



Universidade Federal do Rio Grande do Norte  
Centro de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Elétrica e Computação



## **Cálculo de parâmetros otimizados para superfícies seletivas em frequência por meio do método de otimização Taguchi**

**Jannayna Domingues Barros Filgueira**

Orientador: Prof. Dr. Antônio Luiz P. de Siqueira Campos

**Tese de doutorado** apresentada ao Programa de Pós- Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação (área de concentração: Telecomunicações) como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências

Número de ordem PPgEEC: D175  
Natal-RN, Julho de 2016.

### Catálogo da Publicação na Fonte

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Sistema de Bibliotecas Biblioteca  
Central Zila Mamede / Setor de Informação e Referência

Filgueira, Jannayna Domingues Barros.

Cálculo de parâmetros otimizados para superfícies seletivas de frequência por meio do método de otimização Taguchi / Jannayna Domingues Barros Filgueira. - 2016.

114 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação. Natal, RN, 2016.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Luiz P. de Siqueira Campos.

1. Método Taguchi - Tese. 2. Arranjo ortogonal - Tese. 3. Otimização de parâmetros - Tese. 4. Engenharia elétrica – Tese. 5. Engenharia de computação – Tese. I. Campos, Antônio Luiz P. de Siqueira. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 621.3:681.3

*O temor ao Senhor é o princípio de toda sabedoria.*

*Minha eterna gratidão a todos que colaboraram para realização deste sonho,  
em especial aos meus pais, Maria de Fátima Domingues Barros e Edmundo  
Barros Soares e ao meu esposo, Geam Carlos de Araújo Filgueira.*

---

# Agradecimentos

---

Agradeço antes de tudo a Deus, meu refúgio e fortaleza, aquele que mostra diariamente a sua fidelidade e seu amor por minha vida.

A minha mãe, Maria de Fátima, minha melhor amiga, que nunca me permitiu desistir e sempre renova minhas forças com seu sorriso e suas palavras de ânimo. Ao meu pai, Edmundo Barros, as minhas irmãs, Juliana e Gerciana. Obrigada pela educação que me foi dada e por sempre se alegrarem por todas minhas conquistas.

Ao meu esposo Geam Carlos de A. Filgueira por tudo que tem feito por mim e por nós. Pelos incentivos, conselhos, paciência, companhia e dedicação que tem sido fundamental nesta etapa das nossas vidas e principalmente, por ser o meu maior incentivador deste trabalho.

Ao meu amado filho, João Gabriel Domingues Filgueira, por ter tornado meus dias bem mais felizes, por ter sido meu companheiro nas longas madrugadas de estudo.

Ao professor e orientador Antônio Luiz Campos, pela dedicação, conhecimento compartilhado, amizade e principalmente pela sua paciência. Obrigada professor por tudo.

Ao professor Alfredo Gomes Neto, por sua dedicação, amizade e disponibilidade em sempre ajudar seus alunos. Mais uma vez professor, obrigada.

Aos amigos do PPG Gilmara, Wellington, Albanisa, Dhiego, Bruno e aos demais professores do PPGEEC.

A todos vocês, obrigada.

---

## Resumo

---

As superfícies seletivas em frequência (FSS) pertencem a uma subclasse dos metamateriais composto por *patches* metálicos bidimensionais. Por apresentar um comportamento seletivo de frequência, essas estruturas têm sido aplicadas nas áreas de micro-ondas e sistemas de comunicação, além de ser tema de pesquisa por parte de estudiosos. A literatura define basicamente uma superfície seletiva de frequência como um arranjo periódico de patches que exibe um determinado comportamento de filtragem de frequência podendo apresentar características de filtro rejeita-faixa ou passa-faixa que permite a reflexão ou a transmissão de sinais em uma determinada faixa de frequência. As FSS são utilizadas em diversas aplicações que vão desde sistemas de micro-ondas e antenas até aplicações em radomes e comunicações via satélite. Estruturas de FSS com comportamento Eletromagnético adequado têm sido estudadas por pesquisadores da área. Porém, a análise das características espectrais dessas estruturas requer técnica com elevada complexidade computacional. Para reduzir o esforço computacional relacionado ao tempo de processamento, podem ser utilizadas técnicas de otimização. Neste aspecto, esta pesquisa propõe a utilização de um método de otimização no projeto de FSS. Os métodos de otimização têm como objetivo obter os resultados de um sistema por meio do ajuste dos parâmetros de entrada, ou seja, ao ajustar estes parâmetros os métodos de otimização procuram um melhor resultado de saída de modo que o desempenho do sistema, em termos de qualidade, custo e eficiência, possam ser otimizados. Esses métodos podem ser aplicados em diversas áreas. Atualmente, na área do Eletromagnetismo, os circuitos de micro-ondas e antenas têm aplicado diversas técnicas de otimização como Algoritmos Genéticos (AG), Redes Neurais Artificiais (RNA) e Otimização com Enxame de Partículas (PSO). O método de otimização descrito nesta pesquisa foi desenvolvido com base no conceito do arranjo ortogonal, o Método Taguchi. Este método fornece uma maneira eficiente para escolher os parâmetros do projeto em um processo de

otimização e reduz efetivamente o número de experimentos requerido na aplicação. O Método Taguchi é aplicado com sucesso nas áreas de Engenharia Química e Engenharia Mecânica e mais recentemente têm-se aplicações na área de Eletromagnetismo, porém, sua aplicação em FSS é inédita. Neste estudo aplicamos o Método Taguchi em três estruturas de FSS: FSS quadrada, FSS quadrada com grade e dipolo cruzado. O objetivo do método é obter os melhores valores para parâmetros físicos da FSS, de modo que esta opere de forma satisfatória, de acordo com especificações determinadas no projeto. Utilizamos também nesta pesquisa o Método do Circuito Equivalente. A precisão do método Taguchi é verificada experimentalmente e comparada com as simulações realizadas no *ANSYS Designer*. Em seguida os protótipos são construídos e caracterizados experimentalmente.

**Palavras- chave:**

Método Taguchi, Arranjo ortogonal, Otimização de Parâmetros, Método do Circuito Equivalente, FSS.

---

## Abstract

---

Frequency Selective Surfaces (FSS) belong to a subclass of metamaterial consisting of two-dimensional metallic patches. By presenting a selective frequency behavior, these structures have been applied in the microwave and communication systems fields, in addition it is a research topic by scholars. The literature defines basically the Frequency Selective Surface as a periodic arrangement of patches that displays a certain frequency filtering and it may present characteristics of a band-stop or band-pass filter, which allows the reflection or the transmission of signals in a given frequency range. The FSS are used in diverse applications ranging from microwave and antennas systems to applications in radomes and satellite communications. Researchers have studied FSS structures with appropriate electromagnetic behavior. However, the analysis of spectral characteristics of these structures requires technique with high computational complexity. In order to reduce the computational effort related to the time of processing, it may be used optimization techniques. Concerning to it, this study proposes the use of an optimization method in the FSS design. Optimization methods are intended to get the best results of a system by tuning of the input parameters, that is, when these parameters are adjusted, the optimization methods seek a better output result so that the system performance, in terms of quality, cost and efficiency can be improved. These methods can be applied in various areas. Currently, in the Electromagnetism area, the microwave circuits and antennas have applied various optimization techniques like genetic algorithms (GA), Artificial Neural Networks (ANN) and Particle Swarm Optimization (PSO). The optimization method described in this research was developed based on the concept of the Orthogonal Arrangement, Taguchi Method. This method provides an efficient way to choose the project parameters in a process of optimization and it effectively reduces the number of experiments required in the application. Taguchi method is successfully applied in the chemical engineering and mechanical engineering fields and recently, there have been applications in the

Electromagnetism area, however, its application in FSS is unprecedented. In this study, it was applied the Taguchi Method in three structures of FSS: Square FSS, Square with grid FSS and Cross Dipole. The purpose of the method is to obtain the best values for physical parameters of the FSS, so that is operating in a satisfactory manner, in accordance with certain specifications in the project. It was also used in this research the Equivalent Circuit Method. The accuracy of Taguchi Method is verified experimentally and it is compared to the simulations performed in the ANSYS Designer ®. Then, the prototypes are built and measured in order to validate the experimental results.

**Key words:**

*Taguchi Method, Orthogonal Array, Optimization Parameters, Equivalent Circuit Method, FSS.*

---

# Sumário

---

<b>RESUMO</b>	<b>6</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>8</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>12</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS</b>	<b>15</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>17</b>
<b>1.INTRODUÇÃO</b>	<b>18</b>
<b>2.SUPERFÍCIE SELETIVA DE FREQUÊNCIA</b>	<b>22</b>
2.1. INTRODUÇÃO	22
2.2. ELEMENTOS DE FSS	25
2.4. TÉCNICAS DE ANÁLISE	27
2.5. TÉCNICAS DE MEDIÇÃO	29
2.6. FATORES QUE INFLUENCIAM A RESPOSTA FSS	31
2.7. APLICAÇÕES	34
2.8. SÍNTESE DO CAPÍTULO	35
<b>3.MÉTODO DO CIRCUITO EQUIVALENTE</b>	<b>36</b>
3.1. INTRODUÇÃO	36
3.2. FSS ESPIRA QUADRADA	39
3.3. FSS ESPIRA QUADRADA COM GRADE	41
3.4. FSS DIPOLO CRUZADO	42
3.5. EFEITO DO DIELÉTRICO	43
3.7. SÍNTESE DO CAPÍTULO	45
<b>4.MÉTODO TAGUCHI</b>	<b>46</b>
4.1. INTRODUÇÃO	47
4.2. ARRANJO ORTOGONAL	48
4.3. OTIMIZAÇÃO PELO MÉTODO TAGUCHI	51
4.4. PROCEDIMENTO DE IMPLEMENTAÇÃO DO MÉTODO TAGUCHI	55
4.5. MÉTODO TAGUCHI AJUSTADO	59
4.5.1 <i>Aumentar a diferença de nível inicial</i>	59
4.5.2 <i>Tratamento dos limites</i>	59
4.5.3 <i>Função gaussiana reduzida</i>	60
4.6. MÉTODO TAGUCHI ALEATÓRIO	60
4.7. APLICAÇÕES DO MÉTODO TAGUCHI	61
4.8. SÍNTESE DO CAPÍTULO	66
<b>5.RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS</b>	<b>70</b>
5.1. INTRODUÇÃO	70
5.2. FSS COM ESPIRA QUADRADA	72
5.3. FSS COM ESPIRA QUADRADA COM GRADE	80

5.4. DIPOLO CRUZADO	91
5.5. SÍNTESE DO CAPÍTULO	102
<b>6. CONCLUSÃO</b>	<b>103</b>
<b>ANEXO A - CONSTRUÇÃO DO ARRANJO ORTOGONAL</b>	<b>103</b>
<b>ANEXO B - MÉTODO AO-PSO</b>	<b>103</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>103</b>

---

# Lista de Figuras

---

## Capítulo 2

Figura 2.1 - Superfície seletiva de frequência com aberturas em forma arbitrária.....	23
Figura 2.2 - Tipos de elementos de FSS.....	24
Figura 2.3 - Filtros de FSS e suas respectivas respostas. ....	24
Figura 2.4 - Forma dos elementos das FSS.....	26
Figura 2.5 - Sistema para Medições de uma FSS [18]. ....	29
Figura 2.6 - Técnica de medição em FSS com lentes corretoras [18]. ....	30
Figura 2.7 - Técnica de medição em FSS com câmara anecóica [18]. ....	31
Figura 2.8 - Configuração de uma FSS entre camadas dielétricas (a) e sobre uma camada dielétrica [18]. ....	32
Figura 2.9 - Resposta em frequência de uma FSS quadrada mediante a variação da condutividade dos elementos [18]. ....	33

## Capítulo 3

Figura 3.1 - (a) Elementos tipo abertura (b) Elementos condutores [19]. ....	37
Figura 3.2 - Parâmetros para incidência TE: (a) Arranjo de fitas condutoras paralelas, (b) Ângulo de incidência e (c) Circuito equivalente. ....	37
Figura 3.3 - Parâmetros para incidência TM: (a) Arranjo de fitas condutoras paralelas, (b) Ângulo de incidência e (c) Circuito equivalente. ....	38
Figura 3.4 - Espiras quadradas: (a) Arranjo e parâmetros físicos e (b) Circuito equivalente. ....	40
Figura 3.5 - Espiras quadradas: (a) Arranjo e parâmetros físicos e (b) Circuito equivalente. ....	41
Figura 3.6 - Dipolos cruzados: (a) Arranjo e parâmetros físicos e (b) Circuito equivalente. ....	42
Figura 3.7 - Modelo de linha de transmissão de uma FSS embutida entre substratos dielétricos [18]. ....	44

## Capítulo 4

Figura 4.1 - Fluxograma de otimização do método Taguchi.....	52
Figura 4.2 - Arranjo linear com 20 elementos igualmente espaçados.....	62
Figura 4.3 - Geometria do filtro rejeita-faixa. ....	63
Figura 4. 4 - Geometria do filtro passa-faixa com 11 parâmetros a serem otimizados.....	64
Figura 4.5 - Proposta de geometria para uma antena UWB.....	64

## Capítulo 5

Figura 5.1 - Projeto de uma estrutura FSS.....	70
Figura 5.2 - Projeto de uma estrutura FSS com a otimização do método Taguchi.....	71
Figura 5.3 - Ilustração do arranjo de FSS quadrada a ser otimizado pelo método Taguchi. ....	73
Figura 5.4 - Curva de convergências para os parâmetros (a) p, (b) d e (c) w. .	76
Figura 5.5 - Comparação entre os resultados simulados da FSS com espira quadrada.....	77
Figura 5.6 - FSS quadrada construída. ....	78
Figura 5.7 - Setup de medição. ....	78
Figura 5.8 - Comparação entre os resultados medidos e simulados da FSS com espira quadrada [47]. ....	79
Figura 5.9 - FSS com espiras quadradas com grades. ....	81
Figura 5.10 - Curva de convergência para os parâmetros (a) p, (b) d, (c) w1 e (d) w2.....	88
Figura 5.11 - Comparação entre os resultados simulados da FSS com espira quadrada com grade.....	89
Figura 5.12 - FSS quadrada com grade construída. ....	90
Figura 5.13 - Comparação entre os resultados medidos e simulados da FSS com espira quadrada com grade [47]. ....	91
Figura 5.14 - Parâmetros físicos do dipolo cruzado. ....	92
Figura 5.15 - Curva de convergência para os parâmetros (a) p, (b) d e (c) w. .	98
Figura 5.16 - Comparação entre os resultados simulados para uma FSS com dipolo cruzado. ....	99

Figura 5.17 - Estrutura dipolo cruzado construído.....	100
Figura 5.18 - Setup de medição do dipolo cruzado. ....	101
Figura 5.19 - Comparação entre os resultados medidos e simulados para a FSS com dipolo cruzado.....	101

---

## Lista de Símbolos e Siglas

---

$p$	Periodicidade
$d$	Tamanho da espira
$w$	Largura da espira
$\lambda$	Comprimento de onda no espaço livre
$g$	Espaçamento entre as espiras
$f_i$	Frequência inicial
$f_o$	Frequência final
$f_{ci}$	Frequência de corte inicial
$f_{cf}$	Frequência de corte final
$f_r$	Frequência de ressonância
$h$	Espessura do substrato
$X_L$	Reatância
$B_C$	Susceptância
$Z_0$	Impedância no espaço livre
$\Gamma_{ent}$	Coeficiente de reflexão de entrada
$\epsilon_r$	Permissividade relativa
$\epsilon_{ef}$	Permissividade efetiva
$N$	Número de linhas do arranjo ortogonal
$K$	Colunas do arranjo ortogonal
$s$	Quantidade de níveis ou símbolos
$FSS$	Superfície seletiva de frequência
$MoM$	Método dos Momentos ( <i>Method of Moments</i> )

<i>MCE</i>	Método do circuito equivalente
<i>FDTD</i>	Diferenças finitas no domínio do tempo ( <i>Finite-Difference Time Domain</i> )
<i>FEM</i>	Método dos elementos finitos ( <i>Finite Element Method</i> )
<i>AO</i>	Arranjo ortogonal ( <i>Orthogonal Arrays</i> )
<i>GA</i>	Algoritmo genético ( <i>Genetic Algorithm</i> )
<i>PSO</i>	Otimização por enxame de partícula ( <i>Particle Swarm Optimization</i> )
<i>RNA</i>	Redes neurais artificiais
<i>BW</i>	Largura de banda ( <i>Bandwidth</i> )
<i>RSC</i>	<i>Radar cross section</i>
<i>ERB</i>	Estações rádio base
<i>LD</i>	Diferença de nível
<i>FF</i>	Função fitness
<i>CR</i>	Valor de convergência

---

# Lista de Tabelas

---

## Capítulo 2

Tabela 2.1 - Comparação do desempenho entre os diferentes elementos de FSS.....	27
---	----

## Capítulo 4

Tabela 4.1 - AO (9,3,3,2) de três níveis para os parâmetros P1, P2 e P3.....	49
Tabela 4.2 - AO (12, 4, 3, 2) de quatro níveis para os parâmetros P1, P2, P3 e P4 .....	50
Tabela 4.3 - Valores do níveis e de LD para cada parâmetro otimizado .....	55
Tabela 4.4 - O arranjo ortogonal (9,3,3,2), valores de nível, valores da função fitness e valores S/R para a primeira iteração do processo de otimização.	56
Tabela 4.5 - Cálculo para tabela de resposta.....	57
Tabela 4.6 - Tabela de resposta para primeira iteração do processo de otimização.....	58

## Capítulo 5

Tabela 5.1 - Especificação da FSS quadrada. ....	72
Tabela 5.2 - Intervalos de otimização dos parâmetros físicos.....	74
Tabela 5.3 - Parâmetros da FSS quadrada otimizados pelo método Taguchi. ....	76
Tabela 5.4 - Taxa de erro dos valores medidos e simulados da FSS quadrada. ....	79
Tabela 5.5 - Especificação da FSS com espira quadrada com grade.....	80
Tabela 5.6 - Intervalos de Otimização da FSS com espira quadrada com grade. ....	81
Tabela 5.7 - O arranjo ortogonal (12,4,3,2), valores de nível, valores da função fitness e valores S/R para a primeira iteração do processo de otimização da FSS quadrada com grade.....	84
Tabela 5.8 - Cálculo para tabela de resposta.....	85

Tabela 5.9 - Tabela de resposta da primeira iteração- FSS quadrada com grade.....	86
Tabela 5.10 - Parâmetros da FSS com espira quadrada com grade otimizados pelo Método Taguchi. ....	89
Tabela 5.11 - Taxa de erro dos valores medidos e simulados da FSS quadrada com grade.....	91
Tabela 5.12 - Especificações do dipolo cruzado. ....	92
Tabela 5.13 - Intervalos de otimização dos parâmetros físicos do dipolo cruzado.....	93
Tabela 5.14 - O arranjo ortogonal (9,3,3,2), valores de nível, valores da função de fitness e valores S/R para a primeira iteração do processo de otimização do dipolo cruzado. ....	95
Tabela 5.15 - Cálculo da tabela de resposta – dipolo cruzado.....	96
Tabela 5.16 - Tabela de resposta da primeira iteração - dipolo cruzado.....	97
Tabela 5.17 - Parâmetros do dipolo cruzado otimizados pelo método Taguchi. ....	99
Tabela 5.18 - Taxa de erro dos valores medidos e simulados da FSS quadrada com grade.....	102

---

# Capítulo 1

## Introdução

---

O desenvolvimento de estudos e pesquisas que envolvem as superfícies seletivas em frequência requer projetos de estrutura que funcionem de maneira eficiente, incluindo benefícios como baixo custo e facilidade de implementação, além de requerer baixo esforço computacional. Por apresentar um comportamento seletivo de frequência, essas estruturas têm sido aplicadas nas áreas de micro-ondas e sistemas de comunicação. O projeto dessas estruturas engloba o estudo dos parâmetros físicos a fim de obter características do funcionamento desejado.

Define-se superfície seletiva de frequência como um arranjo periódico de *patches* que exibe um determinado comportamento de filtragem de frequência. As propriedades de filtragem de frequência variam de acordo com o tipo de elemento, as dimensões da estrutura e a periodicidade entre as células da FSS. A análise das superfícies seletivas em frequência tem sido realizada por diferentes métodos a fim de entender seu comportamento segundo os parâmetros envolvidos no projeto da estrutura. Na literatura podemos encontrar diversas fórmulas de aproximação desenvolvidas para determinar as características de transmissão e reflexão de uma FSS, essas fórmulas levam em consideração a exatidão dos resultados, análise do tipo de elemento e o tempo computacional envolvido na solução do projeto. Alguns métodos utilizados são o Método do Circuito Equivalente (MCE), Método dos Momentos (MoM), Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (FDTD) e o Método dos Elementos Finitos (FEM). Geralmente esses métodos de análise consomem muito tempo e esforço computacional. Desse modo, algoritmos de otimização de parâmetros têm sido aplicados com sucesso no desenvolvimento dessas estruturas. Nesta pesquisa aplicamos o Método do Circuito Equivalente combinado com o método de otimização Taguchi. O desenvolvimento do método e os resultados obtidos serão expostos ao decorrer desse estudo.

Nesse contexto, circuitos de micro-ondas, tais como filtros, superfícies seletivas em frequência ou arranjos de antenas, requerem a utilização de

técnicas de otimização a fim de obter um bom resultado sem comprometer o seu desempenho, além de reduzir tempo computacional exigido. Algumas dessas técnicas são os Algoritmos Genéticos (GA), Otimização por Enxame de Partículas (PSO), Redes Neurais Artificiais (RNA), entre outros [1]-[9]. Os métodos de otimização podem ser divididos em duas categorias: técnicas globais e técnicas locais [10]. As técnicas globais têm várias vantagens em relação às técnicas locais e nas aplicações no eletromagnetismo as técnicas globais têm demonstrado melhores resultados do que as técnicas locais.

A definição básica de otimização consiste em um processo cujo objetivo é minimizar o esforço requerido e maximizar o resultado desejado. Os métodos de otimização têm como objetivo encontrar o melhor resultado por meio de ajuste dos parâmetros de entrada, a fim de melhorar o desempenho de um sistema. Recentemente, os métodos de otimização tem recebido grande atenção em diversas áreas de pesquisa, inclusive na área de eletromagnetismo, onde as aplicações são diversas e os resultados são bastante satisfatórios. Características como robustez e flexibilidade de projeto contribuem para que essas técnicas sejam amplamente utilizadas. Na literatura encontramos diversos trabalhos que utilizam métodos de otimização para melhorar o desempenho de estruturas com arranjo de antena, antenas UWB e filtros. Algumas pesquisas utilizam métodos híbridos. Esses estudos são apresentados na seção 4.8 desta pesquisa.

Nesta pesquisa utilizamos o método de otimização Taguchi. O método Taguchi é aplicado com sucesso nas áreas de Engenharia Química e Engenharia Mecânica e mais recentemente têm-se aplicações na área de Eletromagnetismo. Este é considerado um método de otimização global. Desenvolvido com base no conceito de arranjo ortogonal (AO), que oferece uma forma sistemática e eficiente para selecionar parâmetros de projeto, o método de otimização Taguchi fornece uma maneira eficiente para seleção dos parâmetros de projeto em um processo de otimização. Muitas áreas têm utilizado o método Taguchi. No Eletromagnetismo o método Taguchi foi aplicado com sucesso na otimização de estruturas. A literatura destaca que o método Taguchi tem como vantagem a fácil integração do método com outros métodos de otimização, assim como com os softwares comerciais [10]-[13].

Esta pesquisa tem como proposta, pela primeira vez, aplicar o método Taguchi na otimização dos parâmetros de superfícies seletivas em frequência (FSS) de modo que as estruturas analisadas atendam a uma resposta de frequência desejada. Para isto, três geometrias de FSS foram consideradas na análise: FSS de espira quadrada, FSS de espiras quadradas com grade e dipolo cruzado. Os experimentos numéricos foram realizados com o software Matlab©, em seguida as estruturas foram simuladas com o ANSYS Designer®, a partir dessa simulação as estruturas foram confeccionadas e caracterizadas experimentalmente em laboratório. Os resultados experimentais e numéricos obtidos foram comparados a fim de comprovar a eficácia do método.

Este documento está organizado da seguinte forma:

O Capítulo 2 apresenta o um estudo sobre as superfícies seletivas de frequência. Neste capítulo dar-se uma introdução geral e descrição dos elementos que compõem a FSS, seguido das técnicas de análise e técnicas de medição. Ao fim do capítulo os fatores que influenciam a resposta da FSS e suas aplicações são apresentados.

O Capítulo 3 é estudado os métodos de análise para FSS, mais precisamente o método aplicado nesta pesquisa, o Método do Circuito Equivalente. Os conceitos básicos do método são apresentados, em seguida as três geometrias de FSS utilizadas neste estudo foram analisadas. A última seção deste capítulo estuda de forma sucinta o efeito do dielétrico para que possamos entender como a permissividade elétrica relativa e a espessura do dielétrico afetam o comportamento da FSS.

No capítulo 4 o método de otimização Taguchi é estudado. O capítulo inicia-se com a descrição geral do método, em seguida um estudo sobre Arranjo ortogonal é apresentado. As etapas do processo de execução do método Taguchi são estudadas de forma detalhada por meio de um exemplo de otimização de FSS. Por fim apresenta-se um método híbrido de otimização que utiliza os conceitos de arranjo ortogonal, como também algumas das principais aplicações do método Taguchi na área de eletromagnetismo.

No capítulo 5 os resultados numéricos e experimentais desta pesquisa são apresentados. Inicialmente foi aplicado o método Taguchi em três estruturas de FSS. Para isto selecionamos as geometrias das estruturas e os parâmetros físicos a serem otimizados. As estruturas com os novos parâmetros obtidos foram simuladas no *ANSYS Designer*®. Na última seção deste capítulo as estruturas foram construídas e caracterizadas experimentalmente, sendo seus resultados comparados.

O último capítulo desta tese, o Capítulo 6, apresenta as conclusões desse estudo, seguido de sugestões para trabalhos futuros e continuidade desta pesquisa.

---

## Capítulo 2

# Superfície Seletiva de Frequência

---

As superfícies seletivas em frequência pertencem a uma subclasse dos metamateriais composto por *patches* metálicos bidimensionais. Por apresentar um comportamento seletivo de frequência, essas estruturas têm sido aplicadas nas áreas de micro-ondas e sistemas de comunicação, além de ser tema de pesquisa por parte de estudiosos.

Neste capítulo é apresentado um estudo sobre as superfícies seletivas de frequência. No início, dar-se uma introdução geral, seguido por uma descrição dos elementos que compõem uma FSS, suas técnicas de análise e técnicas de medição. Em seguida os fatores que influenciam a resposta de uma FSS são expostos, bem como suas principais aplicações.

### 2.1. Introdução

Os primeiros registros referentes às superfícies seletivas em frequência datam de 1786, nos relatos científicos de Francis Hopkinson e Rittenhouse. O físico americano investigou difrações ópticas e descobriu que algumas cores do espectro de luz eram suprimidas quando uma lâmpada era observada por meio de um lenço de seda, ou seja, este fenômeno era capaz de decompor um feixe de luz monocromático em suas ordens espectrais [14].

O fenômeno descrito por Rittenhouse mostrou a dependência da resposta em frequência com as dimensões físicas. Este fenômeno também fundamental para qualquer anteparo constituído de elementos condutores ou aberturas espaçadas periodicamente. De forma genérica, define-se FSS como sendo uma tela de metal perfurada periodicamente com aberturas que podem assumir diferentes formas, amplamente utilizadas nas faixas de micro-ondas. A Figura 2.1 ilustra de forma básica esta definição. A configuração de cada elemento, bem como o espaçamento entre eles contribui para a forma como os campos são espalhados, ou seja, a forma e o tamanho das aberturas, a

periodicidade e a espessura da tela de metal determinam a resposta em frequência da FSS [15].

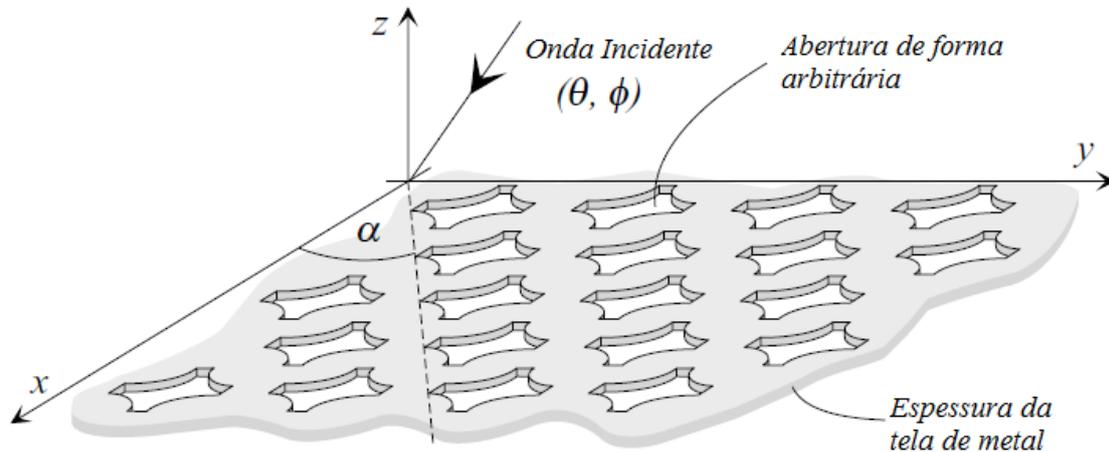


Figura 2.1 - Superfície seletiva de frequência com aberturas em forma arbitrária.

Em 1919 cientistas desenvolveram um refletor parabólico usando seções de fio de meio comprimento de onda [16]. As décadas de 60 e 70 marcaram o desenvolvimento dos estudos e pesquisas das FSS devido as potenciais aplicações militares. Desde então essas estruturas tem sido alvo de pesquisas em diversas áreas.

A literatura define basicamente uma Superfície Seletiva de Frequência como um arranjo periódico de patches que exibe um determinado comportamento de filtragem de frequência podendo apresentar características de filtro rejeita-faixa ou passa-faixa. Este comportamento permite a reflexão ou a transmissão de sinais em uma determinada faixa de frequência. As propriedades de filtragem de frequência variam de acordo com o tipo de elemento, as dimensões da estrutura e a periodicidade entre as células da FSS. A Figura 2.2 ilustra uma FSS com elementos do tipo abertura e elementos tipo condutores.

A FSS com elementos do tipo abertura comporta-se como um filtro passa-faixa, ou seja, na medida em que os elementos vão entrando em ressonância, a estrutura vai se tornando transparente para a onda incidente,

até que na frequência de ressonância da estrutura, ocorre a transmissão total da onda. Por outro lado, a FSS com elementos condutores funciona como um filtro rejeita-faixa [16]. Essas estruturas podem ser classificadas em quatro categorias de resposta de filtros, dependendo de sua construção física, material e geometria: rejeita-faixa; passa-faixa; passa-baixa e passa-alta, como ilustrado na Figura 2.3.

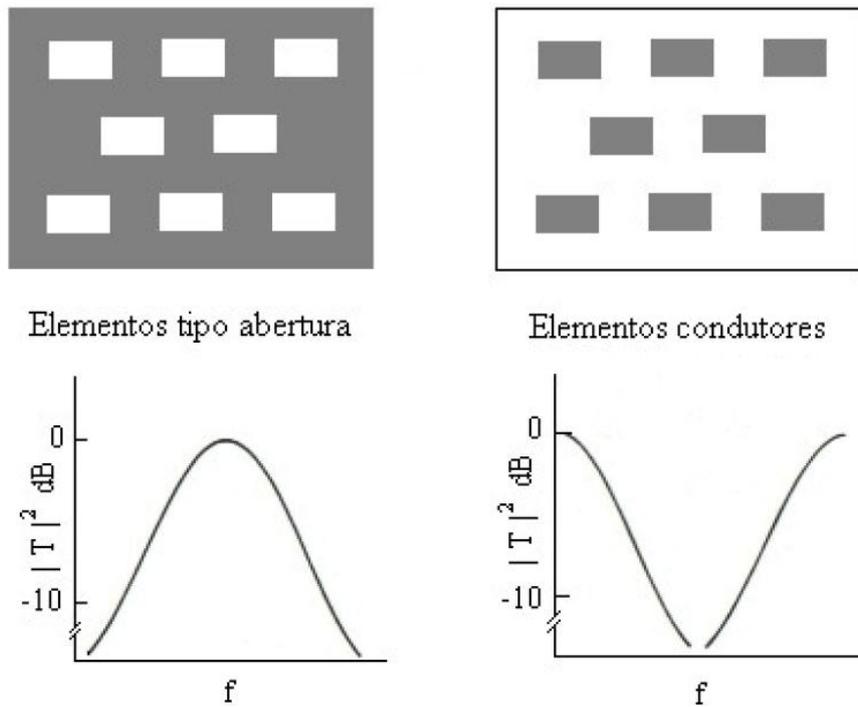


Figura 2.2 - Tipos de elementos de FSS.

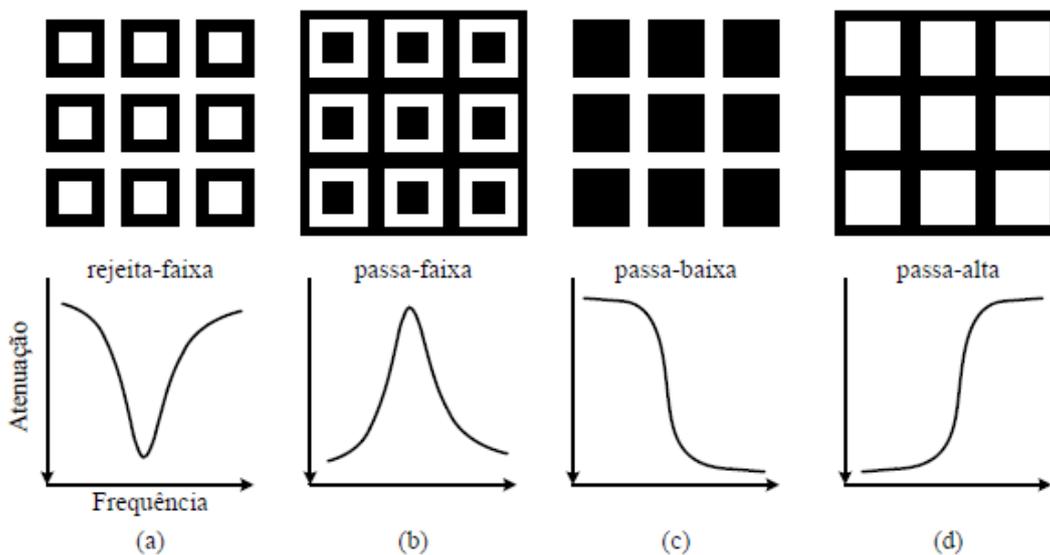


Figura 2.3 - Filtros de FSS e suas respectivas respostas.

## 2.2. Elementos de FSS

A forma dos elementos de uma FSS não se limita a arranjos do tipo *patch* ou elementos tipo abertura. Eles podem ser do tipo pólos conectados pelo centro, dipolos, cruzado, tripolos, Cruz de Jerusalém, elementos de interior sólidos, ou elementos constituídos de combinação. Cada tipo de geometria dos elementos oferece diferentes respostas em frequência para uma FSS. A forma desses elementos será ilustrado na Figura 2.4.

As FSS podem ser classificadas em dois diferentes tipos: Ativa e Passiva. Esta classificação é de acordo com a capacidade de reconfiguração dinâmica das características de filtragem espacial. A FSS passiva é aquela em que as estruturas periódicas são fabricadas sobre um substrato dielétrico para uma determinada frequência a ser transmitida ou refletida. A vantagem destas FSS é que elas são de fácil concepção e fabricação, mas apresentam como desvantagem o fato de não serem reconfiguráveis. Uma vez que esta superfície é fabricada, suas propriedades não podem ser alteradas.

Uma FSS ativa é composta de estruturas periódicas que incorporam dispositivos ativos, tais como diodos PIN ou diodos varactor, no modelo da FSS. Esta estrutura é reconfigurável, porém tem como desvantagem o custo de fabricação, o consumo de energia e a necessidade de uma fonte de alimentação DC.

Os elementos de uma FSS podem assumir diferentes formas que combinadas entre si fornecem diferentes características de multibanda, largura de banda, estabilidade angular, entre outros. Em relação às técnicas de fabricação de uma FSS, a técnica mais adequada depende da aplicação específica da FSS, da faixa de frequência de operação e da precisão requerida. Segundo Munk [16], os elementos utilizados em uma FSS podem ser divididos em quatro grupos, descritos abaixo.

- Grupo 1: N-pólos ou conectados ao centro, como os dipolos e tripolos. Estes elementos podem ser combinados com outros elementos para produzir novas configurações de FSS.

- Grupo 2: Tipo espira, como circular, quadrado e espira hexagonais.
- Grupo 3: Interior sólido, ou *patches* de várias formas.
- Grupo 4: Combinações dos grupos anteriores.

Além dos elementos citados acima podemos acrescentar os elementos fractais e convolucionais. Uma descrição detalhada desses elementos pode ser encontrada na literatura [16]. A Figura 2.4 ilustra as formas dos elementos descritos acima.

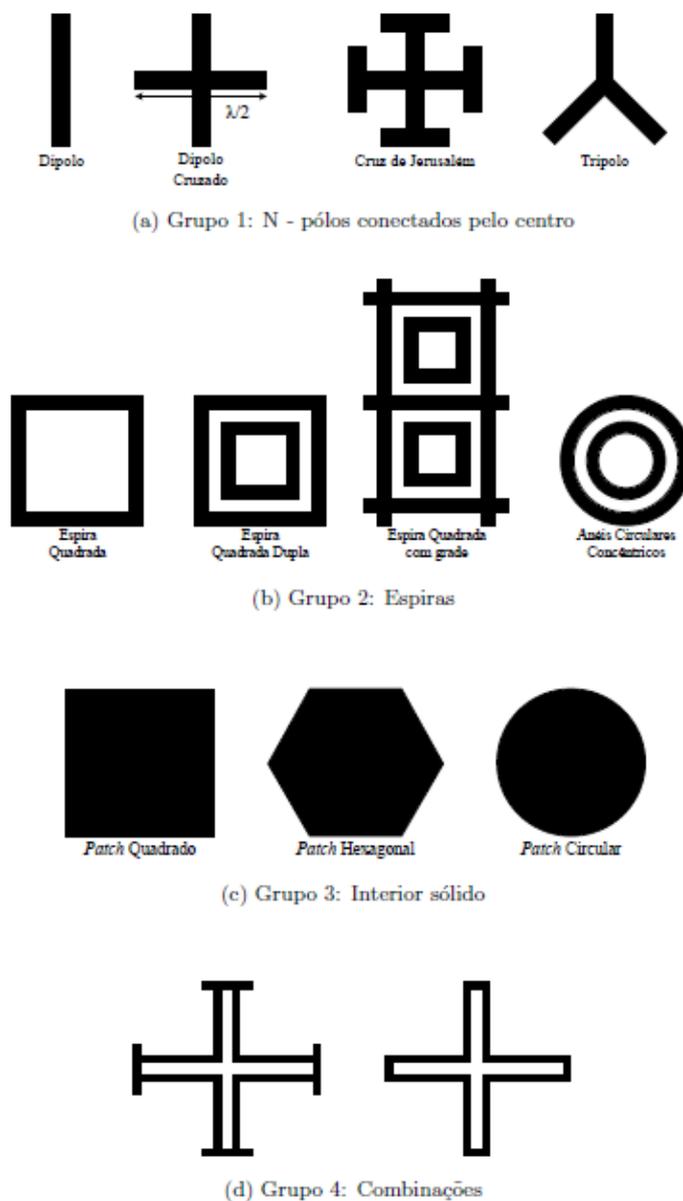


Figura 2.4 - Forma dos elementos das FSS

Cada forma possui sua frequência característica que irá depender diretamente das dimensões dos elementos, sendo algumas formas mais sensíveis aos ângulos de incidência, permitindo rápida transição entre as bandas de passagem e rejeição. Na literatura podemos encontrar uma tabela que compara o desempenho de alguns projetos de FSS, tendo por base critérios como a estabilidade angular, o nível de polarização cruzada, a maior largura de banda e a menor banda de separação [17].

Tabela 2.1 - Comparação do desempenho entre os diferentes elementos de FSS.

<b>Forma dos elementos</b>	Estabilidade angular	Nível de polarização cruzada	Maior largura de banda	Menor banda de separação
<b>Dipolo</b>	4	1	4	1
<b>Cruz de Jerusalém</b>	2	3	2	2
<b>Espira quadrada</b>	1	1	1	1
<b>Anéis circulares</b>	1	2	1	1
<b>Tripolo</b>	3	3	3	2
<b>Dipolo cruzado</b>	3	3	3	3

Classificação: melhor = 1, segunda melhor = 2,...

Analisando a tabela verifica-se que o Dipolo é bastante sensível ao ângulo de incidência (classificação 4), enquanto a espira quadrada apresenta-se como a melhor estrutura, se comparada as demais, visto que obteve classificação 1 em cada característica de desempenho analisada.

## 2.4. Técnicas de Análise

Diferentes técnicas/métodos têm sido utilizado para análise de superfícies seletivas em frequência a fim de entender seu comportamento segundo os parâmetros envolvidos no projeto da estrutura. Na literatura

podemos encontrar diversas fórmulas de aproximação desenvolvidas para determinar as características de transmissão e reflexão de uma FSS, todas elas levam em consideração a exatidão dos resultados, análise do tipo de elemento e o tempo computacional envolvido na solução do projeto [14]-[17]. Porém não há nenhuma técnica que consiga atender a todas essas exigências simultaneamente na análise de uma estrutura. De modo geral, as técnicas de análise de FSS podem ser divididas em três categorias: técnica da teoria do circuito, técnicas da expansão modal e técnicas iterativas.

O Método do circuito equivalente é considerado uma dos métodos mais simples e que produz resultados satisfatórios. Neste método os segmentos em forma de fita que compõem os elementos de um arranjo periódico são modelados como componentes indutivos e capacitivos em uma linha de transmissão [15]. A solução do circuito irá fornecer as características de transmissão e reflexão da FSS. Nesta pesquisa utilizamos o Método do Circuito Equivalente combinado com o Método Taguchi. Ambos os métodos serão descritos detalhadamente nos capítulos seguintes.

A técnica mais comum utilizada na análise FSS é o Método dos Momentos (MoM – *Method of the Moments*). Outro método empregado na análise de FSS é o da Expansão Modal, este método avalia o fluxo de corrente sobre os elementos condutores, combinando o campo tangencial à superfície do elemento e formando uma equação integral para a corrente desconhecida. Este permite uma análise detalhada das respostas de frequência e polarização, além de permitir o entendimento físico da sua operação [18].

A técnica das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (FDTD) e o Método dos Elementos Finitos (FEM) também têm sido aplicado à análise das FSS, ambas podem ser aplicadas a estruturas arbitrárias, porém são técnicas lentas que demandam um grande esforço computacional. A FDTD é uma técnica no domínio do tempo e permite analisar as perdas dielétricas e magnéticas de qualquer tipo de elemento, além de permitir a análise de estruturas não homogêneas. Já as técnicas FEM e MoM analisam as estruturas periódicas no domínio da frequência.

Atualmente, métodos híbridos têm sido utilizados na análise de FSS. Técnicas como interpolação racional de Krylov, Método dos Momentos em conjunto com elementos finitos, estão sendo usados na modelagem de elementos de forma complexa. Metaheurísticas baseadas em computação neural, como Algoritmos Genéticos, PSO, também têm sido utilizados com sucesso na análise dessas estruturas.

## 2.5. Técnicas de medição

Diferentes técnicas podem ser utilizadas para medir as propriedades de transmissão e reflexão de uma FSS. Um dos métodos mais empregado e utilizado neste estudo é ilustrado na Figura 2.5. Nesta técnica um medidor utiliza antenas cornetas como transmissora e receptora. Após o sinal da antena incidir sobre a FSS cria-se uma densidade de corrente nos *patches* de metal, onde há uma filtragem de frequência e apenas as bandas de interesse chegarão a antena receptora [18]. O que determina quais frequências será ou não refletida é a periodicidade e as formas dos elementos.

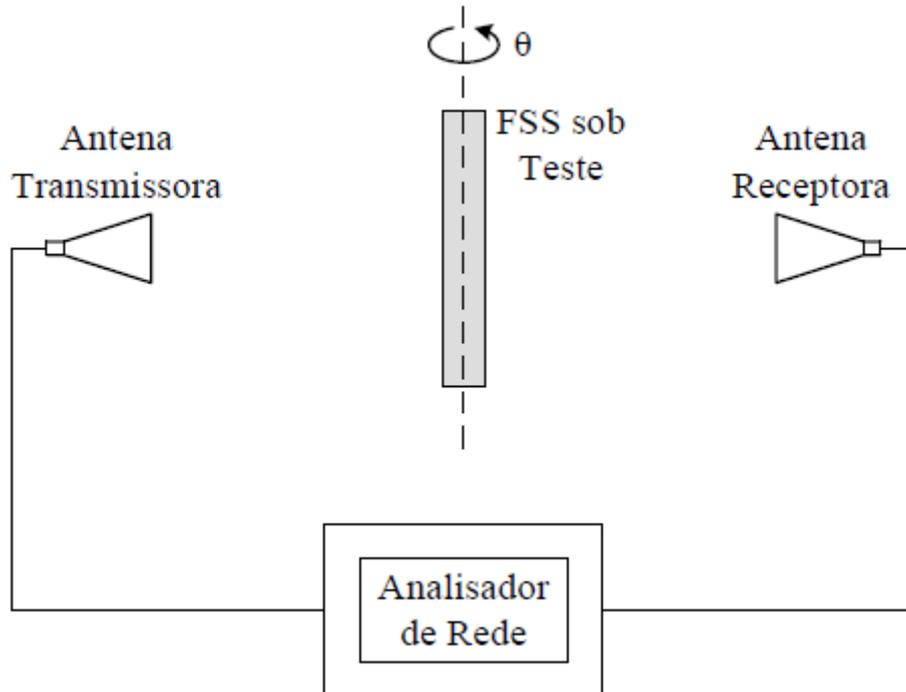


Figura 2.5 - Sistema para Medições de uma FSS [18].

Nesta técnica, ao alterar a polarização das antenas de vertical para horizontal podemos medir as características de transmissão TE e TM.

Geralmente os experimentos são realizados em câmeras anecóicas que simulam o espaço livre, porém erros pode ocorrer nas medidas de reflexão devido às difrações ocasionadas nas bordas da estrutura. Duas configurações de medições podem contornar este problema de difração das bordas. A primeira usa um medidor com antenas cornetas e lentes cuja função é transformar a onda esférica emitida das antenas cornetas em um feixe colimado de ondas planas, como ilustrado na Figura 2.6. Assim, este medidor pode ser usado em medições que exijam uma maior precisão das características de espalhamento, como polarização TE e TM [15]. A segunda, ilustrada na Figura 2.7, utiliza absorvedores em torno da estrutura para eliminar as difrações nas bordas, as antenas possuem uma distância o suficiente para garantir a existência de ondas planas, as reflexões são eliminadas por meio dos absorvedores em torno da estrutura.

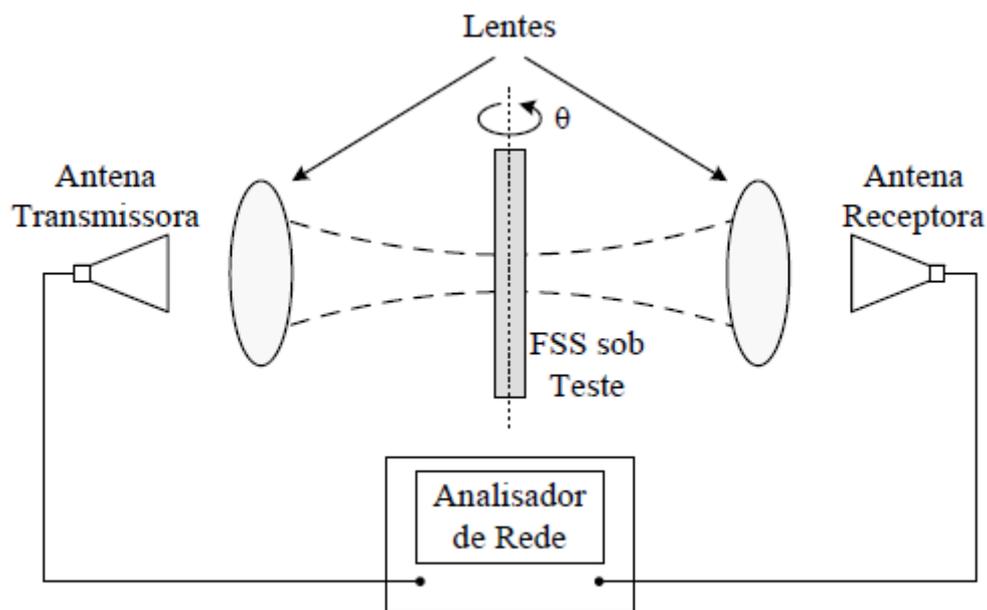


Figura 2.6 - Técnica de medição em FSS com lentes corretoras [18].

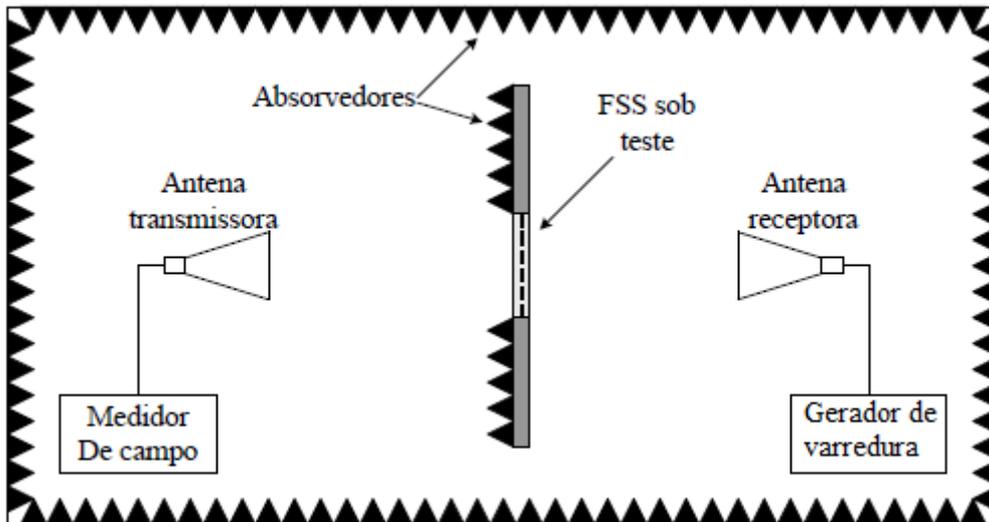


Figura 2.7 - Técnica de medição em FSS com câmara anecóica [18].

Outra técnica de medição utiliza um guia de onda que fornece uma alternativa para medições do desempenho de transmissão e reflexão da FSS. Nesta técnica, a FSS sob teste deve estar encaixada adequadamente às paredes do guia de onda de modo que não altere a periodicidade da FSS. Porém esta técnica apresenta como desvantagem a dependência da frequência, pois o número de ondas dentro do guia varia de acordo com a frequência, assim esta técnica é adequada para medidas em uma única frequência além de produzir erros e ser limitada a polarização TE.

## 2.6. Fatores que influenciam a resposta FSS

Os principais fatores que influenciam a resposta de uma FSS podem ser descritos em quatro aspectos: a geometria dos elementos, a condutividade dos elementos, o substrato dielétrico empregado na FSS e o ângulo de incidência.

A geometria dos elementos e o substrato dielétrico são fatores que atuam principalmente na frequência de ressonância da FSS, fato que os tornam fundamentais no desenvolvimento do projeto de uma estrutura. De acordo com os requisitos de aplicação, diversas formas de FSS podem ser escolhidas para satisfazer algumas exigências ou requisitos apresentados na Tabela 2.1. Como mencionado anteriormente, as formas dos elementos de uma FSS são tão variados quanto suas aplicações. Pesquisas recentes tem

mostrado que um melhor desempenho de FSS pode ser alcançado com padrões de elementos mais sofisticados, como por exemplo, as FSS com diversas camadas ou espiras quadradas dupla, que pode oferecer múltiplas bandas de rejeição.

Como supracitado, o substrato dielétrico influencia diretamente na frequência de ressonância de uma FSS, sendo este usado para fornecer suporte físico e estabilidade na resposta à variação angular em uma FSS [19] [20]. A configuração da FSS em relação ao substrato dielétrico pode está disposta em duas formas: a FSS pode encontrar-se entre os dois substratos dielétricos ou a FSS pode estar sobre apenas um substrato dielétrico [18]. As duas configurações são ilustradas na Figura 2.8.

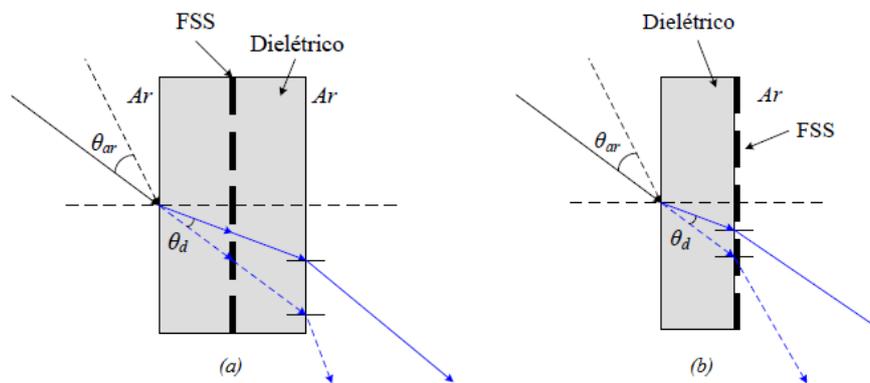


Figura 2.8 - Configuração de uma FSS entre camadas dielétricas (a) e sobre uma camada dielétrica [18].

A espessura do substrato dielétrico também influencia diretamente na frequência de ressonância da FSS.

A condutividade dos elementos influencia no desempenho da FSS em termos qualitativos, como por exemplo, na resposta de transmissão da FSS. A energia eletromagnética ao incidir sobre uma FSS produz correntes que irradiam as ondas eletromagnéticas a partir dos elementos condutores. Como citado anteriormente, a FSS pode ser projetada como um elemento indutivo ou capacitivo que armazena energia de acordo com a forma dos seus elementos. A variação da condutividade em uma FSS influencia diretamente no seu desempenho. A Figura 2.9 ilustra o desempenho de uma FSS de espira

quadrada de acordo com a variação da condutividade dos elementos. A baixa condutividade do elemento pode ser representada por um resistor em série com os componentes L e C do circuito equivalente, de modo que a introdução de um componente com perdas diminui a atenuação da estrutura, ou seja, a atenuação da frequência de ressonância é reduzida à medida que aumenta-se a resistência [21].

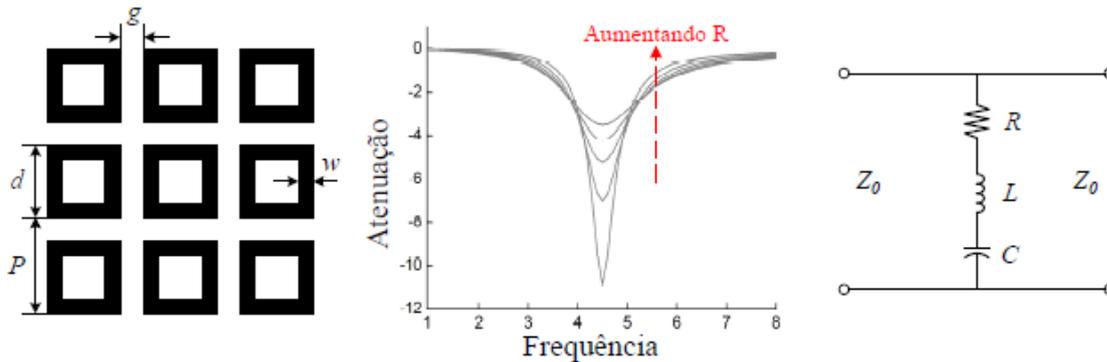


Figura 2.9 - Resposta em frequência de uma FSS quadrada mediante a variação da condutividade dos elementos [18].

Em relação ao ângulo de incidência, é desejável que uma FSS funcione de forma consistente sob ampla gama de ângulos de incidência. A resposta de uma FSS sofre variações de acordo com o ângulo de incidência da onda eletromagnética. Essa variação na resposta pode ser demonstrada pelas equações de circuito equivalente [21], de modo que as equações que calculam os valores indutivos e capacitivos dependem do ângulo de incidência, logo a frequência de ressonância de uma FSS também está em função deste ângulo. Como exemplo, uma FSS de elementos quadrados terá sua frequência de ressonância deslocada para frequências menores a medida que o ângulo de incidência aumenta.

A polarização do sinal também influencia na resposta de uma FSS. Porém, pode ser indesejável que o desempenho da FSS seja afetado pela polarização do sinal e pela variação do ângulo de incidência. Como solução, sugere-se um projeto de FSS que leve em consideração aspectos importante como a escolha apropriada das dimensões dos elementos. Seguindo este

propósito, esta pesquisa sugere o Método Taguchi como mecanismo de escolha das melhores dimensões para os elementos de uma FSS.

## 2.7. Aplicações

As aplicações das estruturas periódicas têm contribuído de forma significativa para o desenvolvimento de novas tecnologias. Essas aplicações envolvem projetos que melhorem a compatibilidade eletromagnética, podendo atuar na prevenção de interferência entre antenas, redução de ruídos em radar, segurança para redes sem fio locais (WLAN), dentre outras. As aplicações típicas de FSS exploram suas propriedades de filtragem para evitar, por exemplo, interferências eletromagnéticas entre antenas que operam em faixas de frequência sobrepostas, também podendo ser usada para análise da frequência ou a resposta angular de uma antena.

As aplicações de FSS ocorrem em diversas frequências do espectro eletromagnético. FSS tem várias aplicações na região GHz e THz, tanto para fins científicos como fins comerciais. Na faixa de micro-ondas, estas estruturas são amplamente utilizadas, como por exemplo no projeto de sistema de antenas refletoras de banda dupla (*dual band*), banda tripla (*tri band*) e multi-banda. Nesta mesma faixa de frequência, as FSS também são utilizadas no projeto de absorvedores eletromagnéticos planares a fim de reduzir o peso, volume e custo dessas estruturas.

Podemos afirmar que a aplicação mais conhecida de uma FSS seja o anteparo da porta do forno de micro-ondas. Agindo como um filtro passa-alta, este anteparo limita à área interna do forno à faixa de frequência de micro-ondas de 2,4 GHz, mas deixa passar a faixa de frequência de luz visível, embora a porta do forno de micro-ondas seja opticamente transparente, ela atua essencialmente como uma blindagem de metal que retém as frequências de micro-ondas geradas internamente.

Superfícies seletivas em frequência podem ser usadas para permitir a varredura espacial de frequência, sendo projetadas de maneira que a onda difratada de primeira ordem se propague como um feixe varredor de frequência, enquanto o feixe refletido é anulado. As FSS podem ser projetadas

para que sejam transparentes em determinada faixa de frequência e opacas em outras faixas, como por exemplo, nas aplicações navais [22][23] ou espaciais [24]-[27]. Essas estruturas também são amplamente aplicadas à radomes, sendo estes projetados para produzir características de filtros passa-faixa e são utilizados em conjunto com um sistema de antena para reduzir a seção transversal de radar (*RCS - Radar Cross Section*) da antena fora da sua banda de operação, assim os sinais de certa faixa de frequência passam pelo radome com o mínimo de perda de inserção, enquanto as transmissões indesejadas são totalmente refletidas.

FSS também podem ser projetadas para trabalhar acoplada com células coletoras de energia solar. Nesta aplicação a FSS é um anteparo passa-faixa transparente na faixa de frequência cujas células solares são mais eficientes e reflete as frequências que encontram-se fora desta faixa. Nos últimos anos, com o desenvolvimento da tecnologia de telefonia móvel, as superfícies seletivas em frequência têm sido aplicadas com o intuito de reduzir o ruído gerado pelos aparelhos e as interferências eletromagnéticas, as FSS são instaladas sobre paredes ou janelas para bloquear as ondas eletromagnéticas entre as ERB (Estações Radio Base) e os aparelhos celulares. Nesta pesquisa três elementos de FSS foram projetados e analisados a fim de validar o método de otimização de parâmetros empregado.

## **2.8. Síntese do capítulo**

Neste capítulo foi apresentado de forma sucinta um estudo sobre as Superfícies Seletivas de Frequência, descrevendo os principais tipos de elementos que essa estrutura pode ter além de apresentar as principais técnicas de análise e de medição de uma FSS. Ao fim do capítulo são descritos alguns fatores que podem influenciar no desempenho da FSS e em seguida são apresentados suas principais aplicações.

---

## Capítulo 3

### Método do Circuito Equivalente

---

Neste capítulo é apresentada a análise de superfícies seletivas em frequência com base na modelagem do circuito equivalente (MCE). No início uma introdução geral sobre o método é apresentada. Em seguida as três geometrias de FSS utilizadas neste estudo foram analisadas: FSS quadrada, FSS quadrada dupla e FSS de dipolo cruzado. A última seção deste capítulo estuda de forma sucinta o efeito do dielétrico para que se possa entender como a permissividade elétrica relativa e a espessura do dielétrico afetam o comportamento da FSS.

#### 3.1. Introdução

Com o desenvolvimento das pesquisas que envolvem as estruturas de superfícies seletivas em frequência (FSS), houve a necessidade de desenvolver métodos que oferecessem resultados precisos em relação às medições e que permitisse um reduzido esforço computacional.

Um método menos complexo, geralmente utilizado, com resultados satisfatórios é o Método do Circuito Equivalente. Neste método, os vários segmentos de fita do arranjo que compõem o elemento *patch* são representados como elementos capacitivos e/ou indutivos, conectados por linhas de transmissão de  $377 \Omega$ . Com a solução deste circuito, têm-se as informações sobre transmissão e reflexão da FSS. De modo geral, na literatura encontramos duas classificações para a geometria das FSS: FSS indutivas (com comportamento semelhante a um filtro passa-alta) e FSS capacitivas (com comportamento semelhante a um filtro passa-baixa). FSS capacitivas e indutivas têm seus nomes derivados da teoria dos circuitos [19]. A Figura 3.1 ilustra as FSS projetadas a partir de *patches* periódicos retangulares e *patches* de abertura, que atuam de forma similar a um circuito capacitivo e circuito indutivo, respectivamente.

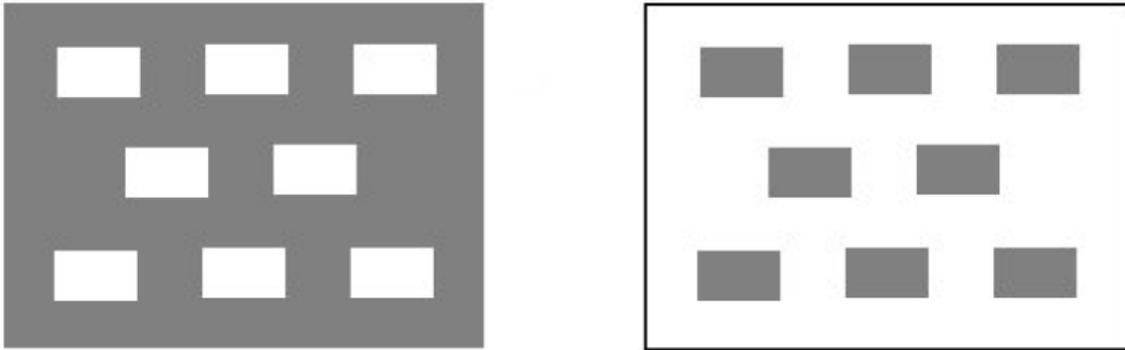


Figura 3.1 - (a) Elementos tipo abertura (b) Elementos condutores [19].

A modelagem de grade de fitas condutoras paralelas foi inicialmente proposta por Marcuvitz [21]. Vários estudos foram desenvolvidos a partir deste modelo, como por exemplo o trabalho de Lee e Zarrillo [28], que apresentaram melhorias à modelagem proposta por Marcuvitz. O estudo desenvolvido por Luukkonen [29], apresenta a modelagem de diversos tipos de grades, porém algumas limitações dos modelos apresentados são devido ao fato desses modelos serem específicos para determinado elemento de FSS, além do autor não considerar as influências do substrato dielétrico.

O arranjo das fitas para incidência TE é mostrado na Figura 3.2. As fitas metálicas têm uma espessura nula, uma largura,  $w$ , e periodicidade,  $p$ . A onda plana incide sobre as fitas com um ângulo  $\phi$ . A influência do substrato dielétrico e do ângulo de incidência sobre a FSS será discutido nas sessões seguintes.

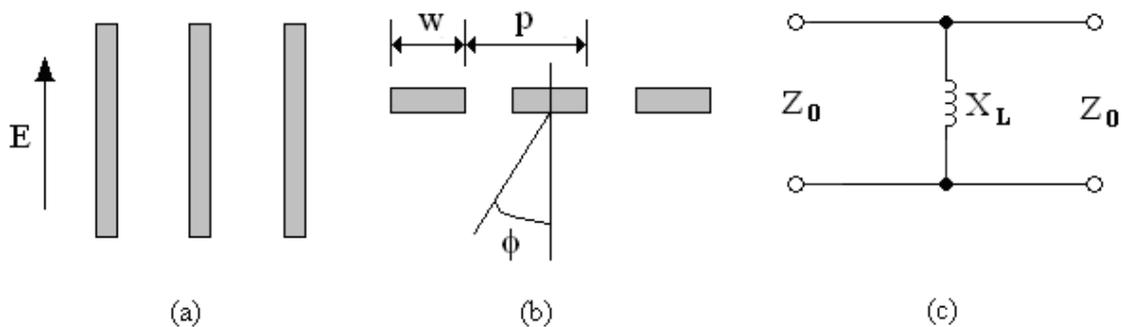


Figura 3.2 - Parâmetros para incidência TE: (a) Arranjo de fitas condutoras paralelas, (b) Ângulo de incidência e (c) Circuito equivalente.

A reatância indutiva é dada por:

$$\frac{X_L}{Z_0} = F(p, w, \lambda, \phi) = \frac{p \cos \phi}{\lambda} \left\{ \ln \left[ \operatorname{cosec} \left( \frac{\pi w}{2p} \right) \right] + G(p, w, \lambda, \phi) \right\} \quad (3.1)$$

Em que,

$$G(p, w, \lambda, \phi) = \frac{0.5(1 - \beta^2)^2 \left[ \left( 1 - \frac{\beta^2}{4} \right) (C_+ + C_-) + 4\beta^2 C_+ C_- \right]}{\left( 1 - \frac{\beta^2}{4} \right) + \beta^2 \left( 1 + \frac{\beta^2}{2} - \frac{\beta^4}{8} \right) (C_+ + C_-) + 2\beta^6 C_+ C_-} \quad (3.2)$$

$$C_{\pm} = \frac{1}{\sqrt{1 \pm \frac{2p \operatorname{sen} \phi}{\lambda} - \left( \frac{p \cos \phi}{\lambda} \right)^2}} - 1 \quad (3.3)$$

$$\beta = \operatorname{sen} \left( \frac{\pi w}{2p} \right) \quad (3.4)$$

e  $\lambda$  é o comprimento de onda no espaço livre.

O circuito equivalente para a representação da incidência TM é ilustrado na Figura 3.3.

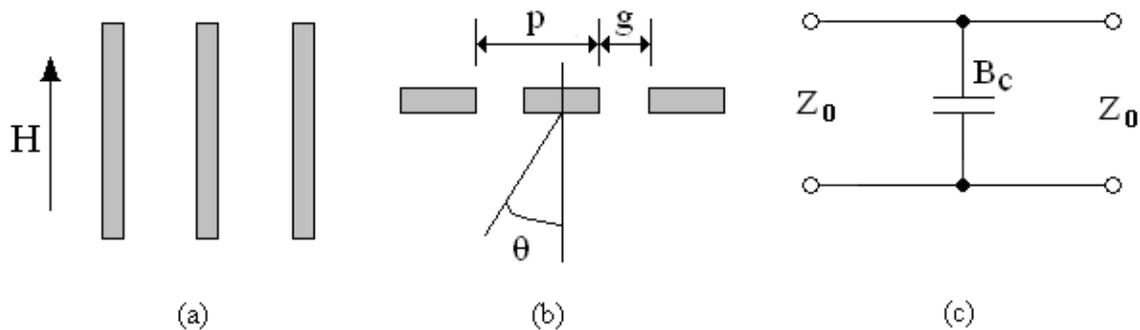


Figura 3.3 - Parâmetros para incidência TM: (a) Arranjo de fitas condutoras paralelas, (b) Ângulo de incidência e (c) Circuito equivalente.

O vetor campo magnético incidente é paralelo às fitas metálicas e incide em um ângulo  $\theta$ . As fitas têm periodicidade  $p$  e uma lacuna de espaçamento  $g$ . A susceptância capacitiva é calculada pela seguinte equação:

$$\frac{B_c}{Z_0} = 4F(p, g, \lambda, \theta) = \frac{4p \cos\theta}{\lambda} \left\{ \ln \left[ \operatorname{cosec} \left( \frac{\pi w}{2p} \right) \right] + G(p, g, \lambda, \theta) \right\} \quad (3.5)$$

A função  $G(p, g, \lambda, \theta)$  pode ser calculada pela Equação 3.2, substituindo na Equação 3.3  $\phi$  por  $\theta$  e na Equação 3.4  $w$  por  $g$ .

## 3.2. FSS espira quadrada

Arranjos periódicos de espiras quadradas são interessantes para aplicações de superfícies seletivas em frequência em refletor dicróico de antenas. A técnica de modelagem para esse tipo de elemento também é baseada nas equações dadas por Marcuvitz [21]. Estas equações são particularmente úteis para o projeto no qual o circuito equivalente pode ser facilmente modelado e as equações podem ser implementadas em computadores pessoais. O método tem algumas limitações, uma vez que é geralmente útil somente para a incidência normal de ondas planas e, sendo uma formulação escalar, não fornece qualquer informação sobre polarização cruzada.

Um arranjo de espira quadrada e seus parâmetros físicos são ilustrados na Figura 3.4(a). As FSS com espiras quadradas podem ser representadas por um circuito equivalente com um componente indutivo em série com um componente capacitivo. Os parâmetros físicos da estrutura são a periodicidade do arranjo,  $p$ , a largura da fita da espira,  $w$ , e o lado da espira,  $d$ . A Figura 3.4(b) ilustra o circuito equivalente desse arranjo, que é representado por uma reatância,  $X_L$ , e uma susceptância,  $B_c$ ,  $Z_0$  é a impedância no espaço livre.

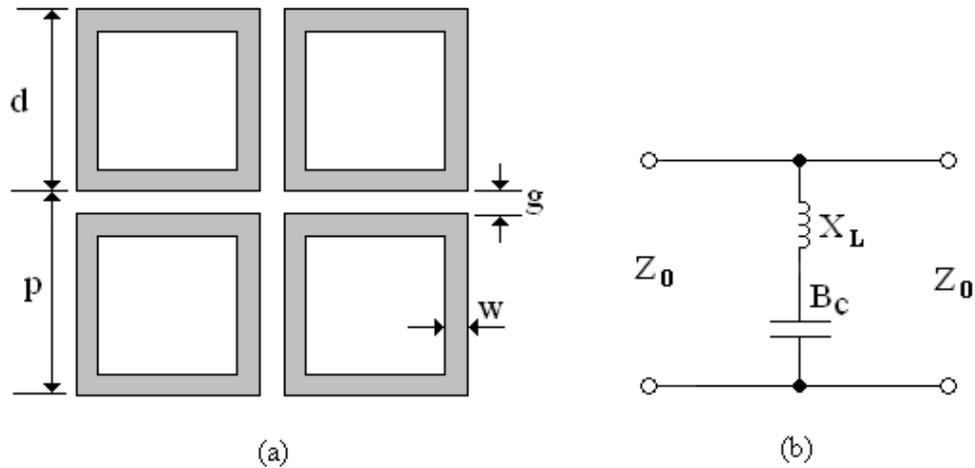


Figura 3.4 - Espiras quadradas: (a) Arranjo e parâmetros físicos e (b) Circuito equivalente.

Para o arranjo de espiras quadradas ilustrado na Figura 3.4(a), a reatância  $X_L$  é dada por:

$$\frac{X_L}{Z_0} = \frac{d}{p} F(p, 2w, \lambda, \phi), \quad (3.6)$$

em que a função  $F(p, 2w, \lambda, \phi)$  foi fornecida pela Equação 3.1.

A susceptância  $B_c$  é dada por:

$$\frac{B_c}{Z_0} = 4 \frac{d}{p} F(p, g, \lambda, \theta), \quad (3.7)$$

em que  $g$  é o espaçamento entre as espiras ( $g = p - d$ ). Percebe-se que a impedância é reduzida por um fator  $\frac{d}{p}$ .

Um substrato dielétrico fino, sobre o qual os elementos condutores são impressos, provoca um aumento na susceptância do arranjo, enquanto que não produz efeito significativos na reatância indutiva. A Equação 3.7 é corrigida para:

$$\frac{B_c}{Z_0} = 4\epsilon_r \frac{d}{p} F(p, g, \lambda, \theta). \quad (3.8)$$

### 3.3. FSS espira quadrada com grade

Arranjos periódicos de espiras quadradas com grades são úteis para suprimir harmônicas. A Figura 3.5(a) ilustra o arranjo da FSS com espiras quadradas com grades e seus parâmetros físicos. Os parâmetros físicos da estrutura são a periodicidade do arranjo,  $p$ , a largura da fita da espira,  $w_1$ , a largura da fita da grade,  $w_2$ , o lado da espira,  $d$  e o espaçamento entre a espira e a grade,  $g$ . A Figura 3.5(b) ilustra o circuito equivalente desse arranjo.

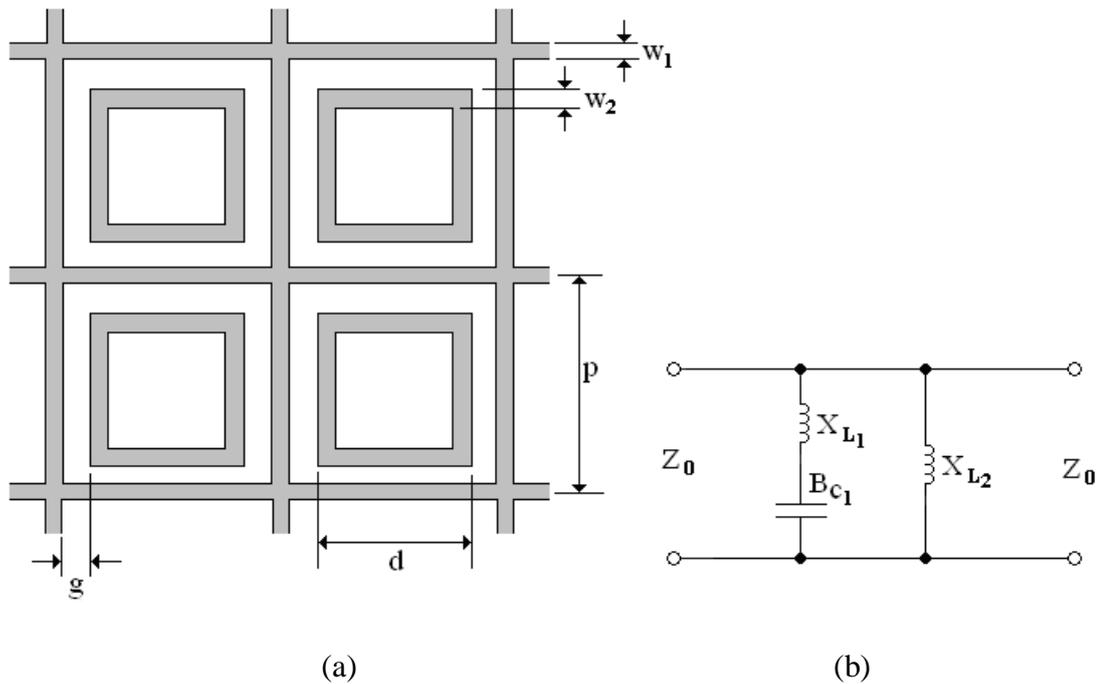


Figura 3.5 - Espiras quadradas: (a) Arranjo e parâmetros físicos e (b) Circuito equivalente.

Para as espiras quadradas com grade, as reatâncias e capacitância são dadas por:

$$\frac{X_{L1}}{Z_0} = 2 (X_{L2} // X_{L3}) \quad (3.9)$$

$$\frac{X_{L2}}{Z_0} = F(p, w_1, \lambda, \phi) \quad (3.10)$$

$$\frac{X_{L3}}{Z_0} = F(p, 2w_2, \lambda, \phi) \frac{d}{p} \quad (3.11)$$

$$\frac{B_{c1}}{Z_0} = 2 \varepsilon_r F(p, g, \lambda, \theta) \frac{d}{p} \quad (3.12)$$

### 3.4. FSS dipolo cruzado

As FSS com dipolos cruzados, assim como as espiras quadradas, podem ser representadas por um circuito equivalente com um componente indutivo em série com um componente capacitivo.

Um arranjo de dipolos cruzados e seus parâmetros físicos são ilustrados na Figura 3.6(a). Os parâmetros físicos da estrutura são a periodicidade do arranjo,  $p$ , a largura da fita do dipolo cruzado,  $w$ , e o comprimento do dipolo cruzado,  $d$ . A Figura 3.6(b) ilustra o circuito equivalente desse arranjo, que é representado por uma reatância,  $X_L$ , e uma susceptância,  $B_C$ .

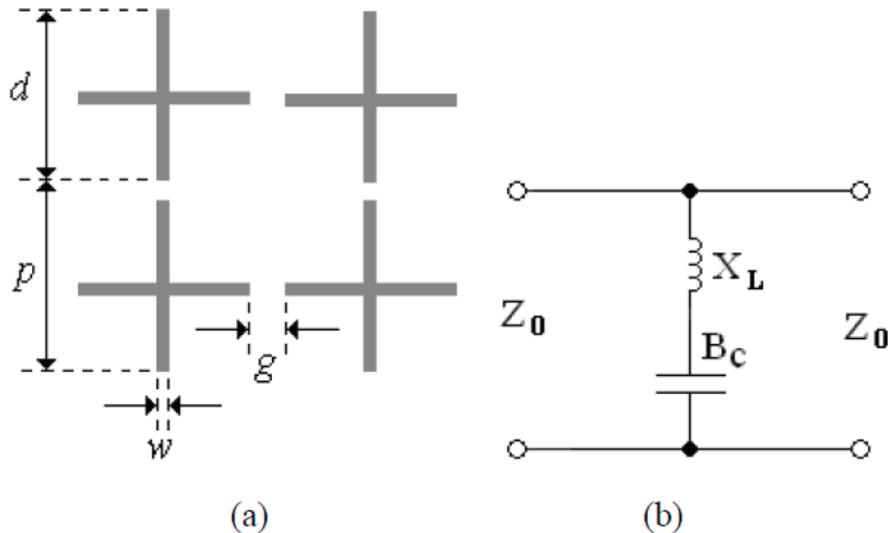


Figura 3.6 - Dipolos cruzados: (a) Arranjo e parâmetros físicos e (b) Circuito equivalente.

Para o arranjo de dipolos cruzados ilustrados acima, a reatância  $X_L$  é dada por:

$$\frac{X_L}{Z_0} = \frac{d}{p} F(p, w_1, \lambda, \phi) \quad (3.13)$$

A susceptância  $B_C$  é dada por:

$$\frac{B_C}{Z_0} = 2 \frac{d}{p} F(p, g, \lambda, \theta) \quad (3.14)$$

em que  $g$  é o espaçamento entre os dipolos cruzados ( $g = p - d$ ).

### 3.5. Efeito do dielétrico

Para estruturas de FSS consideradas ideais (*freestanding*), a frequência de ressonância depende de parâmetros relacionados às células, como a periodicidade e espaçamento entre os elementos adjacentes, dependendo da geometria adotada. Por exemplo, nos elementos ligados pelo centro a frequência de ressonância ocorre quando cada segmento do elemento tiver um quarto do comprimento de onda do centro à extremidade. Nos elementos do tipo espira, a ressonância ocorrerá quando sua circunferência média for de um comprimento de onda. Já os elementos de interior sólido são mais difíceis de estimar a ressonância, porém deve-se considerar que os elementos devem ter lado de aproximadamente meio comprimento de onda.

Sabe-se que na prática uma configuração ideal não existe e placas dielétricas são usadas como suporte estrutural. O uso das placas dielétricas é justificado por razões mecânicas e pelo fato dessas placas ajudarem a manter constante a frequência de ressonância e largura de banda sob incidência angular. Na literatura encontramos alguns estudos que demonstram a influência do dielétrico na resposta de uma FSS, como o estudo de Luebbers *et al.*[30], que utilizou uma solução de análise modal que incluía os efeitos de placas dielétricas em ambos os lados de um arranjo de FSS e demonstrou que os efeitos do dielétrico podem reduzir ou eliminar as alterações indesejadas na frequência de ressonância e largura de banda, desde que o projeto esteja adequado. Vários outros estudos, como o de Callaghan *et al.*[31], demonstraram que as variações na resposta angular pode ser reduzidas quando dielétricos

são aplicados, porém é fundamental compreender como as diferentes propriedades dielétricas a podem afetar a resposta de uma FSS.

A impedância equivalente de uma superfície seletiva de frequência impressa sobre um substrato dielétrico é modificada na proporção da constante dielétrica e da espessura do dielétrico. Portanto é necessário que, ao modelo de linha de transmissão, sejam incorporados linhas adicionais representando as camadas dielétricas [18]. A Figura 3.7 ilustra um modelo de linha de transmissão entre camadas dielétricas.

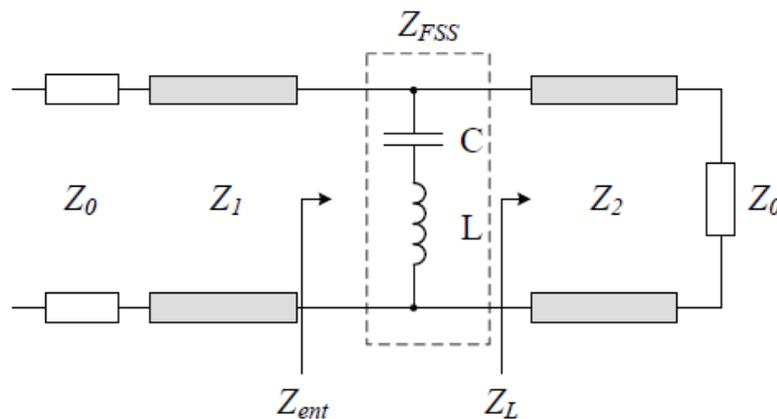


Figura 3.7 - Modelo de linha de transmissão de uma FSS embutida entre substratos dielétricos [18].

A impedância de entrada da estrutura é dada pela equação abaixo:

$$Z_{ent} = Z_1 \frac{1 + \Gamma_{ent}}{1 - \Gamma_{ent}}, \quad (3.15)$$

onde  $\Gamma_{ent}$  é o coeficiente de reflexão de entrada dado pela equação:

$$\Gamma_{ent} = \frac{Z_0 (1 + \Gamma_d) - Z_1 (1 + \Gamma_d)}{Z_0 (1 + \Gamma_d) + Z_1 (1 + \Gamma_d)} e^{j2\beta_1 d} \quad (3.16)$$

em que  $Z_1$  é a impedância da primeira camada dielétrica vista pela onda e  $\Gamma_d$  é o coeficiente de reflexão da nova estrutura.

Os elementos que compõem o circuito de uma FSS são em função da permissividade relativa  $\epsilon_r$  do substrato, mais especificamente da

permissividade efetiva  $\epsilon_{ef}$ , que pode ser usada para variar a frequência de ressonância de uma FSS, do ponto de vista do seu circuito equivalente.

Considerando um substrato com permissividade fixa, o aumento da espessura do substrato leva a uma redução na ressonância da FSS. Caso a estrutura periódica esteja completamente envolvida pelo material dielétrico de espessura infinita, a frequência de ressonância será reduzida por um fator  $\sqrt{\epsilon_r}$ . Caso a espessura seja finita, a frequência de ressonância mudará para um valor entre  $f_r$  e  $f_r/\sqrt{\epsilon_r}$ .

### 3.7. Síntese do capítulo

Neste capítulo foi apresentada a análise de superfícies seletivas em frequência com base na modelagem do circuito equivalente (MCE). No início uma introdução geral sobre o método foi apresentada. Em seguida as três geometrias de FSS utilizadas neste estudo foram analisadas: FSS quadrada, FSS dupla e FSS de dipolo cruzado. A última seção deste capítulo apresentou de forma sucinta o efeito do dielétrico para que se possa entender como a permissividade elétrica relativa e a espessura do dielétrico afetam o comportamento da FSS.

---

## Capítulo 4

### Método Taguchi

---

Em geral, experiências são usadas para estudar o desempenho de um sistema ou processo. De acordo com os resultados podem-se ajustar os valores dos parâmetros do sistema na experiência seguinte para atingir um desempenho melhor, o que é chamado de uma abordagem de tentativa e erro. A desvantagem dessa estratégia surge quando o resultado obtido não é o ideal ou quando os requisitos do sistema não podem ser satisfeitos após um grande número de experiências. De forma alternativa, pode-se querer testar todas as combinações dos parâmetros de uma experiência, o que é chamado de experimento fatorial completo. Essa estratégia pode chegar a cobrir todas as possibilidades no experimento e chegar de fato ao resultado satisfatório, no entanto serão necessários muitos experimentos, o que demanda na prática muito custo e tempo de processamento. Para resolver essas dificuldades descritas, métodos de otimização são desenvolvidos com o intuito de reduzir de forma eficaz o número de testes necessários em um processo ou sistema.

Deste modo, neste capítulo estuda-se o método de otimização Taguchi. No início dar-se uma introdução geral sobre o método Taguchi, seguido de um estudo sobre o arranjo ortogonal, na seção seguinte o processo de otimização é exposto. Para um melhor entendimento do método Taguchi são detalhadas as etapas do processo de execução usando como exemplo uma das estruturas de FSS otimizadas nesta pesquisa. Em seguida um estudo sobre ajustes necessários para a boa convergência do método é apresentado. As últimas seções deste capítulo dedicam-se a apresentar um método híbrido de otimização que utiliza os conceitos de arranjo ortogonal, como também são apresentadas algumas das principais aplicações do método Taguchi na área de eletromagnetismo.

## 4.1. Introdução

Os métodos de otimização têm como objetivo obter os melhores resultados de um sistema por meio do ajuste dos parâmetros de entrada, ou seja, ao ajustar estes parâmetros os métodos de otimização procuram um melhor resultado de saída de modo que o desempenho do sistema, em termos de qualidade, custo e eficiência, possam ser melhorados [10]. Esses métodos podem ser aplicados em diversas áreas. Atualmente, na área do Eletromagnetismo, os circuitos de micro-ondas e antenas têm aplicado diversas técnicas de otimização como Algoritmos genéticos (AG), Redes neurais artificiais (RNA) e Otimização com enxame de partículas (PSO).

Estes métodos buscam auxiliar no projeto de estruturas, como por exemplo, nos projetos de antenas e das superfícies seletivas em frequência (FSS), melhorando suas características físicas, como ganho, largura de banda e diagrama de radiação, ou obtendo geometrias adequadas para construção dessas estruturas. Os métodos tradicionais de otimização, baseado na tentativa e erro, exigem numerosos experimentos para obter bons resultados [32]. Em geral, os métodos de otimização podem ser divididos em duas categorias: globais e locais. As técnicas globais apresentam como vantagem a independência das variáveis de entrada além de ter um bom desempenho ao lidar com espaços de soluções descontínuos, porém sua principal desvantagem é a taxa de convergência que é lenta. As técnicas locais têm como principal vantagem a rápida convergência dos resultados, contudo dependem fortemente das variáveis de entrada.

Nas aplicações em eletromagnetismo prefere-se o uso das técnicas globais em relação às técnicas locais, pois elas costumam encontrar soluções úteis quando técnicas locais falham. Os métodos globais são particularmente úteis quando se lida com novos problemas em que a natureza do espaço solução é relativamente desconhecida [10].

O método descrito nesta pesquisa foi desenvolvido com base no conceito do arranjo ortogonal, este fornece uma maneira eficiente para escolher os parâmetros do projeto em um processo de otimização e reduz

efetivamente o número de experimentos requerido na aplicação, pois o método Taguchi converge rapidamente para a estrutura desejada, o que requer menos recursos computacionais [32],[33].

O método Taguchi é aplicado com sucesso nas áreas de Engenharia Química e Engenharia Mecânica e mais recentemente têm-se aplicações na área de Eletromagnetismo. Desenvolvido pelo Dr. Genechi Taguchi, o método tem as seguintes vantagens [10],[34]:

- Fácil implementação;
- Proporciona uma redução efetiva da quantidade de experimentos requeridos;
- Oferece rápida convergência;
- Apresenta independência dos valores iniciais dos parâmetros de otimização.

## 4.2. Arranjo ortogonal

O desenvolvimento do método Taguchi é baseado em matrizes ou arranjos ortogonais que proporcionam uma maneira eficiente para determinar os parâmetros de modo que o resultado ideal possa ser encontrado com poucos experimentos.

No método Taguchi a notação  $AO(N, K, s, t)$  é usada para representar um arranjo ortogonal, onde  $N$  determina o número de linhas do arranjo,  $K$  a quantidade de colunas e  $s$  a quantidade de níveis do método. As  $K$  colunas de um arranjo ortogonal representam os parâmetros que precisam ser otimizados e as  $N$  linhas representam a quantidade de experimentos que serão realizados a cada iteração do método [34]-[36].

A definição de arranjo ortogonal é apresentada em [10]. Seja  $S$  um conjunto de  $s$  símbolos ou níveis. A matriz  $A$  de  $N$  linhas e  $K$  colunas com  $S$  entradas é dito um arranjo ortogonal com  $s$  níveis e força  $t$  ( $0 \leq t \leq k$ ) se em cada  $N \times t$  do subarranjo de  $A$ , cada  $t$  com base em  $S$  aparece exatamente às mesmas vezes como uma linha. As Tabelas 4.1 e 4.2 apresentam os arranjos

ortogonais utilizados nesta pesquisa. O primeiro arranjo ortogonal com 9 linhas e 3 colunas foi utilizado neste estudo na análise de duas estruturas, FSS quadrada e FSS com dipolo cruzado. O segundo arranjo com 12 linhas e 4 colunas foi aplicado na estrutura de FSS quadrada com grade. Os resultados obtidos serão discutidos no capítulo seguinte.

Tabela 4.1 - AO (9,3,3,2) de três níveis para os parâmetros P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub> e P<sub>3</sub>

Experimentos	Parâmetros		
	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>
1	1	1	1
2	1	2	3
3	1	3	2
4	2	2	2
5	2	3	1
6	2	1	3
7	3	3	3
8	3	1	2
9	3	2	1

Para cada coluna do arranjo ortogonal da Tabela 4.1, as entradas 1, 2 e 3 representam três níveis específicos que cada parâmetro de otimização P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub> e P<sub>3</sub>, pode selecionar. Porém, para os diferentes parâmetros de otimização, os níveis 1, 2 e 3 podem corresponder a diferentes valores numéricos, ou seja, os valores correspondentes para os níveis dependem dos parâmetros e variam de acordo com a aplicação. Cada linha do arranjo ortogonal descreve uma combinação dos níveis destes parâmetros. Deve-se observar que um arranjo ortogonal com um maior número de níveis também pode ser usado no método de otimização Taguchi, como por exemplo, um arranjo ortogonal de cinco

níveis pode ser usado, porém cada parâmetro de otimização terá cinco opções de ajuste, no entanto quanto mais níveis houver no arranjo ortogonal maior será a quantidade de experimentos que devem ser realizados dentro de cada iteração.

Tabela 4.2 - AO (12, 4, 3, 2) de quatro níveis para os parâmetros P1, P2, P3 e P4

Experimentos	Parâmetros			
	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>
1	1	1	1	2
2	1	2	3	3
3	1	3	2	1
4	1	1	1	2
5	2	2	3	3
6	2	3	2	1
7	2	1	1	2
8	2	2	3	3
9	3	3	2	1
10	3	1	1	2
11	3	2	3	3
12	3	3	2	1

A definição do arranjo ortogonal garante uma seleção equilibrada e justa dos parâmetros em todas as combinações possíveis. O arranjo ortogonal possui três propriedades fundamentais para execução do método Taguchi.

A primeira propriedade é a fatorial fracionária onde a quantidade de experimentos necessários para obter o resultado desejado é reduzido de forma considerável. Utilizando o exemplo da Tabela 4.1, com 3 parâmetros a serem otimizados, cada um com 3 níveis, percebe-se que uma estratégia fatorial completa precisaria de  $3^3 = 27$  experimentos. Ao aplicar o arranjo ortogonal, apenas 9 experimentos serão necessários. Considerando a Tabela 4.2 que inclui 4 parâmetros para serem otimizados, onde cada parâmetro tem 3 níveis, uma estratégia fatorial completa precisaria de  $4^3 = 64$  experimentos. Em contraste, ao usar do arranjo ortogonal, apenas 12 experimentos são necessários. Embora o número de experimentos seja reduzido de forma significativa, segundo a literatura, os resultados estatísticos afirmam que os resultados obtidos a partir do arranjo ortogonal são próximos aos obtidos a partir a abordagem fatorial [10].

A segunda propriedade fundamental determina que todas as combinações possíveis dos parâmetros ocorressem igualmente, o que garante uma combinação equilibrada e justa dos níveis para qualquer parâmetro e quaisquer iterações de parâmetros, assim todos os níveis de um parâmetro são testados de forma igualitária. Considerando ainda os exemplos das Tabelas 4.1 e 4.2, para cada parâmetro (coluna), os níveis 1, 2 e 3 tem a mesma quantidade de ocorrências.

A terceira propriedade determina que se uma ou mais colunas forem excluídas de um AO, a matriz resultante continua sendo um AO, porém com menos número de parâmetros.

Os arranjos ortogonais utilizados neste estudo foram retirados da literatura [10].

### **4.3. Otimização pelo método Taguchi**

O processo de otimização inicia-se com a seleção do arranjo ortogonal adequado e da função *fitness* ou função de adaptação. A seleção do arranjo ortogonal depende principalmente do número de parâmetros que estão sendo otimizados [34]. Nesta pesquisa os arranjos ortogonais foram escolhidos de acordo com as necessidades da aplicação. No Anexo A desta tese encontra-se

o procedimento para construção de um arranjo ortogonal, disponível também na literatura [10]. Foram selecionados da literatura dois arranjos ortogonais, AO (9,3,3,2) composto por 9 linhas, 3 colunas e 3 níveis e AO (12,4,3,2) composto por 12 linhas, 4 colunas e 3 níveis. Segundo a literatura, um AO com  $t = 2$  é eficiente para maioria dos problemas, pois resulta em poucas linhas na matriz.

A Figura 4.1 ilustra o fluxograma de execução do método Taguchi. A função *fitness* é escolhida de acordo com o objetivo da otimização. Após a escolha do arranjo ortogonal adequado e da função *fitness*, os parâmetros de entrada são selecionados e para cada parâmetro três níveis de entrada são calculados.

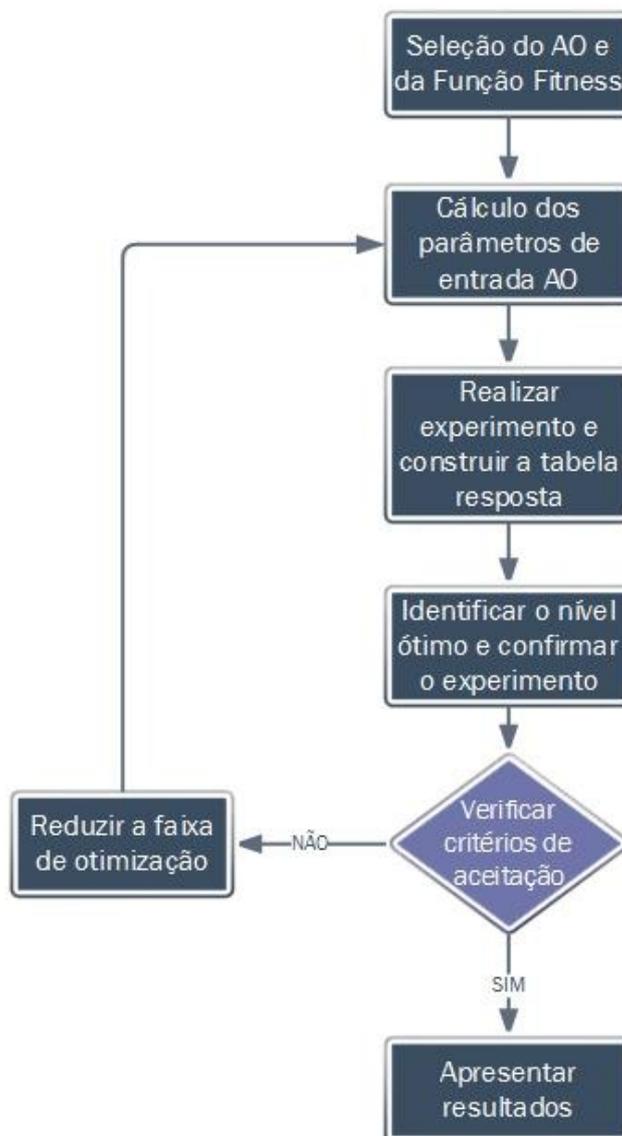


Figura 4.1 - Fluxograma de otimização do método Taguchi.

Na primeira iteração o valor do Nível 2 é selecionado no centro da faixa de otimização, dado por:

$$N_2 = \frac{\min + \max}{2}, \quad (4.1)$$

onde *min* e *max* correspondem aos limites inferior e superior do intervalo de otimização. Os Níveis 1 e 3 são obtidos subtraindo e somando, respectivamente, o valor do Nível 2 com uma variável chamada Diferença de Nível (LD).

$$N_1 = N_2 - LD_i \quad (4.2)$$

$$N_3 = N_2 + LD_i \quad (4.3)$$

A Diferença de Nível da primeira iteração é determinada pela equação:

$$LD_1 = \frac{\max - \min}{\text{número de nível} + 1} \quad (4.4)$$

Assim, os três níveis são distribuídos uniformemente na região de otimização e cada entrada do arranjo ortogonal pode ser convertido em um valor de nível correspondente ao parâmetro de entrada. Após a determinação dos níveis dos parâmetros de entrada, o valor da função *fitness* para cada experimento pode ser calculado e em seguida este valor é convertido para relação sinal-ruído pela fórmula abaixo:

$$\eta = -20 \log(FF) \text{ dB} \quad (4.5)$$

onde *FF* é a função *fitness*.

Realizados todos os experimentos, o resultado *fitness* é utilizado para construir uma tabela de resposta para cada iteração por meio da média da relação sinal-ruído para cada parâmetro e nível usando a seguinte equação:

$$\bar{\eta}_{m,n} = \frac{S}{N} \sum_{i, AO(i,n)=m} \eta_i, \quad (4.6)$$

em que  $m$  representa o nível e  $n$  representa o parâmetro a ser analisado.

Este procedimento permite identificar o maior valor S/N e seu nível correspondente. O nível referente ao melhor S/N será considerado o nível ótimo para um determinado parâmetro. Quando os níveis ótimos de cada parâmetro são identificados, um experimento de confirmação é realizado por meio da combinação dos níveis ótimos identificados na tabela de resposta.

O valor *fitness* obtido a partir da combinação ótima é considerado como o valor *fitness* da iteração atual. Após o experimento de confirmação, se o resultado não atender aos critérios de terminação, o processo é repetido na próxima iteração de modo que os valores de nível ótimo da iteração atual são usados como valores centrais (Nível 2) para próxima iteração:

$$x_n |_{i+1}^2 = x_n |_i^{opt} \quad (4.7)$$

No processo de repetição o intervalo de otimização é reduzido até atingir um valor convergente. Para isto o  $LD_i$  é multiplicado por uma taxa ( $rr$ ) para obter o  $LD_{i+1}$  da  $i + 1$  iteração.

$$LD_{i+1} = rr \cdot LD_i = rr^i \cdot LD_1 = RR(i) \cdot LD_1, \quad (4.8)$$

onde  $RR(i)$  é a função de redução. O valor do  $rr$  pode ser ajustado entre 0,5 e 1,0 dependendo da aplicação. Quando um  $rr$  constante é usado  $RR(i) = rr^i$ . Quanto maior o valor de  $RR$ , mais lenta será a taxa de convergência.

A equação abaixo é usada como critério de finalização do processo de otimização.

$$\frac{LD_i}{LD_1} < \text{valor de convergência} \quad (4.9)$$

O valor de convergência pode estar entre 0,001 e 0,01, dependendo da aplicação. O processo de otimização é encerrado quando a condição acima for satisfeita.

#### 4.4. Procedimento de implementação do método Taguchi

Para explicar de forma detalhada a implementação e execução do Método Taguchi, optamos por exemplificar a primeira iteração do método aplicado a uma das estruturas de FSS analisadas neste estudo.

Seguindo a ordem de execução do fluxograma ilustrado na Figura 4.1, o primeiro passo para implementação do Método Taguchi dar-se pela seleção do arranjo ortogonal e da função *fitness* utilizada. O arranjo ortogonal selecionado da literatura para esta primeira aplicação foi apresentado na Tabela 4.1 deste capítulo. A função *Fitness* abaixo foi selecionada de acordo com o objetivo de otimização. Neste exemplo, o Método Taguchi tem como objetivo otimizar três parâmetros ( $p$ ,  $d$ ,  $w$ ) de uma FSS de estrutura quadrada.

$$FF = 2 * |f_{ci} - f_{ci}'| + |fr - fr'| + 2 * |f_{cf} - f_{cf}'| \quad (4.10)$$

onde  $f_{ci}$  e  $f_{ci}'$  são as frequências de corte desejada e obtida,  $f_{cf}$  e  $f_{cf}'$  são as frequências de corte final desejada e obtida e  $fr$  e  $fr'$  são as frequências de ressonância desejada e obtida, respectivamente.

Conforme explicado anteriormente, na primeira iteração, o nível 2 é selecionado no centro da faixa de otimização e os níveis 1 e 3 são calculados somando e subtraindo o valor do nível 2 com uma variável chamada LD (Diferença de Nível). Assim, as Equações 4.1 a 4.4 foram utilizadas para calcular os respectivos valores de níveis apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Valores do níveis e de LD para cada parâmetro otimizado

Valores das variáveis da 1 <sup>o</sup> iteração	Parâmetros		
	$p$ (1,0 cm – 2,2 cm)	$d$ (0,8 cm – 2,0 cm)	$w$ (0,02 cm – 0,2 cm)
LD	0,3	0,3	0,0450

Nível 1	1,3 cm	1,1 cm	0,0650 cm
Nível 2	1,6 cm	1,4 cm	0,1100 cm
Nível 3	1,9 cm	1,7 cm	0,1550 cm

Após determinar os parâmetros de entrada, a função *fitness* para cada experimento pode ser calculado. Os valores da função *fitness* foram obtidos pela Equação 4.10, que por sua vez utilizou o Método do Circuito Equivalente para obter os valores de frequências necessários.

Após o cálculo dos valores da função *fitness*, esses valores são convertidos para relação Sinal/Ruído, que no método Taguchi é obtido por meio da Equação 4.5. A Tabela 4.4 apresenta os valores de cada nível, os valores *Fitness* e seus respectivos valores convertidos na relação Sinal/Ruído.

Tabela 4.4 - O arranjo ortogonal (9,3,3,2), valores de nível, valores da função *fitness* e valores S/R para a primeira iteração do processo de otimização.

Experimentos	Parâmetros			Fitness	S/R (dB)
	p	d	w		
1	1,3	1,1	0,0650	6,5772	-16,3609
2	1,3	1,4	0,1550	13,9772	-22,9084
3	1,3	1,7	0,1100	25,3772	-28,0889
4	1,6	1,4	0,1100	10,0772	-20,0668
5	1,6	1,7	0,0650	25,8772	-28,2584
6	1,6	1,1	0,1550	7,3228	-17,2935
7	1,9	1,7	0,1550	12,5772	-21,9917
8	1,9	1,1	0,1100	8,4228	-18,5091
9	1,9	1,4	0,0650	8,2772	-18,3577

Esses resultados são usados para construir uma tabela de resposta para a primeira iteração calculando a média da relação S/R para cada um dos parâmetros e para cada nível usando a Equação 4.6.

Calculamos os valores da tabela resposta para cada um dos parâmetros como apresentado na Tabela 4.5. Por exemplo, a média da relação S/R para  $x_2 | 1^3$ , ou seja, a média S/R para o terceiro nível do segundo parâmetro na primeira iteração será de -26.113dB,

Tabela 4.5 - Cálculo para tabela de resposta.

$\bar{\eta}_{1,1} = \frac{1}{3} \sum_{i,AO(i,1)=\frac{1}{3}} [(-16.3609) + (-22.9084) + (-28.0889)] =$ $-22.4527\text{dB}$
$\bar{\eta}_{1,2} = \frac{1}{3} \sum_{i,AO(i,2)=\frac{1}{3}} [(-16.3609) + (-17.2935) + (-18.5091)] =$ $-17.3878\text{dB}$
$\bar{\eta}_{1,3} = \frac{1}{3} \sum_{i,AO(i,3)=\frac{1}{3}} [(-16.3609) + (-28.2584) + (-18.3577)] =$ $-20.9923\text{dB}$
$\bar{\eta}_{2,1} = \frac{1}{3} \sum_{i,AO(i,1)=\frac{1}{3}} [(-20.0668) + (-28.2584) + (-17.2935)] =$ $-21.8729\text{dB}$
$\bar{\eta}_{2,2} = \frac{1}{3} \sum_{i,AO(i,2)=\frac{1}{3}} [(-22.9084) + (-20.0668) + (-18.3577)] =$ $-20.4443\text{dB}$
$\bar{\eta}_{2,3} = \frac{1}{3} \sum_{i,AO(i,3)=\frac{1}{3}} [(-28.0889) + (-20.0668) + (-18.5091)] =$ $-22.2216\text{dB}$
$\bar{\eta}_{3,1} = \frac{1}{3} \sum_{i,AO(i,1)=\frac{1}{3}} [(-21.9917) + (-18.5091) + (-18.3577)] =$ $-19.6195\text{dB}$
$\bar{\eta}_{3,2} = \frac{1}{3} \sum_{i,AO(i,2)=\frac{1}{3}} [(-28.0889) + (-28.2584) + (-21.9917)] =$ $-26.1130\text{dB}$
$\bar{\eta}_{3,3} = \frac{1}{3} \sum_{i,AO(i,3)=\frac{1}{3}} [(-22.9084) + (-17.2935) + (-21.9917)] =$ $-20.7312\text{dB}$

Em seguida, a tabela resposta é criada, como apresentado na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Tabela de resposta para primeira iteração do processo de otimização.

Níveis	Parâmetros		
	p	d	w
1	-22,4527	<b>-17,3878</b>	-20,9923
2	-21,8729	-20,4443	-22,2216
3	<b>-19,6195</b>	-26,1130	<b>-20,7312</b>

O maior valor de S/R para cada coluna da Tabela 4.6, corresponde ao nível ideal para este parâmetro. Por exemplo, para o parâmetro  $p$  o melhor nível é o 3 com um valor correspondente de -19,6195 dB, assim o valor ideal para  $p$  é de 1,9 cm. Para a variável  $d$ , o melhor nível é o 1, com um valor correspondente a -17,3878 dB, assim o valor de  $d$  será 1,1 cm. E por último o parâmetro  $w$  tem como melhor nível o 3, com um valor correspondente a -20,7312 dB e seu valor ideal será de 0,1550 cm. Quando os níveis ótimos são identificados, um experimento de confirmação é efetuado utilizando a combinação dos níveis ótimos identificados na tabela de resposta. Se os resultados da iteração atual não atenderem aos critérios de terminação, o processo é repetido na iteração seguinte até atingir o ponto de convergência de modo que os valores ótimos da iteração atual serão usados como valores centrais (nível 2) para a próxima iteração, conforme Equação 4.7

Conforme explicado anteriormente, no processo de repetição o intervalo de otimização é reduzido até atingir um valor convergente. Utilizando a Equação 4.8, o valor de LD foi multiplicado pelo valor de  $rr = 0,75$  a fim de obter o valor da Diferença de Nível da iteração seguinte.

Nesta aplicação, o valor de convergência  $CR$  foi fixado em 0,002. Deste modo, o processo de otimização foi repetido  $n$  vezes até atingir o critério de finalização, ou seja, o processo foi repetido até que a condição da Equação 4.9 seja satisfeita.

Nos exemplos abordados neste estudo, os arranjos ortogonais possuem três níveis de otimização, porém, como citado anteriormente, um arranjo ortogonal pode ter um maior número de níveis. A estratégia de usar um AO com mais níveis oferece uma otimização com mais força para encontrar o nível ótimo, no entanto quanto maior o nível do AO maior o número de experimentos a serem realizados dentro de cada iteração.

## 4.5. Método Taguchi ajustado

Durante a execução do método Taguchi a faixa de otimização é reduzida a cada iteração. Quando um  $rr$  constante é usado o intervalo de otimização torna-se relativamente pequeno, assim existe a possibilidade dos resultados otimizados residirem fora da faixa de otimização estabelecida. Deste modo, para melhorar o desempenho do método Taguchi algumas técnicas são aplicadas. Essas técnicas são descritas a seguir [10].

### 4.5.1 Aumentar a diferença de nível inicial

O valor de  $LD_1$  é determinado pela equação 3.4 e seu valor é reduzido por  $rr$ , como explicado anteriormente. Em algumas aplicações a solução do processo de otimização está localizado próximo às extremidades do intervalo de otimização. Neste caso, para melhorar o desempenho do método Taguchi a Diferença de Nível Inicial ( $LD_1$ ) é aumentada em 1,5 vezes, de modo que o processo de otimização tenha uma faixa maior para buscar o melhor resultado.

### 4.5.2 Tratamento dos limites

Neste método de ajuste quando o Nível 2 de uma iteração atingir o valor mínimo do intervalo de otimização, a iteração seguinte terá seus valores de Nível 1, Nível 2 e Nível 3 recalculados do seguinte modo:

$$x_n |_{i+1}^1 = \min; \quad (4.10)$$

$$x_n |_{i+1}^2 = \min + LD(n)_{i+1}; \quad (4.11)$$

$$x_n |_{i+1}^3 = \min + 2.LD(n)_{i+1}; \quad (4.12)$$

onde  $min$  é o valor mínimo do intervalo de otimização.

Entretanto, se o valor do Nível 2 atingir o valor máximo do intervalo de otimização, os níveis serão recalculados do seguinte modo:

$$x_n |_{i+1}^3 = max; \quad (4.13)$$

$$x_n |_{i+1}^2 = max - LD(n)_{i+1}; \quad (4.14)$$

$$x_n |_{i+1}^1 = max - 2.LD(n)_{i+1}; \quad (4.15)$$

onde  $max$  é o valor máximo do intervalo de otimização.

Neste estudo verificou-se a necessidade de aplicar o tratamento de ajuste dos limites para atingir resultados satisfatórios.

### 4.5.3 Função gaussiana reduzida

Este método de ajuste sugere definir o RR como uma função gaussiana.

$$RR_{(i)} = e^{-\frac{i^2}{T}} \quad (4.16)$$

Portanto a Diferença de Nível para próxima iteração é calculada do seguinte modo:

$$LD_{i+1} = RR_{(i)}.LD_1 = e^{-\frac{i^2}{T}}.LD_1 \quad (4.17)$$

## 4.6. Método Taguchi aleatório

No processo de otimização do método Taguchi os níveis ótimos são determinados por uma tabela de resposta e os valores correspondentes são atribuídos aos níveis centrais na iteração seguinte. Os outros níveis de entrada são obtidos adicionando e subtraindo o valor do nível ideal com a diferença de nível  $LD(n)_i$ . Assim, a capacidade de pesquisa está confinada pela diferença de nível. Quando o valor da diferença de nível é pequeno, a otimização pode ficar em resultados locais [10].

Para oferecer entradas com melhor capacidade de otimização, todos os valores de nível, exceto o valor central, são determinados usando funções aleatórias. Este método modificado é chamado de Método Taguchi-Random. O processo de otimização com o Taguchi-Random utilizada um arranjo ortogonal com três níveis de entrada. As entradas de nível 1,  $x_n |_i^1$ , e nível 3,  $x_n |_i^3$ , são determinadas pelas equações abaixo:

$$x_n |_{i+1}^1 = \min + rand_1() [x_n |_{i+1}^2 - \min], \quad (4.18)$$

$$x_n |_{i+1}^3 = x_n |_{i+1}^2 + rand_2() [\max - x_n |_{i+1}^2], \quad (4.19)$$

Onde  $rand_{1,2}()$  são valores aleatórios uniformes que variam entre 0 e 1. Neste método não é necessário nenhum valor de  $rr$  ou  $RR$ .

A literatura apresenta outro método de otimização híbrido, onde o método Taguchi é associado ao método de otimização PSO [10]. Uma breve descrição deste método pode ser vista no Anexo B desta tese.

## 4.7. Aplicações do método Taguchi

A validade e eficácia do método Taguchi é demonstrado na literatura por meio das aplicações do método em problemas de antenas e micro-ondas [10]. Os resultados mostram que os objetivos da otimização foram alcançados com sucesso, pois o método proposto consiste em um algoritmo capaz de resolver problemas com elevado grau de complexidade usando um número pequeno de experimentos no processo de otimização. Como supracitado, o método Taguchi é capaz de lidar com um número maior de parâmetros e níveis em um projeto. O autor apresenta alguns exemplos do método Taguchi aplicado ao arranjo de antenas, projeto de filtros planares e no projeto de antenas UWB, descritos a seguir:

No primeiro exemplo o método Taguchi foi usado para projetar três arranjos de antenas lineares. Nesta aplicação, método Taguchi é comparado

com outros métodos de otimização, como o PSO. Nesta comparação constatou-se que o método proposto converge para o resultado desejado de forma mais rápida, constatando-se que o método Taguchi apresenta-se como uma boa ferramenta de otimização na área do Eletromagnetismo.

No primeiro arranjo, ilustrado na Figura 4.2, 10 elementos da antena foram otimizados de modo que foram necessárias 23 iterações para o método atingir os resultados desejados. Para aplicar o método Taguchi adequadamente, um arranjo ortogonal AO (27,13,3,2) foi selecionado diretamente de um banco de dados. As 10 primeiras colunas, que referem-se aos 10 parâmetros que foram otimizados, são utilizadas no processo de otimização e as colunas restantes são ignoradas. Assim o arranjo ortogonal original torna-se o AO (27,10,3,2). Neste exemplo, o valor de convergência foi definido para 0,002 e  $rr$  foi definido 0,75.

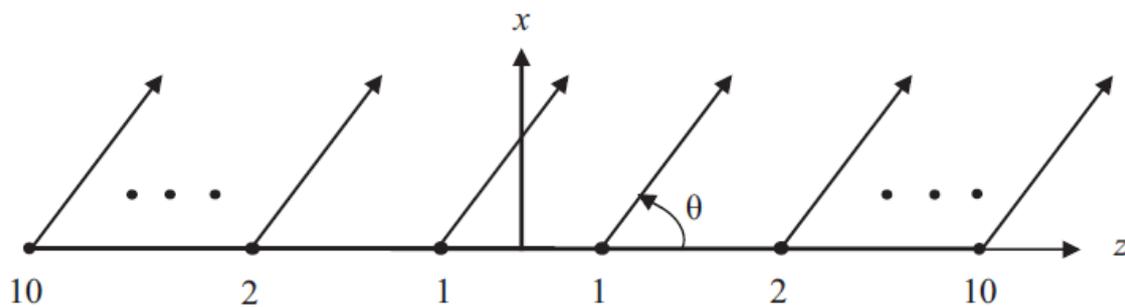


Figura 4.2 - Arranjo linear com 20 elementos igualmente espaçados.

No segundo arranjo 20 parâmetro da antena foram otimizados. Esta aplicação é considerada de alta complexidade de modo que o resultado desejado foi obtido após 60 iterações. Nesta aplicação foi utilizado o AO (83,20,3,2), com um  $rr$  no valor de 0,9 e o valor de convergência fixado em 0.002. Para este arranjo o método PSO também foi aplicado a fim de comparar seu desempenho com o do método proposto, os resultados da comparação mostram que o número de experimentos necessários para o algoritmo convergir foi reduzido cerca de 70%, o que comprova que o método Taguchi converge mais rapidamente em relação ao método PSO [10].

No terceiro arranjo de antenas 5 elementos de antenas foram otimizados de modo que os resultados desejados foram obtidos após 60 iterações. Nesta

aplicação o AO (18,5.3.2) foi utilizado, com o valor de convergência fixado em 0,002 e  $rr$  no valor de 0,9. Na literatura podemos encontrar outras aplicações do Método Taguchi utilizado na otimização de parâmetros de arranjos de antenas [37] – [39].

O método Taguchi também foi aplicado em filtros de micro-ondas [10]. A resposta de frequência desejada dos filtros estudados foram alcançadas com um número bastante reduzido de iterações. No primeiro filtro, ilustrado na Figura 4.3, três parâmetros são otimizados ( $L_1$ ,  $L_2$  e  $S$ ). Para isto utilizou-se o AO (9,3,3,2), de modo que com apenas 11 iterações o algoritmo atingiu resultados satisfatórios com o valor de convergência fixado em 0,05 e  $rr$  no valor de 0,8.

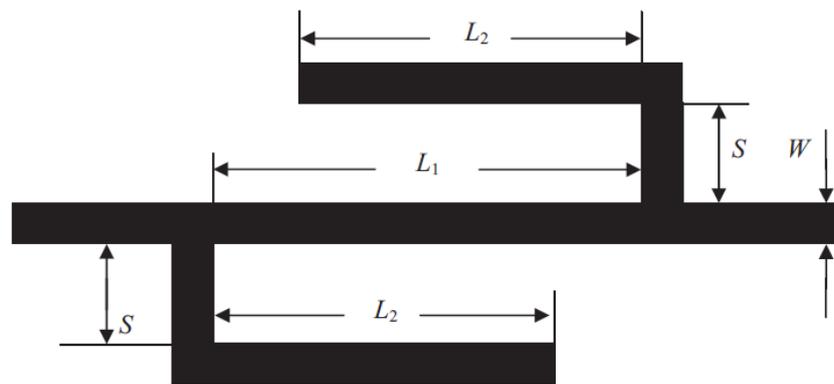


Figura 4.3 - Geometria do filtro rejeita-faixa.

Em um filtro do tipo passa-faixa, ilustrado na Figura 4.4, 11 parâmetros foram otimizados. Nesta aplicação foram necessárias apenas 9 iterações para o algoritmo convergir, com o valor de convergência fixado em 0,05 e  $rr$  no valor de 0,8.

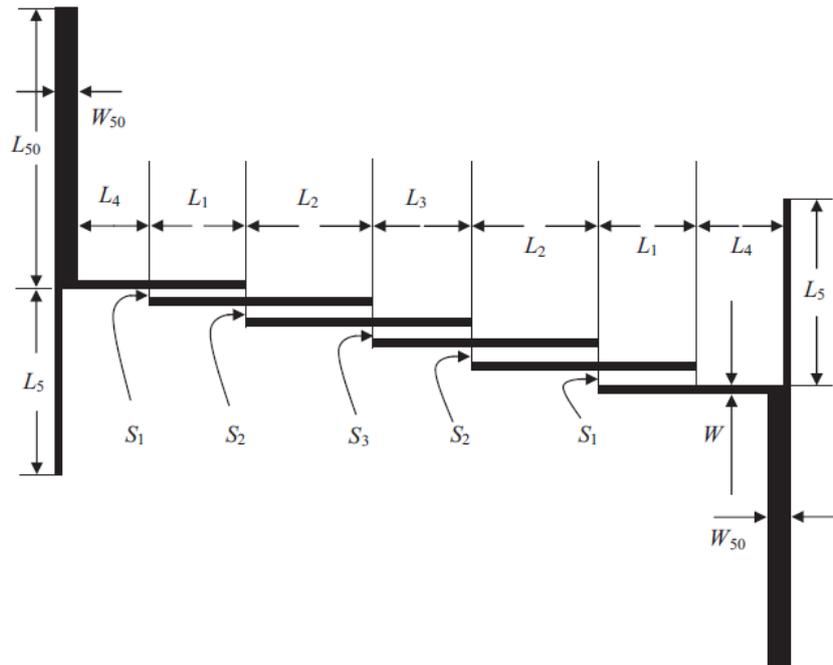


Figura 4. 4 - Geometria do filtro passa-faixa com 11 parâmetros a serem otimizados.

O método Taguchi também foi aplicado no processo de otimização de antenas UWB [40], ilustrada na Figura 4.5. Nesta aplicação 7 parâmetros foram otimizados,  $W$ ,  $W_1$ ,  $W_2$ ,  $G$ ,  $L_1$ ,  $L_2$  e  $S$ . Neste processo de otimização o AO (18,7,3,2) é aplicado, com o valor de convergência fixado em 0,01 e  $r$  determinado como uma função gaussiana. A resposta de frequência desejada da antena foi alcançada com êxito com após 37 iterações.

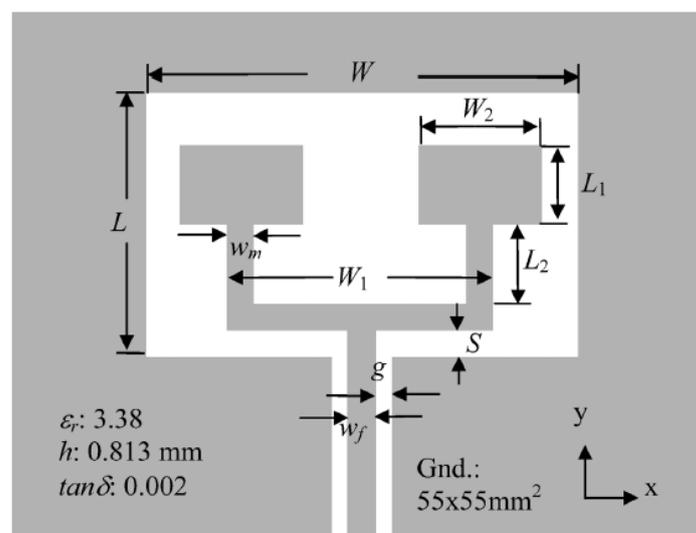


Figura 4.5 - Proposta de geometria para uma antena UWB.

Diversas aplicações do método Taguchi podem ser encontradas na literatura. Métodos híbridos estão sendo aplicados na área do Eletromagnetismo a fim de comparar o método Taguchi com outros métodos de otimização [41]-[45].

No estudo de Weng [33], o método Taguchi é usado para projetar arranjos de antenas lineares. Este estudo demonstrou que o método proposto converge rapidamente para a estrutura desejada, uma vez que leva menos recursos computacionais, além de ser um método simples e fácil de implementar. Os resultados numéricos mostraram que o Método Taguchi atinge com sucesso o padrão de radiação desejado.

No estudo apresentado por Salkim [34], o método Taguchi é aplicado para determinar os parâmetros de uma antena com *patch* retangular com uma frequência de ressonância desejada. O mesmo projeto foi comparado com outros métodos de otimização como Algoritmo Genético e PSO. Os resultados mostram que o número de experimentos necessários para alcançar a estrutura desejada com o AG era de 4000, com o PSO o número de experimentos foi reduzido para 1000, ao aplicar o Método Taguchi este número reduziu para 477 experimentos, isto comprova a eficiência do método. Nesta aplicação o AO (27,10,3,2) foi utilizado, com um valor de convergência de 0,001 e *rr* no valor de 0,8. Na pesquisa apresentada por Kuo [32], o Método Taguchi é aplicado para otimizar um circuito de microfita com duas frequências de ressonância. Neste estudo 4 parâmetros foram otimizados, assim o AO (9,4,3,2) foi aplicado. Três valores para *rr* foram determinados, de modo que foi possível observar que quanto maior o valor do *rr* mais iterações são necessárias para o método convergir para o resultado esperado. Para *rr* = 0,9, 570 iterações são necessárias, em comparação com as 140 e 150 iterações quando os valores de *rr* são 0,5 e 0,7, respectivamente.

O método Taguchi foi usado na pesquisa de Spasos [35], para otimizar um arranjo de antenas de microfita operando em 12,5 GHz. Nesta pesquisa o método Taguchi também foi comparado com o método PSO. O desempenho dos dois métodos foi comparado de acordo com o número de iterações

necessárias para atingir o objetivo do projeto, de modo que o método PSO atingiu o ponto de convergência após 675 iterações enquanto o método Taguchi convergiu com apenas 27 iterações.

Estudos recentes mostram aplicações do método Taguchi na área do Eletromagnetismo. Em 2014 o estudo de Ghenaya [46] utiliza dois métodos de otimização para simular os valores ideais de uma antena UWB com o objetivo de funcionar sem interferências em sistemas WiMax. Neste estudo o Método Taguchi foi aplicado em conjunto com o algoritmo MUSIC (*multiple signal classification*). O algoritmo MUSIC busca obter direções de chegada de sinais incidentes numa rede de antenas. É uma técnica de alta resolução para classificação de sinais baseada na exploração da auto estrutura da matriz de correlação de sinais.

## 4.8. Síntese do capítulo

Este capítulo apresentou o Método Taguchi. Este método tem sido amplamente usado em problemas de otimização de parâmetros e na área do eletromagnetismo encontra-se em total expansão. No início do capítulo foi apresentado um estudo sobre arranjo ortogonal, no que se baseia o método Taguchi. Em seguida o processo de otimização foi detalhado para melhor compreensão de como os parâmetros de uma estrutura são otimizados. Foi estudado também formas de ajustes do Método Taguchi, o que garante uma otimização mais precisa e rápida. Por fim apresentamos um método de otimização híbrido, chamado AO-PSO, que embora não tinha sido implementado nesse estudo, esse método é frequentemente comparado ao método Taguchi. A última seção deste capítulo apresenta algumas aplicações do Método Taguchi na área do Eletromagnetismo.

---

## Capítulo 5

---

### Resultados numéricos e experimentais

---

O Capítulo 5 apresenta os resultados desta pesquisa divididos em três etapas. A primeira etapa consistiu na execução da otimização através do método Taguchi. Para isso três geometrias foram selecionadas e foram definidos os parâmetros físicos a serem otimizados. A segunda etapa consistiu em simular a estrutura com os novos parâmetros obtidos no *ANSYS Designer®*. Por fim, na terceira etapa, as estruturas otimizadas foram construídas e medidas a fim de validar o experimento realizado.

#### 5.1. Introdução

Nos capítulos anteriores foram estudados os conceitos fundamentais para o entendimento deste trabalho, dentre eles os conceitos de FSS estudados no Capítulo 2 e os conceitos de métodos de otimização, vistos no Capítulo 4.

Esta pesquisa apresenta a utilização deste método a fim de se obter parâmetros físicos de uma FSS de modo que as estruturas analisadas atendam a uma resposta em frequência desejada. O projeto de uma estrutura de FSS geralmente segue as etapas ilustradas na Figura 5.1.

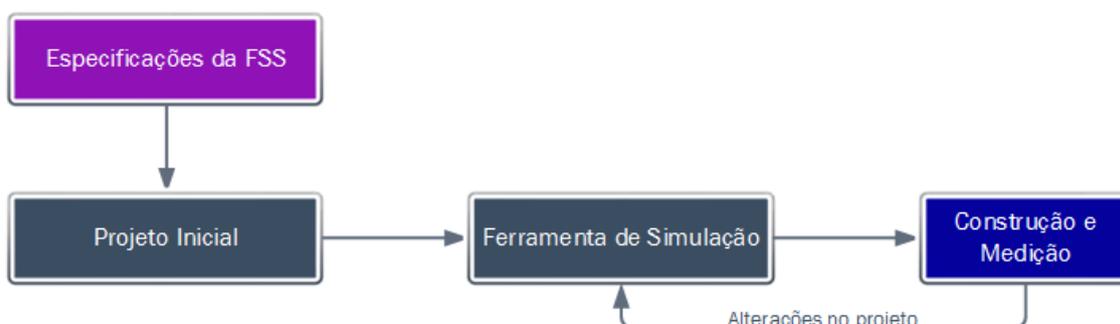


Figura 5.1 - Projeto de uma estrutura FSS.

Assim, o projeto de construção e caracterização de FSS tem início com as características eletromagnéticas requeridas e a definição da geometria do

elemento a ser utilizado na célula unitária da FSS. Após a definição da geometria, a análise paramétrica de onda completa é iniciada por meio de alguma técnica de análise. Algumas dessas técnicas foram apresentadas no Capítulo 2. Nesse estudo foi utilizado o Método do Circuito Equivalente, visto no Capítulo 3. A fase de análise requer um grande esforço computacional, além das repetidas simulações até o fim do projeto, devido aos cálculos dos parâmetros das FSS.

Nesta pesquisa, incluímos no projeto de FSS, a fase de otimização dos seus parâmetros. Para isto utilizamos o método Taguchi. Na Figura 5.2 pode-se observar a inclusão da etapa de otimização dos parâmetros no processo de construção da FSS.



Figura 5.2 - Projeto de uma estrutura FSS com a otimização do método Taguchi.

Na fase de Especificações da FSS são definidos: a geometria da célula unitária, a espessura e tipo de substrato e as frequências de operação da FSS (frequências de corte inferior e superior e frequência de ressonância). Esses dados servem como dados de entrada para o processo de otimização pelo método Taguchi. Nesta etapa o algoritmo executa  $n$  experimentos até atingir o ponto de convergência e, conseqüentemente, obter resultados satisfatórios. O resultado da otimização dá os parâmetros físicos para construção da FSS. Na última etapa, os protótipos são construídos e caracterizados experimentalmente a fim de verificar a precisão do método [47].

A aplicação do método Taguchi na área do eletromagnetismo encontra-se em expansão, por se tratar de um método de fácil implementação, além de

baixo esforço computacional. Os resultados na área de eletromagnetismo têm sido bastante satisfatórios, mesmo quando comparado a outros métodos de otimização, o método Taguchi tem mostrado um melhor desempenho, por ser capaz de atingir o ponto de convergência, ou o resultado esperado, com um menor número de experimentos.

Para estudar e analisar a execução do método Taguchi três geometrias foram escolhidas: a espira quadrada, a espira quadrada com grade e o dipolo cruzado [47]. Os detalhes do processo de projeto e otimização das estruturas serão expostos nas seções seguintes.

## 5.2. FSS com espira quadrada

A primeira geometria a ser otimizada neste estudo foi a espira quadrada. Inicialmente foram definidas as especificações da estrutura para que, a partir delas, o método Taguchi fosse aplicado. A Tabela 5.1 apresenta as características iniciais dessa estrutura.

Tabela 5.1 - Especificação da FSS quadrada.

Parâmetros da FSS	Valor
Altura do substrato	$h = 1,6$ mm
Frequência inicial de simulação	$f_o = 1$ GHz
Frequência final de simulação	$f_f = 12$ GHz
Frequência de corte inicial desejada	$f_{ci} = 5$ GHz
Frequência de corte final desejada	$f_{cf} = 6$ GHz
Frequência de ressonância desejada	$f_r = 5,4$ GHz
Permissividade elétrica relativa	$\epsilon_r = 4,4$

Após a definição da geometria e das características básicas do dielétrico a ser utilizado, bem como, da resposta desejada da FSS, tem início o processo

de otimização com o método Taguchi. O detalhamento da execução do método foi visto no Capítulo 4. O processo de otimização tem início com a escolha do arranjo ortogonal e da função de ajuste (função de *fitness*), que foi determinada de acordo com o objetivo do projeto. Como supracitado, os arranjos ortogonais utilizados neste estudo foram extraídos da literatura, para esta aplicação foi selecionado o AO (9,3,3,2), apresentado na Tabela 4.1.

A Equação (5.1) determina a função de *fitness* selecionada para este projeto:

$$FF = 2x|f_{ci} - f_{ci}'| + |fr - fr'| + 2x|f_{cf} - f_{cf}'| \quad (5.1)$$

em que  $f_{ci}$  e  $f_{ci}'$  são as frequências de corte iniciais desejada e obtida,  $f_{cf}$  e  $f_{cf}'$  são as frequências de corte final desejada e obtida e  $fr$  e  $fr'$  são as frequências de ressonância desejada e obtida, respectivamente. Nesta pesquisa utilizamos o método do circuito equivalente, para obter as respostas de frequência desejada das FSS.

A Figura 5.3 ilustra os parâmetros físicos da FSS com espira quadrada, que devem ser otimizados.

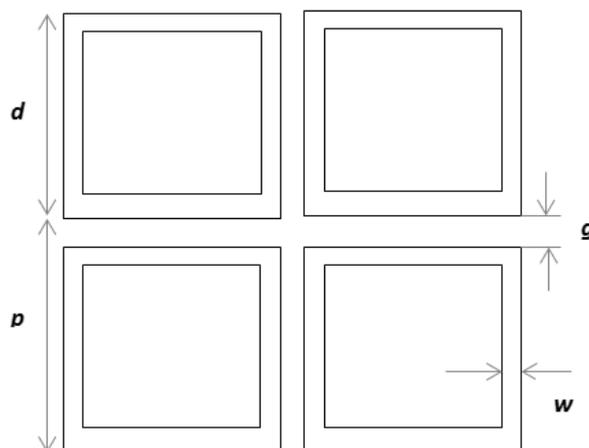


Figura 5.3 - Ilustração do arranjo de FSS quadrada a ser otimizado pelo método Taguchi.

O objetivo desse processo consiste em otimizar os três parâmetros físicos da FSS:  $p$ ,  $d$  e  $w$ . Para todos os parâmetros a serem otimizados, definimos intervalos de otimização, nos quais o método Taguchi será

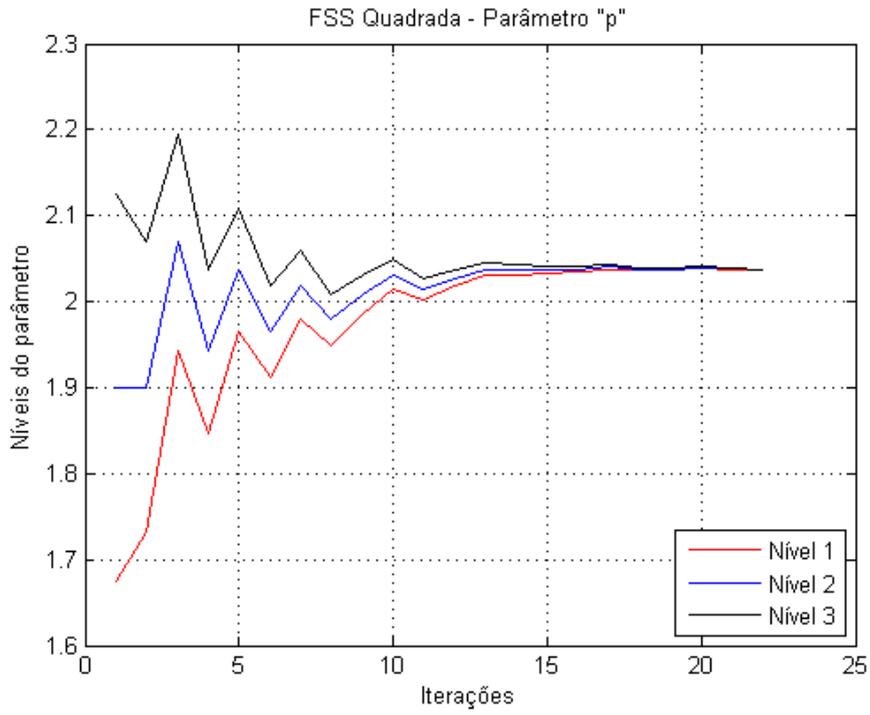
executado, a fim de definir o valor ótimo para cada parâmetro. A Tabela 5.2 representa os valores dos intervalos de otimização, dos parâmetros físicos.

Tabela 5.2 - Intervalos de otimização dos parâmetros físicos.

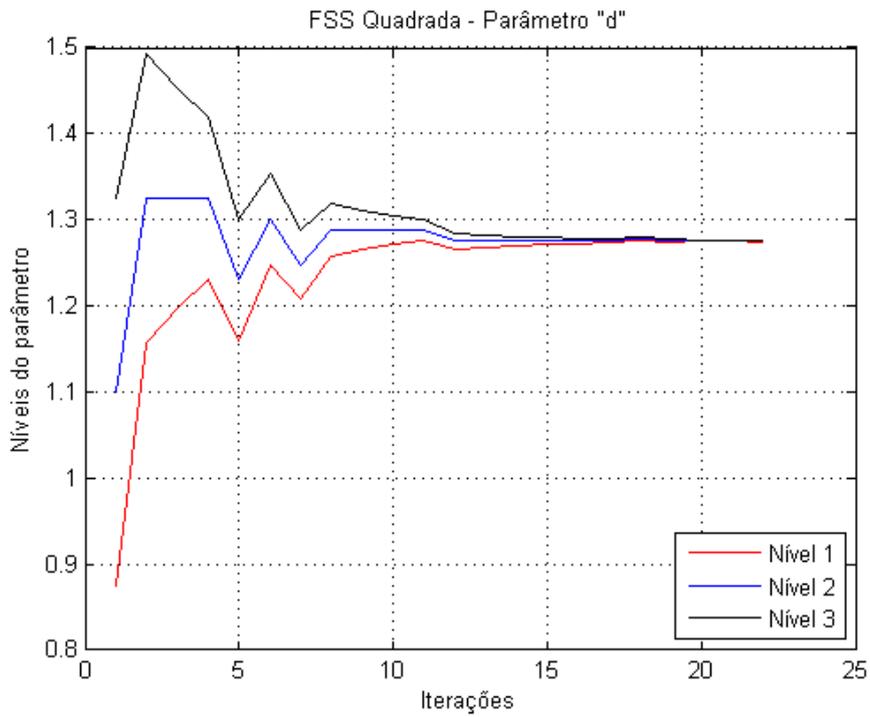
Parâmetro	Intervalo (cm)
$p$	1,0 – 2,2
$d$	0,8 – 2,0
$w$	0,02 – 0,20

Após a definição do arranjo ortogonal e da função de *fitness* definimos as especificações do método Taguchi, com uma taxa de convergência (CR) no valor de 0,002 e  $rr = 0,75$ . Os valores dos níveis  $n_1$ ,  $n_2$  e  $n_3$  de cada parâmetro foram obtidos por meio das equações (4.1) a (4.3). Em seguida, os demais parâmetros necessários para a otimização foram calculados pelas equações (4.4) a (4.8). Nas próximas seções explica-se detalhadamente o procedimento para cálculo dos valores necessários para que o método Taguchi seja executado. O exemplo trata-se da primeira iteração do método para a FSS com espira quadrada. Nas próximas seções será exposta a primeira iteração para as outras estruturas.

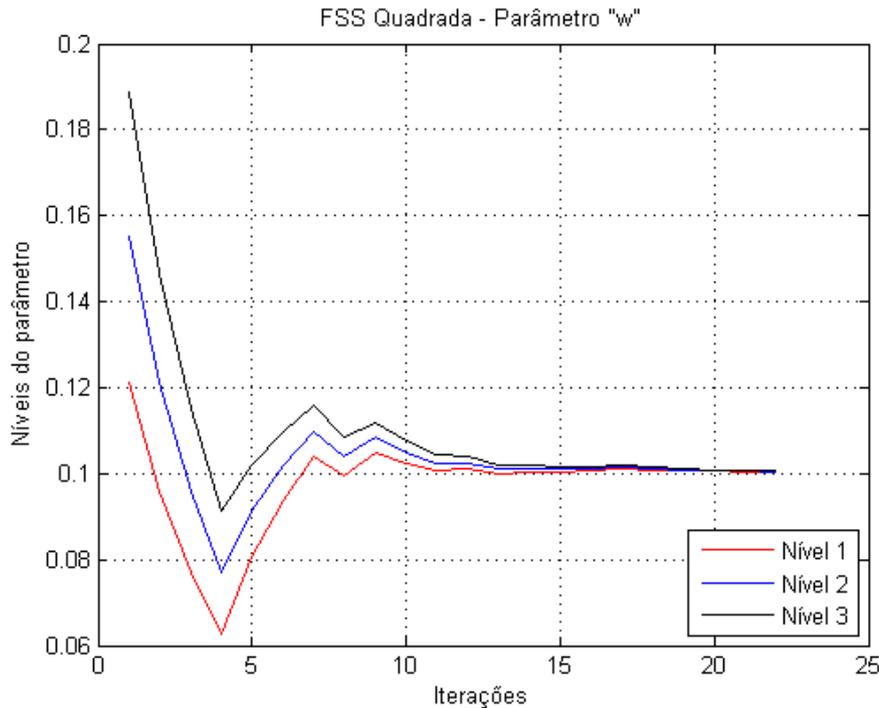
A FSS quadrada atendeu aos critérios de terminação após 22 iterações do método. A Figura 5.4 ilustra as curvas de convergência para os três parâmetros da FSS quadrada otimizados.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.4 - Curva de convergências para os parâmetros (a) p, (b) d e (c) w.

A Tabela 5.3 apresenta os valores otimizados nos três níveis, de modo que os valores de nível 3 foram utilizados para construção e medição da estrutura.

Tabela 5.3 - Parâmetros da FSS quadrada otimizados pelo método Taguchi.

Níveis	Parâmetros (mm)		
	$p$	$d$	$W$
1	20,369	12,746	1,004
2	20,369	12,746	1,004
3	<b>20,380</b>	<b>12,756</b>	<b>1,005</b>

Após a otimização dos parâmetros com o método Taguchi e da escolha do nível ótimo realizamos a análise paramétrica no *ANSYS Designer®*. O resultado experimental da estrutura com os novos valores dos parâmetros físicos foi comparado com o resultado obtido no *ANSYS Designer®*. A Figura 5.5 ilustra essa comparação.

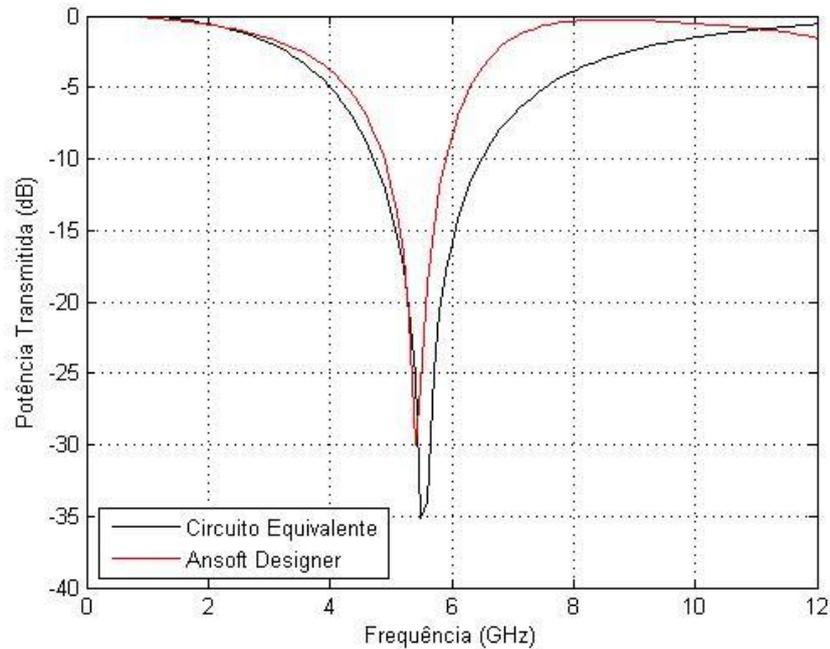


Figura 5.5 - Comparação entre os resultados simulados da FSS com espira quadrada.

Após a otimização paramétrica da FSS com espira quadrada, um protótipo foi construído e medido utilizando um *Network Analyzer* E5071C em duas faixas de frequências. Na primeira medição utilizamos uma Antena Corneta PE9852-20 na faixa de 3,5 GHz a 9 GHz. A segunda medição utilizamos a Antena Corneta PE8590-20 na faixa de 4,55 GHz a 9,0 GHz. As medições foram realizadas no laboratório de Micro-ondas do GTEMA-IFPB. As Figuras 5.6 e 5.7 ilustram a estrutura construída e o *setup* de medição.

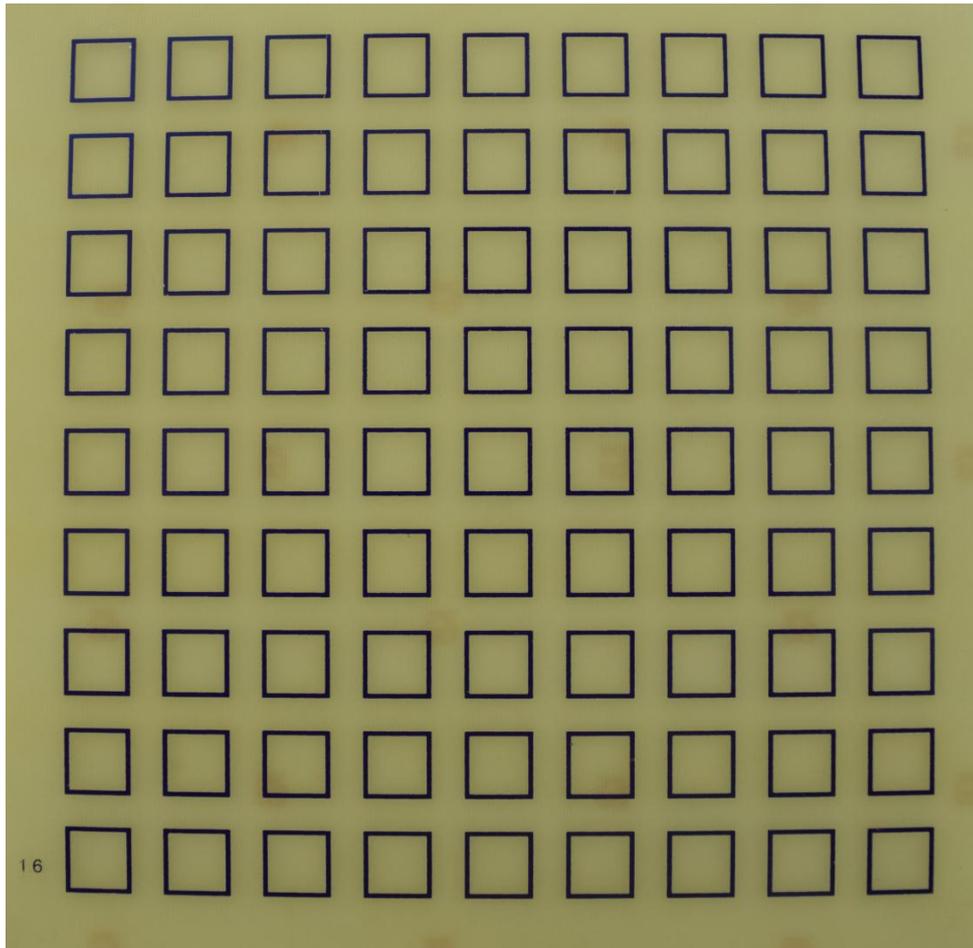


Figura 5.6 - FSS quadrada construída.

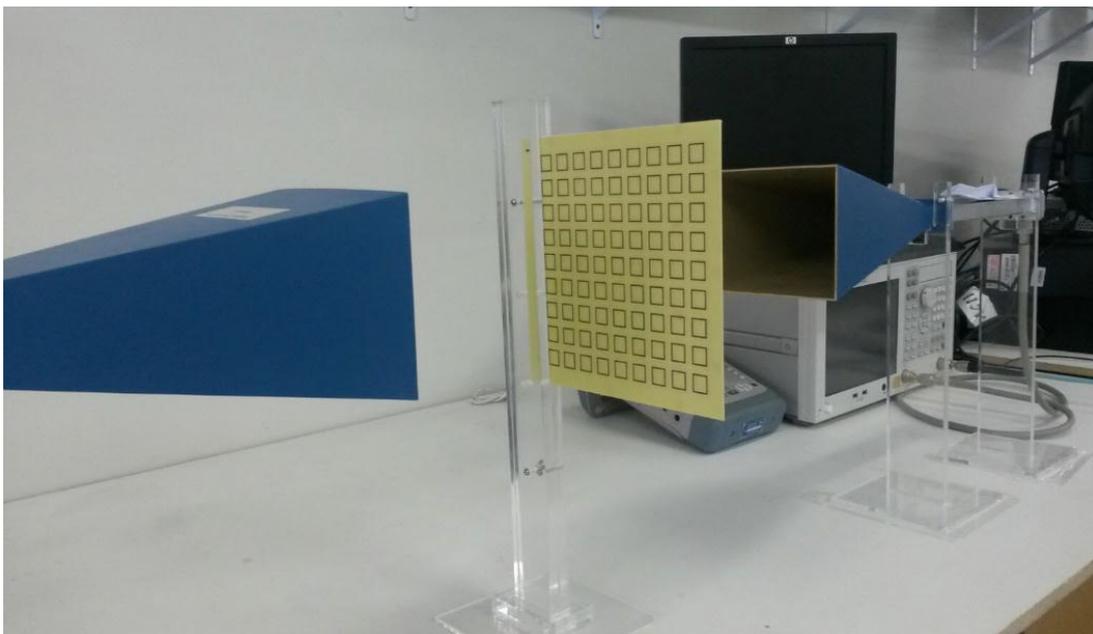


Figura 5.7 - Setup de medição.

O resultado da medição foi comparado com o resultado simulado.

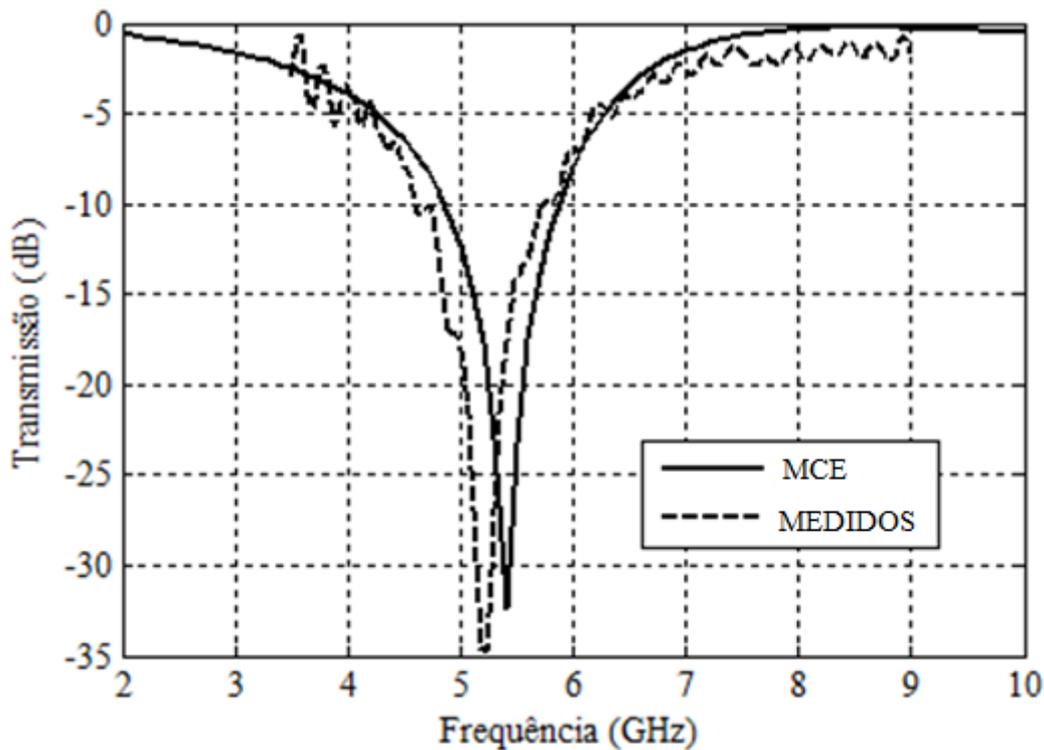


Figura 5.8 - Comparação entre os resultados medidos e simulados da FSS com espira quadrada [47].

Pode-se observar uma boa concordância entre os resultados simulados com o método do circuito equivalente e os resultados medidos em laboratório. A Tabela 5.4 lista os valores obtidos e os valores desejados das frequências de ressonância e de corte da FSS. Observamos que o erro da largura de banda (*Band Width - BW*) é de 0%.

Tabela 5.4 - Taxa de erro dos valores medidos e simulados da FSS quadrada.

Parâmetros	Simulados	Medidos	Erro (%)
Frequência de ressonância	5,19 GHz	5,4 GHz	3,8 %
Largura de Banda	1,0 GHz	1,0 GHz	0,0 %

A diferença na frequência de ressonância pode ser decorrente de defeitos na fabricação, bem como, em diferenças obtidas na espessura do dielétrico. Além disso, um menor peso na função de *fitness* foi atribuído a essa frequência.

### 5.3. FSS com espira quadrada com grade

A segunda geometria escolhida a ser otimizada foi a espira quadrada com grade. Definimos as especificações da estrutura para que, a partir delas, o método Taguchi fosse aplicado. A Tabela 5.5 apresenta as características iniciais dessa estrutura.

Após a definição das características básicas da FSS com espira quadrada com grade, tem-se início o processo de otimização com o Método Taguchi. Inicialmente, foi escolhido o arranjo ortogonal e a função de *fitness*, que foi determinada de acordo com o objetivo do projeto. Nesta aplicação, o arranjo ortogonal selecionado foi o AO (12,4,3,2), apresentado na Tabela 4.2. Foi utilizada a mesma função de *fitness* apresentada na Equação (5.1).

Tabela 5.5 - Especificação da FSS com espira quadrada com grade.

Parâmetros da FSS	Valor
Espessura do substrato	$h = 1,2 \text{ mm}$
Frequência inicial	$f_0 = 2 \text{ GHz}$
Frequência final	$f_f = 6 \text{ GHz}$
Frequência de corte inicial	$f_{c_i} = 4 \text{ GHz}$
Frequência de corte final	$f_{c_f} = 5 \text{ GHz}$
Frequência de ressonância	$f_r = 4,4 \text{ GHz}$
Permissividade elétrica relativa	$\epsilon_r = 4,4$

A Figura 5.9 ilustra os parâmetros físicos da FSS com espira quadrada com grade a serem otimizados.

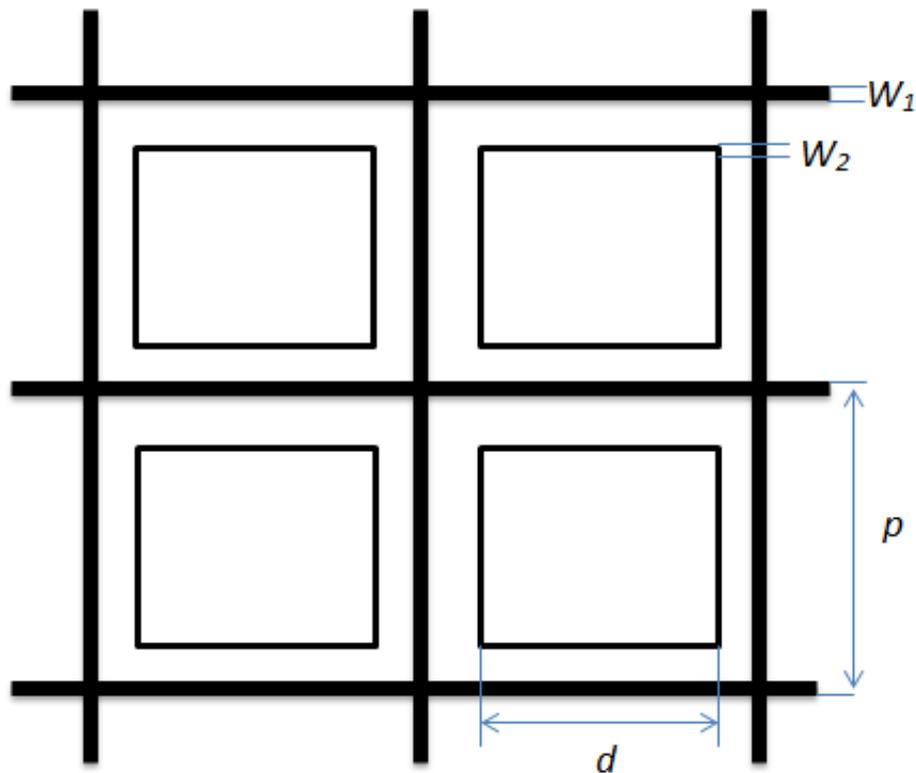


Figura 5.9 - FSS com espiras quadradas com grades.

O objetivo desse processo consiste em otimizar os quatro parâmetros físicos da FSS:  $p$ ,  $d$ ,  $w_1$  e  $w_2$ . Assim como para a espira quadrada, para todos os parâmetros a serem otimizados, definimos um intervalo de otimização, do qual o Método Taguchi ao ser executado irá definir o valor ótimo para cada parâmetro. A Tabela 5.6 representa os valores do intervalo de otimização dos parâmetros da FSS a serem otimizados.

Tabela 5.6 - Intervalos de Otimização da FSS com espira quadrada com grade.

Parâmetro	Intervalo (cm)
$p$	1,0 – 2,2
$d$	0,8 – 2,0
$w_1$	0,02 – 0,20
$w_2$	0,02 – 0,20

Após a definição do arranjo ortogonal e da função de *fitness* definimos as especificações do método Taguchi. Neste exemplo vamos detalhar a passo a passo da primeira iteração.

Conforme explicado, na primeira iteração o nível 2 de cada parâmetro é selecionado no centro da faixa de otimização e os níveis 1 e 3 são calculados somando e subtraindo o valor do nível 2 com uma variável chamada LD (Diferença de Nível).

O cálculo dos níveis e da diferença de nível do parâmetro  $p$  dá-se da seguinte maneira:

$$N_{2,p} = \frac{\min + \max}{2} = \frac{1 + 2,2}{2} = 1,6$$

$$LD_{1,p} = \frac{\max - \min}{\text{num. nível} + 1} = \frac{2,2 - 1}{3 + 1} = 0,3$$

$$N_{1,p} = N_2 - LD_i = 1,6 - 0,3 = 1,3$$

$$N_{3,p} = N_2 + LD_i = 1,6 + 0,3 = 1,9$$

O cálculo dos níveis e da diferença de nível do parâmetro  $d$  dá-se da seguinte maneira:

$$N_{2,d} = \frac{\min + \max}{2} = \frac{0,8 + 2}{2} = 1,4$$

$$LD_{1,d} = \frac{\max - \min}{\text{num. nível} + 1} = \frac{2 - 0,8}{3 + 1} = 0,3$$

$$N_{1,d} = N_2 - LD_i = 1,4 - 0,3 = 1,1$$

$$N_{3,d} = N_2 + LD_i = 1,4 + 0,3 = 1,7$$

O cálculo dos níveis e da diferença de nível dos parâmetros  $w_1$  e  $w_2$  dá-se da seguinte maneira:

$$N_{2,w1,2} = \frac{\min + \max}{2} = \frac{0,02 + 0,2}{2} = 0,11$$

$$LD_{1,w1,2} = \frac{\max - \min}{\text{num. nível} + 1} = \frac{0,2 - 0,02}{3 + 1} = 0,045$$

$$N_{1,w1,2} = N_2 - LD_i = 0,11 - 0,045 = 0,065$$

$$N_{3,w1,2} = N_2 + LD_i = 0,11 + 0,045 = 0,155$$

Após determinar os parâmetros de entrada, a função de *fitness* para cada experimento pode ser calculada. Os valores da função de *fitness* foram obtidos pela Equação (5.1), que por sua vez utilizou o método do circuito equivalente, para obter os valores de frequências necessários, para isto utilizamos rotinas elaboradas no programa computacional Matlab© [15]. Após o cálculo dos valores da função de *fitness*, a Equação (5.2) foi usada para converter esses valores para relação Sinal/Ruído.

$$\eta = -20 \log(FF) \text{ dB} \quad (5.2)$$

A Tabela 5.7 apresenta os valores de cada nível, os valores de *fitness* e seus respectivos valores convertidos na relação sinal/ruído:

Tabela 5.7 - O arranjo ortogonal (12,4,3,2), valores de nível, valores da função fitness e valores S/R para a primeira iteração do processo de otimização da FSS quadrada com grade.

Experimentos	Parâmetros				fitness	S/R (dB)
	$p$	$d$	$w_1$	$w_2$		
1	1,3	1,1	0,0650	0,1100	3,8279	-11,6591
2	1,3	1,4	0,1550	0,1550	20,4721	-26,2233
3	1,3	1,7	0,1100	0,0650	20,4721	-26,2233
4	1,3	1,1	0,0650	0,1100	3,8279	-11,6591
5	1,6	1,4	0,1550	0,1550	3,5221	-10,9361
6	1,6	1,7	0,1100	0,0650	19,6221	-25,8549
7	1,6	1,1	0,0650	0,1100	6,6279	-16,4275
8	1,6	1,4	0,1550	0,1550	3,5221	-10,9361
9	1,9	1,7	0,1100	0,0650	7,1221	-17,0522
10	1,9	1,1	0,0650	0,1100	19,5279	-25,8131
11	1,9	1,4	0,1550	0,1550	3,3779	-10,5728
12	1,9	1,7	0,1100	0,0650	7,1221	-17,0522

Após obter os valores de *fitness*, a Equação (5.3) foi utilizada para obter a tabela de resposta listada na Tabela 5.8.

$$\bar{\eta}_{m,n} = \frac{s}{N} \sum_{i, AO(i,n)=m} \eta_i \quad (5.3)$$

Tabela 5.8 - Cálculo para tabela de resposta.

$\bar{\eta}_{1,1} = \frac{1}{4} \sum_{i,AO(i,1)=\frac{1}{4}} [(-11,6591) + (-26,2233) + (-26,2233) + (-11,6591)]$ $= -18,9412 \text{ dB}$
$\bar{\eta}_{1,2} = \frac{1}{4} \sum_{i,AO(i,2)=\frac{1}{4}} [(-11,6591) + (-11,6591) + (-16,4275) + (-25,8131)]$ $= -16,3897 \text{ dB}$
$\bar{\eta}_{1,3} = \frac{1}{4} \sum_{i,AO(i,3)=\frac{1}{4}} [(-11,6591) + (-11,6591) + (-16,4275) + (-25,8131)] =$ $-16,3897 \text{ dB}$
$\bar{\eta}_{1,4} = \frac{1}{4} \sum_{i,AO(i,4)=\frac{1}{4}} [(-26,2233) + (-25,8549) + (-17,0522) + (-17,0522)] =$ $-21,5456 \text{ dB}$
$\bar{\eta}_{2,1} = \frac{1}{4} \sum_{i,AO(i,1)=\frac{1}{4}} [-10,9361] + (-25,8549) + (-16,4275) + (-10,9361) =$ $-16,0387 \text{ dB}$
$\bar{\eta}_{2,2} = \frac{1}{4} \sum_{i,AO(i,2)=\frac{1}{4}} [(-26,2233) + (-10,9361) + (-10,9361) + (-10,5728)]$ $= -14,6671 \text{ dB}$
$\bar{\eta}_{2,3} = \frac{1}{4} \sum_{i,AO(i,3)=\frac{1}{4}} [(-26,2233) + (-25,8549) + (-17,0522) + (-17,0522)]$ $= -21,5456 \text{ dB}$
$\bar{\eta}_{2,4} = \frac{1}{4} \sum_{i,AO(i,4)=\frac{1}{4}} [(-11,6591) + (-11,6591) + (-16,4275) + (-25,8131)]$ $= -16,3897 \text{ dB}$
$\bar{\eta}_{3,1} = \frac{1}{4} \sum_{i,AO(i,1)=\frac{1}{4}} [(-17,0522) + (-25,8131) + (-10,5728) + (-17,0522)]$ $= -17,6226 \text{ dB}$
$\bar{\eta}_{3,2} = \frac{1}{4} \sum_{i,AO(i,2)=\frac{1}{4}} [(-26,2233) + (-25,8549) + (-17,0522) + (-17,0522)]$ $= -21,5456 \text{ dB}$
$\bar{\eta}_{3,3} = \frac{1}{4} \sum_{i,AO(i,3)=\frac{1}{4}} [(-26,2233) + (-10,9361) + (-10,9361) + (-10,5728)]$ $= -14,6671 \text{ dB}$
$\bar{\eta}_{3,4} = \frac{1}{4} \sum_{i,AO(i,4)=\frac{1}{4}} [(-26,2233) + (-10,9361) + (-10,9361) + (-10,5728)]$ $= -14,6671 \text{ dB}$

Os dados calculados acima compõem a Tabela de Resposta apresentada abaixo.

Tabela 5.9 - Tabela de resposta da primeira iteração- FSS quadrada com grade.

Níveis	Parâmetros			
	p	d	w <sub>1</sub>	w <sub>2</sub>
1	-18,9412	-16,3897	-16,3897	-21,5456
2	-16,0387	-14,6671	-21,5456	-16,3897
3	-17,6226	-21,5456	-14,6671	-14,6671

O maior valor de S/R para cada parâmetro da Tabela 5.9, corresponde ao nível ideal para este parâmetro. Os níveis ótimos serão considerados como os valores de nível 2 da iteração seguinte, de modo que os demais níveis (1 e 3) serão reajustados e recalculados. Em seguida um experimento de confirmação é efetuado utilizando a combinação dos níveis ótimos identificados na tabela de resposta. Se os resultados da iteração atual não atenderem aos critérios de terminação, o processo é repetido na iteração seguinte até atingir o ponto de convergência.

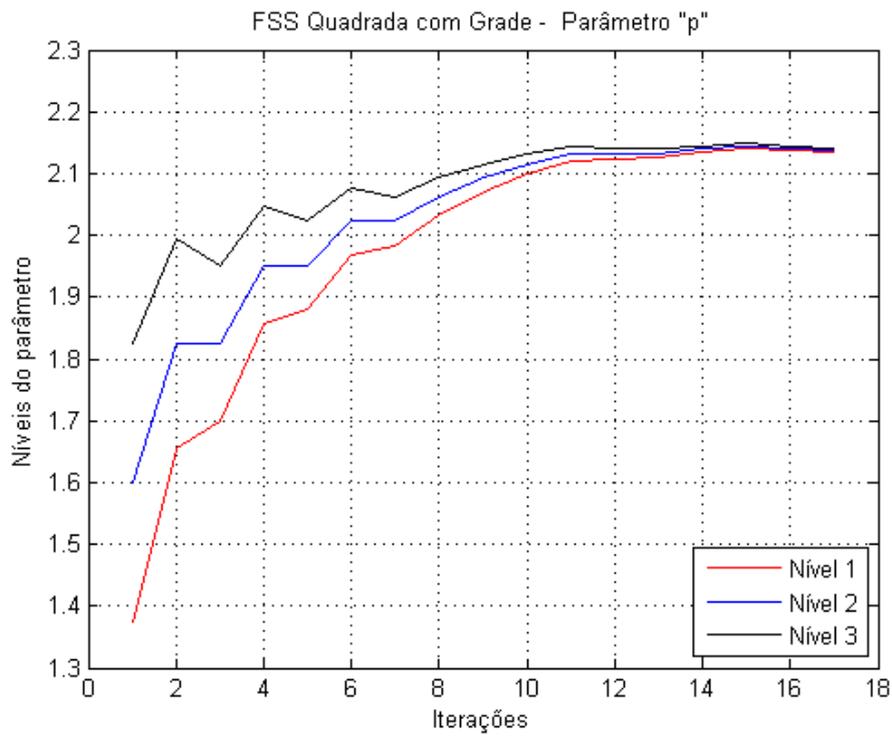
Neste processo de repetição o intervalo de otimização é reduzido até atingir um valor convergente. Utilizando a Equação (5.4), o valor de LD foi multiplicado pelo valor de  $rr = 0,75$  a fim de obter o valor da diferença de nível da iteração seguinte.

$$LD_{i+1} = rr \times LD_i = rr^i \times LD_1 = RR(i) \times LD_1, \quad (5.4)$$

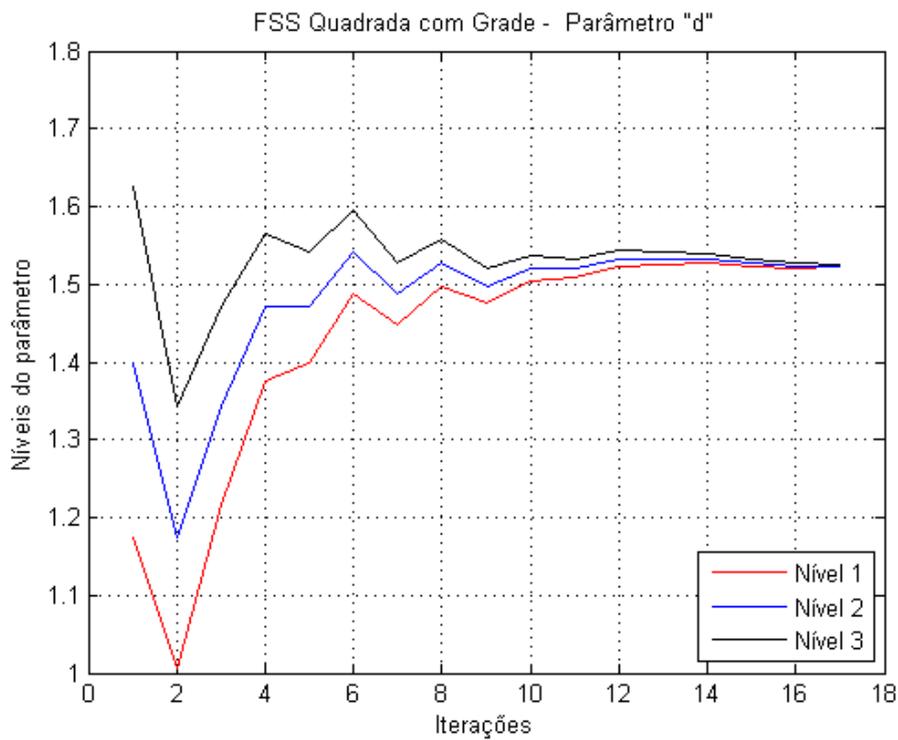
O valor de convergência  $CR$  para esta estrutura foi fixado em 0,01. Deste modo, o processo de otimização foi repetido  $n$  vezes até que o critério de finalização seja satisfeito. Esse critério é calculado como:

$$\frac{LD_i}{LD_1} < \text{valor de convergência} \quad (5.5)$$

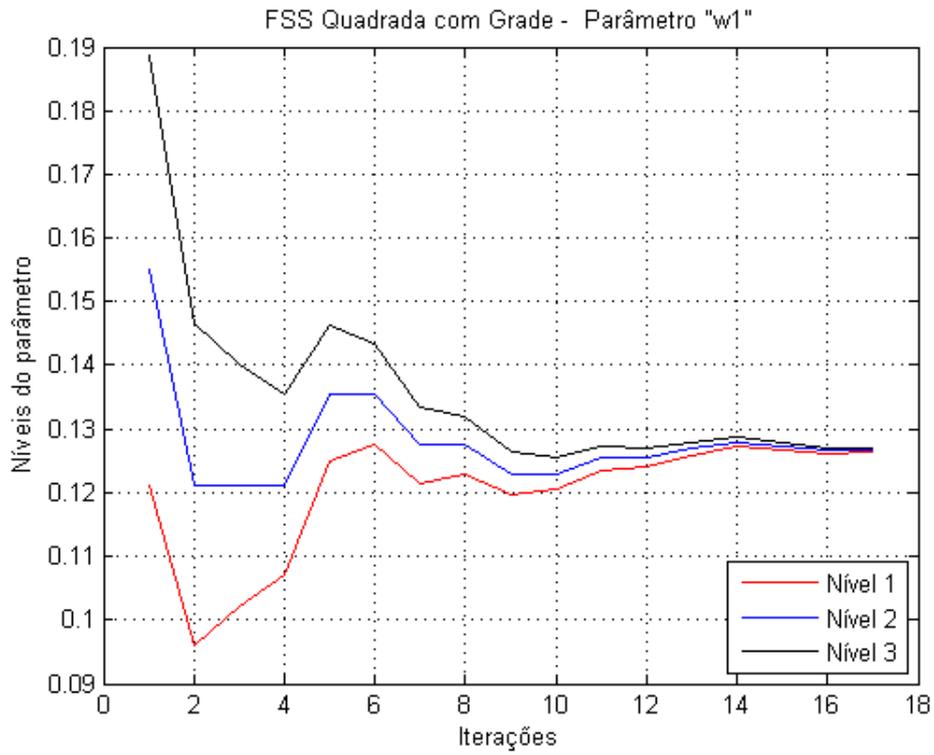
A FSS com espira quadrada com grade atendeu aos critérios de terminação após 17 iterações do método, como ilustrado na Figura 5.10.



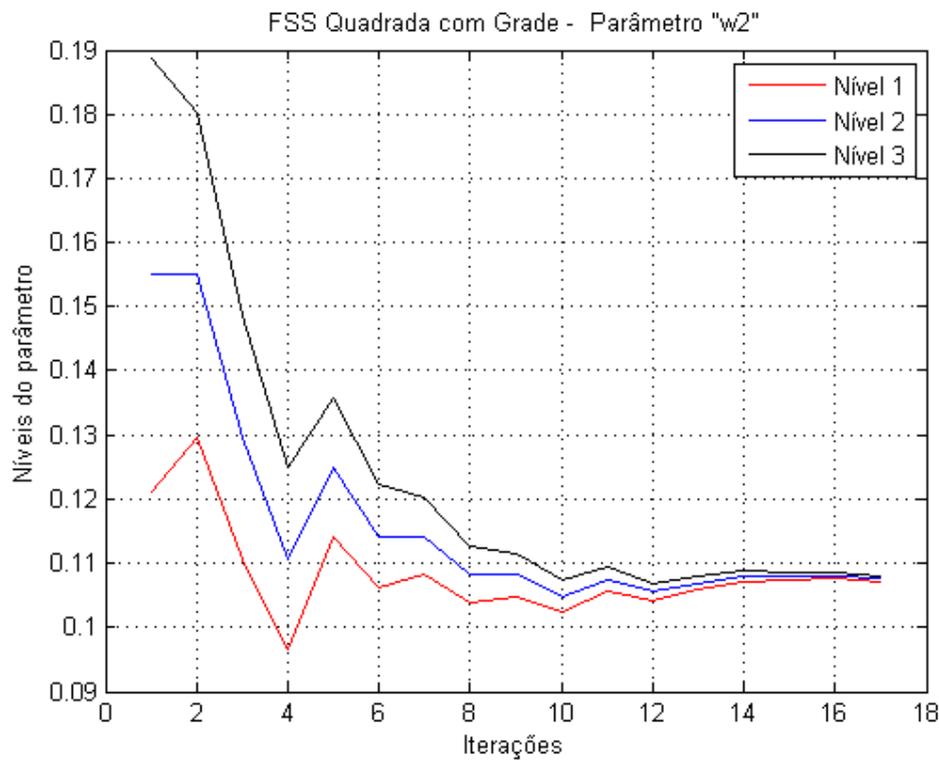
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.10 - Curva de convergência para os parâmetros (a) p, (b) d, (c) w1 e (d) w2.

A Tabela 5.10 apresenta os valores otimizados nos três níveis, que foram utilizados para construir a estrutura desejada.

Tabela 5.10 - Parâmetros da FSS com espira quadrada com grade otimizados pelo Método Taguchi.

Níveis	Parâmetros (mm)			
	$p$	$d$	$W1$	$W2$
1	21,355	15,217	1,263	1,072
2	21,355	15,217	<b>1,263</b>	<b>1,072</b>
3	<b>21,400</b>	<b>15,262</b>	1,269	1,079

Finalizado o processo de otimização dos quatro parâmetros da FSS, a estrutura foi simulada no *ANSYS Designer®*. A comparação entre os experimentos numéricos podem ser visto na Figura 5.11.

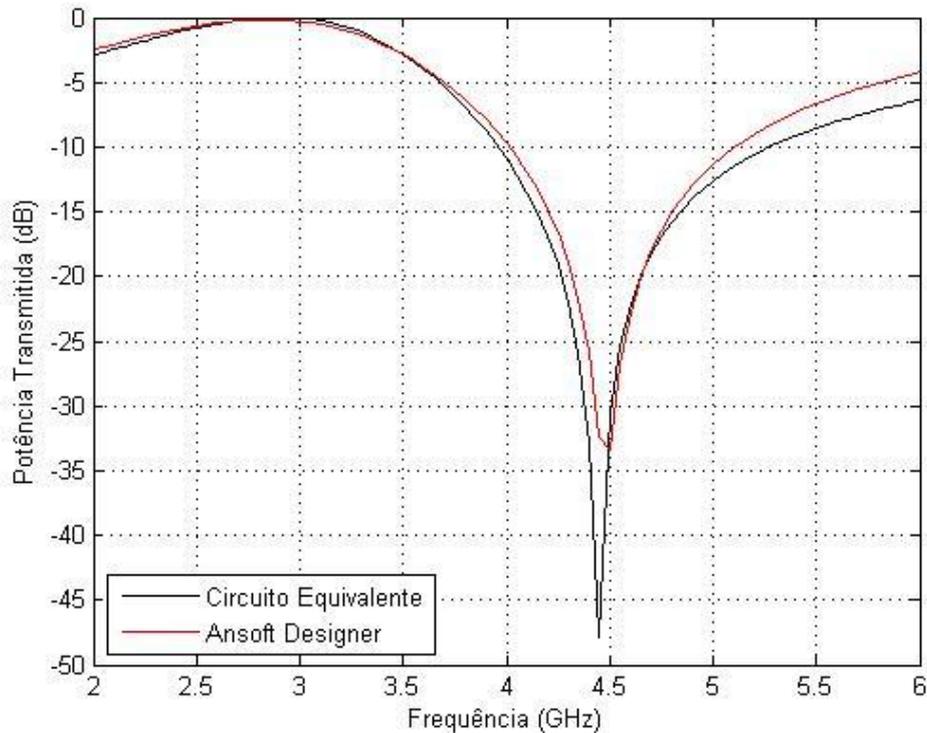


Figura 5.11 - Comparação entre os resultados simulados da FSS com espira quadrada com grade.

Em seguida a estrutura foi construída e medida utilizando nas mesmas faixas de frequências da estrutura anterior. A Figura 5.12 ilustra a estrutura construída. O mesmo *setup* de medição ilustrado na Figura 5.7 foi utilizado.

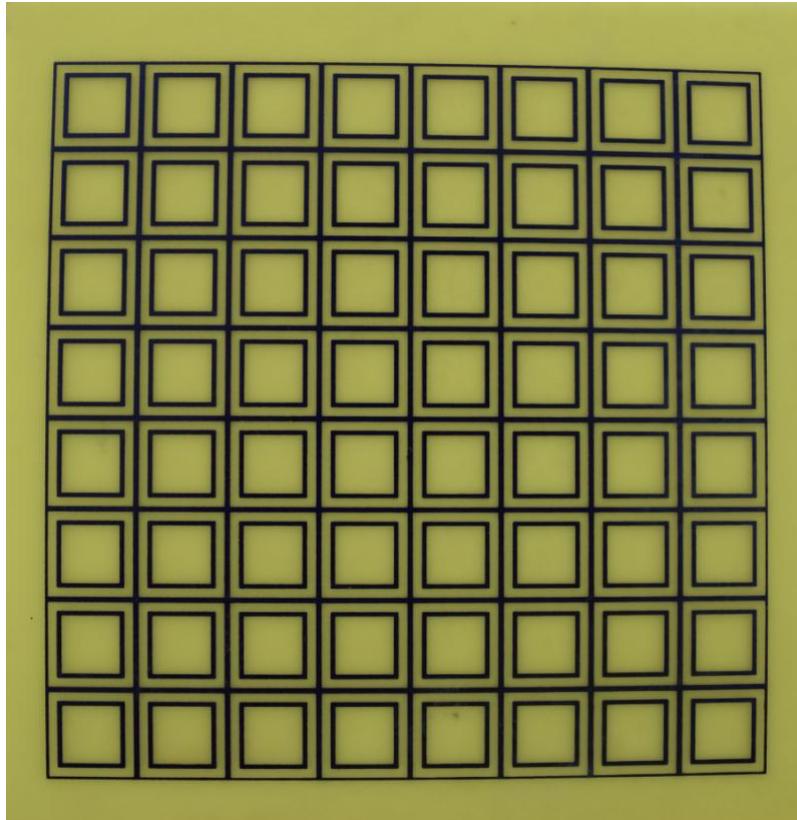


Figura 5.12 - FSS quadrada com grade construída.

Os resultados medidos e simulados são comparados na Figura 5.13.

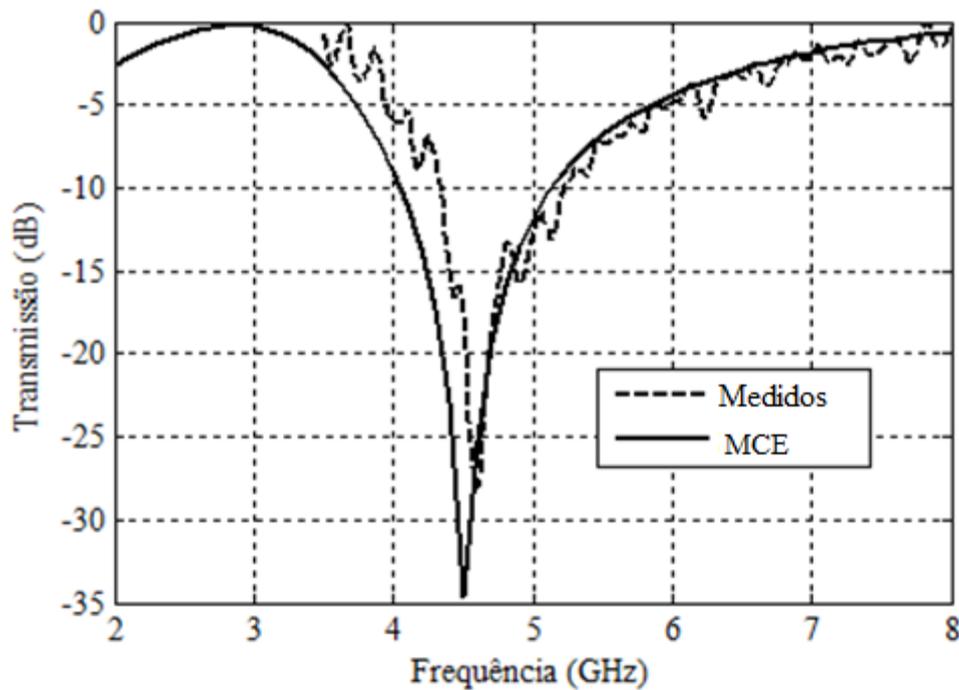


Figura 5.13 - Comparação entre os resultados medidos e simulados da FSS com espira quadrada com grade [47].

Verifica-se que os resultados são bastante satisfatórios, principalmente em relação à frequência de ressonância. A Tabela 5.11 apresenta a taxa de erro entre os valores medidos e simulados.

Tabela 5.11 - Taxa de erro dos valores medidos e simulados da FSS quadrada com grade.

Parâmetros	Obtida	Desejada	Erro (%)
Largura de Banda	0,9 GHz	1,0 GHz	10 %
Frequência de ressonância	4,58 GHz	4,40 GHz	4,09 %

## 5.4. Dipolo cruzado

A terceira e última geometria considerada neste estudo foi o dipolo cruzado. A Tabela 5.12 apresenta as especificações da estrutura

Tabela 5.12 - Especificações do dipolo cruzado.

Parâmetros	Valor
Espessura do substrato	$h = 0,8 \text{ mm}$
Frequência inicial	$f_0 = 4 \text{ GHz}$
Frequência final	$f_f = 12 \text{ GHz}$
Frequência de corte inicial	$f_{c_i} = 7 \text{ GHz}$
Frequência de corte final	$f_{c_f} = 8 \text{ GHz}$
Frequência de ressonância	$f_r = 7,4 \text{ GHz}$
Permissividade elétrica relativa	$\epsilon_r = 4,4$

Assim como nas demais estruturas, definida as características básicas do dipolo cruzado tem início o processo de otimização com o método Taguchi. O processo de otimização tem início com a escolha do arranjo ortogonal e da função *fitness*. Nesta aplicação, o arranjo ortogonal selecionado foi o AO (9,3,3,2). Foi utilizada a mesma função de *fitness* apresentada na Equação (5.1). A Figura 5.14 ilustra os parâmetros físicos a serem otimizados.

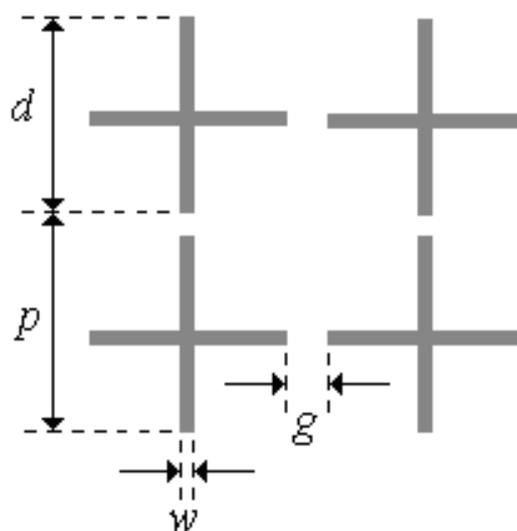


Figura 5.14 - Parâmetros físicos do dipolo cruzado.

Assim como na espira quadrada, o projeto do dipolo cruzado tem como objetivo otimizar os três parâmetros físicos da FSS:  $p$ ,  $d$  e  $w$ . Para todos os parâmetros a serem otimizados, foi definido um intervalo de otimização, dentro do qual o método Taguchi será executado e definirá o valor ótimo para cada parâmetro. Estes intervalos são apresentados na Tabela 5.13:

Tabela 5.13 - Intervalos de otimização dos parâmetros físicos do dipolo cruzado.

Parâmetro	Intervalo (cm)
$p$	1,0 – 2,2
$d$	0,8 – 2,0
$w$	0,05 – 0,50

Definidos os intervalos de otimização e os parâmetros da estrutura, tem início o processo de otimização pelo método Taguchi.

Sabe-se que na primeira iteração, o nível 2 de cada parâmetro é selecionado no centro da faixa de otimização e os níveis 1 e 3 são calculados somando e subtraindo o valor do nível 2 com uma variável chamada  $LD$  (Diferença de Nível). Os valores de níveis e de  $LD$  obtidos são demonstrados a seguir.

O cálculo dos níveis e da Diferença de Nível do parâmetro  $p$  dá-se da seguinte maneira:

$$N_{2,p} = \frac{\min + \max}{2} = \frac{1 + 2,2}{2} = 1,6$$

$$LD_{1,p} = \frac{\max - \min}{\text{num. nível} + 1} = \frac{2,2 - 1}{3 + 1} = 0,3$$

$$N_{1,p} = N_2 - LD_i = 1,6 - 0,3 = 1,3$$

$$N_{3,p} = N_2 + LD_i = 1,6 + 0,3 = 1,9$$

O cálculo dos níveis e da Diferença de Nível do parâmetro  $d$  dar-se da seguinte maneira:

$$N_{2,d} = \frac{\min + \max}{2} = \frac{0,8 + 2}{2} = 1,4$$

$$LD_{1,d} = \frac{\max - \min}{\text{num. nível} + 1} = \frac{2 - 0,8}{3 + 1} = 0,3$$

$$N_{1,d} = N_2 - LD_i = 1,4 - 0,3 = 1,1$$

$$N_{3,d} = N_2 + LD_i = 1,4 + 0,3 = 1,7$$

O cálculo dos níveis e da diferença de nível do parâmetro  $w$  dar-se da seguinte maneira:

$$N_{2,w} = \frac{\min + \max}{2} = \frac{0,05 + 0,5}{2} = 0,275$$

$$LD_{1,w} = \frac{\max - \min}{\text{num. nível} + 1} = \frac{0,5 - 0,05}{3 + 1} = 0,1125$$

$$N_{1,w} = N_2 - LD_i = 0,275 - 0,1125 = 0,1625$$

$$N_{3,w} = N_2 + LD_i = 0,275 + 0,1125 = 0,3875$$

Determinado os valores iniciais dos parâmetros de entrada, a função *fitness* para cada experimento pode ser calculada.

Os valores da função *fitness* também foram obtidos pela Equação 5.1, que por sua vez utilizou o Método do Circuito Equivalente. Com a Equação 5.2, os valores *Fitness* foram convertidos para relação Sinal/Ruído.

A Tabela 5.14 apresenta os valores de cada nível, os valores de *fitness* e seus respectivos valores convertidos na relação Sinal/Ruído:

Tabela 5.14 - O arranjo ortogonal (9,3,3,2), valores de nível, valores da função de *fitness* e valores S/R para a primeira iteração do processo de otimização do dipolo cruzado.

Experimentos	Parâmetros			Fitness	S/R (dB)
	p	d	w		
1	1,3	1,1	0,1625	7,4667	-17,4626
2	1,3	1,4	0,3875	30,2167	-29,6049
3	1,3	1,7	0,275	30,4667	-29,6765
4	1,6	1,4	0,275	1,7167	-4,6938
5	1,6	1,7	0,1625	34,5167	-30,7606
6	1,6	1,1	0,3875	20,3667	-26,1784
7	1,9	1,7	0,3875	2,9833	-9,4940
8	1,9	1,1	0,275	14,2667	-23,0865
9	1,9	1,4	0,1625	0,7833	-2,1213

A Equação (5.3) foi utilizada para se obter a tabela de resposta listada na Tabela 5.15:

Tabela 5.15 - Cálculo da tabela de resposta – dipolo cruzado.

$\bar{\eta}_{1,1} = \frac{1}{3} \sum_{i,AO(i,1)=\frac{1}{3}} [(-17,4626) + (-29,6049) + (-29,6765)]$ $= -25,5813 \text{ dB}$
$\bar{\eta}_{1,2} = \frac{1}{3} \sum_{i,AO(i,2)=\frac{1}{3}} [(-17,4626) + (-26,1784) + (-23,0865)]$ $= -22,2425 \text{ dB}$
$\bar{\eta}_{1,3} = \frac{1}{3} \sum_{i,AO(i,3)=\frac{1}{3}} [(-17,4626) + (-30,7606) + (-2,1213)]$ $= -15,3673 \text{ dB}$
$\bar{\eta}_{2,1} = \frac{1}{3} \sum_{i,AO(i,1)=\frac{1}{3}} [(-4,6938) + (-30,7606) + (-26,1784)]$ $= -20,5443 \text{ dB}$
$\bar{\eta}_{2,2} = \frac{1}{3} \sum_{i,AO(i,2)=\frac{1}{3}} [(-29,6049) + (-4,6938) + (-2,1213)]$ $= -10,7528 \text{ dB}$
$\bar{\eta}_{2,3} = \frac{1}{3} \sum_{i,AO(i,3)=\frac{1}{3}} [(-29,6765) + (-4,6938) + (-23,0865)]$ $= -19,1523 \text{ dB}$
$\bar{\eta}_{3,1} = \frac{1}{3} \sum_{i,AO(i,1)=\frac{1}{3}} [(-9,4940) + (-23,0865) + (-2,1213)]$ $= -10,1531 \text{ dB}$
$\bar{\eta}_{3,2} = \frac{1}{3} \sum_{i,AO(i,2)=\frac{1}{3}} [(-29,6765) + (-30,7606) + (-9,4940)]$ $= -23,3104 \text{ dB}$
$\bar{\eta}_{3,3} = \frac{1}{3} \sum_{i,AO(i,3)=\frac{1}{3}} [(-29,6049) + (-26,1784) + (-9,4940)]$ $= -21,7591 \text{ dB}$

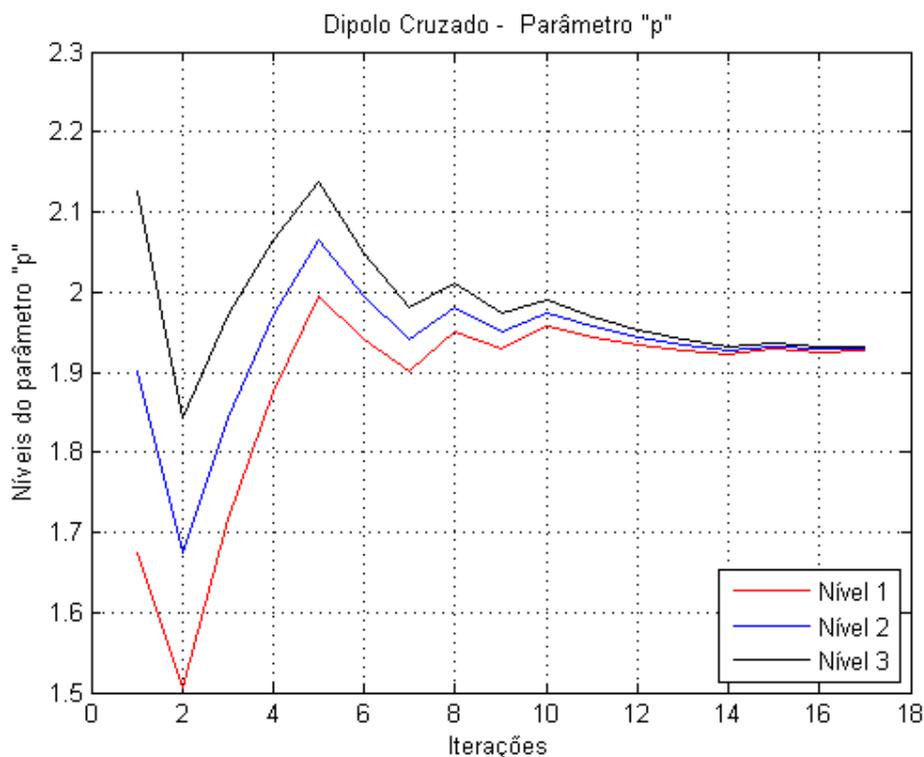
Os valores S/R calculados compõem a tabela de resposta listada na Tabela 5.16.

Tabela 5.16 - Tabela de resposta da primeira iteração - dipolo cruzado.

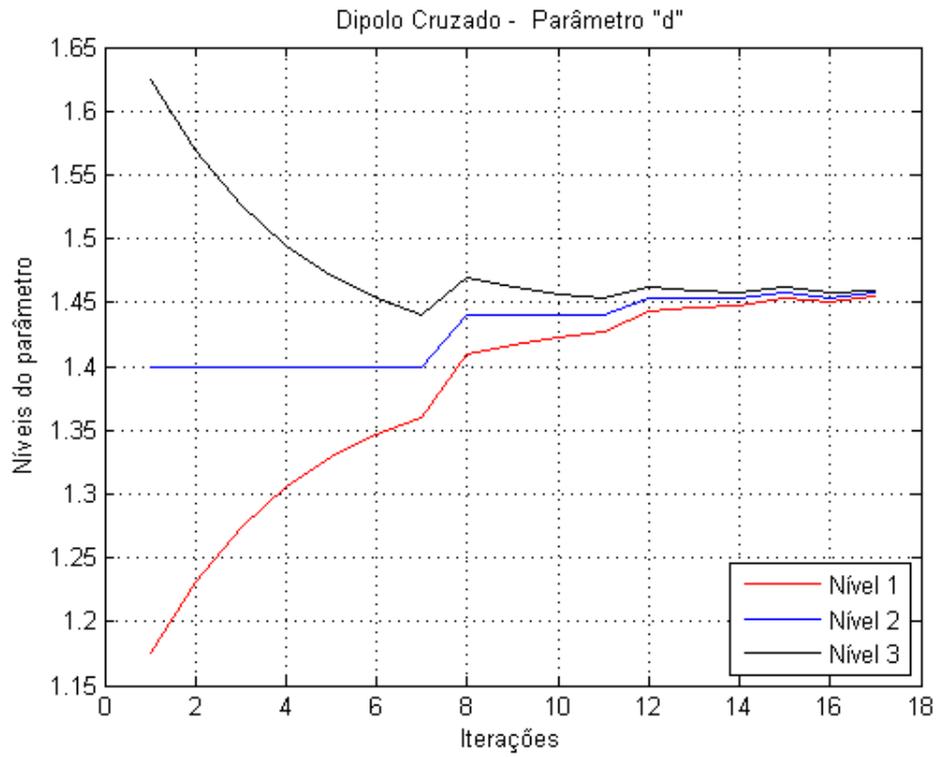
Níveis	Parâmetros (mm)		
	$p$	$d$	$W$
1	-25,5813	-22,2425	-15,3673
2	-20,5443	-10,7528	-19,1523
3	-10,1531	-23,3104	-21,7591

Assim como nas estruturas anteriores, o maior valor de S/R, para cada parâmetro da Tabela 5.16, corresponde ao nível ideal para este parâmetro. Esses níveis são considerados como os valores de nível 2 da iteração seguinte, de modo que os demais níveis (1 e 3) serão reajustados e recalculados. Os mesmos critérios de parada utilizados para as demais geometrias foram utilizados para o dipolo cruzado.

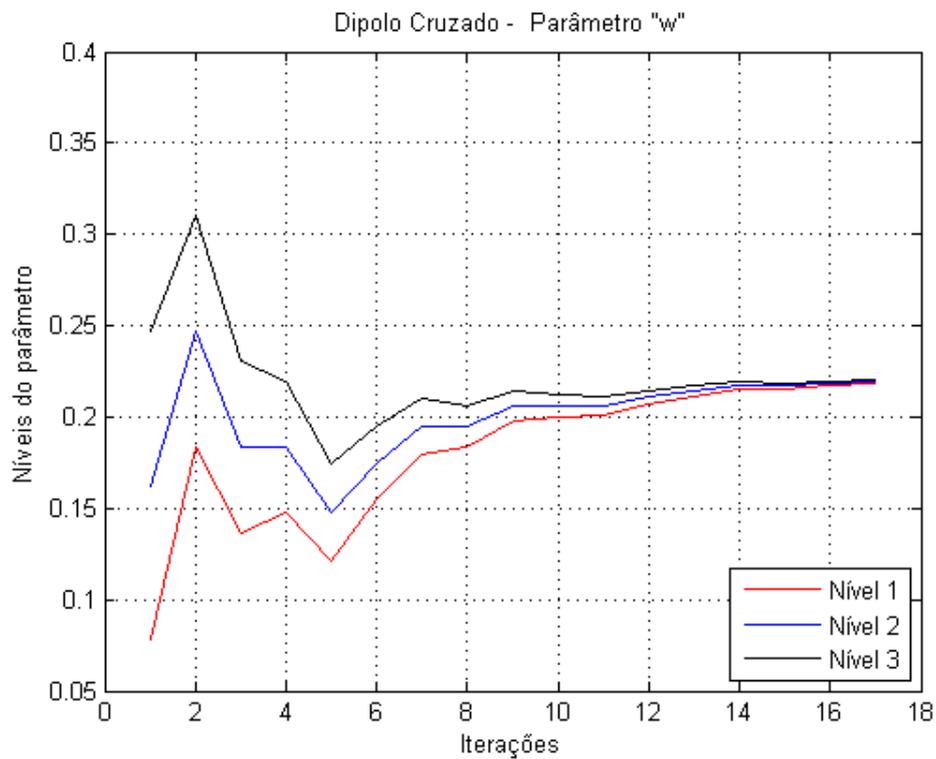
O dipolo cruzado atendeu aos critérios de terminação após 17 iterações do método. A Figura 5.15 ilustra as curvas de convergência para cada parâmetro otimizado.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.15 - Curva de convergência para os parâmetros (a) p, (b) d e (c) w.

A Tabela 5.17 apresenta os valores otimizados nos três níveis, os quais foram utilizados para construir a estrutura desejada.

Tabela 5.17 - Parâmetros do dipolo cruzado otimizados pelo método Taguchi.

Níveis	Parâmetros (mm)		
	$p$	$d$	$W$
1	19,261	14,548	2,188
2	19,261	14,571	2,196
3	19,306	14,593	2,204

Finalizado o processo de otimização o dipolo cruzado foi simulada no *ANSYS Designer®*. A comparação entre os resultados simulados podem ser vistos na Figura 5.16.

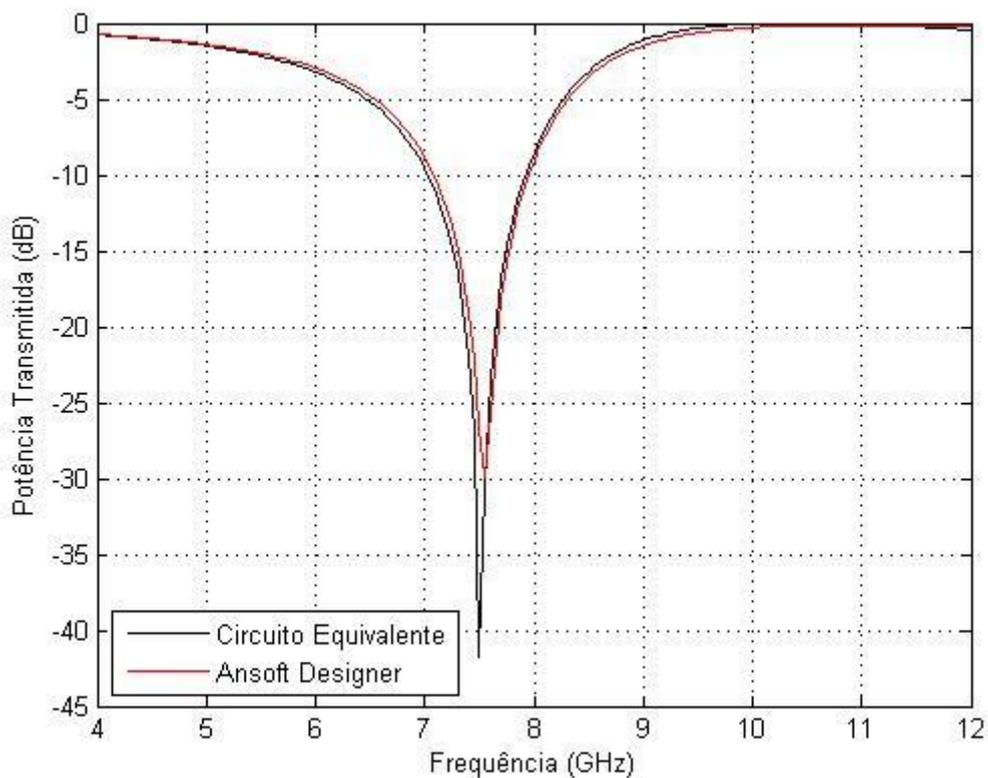


Figura 5.16 - Comparação entre os resultados simulados para uma FSS com dipolo cruzado.

A estrutura da FSS com dipolo cruzado foi construída e medições foram efetuadas no laboratório de Micro-ondas GTEMA-IFPB. A Figura 5.17 ilustra a estrutura construída e a Figura 5.18 ilustra o *setup* de medição montado nesse caso.

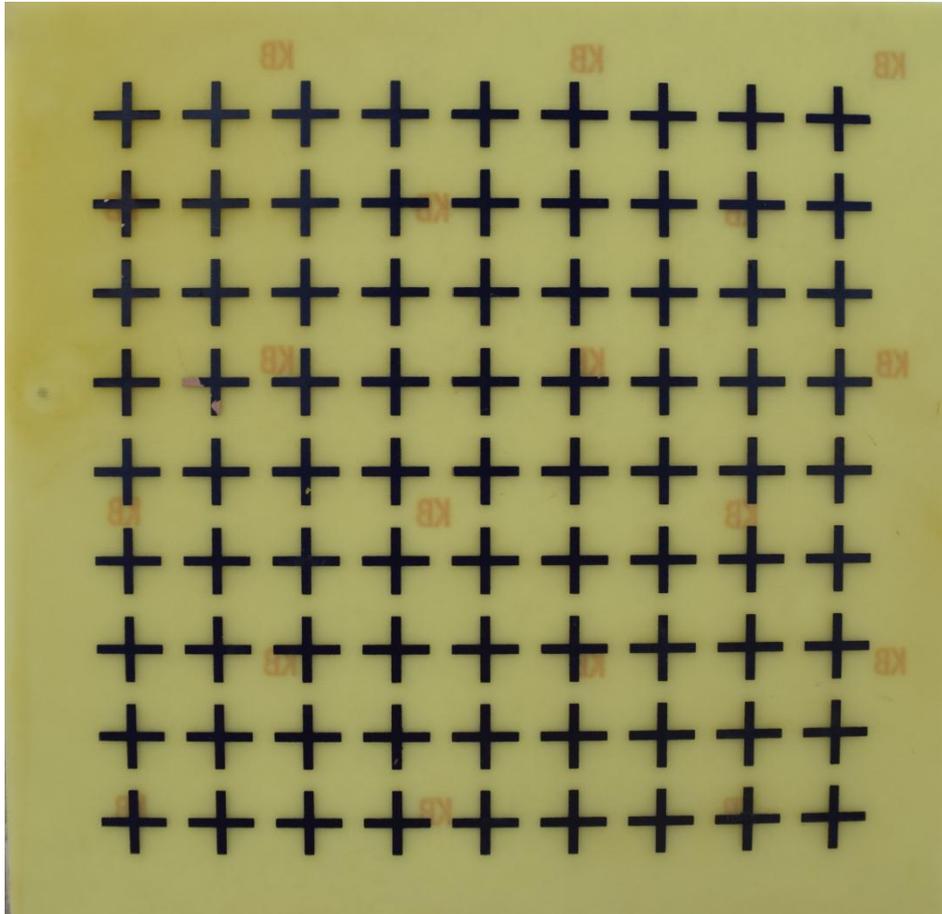


Figura 5.17 - Estrutura dipolo cruzado construído.

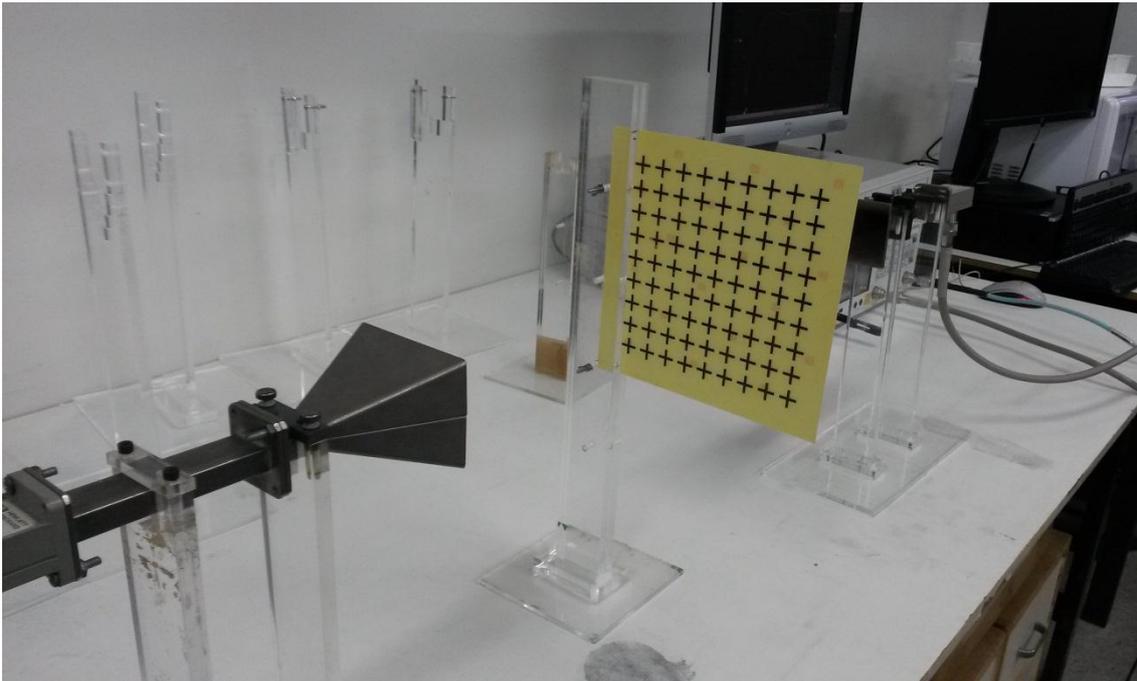


Figura 5.18 - Setup de medição do dipolo cruzado.

Os resultados medidos e simulados foram comparados. A Figura 5.19 ilustra essa comparação.

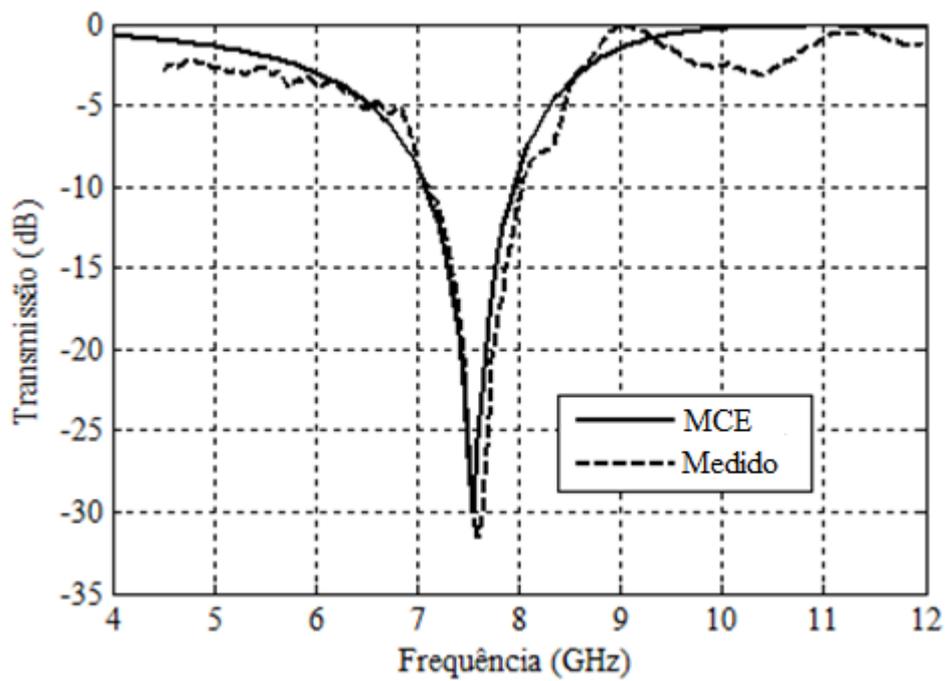


Figura 5.19 - Comparação entre os resultados medidos e simulados para a FSS com dipolo cruzado.

Essa estrutura apresentou os excelentes resultados. A Tabela 5.18 apresenta a taxa de erro entre os valores medidos e simulados.

Tabela 5.18 - Taxa de erro dos valores medidos e simulados da FSS quadrada com grade.

<b>Parâmetros</b>	<b>Obtida</b>	<b>Desejada</b>	<b>Erro (%)</b>
Largura de Banda	0,85 GHz	1,0 GHz	15 %
Frequência de ressonância	7,5 GHz	7,48 GHz	0,2 %

## 5.5. Síntese do capítulo

O quinto Capítulo desta pesquisa apresentou os resultados numéricos e experimentais obtidos. Três estruturas de FSS foram propostas para ser otimizada pelo método Taguchi: FSS quadrada, FSS quadrada com grade e dipolo cruzado. Inicialmente foram determinadas as características de cada estrutura, em seguida foi realizada a otimização com o método Taguchi onde foi detalhada a forma de calcular os níveis, os valores fitness e a tabela de resposta, em seguida os valores correspondentes aos níveis ótimos foram utilizados para análise paramétrica com auxílio do software *ANSYS Designer®*. Por fim as estruturas foram simuladas, construídas e caracterizadas experimentalmente a fim de validar o experimento realizado.

---

# Capítulo 6

## Conclusão

---

Esta tese apresentou um estudo sobre o método de otimização Taguchi destinado a calcular parâmetros de superfícies seletivas em frequência. Foi realizado um estudo sobre FSS, destacando suas aplicações bem como seus métodos de medições e análise. Os parâmetros físicos e características eletromagnéticas das FSS foram estudados. Em relação aos métodos de análise, realizamos um estudo sobre o Método do Circuito Equivalente.

Foi feito um estudo sobre o método de otimização Taguchi. O método é amplamente aplicado nas áreas de engenharia mecânica e engenharia química. Na área do eletromagnetismo o método ainda é pouco estudado, o que nos impulsiona a estudar e pesquisar sobre este método que tem mostrado bons resultados nas suas aplicações, além de ser um método considerado de fácil implementação e que principalmente, requer poucos recursos computacionais para obter os resultados desejados. As pesquisas que foram desenvolvidas anteriormente indicam a eficácia no método. Considera-se como umas das principais contribuições deste estudo, o fato da otimização de parâmetros de FSS pelo método Taguchi ser uma pesquisa inédita.

O conceito de OA e o procedimento de otimização foram descritos em detalhes. O objetivo desta pesquisa foi demonstrar a validade e eficácia do método de Taguchi, otimizando parâmetros de Superfícies Seletivas de Frequências. Os resultados otimizados mostram que os objetivos de otimização desejados são alcançados com sucesso. Para realização desse estudo três estruturas de FSS foram propostas: espira quadrada, espira quadrada com grades e dipolo cruzado. As parâmetros de cada estrutura foi otimizado pelo método Taguchi, em seguida os novos parâmetros foram simulados no ANSYS Designer. As estruturas com os novos parâmetros foram construídas e caracterizadas experimentalmente em laboratório de Micro-onda GTEMA-IFPB. Os resultados medidos e simulados foram comparados. Como esperado, os resultados foram bastante satisfatórios. Em relação a largura de banda o

melhor resultado obtido foi na FSS quadrada, com 0% de erro. Em relação a frequência de ressonância o dipolo cruzado obteve o melhor resultado, com 0.2% de erro.

Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se a aplicação do método Taguchi a outros elementos de FSS, bem como elementos de aberturas. Sugere-se também comparar os resultados obtidos com o Método Taguchi com outros métodos de otimização e técnicas de inteligência artificial.

---

## ANEXO A

### Construção do arranjo ortogonal

---

Várias técnicas são conhecidas para a construção de arranjos ortogonais, de modo que há uma estreita relação entre AO e a teoria da codificação [10]. Inicialmente determina-se um número mínimo de linhas  $N$  de modo que o AO  $(N, k, s, t)$  exista. A razão pela qual se encontra um  $N$  mínimo é que um menor número de experimentos é desejável na prática. Os parâmetros AO  $(N, K, s, t)$  devem satisfazer as seguintes desigualdades:

$$N \geq \sum_{i=0}^u \binom{K}{i} (s-1)^i, \text{ if } t = 2u, u > 0, \quad (\text{A.1})$$

$$N \geq \sum_{i=0}^u \binom{K}{i} (s-1)^i + \binom{K-1}{u} (s-1)^{u+1}, \text{ if } t = 2u+1, u \geq 0. \quad (\text{A.2})$$

Muitas técnicas para construção de arranjos ortogonais têm como base códigos de correção de erros. Hoje, muitos arranjos ortogonais com diferentes números de parâmetros e níveis têm sido desenvolvidos e armazenados em bancos de dados. Para determinadas aplicações, pode-se construir o arranjo ortogonal por meio de códigos computacionais. Um algoritmo de construção de um arranjo ortogonal foi apresentado em [10], em que para um AO  $(N, K, s, t)$  os valores de  $N$  e  $K$  são determinados pelas equações:

$$N = s^p \quad (\text{A.3})$$

$$K = \frac{N-1}{s-1} \quad (\text{A.4})$$

em que  $p$  é um número inteiro positivo começando por 2.

A construção do algoritmo pode ser dividida em duas partes: construção de colunas básicas e construção das colunas não básicas. As colunas não básicas são combinações lineares das colunas básicas. O pseudocódigo do algoritmo é dado do seguinte modo:

1) Construção de colunas básicas

```
for ii = 1 to p
    k = (sii-1)/(s-1)
for m = 1 to N
    a(m,k) = |(m-1)/(sp-1)| mod s
end (loop m)
end (loop ii)
```

2) Construção de colunas não básicas

```
for ii = 2 to p
    k=(sii-1)/(s-1)+1
    for jj = 1 to k-1
        for kk = 1 to s-1
            a(1~m, k + kk + (jj-1)(s-1)) = (a(1~m, jj) kk
+a(1~m,k)) mod s
        end (loop kk)
    end (loop jj)
end (loop ii)
a(m,k) = a(m, k)+1
```

Para exemplificar a construção do arranjo ortogonal um código desenvolvido em Matlab é apresentado [10]. Neste exemplo o usuário deve alterar os valores de S e J, que são indicados por “\*”:

```
clc; clear all;
S = 3; %level “ * ”
J = 2; % related to M “ * ”
M = SJ; % # of experiment

for k = 1:J % for basic columns
    j = (S(k-1)-1)/(S-1) + 1;
    for i = 1:M
        A(i,j) = mod(floor((i-1)/(S(J-k))),S);
    end
```

```

end
for k = 2:J % for non-basic columns
    j = (S^(k-1)-1)/(S-1) + 1;

    for p = 1:j-1
        for q = 1:S-1
            A(:, (j + (p-1)*(S-1) + q)) = mod((A(:,p)*q + A(:,j)),S);
        end
    end
end

% A = A + 1; % if values start from 1
% output data
[N,K] = size(A);
str1 = num2str(N, '%0.1d');
str2 = num2str(K, '%0.1d');
str3 = num2str(S, '%0.1d');
TT = ['\OA(' str1 ', ' str2 ', ' str3 ', 2).txt'];
fid2 = fopen(TT, 'wt');

for j = 1:N
    for k = 1:K
        fprintf(fid2, '%0.1d ', A(j,k));
        if k == K
            fprintf(fid2, '\n');
        end
    end
end
fclose(fid2);

```

---

## ANEXO B

### Método AO-PSO

---

O método Taguchi tem grande capacidade de otimização na área do Eletromagnetismo, embora sua aplicação ainda seja considerada “nova” na área. Como parte essencial do método Taguchi, o conceito de AO também pode ser aplicado em outras técnicas de otimização para melhorar seu desempenho. Neste tópico iremos apresentar de forma sucinta um método híbrido que integra o conceito de AO com a técnica PSO. A técnica PSO não é utilizada neste estudo como forma de comparação com o método Taguchi, porém lançamos a discursão para que possa ser pesquisada posteriormente.

O método PSO (Otimização de Enxame de Partículas) tem demonstrado ser eficaz na otimização de problemas complexos. A ideia fundamental do algoritmo é o estabelecimento, em cada passo ou iteração, do movimento de cada uma das partículas do grupo composto por  $n$  partículas, sendo  $n$  um valor aleatório escolhido pelo usuário. Este movimento é norteado pela lembrança da melhor posição (melhor valor da função *fitness*) no espaço que a partícula já encontrou em seu movimento e no conhecimento da melhor posição já encontrada por todo o grupo. O fluxograma do algoritmo PSO é ilustrado na Figura B.1.

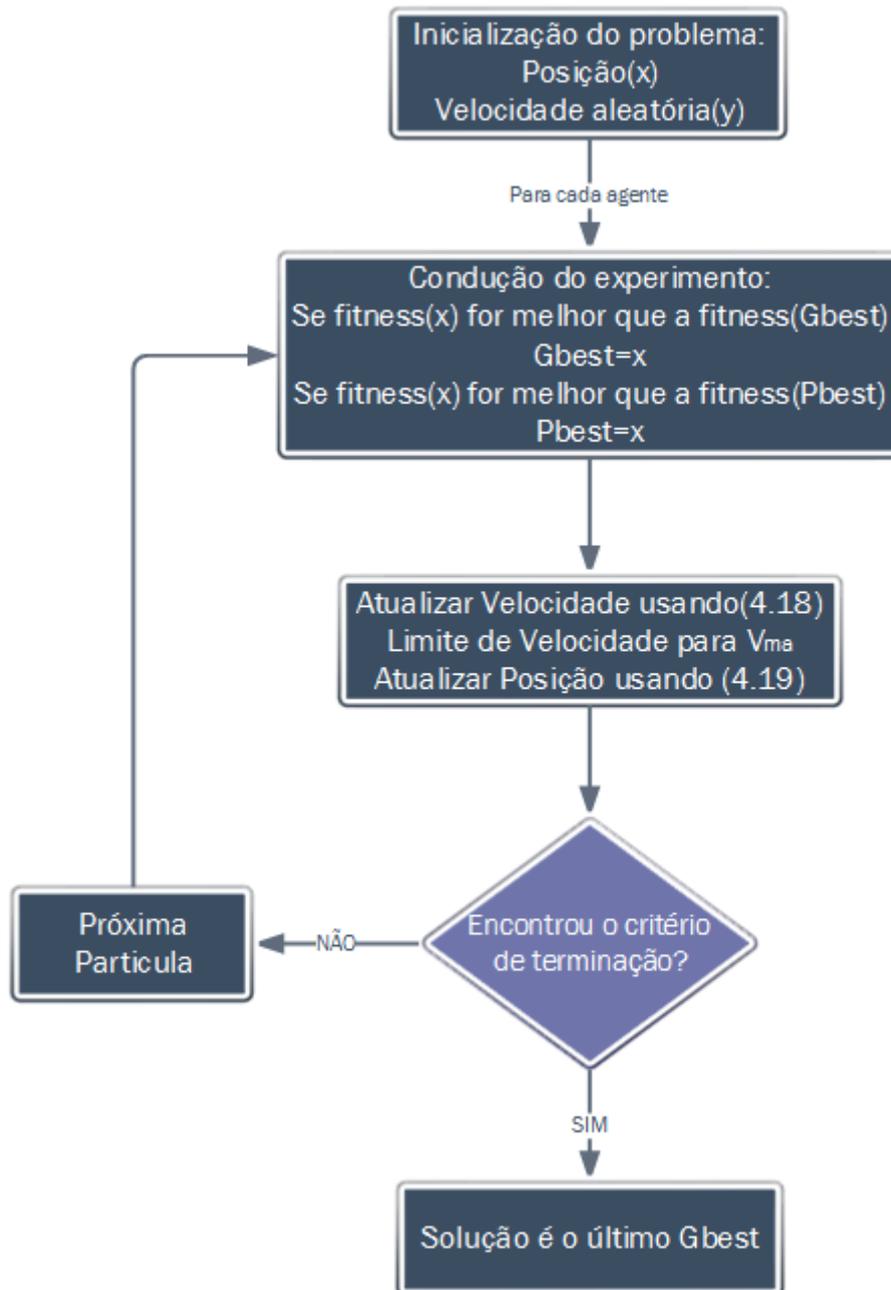


Figura A.1: Fluxograma de otimização do método AO-PSO.

Cada partícula do enxame tem  $k$  dimensões a ser otimizada. O processo de otimização começa a partir da inicialização do problema, que define o espaço de solução, a função *fitness*, as posições iniciais das partículas  $x_i$  e a velocidade das partículas  $v_i$ . Quando o enxame inteiro encontra a melhor solução, a posição da partícula é armazenada em um vetor denominado  $G_{best}$ . Quando uma partícula descobre uma solução melhor do que a encontrada anteriormente pelo enxame completo, a posição da partícula é armazenada em

um vetor de partícula chamado  $P_{best}$ . Se existem  $N$  partículas e cada partícula tem  $K$  parâmetros que devem ser otimizados, o  $G_{best}$  é um vetor  $1 \times k$  e  $P_{best}$  é uma matriz  $N \times k$ .

A velocidade de cada partícula para a próxima iteração é atualizada pela seguinte equação:

$$v_{i+1} = wv_i + c_1 \text{rand}() (P_{best,i} - x_i) + c_2 \text{Rand}() (G_{best} - x_i), \quad (\text{B.1})$$

onde  $w$  é um valor inicial escolhido entre 0 e 1, o valor de  $c_1$  e  $c_2$  é 2.0. Além disso  $v_{i+1}$  é limitado por  $\pm v_{max}$  que é a velocidade máxima permitida numa certa direção. Geralmente o valor de  $v_{max}$  é definido como a metade do tamanho do espaço de solução. O  $\text{rand}()$  e  $\text{Rand}()$  são valores uniformes aleatórios que variam entre 0 e 1.

A nova posição de uma partícula para a iteração seguinte é determinado pela equação abaixo.

$$x_{i+1} = x_i + v_{i+1}. \quad (\text{B.2})$$

O processo de otimização é executado de forma iterativa até que o valor fitness de  $G_{best}$  atenda aos critérios de otimização. O PSO é um método bastante simples de ser implementado e sua eficiência no Eletromagnetismo tem sido demonstrada na literatura específica.

No método PSO, a inicialização do processo dar-se com posições aleatórias das partículas, porém isto não é eficiente uma vez que as posições aleatórias das partículas não são uniformemente distribuídas em todo o espaço, especialmente em problemas de grandes dimensões, pois a posição das partículas pode não estar próxima a uma solução ótima. Como solução deste problema um AO é usado para inicializar as posições das partículas. A ideia básica é que um AO pode oferecer uma distribuição justa e equilibrada em toda faixa de otimização, conseqüentemente a eficiência da otimização do PSO é melhorada.

Este PSO modificado é chamado de AO-PSO, assim a única diferença entre o AO-PSO e o PSO clássico é o processo de inicialização que em vez de ser posições com valores aleatórios, são posições inicializadas pelo AO. Neste método híbrido, o número de partículas deve ser igual ao número de linhas do AO. Pesquisas comprovaram que o AO-PSO é melhor e mais eficiente que o PSO clássico.

---

## Bibliografia

---

- [1] D. Gies and Y. Rahmat-Samii, Particle Swarm Optimization for Reconfigurable Phased Differentiated Array Design, *Microwave and Optical Technology Letter*, vol. 38, no. 3, pp. 168–175 (2003).
- [2] A. L. P. S.Campos, A.M. Martins, and V. A. Almeida Filho, Synthesis of Frequency Selective Surfaces Using Genetic Algorithm Combined with The Equivalent Circuit Method. *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol 54, pp. 1893–1897(2012).
- [3] M. C. A.Netto, J. P. L.Araújo, F. J. B.Barros, A. N. Silva, G. P. S. Cavalcante, and A. G. d'Assunção, Bioinspired Multiobjective Synthesis of X-band FSS via General Regression Neural Network and Cuckoo Search Algorithm. *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol 57, pp. 2400–2405(2015).
- [4] P. H. da F. Silva, R. M. S. Cruz, and A. G. d'Assunção, Blending PSO and ANN for Optimal Design of FSS Filters with Koch Island Patch Elements, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 46, pp. 1-4 (2010).
- [5] Y. Kuwahara, Multi-objective Optimization Design of Yagi-Uda Antenna, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 53, pp. 1984–1992 (2005).
- [6] M. Samsuzzaman, M. T. Islam, S. Kibria, and M. Cho, A Compact Circularly Polarized High Gain S-band Nano Satellite Antenna Using Ramped Convergence Particle Swarm Optimization. *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 57, pp. 1503–1508(2015).

- [7] S. K. Jain, Optimization of Dual Resonance Stacked Patch Resonator by Neural Hybridized Bacteria for Aging Algorithm. *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 57, pp. 1191–1199(2015).
- [8] D. Singh, A. Kumar, S. Meena, and V. Agarwala, Analysis of Frequency Selective Surfaces for Radar Absorbing Materials, *Progress In Electromagnetics Research B*, Vol. 38, pp. 297-314 (2012).
- [9] A. E. Yilmaz and M. Kuzuoglu, Design of the Square Loop Frequency Selective Surfaces with Particle Swarm Optimization via the Equivalent Circuit Model, *Radioengineering*, Vol. 18, pp. 95-102 (2009).
- [10] W. C. Weng, F. Yang, and A. Elsherbeni, *Electromagnetics and Antenna Optimization Using Taguchi Method*, Morgan & Claypool Publishers(2007).
- [11] G. Pelosi, S. Selleri, and R. Taddei, A Novel Multiobjective Taguchi Optimization Technique for Multibeam Array Synthesis. *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 55, pp. 1836–1840(2013).
- [12] X. Li, Z. Wang, and S. Fang, An Accurate Effective Radius Formula Based on Taguchi Method for Calculating Resonant Frequency of Electrically Thin and Thick Circular Patch Antennas. *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 57, pp. 2567–2572(2015).
- [13] M. Sarshenas and Z. H. Firouzeh, A Robust Hybrid Taguchi-Gradient Optimization Method for the Calculation of Analytical Green's Functions of Microstrip Structures, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 14, pp. 1366-1368 (2015).
- [14] R. Mittra, C. H. Chan, and T. Cwik, "Techniques for analyzing frequency selective surfaces – a review," *IEEE Proceedings*, vol. 76, no. 12, pp. 1593–1615, 1988.

- [15] A. L. P. de S. Campos, *Superfícies Seletivas em Frequência – Análise e Projeto*. IFRN Editora, 2009.
- [16] B. A. Munk, *Frequency-selective surfaces: theory and design*. John Wiley & Sons, New York, 2000.
- [17] T. K. Wu, *Frequency selective surface and grid array*, John Wiley & Sons, New York, 1995.
- [18] Silva, M. W. B. *Superfícies seletivas em frequência - FSS : concepção e projeto de absorvedores planares de micro-ondas para aplicação em WLAN, WIMAX e radar*. Tese. Campinas – SP, 2014.
- [19] A. L. P. de S. Campos, R. de Oliveira Moreira, and J. Trindade, "A comparison between the equivalent circuit model and moment method to analyze fss," *IEEE International Microwave and Optoelectronics Conference*, pp. 760–765, 2009.
- [20] E. A. P. P. Callaghan and R. J. Langley, "Influence of supporting dielectric layers on the transmission properties of frequency selective surfaces," *IEE Proc. –H: Microw. Antennas Propag.*, vol. 38, no. 5, pp. 448–454, 1991.
- [21] N. Marcuvitz, *Waveguide Handbook*. New York: Peter Peregrinus Ltd, 1986.
- [22] N. Fourikis, "A proposal for a novel shared aperture radar suitable for horizon searches," *Proceedings of IEEE International Conference on Phased Array Systems and Technology*, pp. 433-436, 2000.
- [23] E. Walton, E. Lee, D. Kohlgraf, R. Pavlovicz, G. Bruce e B. Montgomery, "Compact shipboard antenna system for simultaneous communication with three separate satellites," *Proceedings of MTS/IEEE OCEANS*, pp. 1577-1580, vol. 2, 2005.

- [24] G. Sen, S. Mahato, T. Mandal, S. Mondal, S. Majumdar, e P. P. Sarkar, "Design of a wide band frequency selective surface (FSS) for multiband operation of reflector antenna", 5th International Conference on Computers and Devices for Communication (CODEC), pp. 1-3, 2012.
- [25] C. G. Bin, Q. Y. Ping, Z. Y. Fang e M. J. Gang, "Design of quasi-optical filter for geostationary orbit microwave radiometer," 5th Global Symposium on Millimeter Waves (GSMM), pp. 529-534, 2012.
- [26] S. Monni, A. Neto, G. Gerini, F. Nennie e A. Tijhuis, "Frequency-selective surface to prevent interference between radar and SATCOM antennas," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 8, pp. 220-223, 2009.
- [27] T. Smith, U. Gothelf, O. S. Kim e O. Breinbjerg, "An FSS-backed 20/30 GHz circularly polarized reflect array for a shared aperture L- and ka-band satellite communication antenna," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 62, n° 2, pp. 661-668, 2014.
- [28] S. W. Lee, G. Zarrillo, and C. Law, "Simple formulas for transmission through periodic metal grids or plates," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 30, no. 5, pp. 904–909, 1982.
- [29] O. Luukkonen, Artificial impedance surfaces. Phd dissertation, Helsinki University of Technology – Department of Radio Science and Engineering, 2009.
- [30] R. J. Luebbers and B. A. Munk, "Some effects of dielectric loading on periodic slot arrays" IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 26, no. 4, pp. 536–542, 1978.
- [31] E. A. P. P. Callaghan and R. J. Langley, "Influence of supporting dielectric layers on the transmission properties of frequency selective surfaces," IEE Proc. –H: Microw. Antennas Propag., vol. 38, no. 5, pp. 448–454, 1991.

- [32] KUO, Kevin; HAN, Jingbo, DEMIR, Veysel. Optimization of a Microstrip Matching Circuit at Two Frequencies Using Taguchi Method. 28th Annual Review of Progress in Applied Computational Electromagnetics, 2012.
- [33] WENG,Wei-Chung *et al.* Electromagnetic Optimization Using Taguchi Method: A Case Study of Linear Antenna Array Design. IEEE, 2006.
- [34] SALKIM,Ismail; YILMAZ, Asim Egemen. Calculation of Optimized Parameters for the Rectangular Microstrip Antennas by means of Taguchi Method. Electrical Review, ISSN 0033-2097, 2011.
- [35] M. Spasos, et al; Optimization of a 12.5 GHz Microstrip Antenna Array Using Taguchi Method. International Journal of Antennas and Propagation, 9 pag. DOI: 10.1155/2011/458569, 2011.
- [36] W. C. Weng *et al.* Electromagnetic Optimization Using Taguchi Method: A Case Study of Linear Antenna Array Design, IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, pp. 2063 – 2066.
- [37] A. Smida *et al.* Beam Synthesis of Phased Circular Antenna Arrays Using Taguchi Method. DOI: 978-1-4577-0058-3/12/, IEEE, 2012.
- [38] Y. Diao et al. Computational Complexity Reduction in Taguchi Method Based Joint Optimization of Antenna Parameters in LTE-A Networks. Australian Communications Theory Workshop (AusCTW), 2013.
- [39] Y. Mahmud Esad; G. Tayfun. Conformal Antenna Array Synthesis Using Taguchi Algorithm. 8th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), pg 448 – 452, 2013.
- [40] W. C. Weng *et al.* Design of an Ultra-Wideband Antenna Using Taguchi Optimization Method. 24th Annual Review of Progress in Applied Computational Electromagnetics, 2008.

[41] Po-Jen Cheng et al. Design of a Piezoelectric Speaker Driver Based on Fuzzy Theory and Taguchi Method. International Symposium on Computer, Consumer and Control, 2014.

[42] S. Yiwen et al. Efficient GA approach combined with Taguchi method for mixed constrained circuit design. International Conference on Computational Science and Its Applications, 2011.

[43] C. Kit Yan; D. Tharam S. On-Road Sensor Configuration Design for Traffic Flow Prediction Using Fuzzy Neural Networks and Taguchi Method. TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, VOL. 62, 2013.

[44] W. C. Weng et al. Optimization Comparison between Taguchi Method and PSO by Design of a CPW Slot Antenna, IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 2009.

[45] G. Zwe-Lee et al. Optimization of In-wheel PM Motor by Fuzzy based Taguchi Method. International Power Electronics Conference, 2010.

[46] G. Faten Ben. A new UWB slot antenna with rejection of WiMAX bands. Computer Applications & Research (WSCAR). Pag 1-6, 2014.

[47] J. D. B. Filgueira *et al.* Calculation of Optimized Parameters for the Frequency Selective Surfaces by means of Taguchi's Method. Microwave and Optical Technology Letters, vol 58, pag 1984 – 1989, DOI: 10.1002/mop.29965, 2016.