac{E_0^2}{2\eta r^2} \mathbf{r} \quad (2.25)$$

Através da equação (2.25) determina-se a potência total radiada por um antena, a qual é dada por:

$$\mathbf{P}_{total} = \oint \oint \mathbf{W}_{Medio} \cdot d\mathbf{s} \quad (2.26)$$

Considerando um fonte isotrópica, a qual irradia igualmente em todas as direções. Pode-se determinar a potência total radiada através da seguinte equação (BALANIS, 1982):

$$P_{rad} = \frac{P_{total}}{4\pi r^2} \quad (2.27)$$

Analisando a equação (2.27) observa-se que a densidade de potência irradiada por uma fonte isotrópica é distribuída uniformemente sobre a superfície de uma esfera de raio  $r$ .

### 2.2.5 Intensidade de Radiação

A intensidade de radiação pode ser descrita como a densidade de potência normalizada pela distância da fonte. A intensidade de radiação é dada pelo produto da densidade de potência radiada pelo quadrado da distância (BALANIS, 1982). Portanto, a densidade de potência radiada é inversamente proporcional ao quadrado da distância  $r$  e diminui quando o ponto de referência é afastado da antena fonte.

A intensidade de radiação é expressa por:

$$U = r^2 W_{rad} \quad (2.28)$$

Onde,  $U$  representa a intensidade de radiação da antena em ( $W/\text{unidade de ângulo sólido}$ ) e  $W_{rad}$  a densidade de potência radiada em ( $W/m^2$ ).

A intensidade de radiação também pode estar relacionada ao campo elétrico e magnético, podendo ser expressa através das seguintes equações:

$$U(\theta, \phi) = \frac{r^2}{2\eta} |\mathbf{E}(r, \theta, \phi)|^2 \quad (2.29)$$

$$U(\theta, \phi) = \frac{\eta r^2}{2} |\mathbf{H}(r, \theta, \phi)|^2 \quad (2.30)$$

Onde,  $\eta$  representa a impedância intrínseca do meio,  $E(r, \theta, \phi)$  e  $H(r, \theta, \phi)$  representam a intensidade de campo elétrico e magnético distante da antena, respectivamente. Para uma fonte isotrópica a intensidade de radiação é uniforme, diferentemente de fontes não isotrópicas as quais possuem intensidade de radiação não uniforme, ou seja, possuem diagrama de radiação não uniforme.

### 2.2.6 Diretividade e Ganho

A diretividade de uma antena é definida como a medida da capacidade de uma antena em concentrar a potência radiada na direção de máxima radiação  $(\theta_{max}, \phi_{max})$ , quando considera-se uma antena transmissora. Porém, para uma antena receptora a diretividade representa a medida da capacidade de uma antena concentrar a absorção de potência incidente na direção de máxima radiação  $(\theta_{max}, \phi_{max})$  (BALANIS, 1982).

Matematicamente, pode-se dizer que a diretividade  $D$  de uma antena é definida pela relação da intensidade máxima de radiação  $(\theta_{max}, \phi_{max})$  com a intensidade média de radiação  $(U_{med})$ , considerando uma certa distância da antena. A diretividade pode ser expressa como a relação entre o valor máximo do vetor de *Poynting* e seu valor médio, considerando a região de campo distante, portanto:

$$\theta = \frac{U(\theta_{max}, \phi_{max})}{U_{med}} = \frac{S(\theta_{max}, \phi_{max})}{S_{med}} \quad (2.31)$$

O vetor de *Poynting* médio sobre uma esfera é dado por:

$$S(\theta, \phi)_{med} = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} S(\theta, \phi) \cdot d\Omega \quad (2.32)$$

Logo:

$$D = \frac{1}{\frac{1}{4\pi} \int \int \frac{S(\theta, \phi)}{S(\theta, \phi)_{max}} \cdot d\Omega} = \frac{1}{\int \int P_n(\theta, \phi) \cdot d\Omega} = \frac{4\pi}{\Omega_A} \quad (2.33)$$

Onde  $P_n$  é o Vetor de *Poynting* normalizado e  $\Omega_A$  a área de feixe da antena. Portanto, através da equação (2.33) verifica-se que a diretividade é dada pela relação entre o ângulo sólido total de uma esfera e o ângulo sólido do feixe ( $\Omega_A$ ) de uma antena.

Quando torna-se necessário estimar o desempenho da antena no sistema, isto é, quando deseja-se determinar o desempenho da antena segundo a potência de alimentação ( $P_A$ ), a grandeza comumente utilizada é o ganho de potência da antena, o qual pode ser expresso por:

$$G(\theta_o, \phi_o) = 4\pi r^2 \frac{U(\theta_o, \phi_o)}{P_A} \quad (2.34)$$

Visando avaliar a qualidade de antenas transmissoras e receptoras, pode-se definir a eficiência da antena ( $EF$ ). Tal parâmetro representa a fração da potência de alimentação da antena

que é efetivamente irradiada pela antena, sendo expresso pela seguinte equação (BALANIS, 1982):

$$EF = \frac{P_r}{P_A} \quad (2.35)$$

Através das equações (2.31) e (2.35) obtém-se uma relação entre a diretividade e o ganho ( $G = EF.D$ ). Através desta relação conclui-se que o ganho da antena é inferior à sua diretividade.

### 2.2.7 Largura de Feixe

A partir do diagrama de radiação de uma antena é possível determinar a sua largura de feixe, a qual é definida como a separação angular entre dois pontos idênticos do diagrama de radiação. Estes pontos apresentam-se em lados opostos do diagrama (BALANIS, 1982). Existem inúmeros tipos de largura de feixe, porém os mais importantes são representados na Figura 2.4 e descritos a seguir.

- **Largura de Feixe de Meia Potência (LFMP ou HPBW, do inglês, *Half-Power Beamwidth*):** Representa a separação angular entre dois pontos idênticos do diagrama de radiação, os quais representam metade do valor máximo da intensidade de radiação em um diagrama em escala linear e a  $-3dB$  do valor máximo em um diagrama representado em *decibéis*.
- **Largura de Feixe Entre Nulos (LFEN ou FNBW, do inglês, *First Null Beamwidth*):** Representa a separação angular entre os primeiros nulos do diagrama.

## 2.3 Conceitos Básicos Sobre Arranjos de Antenas

Muitas vezes deseja-se projetar antenas com características específicas, tais como alto ganho e diretividade acentuada e controláveis. Estas características dificilmente são obtidas utilizando antenas simples (dipolo, yagi-uda, parabólica, entre outras). Visto que tais antenas não possuem características de radiação controláveis, apresentam baixo ganho e baixa diretividade para aplicações específicas. Consequentemente, para obter as características desejadas é necessário utilizar uma estrutura com múltiplos elementos. Esta estrutura é denominada Arranjo de

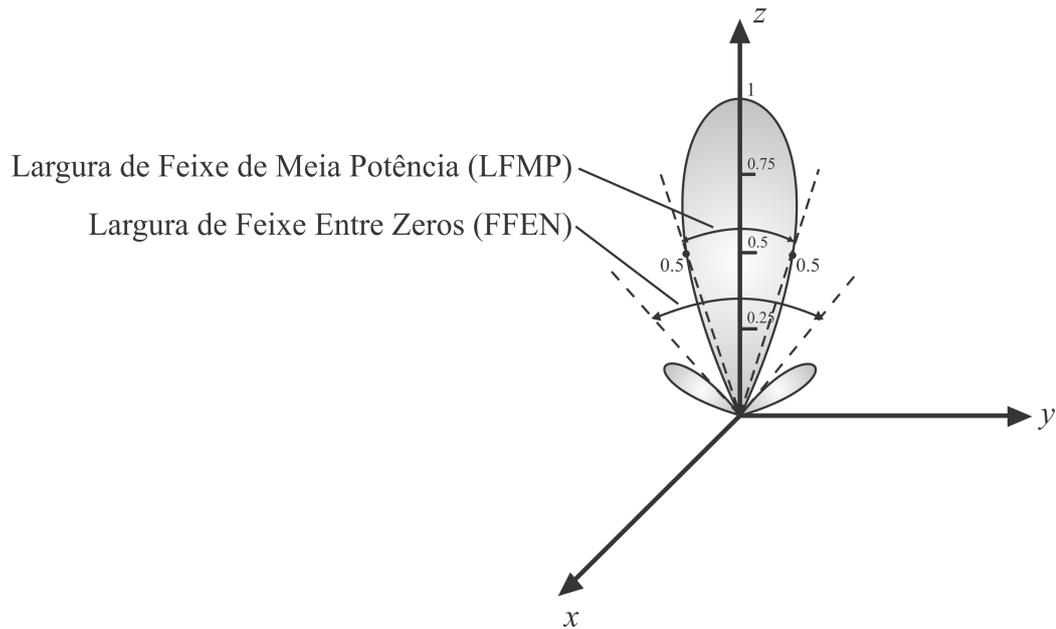


Figura 2.4 – Exemplo de diagrama de potência e representação da Largura de Feixe de Meia Potência e Largura de Feixe Entre Nulos.

Antenas e pode ser composta por elementos distintos (dipolos, aberturas, espiras, microfita ou uma combinação deles).

Nesta seção, são descritas duas abordagens acerca de Arranjos Lineares de Antenas. Inicialmente é realizada uma análise de um arranjo de antenas composto por dois elementos. Para finalizar é apresentada a análise de um arranjo de antenas composto por  $N$  elementos. Esta última configuração apresenta uma maior diretividade e conseqüentemente maior ganho.

### 2.3.1 Arranjo Linear de Antenas com Dois Elementos

Primeiramente, considera-se um arranjo linear de antenas composto por dois dipolos dispostos ao longo do eixo  $z$  horizontalmente. Pode-se representar o diagrama de radiação total deste arranjo como sendo a soma do diagrama de radiação de cada elemento, logo (BALANIS, 1982):

$$\mathbf{E}_t = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 = \hat{\mathbf{a}}_{\theta} j\eta \frac{kI_0 l}{4\pi} \left[ \frac{e^{-j[kr_1 - (\beta/2)]}}{r_1} \cos \theta_1 + \frac{e^{-j[kr_2 - (\beta/2)]}}{r_2} \cos \theta_2 \right] \quad (2.36)$$

Onde,  $\beta$  representa a diferença de fase entre os elementos do arranjo. Considerando o campo distante e que os elementos apresentam-se linearmente espaçados entre si por uma distância  $d$  e não estão em fase ( $\beta \neq 0$ ), conforme ilustra a Figura 2.5, pode-se representar a

equação (2.36) como:

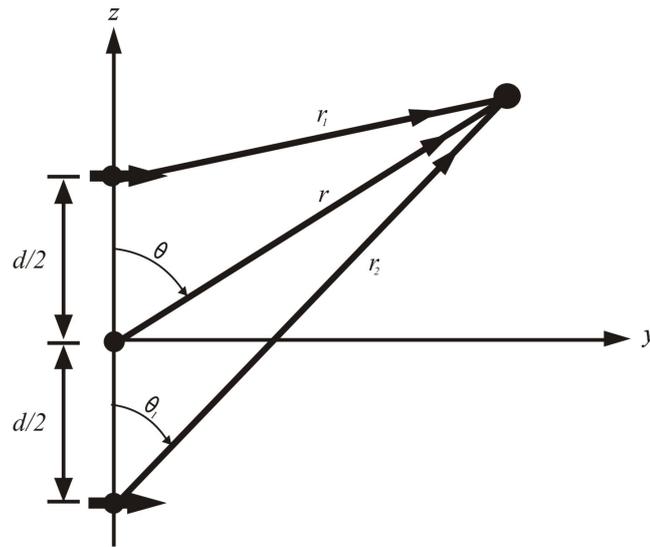


Figura 2.5 – Geometria de um arranjo linear de antenas com dois elementos

$$\mathbf{E}_t = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 = \hat{\mathbf{a}}_{\theta} j \eta \frac{k I_0 l e^{-jkr}}{4\pi r} \cos \theta \cdot \left\{ 2 \cos \left[ \frac{1}{2} (kd \cdot \cos \theta + \beta) \right] \right\} \quad (2.37)$$

Observando a equação (2.37) conclui-se que o diagrama de radiação total de um arranjo de antenas é dado pelo produto do diagrama de radiação de um elemento pelo fator de arranjo da antena (BALANIS, 1982; KRAUS, 1983; ESTEVES, 1980; FUSCO, 2006). O Fator de Arranjo da antena é determinado através da equação:

$$FA = 2 \cdot \cos \left[ \frac{1}{2} (kd \cdot \cos \theta + \beta) \right] \quad (2.38)$$

Portanto,

$$\text{Diagrama de Radiação Resultante} = \text{Diagrama de Radiação de um Elemento} \times \text{Fator de Arranjo da Antena}$$

### 2.3.2 Arranjo Linear de Antenas com $N$ Elementos

Após apresentados os conceitos de arranjos de antenas com dois elementos, este trabalho apresenta uma análise de arranjos lineares de antenas com  $N$  elementos. Existem diversas representações de arranjos lineares, as quais são descritas nesta subsecção.

### 2.3.2.1 Arranjos Co-Lineares

Inicialmente realiza-se um estudo da configuração mais simples de um arranjo co-linear. Nesta configuração o arranjo de antenas é composto por  $N$  elementos isotrópicos em fase ( $\beta = 0$ ) e campos elétricos desprezíveis de acoplamento mútuo entre as antenas. Além disso, considera-se que os elementos encontram-se linearmente espaçados a uma distância  $d$ . Este arranjo é representado na Figura 2.6 e seu diagrama de radiação é dado por (FUSCO, 2006):

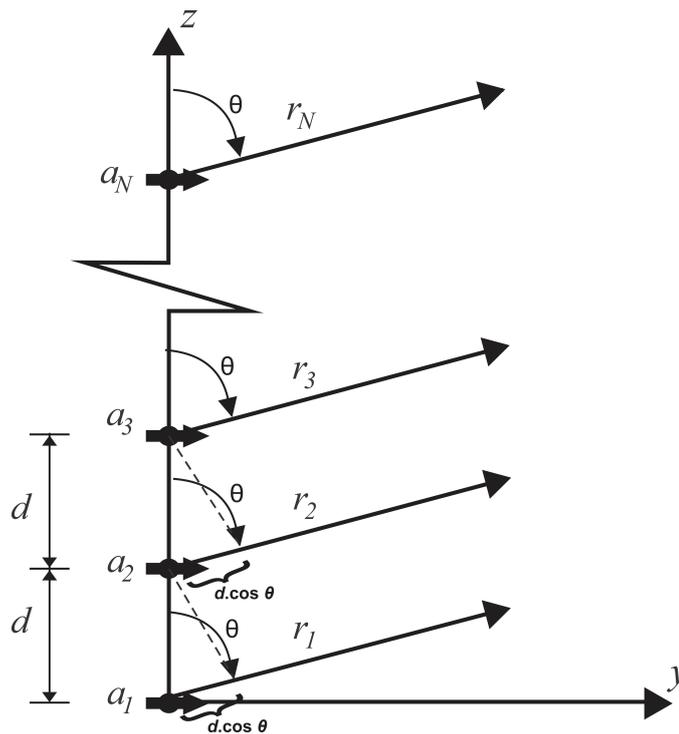


Figura 2.6 – Arranjo linear de antenas com  $N$  elementos

$$E_R = \frac{E_1 \sin\left(\frac{N\pi d}{\lambda} \cdot \sin\theta\right)}{\sin\left(\frac{\pi d}{\lambda} \cos\theta\right)} \quad (2.39)$$

Onde:

$$E_1 = 2R \cdot \sin\left(\frac{N\Psi}{2}\right) \quad (2.40)$$

$$\Psi = \frac{2\pi}{\lambda} d \cdot \cos\theta \quad (2.41)$$

Considerando a direção de máxima radiação ( $\theta = 90^\circ$ ) e uma aproximação para ângulos pequenos, obtém-se:

$$E_R = N \cdot E_1 \quad (2.42)$$

Visto que cada elemento irradia a mesma quantidade de potência e é alimentado com sinais de mesma amplitude. Considera-se a seguinte aproximação para a determinação do diagrama de radiação deste arranjo.

$$E_R = \frac{E}{\sqrt{N}} \frac{\sin\left(\frac{N\pi d}{\lambda} \cdot \cos\theta\right)}{\sin\left(\frac{\pi d}{\lambda} \cdot \cos\theta\right)} \quad (2.43)$$

A partir da equação (2.43) obtém-se o fator de arranjo da antena, o qual é dado por:

$$FA = \left[ \frac{\sin\left(\frac{N}{2}\Psi\right)}{\sin\left(\frac{1}{2}\Psi\right)} \right] \quad (2.44)$$

### 2.3.2.2 Arranjo Transversal

A configuração mais simples de arranjos de antenas consiste em  $N$  dipolos linearmente espaçados ao longo de uma linha reta, de mesmo tamanho e em fase. Arranjos que apresentam esta configuração são denominados Arranjo Transversal ou *Broadside*. Estes arranjos possuem alta diretividade em ângulos retos ao plano do arranjo, ou seja, irradiam muito pouco no seu plano. A Figura 2.7 exemplifica o arranjo em questão.

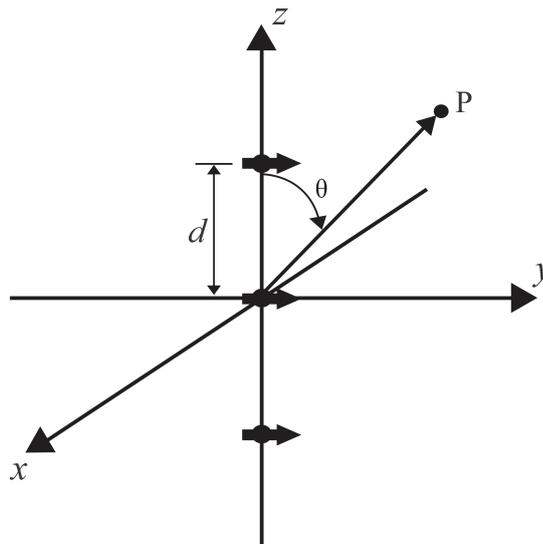


Figura 2.7 – Arranjo transversal ou *Broadside*

Arranjos transversais frequentemente são formados por dipolos de meia onda  $\left(\frac{\lambda}{2}\right)$ , linearmente espaçados de  $\lambda/2$  ou  $\lambda$  e em fase ( $\beta = 0$ ). Seu diagrama de radiação é apresentado

na Figura 2.8 e é dado por:

$$E_R = \frac{E_0}{\sqrt{N}} \frac{\sin\left(\frac{N\pi d}{\lambda} \cos\theta \pm \beta\right)}{\sin\left(\frac{\pi d}{\lambda} \cos\theta \pm \beta\right)} \quad (2.45)$$

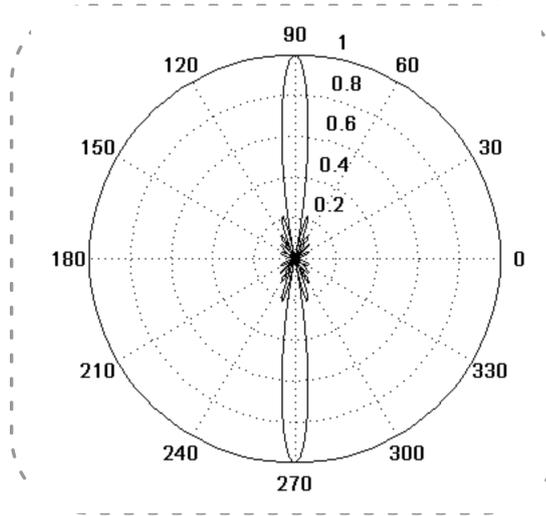


Figura 2.8 – Diagrama de radiação de um arranjo transversal ou *Broadside*

### 2.3.2.3 Arranjo Longitudinal

O Arranjo Longitudinal ou *End-Fire* possui uma estrutura similar a do Arranjo Transversal (*broadside*), pois seus elementos encontram-se dispostos em linha reta e apresentam amplitude uniforme. Porém, neste caso, há uma diferença de fase entre os elementos do arranjo ( $\theta = 90^\circ$ ). Esta diferença de fase resulta em uma máxima radiação na direção longitudinal ao eixo ( $\theta = 0^\circ$  ou  $\theta = 180^\circ$ ), onde encontram-se posicionados seus elementos e obtém-se o máximo de radiação na direção do último elemento do arranjo. A Figura 2.9 exemplifica um Arranjo Longitudinal ou *End-Fire*.

O diagrama de radiação de um Arranjo Longitudinal difere do diagrama de radiação de um Arranjo Transversal, pois encontra-se no plano de formação e não em ângulos retos, é unidirecional e não bidirecional. O diagrama de radiação de um Arranjo Longitudinal é apresentado na Figura 2.10 e é dado por:

$$E_R = \frac{1}{\sqrt{N}} \left( \frac{\sin\left(\frac{N\pi}{4}\right)(1 - \cos\theta)}{\sin\left(\frac{\pi}{4}\right)(1 - \cos\theta)} \right) \quad (2.46)$$

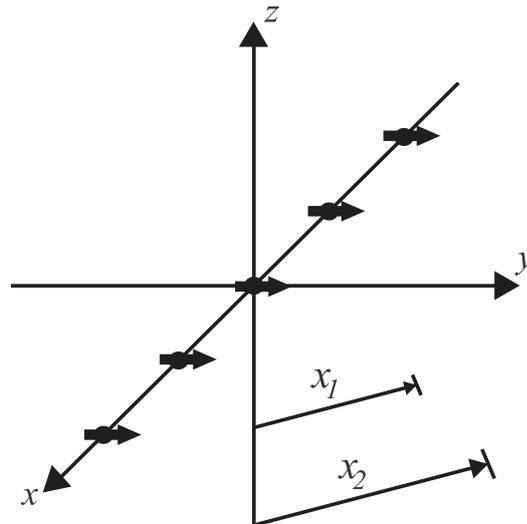


Figura 2.9 – Arranjo Longitudinal ou *End-Fire*

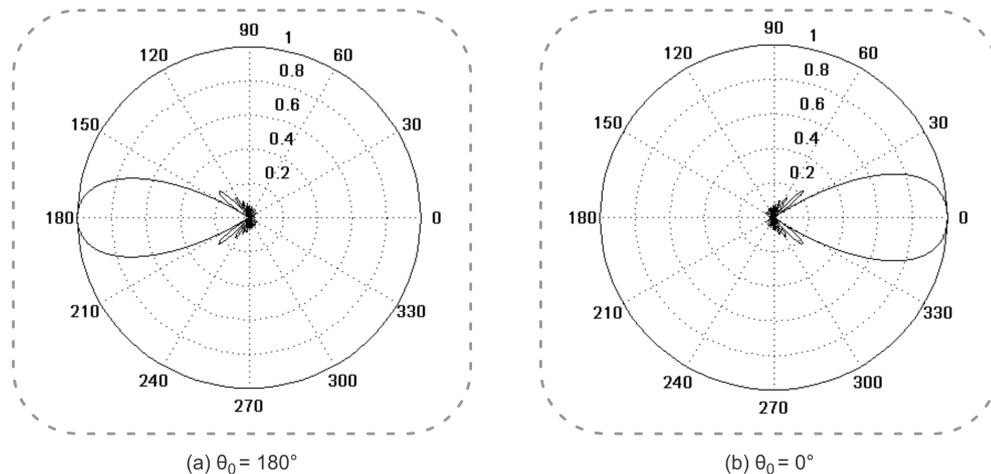


Figura 2.10 – Diagrama de radiação de um arranjo Longitudinal ou *End-Fire*

Os arranjos apresentados, transversal e longitudinal, são denominados lineares e são ressonantes, pois são constituídos por elementos ressonantes. Apresentam uma estreita faixa de frequência e são adequados para transmissão de ondas curtas, porém não são igualmente úteis para a recepção.

### 2.3.3 Arranjos Simétricos

Arranjos simétricos são constituídos por estruturas simétricas pares ou ímpares, dependendo do número de elementos do arranjo. Tais arranjos são representados na Figura 2.11, onde são apresentados arranjos simétricos com amplitudes não-uniformes e com um número par e ímpar de elementos.

Para fins de projeto, inicialmente deve-se determinar o fator de arranjo de cada confi-

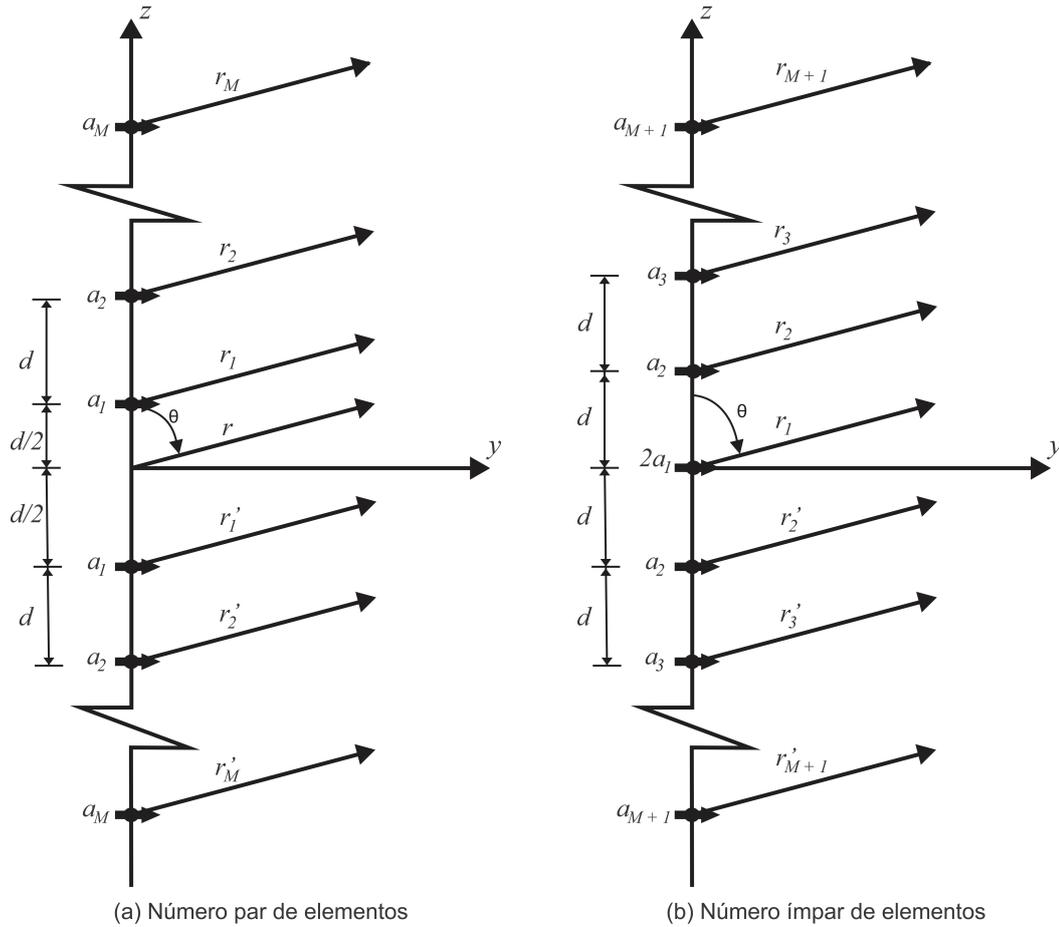


Figura 2.11 – Arranjo de Antenas Simétrico com  $N$  par e ímpar.

guração de um arranjo simétrico. Considerando um arranjo composto por  $N$  elementos, sendo  $N$  um número par e  $N = 2M$ . Determina-se o fator de arranjo através da seguinte equação (BALANIS, 1982):

$$(FA)_{2M} = \sum_{n=1}^M a_n \cdot \cos \left[ \frac{(2n-1)}{2} kd \cos \theta \right] \quad (2.47)$$

Onde  $d$  representa a distância entre os elementos do arranjo. A equação (2.47) representa o fator de arranjo de um arranjo *broadside*, com amplitudes não-uniformes e com elementos linearmente espaçados. Esta equação pode ser reescrita de forma normalizada como:

$$(FA)_{2M} \sum_{n=1}^M a_n \cdot \cos[(2n-1)u] \quad (2.48)$$

Onde:

$$u = \frac{\pi d}{\lambda} \cos \theta \quad (2.49)$$

Considerando um arranjo de antenas composto por  $N$  elementos, sendo  $N$  ímpar. O fator de arranjo, neste caso, é dado por:

$$(FA)_{2M+1} \sum_{n=1}^{M+1} a_n \cdot \cos \left[ (2n - 1)kd \cdot \cos \theta \right] \quad (2.50)$$

$$(FA)_{2M+1} \sum_{n=1}^{M+1} a_n \cdot \cos[2(n - 1)u] \quad (2.51)$$

Onde  $u$  é definido pela equação (2.49).

## 2.4 Técnicas de Determinação do Vetor de Amplitudes de um Arranjo de Antenas

Existem inúmeras técnicas para a obtenção do vetor de amplitudes de um arranjo de antenas, o qual pode ser denominado vetor de pesos dos elementos de um arranjo de antenas. Neste trabalho, estas técnicas são utilizadas com o objetivo de comparação dos resultados obtidos pela técnica de Otimização por Enxame de Partículas. Tais técnicas determinam os pesos dos elementos do arranjo sem considerar os diversos parâmetros do arranjo que são afetados através da alteração das amplitudes dos elementos do arranjo. Para suprir esta limitação utilizou-se a técnica de Otimização por Enxame de Partículas.

Algumas técnicas para determinação da amplitude dos elementos de um arranjo de antenas são: Dolph-Tschebyscheff, Binomial, Hamming, Blackman, Gaussian (DOLPH, 1946; RIBLET, 1947; BALANIS, 1982; NUTTALL, 1981; RIBLET, 1947). Para fins de comparação, foram utilizadas as técnicas: Dolph-Tschebyscheff, Binomial, Hamming e Blackman. Tais técnicas são brevemente descritas a seguir. Além destas técnicas, considera-se um Arranjo Uniforme, o qual apresenta todos os elementos com amplitudes uniformes (BALANIS, 1982).

### 2.4.1 Dolph-Tschebyscheff

O método de Dolph-Tschebyscheff foi desenvolvido por Hansen e Woodyard em 1938 (DOLPH, 1946) e apresenta-se como uma técnica de projeto de arranjos de antenas com inúmeras aplicações práticas (LI et. al, 2011; FALAHATI et. al, 2013; QUEIROZ e ALENCAR, 2003). Através deste método, a amplitude de cada elemento de um arranjo linear de antenas é determinado por meio dos polinômios de Tschebyscheff.

O fator de arranjo de um arranjo linear de antenas simétrico, composto por um número

para ou ímpar de elementos é definido pelas equações (2.48) ou (2.51), respectivamente. Analisando estas equações verifica-se que o fator de arranjo é dado pela soma de  $M$  ou  $M+1$  termos co-senoidais, a qual é expressa por (BALANIS, 1982):

$$\begin{aligned}
 m = 0 \quad \cos(mu) &= 1 = T_0(z) \\
 m = 1 \quad \cos(mu) &= \cos(u) = z = T_1(z) \\
 m = 2 \quad \cos(mu) &= \cos(2u) = 2z^2 - 1 = T_2(z) \\
 m = 3 \quad \cos(mu) &= \cos(3u) = 4z^3 - 3z = T_3(z) \\
 m = 4 \quad \cos(mu) &= \cos(4u) = 8z^4 - 8z^2 + 1 = T_4(z)
 \end{aligned} \tag{2.52}$$

A fórmula de recursão pode ser utilizada para encontrar o Polinômio de Dolph-Tschebyscheff se os dois polinômios anteriores forem conhecidos. Esta fórmula é definida por:

$$T_m(z) = 2zT_{m-1}(z) - T_{m-2}(z) \tag{2.53}$$

Através da equação 2.53 determina-se os polinômios de Tschebyscheff e a partir das raízes destes polinômios define-se o vetor de amplitudes de um arranjo linear de antenas.

#### 2.4.2 Binomial

Esta técnica utiliza a função  $(1+x)^{m-1}$ , escrita em uma série, usando a expansão binomial, representada por (STONE, N°. 1,643,323 e N°. 1,715,433):

$$(1+x)^{m-1} = 1 + (m-1)x + \frac{(m-1)(m-2)}{2!}x^2 + \frac{(m-1)(m-2)(m-3)}{3!}x^3 + \dots \tag{2.54}$$

Os coeficientes positivos desta expansão representam o Triângulo de Pascal. Estes coeficientes são utilizados na determinação da amplitude de cada elemento de um arranjo de antenas. O Triângulo de Pascal para um arranjo com 10 elementos é representado na Figura 2.12, onde  $m$  representa o número de elementos.



## 2.5 Resultados Obtidos Através de Técnicas de Determinação do Vetor de Amplitudes

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos através de técnicas de determinação do vetor de amplitudes de um arranjo de antenas. Para cada técnica obteve-se os valores de HPBW e RSSL, considerando arranjos lineares de antenas com 6, 10, 16 ou 20 elementos, linearmente espaçados em,  $\lambda/4$ ,  $\lambda/2$  ou  $3\lambda/4$ , e em fase ( $\beta = 0$ ). A seguir são apresentados os resultados obtidos pelas técnicas: Dolph-Tschebyscheff, Binomial, Blackman e Hamming. Além disso, também são apresentados os valores de HPBW e RSSL obtidos para um Arranjo Uniforme.

Considerando um Arranjo Uniforme composto por 6, 10, 16 ou 20 elementos, linearmente espaçados, onde todos os elementos possuem amplitude uniforme ( $A_{1...N} = 1$ ) e encontram-se em fase. Obteve-se os valores de RSSL e HPBW apresentados na Tabela 2.2. Os diagramas de radiação obtidos são apresentados na Figura 2.13. Através da Tabela 2.2 observa-se um alto valor de RSSL, pois para todas as configurações de arranjo obteve-se valores de RSSL próximos de  $-13dB$ . Este fato é melhor observado no diagrama de radiação de cada caso, retratado na Figura 2.13, no qual nota-se a prevalência dos lóbulos secundários.

Tabela 2.2 – Valores de RSSL e HPBW obtidos para um Arranjo Uniforme.

N = 6			N = 10		
$d$	RSSL (dB)	HPBW (°)	$d$	RSSL (dB)	HPBW (°)
$\lambda/4$	-13.06	23.20	$\lambda/4$	-13.19	13.82
$\lambda/2$	-13.06	11.52	$\lambda/2$	-13.19	6.91
$3\lambda/4$	-13.06	7.70	$3\lambda/4$	-13.19	4.61
N = 16			N = 20		
$d$	RSSL (dB)	HPBW (°)	$d$	RSSL (dB)	HPBW (°)
$\lambda/4$	-13.23	8.64	$\lambda/4$	-13.24	6.91
$\lambda/2$	-13.23	4.32	$\lambda/2$	-13.24	3.45
$3\lambda/4$	-13.23	2.88	$3\lambda/4$	-13.24	2.30

Considerando um Arranjo de Dolph-Tschebyscheff obteve-se os valores de RSSL e HPBW. Tais parâmetros foram atingidos considerando as configurações de arranjo definidas para um arranjo uniforme. Porém, neste caso, os elementos possuem amplitude de excitação distinta. Os valores de amplitude são determinados através dos polinômios de Dolph-Tschebyscheff (BALANIS, 1982). Os resultados alcançados são apresentados na Tabela 2.3, considerando uma razão entre lóbulo principal e secundário de  $40dB$ . Os diagramas de radiação obtidos são exibidos na Figura 2.14.

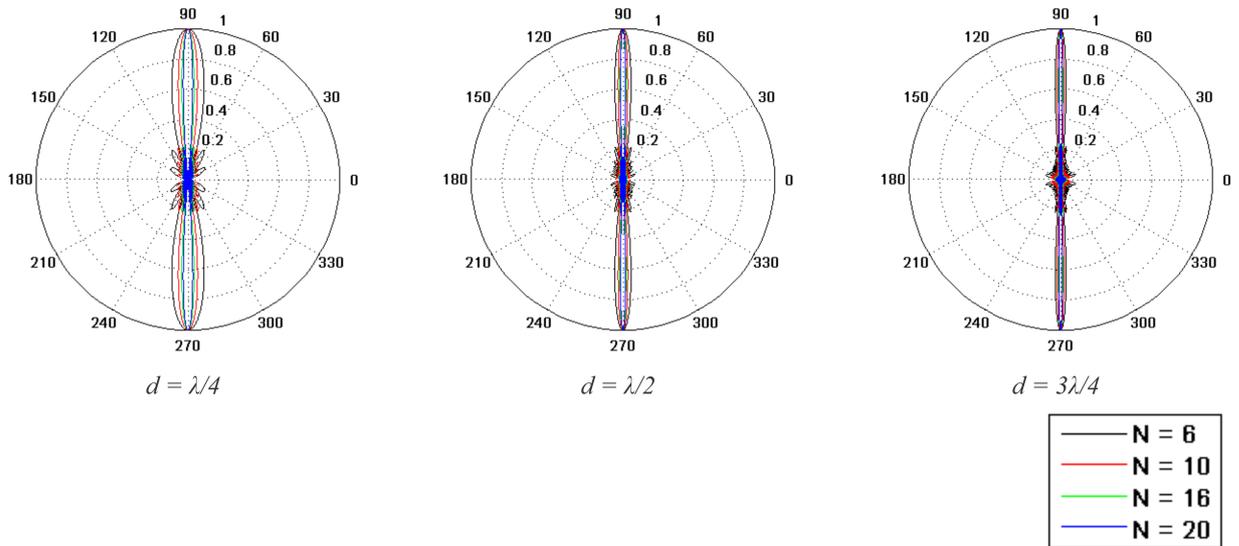


Figura 2.13 – Diagramas de Radiação de um Arranjo Uniforme com 6, 10, 16 e 20 elementos linearmente espaçados de  $\lambda/4$ ,  $\lambda/2$  e  $3\lambda/4$ .

Por meio da Tabela 2.3 verifica-se uma redução do RSSL e um aumento no HPBW, quando comparado aos valores encontrados para um Arranjo Uniforme. Este fato é evidenciado na Figura 2.14, na qual é possível observar a predominância do lóbulo principal e um aumento na largura do lóbulo principal, diminuindo a diretividade do arranjo em todos os casos.

Tabela 2.3 – Valores de RSSL e HPBW obtidos para um Arranjo de Dolph-Tschebyscheff.

N = 6			N = 10		
$d$	RSSL (dB)	HPBW (°)	$d$	RSSL (dB)	HPBW (°)
$\lambda/4$	NL*	69.48	$\lambda/4$	-40	40.9
$\lambda/2$	-40	33.12	$\lambda/2$	-40	20.16
$3\lambda/4$	-23.04	21.89	$3\lambda/4$	-40	13.39
N = 16			N = 20		
$d$	RSSL (dB)	HPBW (°)	$d$	RSSL (dB)	HPBW (°)
$\lambda/4$	-40	25.06	$\lambda/4$	-40	19.87
$\lambda/2$	-40	12.46	$\lambda/2$	-40	9.93
$3\lambda/4$	-40	8.28	$3\lambda/4$	-40	6.62
*NL - Não possui lóbulos secundários.					

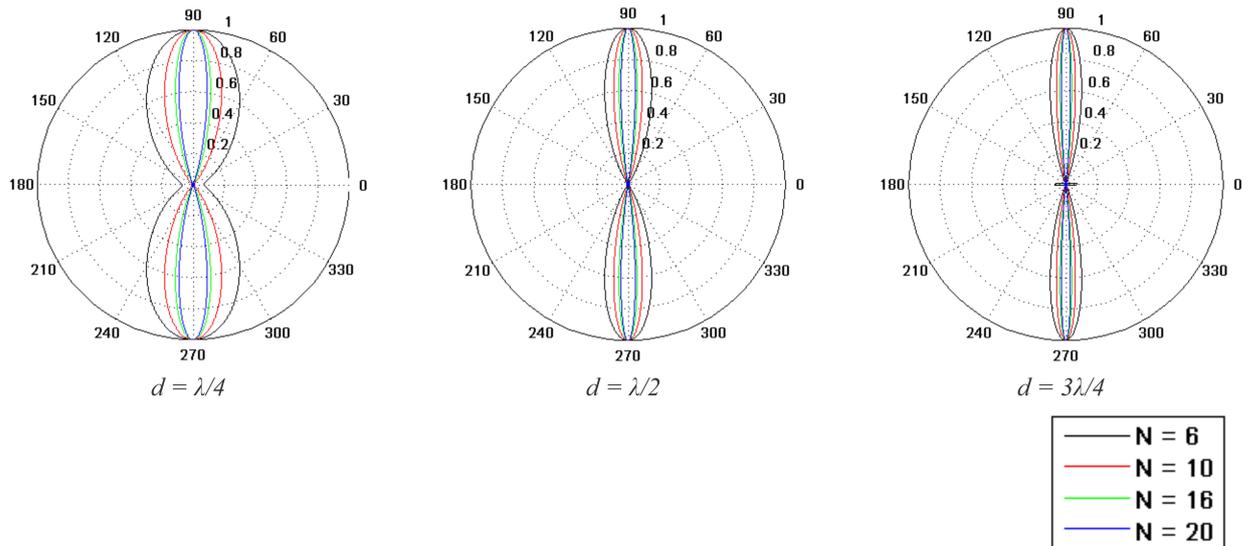


Figura 2.14 – Diagrama de Radiação de um Arranjo de Dolph-Tschebyscheff com 6, 10, 16 e 20 elementos linearmente espaçados de  $\lambda/4$ ,  $\lambda/2$  e  $3\lambda/4$ .

Considerando a técnica Binomial, atingiu-se os valores de RSSL e HPBW apresentados na Tabela 2.4. Os diagramas de radiação obtidos são exibidos na Figura 2.15. Através da Tabela 2.4 verifica-se que em praticamente todos os casos avaliados obteve-se um aumento no HPBW, quando comparado aos resultados encontrados para um arranjo Uniforme e de Dolph-Tschebyscheff diminuindo a diretividade do arranjo e conseqüentemente, suprimindo os lóbulos secundários em quase todos os casos.

Tabela 2.4 – Valores de RSSL e HPBW obtidos para um Arranjo Binomial.

N = 6			N = 10		
$d$	RSSL (dB)	HPBW (°)	$d$	RSSL (dB)	HPBW (°)
$\lambda/4$	NL*	81.18	$\lambda/4$	NL*	58.68
$\lambda/2$	NL*	37.98	$\lambda/2$	NL*	28.37
$3\lambda/4$	-15.05	25.06	$3\lambda/4$	-27.09	18.81
N = 16			N = 20		
$d$	RSSL (dB)	HPBW (°)	$d$	RSSL (dB)	HPBW (°)
$\lambda/4$	NL*	44.84	$\lambda/4$	NL*	39.7
$\lambda/2$	NL*	22.0	$\lambda/2$	NL*	19.55
$3\lambda/4$	-45.15	14.62	$3\lambda/4$	-57.2	13.0
*NL - Não possui lóbulos secundários.					

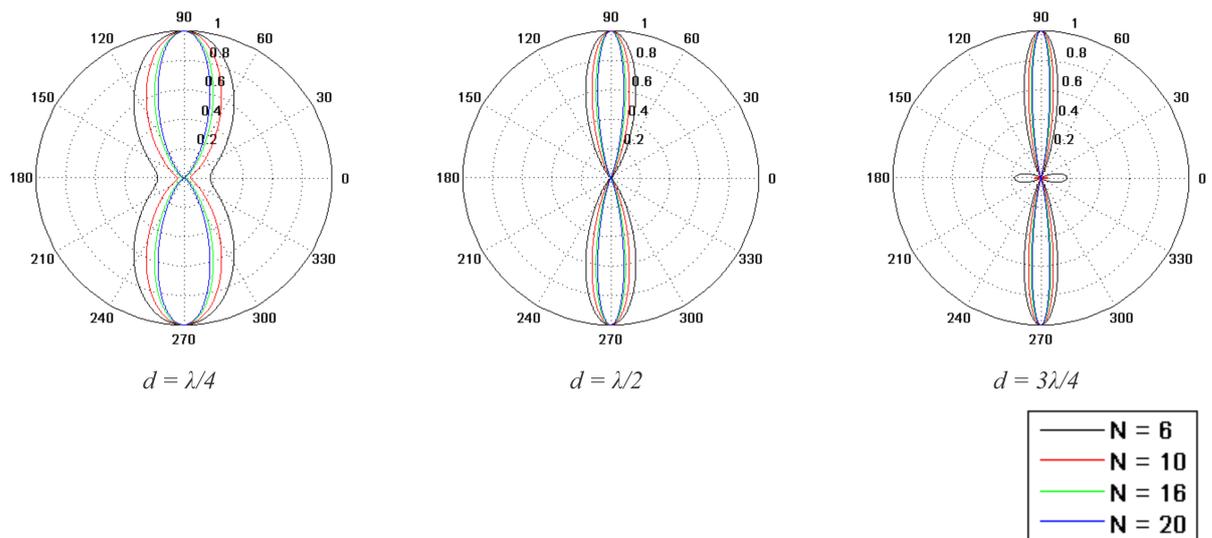


Figura 2.15 – Diagrama de Radiação de um Arranjo Binomial com 6, 10, 16 e 20 elementos linearmente espaçados de  $\lambda/4$ ,  $\lambda/2$  e  $3\lambda/4$ .

Por meio da técnica de Hamming foram alcançados os valores de RSLL e HPBW expostos na Tabela 2.5. Os diagramas de radiação são apresentados na Figura 2.16. Através da Tabela 2.5 verifica-se um aumento considerável do HPBW, em todos os casos, quando comparado aos resultados apresentados anteriormente. Porém em praticamente todos os casos houve uma forte supressão nos lóbulos secundários. A Figura 2.16 evidencia o aumento do HPBW e a supressão dos lóbulos secundários.

Tabela 2.5 – Valores de RSLL e HPBW obtidos para um Arranjo de Hamming.

N = 6			N = 10		
$d$	RSLL (dB)	HPBW (°)	$d$	RSLL (dB)	HPBW (°)
$\lambda/4$	NL*	85.65	$\lambda/4$	NL*	45.61
$\lambda/2$	NL*	39.74	$\lambda/2$	-35.37	22.36
$3\lambda/4$	-13.11	26.21	$3\lambda/4$	-35.81	14.86
N = 16			N = 20		
$d$	RSLL (dB)	HPBW (°)	$d$	RSLL (dB)	HPBW (°)
$\lambda/4$	-39.82	27.29	$\lambda/4$	-40.45	21.56
$\lambda/2$	-39.37	13.54	$\lambda/2$	-40.45	10.73
$3\lambda/4$	-39.37	9.04	$3\lambda/4$	-40.45	7.16

\*NL - Não possui lóbulos secundários.

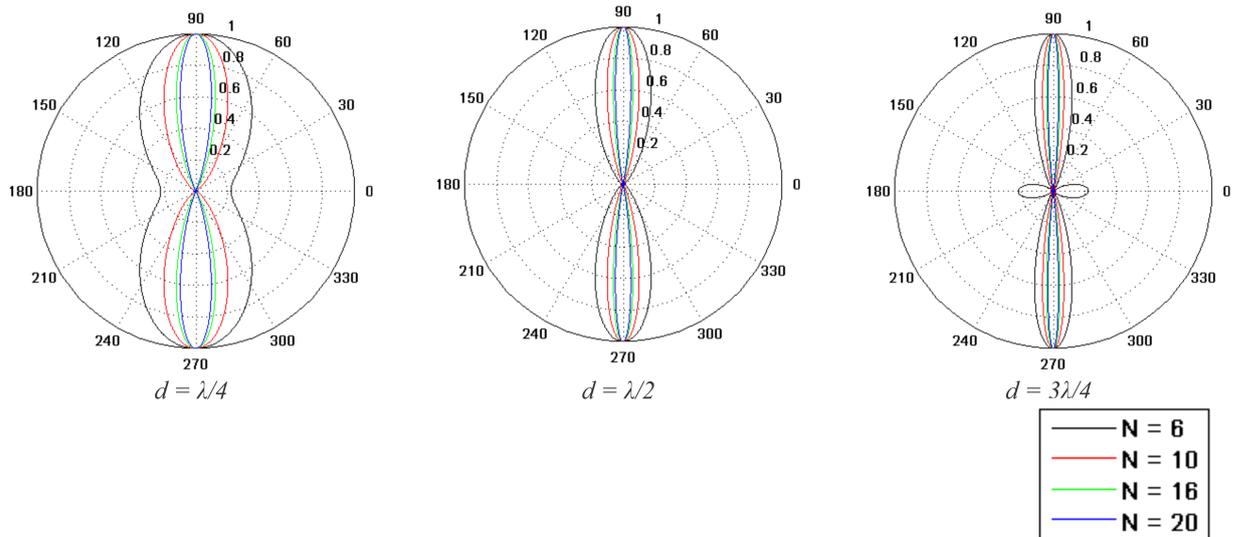


Figura 2.16 – Diagrama de Radiação de um Arranjo de Hamming com 6, 10, 16 e 20 elementos linearmente espaçados de  $\lambda/4$ ,  $\lambda/2$  e  $3\lambda/4$ .

Através da técnica de Blackman foram atingidos os valores de RSSL e HPBW apresentados na Tabela 2.6. Os diagramas de radiação são exibidos na Figura 2.17. Através da Tabela 2.6 verifica-se um aumento do HPBW, quando comparado aos resultados anteriores. Aumentando a largura do lóbulo principal e diminuindo a diretividade do arranjo. Entretanto, ocorreu uma forte supressão dos lóbulos secundários, a qual pode ser observada na Figura 2.17.

Tabela 2.6 – Valores de RSSL e HPBW obtidos para um Arranjo de Blackman.

N = 6			N = 10		
$d$	RSSL (dB)	HPBW (°)	$d$	RSSL (dB)	HPBW (°)
$\lambda/4$	NL*	131.8	$\lambda/4$	NL*	60.98
$\lambda/2$	NL*	54.32	$\lambda/2$	-64.62	29.4
$3\lambda/4$	-7.2	35.46	$3\lambda/4$	-27.40	19.48
N = 16			N = 20		
$d$	RSSL (dB)	HPBW (°)	$d$	RSSL (dB)	HPBW (°)
$\lambda/4$	-58.62	35.46	$\lambda/4$	-58.3	27.83
$\lambda/2$	-58.62	17.53	$\lambda/2$	-58.3	13.82
$3\lambda/4$	-58.62	11.66	$3\lambda/4$	-58.3	9.22
*NL - Não possui lóbulos secundários.					

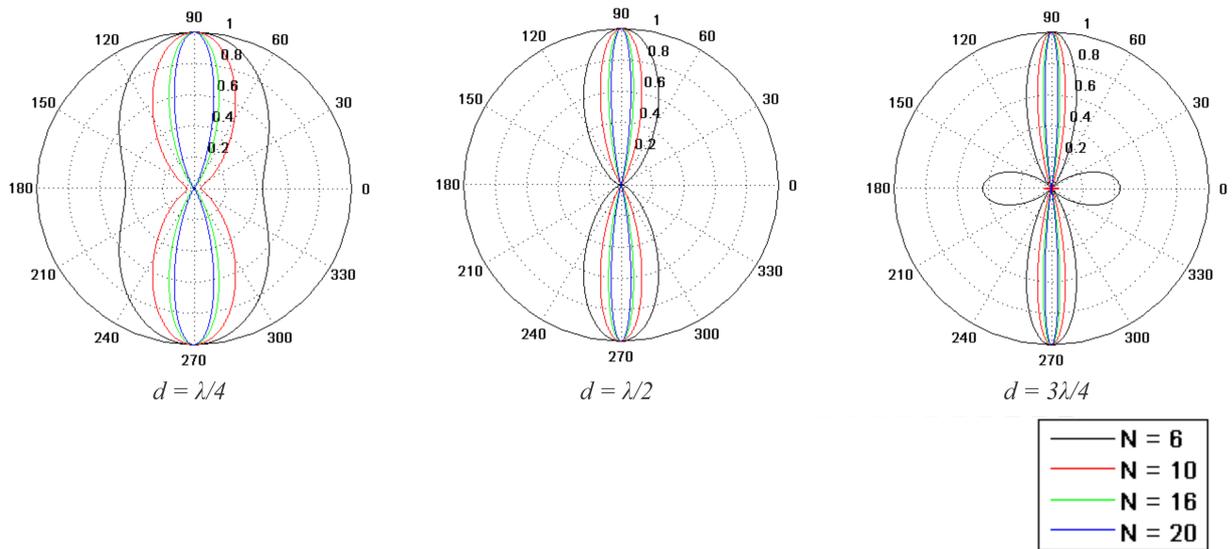


Figura 2.17 – Diagrama de Radiação de um Arranjo de Blackman com 6, 10, 16 e 20 elementos linearmente espaçados de  $\lambda/4$ ,  $\lambda/2$  e  $3\lambda/4$ .

Por meio dos resultados expostos anteriormente conclui-se que para um arranjo uniforme obtém-se altos níveis de lóbulos secundários e lóbulo principal estreito, quando comparado as demais técnicas analisadas. Porém, o aumento no nível dos lóbulos secundários não é desejado, pois aumenta a transmissão e recepção de sinais em direções indesejadas. Por este motivo para muitas aplicações é importante realizar a supressão dos lóbulos secundários, apesar de acarretar em um aumento da largura do lóbulo principal e redução da diretividade. Contudo, o arranjo de Dolph-Tschebyschev apresentou baixos níveis de lóbulos secundários e um pequeno aumento no HPBW do arranjo, quando comparado ao arranjo uniforme. Tal técnica obteve valores de RSSL satisfatórios e baixos valores de HPBW, quando comparados com as demais técnicas abordadas nesta seção. Portanto, esta técnica apresenta-se como a melhor opção quando deseja-se realizar a supressão dos lóbulos secundários e obter um HPBW baixo.

---

---

## 3

---

# OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS

Este capítulo tem como objetivo apresentar a fundamentação teórica sobre o método de Otimização por Enxame de Partículas (*Particle Swarm Optimization, PSO*). Neste capítulo são descritos e brevemente analisados os principais parâmetros deste algoritmo e seu funcionamento básico.

### 3.1 Introdução

O método de Otimização por Enxame de Partículas (*do inglês, Particle Swarm Optimization - PSO*), apresenta-se como um processo de otimização estocástico, o qual demonstra-se eficaz na otimização de funções não-lineares de alta dimensionalidade e com variáveis contínuas. O PSO foi proposto em 1995 por Kenedy e Eberhart (KENNEDY e EBERHART, 1995) e foi baseado no comportamento social de algumas espécies animais, sendo inspirado na capacidade de tais espécies trabalharem de forma coletiva na localização de alimentos, esta capacidade pode ser verificada em cardumes de peixes, bandos de pássaros e enxames de abelhas (BRATTON e KENNEDY, 2007).

O PSO foi classificado pelos seus criadores como um método evolucionário (KENNEDY e EBERHART, 2001), apesar de não ser baseado no conceito de seleção natural, pois utiliza a estratégia de colaboração para evoluir. Tal classificação é baseada no fato do PSO fazer uso de populações de soluções individuais do problema e de apresentar aspectos semelhantes aos operadores evolucionários.

Para melhor compreender a analogia que levou ao desenvolvimento do PSO, imagine um bando de pássaros procurando o local com maior quantidade de alimento, sem prévio conhecimento do local onde estão sobrevoando. Os pássaros iniciam sua busca de forma aleatória e com velocidade aleatória. Conforme sobrevoam o local, cada pássaro pode lembrar o local onde encontrou o maior número de alimentos anteriormente, da mesma forma que pode ter conhecimento da melhor localização experimentada pelo seu bando até o momento. Com tais informações cada pássaro atualiza a sua velocidade em ambas as direções, alterando a sua trajetória e voando para uma posição entre os dois pontos, dependendo da influência de cada direção na sua decisão. Assim, o bando de pássaros sobrevoa a área até que o local com maior quantidade de alimentos seja encontrado e que todos os pássaros encontrem tal posição, através da experiência individual e coletiva do bando. Esta analogia pode ser estendida para um enxame de abelhas ou um cardume de peixes a procura de alimentos, os quais apresentam o mesmo comportamento.

### 3.2 Conceitos Básicos e Terminologia

Para uma melhor compreensão do PSO, a seguir são apresentados os principais termos que serão utilizados no decorrer deste trabalho.

- **Partícula:** Cada indivíduo do enxame é chamado de partícula e representa uma possível solução para o problema avaliado. Cada partícula atua isoladamente, atualizando a sua posição e velocidade para alcançar o seu objetivo.
- **Enxame:** Representa um grupo de partículas, o qual tem seu tamanho definido durante a implementação do PSO.
- **Posição:** Representa a posição da partícula no espaço de busca do enxame. A posição da partícula é representada em um plano cartesiano  $(x, y)$ , os valores limites deste plano são definidos para cada problema a ser otimizado. Estes valores determinam o espaço de busca do método proposto, o qual será definido a seguir.
- **Aptidão:** Valor calculado através da posição de cada partícula. Este valor é definido através de uma função aptidão, a qual é definida com o objetivo de avaliar a posição de cada partícula, verificando o quão próxima da melhor posição encontra-se cada partícula. Em todas as técnicas de computação evolutiva existe uma forma de avaliar a posição de

cada partícula, tanto o PSO como os Algoritmos Genéticos utilizam a função aptidão com esta finalidade.

- ***pbest***: Representa a melhor posição experimentada pela partícula até o momento. Este parâmetro representa a memória individual de cada partícula do enxame.
- ***gbest***: Representa a melhor posição experimentada pelo enxame. Tal parâmetro representa a memória coletiva do enxame. Todas as partículas do enxame possuem o mesmo *gbest*, diferentemente do *pbest*, o qual cada partícula possui o seu.
- **$V_{max}$** : Todas as partículas do enxame devem atualizar a sua posição no espaço, com o objetivo de encontrar a melhor posição. Porém, para realizar a atualização é necessário que a partícula voe com uma determinada velocidade e que esta velocidade seja alterada levando em consideração a experiência individual (*pbest*) e coletiva (*gbest*) do enxame e a velocidade máxima do enxame. A velocidade máxima do enxame define a máxima velocidade que a partícula pode possuir, sendo utilizada para evitar que a partícula escape do espaço de busca.
- ***Espaço de Busca***: Representa as posições permitidas para o enxame, ou seja, como cada posição é representada em um plano cartesiano ( $x, y$ ). O espaço de busca representa os valores máximo e mínimo de  $x$  e  $y$ .

### 3.3 Versão Básica do PSO

O funcionamento básico do PSO é representado pelo fluxograma da Figura 3.1. Nesta técnica, cada pássaro é visto como uma partícula e representa uma possível solução para o problema a ser otimizado. Estas partículas percorrem o espaço de busca com uma velocidade variável. Seu movimento no espaço depende de duas variáveis, a experiência individual (*pbest*) e a experiência do enxame (*gbest*). Essas variáveis são obtidas através da avaliação da posição de cada partícula através de uma função aptidão. Por conseguinte, a posição da partícula é calculada empregando a melhor posição (*pbest*) experimentada pela partícula até a iteração atual e a melhor posição (*gbest*) experimentada pelo enxame até a iteração atual (KENNEDY e EBERHART, 1995).

Considerando a Figura 3.1, para um melhor entendimento do funcionamento básico do PSO, a seguir é descrito cada passo apresentado no fluxograma.

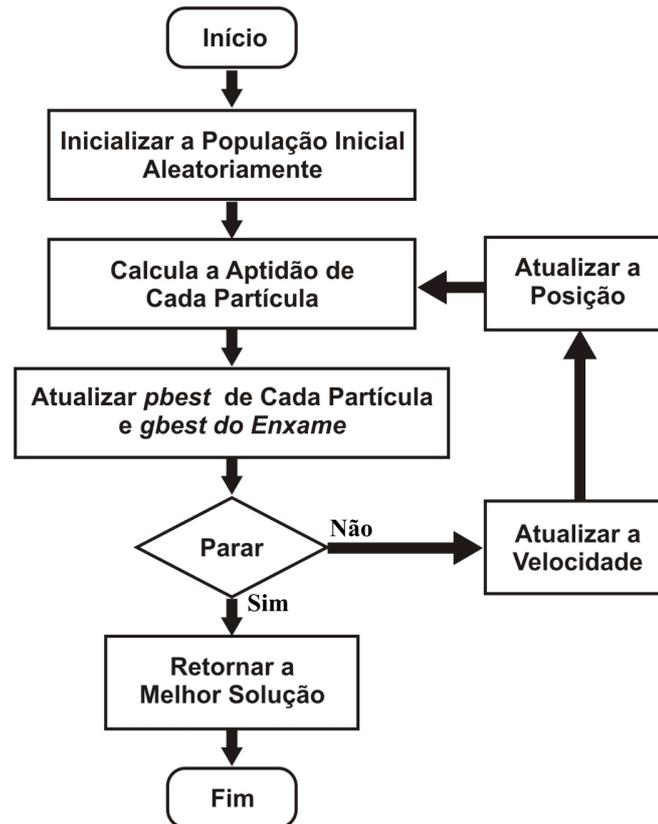


Figura 3.1 – Fluxograma da Técnica de Otimização por Enxame de Partículas.

1. *Inicializar a População Inicial Aleatoriamente*: O primeiro passo do PSO consiste em inicializar a sua população inicial, para fazer esta inicialização é necessário definir o espaço de busca de cada partícula do PSO. Para isto, deve-se saber o limite superior e inferior permitido para a posição de cada partícula. Após definido o espaço de busca das partículas, define-se aleatoriamente a posição inicial e a velocidade inicial de cada partícula do PSO.
2. *Calcula a Aptidão de Cada Partícula*: A posição de cada partícula é avaliada através da função aptidão. A função aptidão deve ser definida cuidadosamente, pois ela irá determinar a direção para onde a partícula irá se locomover. O valor calculado pela função aptidão será utilizado para determinar os valores de *pbest* e *gbest*.
3. *Atualizar pbest de cada Partícula e gbest do Enxame*: Após determinado o valor de aptidão de cada partícula, deve-se atualizar os valores de *pbest* e *gbest*. Estes valores só serão atualizados se o valor de aptidão encontrado na iteração atual for superior ao registrado em tais parâmetros. Ou seja, caso a partícula encontre uma posição melhor que as posições por ela visitada até a iteração anterior o valor de *pbest* será atualizado,

caso contrário o valor de  $pbest$  será mantido inalterado. Da mesma forma, caso o enxame encontre uma posição melhor que a melhor posição visitada até a iteração anterior o valor de  $gbest$  será atualizado, caso contrário,  $gbest$  será mantido inalterado.

4. *Critério de Parada:* O critério de parada define se o algoritmo deve ser encerrado ou deve continuar executando, voltando ao passo 2. Caso o critério de parada seja satisfeito o algoritmo deve retornar a posição de  $gbest$ , ou seja, a melhor solução para o problema em questão. Caso contrário, a posição da partícula deve continuar sendo atualizada até que tal critério seja satisfeito. Para cada aplicação pode-se definir um critério de parada distinto. A seguir serão descritos os critérios de parada mais utilizados.
5. *Atualiza Velocidade:* Caso o critério de parada não seja satisfeito é necessário determinar a velocidade de cada partícula no espaço de busca, a qual é dada por:

$$V_i^{k+1} = w \cdot V_i^k + C_1 \cdot rand_1(pbest_i^k - X_i^k) + C_2 \cdot rand_2(gbest^k - X_i^k) \quad (3.1)$$

Onde:

- $k$  = Iteração atual da partícula;
- $V_i^{k+1}$  = Velocidade da partícula  $i$  na iteração  $k + 1$ ;
- $V_i^k$  = Velocidade da partícula  $i$  na iteração atual;
- $X_i^k$  = Posição atual da partícula  $i$ ;
- $pbest_i^k$  = Melhor posição da partícula  $i$  até a iteração atual;
- $gbest^k$  = Melhor posição do enxame até a iteração atual;
- $C_1$  e  $C_2$  = Fatores de aprendizagem da partícula, os quais definem a influência da experiência individual e coletiva no movimento das partículas;
- $rand_1$  = Valor aleatório entre  $[0, 1]$ ;
- $rand_2$  = Valor aleatório entre  $[0, 1]$ ;
- $w$  = Coeficiente de inércia.

O coeficiente de inércia da partícula é responsável por ponderar a influência da velocidade atual na atualização da velocidade de cada partícula. Este coeficiente é determinado por:

$$w = w_{max} - \frac{w_{max} - w_{min}}{k_{total}} \cdot k \quad (3.2)$$

Onde  $k_{total}$  é o número total de iterações,  $w_{max}$  e  $w_{min}$  representam os valores máximo e mínimo do coeficiente de inércia, respectivamente. A escolha de valores máximo e

mínimo do coeficiente de inércia deve ser cuidadosa, pois valores muito altos podem fazer com que a partícula seja afastada do valor ótimo, ou seja, se perca do enxame, porém valores muito baixos fazem com que ocorra uma convergência prematura da população, sendo atingido um ótimo local, fato este que não é desejado (ROBINSON e RAHMAT-SAMII, 2004).

6. *Atualiza Posição:* Através da posição atual da partícula e da nova velocidade calculada é possível atualizar a posição da partícula no espaço de busca. Para realizar esta atualização o PSO utiliza a equação:

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1} \quad (3.3)$$

### 3.3.1 Codificação das Variáveis

O PSO pode ser utilizado na resolução de problemas complexos, os quais não possuem soluções analíticas praticáveis. Estes problemas em sua grande maioria necessitam considerar diversas variáveis para determinar a sua solução. Por este motivo, o PSO deve ser capaz de codificar tais variáveis, com o objetivo de encontrar a melhor solução para o problema. O PSO foi projetado, inicialmente, considerando variáveis reais contínuas (KENNEDY e EBERHART, 1995). Porém existem diversos problemas que necessitam que as variáveis assumam valores booleanos, ou seja, 0 ou 1. Para resolver este problema foi desenvolvido o PSO Binário (JUN e CHANG, 2009), o qual faz uso de variáveis binárias. Além disso, é possível considerar uma codificação híbrida, ou seja, em um mesmo PSO pode-se considerar variáveis binárias e reais.

Neste trabalho foi realizada a implementação de diversas versões do PSO, as quais utilizam codificação real, binária e híbrida para o controle de diversos parâmetros de um arranjo linear de antenas.

### 3.3.2 Critérios de Parada

Para realizar a implementação do PSO é necessário definir o critério de parada do algoritmo. Através deste critério será possível definir se a posição e velocidade de cada partícula do enxame continuará a ser atualizada ou se o algoritmo será encerrado e a melhor posição encontrada pelo enxame será apresentada. Para cada aplicação pode existir um critério de parada diferente. Os dois critérios mais populares são descritos a seguir, estes e outros critérios de

parada podem ser encontrados em (JIN e RAHMAT-SAMII).

- *Número de Iterações*: O PSO irá executar um número pré-determinado de vezes (Número de Iterações). Este é o critério de parada mais utilizado e foi utilizado em todas versões do PSO implementadas neste trabalho.
- *Valor Aptidão Alcançado*: O PSO irá executar um número pré-determinado de vezes (Número de Iterações), porém pode ser encerrado a qualquer momento caso seja verificado que alguma partícula do enxame possui o valor de aptidão desejado.

### 3.4 Parâmetros de Aplicação do PSO

No algoritmo do PSO existem diversos parâmetros que devem ser ajustados, visando produzir variações no modo como o algoritmo executa a busca no espaço de busca do problema, ou seja, tais parâmetros definem a movimentação das partículas pelo espaço de busca. A seguir são apresentados os valores definidos para os principais parâmetros do PSO, os quais são utilizados para determinar a velocidade de cada partícula no espaço de busca, através da equação (3.1).

- *Tamanho da População*: O Tamanho da população varia para cada aplicação, porém populações com 20 e 50 partículas, são mais usuais. O PSO apresenta-se como um método simples, de fácil implementação e com baixo tempo de computação quando comparado com outros métodos de computação evolutiva. Um dos motivos de tal vantagem é a necessidade de pequenas populações quando comparado a outros métodos (MENDES, 1994).
- *Coefficiente de Inércia ( $w$ )*: O valor do coeficiente de inércia deve ser determinado de forma cuidadosa, pois seu valor é considerado crítico para a convergência do PSO. A escolha de valores máximo e mínimo do coeficiente de inércia deve ser cuidadosa, pois valores muito altos podem fazer com que a partícula seja afastada do valor ótimo, ou seja, se perca do enxame, porém valores muito baixos fazem com que ocorra uma convergência prematura da população, sendo atingido um ótimo local, fato este que não é desejado. Percebendo a importância deste parâmetro Eberhart (EBERHART e SHI, 1998) sugeriu que o valor de  $w$  variasse linearmente de 0.4 à 0.9, durante a execução do PSO. Esta variação foi utilizada em todos os casos apresentados.

- *Fatores de Aprendizagem ( $C_1$  e  $C_2$ ):* Os fatores de aprendizagem do PSO determinam a influência da experiência individual e coletiva. Estes parâmetros foram definidos como 2 pelo seu próprio criador em (EBERHART e SHI, 2001). Este valor foi utilizado em todos os casos apresentados.

### 3.5 Técnica de Otimização por Enxame de Partículas Binária

A técnica de Otimização por Enxame de Partículas foi desenvolvida para trabalhar com variáveis reais e contínuas. Porém inúmeros problemas de otimização necessitam de técnicas capazes de trabalhar com variáveis discretas. Devido a isto, pesquisadores da área desenvolveram uma variação do PSO, denominada PSO Binário (AFSHINMANESH et al., 2005; JIN e RAHMAT-SAMII, 2007; WENG et al., 2014; KENNEDY e EBERHART, 1997). Esta versão do PSO é utilizada na otimização de problemas discretos, sendo aplicada especialmente na otimização do padrão de radiação de antenas (JIN e RAHMAT-SAMII, 2007; WENG et al., 2014).

No PSO Binário uma partícula só pode estar em dois estados, ou seja, verdadeiro ou falso (1 ou 0, respectivamente). Nesta versão do PSO, a velocidade da partícula é determinada pela equação (3.1), da mesma forma que no PSO contínuo. Porém, a posição da partícula é definida como uma probabilidade de a partícula estar no estado 0 ou 1. Portanto, atualização da partícula é definida por (KENNEDY e EBERHART, 1997):

$$X_i^{k+1} = \begin{cases} 1 & \text{se } \text{rand}() < S(V_i^{k+1}) \\ 0 & \text{, Caso Contrário} \end{cases} \quad (3.4)$$

Onde,  $S(V_i^{k+1})$  representa o valor da função *sigmóide* para o valor da velocidade, calculado através da equação (3.1) para cada partícula.

---

---

## 4

---

# OTIMIZAÇÃO DE ARRANJOS LINEARES DE ANTENAS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos na otimização de Arranjos Lineares de Antenas através da Técnica de Otimização por Enxame de Partículas. Estas otimizações foram realizadas com o objetivo de reduzir o Nível dos Lóbulos Secundários e o Ângulo de Meia Potência do arranjo.

### 4.1 Introdução

Nos sistemas de comunicação atuais ocorre uma demanda por antenas cujo o padrão de radiação se caracteriza por lóbulos secundários de baixa amplitude e uma largura de feixe estreita, possibilitando a redução da interferência de outros sistemas de comunicação e aumentando a diretividade do arranjo. Além disso, realizou-se o apontamento do feixe principal, permitindo realizar a varredura de fase em diversas direções, viabilizando a transmissão e/ou recepção de sinais com máximo ganho nas direções desejadas. Inúmeras aplicações necessitam que o feixe principal seja controlado dinamicamente, como por exemplo, sistemas de comunicação por satélite.

Os arranjos de antenas permitem conformar o padrão de radiação, visando obter as especificações de projeto desejadas. Em um arranjo linear de antenas o padrão de radiação final é determinado pelo produto do padrão de radiação de um elemento pelo fator de arranjo da antena (BALANIS, 1982; KRAUS, 1983). Este fator depende do número de elementos do arranjo, espaçamento entre os elementos, intensidade e ângulo de excitação de fase. Portanto, através

da variação destes parâmetros é possível obter o padrão de radiação desejado para um arranjo linear de antenas.

Neste trabalho foi realizado o ajuste do padrão de radiação de um arranjo linear de antenas, visando reduzir o nível dos lóbulos secundários, o ângulo de meia potência e o número de elementos do arranjo, ou seja, o tamanho físico do arranjo. Além disso, foi realizado o apontamento do feixe principal para direções pré-determinadas e a seleção de antenas do arranjo de antenas. Estes parâmetros foram otimizados de maneira conjunta e isolada, com o objetivo de encontrar o padrão de radiação desejado e avaliar a influência da redução de cada parâmetro no padrão de radiação de um arranjo linear de antenas composto por fontes puntiformes. Este capítulo apresenta os casos de otimização que consideram apenas a otimização do Nível dos Lóbulos Secundários e do Ângulo de Meia Potência de um arranjo linear de antenas. Tais otimizações foram realizadas através do PSO.

Com o objetivo de verificar a efetividade da técnica proposta, o efeito isolado e, após, conjunto dos parâmetros de otimização foi avaliado com respeito a Máxima Amplitude dos Lóbulos Secundários (RSSL) e Ângulo de Meia Potência (HPBW). Além disso, os resultados obtidos foram comparados aos resultados encontrados a partir de um Arranjo Uniforme e das técnicas: Binomial, Dolph-Tschebyscheff, Blackman e Hamming. Estas são técnicas consolidadas na literatura (BALANIS, 1982; RUDGE, 1983), sendo empregadas na determinação da amplitude de cada elemento do arranjo.

#### **4.2 Otimização da Máxima Amplitude dos Lóbulos Secundários**

Algumas aplicações, por exemplo a detecção de alvos, podem requerer antenas com lóbulos secundários reduzidos. Esta característica possibilita atenuar a recepção ou transmissão de sinais em direções que se encontram fora do lóbulo principal da antena. Dessa forma, um dos principais objetivos do projeto de antenas é minimizar os lóbulos secundários, garantindo a prevalência do lóbulo principal. Neste trabalho, é proposto e implementado um PSO com o objetivo de minimizar a Máxima Amplitude dos Lóbulos Secundários de um arranjo linear de antenas composto por fontes puntiformes.

Pode-se realizar a otimização do RSSL através de modificações na amplitude de excitação e distância entre os elementos de um arranjo de antenas. Por conseguinte, estes parâmetros são utilizados como variáveis de otimização, sendo suas influências analisadas na otimização do RSSL. Foram simuladas configurações de arranjos lineares de antenas com 6, 10, 16 e 20

elementos, linearmente espaçados de  $1/4$ ,  $1/2$  e  $3/4$  de comprimentos de onda ( $\lambda$ ) e em fase ( $\beta = 0$ ). O PSO implementado é representado pela Figura 4.1.

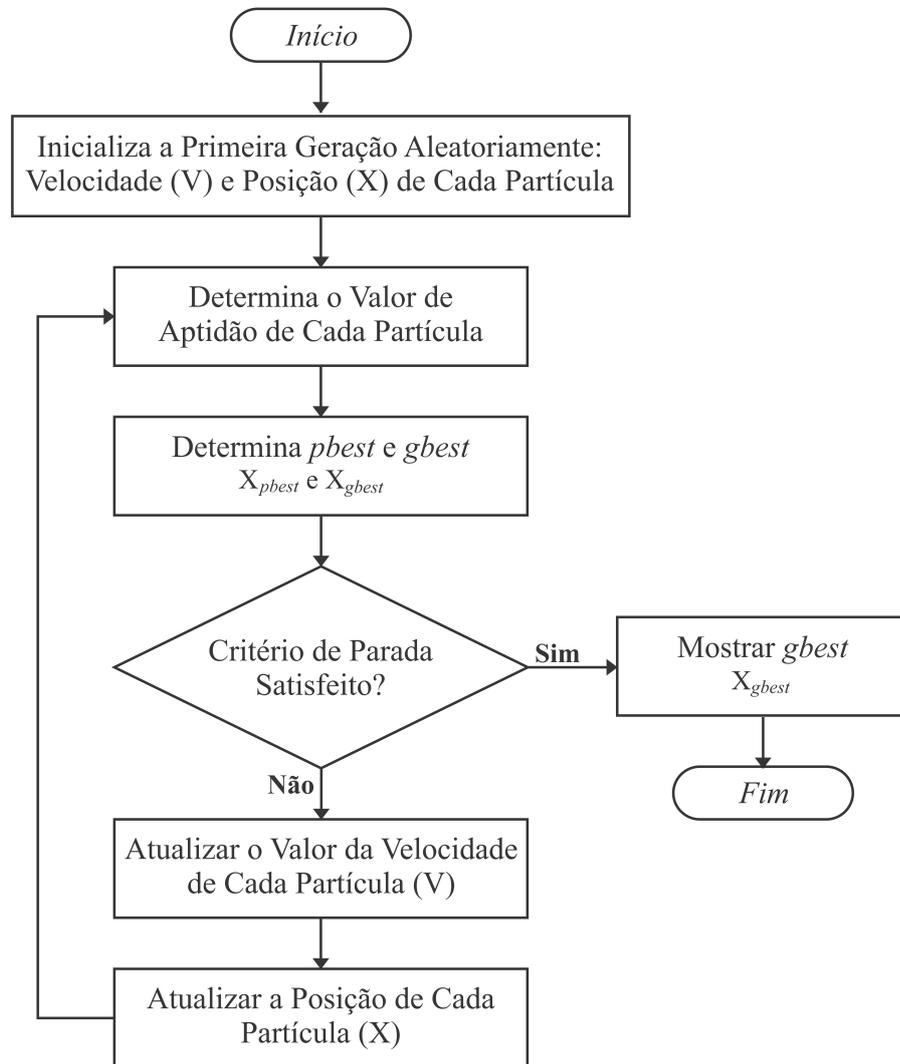


Figura 4.1 – Fluxograma do PSO.

Para realizar a implementação do PSO deve-se determinar seus parâmetros, inicialmente define-se o espaço de busca do enxame, o qual depende das variáveis que serão utilizadas no processo de otimização. Como mencionado anteriormente, foram utilizadas duas variáveis, a amplitude de excitação de cada elemento e a distância entre eles. A amplitude de excitação varia no intervalo  $[0, 1]$  e a distância entre os elementos no intervalo  $]0, 0,75]$ . Estes valores representam o espaço de busca do enxame, qualquer valor de amplitude ou distância fora deste intervalo não será aceito, pois a partícula estará escapando do espaço de busca. Caso isto ocorra, a partícula será colocada novamente no seu espaço de busca através do espelhamento de sua posição.

Após determinado o espaço de busca do enxame define-se o critério de parada do PSO. Este critério é utilizado para determinar o momento em que o PSO deve encerrar a sua execução. Para a otimização em questão, considerou-se como critério de parada o número de iterações igual a 500. Além disso, o tamanho do enxame foi definido como 50 partículas. Estes valores foram determinados a partir da avaliação da convergência do PSO em todos os casos apresentados.

Os parâmetros descritos acima são essenciais para o funcionamento adequado do PSO. Porém, o principal parâmetro do PSO é a função aptidão, a qual avalia as possíveis soluções para o problema a ser resolvido. Visando realizar a otimização do RSSL de um arranjo linear de antenas foi desenvolvida a seguinte função aptidão:

$$\text{Aptidão} = \text{máx}(|RSSL - RSSL_d|^{-2}) \quad (4.1)$$

A equação (4.1) considera o valor desejado da máxima amplitude dos lóbulos secundários ( $RSSL_d = -40dB$ ) como parâmetro comparativo com o valor obtido de RSSL para cada partícula. Através destes valores avalia-se o quão próxima do valor desejado encontra-se a partícula avaliada.

Para cada configuração do arranjo de antenas descrita anteriormente, realiza-se a otimização do RSSL. Portanto, a seguir serão apresentados os resultados obtidos quando considera-se as seguintes variáveis de otimização: (1) Amplitude de excitação de cada elemento do arranjo; (2) Distância entre os elementos do arranjo; (3) Amplitude de excitação de cada elemento do arranjo e a distância entre eles.

Inicialmente, emprega-se como variável de otimização a amplitude de excitação de cada elemento do arranjo de antenas e a distância entre os elementos é mantida constante. Os diagramas de radiação obtidos são apresentados na Figura 4.2. Na segunda otimização utiliza-se como variável de otimização apenas a distância entre os elementos do arranjo. Neste caso, foram usados os valores de amplitude de um Arranjo Uniforme e também os valores adquiridos pelas técnicas: Binomial, Dolph-Tschebyscheff, Blackman e Hamming. Os diagramas de radiação obtidos são apresentados na Figura 4.3. Após, emprega-se como variáveis de otimização a amplitude de excitação de cada elemento e a distância entre os elementos do arranjo, neste caso ambos os parâmetros foram determinados através do PSO. Os diagramas de radiação obtidos são apresentados na Figura 4.4.

Conforme desejado os lóbulos secundários, em todos os casos, sofreram forte atenuação durante o processo de otimização. Como consequência, apenas pode ser observado nas Figuras 4.2, 4.3 e 4.4 o lóbulo principal. As Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3 apresentam os valores de HPBW e RSSL obtidos por meio do PSO implementado para cada caso. É possível verificar que, conforme desejado, o PSO alcançou valores de RSSL próximos de  $-40dB$ , ocasionando a supressão dos lóbulos secundários dos arranjos lineares de antenas implementados.

A partir dos resultados expostos nas Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3 nota-se que na maioria dos casos encontrou-se o valor de RSSL desejado. Porém, quando utiliza-se como variável de otimização apenas a distância entre os elementos do arranjo, tem-se valores de HPBW altos. Visto que, para realizar a redução dos lóbulos secundários o PSO implementado obtém baixos valores de distância aumentando, assim, o HPBW do arranjo. No entanto, através da comparação dos resultados apresentados neste caso e os descritos na seção 2.5 conclui-se que: (1) Os valores de RSSL encontrados, em todos os casos, são menores que os obtidos para um arranjo uniforme e possui valores iguais ou próximos aos obtidos pelas demais técnicas; (2) Para avaliar os valores HPBW encontrados é necessário analisar as Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3 separadamente. A partir da Tabela 4.1, verifica-se valores de HPBW próximos aos valores encontrados para um arranjo uniforme e inferiores aos obtidos pelas demais técnicas. Porém, a partir dos valores de HPBW da Tabela 4.2 nota-se um aumento considerável quando comparado a um arranjo uniforme. Contudo, quando comparado com as técnicas descritas na seção 2.5 conclui-se que o PSO alcançou valores maiores de HPBW. Através da Tabela 4.3 constata-se que os valores de HPBW encontrados são maiores que os valores obtidos em praticamente todas as técnicas para  $d = 3\lambda/4$ .

Portanto, apesar do PSO implementado ter alcançado o seu objetivo, o mesmo obteve valores altos de HPBW quando comparado aos resultados apresentados na seção 2.5. Isto pode ser justificado pelo fato de a função aptidão desenvolvida, neste caso, não considerar outros parâmetros do arranjo na avaliação da possível solução do problema a ser otimizado. Não obstante, os resultados encontrados apresentam valores satisfatórios de RSSL alcançando, assim, o objetivo proposto. Em aplicações onde deseja-se apenas suprimir o nível dos lóbulos secundários, visando reduzir a recepção/transmissão de sinais indesejados, o PSO implementado mostra-se eficiente. Contudo, em aplicações onde o ângulo de meia potência e a diretividade do arranjo apresentam-se como parâmetros importantes de projeto, deve-se desenvolver uma nova função aptidão, a qual considere tais parâmetros em sua avaliação.

Tabela 4.1 – Otimização do RSLI, valores de RSLI e HPBW obtidos considerando como variável de otimização a amplitude de excitação de cada elemento do arranjo.

N = 6			N = 10		
$d$	RSLI (dB)	HPBW (°)	$d$	RSLI (dB)	HPBW (°)
$\lambda/4$	-40.00	32.3	$\lambda/4$	-40.01	13.7
$\lambda/2$	-40.03	18.2	$\lambda/2$	-39.22	7.4
$3\lambda/4$	-40.00	9.1	$3\lambda/4$	-39.3	5
N = 16			N = 20		
$d$	RSLI (dB)	HPBW (°)	$d$	RSLI (dB)	HPBW (°)
$\lambda/4$	-40.00	9.4	$\lambda/4$	-40.00	7.1
$\lambda/2$	-39.30	4.7	$\lambda/2$	-40.00	3.7
$3\lambda/4$	-40.00	3.1	$3\lambda/4$	-34.50	2.3

Tabela 4.2 – Otimização do RSLI, valores de RSLI e HPBW obtidos considerando como variável de otimização a distância entre os elementos do arranjo.

N = 6			N = 10		
AMPLITUDES	RSLI (dB)	HPBW (°)	AMPLITUDES	RSLI (dB)	HPBW (°)
Uniforme	-40.0	73.63	Uniforme	-40.0	73.41
Binomial	-40.0	30.09	Binomial	-40.0	20.18
Blackman	-40.0	53.19	Blackman	-40.0	20.64
Hamming	-40.0	37.15	Hamming	-40.0	39.04
Chebychev	-40.0	24.42	Chebychev	-40.0	15.71
N = 16			N = 20		
AMPLITUDES	RSLI (dB)	HPBW (°)	AMPLITUDES	RSLI (dB)	HPBW (°)
Uniforme	-40.00	73.41	Uniforme	-40.00	73.26
Binomial	-45.15	14.73	Binomial	-57.20	13.12
Blackman	-58.62	25.74	Blackman	-58.30	37.83
Hamming	-40.00	34.10	Hamming	-40.45	24.59
Chebychev	-40.00	20.41	Chebychev	-40.00	7.39

Tabela 4.3 – Otimização do RSLI, valores de RSLI e HPBW obtidos considerando como variáveis de otimização a distância e a amplitude dos elementos do arranjo.

N	RSLI (dB)	HPBW (°)
6	-40.0	28.6
10	-40.0	15.6
16	-40.0	11.4
20	-40.0	8.5

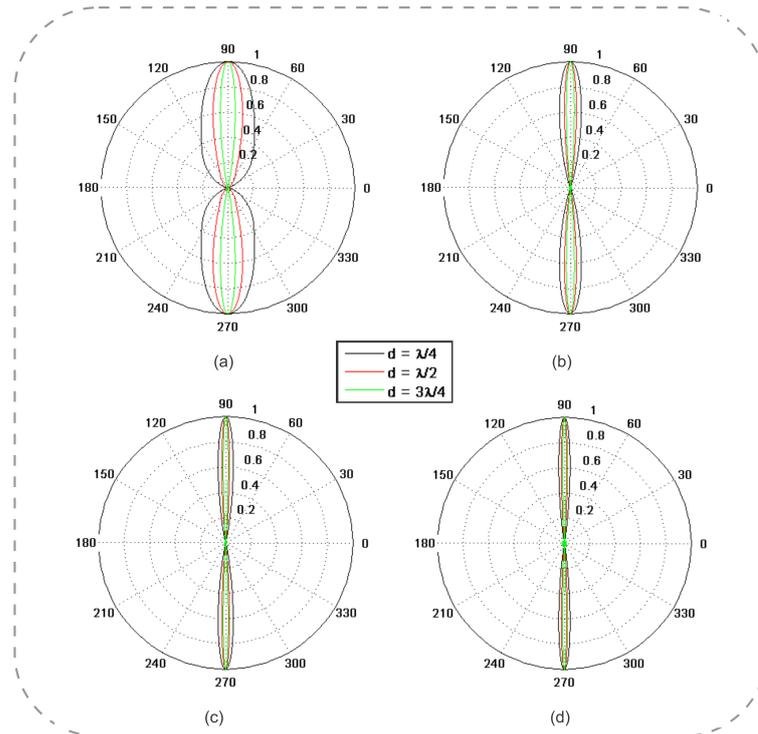


Figura 4.2 – Otimização do RSSL, considerando como variável a amplitude dos elementos de um arranjo linear de antenas com: (a)  $N = 6$ ; (b)  $N = 10$ ; (c)  $N = 16$ ; (d)  $N = 20$ .

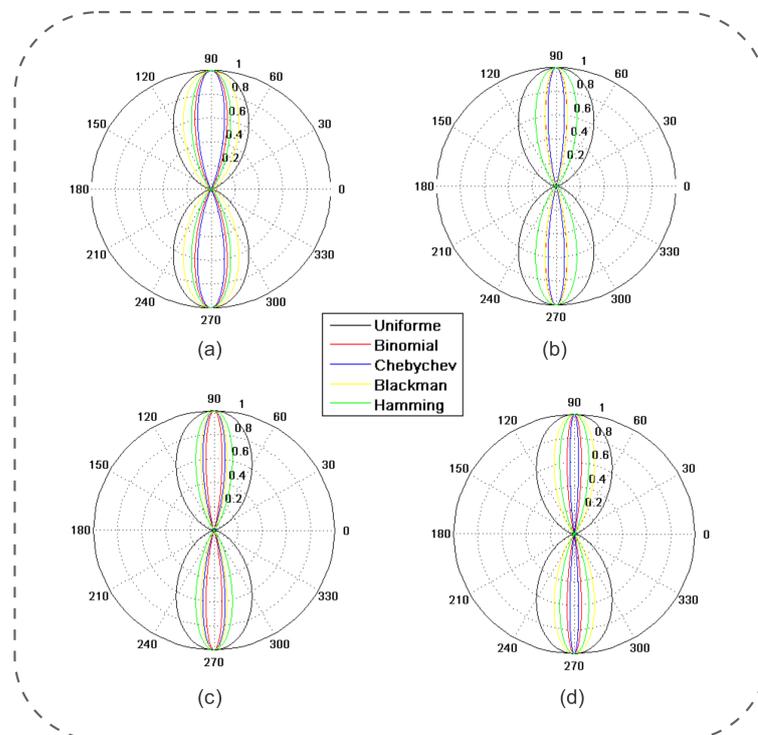


Figura 4.3 – Otimização do RSSL, considerando como variável a distância entre os elementos de um arranjo linear de antenas com: (a)  $N = 6$ ; (b)  $N = 10$ ; (c)  $N = 16$ ; (d)  $N = 20$ .

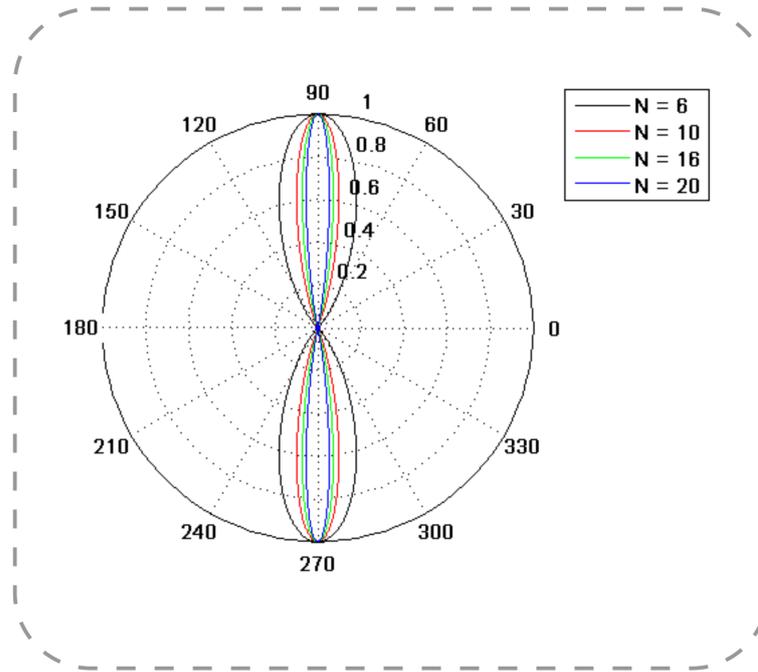


Figura 4.4 – Otimização do RSLL, considerando como variáveis a amplitude de excitação e a distância entre os elementos de um arranjo linear de antenas com 6, 10, 16 e 20 elementos

### 4.3 Otimização do Ângulo de Meia Potência

Na seção 4.2, realizou-se a otimização do RSLL sem considerar os demais parâmetros do arranjo de antenas. Ademais, verificou-se um aumento do HPBW nos casos analisados, em consequência disso, uma segunda síntese foi realizada. Esta seção apresenta a implementação de um PSO com o objetivo de otimizar o HPBW de arranjos lineares de antenas composto por 6, 10, 16 e 20 elementos puntiformes. Tais elementos encontram-se linearmente espaçados de  $1/4$ ,  $1/2$  e  $3/4$  comprimentos de onda ( $\lambda$ ). O PSO implementado considera como variáveis de otimização a amplitude de excitação dos elementos do arranjo e a distância entre eles. Estas variáveis foram otimizadas separadamente e em conjunto, visando verificar sua influência no processo de otimização do HPBW. A amplitude de excitação varia no intervalo  $[0, 1]$  e a distância entre os elementos no intervalo  $]0, 0,75]$ . O PSO implementado é representado pela Figura 4.1.

Para realizar a otimização do HPBW considera-se uma população com 20 partículas e, como critério de parada, o número de iterações igual a 500, permitindo a convergência do PSO implementado em todos os casos avaliados. A função aptidão empregada como referência para avaliar as possíveis soluções deste problema de otimização é dada pela equação a seguir, onde  $HPBW_d = 15^\circ$  e representa o ângulo de meia potência desejado.

$$\text{Aptidão} = \text{máx}(\delta^{-2}) \quad (4.2)$$

Onde:

$$\delta = \max(|HPBW - HPBW_d|, 0) \quad (4.3)$$

Para cada configuração do arranjo de antenas foi realizada a otimização do HPBW. Em uma primeira análise utiliza-se como variável de otimização apenas a amplitude de excitação dos elementos do arranjo, sendo obtidos os diagramas de radiação apresentados na Figura 4.5. Após, emprega-se como variável de otimização a distância entre os elementos do arranjo de antenas. Além disso, usa-se os valores de amplitude de um Arranjo Uniforme e também os valores definidos pelas técnicas: Binomial, Dolph-Tschebyscheff, Blackman e Hamming. Os diagramas de radiação obtidos são expostos na Figura 4.6.

Para finalizar considera-se como variáveis de otimização a amplitude de excitação de cada elemento e a distância entre os elementos do arranjo de antenas. A Figura 4.7 apresenta os diagramas de radiação resultantes. As Tabelas 4.4, 4.5 e 4.6 apresentam os valores de RSSL e HPBW encontrados para cada caso. A partir destes resultados verifica-se um aumento considerável do RSSL em todos os casos, pois foi considerado como parâmetro a ser otimizado apenas o HPBW. Quando o valor de HPBW diminui, conseqüentemente, há um aumento no RSSL, por outro lado, quando os valores de RSSL diminuem há um aumento nos valores de HPBW (BALANIS, 1982).

Tabela 4.4 – Otimização do HPBW, valores de RSSL e HPBW obtidos considerando como variável de otimização a amplitude de excitação de cada elemento do arranjo.

N = 6			N = 10		
d	RSSL (dB)	HPBW (°)	d	RSSL (dB)	HPBW (°)
$\lambda/4$	-3.12	16.85	$\lambda/4$	-3.72	10.58
$\lambda/2$	-5.21	9.36	$\lambda/2$	-10.44	7.27
$3\lambda/4$	-8.81	8.10	$3\lambda/4$	-8.74	5.07
N = 16			N = 20		
d	RSSL (dB)	HPBW (°)	d	RSSL (dB)	HPBW (°)
$\lambda/4$	-1.27	5.87	$\lambda/4$	-5.49	5.35
$\lambda/2$	-11.16	4.07	$\lambda/2$	-11.77	3.42
$3\lambda/4$	-14.00	3.01	$3\lambda/4$	-10.78	2.16

Tabela 4.5 – Otimização do HPBW, valores de RSLI e HPBW obtidos considerando como variável de otimização a distância entre os elementos do arranjo.

N = 6			N = 10		
AMPLITUDES	RSLI (dB)	HPBW (°)	AMPLITUDES	RSLI (dB)	HPBW (°)
Uniforme	-13.06	7.70	Uniforme	-13.19	4.61
Binomial	-15.05	25.06	Binomial	-27.09	18.81
Blackman	-7.20	35.46	Blackman	-27.40	19.48
Hamming	-13.11	26.21	Hamming	-35.80	14.87
Chebyshev	-23.04	21.89	Chebyshev	-40.00	13.39
N = 16			N = 20		
AMPLITUDES	RSLI (dB)	HPBW (°)	AMPLITUDES	RSLI (dB)	HPBW (°)
Uniforme	-13.23	2.88	Uniforme	-13.24	2.30
Binomial	-45.15	14.62	Binomial	-57.2	13.00
Blackman	-58.62	11.66	Blackman	-58.29	9.22
Hamming	-39.37	9.04	Hamming	-40.45	7.16
Chebyshev	-40.00	8.28	Chebyshev	-40.00	6.62

Tabela 4.6 – Otimização do HPBW, valores de RSLI e HPBW obtidos considerando como variáveis de otimização a distância e a amplitude dos elementos do arranjo.

N	RSLI (dB)	HPBW (°)
6	-1.52	5.60
10	-10.00	4.60
16	-2.37	2.00
20	-2.13	1.66

Visando avaliar o método proposto, foram considerados os valores de referência para RSLI e HPBW apresentados na seção 2.5, através dos quais realiza-se a comparação com os resultados encontrados pelo PSO. A partir dos valores apresentados nas Tabelas 4.4, 4.5 e 4.6 nota-se que o PSO obteve altos valores de RSLI, quando comparados aos apresentados na seção 2.5. Porém, analisando os valores de HPBW obtidos conclui-se que: (1) Através das Tabelas 4.4 e 4.6 é possível notar que foram encontrados baixos valores de HPBW. Estes valores são menores que os obtidos por todas as técnicas apresentadas na seção 2.5, alcançando o objetivo proposto e aumentando, assim, o ganho do arranjo de antenas e conseqüentemente a sua diretividade. (2) Os valores de HPBW e RSLI obtidos quando considera-se como variável de otimização apenas a distância entre os elementos são iguais aos obtidos na seção 2.5, para todas as técnicas apresentadas para  $d = 3\lambda/4$ . Isto pode ser explicado pelo fato de que, neste caso, o PSO implementado obteve  $d = 3\lambda/4$ , pois este representa o valor máximo permitido de distância entre os elementos. Isto comprova que aumentando a distância entre os elementos, se reduz o HPBW do arranjo.

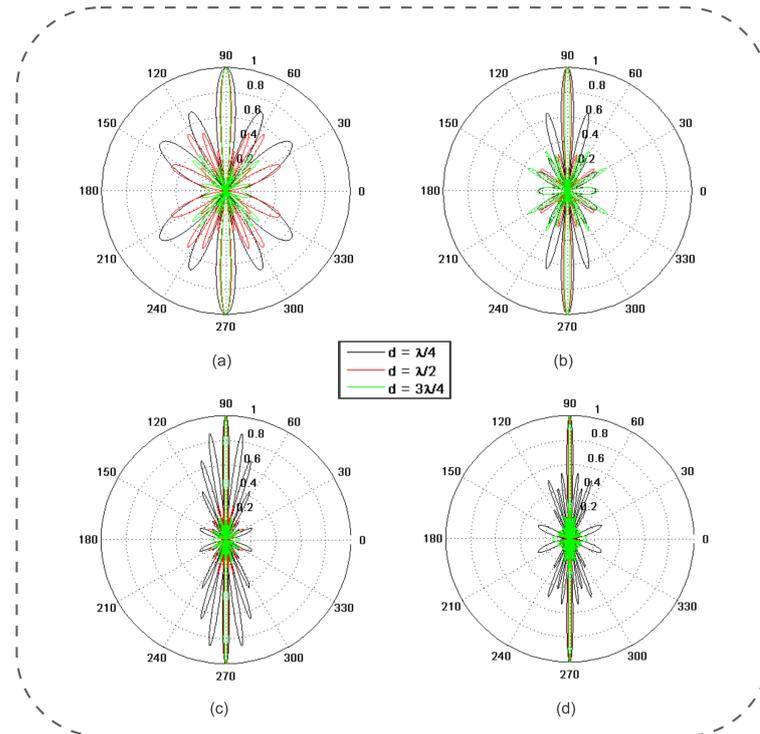


Figura 4.5 – Otimização do HPBW, considerando como variável de otimização a amplitude dos elementos de um arranjo de antenas com: (a)  $N = 6$ ; (b)  $N = 10$ ; (c)  $N = 16$ ; (d)  $N = 20$ .

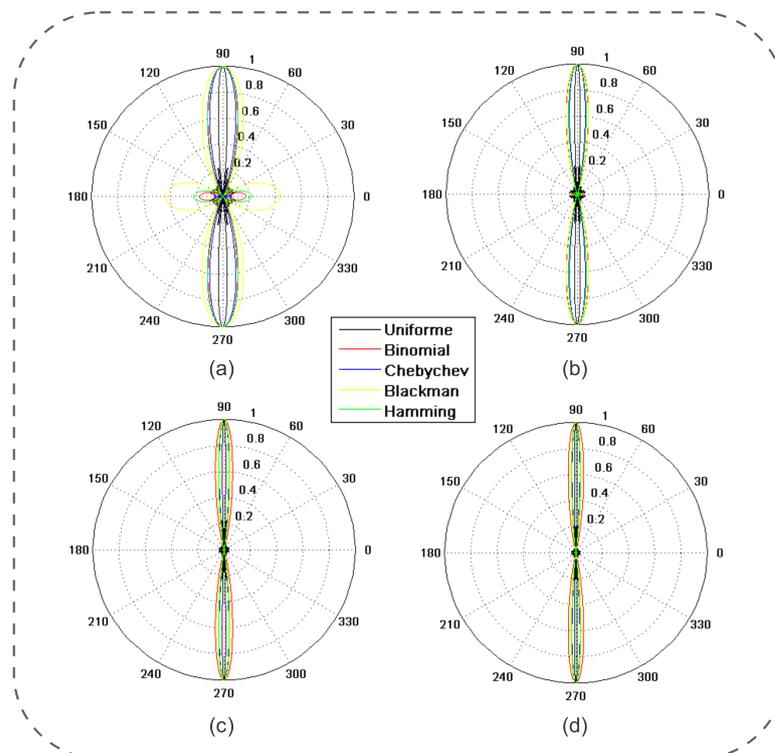


Figura 4.6 – Otimização do HPBW, considerando como variável de otimização a distância entre elementos de um arranjo de antenas com: (a)  $N = 6$ ; (b)  $N = 10$ ; (c)  $N = 16$ ; (d)  $N = 20$ .

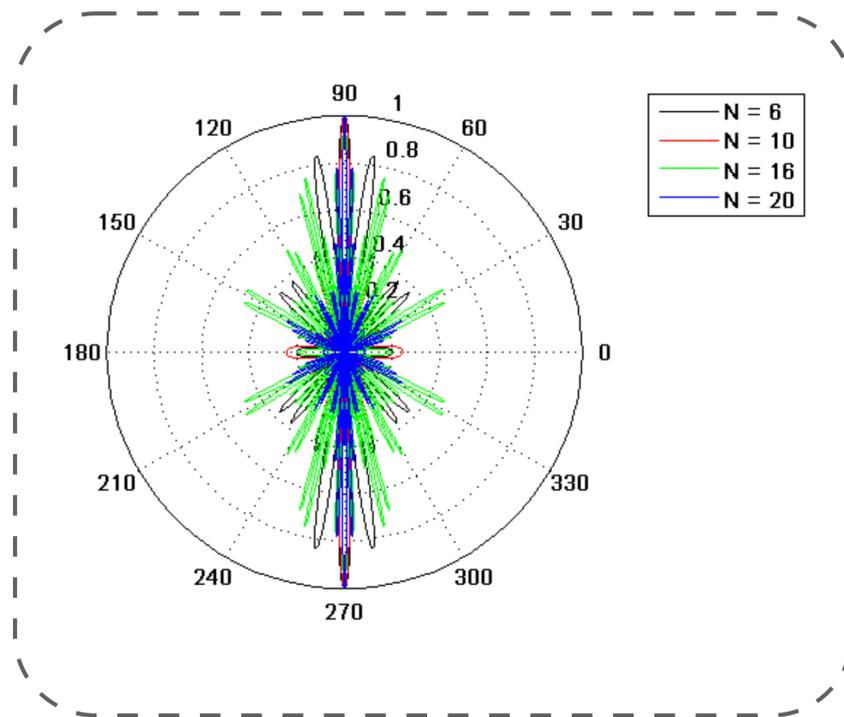


Figura 4.7 – Otimização do HPBW, considerando como variáveis de otimização a amplitude de excitação dos elementos e a distância entre os elementos de um arranjo de antenas com 6, 10, 16 e 20 elementos.

Portanto, o PSO implementado encontrou valores de HPBW iguais ou menores que o desejado, na maioria dos casos. Alcançando, assim, o seu objetivo. Contudo, obteve-se um aumento considerável dos lóbulos secundários. Novamente, isto pode ser explicado, pois a função aptidão não leva em consideração os valores de RSSL durante a avaliação da solução do problema a ser otimizado. Porém, através dos resultados descritos anteriormente verifica-se a eficiência do PSO em otimizar parâmetros distintos de um arranjo linear de antenas, tornando possível otimizar qualquer parâmetro de projeto de um arranjo. Tal situação muitas vezes seria inviável sem o auxílio de uma técnica de otimização computacional.

#### 4.4 Otimização da Máxima Amplitude dos Lóbulos Secundários e do Ângulo de Meia Potência

Nas seções 4.2 e 4.3 foram apresentados os resultados encontrados a partir da otimização de apenas um parâmetro, RSSL ou HPBW, de um arranjo linear de antenas. Os resultados evidenciam o aumento do HPBW quando otimiza-se apenas o RSSL e também um aumento no RSSL quando otimiza-se apenas o HPBW. Isto pode ser explicado pelo fato de que as funções

aptidão desenvolvidas não consideram ambos os parâmetros na avaliação da solução do problema de otimização. Além disso, as variáveis utilizadas para a otimização de tais parâmetros possuem comportamentos distintos para cada otimização. Por exemplo, para otimizar o valor de RSSL a distância entre os elementos diminui e para otimizar o valor de HPBW a distância entre os elementos aumenta. Os valores de amplitude de excitação para cada elemento do arranjo também apresentam comportamentos distintos em cada caso de otimização.

Portanto, necessita-se encontrar valores de amplitude de excitação e distância entre os elementos que possibilitem obter os valores desejados de RSSL e HPBW. Visando solucionar este problema, foi implementado um PSO com o objetivo de otimizar o RSSL e HPBW de um arranjo linear de antenas. O PSO implementado é representado pela Figura 4.1. Neste caso, considera-se uma população com 50 partículas e como critério de parada o número de iterações igual a 500, o qual garante a convergência do PSO em todos os casos avaliados. Novamente são realizadas simulações considerando arranjos lineares de antenas com 6, 10, 16 e 20 elementos puntiformes, linearmente espaçados de 1/4, 1/2 e 3/4 comprimentos de onda ( $\lambda$ ). Considera-se como variáveis de otimização a amplitude de excitação dos elementos e a distância entre eles, estas variáveis são utilizadas separadamente e em conjunto.

O espaço de busca do enxame é o mesmo descrito na seção anterior. Visando realizar a otimização do RSSL e HPBW simultaneamente, utiliza-se a seguinte função aptidão:

$$\text{Aptidão} = \text{máx}(\delta^{-2}) \quad (4.4)$$

O valor de  $\delta$  varia de acordo com os valores de RSSL e HPBW e é dado por:

$$\delta = \text{máx}(|RSSL - RSSL_d|, |HPBW - HPBW_d|, |RSSL - RSSL_d| + |HPBW - HPBW_d|, 0) \quad (4.5)$$

Onde:  $RSSL_d = -30dB$  e  $HPBW_d = 15^\circ$ .

Para cada configuração do arranjo linear de antenas realiza-se a otimização do RSSL e HPBW utilizando como variáveis de otimização a amplitude de excitação dos elementos do arranjo e a distância entre eles. Estas variáveis foram utilizadas de forma conjunta e isolada. Primeiramente, considera-se como variável de otimização apenas a amplitude de excitação dos elementos do arranjo. A Figura 4.8 apresenta os diagramas de radiação obtidos. Após, utiliza-se como variável de otimização apenas a distância entre os elementos. Neste caso, considera-se

os valores de amplitude de um Arranjo Uniforme e também os valores definidos pelas técnicas: Binomial, Dolph-Tschebyscheff, Blackman e Hamming. Os diagramas de radiação obtidos são apresentados na Figura 4.9. Por fim, define-se como variáveis de otimização a amplitude de excitação dos elementos e a distância entre eles. A Figura 4.10 apresenta os diagramas de radiação obtidos.

Tabela 4.7 – Otimização do RSSL e HPBW, valores de RSSL e HPBW obtidos considerando como variável de otimização a amplitude de excitação de cada elemento do arranjo.

N = 6			N = 10		
d	RSSL (dB)	HPBW (°)	d	RSSL (dB)	HPBW (°)
$\lambda/4$	-40.12	31.03	$\lambda/4$	-40.00	18.72
$\lambda/2$	-35.65	15.98	$\lambda/2$	-39.50	10.30
$3\lambda/4$	-40.12	12.17	$3\lambda/4$	-40.02	6.66
N = 16			N = 20		
d	RSSL (dB)	HPBW (°)	d	RSSL (dB)	HPBW (°)
$\lambda/4$	-35.00	12.53	$\lambda/4$	-32.27	9.03
$\lambda/2$	-30.00	5.47	$\lambda/2$	-30.00	4.57
$3\lambda/4$	-30.00	3.90	$3\lambda/4$	-27.16	2.88

Tabela 4.8 – Otimização do RSSL e HPBW, valores de RSSL e HPBW obtidos considerando como variável de otimização a distância entre os elementos do arranjo.

N = 6			N = 10		
AMPLITUDES	RSSL (dB)	HPBW (°)	AMPLITUDES	RSSL (dB)	HPBW (°)
Uniforme	-13.05	7.70	Uniforme	-13.19	4.60
Binomial	-30.01	28.22	Binomial	-30.04	19.11
Blackman	-30.03	49.93	Blackman	-30.07	19.72
Hamming	-40.00	36.86	Hamming	-35.81	14.86
Chebychev	-30.21	22.53	Chebychev	-40	13.39
N = 16			N = 20		
AMPLITUDES	RSSL (dB)	HPBW (°)	AMPLITUDES	RSSL (dB)	HPBW (°)
Uniforme	-13.23	2.88	Uniforme	-13.24	2.304
Binomial	-45.15	14.62	Binomial	-57.19	12.99
Blackman	-58.62	11.66	Blackman	-58.29	9.21
Hamming	-39.37	9.03	Hamming	-40.45	7.16
Chebychev	-40.00	8.28	Chebychev	-40.00	6.62

Tabela 4.9 – Otimização do RSSL e HPBW, valores de RSSL e HPBW obtidos considerando como variáveis de otimização a distância e a amplitude dos elementos do arranjo.

N	RSSL (dB)	HPBW (°)
6	-30.8	10.5
10	-30.0	6.25
16	-30.0	3.84
20	-28.39	2.80

Através das otimizações realizadas obteve-se os valores de RSSL e HPBW exibidos nas Tabelas 4.7, 4.8 e 4.9. Analisando tais tabelas observa-se que o PSO implementado atingiu os valores de RSSL e HPBW desejados na maioria dos casos e valores de HPBW menores ou próximos do valor desejado, desta forma conclui-se que através do PSO é possível otimizar diversos parâmetros de um arranjo linear de antenas simultaneamente. Esta técnica permite que durante o projeto de um arranjo linear de antenas sejam determinados seus parâmetros de projeto de forma rápida e otimizada. Ajustando, assim, seu padrão de radiação, conforme o desejado.

Visando avaliar o método proposto, foram calculados os valores de referência para RSSL e HPBW apresentados na seção 2.5, mediante comparação destes valores com os valores expostos nas Tabelas 4.7, 4.8 e 4.9 conclui-se que: (1) A partir dos valores exibidos na Tabela 4.7 verifica-se que o PSO obteve o valor desejado de RSSL na maioria dos casos. Porém atingiu-se valores maiores de HPBW em comparação aos encontrados para um arranjo uniforme e menores às demais técnicas. Apesar de alcançar valores maiores de HPBW, quando comparado ao arranjo uniforme, o PSO obteve uma diferença de aproximadamente  $20dB$  no RSSL; (2) Através dos valores de RSSL apresentados na Tabela 4.8 conclui-se que o PSO atingiu o valor desejado em praticamente todos os casos. Os valores de HPBW obtidos apresentam o mesmo comportamento descrito para os valores da Tabela 4.7. Apesar disso, o PSO alcançou o valor desejado de HPBW na maioria dos casos avaliados; (3) Para finalizar, verifica-se a partir dos valores de RSSL apresentados na Tabela 4.9 que o PSO atingiu o valor desejado de RSSL e HPBW em praticamente todos os casos e valores de HPBW menores em comparação as técnicas descritas na seção 2.5.

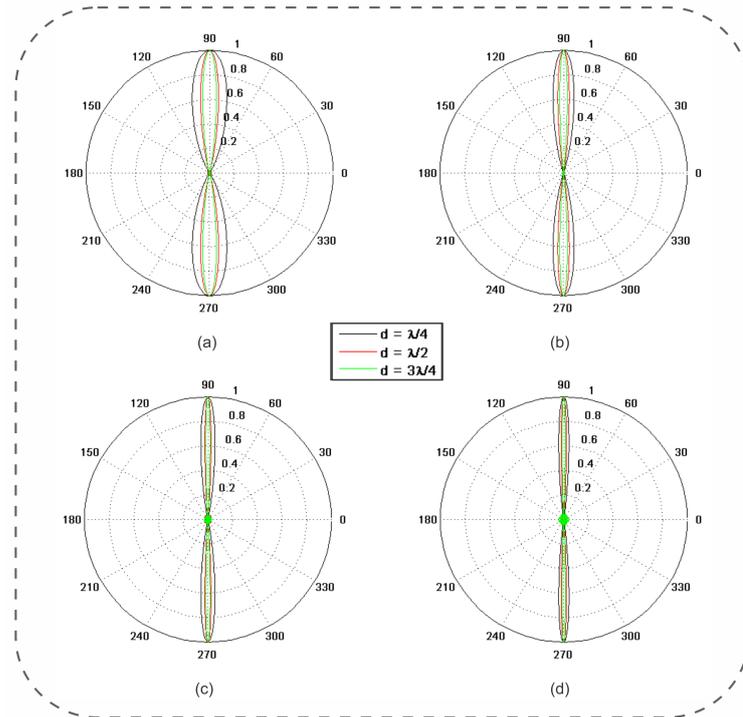


Figura 4.8 – Otimização do RSSL e HPBW, considerando como variável de otimização a amplitude dos elementos de um arranjo de antenas com: (a)  $N = 6$ ; (b)  $N = 10$ ; (c)  $N = 16$  e (d)  $N = 20$ .

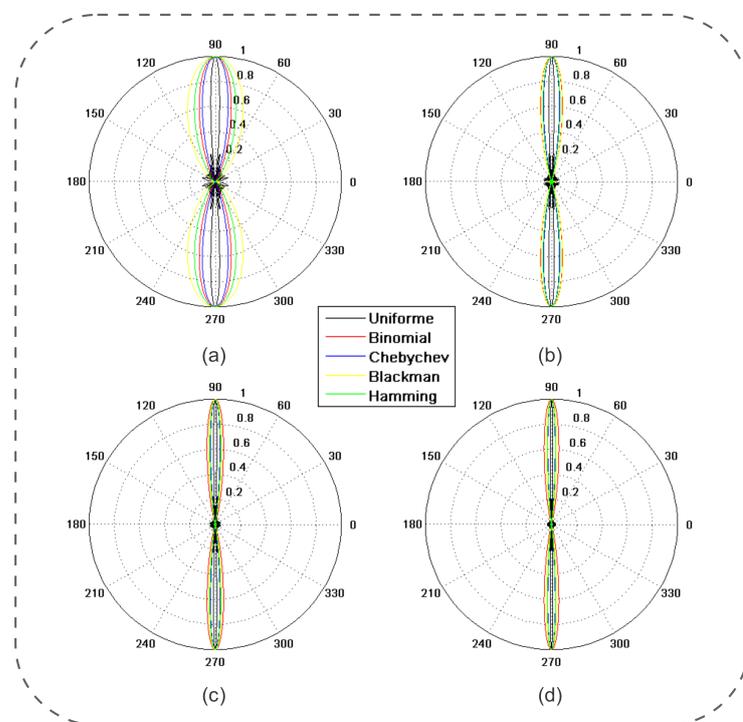


Figura 4.9 – Otimização do RSSL e HPBW, considerando como variável de otimização a distância entre os elementos de um arranjo de antenas com: (a)  $N = 6$ ; (b)  $N = 10$ ; (c)  $N = 16$  e (d)  $N = 20$ .

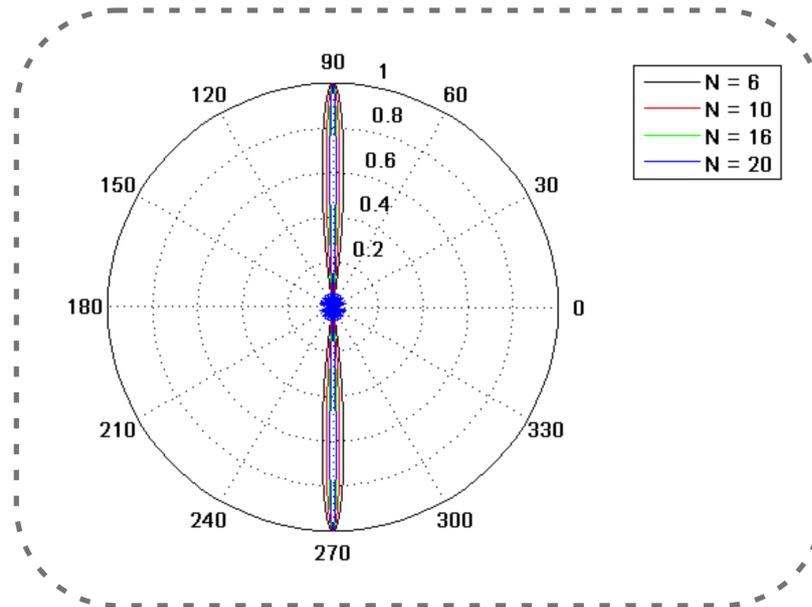


Figura 4.10 – Otimização do RSSL e HPBW, considerando como variáveis de otimização a amplitude de excitação dos elementos e a distância entre os elementos de um arranjo de antenas com 6, 10, 16 e 20 elementos.

Portanto, o PSO atingiu seu objetivo, pois alcançou valores satisfatórios de RSSL e HPBW quando comparados com os resultados descritos na seção 2.5. Tal técnica de otimização mostrou-se eficiente na otimização de inúmeros parâmetros de um arranjo linear de antenas. Estes parâmetros foram otimizados de maneira conjunta e isolada. A otimização conjunta de parâmetros de um arranjo de antenas não pode ser realizada através das técnicas descritas na seção 2.5. A partir do PSO torna-se possível a otimização de diversos parâmetros de um arranjo de antenas, levando em consideração uma grande quantidade de variáveis reais e contínuas.

#### 4.5 Conclusões

Este capítulo apresentou os resultados da otimização do RSSL e HPBW através da técnica de Otimização por Enxame de Partícula. Os resultados obtidos para cada caso de otimização foram apresentados nas seções 4.2, 4.3 e 4.4. A partir destes resultados conclui-se que quando o PSO utiliza como variável de otimização apenas a distância entre os elementos do arranjo, obtém-se uma redução do HPBW através do aumento da distância entre tais elementos. Para reduzir o RSSL é necessário reduzir a distância entre os elementos, de forma que os elementos encontrem-se próximos o suficiente para que seus campos se cancelem gerando, assim, um padrão de radiação similar ao campo de apenas dois elementos. Além disso, verificou-se que quando considera-se apenas a amplitude de excitação de cada elemento do arranjo é possível

alterar consideravelmente tanto o RSSL como o HPBW de um arranjo linear de antenas, porém separadamente. Para realizar a otimização do RSSL e HPBW de um arranjo linear de antenas é necessário utilizar como variáveis de otimização a amplitude de excitação e a distância entre os elementos do arranjo, visando alterar ambos os parâmetros, encontrando, assim, resultados sub-ótimos para ambos os parâmetros. Tais resultados não são alcançados considerando como variável apenas um dos parâmetros de projeto do arranjo.

Através destes resultados constata-se a eficiência da técnica utilizada, pois a mesma apresentou resultados superiores quando comparados aos resultados expostos na seção 2.5, os quais foram obtidos através de técnicas conhecidas na literatura de antenas. Além disso, o PSO implementado mostrou-se eficiente na otimização de múltiplos parâmetros e capaz de considerar inúmeras variáveis no seu processo de otimização. As técnicas apresentadas na seção 2.5 não apresentam esta flexibilidade. Além da flexibilidade apresentada pelo PSO, o qual pode ser utilizado para otimizar diversos parâmetros de um arranjo linear de antenas simultaneamente, o mesmo possui fácil implementação e baixo tempo computacional (SHARMA e SINGHAL, 2015).

---

---

# 5

---

## APONTAMENTO DO FEIXE PRINCIPAL DE UM ARRANJO LINEAR DE ANTENAS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos através do Apontamento do Feixe Principal de um Arranjo Linear de Antenas em conjunto com a otimização da Máxima Amplitude dos Lóbulos Secundários e do Ângulo de Meia Potência do arranjo.

### 5.1 Introdução

A síntese de arranjos lineares de antenas permite conformar o padrão de radiação do arranjo, tornando possível realizar a varredura de fase e controlar o nível dos lóbulos secundários. Permitindo a transmissão e/ou recepção de sinais com uma maior eficiência. Ocasionalmente, assim, a redução da interferência de outros sistemas de comunicação. Para isto, é necessário definir as amplitudes de excitação de cada elemento do arranjo e o espaçamento entre eles. A determinação destes parâmetros durante o projeto de um arranjo linear de antenas, deve ser feita de maneira simples e otimizada. Devido a isto, muitas vezes é necessário fazer uso de técnicas de otimização computacionais, pois esses parâmetros não podem ser determinados de forma analítica.

Em consequência disso, este trabalho, realiza o apontamento do feixe principal e a otimização do RSSL e HPBW de um arranjo linear de antenas através da Técnica de Otimização por Enxame de Partículas. Os resultados obtidos são apresentados no decorrer deste capítulo. Além disso são descritos em detalhes todos os algoritmos implementados e a formulação matemática

desenvolvida para cada caso de otimização.

## 5.2 Apontamento do Feixe Principal de um Arranjo Linear de Antenas

Neste trabalho foi realizada a implementação de um PSO, o qual realiza o ajuste do sinal de alimentação de cada elemento de um arranjo linear de antenas composto por fontes puntiformes. O objetivo deste ajuste é controlar dinamicamente o apontamento do feixe principal. O apontamento permite realizar a varredura de fase em diversas direções, possibilitando a transmissão e recepção de sinais nas direções desejadas. Inúmeras aplicações necessitam que o feixe principal seja controlado dinamicamente, dentre elas pode-se citar: sistemas de comunicações móveis, sistemas de comunicações aeroespaciais, sistemas de localização, radares, dentre outras.

Nesta seção é descrito o processo de apontamento do lóbulo principal utilizando o PSO. Visando realizar o apontamento do lóbulo principal considera-se um arranjo linear de antenas com 6, 10, 16 e 20 elementos puntiformes, linearmente espaçados de  $1/4$  e  $1/2$  de comprimentos de onda ( $\lambda$ ) e em fase, ou seja, o ângulo progressivo de excitação de fase é o mesmo para todos os elementos do arranjo e ângulo de apontamento ( $\theta_0 = 60^\circ, 45^\circ$  ou  $30^\circ$ ). Para realizar o apontamento do feixe principal utiliza-se como variável de otimização o ângulo progressivo de excitação de fase ( $\beta$ ) de cada elemento do arranjo, o qual varia de 0 a  $\pi$ . Tal variação representa o espaço de busca do enxame para o problema em questão.

O PSO implementado é representado pela Figura 4.1, o qual considera uma população com 10 partículas e utiliza como critério de parada o número de iterações, que foi definido como 100. Objetivando o apontamento do feixe principal, foi elaborada uma função aptidão utilizada como referência na avaliação das possíveis soluções do problema em questão. Esta função é expressa por:

$$\text{Aptidão} = \text{máx}(|\theta - \theta_0|^{-2}) \quad (5.1)$$

Onde:  $\theta_0 = 60^\circ, 45^\circ$  ou  $30^\circ$ .

Para cada caso considerou-se os valores de amplitude de um Arranjo Uniforme e das técnicas: Binomial, Dolph-Tschebyscheff, Blackman e Hamming. A partir de cada conjunto de amplitudes, o PSO obteve o valor do ângulo de excitação de fase, através do qual foi realizado o apontamento do feixe principal para o ângulo desejado. As Figuras 5.1 e 5.2 apresentam os

diagramas de radiação obtidos.

As Tabelas 5.1, 5.2 e 5.3 apresentam os valores de RSSL e HPBW obtidos através do apontamento do feixe principal, os quais são comparados com os resultados descritos na seção 2.5. A partir da comparação dos resultados verifica-se que em muitos casos obteve-se altos níveis de lóbulos secundários. Além disso, obteve-se valores de HPBW altos em todos os casos, ocasionando um aumento da largura do feixe principal, diminuindo o ganho do arranjo e, conseqüentemente, a diretividade. Contudo, o PSO alcançou o seu objetivo, pois realizou o apontamento do feixe principal para o ângulo desejado em todos os casos avaliados. Foi realizado o apontamento do feixe principal para três direções ( $\theta_0 = 60^\circ, 45^\circ$  e  $30^\circ$ ), porém tais valores foram definidos visando validar a técnica utilizada, podendo ter sido realizado o apontamento para qualquer direção desejada.

Conforme mencionado, o apontamento do feixe principal ocasionou alterações indesejadas nos valores de RSSL e HPBW. Tais alterações podem ser explicadas devido a função aptidão formulada para este caso de otimização, não considerar os valores de RSSL e HPBW na determinação da melhor solução para o problema em questão. O PSO implementado visa apenas o apontamento do feixe principal, sem considerar variações ocorridas em outros parâmetros do arranjo. Neste capítulo serão apresentadas as versões implementadas do PSO visando resolver este problema.

Tabela 5.1 – Apontamento do Feixe Principal, valores de RSSL e HPBW obtidos para  $\theta_0 = 60^\circ$ .

$\theta_0 = 60^\circ$ e $d = \lambda/4$					
N = 6			N = 10		
AMPLITUDES	RSSL (dB)	HPBW (°)	AMPLITUDES	RSSL (dB)	HPBW (°)
Uniforme	-13.05	27.07	Uniforme	-13.19	16.02
Binomial	NL*	197.33	Binomial	NL*	81.26
Blackman	NL*	228.76	Blackman	-67.13	180.86
Hamming	NL*	200.68	Hamming	-35.81	56.11
Chebychev	-40.00	171.68	Chebychev	-40	49.42
N = 16			N = 20		
AMPLITUDES	RSSL (dB)	HPBW (°)	AMPLITUDES	RSSL (dB)	HPBW (°)
Uniforme	-13.23	9.97	Uniforme	-13.24	7.97
Binomial	NL*	55.0	Binomial	NL*	47.85
Blackman	-58.62	42.28	Blackman	-58.29	32.71
Hamming	-39.37	32.04	Hamming	-40.45	25.146
Chebychev	-40.00	29.29	Chebychev	-40.00	23.10
$\theta_0 = 60^\circ$ e $d = \lambda/2$					
N = 6			N = 10		
AMPLITUDES	RSSL (dB)	HPBW (°)	AMPLITUDES	RSSL (dB)	HPBW (°)
Uniforme	-13.05	13.36	Uniforme	-13.19	8.0
Binomial	-15.06	45.56	Binomial	-27.10	33.38
Blackman	-7.21	70.479	Blackman	-27.42	34.65
Hamming	-13.13	47.89	Hamming	-35.81	26.11
Chebychev	-23.081	39.26	Chebychev	-40	23.43
N = 16			N = 20		
AMPLITUDES	RSSL (dB)	HPBW (°)	AMPLITUDES	RSSL (dB)	HPBW (°)
Uniforme	-13.23	4.97	Uniforme	-13.24	3.98
Binomial	-45.15	25.68	Binomial	-57.16	22.77
Blackman	-58.62	20.37	Blackman	-58.29	16.01
Hamming	-39.37	15.70	Hamming	-40.45	12.42
Chebychev	-40.00	14.41	Chebychev	-40.00	11.439
*NL - Não possui lóbulos secundários.					

Tabela 5.2 – Apontamento do Feixe Principal, valores de RSSL e HPBW obtidos para  $\theta_0 = 45^\circ$ .

$\theta_0 = 45^\circ$ e $d = \lambda/4$					
N = 6			N = 10		
AMPLITUDES	RSSL (dB)	HPBW (°)	AMPLITUDES	RSSL (dB)	HPBW (°)
Uniforme	-13.05	34.78	Uniforme	-13.19	19.91
Binomial	NL*	173.48	Binomial	NL*	154.91
Blackman	NL*	203.76	Blackman	-64.62	156.92
Hamming	NL*	176.88	Hamming	-35.81	142.76
Chebychev	-40.00	164.69	Chebychev	-40	138.4
N = 16			N = 20		
AMPLITUDES	RSSL (dB)	HPBW (°)	AMPLITUDES	RSSL (dB)	HPBW (°)
Uniforme	-13.23	12.28	Uniforme	-13.24	9.79
Binomial	NL*	142.02	Binomial	NL*	22.29
Blackman	-58.62	132.52	Blackman	-58.29	43.56
Hamming	-39.37	42.40	Hamming	-40.45	32.03
Chebychev	-40.00	38.06	Chebychev	-40.00	29.24
$\theta_0 = 45^\circ$ e $d = \lambda/2$					
N = 6			N = 10		
AMPLITUDES	RSSL (dB)	HPBW (°)	AMPLITUDES	RSSL (dB)	HPBW (°)
Uniforme	-13.05	16.52	Uniforme	-13.19	9.79
Binomial	-4.77	135.12	Binomial	-8.58	44.66
Blackman	-2.37	150.97	Blackman	-8.03	46.96
Hamming	-4.38	132.93	Hamming	-14.23	33.40
Chebychev	-6.32	57.6	Chebychev	-40	29.67
N = 16			N = 20		
AMPLITUDES	RSSL (dB)	HPBW (°)	AMPLITUDES	RSSL (dB)	HPBW (°)
Uniforme	-13.23	6.12	Uniforme	-13.24	4.90
Binomial	-14.31	32.79	Binomial	-18.09	28.77
Blackman	-25.84	25.53	Blackman	-54.04	19.89
Hamming	-39.37	19.48	Hamming	-40.45	15.33
Chebychev	-40.00	17.85	Chebychev	-40.00	14.10
*NL - Não possui lóbulos secundários.					

Tabela 5.3 – Apontamento do Feixe Principal, valores de RSSL e HPBW obtidos para  $\theta_0 = 30^\circ$ .

$\theta_0 = 30^\circ$ e $d = \lambda/4$					
N = 6			N = 10		
AMPLITUDES	RSSL (dB)	HPBW (°)	AMPLITUDES	RSSL (dB)	HPBW (°)
Uniforme	-4.16	27.14	Uniforme	-1.86	15.52
Binomial	NL*	155.11	Binomial	NL*	135.81
Blackman	NL*	185.36	Blackman	-64.62	137.95
Hamming	NL*	158.51	Hamming	-35.81	122.85
Chebychev	-40.00	145.94	Chebychev	-40	118.00
N = 16			N = 20		
AMPLITUDES	RSSL (dB)	HPBW (°)	AMPLITUDES	RSSL (dB)	HPBW (°)
Uniforme	-13.23	17.96	Uniforme	-13.24	14.13
Binomial	NL*	122.04	Binomial	NL*	116.44
Blackman	-58.62	111.67	Blackman	-4.21	16.15
Hamming	-39.37	101.88	Hamming	-40.45	94.46
Chebychev	-40.00	99.1	Chebychev	-40.00	92.4
$\theta_0 = 30^\circ$ e $d = \lambda/2$					
N = 6			N = 10		
AMPLITUDES	RSSL (dB)	HPBW (°)	AMPLITUDES	RSSL (dB)	HPBW (°)
Uniforme	-12.70	25.16	Uniforme	-13.19	14.15
Binomial	-1.00	114.53	Binomial	-1.74	103.18
Blackman	-0.5	131.67	Blackman	-1.61	104.51
Hamming	-1.0	116.49	Hamming	-2.79	95.56
Chebychev	-1.24	108.76	Chebychev	-3.40	92.8
N = 16			N = 20		
AMPLITUDES	RSSL (dB)	HPBW (°)	AMPLITUDES	RSSL (dB)	HPBW (°)
Uniforme	-13.23	8.69	Uniforme	-13.24	14.13
Binomial	-2.91	95.06	Binomial	-3.69	91.764
Blackman	-4.56	88.94	Blackman	-7.46	32.25
Hamming	-7.79	31.25	Hamming	-12.91	23.07
Chebychev	-9.45	27.75	Chebychev	-16.33	20.95
*NL - Não possui lóbulos secundários.					

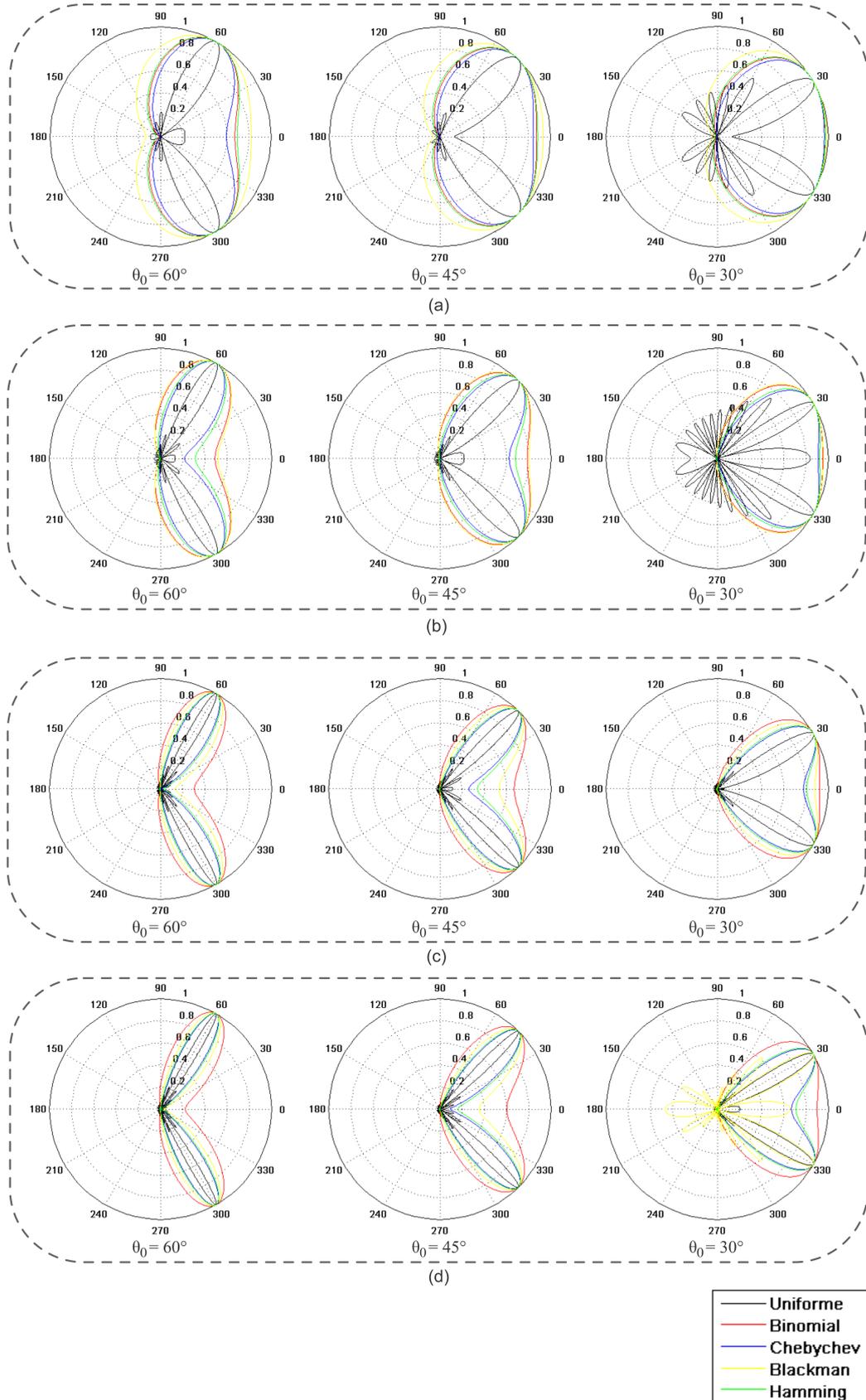


Figura 5.1 – Apontamento do Feixe Principal, considerando um Arranjo Linear de Antenas, com  $d = \lambda/4$  e (a)  $N = 6$ ; (b)  $N = 10$ ; (c)  $N = 16$ ; (d)  $N = 20$ .

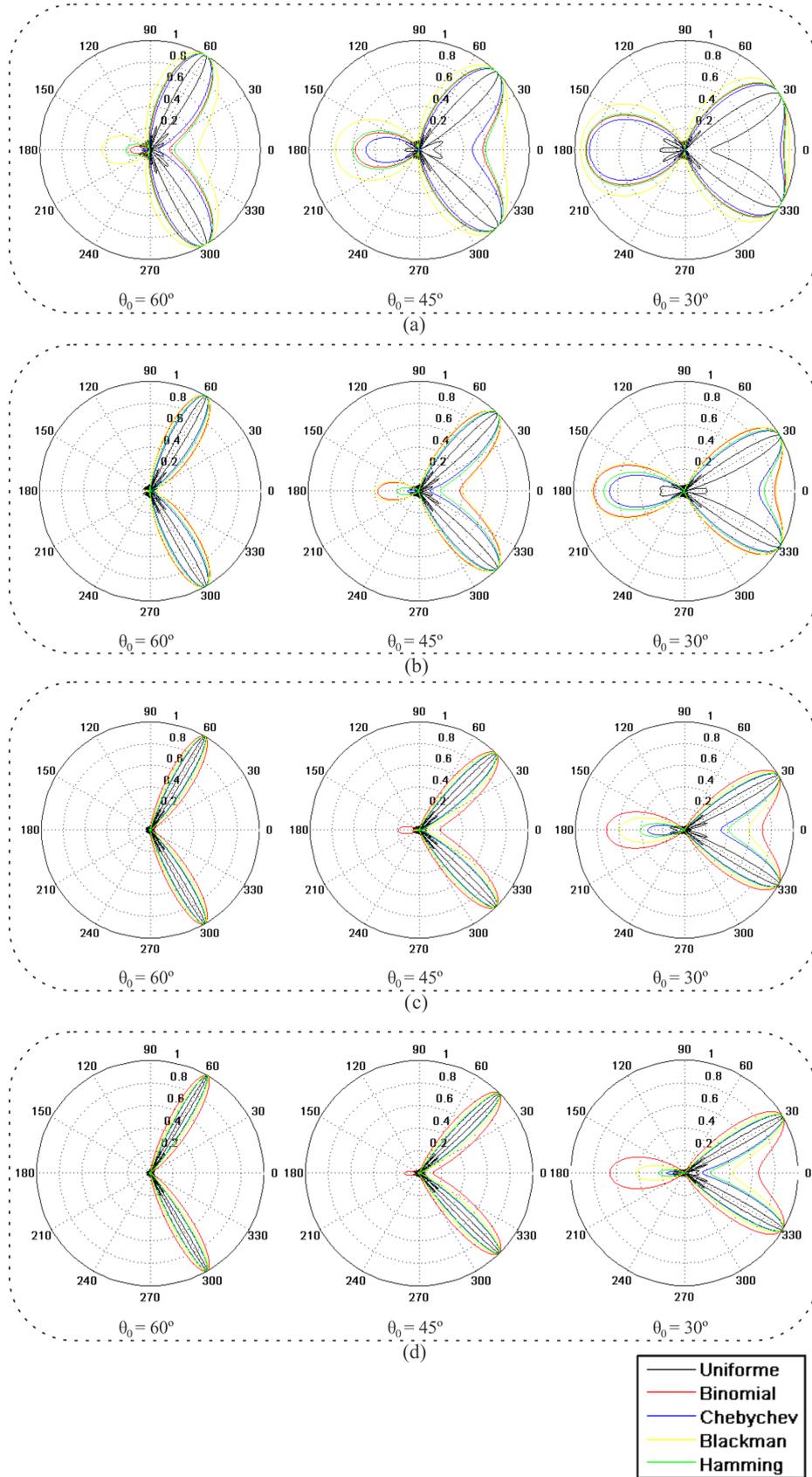


Figura 5.2 – Apontamento do Feixe Principal, considerando um Arranjo Linear de Antenas, com  $d = \lambda/2$  e (a)  $N = 6$ ; (b)  $N = 10$ ; (c)  $N = 16$ ; (d)  $N = 20$ .

### 5.3 Apontamento do Feixe Principal e Otimização da Máxima Amplitude dos Lóbulos Secundários

Com o propósito de minimizar interferências e realizar o apontamento do feixe principal simultaneamente, foi realizada a otimização do RSSL de um arranjo linear de antenas em conjunto com o apontamento do seu lóbulo principal através do PSO. Neste processo de otimização utiliza-se como variável de otimização a amplitude de excitação de cada elemento do arranjo, o ângulo de excitação de fase e a distância entre os elementos do arranjo. Estas variáveis foram consideradas de maneira isolada e conjunta, visando avaliar sua influência no processo de otimização. As otimizações descritas nesta seção fazem uso da seguinte combinação de variáveis: (1) Amplitude e ângulo de excitação de fase de cada elemento; (2) Ângulo de excitação de fase de cada elemento e a distância entre eles; (3) Amplitude e ângulo de excitação de fase de cada elemento e a distância entre eles. O ângulo de excitação de fase é responsável por realizar o apontamento do feixe principal, portanto é utilizado em todos os casos de otimização.

Cosidera-se arranjos lineares de antenas com 6, 10, 16 e 20 elementos puntiformes, linearmente espaçados de  $1/4$  e  $1/2$  de comprimento de onda ( $\lambda$ ). O PSO implementado é apresentado pela Figura 4.1. Para realizar esta otimização foi necessário determinar alguns parâmetros do PSO, tal como o espaço de busca do enxame. Neste caso, foram utilizadas três variáveis, onde a amplitude varia no intervalo  $[0, 1]$ , a distância entre os elementos varia no intervalo  $]0, 0,75]$  e o ângulo de excitação de fase varia no intervalo  $[0, \pi]$ . O PSO implementado faz uso de uma população com 50 partículas e define como critério de parada o número de iterações, o qual foi definido como 500. A partir destes parâmetros verificou-se a convergência do PSO implementado em todos os caso avaliados. A função aptidão desenvolvida para realizar o processo de otimização é dada por:

$$\text{Aptidão} = \text{máx}(\delta^{-2}) \quad (5.2)$$

O valor de  $\delta$  varia de acordo com os valores de RSSL e do Ângulo de Máxima Radiação ( $\theta$ ) e é definido por:

$$\delta = \max(|RSSL - RSSL_d| + |\theta - \theta_d|, 0) \quad (5.3)$$

Onde:  $RSSL_d = -30dB$  e  $\theta_d$  igual a  $60^\circ$ ,  $45^\circ$  ou  $30^\circ$ .

A Figura 5.3 apresenta os diagramas de radiação obtidos, considerando como variáveis

de otimização a amplitude e o ângulo de excitação dos elementos de um arranjo linear de antenas com 6, 10, 16 e 20 elementos. A Figura 5.4 apresenta os diagramas de radiação obtidos, utilizando como variáveis de otimização o ângulo de excitação de fase e a distância entre os elementos, neste caso considerou-se os valores de amplitude de um Arranjo Uniforme e das técnicas: Binomial, Dolph-Tschebyscheff, Blackman e Hamming. A Figura 5.5 apresenta os diagramas de radiação obtidos, empregando como variáveis de otimização a amplitude de excitação, o ângulo de excitação e distância entre os elementos do arranjo.

A partir do PSO implementado atingiu-se os valores de RSSL e HPBW expostos nas Tabelas 5.4, 5.5 e 5.6. Pode-se verificar que o PSO implementado alcançou resultados satisfatórios de RSSL e realizou o apontamento do feixe principal simultaneamente. Isto mostra a eficiência da técnica na otimização de diversos parâmetros de um arranjo de antenas. Porém, também é possível observar que quando o feixe principal afasta-se de  $90^\circ$  os valores de RSSL aumentam, tornando difícil encontrar os valores desejados.

Tabela 5.4 – Apontamento do Feixe Principal e a otimização do RSSL, valores de RSSL e HPBW obtidos considerando como variáveis de otimização a amplitude e a fase de excitação de cada elemento.

N = 6				N = 10		
d	$\theta_0$	RSSL(dB)	HPBW( $^\circ$ )	$\theta_0$	RSSL(dB)	HPBW( $^\circ$ )
$\lambda/4$	$60^\circ$	-40.13	38.39	$60^\circ$	-40.31	23.47
	$45^\circ$	-40.00	50.96	$45^\circ$	-40.02	18.43
	$30^\circ$	-41.02	246.43	$30^\circ$	-37.04	26.56
$\lambda/2$	$60^\circ$	-40.02	19.58	$60^\circ$	-39.83	11.45
	$45^\circ$	-39.62	24.30	$45^\circ$	-40.01	9.12
	$30^\circ$	-14.33	23.96	$30^\circ$	-31.93	18.07
N = 16				N = 20		
d	$\theta_0$	RSSL(dB)	HPBW( $^\circ$ )	$\theta_0$	RSSL(dB)	HPBW( $^\circ$ )
$\lambda/4$	$60^\circ$	-39.32	14.13	$60^\circ$	-37.43	11.03
	$45^\circ$	-40.02	18.43	$45^\circ$	-34.14	13.44
	$30^\circ$	-37.04	26.56	$30^\circ$	-38.00	20.43
$\lambda/2$	$60^\circ$	-40.00	7.30	$60^\circ$	-33.51	5.40
	$45^\circ$	-40.01	9.12	$45^\circ$	-38.42	7.11
	$30^\circ$	-35.34	12.76	$30^\circ$	-30.98	9.02

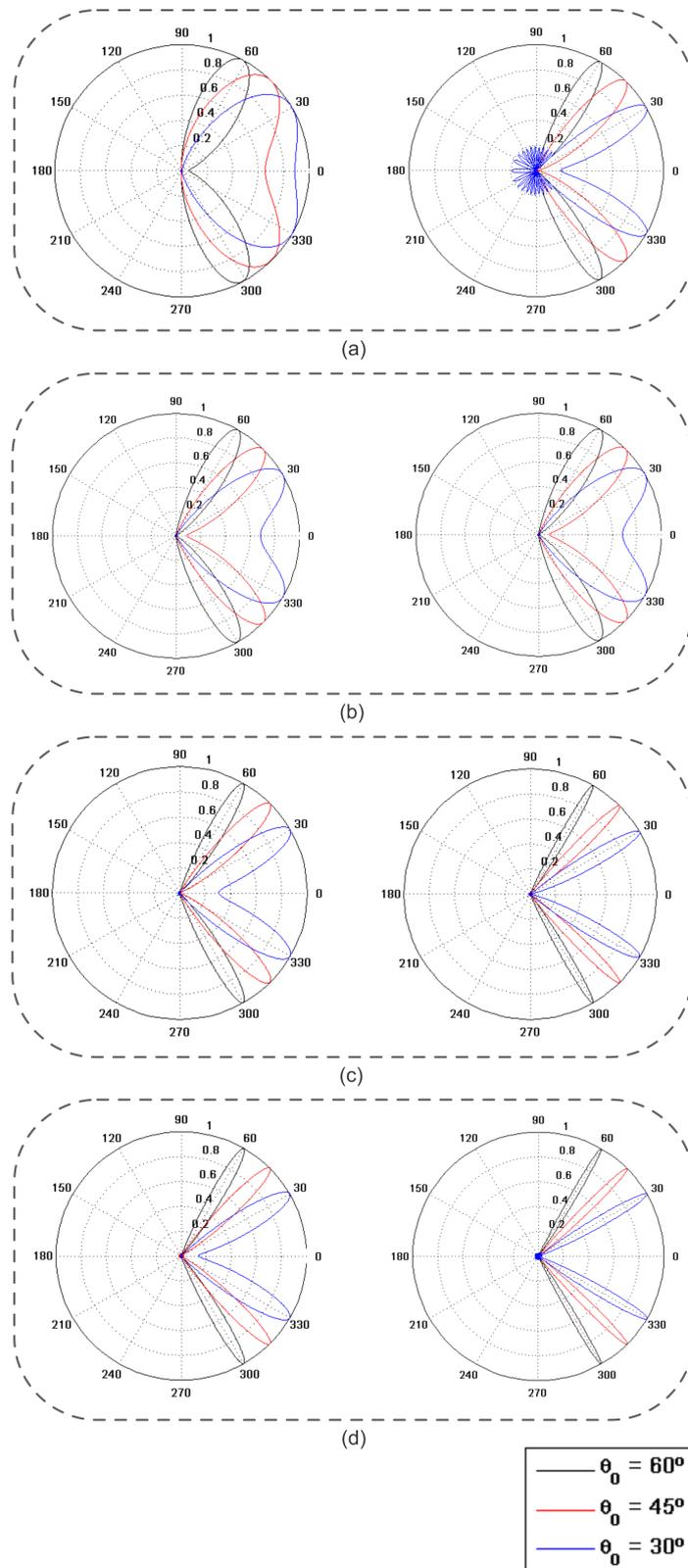


Figura 5.3 – Apontamento do Feixe Principal e Otimização do RSLL, considerando como variáveis de otimização a amplitude e fase de excitação de um Arranjo Linear de Antenas, com  $d = \lambda/4$  e  $d = \lambda/2$  para: (a)  $N = 6$ ; (b)  $N = 10$ ; (c)  $N = 16$ ; (d)  $N = 20$ .

Tabela 5.5 – Apontamento do Feixe Principal e a otimização do RSSL, valores de RSSL e HPBW obtidos considerando como variáveis de otimização a distância entre os elementos e a fase de excitação de cada elemento.

Amplitude Uniforme								
	N = 6		N = 10		N = 16		N = 20	
$\beta$	RSSL	HPBW	RSSL	HPBW	RSSL	HPBW	RSSL	HPBW
60°	-13.11	13.45	-13.19	12.63	-13.23	7.85	-13.25	3.32
45°	-13.11	24.15	-13.19	20.67	-13.23	9.24	-13.25	6.33
30°	-13.11	86.72	-13.19	14.27	-13.23	8.96	-13.25	10.08
Amplitude Binomial								
	N = 6		N = 10		N = 16		N = 20	
$\beta$	RSSL	HPBW	RSSL	HPBW	RSSL	HPBW	RSSL	HPBW
60°	-33.92	54.17	-133.97	46.52	-67.24	27.59	-142.61	27.05
45°	-44.25	150.46	-287.26	146.44	-30.52	36.12	-58.88	33.64
30°	-67.52	141.63	-69.45	119.45	-91.28	106.67	-168.84	105.14
Amplitude de Dolph-Tschebyscheff								
	N = 6		N = 10		N = 16		N = 20	
$\beta$	RSSL	HPBW	RSSL	HPBW	RSSL	HPBW	RSSL	HPBW
60°	-40	48.275	-40	25.08	-40	19.91	-40	19.48
45°	-40	183.50	-40	25.73	-40	37.5	-40	14.18
30°	-40	101.28	-40	87.18	-40	107.88	-40	25.36
Amplitude de Blackman								
	N = 6		N = 10		N = 16		N = 20	
$\beta$	RSSL	HPBW	RSSL	HPBW	RSSL	HPBW	RSSL	HPBW
60°	-36.11	198.52	-64.62	58.95	-58.62	55.06	-58.29	17.14
45°	-39.87	186.34	-64.62	135.57	-58.62	36.5	-58.29	28.63
30°	-41.64	176.73	-41.29	115.76	-58.62	18.08	-58.29	92.59
Amplitude de Hamming								
	N = 6		N = 10		N = 16		N = 20	
$\beta$	RSSL	HPBW	RSSL	HPBW	RSSL	HPBW	RSSL	HPBW
60°	-38.32	74.27	-35.81	38.15	-39.37	34.92	-40.45	15.68
45°	-32.14	155.6	-35.81	38.77	-39.37	26.98	-40.45	19.06
30°	-34.43	144.31	-35.81	101.15	-39.37	95.66	-40.45	20.75

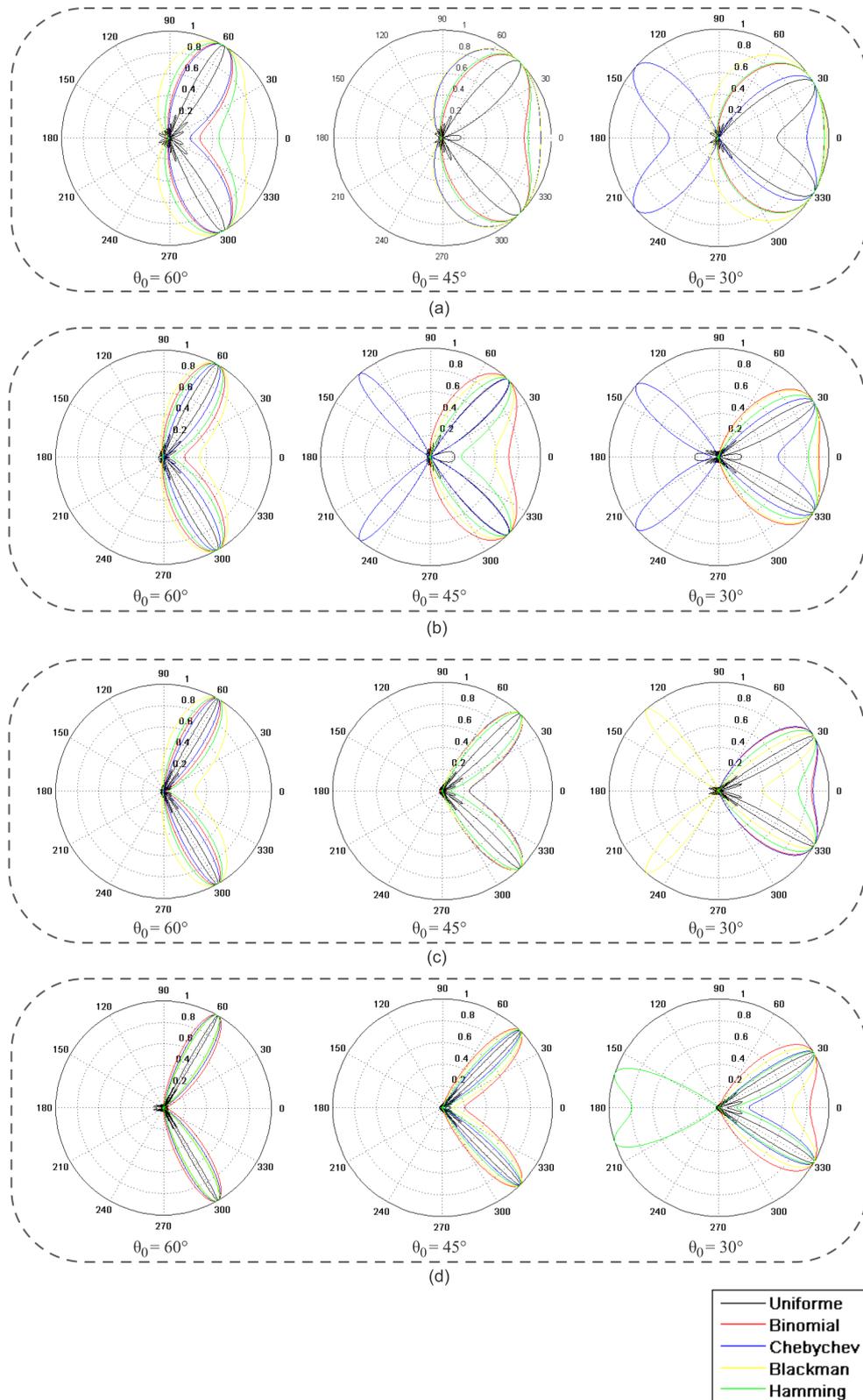


Figura 5.4 – Apontamento do Feixe Principal e otimização do RSL, considerando como variáveis de otimização o ângulo de excitação de fase e a distância entre os elementos de um arranjo linear de antenas com: (a)  $N = 6$ ; (b)  $N = 10$ ; (c)  $N = 16$  e (d)  $N = 20$ .

Tabela 5.6 – Apontamento do Feixe Principal e a otimização do RSL, valores de RSL e HPBW obtidos considerando como variáveis de otimização a distância entre os elementos, a amplitude e a fase de excitação de cada elemento.

N = 6			N = 10		
$\theta_0$	RSL(dB)	HPBW( $^\circ$ )	$\theta_0$	RSL(dB)	HPBW( $^\circ$ )
60 $^\circ$	-45.31	219.6	60 $^\circ$	-41.95	66.24
45 $^\circ$	-40.87	198.97	45 $^\circ$	-44.32	56.80
30 $^\circ$	-40.0	28.31	30 $^\circ$	-42.42	169.75

N = 16			N = 20		
$\theta_0$	RSL(dB)	HPBW( $^\circ$ )	$\theta_0$	RSL(dB)	HPBW( $^\circ$ )
60 $^\circ$	-42.07	39.38	60 $^\circ$	-40.06	28.42
45 $^\circ$	-40.26	49.91	45 $^\circ$	-40.027	35.76
30 $^\circ$	-40.06	252.71	30 $^\circ$	-39.15	262.2

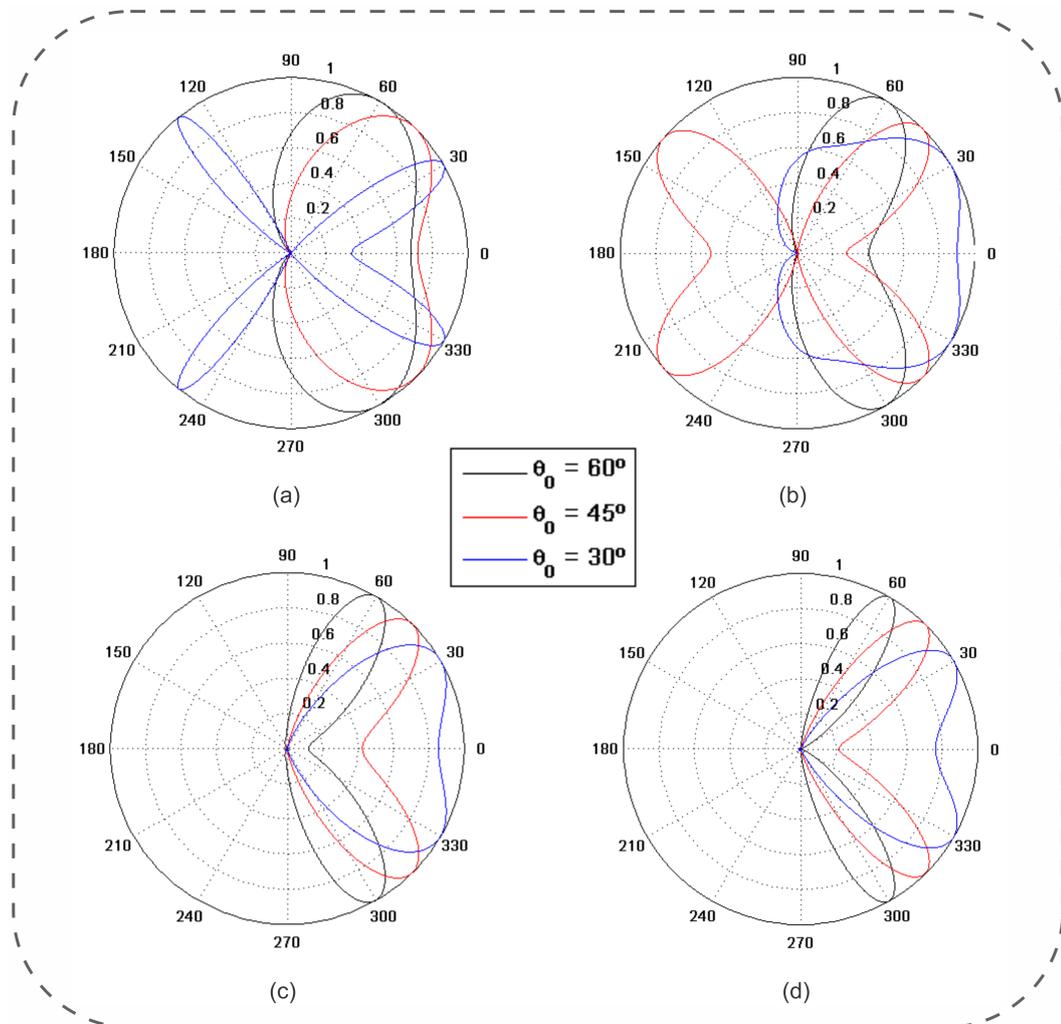


Figura 5.5 – Apontamento do Feixe Principal e otimização do RSL, considerando como variáveis de otimização a amplitude e fase de excitação dos elementos e a distância entre os elementos de um arranjo linear de antenas com 6, 10, 16 e 20 elementos

#### 5.4 Apontamento do Feixe Principal e Otimização do Ângulo de Meia Potência

Anteriormente, foram apresentados os resultados obtidos para o apontamento do feixe principal e otimização do RSSL. A partir destes resultados observa-se que quando o feixe principal afasta-se de  $90^\circ$  ocorre um aumento no RSSL e HPBW. Na seção 5.3 foi realizada a otimização do RSSL em conjunto com o apontamento do feixe principal via PSO. O PSO implementado, neste caso, alcançou o objetivo proposto, pois o mesmo mostrou-se eficiente na supressão dos lóbulos secundários e apontamento do feixe principal. Entretanto, a partir dos resultados descritos na seção 5.3 nota-se que reduzindo o RSSL aumenta-se o HPBW do arranjo, diminuindo a diretividade e o ganho do arranjo de antenas.

Visando aumentar a diretividade e o ganho de um arranjo linear de antenas composto por fontes puntiformes e realizar o controle dinâmico do feixe principal, implementou-se novamente o PSO. Contudo, neste caso, tem-se como objetivo realizar o apontamento do feixe principal e reduzir o ângulo de meia potência do arranjo. O PSO implementado é representado na Figura 4.1 e considera o espaço de busca descrito na seção anterior. O PSO considera uma população com 50 partículas e utiliza como critério de parada o número de iterações, o qual foi definido como 500 iterações.

O processo de otimização é realizado com o auxílio de uma função aptidão, a qual, neste caso, é definida pela seguinte equação:

$$\text{Aptidão} = \text{máx}(|\delta|^{-2}) \quad (5.4)$$

O valor de  $\delta$  varia de acordo com os valores de HPBW e do Ângulo de Máxima Radiação ( $\theta$ ) e é dado por:

$$\delta = \max(|HPBW - HPBW_d| + |\theta - \theta_d|, 0) \quad (5.5)$$

Onde:  $HPBW_d = 15^\circ$  e  $\theta_d$  igual a  $60^\circ$ ,  $45^\circ$  ou  $30^\circ$ .

Após o processo de otimização, obteve-se os diagramas de radiação apresentados na Figura 5.6, considerando como variáveis de otimização a amplitude e o ângulo de excitação fase de cada elemento do arranjo. Na Figura 5.7 são expostos os diagramas de radiação obtidos utilizando como variáveis de otimização a distância entre os elementos e o ângulo de excitação de fase de cada elemento do arranjo. A Figura 5.8 apresenta os diagramas de radiação encontrados empregando como variáveis de otimização a amplitude, o ângulo de excitação de fase e

a distância entre os elementos do arranjo.

As Tabelas 5.7, 5.8 e 5.9 exibem os valores de RSSL e HPBW encontrados para cada caso. Por meio destes resultados e dos diagramas de radiação verifica-se que o PSO atingiu valores satisfatórios de HPBW em praticamente todos os casos avaliados, além de realizar o apontamento do feixe principal. No entanto, os valores de RSSL sofreram um aumento considerável, pois a função aptidão não considera tal parâmetro na avaliação da melhor solução para o problema a ser otimizado. Através das Figuras 5.6, 5.7 e 5.8 nota-se a prevalência dos lóbulos secundários, aumentando, assim, a transmissão e/ou recepção de sinais indesejados. A próxima seção apresenta a síntese completa de um arranjo linear de antenas, visando suprimir os lóbulos secundários, reduzir a largura do lóbulo principal e realizar o apontamento do feixe principal para direções pré-determinadas.

Tabela 5.7 – Apontamento do Feixe Principal e a otimização do HPBW, valores de RSSL e HPBW obtidos considerando como variáveis de otimização a amplitude e a fase de excitação de cada elemento.

N = 6				N = 10		
d	$\theta_0$	RSSL(dB)	HPBW(°)	$\theta_0$	RSSL(dB)	HPBW(°)
$\lambda/4$	60°	-13.06	27.02	60°	-13.19	16.08
	45°	-1.75	24.49	45°	-15.52	21.56
	30°	-4.16	27.11	30°	-1.45	23.12
$\lambda/2$	60°	-9.74	13.50	60°	-13.19	7.96
	45°	-13.05	16.47	45°	-14.87	10.29
	30°	-10.34	25.44	30°	-8.69	12.79
$3\lambda/4$	60°	-5.26	8.48	60°	-9.17	4.94
	45°	-13.06	10.90	45°	-6.15	5.73
	30°	-8.76	15.03	30°	-8.49	8.36
N = 16				N = 20		
d	$\theta_0$	RSSL(dB)	HPBW(°)	$\theta_0$	RSSL(dB)	HPBW(°)
$\lambda/4$	60°	-10.53	9.708	60°	-14.04	8.22
	45°	-1.55	8.28	45°	-11.79	9.53
	30°	-1.18	21.89	30°	-3.21	10.68
$\lambda/2$	60°	-14.54	5.04	60°	-13.17	4.42
	45°	-10.62	6.81	45°	-7.161	4.91
	30°	-15.80	9.19	30°	-14.96	7.13
$3\lambda/4$	60°	-14.43	3.44	60°	-12.59	2.74
	45°	-13.27	4.03	45°	-13.37	3.16
	30°	-10.95	5.56	30°	-11.87	4.43

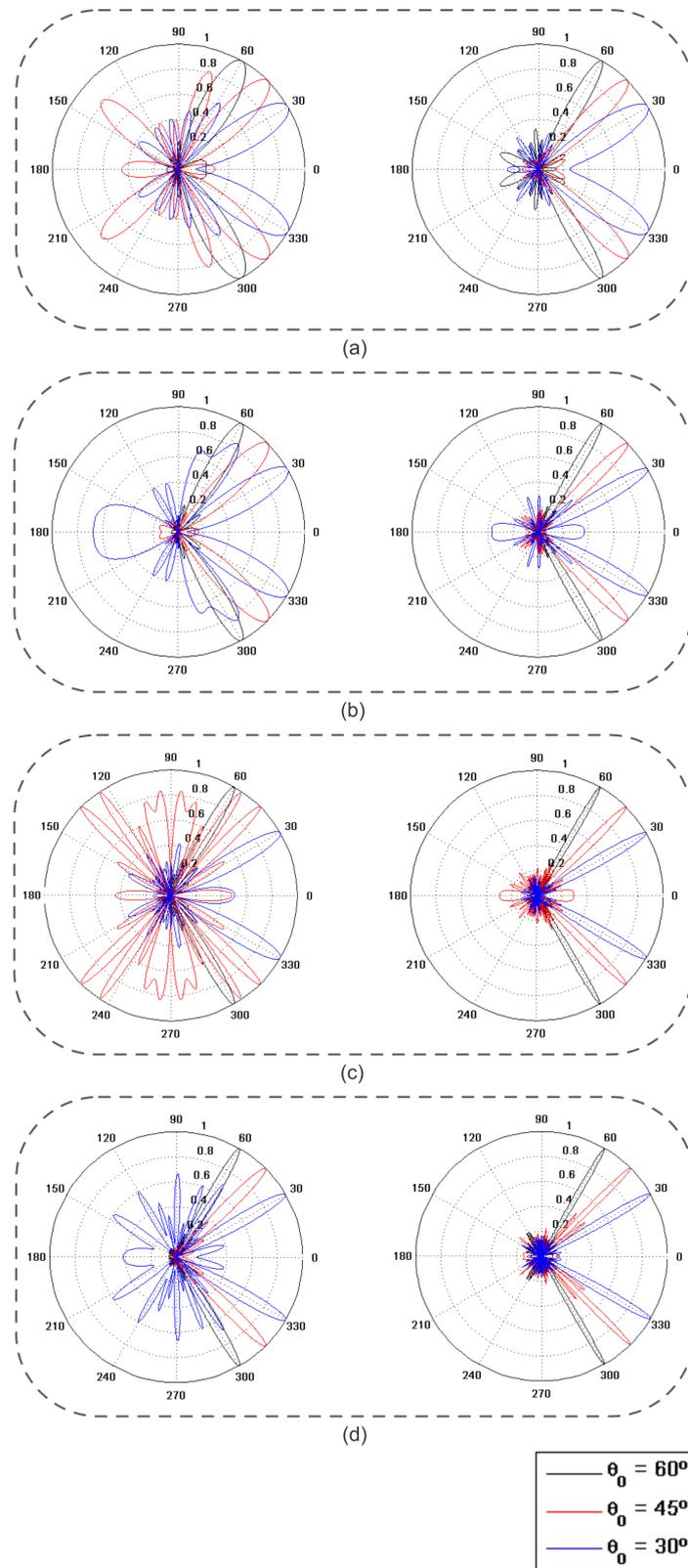


Figura 5.6 – Apontamento do Feixe Principal e Otimização do HPBW, considerando como variáveis de otimização a amplitude e fase de excitação de um Arranjo Linear de Antenas, com  $d = \lambda/4$  e  $d = \lambda/2$  para: (a)  $N = 6$ ; (b)  $N = 10$ ; (c)  $N = 16$ ; (d)  $N = 20$ .

Tabela 5.8 – Apontamento do Feixe Principal e a otimização do HPBW, valores de RSSL e HPBW obtidos considerando como variáveis de otimização a distância entre os elementos e o ângulo de excitação de fase de cada elemento.

Amplitude Uniforme								
	N = 6		N = 10		N = 16		N = 20	
$\beta$	RSSL	HPBW	RSSL	HPBW	RSSL	HPBW	RSSL	HPBW
60°	-13.06	8.91	-13.19	5.33	-13.23	3.33	-13.24	2.66
45°	-13.06	10.95	-13.19	6.53	-13.23	4.08	-13.24	3.26
30°	-13.06	15.91	-13.19	9.32	-13.23	5.78	-13.24	4.62
Amplitude Binomial								
	N = 6		N = 10		N = 16		N = 20	
$\beta$	RSSL	HPBW	RSSL	HPBW	RSSL	HPBW	RSSL	HPBW
60°	NL*	29.52	NL*	22.00	NL*	17.05	NL*	15.15
45°	NL*	38.42	NL*	27.74	NL*	21.22	NL*	18.79
30°	NL*	99.23	NL*	90.92	NL*	36.08	NL*	29.68
Amplitude de Dolph-Tschebyscheff								
	N = 6		N = 10		N = 16		N = 20	
$\beta$	RSSL	HPBW	RSSL	HPBW	RSSL	HPBW	RSSL	HPBW
60°	-40	25.68	-40	15.58	-40	9.63	-40	7.65
45°	-40	32.81	-40	19.33	-40	11.85	-40	9.40
30°	-40	95.06	-40	30.91	-40	17.31	-40	13.56
Amplitude de Blackman								
	N = 6		N = 10		N = 16		N = 20	
$\beta$	RSSL	HPBW	RSSL	HPBW	RSSL	HPBW	RSSL	HPBW
60°	NL*	42.51	-64.62	22.81	-58.62	13.57	-58.29	10.70
45°	NL*	50.16	-64.62	28.82	-58.62	16.78	-58.29	13.17
30°	NL*	112.01	-64.62	91.83	-58.62	25.67	-58.29	19.43
Amplitude de Hamming								
	N = 6		N = 10		N = 16		N = 20	
$\beta$	RSSL	HPBW	RSSL	HPBW	RSSL	HPBW	RSSL	HPBW
60°	NL*	30.92	-35.81	17.33	-39.37	10.49	-40.45	8.31
45°	NL*	40.58	-35.81	21.58	-39.37	12.92	-40.45	10.21
30°	NL*	100.77	-35.81	37.43	-39.37	19.00	-40.45	14.77
*NL - Não possui lóbulos secundários.								

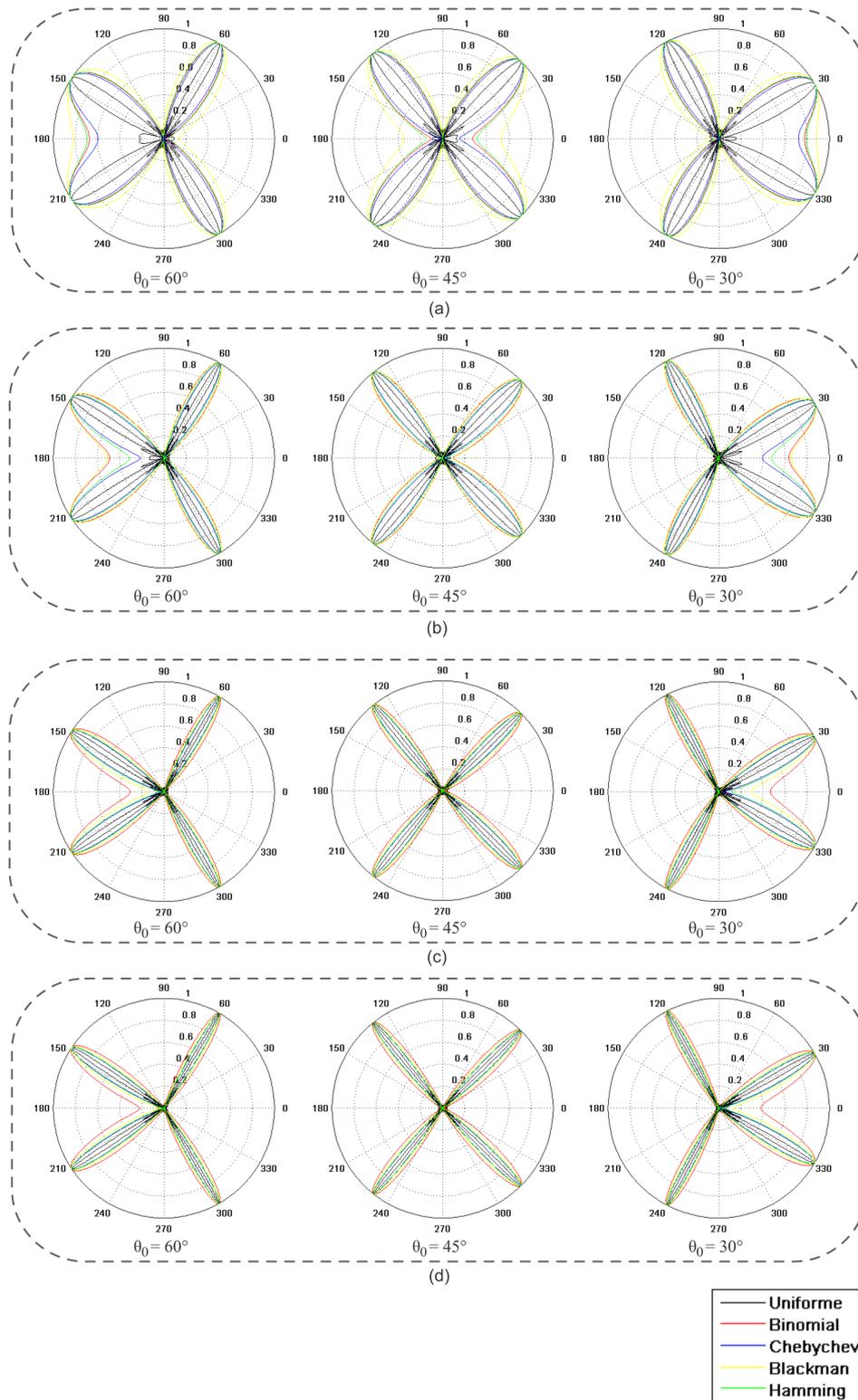


Figura 5.7 – Apontamento do Feixe Principal e Otimização do HPBW, considerando como variáveis de otimização o ângulo de excitação de fase e a distância entre os elementos de um Arranjo Linear de Antenas com: (a)  $N = 6$ ; (b)  $N = 10$ ; (c)  $N = 16$ ; (d)  $N = 20$ .

Tabela 5.9 – Apontamento do Feixe Principal e a otimização do HPBW, valores de RSSL e HPBW obtidos considerando como variáveis de otimização a distância entre os elementos, a amplitude e a fase de excitação de cada elemento.

N = 6			N = 10		
$\theta_0$	RSSL(dB)	HPBW( $^\circ$ )	$\theta_0$	RSSL(dB)	HPBW( $^\circ$ )
60 $^\circ$	-6.88	7.97	60 $^\circ$	-13.59	9.46
45 $^\circ$	-3.75	8.89	45 $^\circ$	-2.94	6.19
30 $^\circ$	-13.07	15.84	30 $^\circ$	-16.03	9.72

N = 16			N = 20		
$\theta_0$	RSSL(dB)	HPBW( $^\circ$ )	$\theta_0$	RSSL(dB)	HPBW( $^\circ$ )
60 $^\circ$	-12.51	3.89	60 $^\circ$	-12.04	2.72
45 $^\circ$	-10.3	4.03	45 $^\circ$	-10.97	3.20
30 $^\circ$	-9.66	5.41	30 $^\circ$	-11.72	4.48

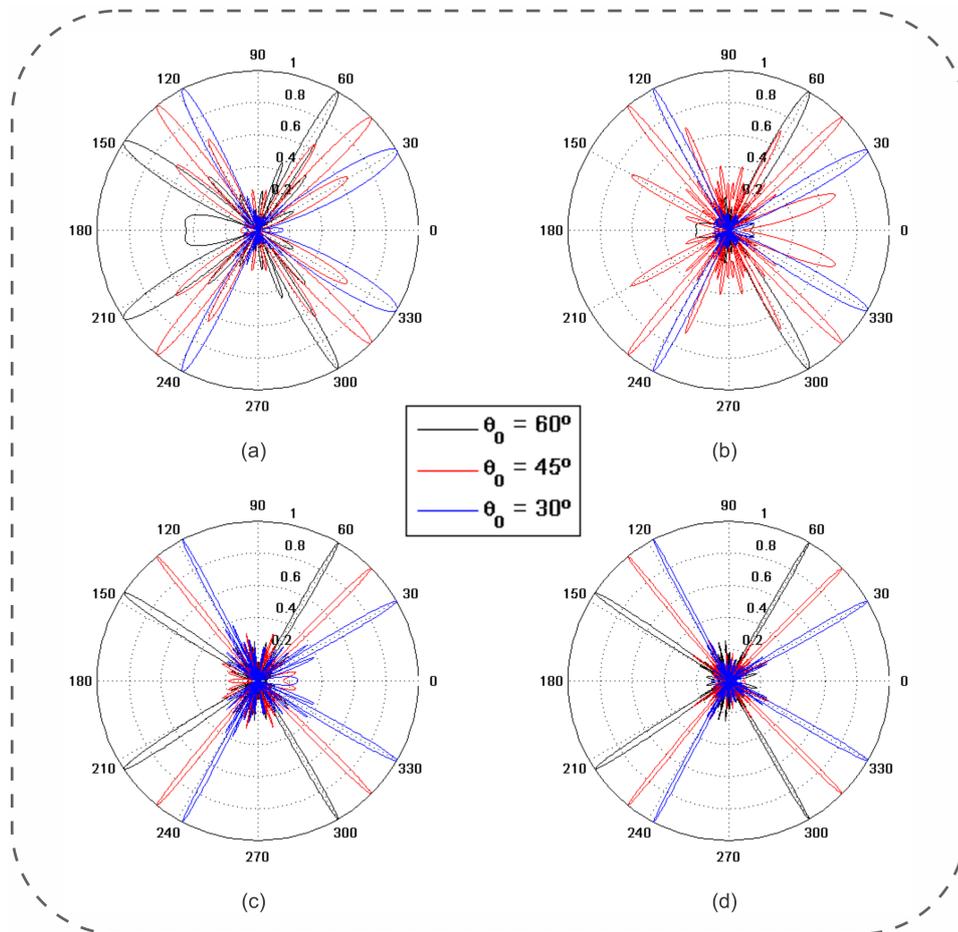


Figura 5.8 – Diagramas de Radiação obtidos através do PSO implementado considerando como variáveis de otimização a amplitude e fase de excitação e a distância entre os elementos de um arranjo de antenas com: (a)  $\theta_0 = 60^\circ$ ; (b)  $\theta_0 = 45^\circ$  e (c)  $\theta_0 = 30^\circ$ .

## 5.5 Apontamento do Feixe Principal e Otimização do Nível dos Lóbulos Secundários e Ângulo de Meia Potência

As seções 5.2, 5.3 e 5.4 apresentam os resultados alcançados a partir da otimização do RSSL ou HPBW e apontamento do feixe principal. Nestas seções os processos de otimização abordados realizam o apontamento do feixe principal em conjunto com a otimização de apenas um parâmetro de um arranjo linear de antenas. Sendo assim, otimizando apenas o RSSL de um arranjo outros parâmetros podem sofrer alterações, desejadas ou não, pois tais alterações não são consideradas durante o processo de otimização. Da mesma forma, caso seja otimizado o HPBW de um arranjo o nível dos lóbulos secundários apresentam variações. Ambos os parâmetros, RSSL e HPBW, são importantes e devem ser considerados durante o projeto de um arranjo de antenas. Devido a isto, foi utilizado o método PSO para realizar a otimização do RSSL e HPBW de um arranjo linear de antenas, em conjunto com as otimizações foi feito o apontamento do feixe principal do arranjo para direções pré-determinadas.

O PSO implementado utiliza como variáveis de otimização a amplitude e o ângulo de excitação de fase de cada elemento do arranjo de antenas e a distância entre eles. Estas variáveis são consideradas de maneira isolada e conjunta, visando avaliar a influência de cada uma no processo de otimização. A Figura 4.1 apresenta o funcionamento básico do PSO implementado. Para fins de implementação, o PSO considera uma população com 50 partículas e utiliza como critério de parada o número de iterações, o qual foi definido como 500 iterações. Através destes parâmetros obteve-se a convergência do PSO em todos os caso avaliados. O espaço de busca do enxame possui a mesma configuração descrita na seção anterior.

A função aptidão desenvolvida, neste caso, é definida por:

$$\text{Aptidão} = \text{máx}(|\delta|^{-2}) \quad (5.6)$$

O valor de  $\delta$  varia de acordo com os valores de RSSL e HPBW e é dado por:

$$\begin{aligned} \delta = \max(&|RSSL - RSSL_d| + |HPBW - HPBW_d| + |\theta - \theta_0|, \\ &|RSSL - RSSL_d|, |RSSL - RSSL_d| + |\theta - \theta_0|, \\ &|HPBW - HPBW_d|, |HPBW - HPBW_d| + |\theta - \theta_0|, \\ &|RSSL - RSSL_d| + |HPBW - HPBW_d|, |\theta - \theta_0|, 0) \end{aligned} \quad (5.7)$$

Onde:

- $RSLL_d$  = Nível Desejado dos Lóbulos Secundários ( $RSLL_d = -30dB$ );  
 $RSLL$  = Nível dos Lóbulos Secundários obtido na iteração  $i$ .  
 $HPBW_d$  = Ângulo de Meia Potência Desejado ( $HPBW_d = 15^\circ$ );  
 $HPBW$  = Ângulo de Meia Potência obtido na iteração  $i$ .  
 $\theta_0$  = Ângulo de Apontamento Desejado,  $\theta_0$  é igual a  $60^\circ$ ,  $45^\circ$  ou  $30^\circ$ .  
 $\theta$  = Ângulo de Máxima Radiação obtido na iteração  $i$ .

Inicialmente, considera-se como variável de otimização a amplitude e o ângulo de excitação de cada elemento do arranjo, mantendo a distância constante em  $\lambda/4$  e  $\lambda/2$ . Os diagramas de radiação obtidos, neste caso, são apresentados na Figura 5.9. Em uma segunda análise, utiliza-se como variável de otimização a distância entre os elementos do arranjo e o ângulo de excitação de fase de cada elemento do arranjo. Além disso, utiliza-se os valores de amplitude determinados pelas técnicas descritas na seção 2.5. A Figura 5.10 apresenta os diagramas de radiação obtidos.

Por fim, considera-se como variáveis de otimização a amplitude e o ângulo de excitação de cada elemento do arranjo e a distância entre eles. Os diagramas de radiação obtidos são exibidos na Figura 5.11. Para todos os casos de otimização avaliados, foram utilizados arranjos lineares de antenas com 6, 10, 16 e 20 elementos puntiformes, linearmente espaçados e em fase. Os valores de RSLL e HPBW encontrados para cada caso são expostos nas Tabelas 5.10, 5.11 e 5.12.

Por intermédio dos valores de RSLL e HPBW obtidos, conclui-se que o PSO implementado alcançou resultados satisfatórios em todos os casos, pois foi realizado o apontamento do feixe principal sem comprometer os valores de RSLL e HPBW, diferentemente das otimizações apresentada nas seções 5.2, 5.3 e 5.4.

Tabela 5.10 – Apontamento do Feixe Principal e a otimização do RSSL e HPBW, valores de RSSL e HPBW obtidos considerando como variáveis de otimização a amplitude e o ângulo de excitação de fase de cada elemento do arranjo.

N = 6				N = 10		
d	$\theta_0$	RSSL(dB)	HPBW(dB)	$\theta_0$	RSSL(dB)	HPBW(dB)
$\lambda/4$	60°	-30.00	33.74	60°	-30.03	23.15
	45°	-30.01	39.78	45°	-30.03	25.84
	30°	-31.46	37.36	30°	-30.08	31.32
$\lambda/2$	60°	-30.30	19.83	60°	-27.60	10.11
	45°	-30.03	21.45	45°	-30.11	13.24
	30°	-14.20	24.37	30°	-27.82	18.18

N = 16				N = 20		
d	$\theta_0$	RSSL(dB)	HPBW(dB)	$\theta_0$	RSSL(dB)	HPBW(dB)
$\lambda/4$	60°	-30.02	14.18	60°	-30.05	10.22
	45°	-30.00	15.87	45°	-30.00	12.38
	30°	-26.74	22.17	30°	-23.86	5.07
$\lambda/2$	60°	-30.00	6.87	60°	-30.04	10.22
	45°	-28.62	7.88	45°	-30.04	6.51
	30°	-26.00	10.72	30°	-30.00	8.85

Tabela 5.11 – Apontamento do Feixe Principal e a otimização do RSSL e HPBW, valores de RSSL e HPBW obtidos, considerando como variáveis de otimização a distância entre os elementos do arranjo e o ângulo de excitação de fase de cada elemento do arranjo.

N = 6			N = 10		
$\theta_0$	RSSL(dB)	HPBW(dB)	$\theta_0$	RSSL(dB)	HPBW(dB)
60°	-30.04	17.32	60°	-30.06	10.40
45°	-30.01	21.53	45°	-30.00	12.67
30°	-30.57	91.96	30°	-28.87	17.93

N = 16			N = 20		
$\theta_0$	RSSL(dB)	HPBW(dB)	$\theta_0$	RSSL(dB)	HPBW(dB)
60°	-30.33	6.95	60°	-30.17	5.40
45°	-30.48	8.17	45°	-30.01	6.30
30°	-29.87	11.09	30°	-30.00	11.05

Tabela 5.12 – Apontamento do Feixe Principal e a otimização do RSSL e HPBW, valores de RSSL e HPBW obtidos considerando como variáveis de otimização a amplitude de excitação e ângulo de excitação de fase de cada elemento do arranjo e a distância entre eles.

Amplitude Uniforme								
	N = 6		N = 10		N = 16		N = 20	
$\beta$	RSSL	HPBW	RSSL	HPBW	RSSL	HPBW	RSSL	HPBW
60°	-13.06	8.91	-13.19	5.33	-13.23	3.33	-13.24	2.66
45°	-13.06	10.95	-13.19	6.53	-13.23	4.08	-13.24	3.26
30°	-13.06	15.91	-13.19	9.32	-13.23	5.78	-13.24	4.62
Amplitude Binomial								
	N = 6		N = 10		N = 16		N = 20	
$\beta$	RSSL	HPBW	RSSL	HPBW	RSSL	HPBW	RSSL	HPBW
60°	NL*	29.52	NL*	22.00	NL*	17.05	NL*	15.15
45°	NL*	38.42	NL*	27.74	NL*	21.22	NL*	18.79
30°	NL*	99.23	NL*	90.92	NL*	36.08	NL*	29.68
Amplitude de Dolph-Tschebyscheff								
	N = 6		N = 10		N = 16		N = 20	
$\beta$	RSSL	HPBW	RSSL	HPBW	RSSL	HPBW	RSSL	HPBW
60°	-40	25.68	-40	15.58	-40	9.63	-40	7.65
45°	-40	32.81	-40	19.33	-40	11.85	-40	9.40
30°	-40	95.06	-40	30.91	-40	17.31	-40	13.56
Amplitude de Blackman								
	N = 6		N = 10		N = 16		N = 20	
$\beta$	RSSL	HPBW	RSSL	HPBW	RSSL	HPBW	RSSL	HPBW
60°	NL*	42.51	-64.62	22.81	-58.62	13.57	-58.29	10.70
45°	NL*	50.16	-64.62	28.82	-58.62	16.78	-58.29	13.17
30°	NL*	112.01	-64.62	91.83	-58.62	25.67	-58.29	19.43
Amplitude de Hamming								
	N = 6		N = 10		N = 16		N = 20	
$\beta$	RSSL	HPBW	RSSL	HPBW	RSSL	HPBW	RSSL	HPBW
60°	NL*	30.92	-35.81	17.33	-39.37	10.49	-40.45	8.31
45°	NL*	40.58	-35.81	21.58	-39.37	12.92	-40.45	10.21
30°	NL*	100.77	-35.81	37.43	-39.37	19.00	-40.45	14.77
*NL - Não possui lóbulos secundários.								

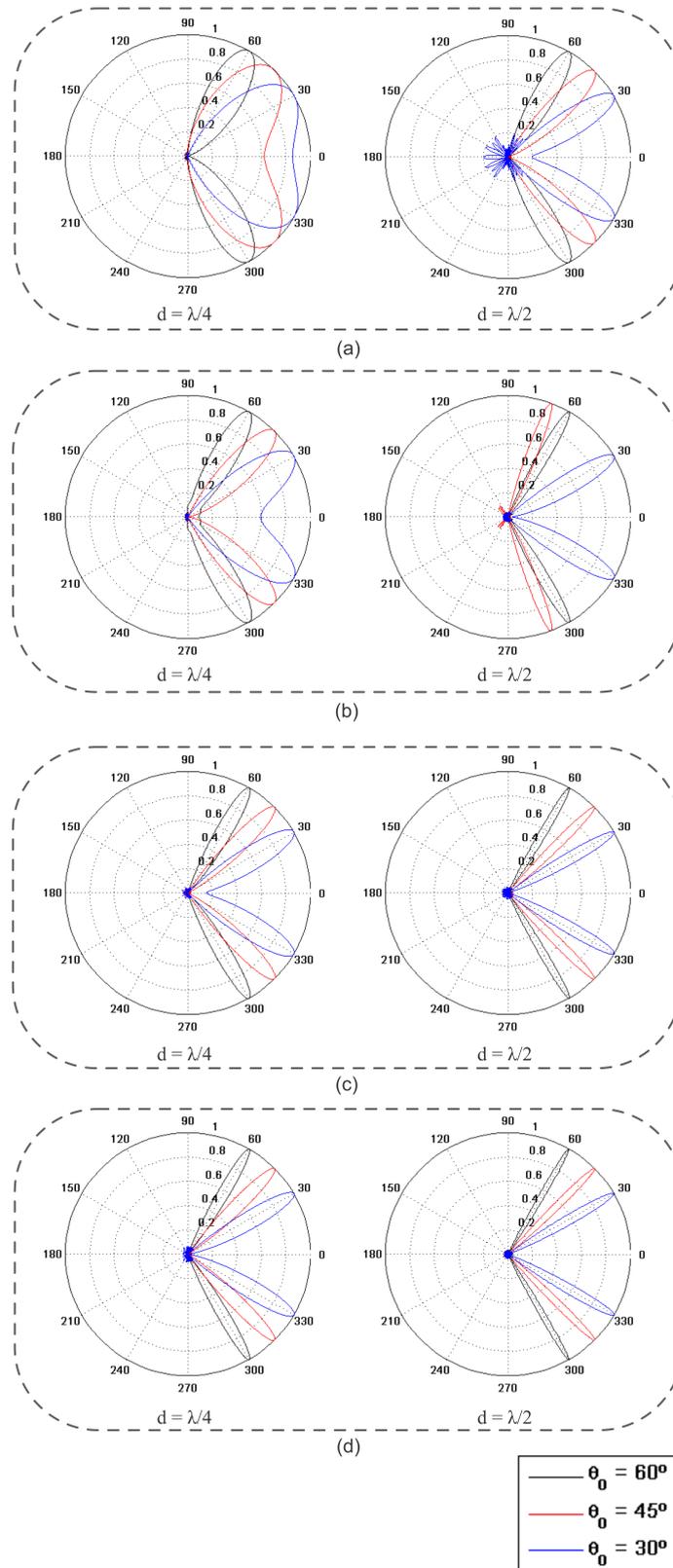


Figura 5.9 – Diagramas de radiação obtidos através do apontamento do feixe principal e otimização do RSSL e HPBW, considerando como variáveis de otimização amplitude e o ângulo de excitação de fase de cada elemento de um arranjo linear de antenas com (a)  $N = 6$ ; (b)  $N = 10$ ; (c)  $N = 16$ ; (d)  $N = 20$ .

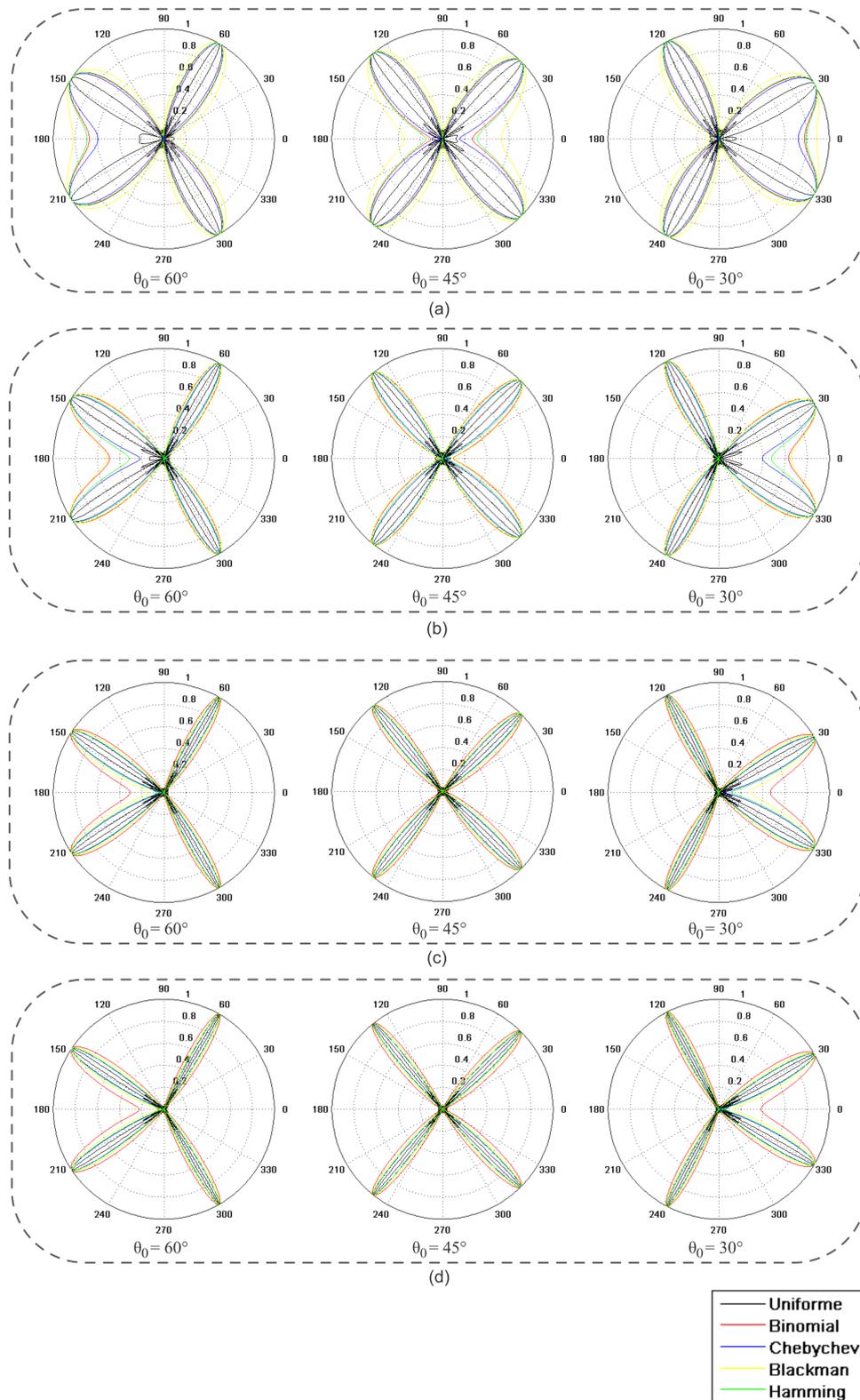


Figura 5.10 – Apontamento do Feixe Principal e Otimização do RSL e HPBW, considerando como variáveis de otimização o ângulo de excitação de fase de cada elemento e a distância entre os elementos de um Arranjo Linear de Antenas com: (a) N = 6; (b) N = 10; (c) N = 16; (d) N = 20.

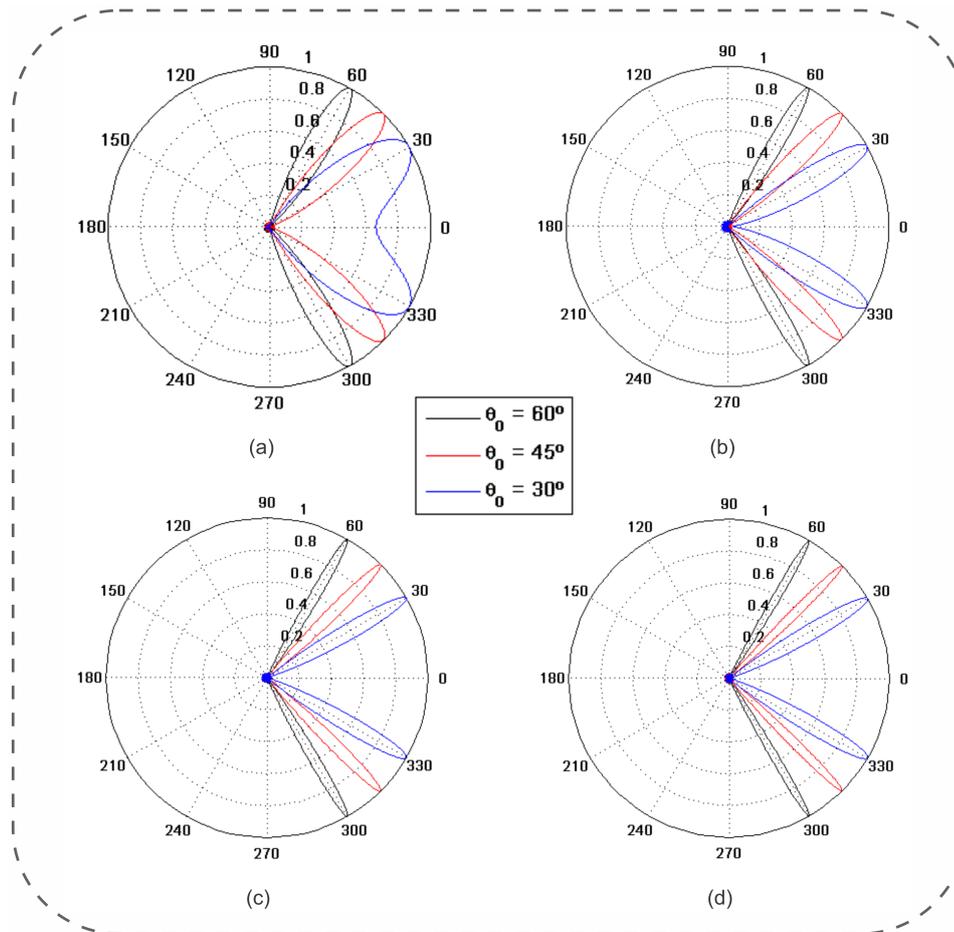


Figura 5.11 – Diagramas de radiação obtidos através do apontamento do feixe principal e otimização do RSSL e HPBW, considerando como variáveis de otimização a distância entre os elementos do arranjo e a amplitude e ângulo de excitação de fase de cada elemento de um arranjo linear de antenas com (a)  $N = 6$ ; (b)  $N = 10$ ; (c)  $N = 16$ ; (d)  $N = 20$ .

## 5.6 Conclusões

Neste capítulo foi realizado o apontamento do feixe principal de um arranjo linear de antenas e a otimização do RSSL e HPBW. A partir dos resultados obtidos para cada caso de otimização conclui-se que:

(1) *Apontamento do Feixe Principal*: Quando realiza-se apenas o apontamento do feixe principal, ocorre um aumento considerável no HPBW do arranjo, quando comparado aos valores obtidos pelas técnicas descritas no Capítulo 2. Através dos resultados obtidos verifica-se que quanto mais distante de  $90^\circ$  encontra-se o ângulo de máxima radiação, maior o valor de HPBW e, conseqüentemente, menor a diretividade do arranjo;

(2) *Apontamento do Feixe Principal e Otimização do RSSL*: Neste caso de otimização

foram consideradas três combinações de variáveis. Inicialmente considera-se a amplitude e o ângulo de excitação de fase como variáveis de otimização obtendo, assim, o valor desejado de RSSL em todos os casos. Os valores de HPBW obtidos, neste caso, apresentaram valores próximos aos encontrados para um arranjo uniforme e inferiores, em sua maioria, quando comparado as técnicas apresentadas no Capítulo 2. Em uma segunda análise foram consideradas como variáveis de otimização o ângulo de excitação de fase e a distância entre os elementos do arranjo, a partir dos valores alcançados verifica-se que o PSO implementado obteve o valor de RSSL desejado na maioria das configurações do arranjo. Entretanto, ocorreu um aumento no HPBW, pois o mesmo não foi considerado pela função aptidão. Para finalizar este caso de otimização foram consideradas como variáveis de otimização a amplitude e o ângulo de excitação de cada elemento do arranjo e a distância entre eles. Através do PSO implementado atingiu-se, neste caso, o valor desejado de RSSL para todas as configurações de arranjo, porém obteve-se altos valores de HPBW quando comparado aos valores obtidos pelas técnicas descritas no Capítulo 2. Pois apenas o RSSL foi considerado pela função aptidão, devido a isto o PSO tende a convergir para baixos valores de distância visando reduzir o RSSL e aumentando, conseqüentemente, o HPBW. O aumento do HPBW acarreta em uma redução do ganho do arranjo e de sua diretividade. Para todos os casos de otimização descritos, foi possível realizar o apontamento do feixe principal para as direções desejadas;

(3) *Apontamento do Feixe Principal e Otimização do HPBW*: Novamente foram consideradas três combinações de variáveis. Primeiramente considerou-se a amplitude e o ângulo de excitação de fase como variáveis de otimização, neste caso, o PSO implementado obteve o valor desejado de HPBW, ou próximo, para todas as configurações de arranjo, conseqüentemente ocorreu um aumento considerável no RSSL. O PSO implementado conquistou baixos valores de HPBW quando comparados as técnicas apresentadas no Capítulo 2. Em um segundo caso de otimização utiliza-se como variáveis de otimização o ângulo de excitação de fase de cada elemento e a distância entre eles, neste caso, o PSO implementado não alcançou o valor desejado de HPBW em todos os casos, pois o valor máximo permitido para a distância entre os elementos foi  $0.75\lambda$ , não sendo possível realizar um redução considerável do HPBW, sem alterar a amplitude de excitação de forma conjunta. Neste caso, o PSO implementado obteve os mesmos valores de RSSL encontrados pelas técnicas descritas no Capítulo 2. Para finalizar este caso de otimização, foram usadas como variáveis de otimização a amplitude e ângulo de excitação de fase de cada elemento do arranjo e a distância entre eles. Neste caso, o PSO im-

plementado alcançou o valor desejado de HPBW em todos os casos, porém novamente ocorreu um aumento significativo no RSSL, quando comparado as técnicas apresentadas no Capítulo 2. Novamente, em todos os casos de otimização descritos, foi possível realizar o apontamento do feixe principal para as direções desejadas;

(4) *Apontamento do Feixe Principal e Otimização do RSSL e HPBW*: Para finalizar, realizou-se o apontamento do feixe principal e otimização do RSSL e HPBW, pois por meio dos resultados apresentados para as demais otimizações nota-se que quando otimiza-se apenas o RSSL os valores do HPBW são alterados sem qualquer controle, da mesma forma que quando é realizada a otimização do HPBW o nível dos lóbulos secundários aumenta. Para realizar tal otimização, utilizou-se três combinações de variáveis. Inicialmente considerou-se como variáveis de otimização o ângulo de excitação de fase de cada elemento do arranjo e a distância entre eles. Neste caso, obteve-se os valores desejados de RSSL e HPBW em praticamente todas as configurações de arranjos. Os valores de HPBW obtidos são relativamente inferiores quando comparados aos obtidos pelas otimizações apresentadas neste capítulo e pelas técnicas apresentadas no Capítulo 2. Em uma segunda análise, utilizou-se como variáveis de otimização o ângulo de excitação de fase de cada elemento do arranjo e a distância entre eles, neste caso o PSO implementado atingiu valores de RSSL próximos aos obtidos pelas técnicas descritas no Capítulo 2 e valores de HPBW superiores aos obtidos por tais técnicas. Para finalizar foram consideradas como variáveis de otimização a amplitude e ângulo de excitação de fase de cada elemento do arranjo e a distância entre eles, neste caso, o PSO implementado conquistou os valores desejados de RSSL e HPBW em grande parte das configurações de arranjo apresentadas. Tais resultados foram obtidos apesar do ângulo de máxima radiação estar afastado de  $90^\circ$ . Novamente, em todos os casos de otimização descritos, foi possível realizar o apontamento do feixe principal para as direções desejadas.

Por intermédio das análises realizadas neste capítulo, concluiu-se que o PSO implementado mostrou-se eficiente, novamente, na otimização de múltiplos parâmetros de um arranjo linear de antenas. Tornando possível realizar o projeto de tal arranjo, levando em consideração a conformação do feixe principal e reduzindo o nível dos lóbulos secundários e ângulo de meia potência.

---

---

## 6

---

# SELEÇÃO DE ANTENAS EM UM ARRANJO LINEAR DE ANTENAS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos na seleção de antenas de um Arranjo Linear de Antenas através da Técnica de Otimização por Enxame de Partículas. Além disso, este capítulo descreve os detalhes da versão Híbrida proposta.

### 6.1 Introdução

A técnica de Otimização por Enxame de Partículas é um tipo de inteligência de enxame inspirada no comportamento de bandos de pássaros, que surgiu com o objetivo de tratar problemas de otimização contínuos e não-lineares (KENNEDY e EBERHART, 1995). Porém, existem inúmeros problemas de otimização discretos, os quais não poderiam ser resolvidos através desta versão do PSO. Devido a isto, foi desenvolvida a versão binária do PSO (KENNEDY e EBERHART, 1997), a qual é muito utilizada por pesquisadores da área, na resolução de problemas de otimização de antenas (KAN et al., 2012; JIN e RAHMAT-SAMII, 2008; WANG et al., 2012). A partir da versão binária do PSO, neste trabalho, é realizada a seleção de antenas. A seleção de antenas consiste em selecionar um subconjunto das antenas do arranjo, visando um melhor desempenho do sistema. Este capítulo apresenta os resultados obtidos.

O PSO, como descrito anteriormente, surgiu com o objetivo de resolver problemas de otimização contínuos e através da versão binária do PSO, realiza-se a otimização de problemas discretos. Contudo, existem inúmeros problemas de otimização que consideram variáveis contínuas e discretas, as quais necessitam de um algoritmo de otimização capaz de tratar ambos

os casos, simultaneamente. Devido a isto, neste trabalho, foi desenvolvida uma nova versão do PSO, a qual utiliza uma codificação híbrida, ou seja, trata problemas de otimização com variáveis contínuas e discretas, simultaneamente. Esta variação do PSO é utilizada, neste trabalho, para realizar a seleção de antenas e controlar simultaneamente as correntes de alimentação do arranjo de antenas, visando obter o padrão de radiação desejado e reduzir o número de antenas selecionadas. Portanto, o PSO implementado deve procurar uma configuração dos elementos que o compõe, de modo que esta seja a mais econômica, e que possa atingir os requisitos de desempenho do sistema.

Todas as otimizações descritas acima, levam em consideração que o arranjo de antenas foi projetado e encontra-se em funcionamento. Entretanto, o projeto de um arranjo é um processo que exige tempo e experiência do projetista, sendo muitas vezes necessário a utilização de técnicas de otimização, visando obter os parâmetros de projeto de forma rápida e otimizada. Portanto, para finalizar as otimizações, é realizada a síntese completa de um arranjo linear de antenas composto por fontes puntiformes, através da técnica de Otimização por Enxame de Partícula, visando reduzir o RSSL e HPBW do arranjo. Neste caso, foram adquiridos os seguintes parâmetros de projeto: Número de elementos, amplitude e ângulo de excitação de cada elemento do arranjo e a distância entre eles. Através destes parâmetros é possível realizar o projeto de um arranjo linear de antenas.

Este capítulo, apresenta os resultados dos casos de otimização descritos acima e a formulação matemática desenvolvida.

## **6.2 Síntese de um Arranjo Linear de Antenas**

Esta seção apresenta os resultados encontrados através da síntese de um arranjo linear de antenas composto por fontes puntiformes, visando reduzir o RSSL e HPBW do arranjo e obter o padrão de radiação desejado. Neste caso, obteve-se através do PSO o número de elementos, a amplitude e ângulo de excitação de cada elemento do arranjo e a distância entre eles. Estes parâmetros foram encontrados com o objetivo de realizar o projeto de um arranjo linear de antenas com tamanho físico reduzido.

O PSO implementado apresenta o funcionamento descrito na Figura 4.1. Para realizar a implementação do PSO é necessário definir inúmeros parâmetros, os quais garantem o seu correto funcionamento. Inicialmente deve-se determinar o espaço de busca do enxame, que depende das variáveis que serão utilizadas no processo de otimização. Neste caso, utilizou-se

as seguintes variáveis: Amplitude e ângulo de excitação de cada elemento, a distância entre eles e o número de elementos do arranjo. A amplitude de excitação varia no intervalo  $[0, 1]$  e o ângulo de excitação de fase no intervalo  $[0, \pi]$ . A distância entre os elementos pode variar no intervalo de  $]0, 0,5]$ . O número de elementos do arranjo não pode ser representado através de um intervalo contínuo, pois não podem existir "partes" de um elemento em um arranjo de antenas. Portanto, o número de elementos do arranjo é definido como uma variável inteira, possuindo, assim, um valor máximo e mínimo ( $N_{min}$  e  $N_{max}$ ). Logo, define-se  $N_{min} = 2$ , pois não existem arranjos formados por apenas um elemento e  $N_{max} = 20$ , limitando o tamanho máximo do arranjo em 20 elementos.

Com o objetivo de realizar a otimização do número de elementos de um arranjo linear de antenas, foi necessário realizar uma modificação na versão clássica do PSO. O PSO foi inicialmente desenvolvido para trabalhar com variáveis reais e contínuas, no caso da otimização descrita anteriormente necessita-se que o PSO considere como variável valores inteiros, para isso a equação (3.3), utilizada na atualização da posição da partícula foi reescrita da seguinte forma:

$$X_i^{k+1} = \lfloor X_i^k + V_i^{k+1} \rfloor \quad (6.1)$$

A operação apresentada na equação (6.1) converte um número real ( $X_i^k + V_i^{k+1}$ ) no maior número inteiro, menor ou igual, a ( $X_i^k + V_i^{k+1}$ ).

Após determinado o espaço de busca do enxame, foi necessário definir o critério de parada do PSO. Tal critério foi utilizado para determinar o momento em que o PSO encerra a sua execução. Para a otimização em questão considerou-se como critério de parada o número de iterações igual a 200, para cada caso apresentado a seguir. Além disso, o tamanho do enxame foi definido como 20 partículas, para cada caso.

Os parâmetros descritos acima são primordiais para o funcionamento adequado do PSO. Porém, o principal parâmetro do PSO é a função aptidão. Para realizar a síntese de um arranjo linear de antenas, foi desenvolvida a seguinte função aptidão:

$$\text{Aptidão} = \text{máx} \left[ (|RSL L - RSL L_d| + |HPBW - HPBW_d| + |\theta - \theta_d| + N^2)^{-2} \right] \quad (6.2)$$

Onde:

$$RSL L_d = -30dB, HPBW_d = 30^\circ \text{ e } \theta_0 = 90^\circ, 60^\circ, 45^\circ \text{ ou } 30^\circ.$$

Os diagramas de radiação obtidos são apresentados na Figura 6.1. Os valores de RSSL, HPBW e o Número de Elementos encontrados para cada caso são expostos na Tabela 6.1. A partir dos valores obtidos verifica-se que o PSO implementado alcançou os valores desejados de RSSL e HPBW na maioria dos casos. Porém, como esperado, quando o ângulo de máxima radiação afasta-se de  $90^\circ$  valores superiores de RSSL e HPBW são alcançados, tornando necessário aumentar o número de elementos do arranjo para compensar tal problema. Contudo, para  $\theta_0 = 90^\circ$  atingiu-se os valores de RSSL e HPBW desejados através de um arranjo linear de antenas composto por apenas 3 elementos, minimizando, assim, o tamanho físico do arranjo.

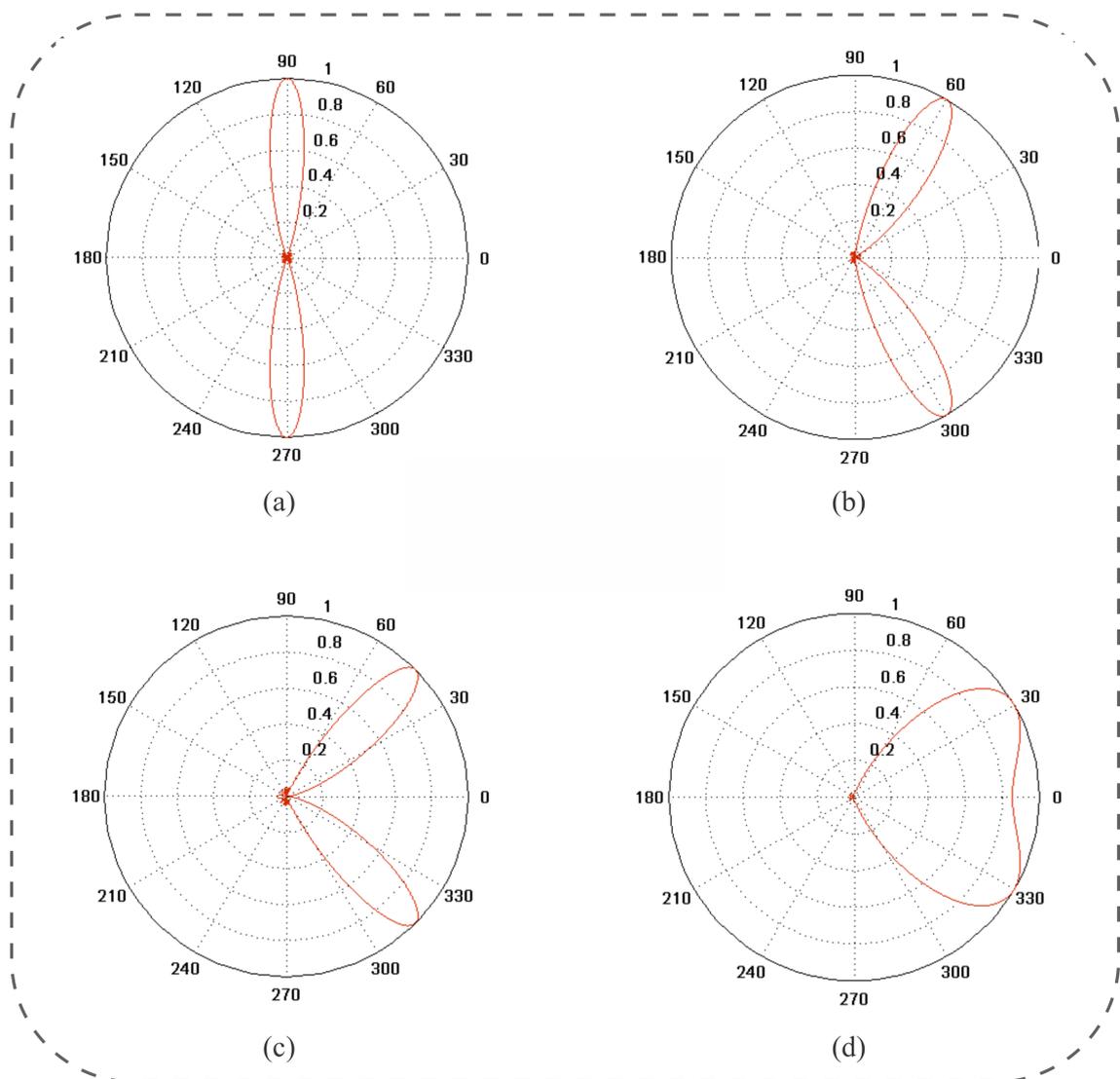


Figura 6.1 – Diagramas de Radiação Obtidos Através da Síntese de um Arranjo Linear de Antenas via PSO, considerando (a)  $\theta_0 = 90^\circ$ ; (b)  $\theta_0 = 60^\circ$ ; (c)  $\theta_0 = 45^\circ$ ; (d)  $\theta_0 = 30^\circ$ .

Tabela 6.1 – Valores de RSSL, HPBW e Número de Elementos obtidos para os diagramas de radiação apresentados na Figura 6.1.

$\beta$	RSSL(dB)	HPBW(°)	N
90°	-30	20	3
60°	-30	28	4
45°	-27	30	20
30°	-30	47	9

### 6.3 Seleção de Antenas

Os resultados apresentados no decorrer deste trabalho foram obtidos considerando variáveis contínuas, porém inúmeros problemas da engenharia necessitam de técnicas de otimização capazes de otimizar problemas combinacionais, dentre as técnicas que consideram variáveis discretas no seu processo de otimização encontra-se o Algoritmo Genético, o qual possui a capacidade de trabalhar com problemas no espaço de busca contínuo e discreto (FU et al., 2016; MAINKAR e MULAY, 2016). Porém tal técnica apresenta um tempo computacional elevado e possui difícil implementação. Visando superar estas limitações, foi desenvolvido o PSO Binário, através do qual é possível realizar a otimização de problemas combinacionais em menor tempo computacional e através de uma implementação simples.

Os resultados apresentados até o momento consideram parâmetros de projeto de um arranjo de antenas, porém inúmeras vezes é necessário alterar o padrão de radiação de um arranjo durante o seu funcionamento, adaptando-o ao ambiente. Devido a isso, neste trabalho, foi realizada a implementação de um PSO Binário, o qual realiza a seleção de antenas de um arranjo linear de antenas. Através desta seleção é possível determinar qual antena deve estar ligada/desligada para obter o padrão de radiação desejado.

Para realizar a implementação do PSO Binário não é necessário determinar o espaço de busca do enxame, pois as partículas só podem estar em dois estados, ligada ou desligada (1 ou 0). Porém, semelhante ao PSO Clássico, na versão binária também é necessário determinar o critério de parada do PSO. Tal critério foi utilizado para determinar o momento em que o PSO encerra a sua execução. Para a otimização em questão considerou-se como critério de parada o número de iterações igual a 200, para cada caso apresentado a seguir. Além disso o tamanho do enxame também foi definido como 20 partículas, para cada caso. Estes valores foram determinados após ter sido avaliada a convergência do PSO para todos os casos apresentados. A Figura 6.2 apresentada o funcionamento do PSO implementado.

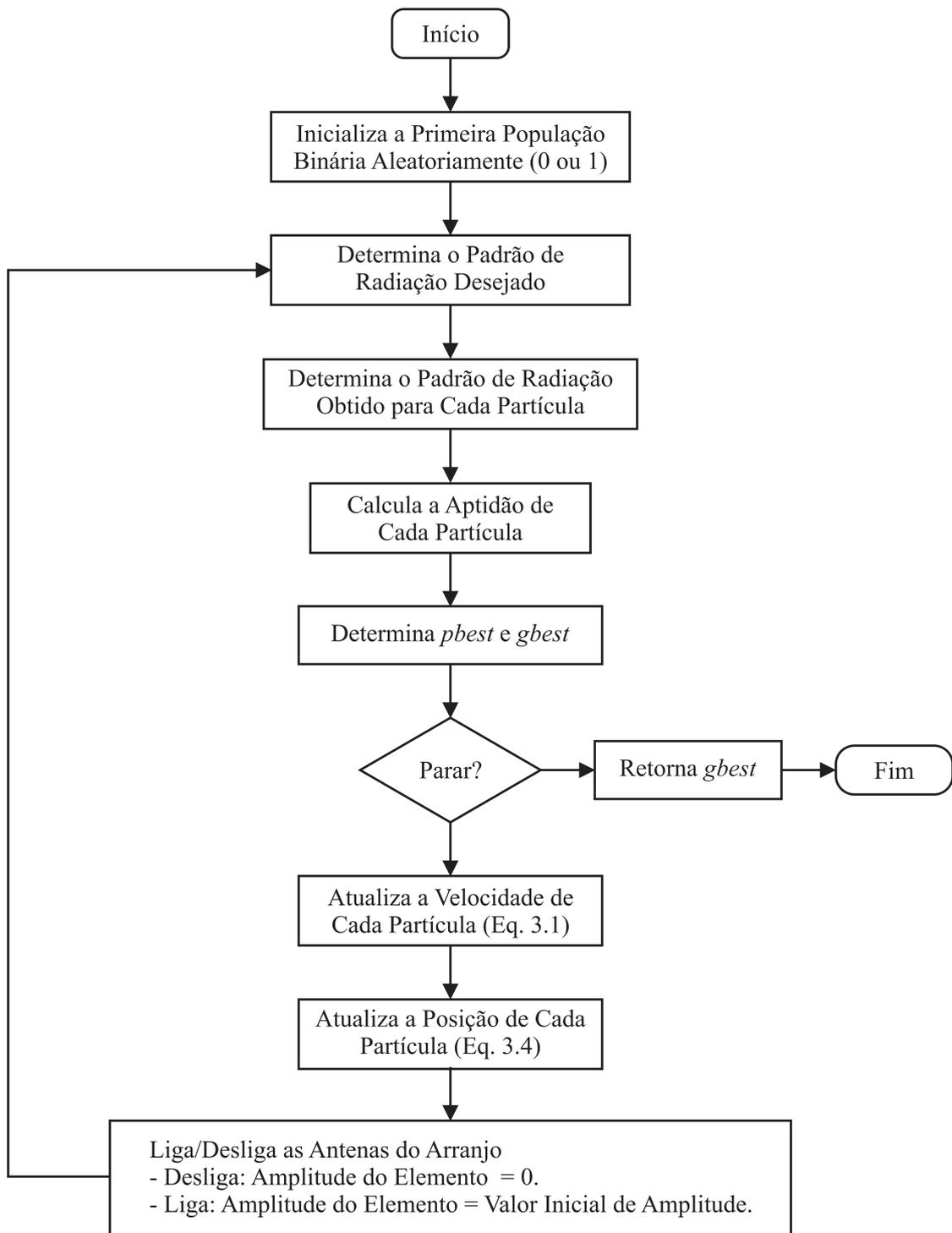


Figura 6.2 – Fluxograma representando o funcionamento do PSO-Binário.

Os parâmetros descritos acima são essenciais para o funcionamento adequado do PSO implementado, porém o principal parâmetro do PSO Binário, da mesma forma que no PSO Clássico, é a função aptidão, a qual avalia as possíveis soluções para o problema a ser resolvido. Para realizar a seleção de antenas, inicialmente foi definido o padrão de radiação desejado, e

através deste padrão foram selecionadas as antenas que deveriam ser ligadas ou desligadas para obter tal padrão. A função aptidão desenvolvida define o quão próximo do padrão desejado encontra-se cada partícula, esta função é dada por:

$$\text{Aptidão} = \text{máx}(|\text{erro}|^{-\delta}) \quad (6.3)$$

Onde  $\delta = 2$ , caso  $N > N_{\text{ligadas}}$ , ou  $\delta = 4$ , caso contrário.  $N_{\text{ligadas}}$  representa o número de antenas ligadas do arranjo e  $\text{erro}$  representa a diferença do padrão de radiação obtido pelo PSO implementado e o padrão de radiação desejado. Através da minimização do erro ocorre a maximização da função aptidão, como desejado. O valor de  $\delta$  foi definido através da avaliação da convergência do PSO.

A Figura 6.3 apresenta os diagramas de radiação desejados e obtidos através do PSO. A partir desta figura verifica-se que o PSO Binário alcançou o padrão de radiação desejado em todos os casos, realizando a seleção das antenas que devem estar ligadas ou desligadas, visando reduzir o número de elementos ligados. Porém, tais resultados apresentam uma limitação, pois como apenas trabalha-se com a seleção de antenas as correntes de excitação são mantidas constantes, impedindo que este parâmetro seja alterado. A alteração da corrente de excitação de cada elemento do arranjo em conjunto com a seleção de antenas, pode reduzir consideravelmente o número de antenas ligadas necessárias para obter um dado padrão de radiação. Por este motivo, é necessário considerar o problema combinacional da seleção de antenas e a otimização de parâmetros contínuos do arranjo, fato este que será tratado na próxima seção.

#### 6.4 PSO Híbrido

Através dos resultados obtidos verifica-se a eficiência do PSO na otimização de diversos parâmetros de um arranjo linear de antenas. Além disso, a partir do PSO foi realizado o apontamento do feixe principal e a seleção de antenas de um arranjo. O PSO mostrou-se eficiente na otimização de problemas com múltiplas variáveis. Tais variáveis apresentam-se no espaço de busca contínuo e discreto. Porém, através dos casos de otimização apresentados verifica-se que as versões descritas do PSO consideram apenas um tipo de codificação, não podendo através da mesma versão do PSO otimizar problemas com variáveis contínuas e discretas, simultaneamente. Para resolver este problema, foi proposta uma versão do PSO, a qual utiliza uma codificação híbrida das variáveis, ou seja, variáveis reais e binárias no mesmo problema de otimização.

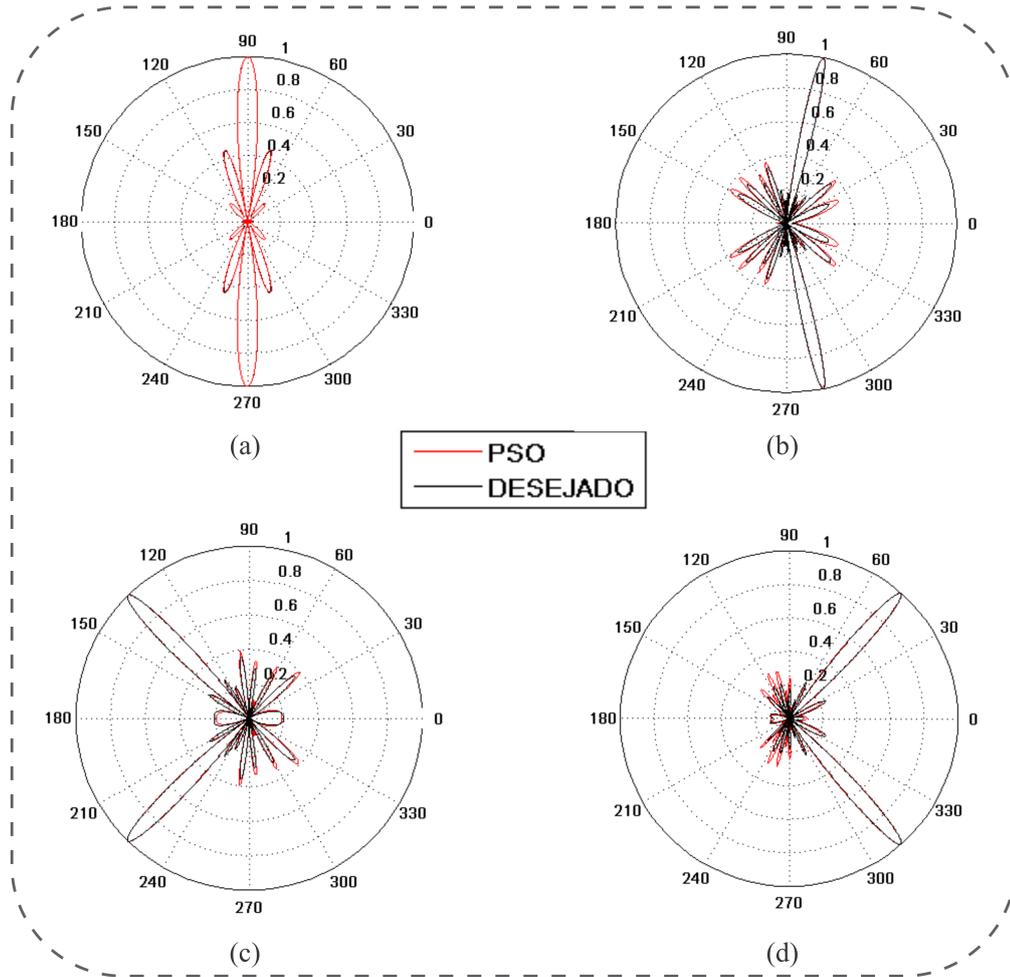


Figura 6.3 – Diagramas de Radiação Obtidos pelo PSO Binário, para cada diagrama obteve-se: (a)  $N = 10$ , com 1 Antena Desligada; (b)  $N = 10$ , com 2 Antenas Desligadas; (c)  $N = 10$ , com 2 Antenas Desligadas; (d)  $N = 10$ , com 2 Antenas Desligadas.

Esta versão do PSO foi implementada para realizar a seleção de antenas e alterar a alimentação do arranjo simultaneamente, visando obter o padrão de radiação desejado. Os casos de otimização apresentados neste trabalho consideram como variável de otimização a distância entre os elementos do arranjo, a qual só pode ser determinada antes do arranjo ser projetado. Após realizado o projeto de um arranjo de antenas, apenas a alimentação do arranjo pode ser alterada, modificando, assim, o padrão de radiação. Conseqüentemente, o PSO considera como variáveis a amplitude e o ângulo de excitação de fase dos elementos do arranjo e seleciona quais elementos devem estar ligados/desligados em cada momento. A amplitude e o ângulo de excitação de fase são variáveis contínuas, porém a seleção de antenas é tratada como um problema combinacional, pois pode-se imaginar que as antenas representam lâmpadas, as quais podem estar em dois estados, ligadas ou desligadas, ou seja, 0 ou 1. Representando, assim, um problema combinacional.

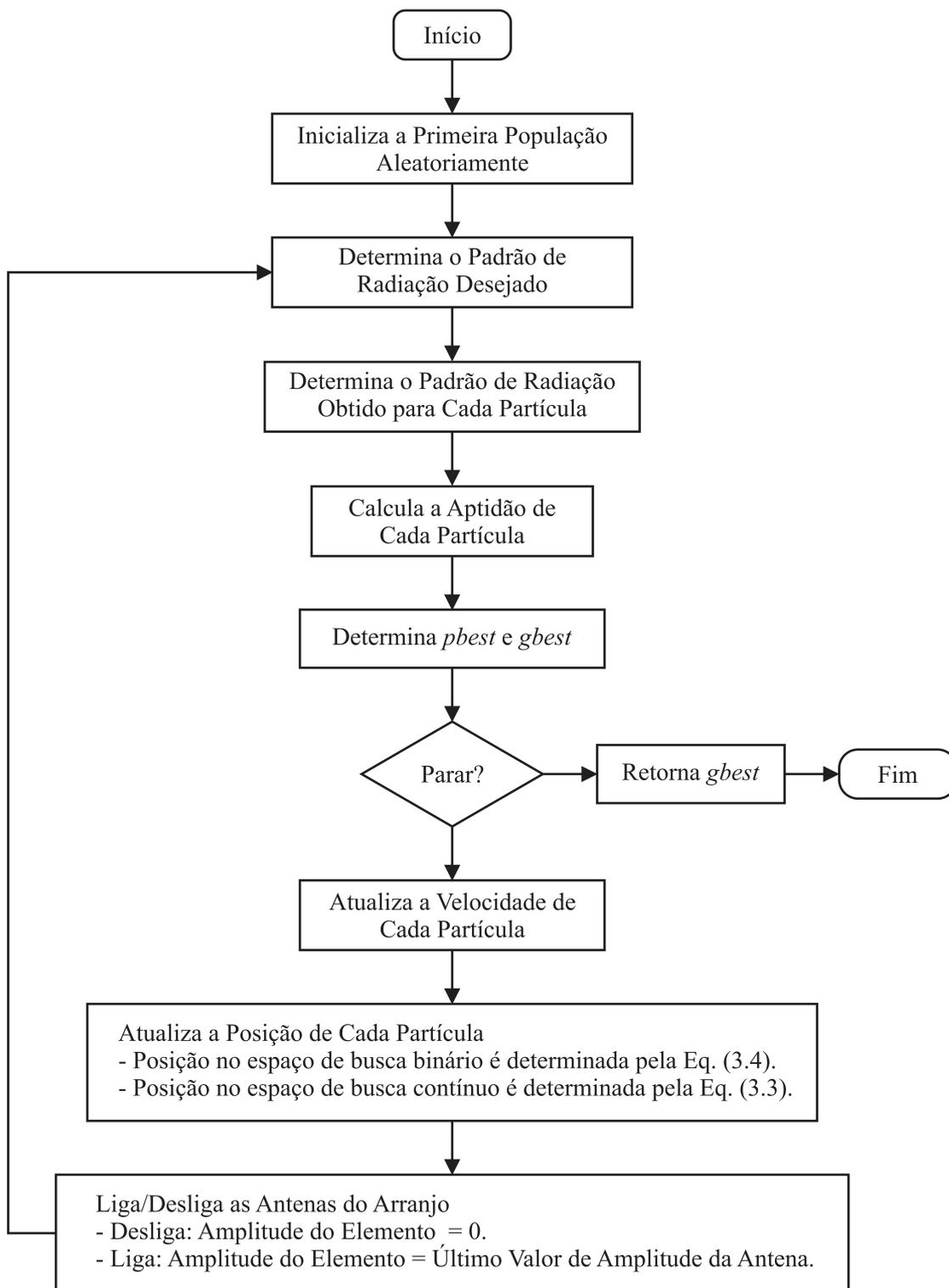


Figura 6.4 – Fluxograma representando o funcionamento do PSO-Híbrido.

Para realizar tal otimização foi necessário implementar esta nova versão do PSO, o qual apresenta o funcionamento descrito pelo fluxograma da Figura 6.5. O PSO inicialmente inicializa aleatoriamente a primeira população do enxame. A inicialização é feita observando o espaço de busca de cada variável. Neste processo de otimização considera-se como variáveis de otimização a amplitude de excitação, que varia no intervalo  $[0, 1]$  e o ângulo de excitação de cada elemento do arranjo, o qual varia no intervalo  $[0, \pi]$ . Para cada elemento do arranjo é determinado o seu estado, ligado ou desligado. Portanto, cada partícula do enxame é representada pela seguinte matriz:

$$P_i = \begin{bmatrix} A_1 & \beta & Estado_1 \\ A_2 & \beta & Estado_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ A_N & \beta & Estado_N \end{bmatrix}$$

Por meio da inicialização destas variáveis determina-se a primeira população do enxame. Após, é definido o padrão de radiação de cada partícula do enxame e o padrão de radiação desejado. Através destes parâmetros é realizado o cálculo da aptidão de cada partícula do arranjo. A função de aptidão desenvolvida para avaliar este caso de otimização é dada por:

$$\text{Aptidão} = \text{máx}(|\text{erro}|^{-2}) \quad (6.4)$$

Onde *erro* representa a diferença entre o campo obtido pela partícula e o desejado. A Figura 6.5 apresenta os diagramas de radiação desejados e obtidos através do PSO. Analisando esta figura verifica-se que a versão Híbrida do PSO, obteve o padrão de radiação desejado em todos os casos com um número consideravelmente baixo de elementos, mostrando a eficiência da técnica quando considera-se dois tipos de variáveis, contínuas e discretas. Além disso, esta versão do PSO apresenta tempo computacional baixo quando comparado aos Algoritmos Genéticos, sendo uma possível alternativa para substituição desta técnica na otimização de arranjos de antenas.

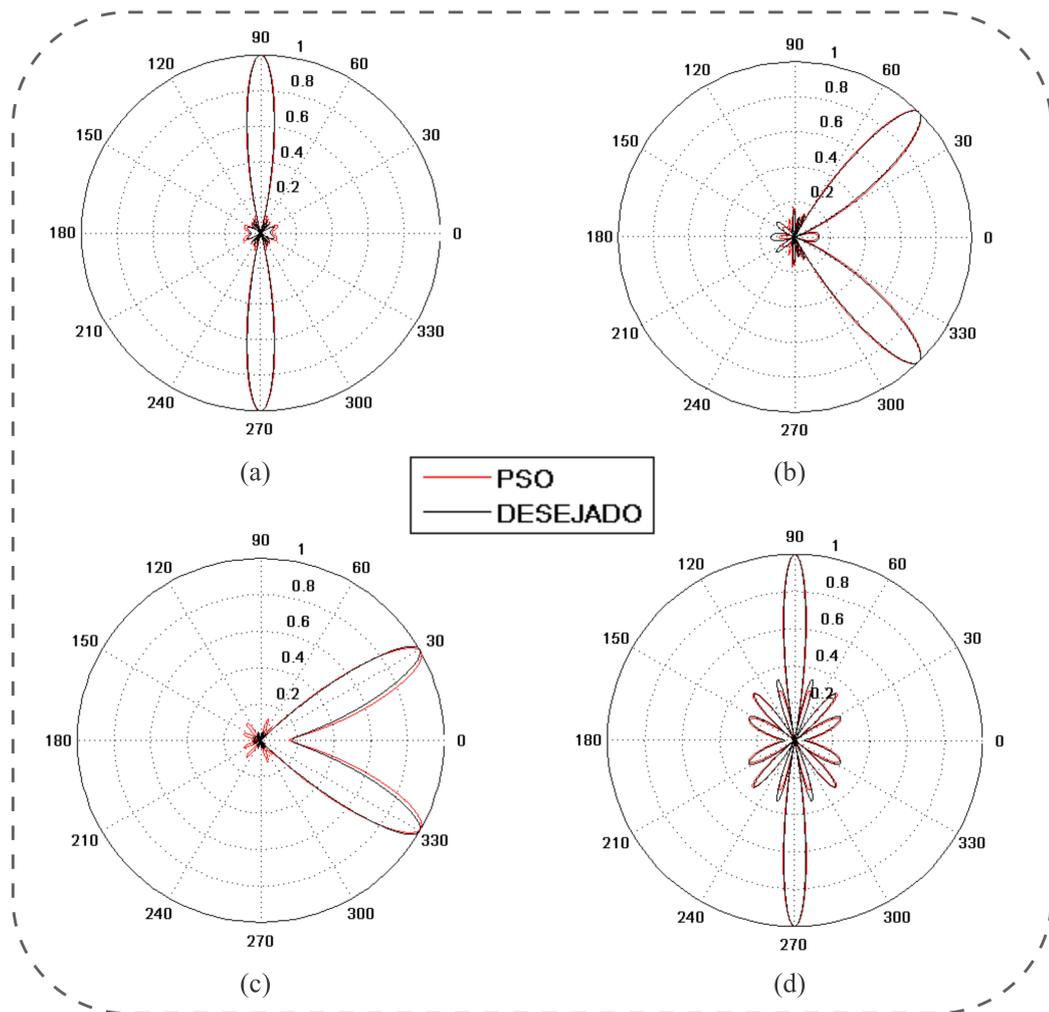


Figura 6.5 – Diagramas de Radiação Obtidos Através do PSO Híbrido, para cada caso obteve-se: (a)  $N = 10$ , com 5 Antenas Desligadas; (b)  $N = 10$ , com 3 Antenas Desligadas; (c)  $N = 16$ , com 9 Antenas Desligadas ; (d)  $N = 10$ , com 5 Antenas Desligadas

## 6.5 Conclusões

Neste capítulo foram apresentados os resultados obtidos para a seleção de antenas de um arranjo linear de antenas composto por fontes puntiformes. Através dos resultados apresentados observa-se a eficiência do PSO Binário, o qual obteve o padrão de radiação desejado em todos os casos analisados. Além disso, a versão proposta do PSO, que considera variáveis binárias e reais, simultaneamente, foi apresentada e validada através da seleção de antenas do arranjo e variação da corrente de alimentação de cada elemento do arranjo. Estas otimizações consideram arranjos de antenas projetados e em funcionamento, visando adaptar-se ao ambiente e conformar o seu padrão de radiação conforme desejado. Tal característica é extremamente importante em aplicações de radares, comunicações via satélite, sensoriamento remoto e equipamentos de

busca, as quais necessitam que o padrão de radiação do arranjo se adapte dinamicamente.

Além destas otimizações neste capítulo foram apresentados os resultados encontrados para uma síntese completa de um arranjo linear de antenas. Neste caso, foram obtidos os principais parâmetros de projeto de um arranjo de antenas, sendo eles: Número de elementos, correntes de excitação e ângulo de excitação de cada elemento do arranjo e a distância entre eles. Estes elementos são utilizados para variar o padrão de radiação de um arranjo, apenas estes parâmetros e a geometria do arranjo são utilizados para realizar tal variação (BALANIS, 1982). Os resultados apresentados neste capítulo mostram que o PSO obteve os valores de RSSL e HPBW desejados, além de realizar o apontamento do feixe principal. A flexibilidade do PSO, permite que através da variação da função aptidão seja possível otimizar inúmeros parâmetros de um arranjo.

---

---

# 7

---

## CONCLUSÃO

Inúmeros trabalhos foram desenvolvidos com o objetivo de realizar a otimização de arranjos lineares de antenas. Existem diversas técnicas que podem ser utilizadas para realizar tal otimização, dentre as mais populares, pode-se citar: Algoritmos Genéticos e Otimização por Enxame de Partículas (BERA et. al, 2016; GANGWAR et. al, 2015; NANDI e ROY, 2015; MAGALHÃES et. al, 2015). O método de Otimização por Enxames de Partículas foi desenvolvido com o objetivo de substituir os Algoritmos Genéticos, pois o mesmo apresenta uma simples implementação e baixo tempo computacional.

Assim sendo, este trabalho fez uso da técnica de Otimização por Enxame de Partículas para realizar a otimização de um arranjo linear de antenas composto por fontes puntiformes. Foi realizada a otimização do nível dos lóbulos secundários, ângulo de meia potência, ângulo de máxima radiação e número de elementos. Estes parâmetros foram otimizados de forma isolada e conjunta, visando avaliar a influência de cada parâmetro no processo de otimização.

Em todos os casos de otimização propostos a técnica utilizada alcançou seu objetivo, pois conseguiu-se alcançar o padrão de radiação desejado, com a redução do nível dos lóbulos secundários, aumento do ganho e diretividade do arranjo. Além disso, realizou-se o apontamento do feixe principal para as direções desejadas, reduzindo a transmissão e/ou recepção de sinais indesejados.

Além da otimização dos parâmetros apresentados, neste trabalho, realizou-se a implementação da versão binária do PSO. A partir da qual foi possível realizar a seleção de antenas em uma arranjo linear de antenas, visando conformar o padrão de radiação de um arranjo linear de antenas de maneira econômica, pois foi possível reduzir o consumo de energia do arranjo

com a redução do número de elementos que encontram-se ligados. Porém, neste caso, as correntes de excitação do arranjo foram mantidas constante, os elementos do arranjo eram apenas ligados ou desligados. Desta forma, os resultados obtidos mostram que, mantendo constante a corrente de excitação não é possível desligar muitos elementos sem que isto afete consideravelmente o padrão de radiação do arranjo. Para resolver este problema, foi proposta uma versão Híbrida do PSO, a qual teve como objetivo realizar a seleção de antenas e controlar a amplitude de excitação de cada elemento do arranjo. Através dos resultados apresentados foi possível validar esta versão do PSO, pois alcançou-se os objetivos de projeto em todos os casos analisados.

Para finalizar, foi desenvolvido um simulador que envolveu todos os casos de otimização tratados neste trabalho e a seleção de antenas, o qual é descrito no Anexo A. Como próximo trabalho, sugere-se implementar o Simulador proposto em uma nova linguagem de programação (C, Java, Python, entre outras). Além disso, em trabalhos futuros com o PSO, ou outro método de otimização, sugere-se que além do Nível dos Lóbulos Secundários, Ângulo de Meia Potência e Ângulo de Máxima Radiação, outros parâmetros sejam otimizados, tais como o acoplamento mútuo em arranjos de antenas.

---

## REFERÊNCIAS

- KENNEDY, J.; EBERHART, R. C. Particle Swarm Optimization. *Proc. IEEE Int’l Conf. on Neural Networks*, IV, pp. 1942-1948. Piscataway, NJ: IEEE Service Center, 1995.
- BRATTON, D; KENNEDY, J. Defining a standard for particule swarm optimization. *In IEEE Symposium on Swarm Intelligence, SIS’ 2007*, pp. 120–127, 2007.
- KENNEDY, J.; EBERHART, R. C. *Swarm Intelligence, Morgan Kaufmann Publishers*, ISBN: 1-55860-595-9, 2001.
- ROBINSON, J.; RAHMAT-SAMII, Y. *Particle Swarm Optimization in Electromagnetics. Fellow*, IEEE, 2004.
- JUN, X.; CHANG, H. The discrete binary version of the improved particle swarm optimization algorithm, *In: 2009 International Conference on Management and Service Science (MASS)*, pp. 6-, Sept. 2009.
- JIN, N.; RAHMAT-SAMII, Y. *User’s Manual of Ucla-PSO Algorithm*. Department of Electrical Engineering, University of California, Los Angeles.
- MENDES, R. *Population Topologies and Their Influence in Particle Swarm Performance*. Tese de Doutorado, Departamento de Informática - Escola de Engenharia – Universidade do Minho, 1994.
- EBERHART, R. C.; SHI, Y. Evolving artificial neural networks. *in Proc. Int. Conf. Neural Networks and Brain*, Beijing, P.R.C, 1998.

- EBERHART, R. C.; SHI, Y. Particle Swarm Optimization: Developments, Applications and Resources. *In Proc. 2001 Congr. Evolutionary Computation*, vol. 1.
- ESTEVEES, L. C. Antenas - Teoria Básica e Aplicações. 1a ed. McGraw-Hill, BR, 1980.
- KRAUS, J. D. Antennas. McGraw-Hill Book Company. 1983.
- BALANIS, C. A. Antenna Theory Analysis and Design. Arizona State University, 1982.
- VAN VLACK, L. H. Princípio de Ciência dos Materiais. Ed. Edgar Blucher, 1970.
- FUSCO, V. F. Teoria e Técnicas de Antenas: Princípio e Prática. Bookman, Porto Alegre, 2006.
- RUDGE, A. W.; MILNE K.; OLVER A. D.; KNIGHT P. The Handbook of Antenna Design. IET, 1983.
- GROSS, F. B. Smart Antennas for Wireless Communications With MATLAB, *Copyright*© 2005 by The McGraw-Hill Companies, Inc.
- STONE J.S. United States Patents No. 1,643,323 and No. 1,715,433.
- DOLPH C. L., A Current Distribution for Broadside Arrays Wich Optimizes the Relationship Between Beamwidth and Side-Lobe Level. *Proc. IRE and Waves and Electrons*, June 1946.
- RIBLET H. J. Discussion on A Current Distribution for Broadside Arrays Which Optimizes the Relationship Between Beamwidth and Side-Lobe Level. *Proc. IRE*, May 1947, pp. 489-492.
- AFSHINMANESH, F.; MARANDI, A.; RAHIMI-KIAN, A. A novel binary particle swarm optimization method using artificial immune system. *In Proc. EUROCON Int. Conf. Comput. as a Tool*, Nov. 22-24, 2005, vol. 1, pp. 217-220.
- JIN, N.; RAHMAT-SAMII, Y. Advances in Particle Swarm Optimization for Antenna Designs: Real-Number, Binary, Single-Objective and Multiobjective Implementations. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 55, no. 3, pp. 556-567, March 2007.
- WENG., W.; HO, W.; CHANG, M. Optimal design of a planar antenna using binary particle swarm optimization, *IEEE International Workshop on Electromagnetics (iWEM)*, 2014.

- KENNEDY, J.; EBERHART, R. Discrete binary version of the particle swarm algorithm. *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 5, pp. 4104-4108, 1997.
- KAN, Y.; HUANG, S.; HUNG, C.; HUANG, N. A binary PSO-miniaturized printed monopole antenna for WSN-enabled inertial sensor node. *19th International Conference on Microwaves Radar and Wireless Communications*, vol. 1, pp. 73-76, May, 2012.
- JIN, N; RAHMAT-SAMMI, Y. Particle Swarm Optimization for Antenna Designs in Engineering Electromagnetics. *Journal of Artificial Evolution and Applications*, Volume 2008, Article ID 728929, 10 pages.
- WANG, W.; FENG, Q. Synthesis of Thinned Linear and Planar Antenna Arrays Using Binary PSO Algorithm. *Progress In Electromagnetics Research*, Vol. 127, 371–387, 2012.
- FU, Y. et al. Optimization of planar thinned antenna array based on genetic and convex hybrid algorithm, Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS), 2016.
- MAINKAR, P. M., MULAY, G. N. Recursive least mean square algorithm for linear antenna array optimization for beamforming using genetic algorithm, Internet of Things and Applications (IOTA), International Conference on, 2016.
- NUTTALL, A. H. Some Windows with Very Good Sidelobe Behavior, IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Vol. ASSP-29, NO. 1, 1981.
- C. L. Dolph, "A Current Distribution for Broadside Arrays Which Optimizes the Relationship Between Beamwidth and Side-Lobe Level," Proc. IRE and Waves and Electrons, June 1946.
- Barton, P. Digital Beamforming for Radar. IEEE Proceedings Communications, Radar and Signal Processing, v. 127, n. 4, pp. 266-277, Agosto 1980.
- Rayleigh, G. G., Cioffi, J. M. Spatial-Temporal Coding of Wireless Communications. IEEE Trans. on Communications, v. 46, pp. 357-366, Março 1998.
- PRATAP, R. Getting Started with MATLAB. Oxford University Press, 2002.
- J. Li, Q. Chen, K. Sawaya, Q. Yuan, "Amplitude controlled reflectarray using non-uniform FSS reflection plane", Proc. IEEE AP-S/URSI, pp. 2180-2183, 2011.

A. Falahati, M. NaghshvarianJahromi, R.M. Edwards, "Wideband Fan-Beam Low-Sidelobe Array Antenna Using Grounded Reflector for DECT, 3G, and Ultra-Wideband Wireless Applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 61, no. 2, pp. 700-706, 2013

W. J. L. Queiroz, M. S. Alencar, "Project of antenna arrays with random parameters", *Proc. Brazilian Microwave and Optoelectronics Society/Microwave Theory and Techniques Society Int. Microwave and Optoelectronics Conf.*, pp. 33-38, Sep. 2003.

Kim J., Han, J., Park J., "Design of phased array antenna for 5G mm-wave beamforming system", *Antennas and Propagation (APCAP), 2016 IEEE 5th Asia-Pacific Conference on*, July 2016.

Xu, H., Lei Leia, "A MAC protocol based on busy tone for ad-hoc networks with beamforming antennas", *Systems and Informatics (ICSAI), 2016 3rd International Conference on*, Nov. 2016.

SHARMA, J., SINGHAL, R. S., "Comparative research on genetic algorithm, particle swarm optimization and hybrid GA-PSO", *Computing for Sustainable Global Development (INDIACom), 2015 2nd International Conference on*, March, 2015.

Bera, R., Mandal, D., Ghoshal, S. P., Kar, R., "Optimal design of concentric elliptical array antenna for maximum side-lobe level reduction using particle swarm optimization with aging leader and challengers", *Communication and Signal Processing (ICCSP), 2016 International Conference on*, April 2016.

V.S. Gangwar, A. K. Singh, Elvy Thomas, S. P. Singh, "Side lobe level suppression in a thinned linear antenna array using particle swarm optimization", *IEEE International Conference on Applied and Theoretical Computing and Communication Technology*, 2015.

Nandi, P., Roy, J. S., "Optimization of sidelobe level of thinned phased array antenna using genetic algorithm and particle swarm optimization", *Electrical and Computer Engineering (WIECON-ECE), 2015 IEEE International WIE Conference on*, Dec. 2015.

Magalhães, M. P., Engroff, A. M., Pereira, L. S., Heckler, M. V. T., Girardi, A. G., "Synthesis of the radiation pattern of retrodirective antenna arrays using the Particle Swarm Optimization

algorithm", Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), 2015 SBMO/IEEE MTT-S International, Nov. 2015.

# **ANEXOS**

---

# ANEXO A

## SIMULADOR PSO

A partir dos casos de otimização apresentados no decorrer deste trabalho, foi realizada a implementação de um simulador, com o auxílio do Software *Matlab*<sup>®</sup> (PRATAP, 2002). O simulador implementado tem como objetivo realizar a otimização de diversos parâmetros de um arranjo linear de antenas via PSO. As versões do PSO apresentadas no decorrer deste trabalho podem ser utilizadas através deste simulador. A Figura A.1 apresenta a interface do simulador desenvolvido.

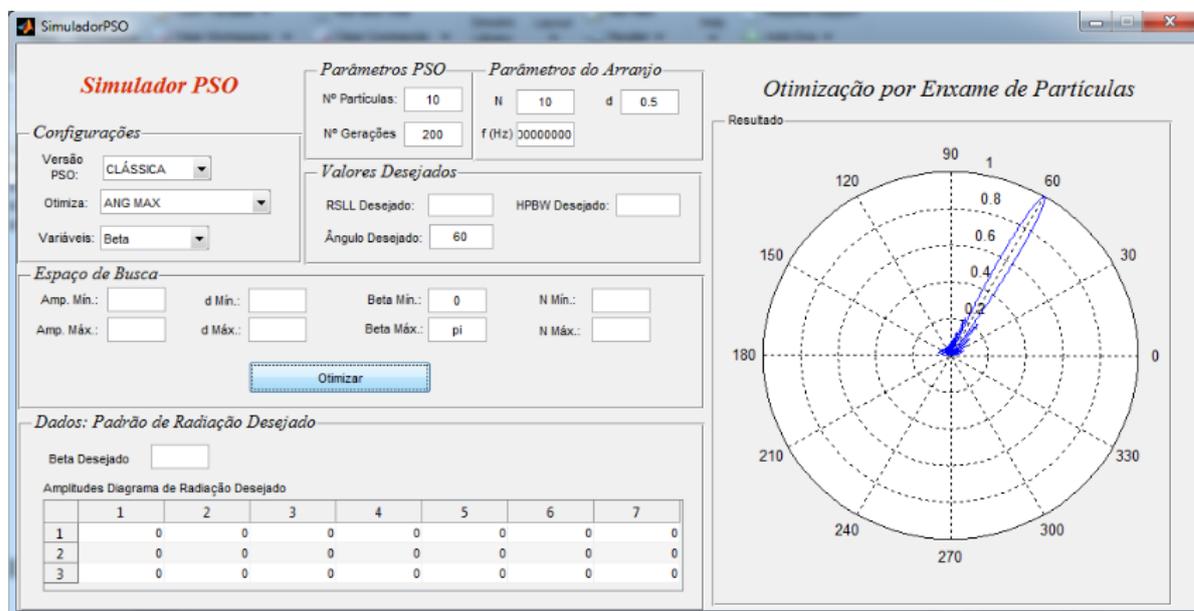


Figura A.1 – Interface Simulador PSO.

A Tabela A.1 apresenta as otimizações que podem ser realizadas pelo simulador desenvolvido, a versão do PSO utilizada e as combinações de variáveis que podem ser utilizadas. O

espaço de busca do PSO, o número de partículas e de iterações é definido pelo usuário, permitindo ao usuário visualizar a influência de cada parâmetro na sua otimização. Além disso, quando deseja-se realizar a seleção de antenas visando obter um dado padrão de radiação, o mesmo pode ser definido pelo usuário, através dos valores de amplitude, distância e ângulo de excitação de fase. Tais valores podem ser obtidos através de diversas técnicas ou de forma aleatória, conforme o desejado pelo usuário. Todos os casos de otimização apresentados na Tabela A.1 foram descritos no decorrer deste trabalho e os resultados obtidos foram apresentados, validando assim a técnica utilizada.

Tabela A.1 – Opções de Otimização Apresentadas no Simulador.

Versão do PSO	Parâmetros de Otimização	Variáveis
PSO Clássico	RSSL	$A_{mp}$ $d$ $A_{mp}$ e $d$
	HPBW	$A_{mp}$ $d$ $A_{mp}$ e $d$
	RSSL e HPBW	$A_{mp}$ $d$ $A_{mp}$ e $d$
	$(\theta_0)$	$(\beta)$
	$\theta_0$ e RSSL	$\beta$ e $A_{mp}$ $\beta$ e $d$ $\beta, A_{mp}$ e $d$
	$\theta_0$ e HPBW	$\beta$ e $A_{mp}$ $\beta$ e $d$ $\beta, A_{mp}$ e $d$
	$\theta_0$ , RSSL e HPBW	$\beta$ e $A_{mp}$ $\beta$ e $d$ $\beta, A_{mp}$ e $d$
	$\theta_0$ , RSSL, HPBW e N	$\beta, N, A_{mp}$ e $d$
PSO BINÁRIO	Seleção de Antenas	-
PSO HÍBRIDO	Seleção de Antenas	$A_{mp}$ e $\beta$
$A_{mp}$ : Amplitude de Excitação. $\beta$ : Ângulo de Excitação de Fase. $d$ : Distância entre os elementos do arranjo. $\theta_0$ : Ângulo de Máxima Radiação.		