



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO-UFERSA
CAMPUS CARAÚBAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS, TECNOLÓGICAS E
HUMANAS
CURSO DE BACHARELADO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

DAVID LUIZ MOURA DE LIMA

**OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS DE ANTENAS DE MICROFITA
UTILIZANDO ALGORITMOS GENÉTICOS**

CARAÚBAS-RN
2015

DAVID LUIZ MOURA DE LIMA

**OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS DE ANTENAS DE MICROFITA
UTILIZANDO ALGORITMOS GENÉTICOS**

Monografia apresentada a
Universidade Federal Rural do Semi-
Árido – UFRSA - Campus Caruabas,
para a obtenção do Título de Bacharel
em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Profº Dr. Hugo Michel
Câmara de Azevedo Maia – UFRSA
Campus Caruabas

CARAUABAS-RN
2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Campus Angicos (BCA)
Setor de Informação e Referência

L732o Lima, David Luiz Moura de.

Otimização de parâmetros de antenas de microfita
utilizado algoritmos genéticos. / David Luiz Moura de
Lima. – Angicos,
2015.
49f.:il.

Orientador: Prof. Dr. Hugo Michel Câmara Azevedo
Maia..

Monografia (Bacharel em Ciência e Tecnologia) –
Universidade Federal Rural do Semi-Árido. Pró - Reitoria de
Graduação.

1. Algoritmo Genético. 2. Antena de Microfita.
3. Otimização. I. Título.

RN/UFERSA/B CA/ 86-15

CDD 006.31

DAVID LUIZ MOURA DE LIMA

**OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS DE ANTENAS DE MICROFITA
UTILIZANDO ALGORITMOS GENÉTICOS**

Monografia apresentada no Campus Caraúbas para a obtenção
do título de Bacharel em Ciências e Tecnologia.

APROVADO EM: 04 / 12 / 2015

BANCA EXAMINADORA

[Redacted Signature]

Prof. Dr. Hugo Michel de Azevedo Maia – UFERSA

Presidente

[Redacted Signature]

Prof. Dr. Max Chianca Pimentel Filho – UFERSA

Primeiro Membro

[Redacted Signature]

Prof. Dr. Dorgival Albertino da Silva Junior – UFERSA

Segundo Membro

A minha mãe, **Rachel Moura de Lima**, que sempre esteve ao meu lado durante minha jornada, e sempre me deu apoio. Sem minha mãe eu não estaria aqui.

AGRADECIMENTOS

Gostaria primeiramente de agradecer a minha mãe e minha avó, que me ajudaram muito desde o início da graduação.

Ao professor Hugo Maia, que me acolheu em um momento muito difícil, e me guiou para o fim desse primeiro, mas grande passo.

Aos grandes professores Matheus da Silva Menezes e Ivan Mezzomo, que me deram inspiração nas áreas da matemática e computação, também aos demais professores da UFRSA - Angicos, por terem me proporcionado uma ótima experiência que é a graduação.

Aos meus amigos da UFRSA - Angicos, que me deram inspiração para concluir esse curso.

À toda “galera do buzinho”, por todas as viagens Alto/Angicos.

À meus novos amigos do Campus Caraúbas, por me darem força e me ajudarem na minha adaptação em uma nova cidade.

Aos colegas que fazem parte do grupo de pesquisa: José Jefferson Azevedo Lima e Adilino Sena Maia.

Ao Google, por ter mostrado o caminho para responder minhas perguntas.

RESUMO

O presente trabalho é referente a otimização dos parâmetros de uma antena de microfita de patch retangular, sendo objetivada a busca por dimensões da antena que mais se aproximem dos parâmetros desejados por um projeto, para isso utilizaremos algoritmos genéticos, que é uma técnica de busca global. Esse tipo de algoritmo é muito utilizado para encontrar soluções aproximadas em problemas de otimização ou busca. Esta pesquisa será realizada considerando o comprimento e a largura de uma antena de microfita de patch retangular, esses dados serão usados como genes no nosso algoritmo. O algoritmo genético utilizará como método de seleção o Rank de Wetzel, para proporcionar uma maior pluralidade na nossa busca. Ao fim do trabalho, os resultados obtidos pelo nosso algoritmo genético serão simulados no Matlab.

Palavras-chave: Algoritmo genético. Antena de Microfita. Otimização.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Antena de microfita retangular padrão com plano de terra, altura g , comprimento l e largura w	17
Figura 2.2 - Possíveis formatos para uma antena de microfita.....	17
Figura 2.3 - Tipos de alimentação de antenas de microfita.....	18
Figura 2.4 - (a)Linha de Microfita, (b)Linhas de Campo Elétrico, (c)Constante Dielétrica Efetiva.....	21
Figura 2.5 - Acréscimo no tamanho da antena do ponto de vista elétrico.....	22
Figura 3.1 - Representação Genérica de um Algoritmo Genético.....	25
Figura 3.2 - Representação de um cromossomo binário.....	26
Figura 3.3 - Representação de um Cromossomo com números Reais.....	26
Figura 3.4 - Estratégia da roleta para a seleção de indivíduos.....	28
Figura 3.5 - Seleção por torneio utilizando $N=4$	29
Figura 3.6 - Crossover de um ponto.....	29
Figura 3.7 - Mutação Pontual.....	30
Figura 4.1 - Representação Fenótipo Genótipo de um indivíduo.....	31
Figura 5.1 - Resultado obtido no Matlab para o plano E, de antena de microfita retangular com elementos distribuídos 2×2 com dados de entrada mencionados acima.....	34
Figura 5.2 - Resultado para o plano H de antena de microfita retangular com elementos distribuídos 2×2 , com dados de entrada mencionados acima.	34

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 5.1 – Gráfico da Frequência em função do comprimento L.....33

Gráfico 5.2 – Gráfico $\text{dB}(S(1,1))$, usado para determinar a largura de banda da nossa antena.33

LISTA DE SÍMBOLOS

ϕ	Ângulo de azimute
θ	Ângulo de elevação
h	Altura do Substrato
f_r	Frequência de ressonância
L	Comprimento da fita
λ	Comprimento de onda, $\lambda=c/f$
W	Largura da fita
ϵ_0	Permissividade no espaço livre
ϵ_r	Permissividade relativa
ϵ_{ref}	Constante dielétrica eficaz

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Representação da Variação do intervalo.....	31
Tabela 5.1 - Resultados obtidos pelo Algoritmo Genético apresentado no trabalho.....	32

SUMÁRIO

1 – INTODUÇÃO.....	13
1.1 – OBJETIVOS.....	14
1.1.1 - Objetivo Geral.....	14
1.1.2 – Objetivos Específicos.....	14
1.2 – METODOLOGIA E FERRAMENTAS.....	15
2 – ANTENAS DE MICROFITA.....	16
2.1 - ANTENAS DE MICROFITA.....	16
2.2 - MÉTODOS DE ALIMENTAÇÃO.....	18
2.3 - METODOS DE ANÁLISE.....	19
2.4 - ANTENAS DE MICROFITA COM PATCH RETANGULAR.....	20
2.4.1 - Método da linha de transmissão.....	20
3 – ALGORITMOS GENÉTICOS.....	23
3.1 – CODIFICAÇÃO DE INDIVÍDUOS.....	25
3.2 – POPULAÇÃO INICIAL.....	26
3.3 – AVALIAÇÃO.....	27
3.4 – SELEÇÃO.....	27
3.4.1 – Rank.....	27
3.4.2 – Roleta.....	28
3.4.3 – Torneio.....	28
3.4.4 - Rank de Wetzel.....	29
3.5 – CRUZAMENTO.....	29
3.6 – MUTAÇÃO.....	30
4 – METODOLOGIA.....	31
4.1 – MODELANDO O PROBLEMA.....	31
4.2 – CRIANDO O ALGORITMO.....	31
5 – RESULTADOS.....	32
5.1 – LARGURA DE BANDA.....	33
5.2 – ARRANJOS DE ANTENAS DE MICROFITA.....	35
6 – CONCLUSÕES.....	35
REFERÊNCIAS.....	36
APÊNDICE A.....	39

1 - INTRODUÇÃO

Antenas são dispositivos capazes de transformar ondas guiadas em ondas radiadas e vice-versa, são usadas para maximizar o sinal em algumas direções e minimizá-lo em outras.

O avanço dos sistemas de comunicação sem fio (wireless) e o crescimento de suas aplicações nos últimos anos, tornaram o uso de antenas compactas multibanda/banda larga um grande atrativo e de suma importância em aplicações comerciais e bélicas. Podemos encontrar grandes exemplos de aparelhos que utilizamos no nosso cotidiano, como: celulares, GPS (Global Positioning System), computadores portáteis entre outros. No futuro, sistemas de comunicação sem-fio proverão diversos serviços banda larga. Assim, é de interesse criar antenas com características banda larga para aceso instantâneo na faixa de espectro de interesse.

O surgimento de várias tecnologias sem fio tem impulsionado a busca por dispositivos leves, compactos e com custo reduzido, como é o caso das antenas planares em microfita.

A modelagem utilizando algoritmos de otimização é essencial pois viabiliza a construção da mesma, encontrando parâmetros e dimensões da antena que visem adequá-la frequências exigidas em cada aplicação.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Estudar e otimizar as antenas de microfita, de tal forma, a compreender suas características e propriedades. Analisar a viabilidade do uso de Algoritmos Genéticos na otimização do dimensionamento de antenas de microfita.

1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Obter gráficos e curvas de diagrama de radiação, frequência de ressonância, obtidas durante o período do TCC.
- b) Elaborar uma antena de forma simulada analítica/numericamente utilizando o método de análise por linha de transmissão.
- c) Implementar um algoritmo genético baseado no método de análise pela linha de transmissão a fim de otimizar as dimensões de uma antena.
- d) Analisar se existe uma boa eficiência na aplicação de Algoritmos Genéticos na otimização de antenas de microfita.
- e) Analisar o comportamento da antena encontrada pelo algoritmo genético em um arranjo 2x2 de antenas retangulares.

1.2 METODOLOGIA E FERRAMENTAS

A metodologia desse trabalho se dará da seguinte maneira:

- 1) Utilizaremos algoritmos genéticos para determinar a dimensão de antenas de patch retangular.
- 2) Para o problema tentaremos como objetivo dimensionar uma antena com frequência de ressonância de 10Ghz.
- 3) O substrato da antena apresentará $h = 0,1588$ cm e $\epsilon_r = 2,2$.
- 4) No nosso algoritmo genético será utilizado o método de seleção do Rank de Wetzel e o elitismo será de um indivíduo.
- 5) O modelo de análise é o modelo da linha de transmissão.
- 6) Após o resultado obtido através do algoritmo escrito em linguagem C, consideraremos o resultado que mais se aproxime da frequência desejada e simularemos no software Matlab.
- 7) Os resultados serão apresentados no final.

A máquina utilizada nos testes terá processador Intel core i7 4510U, 2.0Ghz, com 2 núcleos, cache L1 de 128KB, cache L2 de 512KB, cache L3 de 4.0MB, memória DDR3 de 16GBytes, disco de 1T, operando em um sistema Windows 8.1

2 - ANTENAS DE MICROFITA

2.1 ANTENAS DE MICROFITA

As antenas de microfita foram propostas e idealizadas inicialmente por Deschamps em 1953, porém recebeu destaque nos anos 70, esses tipos de antenas são de certo modo antenas discretas, moldáveis a superfícies planas e não planas, de baixo custo, podem ser construídas facilmente utilizando a tecnologia de circuitos impressos, quando montadas em superfícies rígidas se tornam mecanicamente robustas. Apresentam muita versatilidade, pois diversos parâmetros podem ser ajustados de acordo com o projeto como: frequência de ressonância, polarização, diagrama de irradiação, largura de banda, ganho e casamento de impedância (BALANIS, 1997).

Suas aplicações estão inseridas na área de pesquisa acadêmica, projetos de antenas para dispositivos móveis, nas áreas aeroespacial, aeronáutica, de satélite e mísseis, pois nessas áreas, tamanho, peso, custo, desempenho, perfil aerodinâmico e instalação são fatores limitantes (BALANIS, 1997), a versatilidade desse tipo de antena é tanta que elas podem ser utilizadas no campo aeroespacial como antenas para navegação de aeronaves, também podemos encontrar esse tipo de antena em aplicações biomédicas. Outros fatores que garantem um amplo uso das antenas de microfita, são sua adaptação a superfícies e sua compatibilidade com circuitos integrados em micro-ondas. (GARG et al., 2001).

A estrutura básica de uma antena de microfita na figura 2.1. Elas consistem em um patch metálico com espessura $t \ll \lambda_0$ (onde λ_0 é o comprimento de onda no espaço livre) acima de um plano de terra com uma distância h (onde $h \ll \lambda_0$, usualmente $0,003 \lambda_0 \leq h \leq 0,05 \lambda_0$), O patch é projetado para que se obtenha uma irradiação máxima normal a ele, pode-se alcançar isso escolhendo um tipo de excitação que mais se adeque ao patch. No caso de patch retangular temos um comprimento L tal que $\lambda_0/3 < L < \lambda_0/2$. O patch e o plano de terra são separados por uma camada de material dielétrico que chamamos de substrato (BALANIS, 1997).

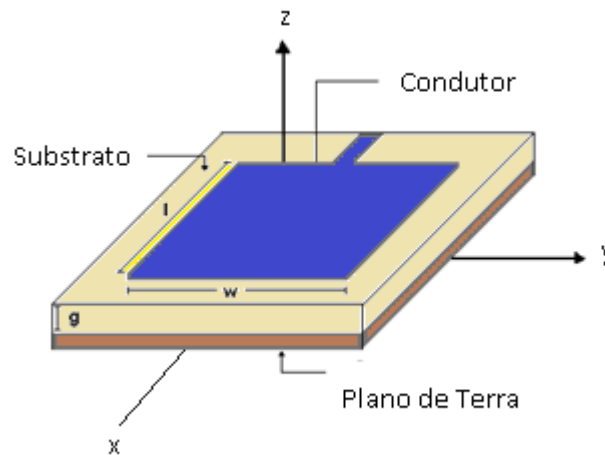


Figura 2.1 - Antena de microfita retangular padrão com plano de terra, altura g , comprimento l e largura w .

No projeto de antenas de microfita podem ser utilizados diferentes materiais como substrato, geralmente utilizando materiais com constante dielétrica ϵ_r com valores na faixa de $2,2 \leq \epsilon_r \leq 12$. Para um bom desempenho das antenas utilizasse substratos espessos e com constante dielétrica de valor baixo, isso permite maior eficiência e largura de banda de modo que facilita a radiação no espaço. Geralmente os elementos irradiantes e de alimentação são fotogravados na placa metálica, que fica sobre o substrato dielétrico. Podemos atribuir vários formatos ao patch irradiante, formas geométricas básicas são as mais usuais (retangular, quadrado, circular, elíptico) como mostra a Figura 2.2(BALANIS, 1997).

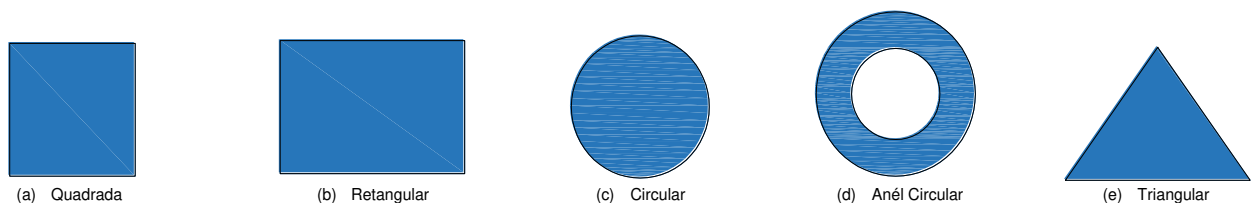


Figura 2.2 - Possíveis formatos para uma antena de microfita.

Algumas das principais vantagens das antenas de microfita são citadas por (GARG *et al.*, 2001; BAHL & BHARTIA, 2001;). São essas:

- Peso leve, baixo volume e conformidade a vários tipos de estruturas;
- Baixo custo de fabricação;
- Suporta tanto, linear, bem como a polarização circular.
- Prontamente passíveis de produção em massa;

- Antenas em microfita podem se ajustar a superfícies onduladas, o que torna possível aplicação em fuselagens de aviões e mísseis;
- Compatível com circuitos integrados;
- Antenas de duplas ou triplas frequências;

Mesmo com todas essas vantagens, as antenas de microfita ainda apresentam alguns parâmetros muito limitados se comparados a antenas normais (GARG *et al.*, 2001; BAHL & BHARTIA, 2001), são esses:

- Baixa eficiência e ganho;
- Excitação de ondas de superfície;
- Irradiação externa nas linhas e junções.
- A capacidade de processamento de potência é baixa;
- Largura de banda estreita;

2.2 MÉTODOS DE ALIMENTAÇÃO

Existem diversas maneiras de alimentar antenas de microfita, onde podemos listar as quatro mais usadas: Linha de microfita, cabo coaxial e acoplamento por abertura ou proximidade, os layouts desses métodos podem ser vistos na Figura 2.3(b). (BALANIS, 1997).

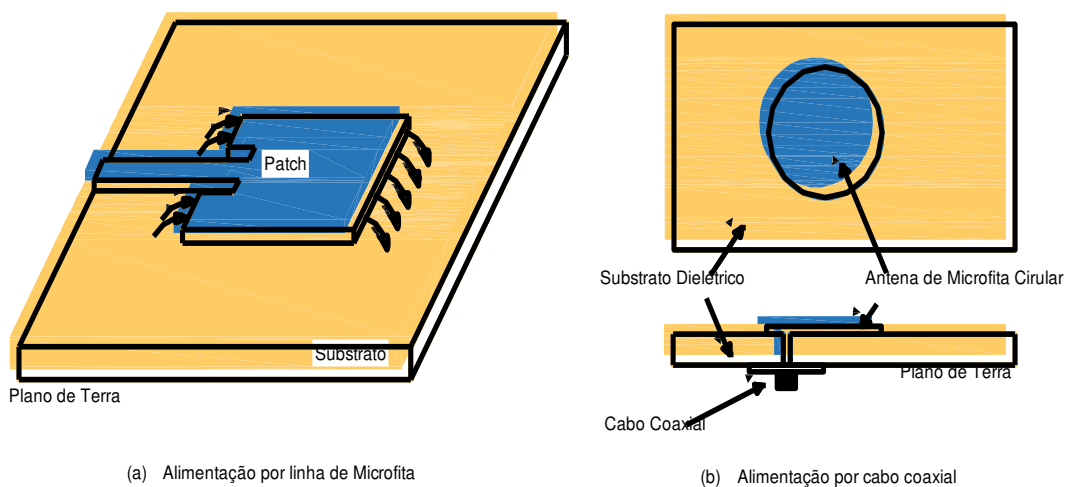


Figura 2.2 - Tipos de alimentação de antenas de microfita.

O método de mais fácil fabricação é o da linha de microfita, consiste em uma fita condutora onde teremos um fácil casamento de impedância e uma fácil modelagem, um de seus problemas ocorrem quanto mais aumentarmos a espessura do substrato maior será a limitação da largura de banda. (BALANIS, 1997). Sendo um dos métodos mais simples para alimentar uma antena de microfita, esse método consiste em, num mesmo substrato nós conectarmos uma linha de microfita ao patch irradiador conforme podemos ver na Figura 2.3(a). A alimentação por linha de microfita foi a primeira utilizada na prática. (MUNSON, 1974).

A alimentação por cabo coaxial se dá através da conexão interna entre o patch irradiante com o plano de terra, é de fácil construção, mas é difícil de se modelar e tem uma baixa largura de banda. (BALANIS, 1997). A alimentação por cabo coaxial é um método muito popular, para um melhor casamento da impedância devemos determinar bem a posição do ponto de alimentação do cabo (BARRA, 2007).

A alimentação sem contato (acoplamento por abertura) tem uma fabricação muito difícil dentre os quatro tipos e apresentam menores larguras de banda para os mesmos parâmetros de uma antena, a configuração dessa forma de acoplamento consiste em uma linha de microfita que fica entre dois substratos que acopla a energia através de um plano de terra, geralmente substrato superior tem constante dielétrica menor que o inferior. (BALANIS, 1997).

No acoplamento por proximidade temos dois substratos onde o plano de terra fica abaixo dos dois e o patch acima dos dois, passando pelo meio desses dois substratos uma linha de microfita. (BALANIS, 1997).

2.3 MÉTODOS DE ANÁLISE

Dentre vários tipos de análises de antenas de microfita os mais populares são, o método da linha de transmissão, o método da cavidade ressonante e método de análise de onda completa, onde o método da linha de transmissão é o mais simples de todos mas é o menos preciso e mais difícil na hora de modelar um acoplamento. O método da cavidade ressonante é mais preciso e mais complexo de se analisar, a modelagem de seu acoplamento também é difícil. No método de onda completa teremos uma maior precisão se comparado aos outros dois métodos citados além de uma versatilidade e podem analisar elementos isolados se aplicado de maneira apropriada. (BALANIS,

1997). Considerando os parâmetros físicos de uma antena de microfita, deve-se utilizar do método que retorne resultados numéricos para os critérios de desempenho, como a largura de banda, diretividade, ganho e eficiência, padrão de irradiação, impedância de entrada, eficiência e ganho. (GARG et al., 2001).

2.3 ANTENAS DE MICROFITA COM PATCH RETANGULAR

O patch retangular é muito utilizado pois é fácil de analisar usando o método da linha de transmissão (BALANIS, 1997).

2.3.1 Método da Linha de Transmissão

O método da linha de transmissão é uma maneira fácil de analisar uma antena, mas os resultados obtidos utilizando esse método não são muito precisos. Nesse método a antena de microfita é representada por duas aberturas estreitas radiantes, onde cada uma tem largura W e altura h , com uma distância L que as separa, ou basicamente, a antena pode ser representada pelas duas pequenas aberturas separadas por uma linha de transmissão de baixa impedância Z_c e comprimento L (BALANIS, 1997). Esse método é adequado para a análise de antenas de microfita com formato retangular ou quadrado (NETO, 2014).

Considere a antena mostrada na Figura 2.4(a), podemos observar que a linha de microfita fica em meio a dois dielétrico, o substrato e o ar, onde as linhas de campo elétrico ficam associadas a essa linha de microfita, conforme podemos ver na Figura 2.4(b). Podemos observar ainda na Figura 2.4(b), que a maior parte das linhas de campo elétrico ficam confinada no substrato e o restante fica no ar (BALANIS, 1997).

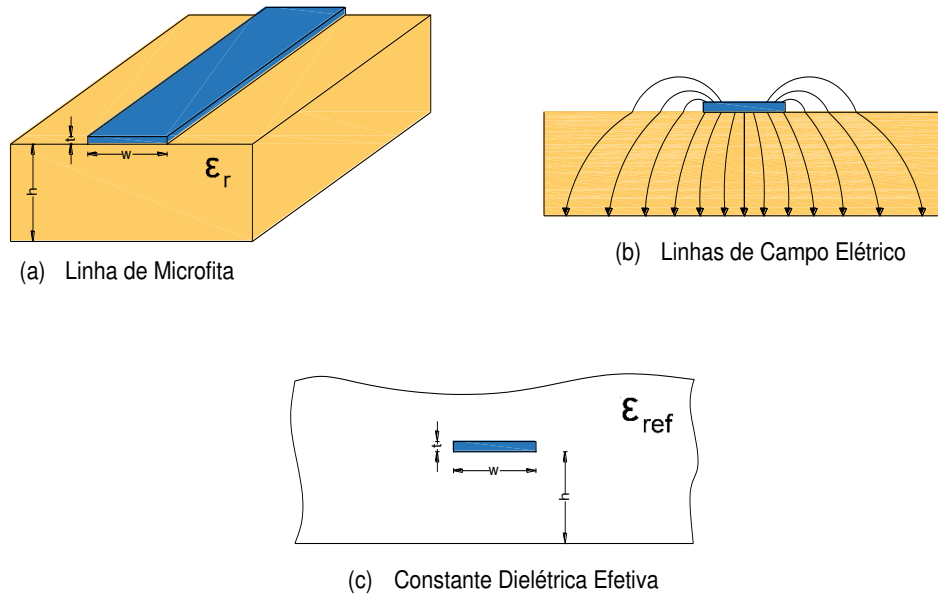


Figura 2.4 - (a)Linha de Microfita, (b)Linhas de Campo Elétrico, (c)Constante Dielétrica Efetiva.

Consideramos que a linha de alimentação esteja a uma distância h do plano de terra, imersa em um único dielétrico Figura 2.4(c), e que suas dimensões sejam as dimensões definidas na Figura 2.4(c). A constante dielétrica efetiva é definida como a constante dielétrica de um material uniforme de modo que a linha de transmissão mostrada na Figura 2.4(c) tem características elétricas idênticas as da linha mostrada na Figura 2.4(a). Os valores da constante dielétrica efetiva de uma linha de microfita com ar acima de seu substrato encontrasse no intervalo $1 < \epsilon_{ref} < \epsilon_r$. Numa situação onde $\epsilon_r \gg 1$, teremos uma grande aproximação entre os valores de ϵ_r e ϵ_{ref} , dessa maneira a linha de microfita se comporta como uma linha homogênea de um dielétrico, nesse caso podemos considerar apenas o substrato. Podemos obter o valor de ϵ_{ref} utilizando a equação 2.1 (BALANIS, 1997).

$$\epsilon_{ref} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + \frac{h}{W} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (2.1)$$

Analisando do ponto de vista elétrico a antena aparenta ser maior que sua dimensão física devido ao efeito de franja, podemos observar na Figura 2.5(a), podemos ver que o comprimento do patch foi alongado em cada extremidade por uma distância ΔL que é uma função da constante dielétrica eficaz ϵ_{ref} e a relação (W/h) . (BALANIS, 1997).

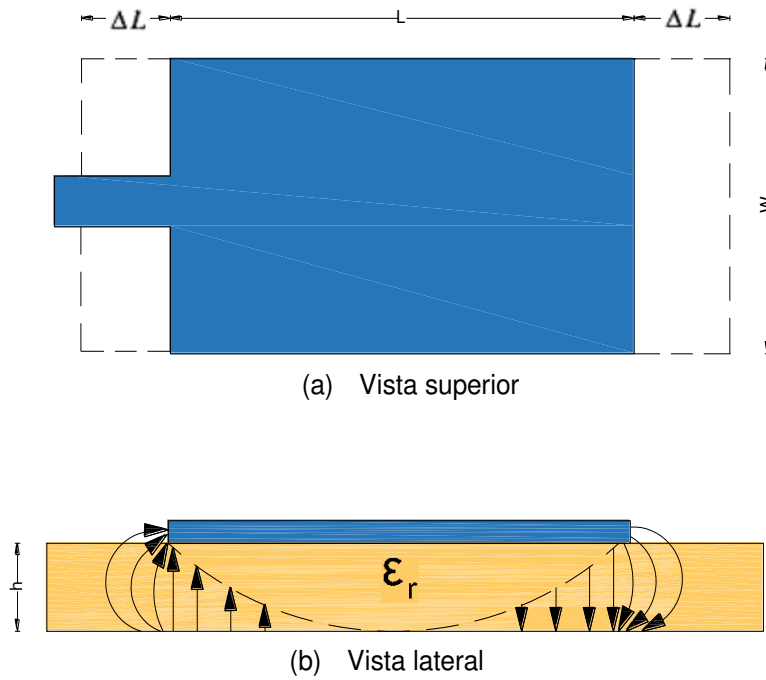


Figura 2.5 - Acréscimo no tamanho da antena do ponto de vista elétrico.

Uma relação muito popular e prática para normalizar essa extensão do comprimento é dada em (HAMMERSTAD, 1975).

$$\frac{\Delta L}{h} = 0,412 \frac{(\epsilon_{ref} + 0,3) \left(\frac{W}{h} + 0,264 \right)}{(\epsilon_{ref} - 0,258) \left(\frac{W}{h} + 0,8 \right)} \quad (2.2)$$

Sabendo disso, podemos determinar o comprimento total do patch utilizando (BALANIS, 1997):

$$L = \frac{1}{2f_r \sqrt{\epsilon_{ref}} \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} - 2\Delta L \quad (2.3)$$

E sua largura é dada por (BALANIS, 1997):

$$W = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_r + 1}} \quad (2.4)$$

3 – ALGORITMOS GENÉTICOS

Algoritmos genéticos (AG) são métodos de otimização global, utilizados para descobrir pontos de melhores desempenhos em um problema (SILVA, 2005). São fundamentados no processo da seleção natural proposto por Darwin (1842), de acordo com essa teoria, se tivermos uma dada população, os mais adaptados têm maior probabilidade de sobreviver, por consequência disso esses indivíduos mais adaptados vão gerar mais descendentes, passando algumas suas características para as futuras gerações. A teoria da genética proposta por Mendel (1866) tem grande impacto no desenvolvimento dos algoritmos genéticos, a teoria de Mendel se completa com a teoria de Darwin (ALBRECHT, 2005), pois explica como as características são passadas de uma geração para outra.

Podemos falar que AG são métodos com aplicação computacional de busca que utiliza dos princípios da evolução natural e da genética. O funcionamento de um AG pode ser representado da seguinte maneira: escolhemos uma população inicial formada por possíveis soluções (indivíduos), em muitas vezes formada de maneira aleatória, um critério é utilizado para avaliar cada indivíduo da população, esse critério é determinado por uma função que analisa a qualidade (fitness) que cada indivíduo tem em determinado contexto. Após a geração de uma população inicial é aplicada a etapa de seleção, nessa etapa escolhemos os melhores indivíduos para criar uma nova população, sendo essa uma nova geração em relação a população anterior. A nova geração é obtida aplicando operadores probabilísticos a fim de misturar as características (genes) de cada indivíduo, através de mutação e cruzamento (crossover) dos genes. Com a repetição desses passos a tendência é que os indivíduos que melhor se adaptam vão representar melhores soluções cada vez melhores a medida que o algoritmo vai evoluindo (TANOMARU, 1995; POZO et al. 2001)

Nos algoritmos genéticos temos um vetor chamado de cromossomo, que é preenchido pelas variáveis da função que desejamos otimizar. As variáveis que compõem o cromossomo são genes, existe um valor finito deles dentro de um cromossomo, e sua representação pode ser feita por um alfabeto binário ou por um alfabeto de maior cardinalidade. Quanto mais vão se passando as gerações melhor vai ficando a qualidade dos indivíduos de uma população, isso ocorre devido aos operadores de, mutação, reprodução e cruzamento que são aplicados aos cromossomos dessa população (BROCHONSKI, 1999).

Esse algoritmo foi proposto primeiramente por (HOLLAND, 1975) e foi popularizado por seu aluno David Goldberg (GOLDBERG, 1989). Esses algoritmos visam otimizar a busca por soluções de um problema, por se tratar de um método global esse algoritmo não depende

do ponto inicial da busca por causa de sua natureza estocástica na busca iterativa (GOLDBERG, 1989).

Podemos encontrar algumas definições de parâmetros envolvidos no algoritmo genético em (GOLDBERG, 1989):

- **População** – É o conjunto formado por todos os indivíduos;
- **Geração** – É o um conjunto de indivíduos que pertencem a uma mesma etapa da evolução;
- **Indivíduo** – É um dos membros que constituem a população, e pode ser representado por um cromossomo;
- **Cromossomo** – É a estrutura ou vetor que armazena as variáveis que serão otimizadas, um cromossomo representa apenas uma solução no espaço da busca;
- **Gene** – É uma parte do cromossomo que representa apenas uma variável;
- **Função de aptidão** – Apresenta numericamente a probabilidade de um cromossomo se reproduzir com mais frequência. O valor gerado pela função de aptidão pode ser chamado de fitness;
- **Seleção** – É uma operação genética que seleciona os indivíduos de uma população, esses servirão como os pais no processo de reprodução;
- **Cruzamento** (crossover) – É o operador genético que combina aleatoriamente os genes de um cromossomo para gerar novos cromossomos;
- **Mutação** – Também é um operador genético, que funciona após o crossover, modificando a estrutura de alguns cromossomos, criando assim uma diversidade entre os indivíduos;
- **Fitness** – É o valor que mostra o quanto o cromossomo é bom para aquele problema, esse valor é gerado em uma junção das funções de aptidão e funções de penalização que são estabelecidas pelo problema em questão;
- **Genótipo** – Representa toda a informação que está contida num cromossomo;
- **Fenótipo** – É a estrutura construída a partir dos dados do genótipo.

Muitas variações de algoritmos genéticos foram propostas por (HOLLAND, 1975), mas todos se baseiam em uma estrutura genérica, conforme ilustra a Figura 3.1.

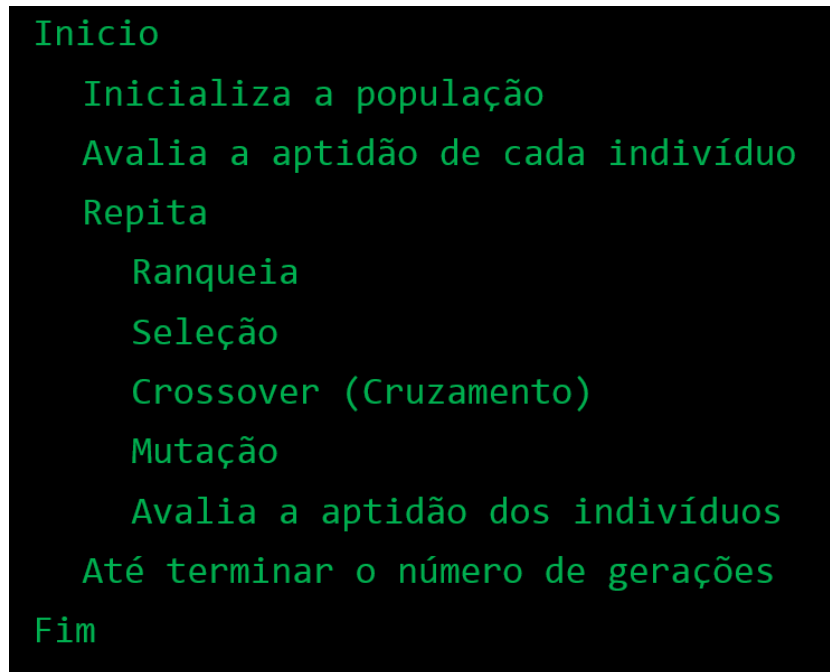


Figura 3.1 - Representação Genérica de um Algoritmo Genético.

3.1 CODIFICAÇÃO DE INDIVÍDUOS

Os indivíduos de uma população representam uma possível solução para um problema, esses indivíduos podem ser representados por cromossomos, que são estruturas de dados compostos por valores binários ou reais, ou até mesmo os dois, são essas as variáveis que devem ser otimizadas no problema.

Na representação mais clássica proposta por (HOLLAND, 1975), os indivíduos eram codificados em arranjos utilizando o alfabeto binário. A representação binária é muito utilizada por sua facilidade de manipulação, mas o desempenho dessa forma de representação diminui drasticamente quando utilizada em problemas que exijam uma alta precisão na representação de seus parâmetros, pois os indivíduos terão que ser representados por longos cromossomos. A Figura 3.2 representa um cromossomo utilizando codificação binária.

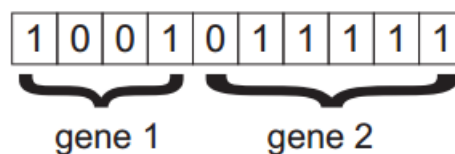


Figura 3.2 - Representação de um cromossomo binário.

Em vários tipos de aplicação prática, temos um baixo desempenho de algoritmos que utilizam de representação binária, pois seu espaço de busca fica muito elevado tratando-se de representações de alta precisão, uma proposta para resolver esses problemas é utilizar uma representação por números reais, como ilustra a Figura 3.3. (MICHALEWICZ, 1996).

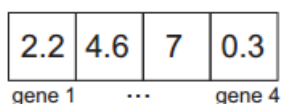


Figura 3.3 - Representação de um Cromossomo com números Reais.

O tipo de representação deve ser escolhido de acordo com a aplicação do AG, se a aplicação tiver o objetivo de otimizar parâmetros contínuos, como tempo ou comprimento, o mais indicado é representar os cromossomos utilizando valores reais. Já casos que representem processos como ligado/desligado ou em casos onde tenhamos que validar ou invalidar variáveis, a representação do cromossomo utilizando a codificação binária é mais indicada. (MICHALEWICZ & FOGEL, 2000)

3.2 POPULAÇÃO INICIAL

Na grande maioria das aplicações, a população inicial é gerada de forma aleatória, criando assim um espaço de busca bem distribuído e diversificado, aumentando as possibilidades de convergência para o problema. Nos casos onde se conhece espaços de busca promissores no problema, o ideal é gerar uma população inicial que contemple apenas esse espaço, isso diminui o tempo de convergência pois evita que o algoritmo busque em regiões onde não se encontram as possíveis soluções ótimas do problema.

Quanto mais restritas as condições iniciais do problema, mais rápida será a convergência, pois mesmo que a população seja gerada aleatoriamente, as restrições iniciais colocarão os indivíduos dessa população próximos a solução (LACERDA & CARVALHO 1999).

Um dos cuidados na geração da população inicial é não errar na hora de elaborar restrições para o espaço de busca, o usuário deverá ter um bom conhecimento acerca da função que será otimizada.

Uma observação acerca do tamanho da população inicial é que quanto maior o número de indivíduos de uma população, maior será a chance de convergência, pois as chances da solução desejada estar entre os indivíduos da população aumenta, mas um ponto negativo é o

tempo de processamento que aumenta. No caso de uma população inicial muito pequena, diminuirá o tempo de processamento, mas diminuirá a diversidade da população, isso pode acarretar em uma solução local e não em uma solução global para o problema (R.K.Ursem 2002)

No algoritmo genético apresentado por (GOLDBERG, 1989) não tínhamos variação no tamanho da população durante o processo evolutivo, mas (MICHALEWICZ, 1996) propõe que o tamanho da população deve variar durante a otimização do problema, pois é dessa maneira que ocorre na natureza.

3.3 AVALIAÇÃO

Nos algoritmos genéticos cada indivíduo recebe um valor que é gerado por uma função de aptidão, essa função recebe as variáveis contidas no cromossomo, o valor gerado pela função de aptidão representa o quanto esse indivíduo está adaptado ao ambiente do problema, quanto maior a aptidão de um indivíduo maior suas chances de repassar seu código genético para gerações futuras. Chamaremos esse valor de aptidão de *fitness*. Quanto melhor a avaliação for feita, maiores as chances de encontrarmos uma boa solução para o problema.

O melhor indivíduo sempre ficará armazenado, mesmo que ele não faça mais parte da população (TANOMARU, 1995).

3.4 SELEÇÃO

Após a avaliação de uma população, de maneira probabilística devemos escolher quais indivíduos participarão da reprodução, concedendo maiores chances para os indivíduos com mais aptidão (ALBRECHT, 2005) ou seja, maior *fitness*.

3.4.1 Rank

A estratégia de rank é determinística, ela consiste em ordenar todos os indivíduos de acordo com os valores de seus respectivos fitness, onde é escolhido um valor mínimo de corte, removido da população qualquer indivíduo do rank que esteja abaixo dessa nota, na nova população esses indivíduos podem ser repostos pela reprodução dos indivíduos que não foram removidos da população, em casos extremos onde não sobre nenhum indivíduo, a nova população pode ser repostada por cromossomos aleatórios. Também podemos definir o ponto de corte de maneira percentual, ou seja, a nova população será formada por uma porcentagem

dos melhores indivíduos juntamente com uma porcentagem dos piores indivíduos (MICHALEWICZ, 1996).

3.4.2 Roleta

Nessa estratégia de seleção, cada indivíduo recebe um valor percentual referente ao seu valor de aptidão, podendo serem divididos em uma espécie de gráfico do tipo pizza, que chamaremos de roleta. Cada indivíduo recebe uma porção na roleta proporcional ao seu valor de aptidão como mostra a Figura 3.4. Um dos problemas apresentados por essa estratégia é que ela converge prematuramente caso a população tenha um número pequeno de indivíduos ou alguns indivíduos apresentem valores de aptidão muito altos (HOLLAND, 1975). O motivo de uma convergência prematura quando um indivíduo apresentar um valor relativamente alto em relação aos demais, é que esse indivíduo tem maior probabilidade de ser escolhido várias vezes na roleta.

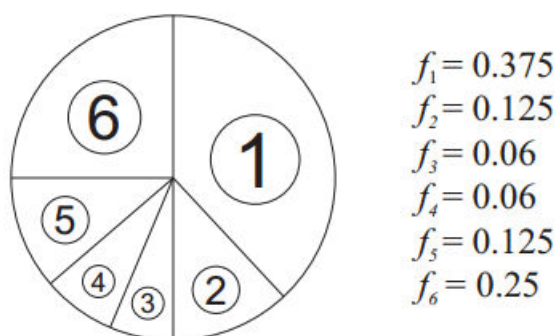


Figura 3.4 - Estratégia da roleta para a seleção de indivíduos.

3.4.3 Torneio

O torneio é uma das estratégias de seleção mais utilizadas, consiste em sortear n indivíduos da população, dentre esses n indivíduos é selecionado o indivíduo com maior *fitness*, tornando-se um dos indivíduos que irá se reproduzir. Para que a diversidade da população diminua lentamente é utilizado o valor de $n = 2$, isso dá chance aos indivíduos com valor de *fitness* baixo a fazerem parte da reprodução (Miller & Goldberg, 1996).

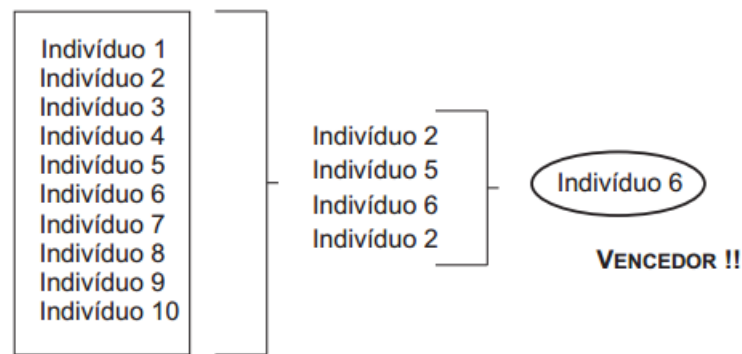


Figura 3.5 - Seleção por torneio utilizando $N=4$.

3.4.4 Rank de Wetzel

Essa estratégia de seleção é uma junção entre as estratégias da roleta e do torneio, consiste em ao invés de selecionar os indivíduos do torneio de forma aleatória, utiliza-se a roleta para fazer essa seleção.

3.5 CRUZAMENTO (*crossover*)

O *crossover* é um operador genético utilizado para realizar a troca de informações entre indivíduos selecionados para a reprodução, ou seja, realizar a permutação dos genes de um par de indivíduos para gerar um novo, ajudando na pluralidade da nova população.

O mais simples exemplo desse método é o *crossover* de 1-ponto, que consiste em selecionarmos um ponto aleatório comum aos dois indivíduos (*cromossomos*) utilizados na operação de crossover, e em seguida permutaremos entre os dois todas as informações a partir do ponto selecionado (OLIVIERI, 2004). Podemos observar a Figura 3.6 para esclarecer mais a aplicação dos métodos.

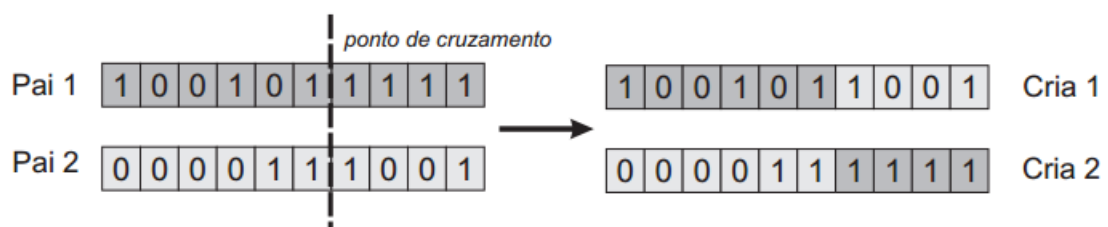


Figura 3.6 - Crossover de um ponto.

Analogamente, podemos escolher n -pontos nos dois indivíduos e aplicar o mesmo princípio visto anteriormente.

No entanto existem outros métodos de crossover para utilização em cromossomos que utilizem codificação real, e um deles é o crossover aritmético. Chamaremos de P_1 e P_2 os dois

indivíduos escolhidos para a operação de crossover, e chamaremos de F_1 e F_2 os dois indivíduos gerados pela operação de crossover realizada em P_1 e P_2 . Temos que:

$$F_1 = aP_1 + (1 - a)P_2 \quad (3.1)$$

e:

$$F_2 = aP_2 + (1 - a)P_1 \quad (3.2)$$

Onde o valor de a se encontra entre 0 e 1.

3.6 MUTAÇÃO

O processo de mutação é aplicado após o cruzamento, e serve para manter uma pluralidade na população de indivíduos, no intuito de explorar melhor o espaço de busca. A operação em si consiste em: de forma aleatória ou ocasional alterar a forma do cromossomo de acordo com uma taxa de mutação, a mudança ocorre com permutação do valor de um gene ou mais no cromossomo (OLIVIERI, 2004).



Figura 3.7 - Mutação Pontual.

Em situações onde os cromossomos estiverem com uma codificação de números reais, poderemos utilizar o operador de mutação uniforme, nesse método selecionarmos aleatoriamente um gene G do cromossomo, e o substituímos por um valor G_n aleatório que esteja dentro do intervalo de restrição para a aquele gene. (MICHALEWICZ & SCHOENAUER, 1996).

4 – METODOLOGIA

A finalidade desses experimentos será dimensionar através de algoritmos genéticos uma antena, com frequência de ressonância mais próxima de 10Ghz ou o mais próximo possível. Utilizaremos uma variação de um algoritmo genético, onde esse modelo apresentara o modelo de seleção do Rank de Wetzel.

4.1 MODELANDO O PROBLEMA

No nosso problema, as antenas apresentarão formato retangular. Representaremos as variáveis das antenas por um sistema de ponto flutuante conforme mostra a Figura 4.1.

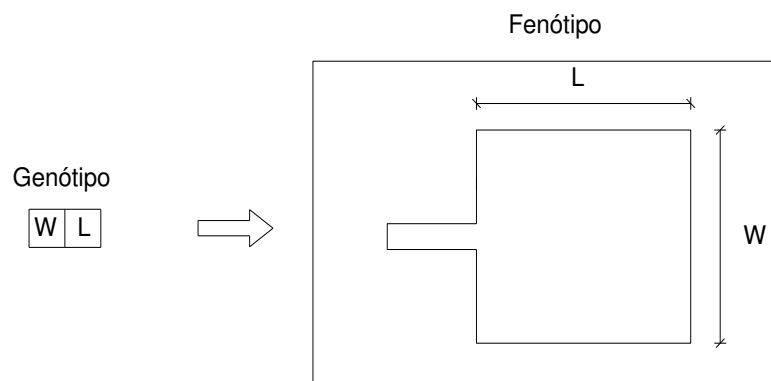


Figura 4.1 - Representação Fenótipo Genótipo de um indivíduo.

A função F_o que deve ser objetivada pelos indivíduos é:

$$F_o = \left| \left(\frac{1}{2L\sqrt{\epsilon_{ref}}\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} - 2\Delta L \right) - 10 \right| \quad (4.1)$$

De modo que os melhores indivíduos serão os que mais se aproximarem de zero.

4.2 CRIANDO O ALGORITMO

Para iniciarmos os testes iremos impor limites de valores para os genes de cada indivíduo (antena) como mostra a tabela abaixo:

Gene	Valor Mínimo (cm)	Valor Máximo (cm)
W	0,1	5
L	0,1	5

Tabela 4.1 – Representação da Variação do intervalo.

Esses intervalos de valores foram escolhidos com base em obter uma antena de dimensões reduzidas, para facilitar sua aplicação em pequenos equipamentos.

Alguns parâmetros do nosso algoritmo que devem ser levados em consideração são:

- Utilizaremos elitismo 1, ou seja, o melhor indivíduo de cada geração obrigatoriamente passará para uma nova geração do nosso algoritmo.
- Nossa população inicial será de 10 indivíduos, que serão gerados aleatoriamente obedecendo os limites estabelecidos para os valores dos genes, essa população irá se perpetuar por 30 gerações, ou seja, 30 ciclos do algoritmo.
- Após nossa geração atual de indivíduos ser ranqueada e selecionada, o cruzamento será feito intercalando os melhores quatro melhores indivíduos com os quatro piores do ranking, fazendo com que a pluralidade da população não diminua. Os quatro novos indivíduos substituirão os quatro piores indivíduos da geração atual.
- Após o cruzamento entre nossos indivíduos (antenas) serem realizados, a mutação será realizada em apenas 30% da população, a variação do valor do gene irá variar em no máximo 10% do valor atual.

5 – RESULTADOS

Para simulação dos resultados foi utilizando uma antena padrão de microfita retangular com patch de cobre e substrato de RTDuroid5880 com altura 1,58mm. Para os resultados do diagrama de radiação utilizou-se um arranjo 2x2 de antenas de microfita com a largura e comprimento encontrados no resultado de simulação do algoritmo genético.

Após rodarmos o algoritmo obtivemos parâmetros para uma antena de microfita de formato retangular, os valores podem ser conferidos na tabela abaixo:

W	L	Tempo
1,102 cm	0,931 cm	3,427 s

Tabela 5.1 - Resultados obtidos pelo Algoritmo Genético apresentado no trabalho.

Para constatar se a frequência se aproximou de 10Ghz, utilizamos o Software Matlab, nele implementamos a modelagem pelo método da linha de transmissão, o gráfico obtido pode ser conferido abaixo:

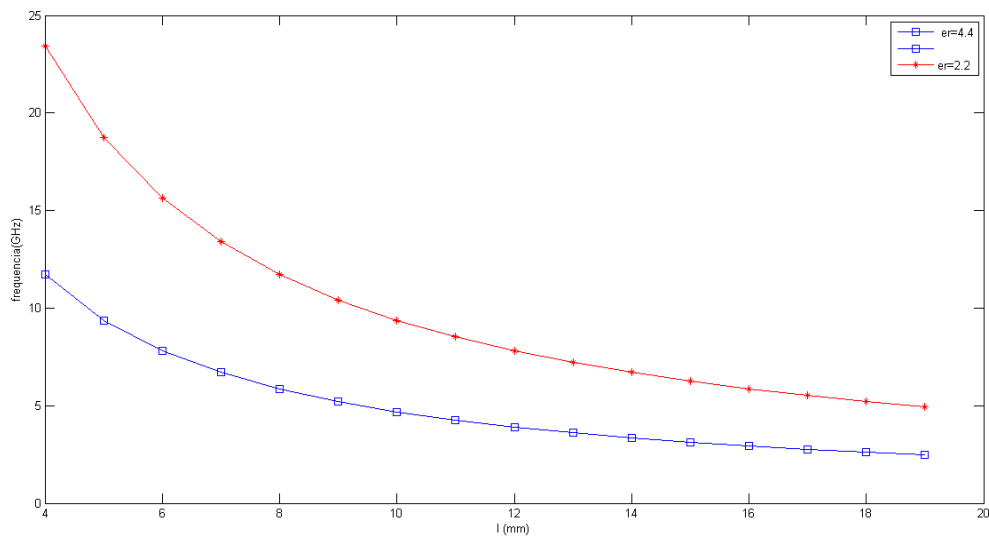


Gráfico 5.1 – Gráfico da Frequência em função do comprimento L .

Perceba que temos dois gráficos, cada um representa a mesma antena obtida pelo algoritmo genético, mas, com permissividades diferentes.

5.1 LARGURA DE BANDA

Agora para sabermos qual a largura de banda da antena utilizaremos o método dos momentos para obter um gráfico $S(1,1)$.

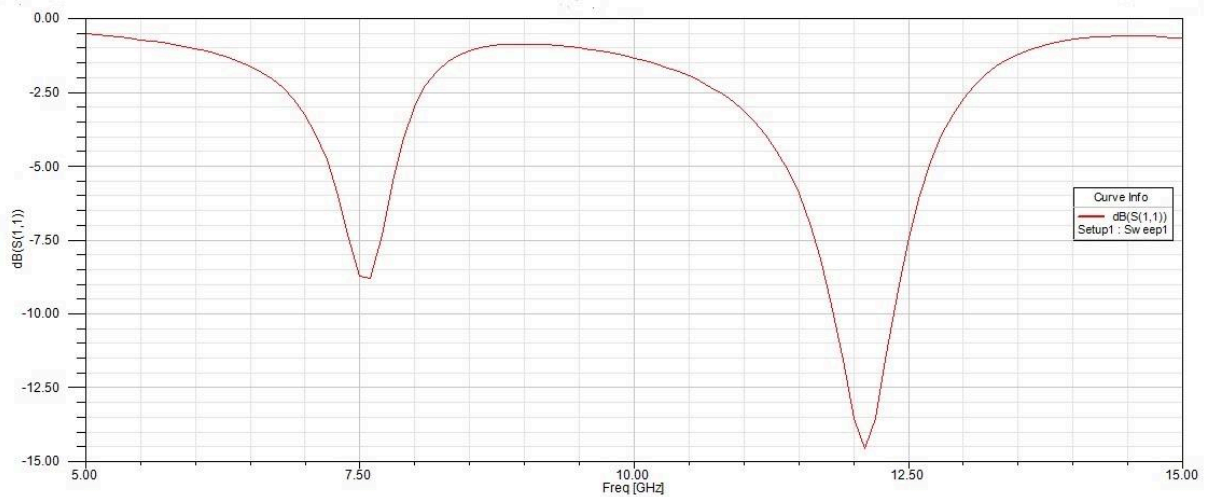


Gráfico 5.2 – Gráfico $S(1,1)$, usado para determinar a largura de banda da nossa antena.

Ao analisarmos o gráfico, percebemos que a nossa antena ressoou em duas frequências diferentes, 7.5 GHz e 12.1GHz. A largura de banda se dá pelo intervalo de frequências que ficaram abaixo de -10dB, esse intervalo vai de 11.8Ghz até 12.35Ghz, o que nos dá uma largura de banda de 0.55Ghz ou 550Mhz, que é um resultado muito satisfatório.

5.2 ARANJOS DE ANTENAS DE MICROFITA

Agora iremos aplicar nossa antena em arranjos de 2x2, variando os ângulos de irradiação.

Para um arranjo de antenas de microfita retangulares (Apêndice A), de cobre, com substrato de fibra de vidro e para uma frequência de ressonância de 10GHz, e elementos distribuídos por uma distância $\lambda/2$, para valores de $\theta=45$ e $\phi=45$. Para o plano-E, temos:

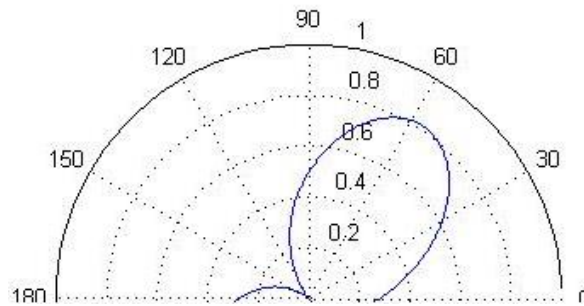


Figura 5.1 – Resultado obtido no Matlab para o plano E, de antena de microfita retangular com elementos distribuídos 2x2 com dados de entrada mencionados acima.

Para um arranjo de antenas de microfita retangulares (Apêndice A), de cobre, com substrato de fibra de vidro e para uma frequência de ressonância de 10GHz, e elementos distribuídos por uma distância $\lambda/2$, para valores de $\theta=45$ e $\phi=45$. Para o plano-E, temos:

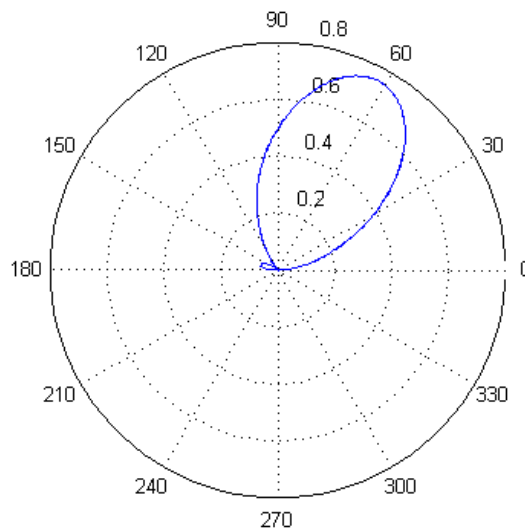


Figura 5.2 – Resultado para o plano H de antena de microfita retangular com elementos distribuídos 2x2, com dados de entrada mencionados acima.

6 – CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos de largura e comprimento do patch, pelo algoritmo genético, quando simulados em Matlab pelo método da Linha de Transmissão (BALANIS, 1997), a frequência simulada convergiu para o valor de frequência desejada de 10GHz, foi obtido o valor de 11 GHz para o substrato RTDuroid5880 $\epsilon_r = 2,2$, para o substrato de FR-4 com permissividade elétrica de 4,4, concluímos que para 10GHz ocorreu a miniaturização da antena de microfita com comprimento de $L=4,3\text{mm}$.

Utilizando-se o método dos Momentos, a antena de microfita teve duas ressonâncias uma de $f=7.5\text{GHz}$, e a principal com $f = 12,1 \text{ GHz}$. A largura de banda obtida, foi surpreendente para este trabalho, o que justifica o uso de algoritmos genéticos aplicados a otimização de antenas de microfita ou circuitos planares. Observando a função S_{11} , e que as frequências abaixo de -10dB estão no intervalo que vai de 11.8GHz até 12.35GHz, resultando em uma largura de banda de 550MHz, muito satisfatório, pois em geral as antenas de microfita possuem baixa largura de banda.

Resultados de diagrama de radiação com um arranjo 2x2 do patch retangular obtido, espaçados por $\lambda/2$ nos eixos foram simulados em Matlab. Podemos concluir nestes resultados que a diretividade da antena foi menor, porém justificada por uma maior largura de banda e presença de lóbulos secundários que consomem potência e ganho dos lóbulos primários.

Para trabalhos futuros, pode-se simular para frequências próximas do resultado obtido pelo método dos Momentos e executar a corrosão da estrutura de microfita, tanto do arranjo 2x2 com substrato de fibra de vidro (FR-4) e para a antena de um elemento utilizando-se o RTDuroid5880 e FR4. A inserção de fractais no condutor e substrato de outros materiais podem facilitar a otimização e miniaturização da estrutura, também pode-se paralelizar o processo do algoritmo genético e testar outros tipos de seleção, além de variar os valores da taxa de mutação, número de indivíduos na população e quantidade de ciclos do algoritmo possibilitando uma comparação entre os resultados obtidos.

REFERÊNCIAS

BALANIS, Constantine A. **Antenna Theory – Analysis and Design**. 2. Ed. New York: John Wiley & Sons, 1997.

GARG, R. et al. **Microstrip Antenna Design Handbook**: Artech House. 2001.

MUNSON, R. E.. **Conformal microstrip antennas and microstrip phased arrays**. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, p. 74–78. 1974.

HAMMERSTAD, E. O. **Equations for Microstrip Design**. Proceedings of Fifth European Microwave Conference, p. 268-272. 1975.

HOLLAND, J. H. **Adaptation in Natural and Artificial Systems**. Ann Arbor: University of Michigan Press, 1975.

GOLDBERG, D. E. **Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning**. New York: Addison-Wesley, 1989.

TANOMARU, J. **Motivação, fundamentos e aplicações de algoritmos genéticos**, II Congresso Brasileiro de Redes Neurais - III Escola de Redes Neurais, 1995.

BARRA, Tiago Venturi. **Um ambiente evolutivo para apoio ao projeto de antenas de microfitas**. Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2007.

BROCHONSKI, P. C. **Um Sistema para Programação da Produção de Máquinas de Composição SMT**, Curitiba, 1999.

LACERDA, E. & CARVALHO, A. **Introdução aos algoritmos genéticos**, Anais do XIX Congresso Nacional da Sociedade Brasileira de Computação, Vol. 2, p. 51–126. 1999.

URSEM, R. K. **Diversity-guided evolutionary algorithms**, Proceedings of PPSN 2002, p. 462–471. 2002.

ALBRECHT, Carl Horst. **Algoritmos Evolutivos Aplicados à Síntese e Otimização de Sistemas de Ancoragem** [Rio de Janeiro] 2005 VII, 166 p. (COPPE/UFRJ, D.Sc., Engenharia Oceânica, 2004) Tese – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. p. 89.

MILLER, B. L. & GOLDBERG, D. E. **Genetic algorithms, tournament selection, and the effect of noise**. Complex Systems, 1996.

MICHALEWICZ, Z. **Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs**. Springer, 1996.

MICHALEWICZ, Z. & FOGEL, D. B. **How to solve It: Modern Heuristics**. Springer, 2000.

POZO, Aurora et al. **Computação evolutiva**. 2001. Disponível em <www.inf.ufpr.br/aurora/tutoriais/Ceapostila.pdf> 23 mai.2015.

OLIVIERI, Bruno Perdigão. **Otimização do Projeto de Pontes Protendidas Pré-Moldadas pelo Método dos Algoritmos Genéticos** [Rio de Janeiro] 2004 XIV, 129 p. (COPPE/UFRJ, M. Sc., Engenharia Civil, 2004) Tese – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2004.

MICHALEWICZ, Z. & SCHOENAUER, M. **Evolutionary Algorithms for Constrained Parameter Optimization Problems**, Evolutionary Computation, vol. 4, no. 1, p. 1-32, 1996.

MOREIRA Silva; ANGELO José. **Implementação de um Algoritmo Genético utilizando o Modelo de Ilhas** [Rio de Janeiro] 2005 XI, 73 p. (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Civil, 2005) Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE p.

NETO, Sílvio Petrolí. **Computação Evolutiva: Desvendando os Algoritmos Genéticos**. 2004. Disponível em <<http://www.portal.anchieta.br/revistas-e-livros/ubiquidade/pdf/artigo4.pdf>> 12 jul.2015.

BAHL, I. J; BHARTIA, P. **Microstrip Antennas**, Artech House, Inc, second printing, 1982.
FERNANDES, Humberto, C. Chaves, AZEVEDO, Hugo M. C. M; CAETANO, Leonardo Martins. **Analysis of Microstrip Antennas Array with Circular and Rectangular Patch in 21 GHz Frequency**, International Conference on Superconductivity and Magnetism, Istambul, 2012.

APÊNDICE A

Fonte: Apêndice extraído da tese de doutorado do Professor D.Sc. Hugo Michel C. de Azevedo Maia

A.1 ELEMENTOS DE ANTENA DE MICROFITA RETANGULARES

Um arranjo de fase de antenas é constituído por um número limitado de antenas idênticas e associa os sinais induzidos nessas antenas para formar a saída do arranjo. Cada antena do arranjo recebe o nome de elemento do arranjo. A direção onde o ganho do arranjo será máximo possível, é controlada pelo ajuste da fase do sinal nos diferentes elementos. A fase induzida nos vários elementos é ajustada de forma que os sinais em uma determinada direção, na qual se deseja máximo ganho, são somados em fase. Isso resulta em um ganho do arranjo, que é aproximadamente a soma dos ganhos individuais dos elementos naquela direção.

Em estruturas simples (apenas um elemento radiador), verifica-se que certas características como: ganho, diretividade e largura de feixe de meia-potência nem sempre são adequadas para aplicações práticas. Alternativamente, usa-se arranjos para solucionar tais problemas.

Neste capítulo serão descritos o arranjo de fase em configurações geométricas lineares e planares. No arranjo linear seus elementos radiadores estão dispostos ao longo de uma linha, enquanto que, no arranjo planar seus elementos estão dispostos em um *grid* retangular. Em todos os casos os elementos são constituídos do mesmo material e possuem espaçamento constante entre os elementos adjacentes.

A.2 ARRANJO LINEAR

Conforme a Figura A.1, verifica-se um arranjo linear de N elementos em um campo distante de fontes isotrópicas ao longo do eixo “z”. O fator de arranjo pode ser obtido considerando os elementos como uma fonte pontual, sendo determinado por [11], [12]:

$$FA = 1 + e^{+j(kd \cos \theta + \beta)} + e^{+j2(kd \cos \theta + \beta)} + \dots + e^{+j(N-1)(kd \cos \theta + \beta)} \quad (A.1)$$

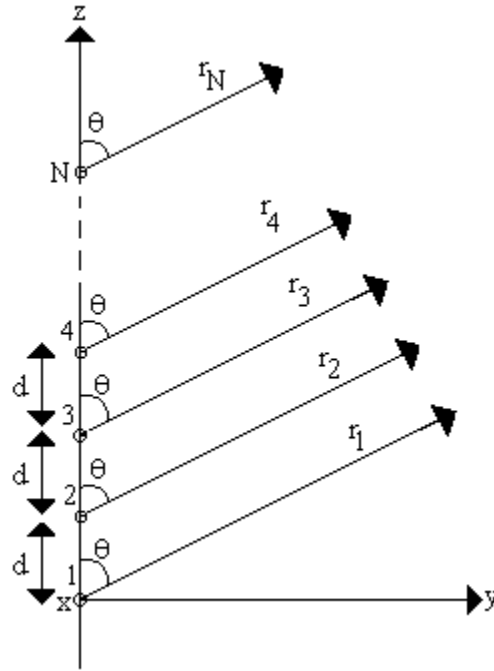


Figura A.01 - Geometria de um arranjo linear de N elementos.

Com manipulação algébrica obtém-se:

$$FA = \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)(kd \cos \theta + \beta)} \quad (\text{A.2})$$

onde (3.2) pode ser reescrito como:

$$FA = \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)\psi} \quad (\text{A.3})$$

sendo:

$$\psi = kd \cos \theta + \beta \quad (\text{A.4})$$

Multiplicando-se ambos os lados da equação (A.3) por $e^{j\psi}$, obtém-se:

$$FA \cdot e^{j\psi} = e^{j\psi} + e^{j2\psi} + e^{j3\psi} + \dots + e^{j(N-1)\psi} + e^{jN\psi} \quad (\text{A.5})$$

Subtraindo-se (A.3) de (A.5), obtém-se:

$$FA \cdot (e^{j\psi} - 1) = (1 - e^{jN\psi}) \quad (\text{A.6})$$

logo, a equação anterior pode ser reescrita como:

$$FA = \left[\frac{e^{jm\psi} - 1}{e^{j\psi} - 1} \right] = e^{j \left[\frac{(N-1)}{2} \right] \psi} \left[\frac{e^{j(N/2)\psi} - e^{-j(N/2)\psi}}{e^{j(1/2)\psi} - e^{-j(1/2)\psi}} \right] \quad (\text{A.7})$$

$$FA = e^{j \left[\frac{(N-1)}{2} \right] \psi} \left[\frac{\text{sen} \left(\frac{N}{2} \psi \right)}{\text{sen} \left(\frac{1}{2} \psi \right)} \right] \quad (\text{A.8})$$

Se for tomado como referência um ponto localizado no centro físico do arranjo, o fator de arranjo pode ser reduzido para:

$$FA = \left[\frac{\text{sen} \left(\frac{N}{2} \psi \right)}{\text{sen} \left(\frac{1}{2} \psi \right)} \right] \quad (\text{A.9})$$

Para valores pequenos de ψ , obtém-se:

$$FA = \left[\frac{\text{sen} \left(\frac{N}{2} \psi \right)}{\left(\frac{\psi}{2} \right)} \right] \quad (\text{A.10})$$

Realizando-se uma normalização em relação ao número máximo de elementos do arranjo, as equações (A.9) e (A.10) podem ser apresentadas da seguinte forma:

$$FA_n = \frac{1}{N} \left[\frac{\text{sen} \left(\frac{N}{2} \psi \right)}{\text{sen} \left(\frac{1}{2} \psi \right)} \right] \quad (\text{A.11})$$

e

$$FA_n = \left[\frac{\text{sen} \left(\frac{N}{2} \psi \right)}{\left(\frac{N}{2} \right)} \right] \quad (\text{A.12})$$

A.2.1 FASE E ESPAÇAMENTO ENTRE OS ELEMENTOS DE UM ARRANJO LINEAR

Em um arranjo de fase, a máxima radiação pode ser orientada em qualquer direção. Assumindo que a máxima radiação do arranjo é necessária para ângulos θ_0 variando de 0° à 180° , a fase de excitação β entre os elementos deve ser ajustada, tal que:

$$\psi = kd \cos(\theta) + \beta \Big|_{\theta=\theta_0} \quad (\text{A.13})$$

resultando em:

$$\beta = -kd \cos \theta_0 \quad (\text{A.14})$$

ou

$$\theta_0 = \cos^{-1} \left(\frac{\beta}{kd} \right) \quad (\text{A.15})$$

A variação da fase β irá mudar θ_0 , causando um deslocamento no feixe. Este mecanismo é a base do arranjo de fase em antenas, como mostra a Figura A.2. A variação na fase é realizada por deslocadores de fase (*phase shifters*), conectados em cada um dos elementos que compõe o arranjo.

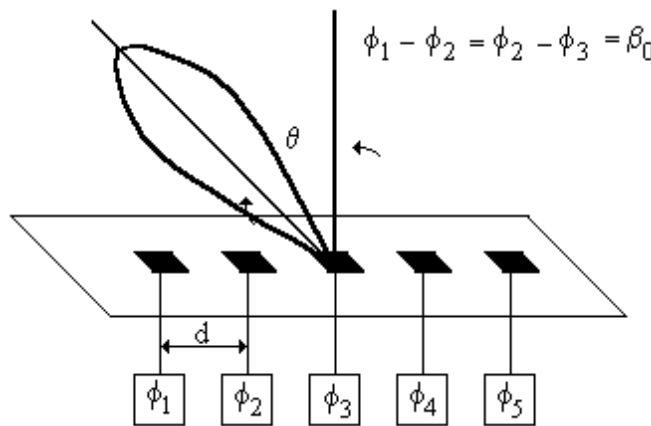


Figura A.02 - Arranjo de fase em uma antena.

Quando as correntes que alimentam os elementos estão em fase e com igual amplitude, resultará em um feixe na direção *broadside* (arranjo cujos elementos contribuem com campos de igual amplitude e fase), como mostra a Figura A.3.

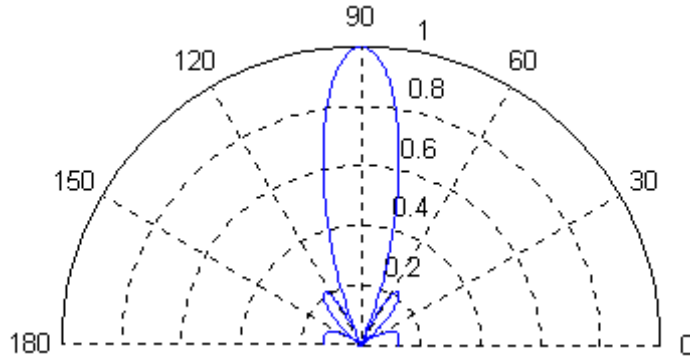


Figura A.03 - Diagrama do fator de arranjo com 5 elementos ($N=5$, $d=\lambda/2$ e $\beta=0$).

O fator de arranjo da equação (A.2) pode ser escrito em termos da variável $v = \cos \theta$:

$$FA(v) = \sum_{n=0}^{N-1} e^{jnk d(v-v_0)} \quad (\text{A.16})$$

onde a direção de maior radiação v_0 é relacionada com a diferença de fase $\Delta\psi$ por $\Delta\psi = -kdv_0$.

$FA(v)$ e $FA(\theta)$ são relacionados ponto-a-ponto na região $|v| \leq 1$, que é referida como a região visível do espaço correspondente a ângulos reais de θ . Também se nota que $FA(v)$ é uma função periódica de v de período [13]:

$$\frac{2\pi}{kd} = \frac{1}{d/\lambda} = \frac{\lambda}{d} \quad (\text{A.17})$$

e que a equação (3.16) está na forma da representação da série de *Fourier*. O máximo de $FA(v)$ ocorre sempre que o argumento da equação (A.16) é múltiplo de $2i\pi$;

$$kd(v - v_0) = 2i\pi \quad (\text{A.18})$$

ou

$$v_i - v_0 = \frac{i}{d/\lambda} \quad (\text{A.19})$$

Sendo $i = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$,

Quando $v_i = v_o$ ou $i = 0$ ocorre, o máximo geralmente refere-se como lóbulo principal e os outros máximos são conhecidos como lóbulos secundários. No projeto de arranjos de fase, é necessário que os lóbulos secundários sejam eliminados ou minimizados. Este lóbulo reduz a potência do lóbulo principal, diminuindo o ganho da antena. O espaçamento d entre os elementos deve ser escolhido de forma a evitar lóbulos de grade na região visível do espaço. Quando o lóbulo principal está em uma direção v_o , o lóbulo de grade mais próximo da região visível do espaço é localizado por [12], [28]:

$$v_i = v_o - \frac{1}{d/\lambda} \quad (\text{A.20})$$

O lóbulo de grade apenas aparecerá no espaço visível quando $v_o - 1/(d/\lambda) \leq -1$, desta forma o critério para o espaçamento entre os elementos em termos do maior ângulo de radiação θ_{omax} é [12], [28]:

$$\frac{d}{\lambda} < \frac{1}{1 + \sin|\theta_{0\text{max}}|} \quad (\text{A.21})$$

A Figura A.A mostra o diagrama do fator de arranjo para um ângulo $\theta_o = 60^\circ$.

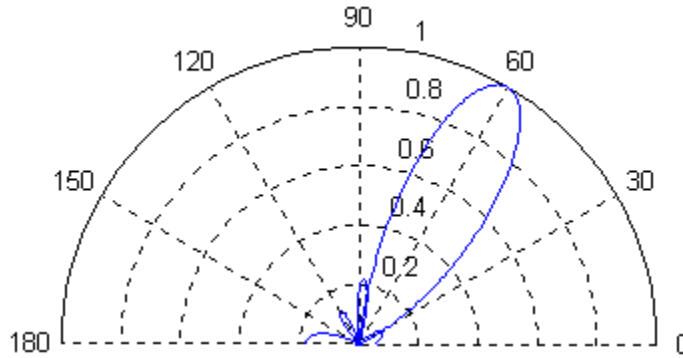


Figura A.0A - Diagrama do fator de arranjo com $\theta_o = 60^\circ$ ($N=3$, $d=\lambda/2$).

A.3 ARRANJO PLANAR

Para obtermos ângulos de radiação em duas dimensões, deve ser usado um arranjo planar de elementos radiadores. Para uma disposição em um *grid* retangular, o elemento (m,n) -ésimo é localizado por $x_m=md_x$ e $y_n=nd_y$. Devido suas características geométricas, os arranjos planar apresentam uma maior simetria em seus campos radiados.

Se M elementos são posicionados ao longo do eixo “x” como ilustrado na Figura 3.5, o fator de arranjo é dado por [11], [12]:

$$FA = \sum_{m=1}^M I_{m1} e^{j(m-1)(kd_x \sin\theta \cos\phi + \beta_x)} \quad (A.22)$$

sendo I_{m1} o coeficiente de excitação de cada elemento. O espaçamento e o deslocamento de fase entre os elementos ao longo do eixo “x” são representados, respectivamente, por d_x e β_x .

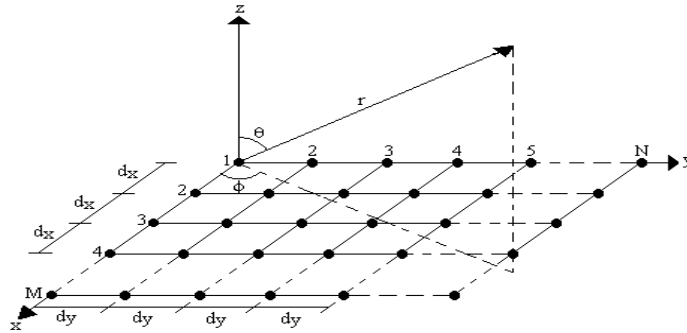


Figura A.05 - Geometria de um arranjo planar de $N \times M$ elementos.

Conforme a Figura 3.5, observa-se que N elementos são dispostos ao longo do eixo “y”, sendo d_y a distância entre eles e β_y o deslocamento de fase. Desta forma, o fator de arranjo pode ser calculado assumindo o vetor contribuição de cada elemento do arranjo em cada ponto no espaço.

$$FA = \sum_{n=1}^N I_{n1} \left[I_{m1} e^{j(m-1)(kd_x \sin\theta \cos\phi + \beta_x)} \right] e^{j(n-1)(kd_y \sin\theta \cos\phi + \beta_y)} \quad (A.23)$$

ou

$$(A.24)$$

$$FA = S_{xm} \times S_{yn}$$

sendo:

$$S_{xm} = \sum_{m=1}^M I_{m1} e^{j(m-1)(kd_x \sin \theta \cos \phi + \beta_x)} \quad (A.25)$$

$$S_{yn} = \sum_{n=1}^N I_{n1} e^{j(n-1)(kd_y \sin \theta \cos \phi + \beta_y)} \quad (A.26)$$

As equações (3.25) e (3.26) mostram que o fator de arranjo de um arranjo planar é o produto dos fatores nas direções “x” e “y”.

Se as amplitudes dos coeficientes de excitação dos elementos do arranjo na direção “y” são proporcionais em relação aqueles na direção “x”, a amplitude do (m,n)-ésimo pode ser escrita como:

$$I_{mn} = I_{m1} \cdot I_{n1} \quad (A.27)$$

Considerando a excitação de amplitude uniforme, a excitação total poderá ser definida por $I_{mn}=I_0$. Logo, o fator de arranjo será expresso como:

$$FA = I_0 \sum_{m=1}^M e^{j(m-1)(kd_x \sin \theta \cos \phi + \beta_x)} \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)(kd_y \sin \theta \cos \phi + \beta_y)} \quad (A.28)$$

Normalizando-se (3.28), obtém-se [11]:

$$FA = \left[\frac{1}{M} \frac{\sin\left(\frac{M}{2}\psi_x\right)}{\sin\left(\frac{\psi_x}{2}\right)} \right] \left[\frac{1}{N} \frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi_y\right)}{\sin\left(\frac{\psi_y}{2}\right)} \right] \quad (A.29)$$

sendo:

$$\psi_x = kd_x \sin \theta \cos \phi + \beta_x \quad (A.30)$$

$$\psi_y = kd_y \sin \theta \cos \phi + \beta_y \quad (A.31)$$

A.3.1 FASE E ESPAÇAMENTO ENTRE OS ELEMENTOS DE UM ARRANJO PLANAR

Em um arranjo retangular, o lóbulo principal ($m=n=0$) e os secundários são orientados a partir de:

$$kd_x \sin\theta \cos\phi + \beta_x = \pm 2m\pi \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (\text{A.32})$$

$$kd_y \sin\theta \cos\phi + \beta_y = \pm 2n\pi \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (\text{A.33})$$

As fases β_x e β_y são independentes, ou seja, os seus valores podem ser diferentes. Quando se deseja máxima radiação em uma certa localização $\theta=\theta_0$ e $\phi=\phi_0$, a variação da fase progressiva entre os elementos nas direções “x” e “y” é definida por [11]:

$$\beta_x = -kd_x \sin\theta_0 \cos\phi_0 \quad (\text{A.34})$$

$$\beta_y = -kd_y \sin\theta_0 \cos\phi_0 \quad (\text{A.35})$$

O lóbulo principal e os lóbulos de grade podem ser localizados por:

$$kd_x (\sin\theta \cos\phi - \sin\theta_0 \cos\phi_0) = \pm 2m\pi \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (\text{A.36})$$

$$kd_y (\sin\theta \sin\phi - \sin\theta_0 \cos\phi_0) = \pm 2n\pi \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (\text{A.37})$$

ou:

$$\sin\theta \sin\phi - \sin\theta_0 \cos\phi = \pm \frac{m\lambda}{d_x} \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (\text{A.38})$$

$$\sin\theta \sin\phi - \sin\theta_0 \cos\phi = \pm \frac{n\lambda}{d_y} \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (\text{A.39})$$

Manipulando-se, simultaneamente, as equações (A.38) e (A.39) obtém-se [11]:

$$\phi = \tan^{-1} \left[\frac{\sin\theta_0 \sin\phi_0 \pm \frac{n\lambda}{d_y}}{\sin\theta_0 \cos\phi_0 \pm \frac{m\lambda}{d_x}} \right] \quad (\text{A.40})$$

e

$$\theta = \text{sen}^{-1} \left[\frac{\text{sen}\theta_0 \cos\phi_0 \pm \frac{m\lambda}{d_x}}{\cos\phi} \right] = \text{sen}^{-1} \left[\frac{\text{sen}\theta_0 \text{sen}\phi_0 = \frac{n\lambda}{d_x}}{\text{sen}\phi} \right] \quad (\text{A.41})$$

O número de lóbulos de grade que podem ser projetados no espaço visível depende dos parâmetros d_x / λ e d_y / λ . Para evitar formação de lóbulos de grade no espaço visível, definido por [13]:

$$\cos^2 a_x + \cos^2 a_y = 1 \quad (\text{A.42})$$

sendo:

$$\cos a_x = \text{sen}\theta \cos\phi \quad (\text{A.43})$$

$$\cos a_y = \text{sen}\theta \text{sen}\phi \quad (\text{A.44})$$

o espaçamento entre os elementos d_x / λ e d_y / λ deve ser escolhido de forma que ocorra apenas um máximo do fator de arranjo. Esse ajuste de parâmetro é de forma similar ao apresentado para os arranjos lineares, sendo, portanto definidos por [1A], [28]:

$$\frac{d_x}{\lambda} < \frac{1}{1 + \text{sen}\theta_{0\max}} \quad (\text{A.45})$$

$$\frac{d_y}{\lambda} < \frac{1}{1 + \text{sen}\theta_{0\max}} \quad (\text{A.46})$$