



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E
DE COMPUTAÇÃO



Obtenção de parâmetros construtivos para antenas de microfita utilizando o Método Taguchi de otimização

Ruann Víctor de Andrade Lira

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

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação da UFRN (área de concentração: Telecomunicações) como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Número de ordem do PPgEEC: M505
Natal, RN, novembro de 2017

Sistema de Bibliotecas – SISBI
Catalogação da Publicação na Fonte - Biblioteca Central Zila Mamede

Lira, Ruann Víctor de Andrade.

Obtenção de parâmetros construtivos para antenas de microfitas utilizando o Método Taguchi de otimização / Ruann Víctor de Andrade Lira. - 2017.

65 f. : il.

Dissertação (Mestrado) Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Natal, 2018.

Orientador: Dr. Antonio Luiz Pereira de Siqueira Campos.

1. Método Taguchi - Dissertação. 2. Otimização - Dissertação. 3. Antenas de microfitas - Dissertação. I. Campos, Dr. Antonio Luiz Pereira de Siqueira. II. Título.

RN/UFRN/BCZM

CDU 621. 3

Obtenção de parâmetros construtivos para antenas de microfita utilizando o Método Taguchi de otimização

Ruann Víctor de Andrade Lira

Dissertação de Mestrado aprovada em 24 de novembro de 2017 pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Antonio Luiz P.S.C.

Prof. Dr. Antônio Luiz Pereira de Siqueira Campos DCO/UFRN

Gutemberg Soares da Silva

Prof. Me. Gutemberg Soares da Silva DCO/UFRN

Robson Hebraico Cipriano Maniçoba

Prof. Dr. Robson Hebraico Cipriano Maniçoba UESB

José Patrocínio da Silva

Prof. Dr. José Patrocínio da Silva DEE/UFRN

*"Irmão, você não percebeu que é o
único representante do seu sonho na
face da terra? Se isso não fizer você
correr, chapa, eu não sei o que vai"*

Emicida.

Agradecimentos

A minha família, que sempre colocou a minha educação como prioridade. Em especial ao meu pai Robério Lira e minha mãe Teresa Cristina pelo apoio e torcida durante todos esses anos.

Agradeço a todos que fazem parte do PPGEEC, que de alguma forma, contribuíram para a conclusão dessa etapa.

Aos amigos Felipe, Daniel e Mário pela companhia, amizade e força passada ao longo da nossa convivência.

Por fim, agradeço ao Prof. Dr. Antônio Campos, pela orientação, paciência, confiança e amizade no decorrer da minha vida acadêmica.

Resumo

As aplicações de antenas de microfitas abrangem uma grande área das Telecomunicações, principalmente em sistemas que necessitem de componentes de volume e peso reduzido, como comunicações aeroespaciais. Daí inúmeros pesquisadores têm estudado, cada vez mais, técnicas de otimização no projeto dessas antenas. Assim, esse trabalho tem como principal objetivo a otimização de projeto de antenas de microfitas. Para isso, utiliza-se o Método Taguchi no qual cada parâmetro físico é definido a partir da frequência de operação desejada pelo usuário, das características elétricas do dielétrico que será utilizado para fabricar a antena (espessura do substrato e constante dielétrica do material) e da definição dos limites de otimização (valores máximo e mínimo) que os parâmetros físicos podem atingir. Especificamente, a análise usa o método Taguchi com tratamento dos limites, para que o valor final otimizado não fique fora da faixa especificada. Na análise, são considerados *patches* retangulares e circulares, para projetos nas faixas de frequência específicas para WLAN. No trabalho, são apresentados resultados numéricos e experimentais para a perda de retorno. São feitas comparações entre esses resultados. Uma boa concordância entre os resultados é observada. São apresentadas, ainda, sugestões de continuidade do trabalho.

Palavras-chave: Método Taguchi, Otimização, Antenas de microfita.

Abstract

The applications of microstrip antennas cover a large area of Telecommunications, especially in systems that require components of volume and reduced weight, such as aerospace communications. Hence numerous researchers have been studying, more and more, techniques of optimization in the design of these antennas. Thus, this work has as main objective the optimization of microstrip antenna design. For this, the Taguchi Method is used in which each physical parameter is defined from the frequency of operation desired by the user, of the electric characteristics of the dielectric that will be used to make the antenna (substrate thickness and dielectric constant of the material) and definition of optimization limits (maximum and minimum values) that physical parameters can achieve. Specifically, the analysis uses the Taguchi method with boundary treatment so that the optimum final value does not fall outside the specified range. In the analysis, rectangular and circular patches are considered for projects in the frequency bands specific to WLAN. In the paper, numerical and experimental results are presented for loss of return. Comparisons are made between these results. A good agreement between the results is observed. Suggestions for continuity of work are also presented.

Keywords: Taguchi Method, Optimization, Microstrip Antennas.

Sumário

Sumário	i
Lista de Figuras	iii
1 Introdução	1
1.1 Estruturas	2
1.2 Organização	4
2 Antenas	5
2.1 Tipos de Antenas	5
2.1.1 Antenas Filamentares	5
2.1.2 Antenas de Abertura	6
2.2 Antenas de Microfita	7
2.2.1 Métodos de Alimentação	8
2.2.2 Alimentação por Linha de Microfita	12
2.3 Geometrias Analisadas	14
2.3.1 Geometria Retangular	14
2.3.2 Geometria Circular	16
2.3.3 Casamento de Impedância	16
3 Método Taguchi	17
3.1 Etapa 1 - Inicialização	18
3.1.1 Arranjo Ortogonal	19
3.1.2 Função fitness	21

3.2	Etapa 2 - Definição dos parâmetros	21
3.3	Etapa 3 - Experimentos e tabela resposta	22
3.3.1	Tabela Resposta	24
3.4	Etapa 4 - Nível ótimo	25
3.4.1	Tratamento de Limites	26
3.5	Etapa 5 - Critério de Parada	26
3.6	Etapa 6 - Faixa de otimização	27
4	Resultados Experimentais e Numéricos	28
4.1	Validação da Implementação	28
4.1.1	Validação Retangular	28
4.1.2	Validação Circular	36
4.2	Validação das Estruturas	41
4.2.1	Estrutura Retangular	41
4.2.2	Estrutura Circular	43
4.3	Construção das Estruturas	45
4.3.1	Retangular	45
4.3.2	Circular	46
5	Conclusões	49

Lista de Figuras

1.1	Estruturas básicas analisadas.	3
2.1	Modelos de antenas tipo filamentos. (a) Dipolo, (b) Antena de quadro, (c) Antena helicoidal.	6
2.2	Modelos de antenas tipo abertura.	6
2.3	Exemplos de geometrias.	7
2.4	Composição de uma antena de microfita.	8
2.5	Alimentação por cabo coaxial.	9
2.6	Técnica de Acoplamento por Abertura.	11
2.7	Técnica de Acoplamento por Proximidade.	11
2.8	Alimentação por linha de microfita.	12
2.9	Linha de alimentação indentada.	13
3.1	Fluxograma do Método Taguchi.	18
3.2	Estrutura FSS utilizada.	23
4.1	Convergência para W - Problema 1.	30
4.2	Convergência para L - Problema 1.	31
4.3	Convergência para Frequência - Problema 1.	31
4.4	Erro relativo à função <i>fitness</i> - Problema 1.	32
4.5	Convergência para W - Problema 2.	33
4.6	Convergência para L - Problema 2.	33
4.7	Convergência para Frequência - Problema 2.	34
4.8	Erro relativo à função <i>fitness</i> (retangular) - Problema 2.	34

4.9	Convergência do Raio - Problema 1.	37
4.10	Convergência para Frequência (circular) - Problema 1.	37
4.11	Erro relativo à função <i>fitness</i> (circular) - Problema 1.	38
4.12	Convergência do Raio - Problema 2.	39
4.13	Convergência para Frequência (circular) - Problema 2.	39
4.14	Erro relativo à função <i>fitness</i> (circular) - Problema 2.	40
4.15	Convergência para W.	41
4.16	Convergência para L.	42
4.17	Convergência para Frequência.	42
4.18	Estrutura Retangular.	43
4.19	Convergência para o raio.	43
4.20	Convergência para Frequência.	44
4.21	Estrutura Circular.	44
4.22	Comparativo - Frequência de ressonância (retangular).	45
4.23	Estrutura Construída.	46
4.24	Comparativo - Frequência de ressonância (circular).	47
4.25	Estrutura Construída.	47
4.26	Estrutura retangular e circular construídas.	48

Capítulo 1

Introdução

Estudos e pesquisas em aplicações de rádio aeroespacial, aeronáutica e móvel requerem projetos de antenas que funcionem de forma eficiente. Esses projetos apresentam algumas restrições referentes ao peso, custo, desempenho e facilidade de integração dessas antenas. Como solução, a utilização das antenas de microfita atende a maioria das limitações existentes.

Muitos problemas de síntese no eletromagnetismo apresentam abordagens baseadas em tentativas e erros. A classe dos algoritmos de otimização, conhecidos como "metaheurísticas"[1] - [3], não são mais do que procedimentos de tentativa e erro realizados de forma mais inteligente e sistemática [4].

Os métodos de otimização podem ser divididos em técnicas globais e locais [5]. As técnicas globais têm vantagens e são mais favoráveis em relação às técnicas locais e, nas aplicações eletromagnéticas, uma vez que a primeira produz um ótimo global, em vez de uma ótima localização, encontrando soluções úteis quando as técnicas locais falham. Neste contexto, o método Taguchi aparece como uma abordagem eficiente e popular por reduzir o número de execuções, que satisfaz uma porcentagem de cobertura razoável do problema, uma vez que, o método baseia-se no conceito de matrizes ortogonais.

Métodos de otimização têm sido alvo de atenção em diversas áreas de pesquisa devido às características como robustez e flexibilidade [5], inclusive na área de eletromagnetismo, onde possuem diversas aplicações e conseguem gerar resultados expressivos. É

possível também encontrar nas literaturas alguns trabalhos que utilizam-se desses métodos para potencializar o desempenho de estruturas como Arranjo de Antena [23, 28], Antenas de banda larga (UWB) [9, 22, 24] e Filtros [5]. Porém, neste trabalho a utilização de um método de otimização tem como objetivo encontrar os parâmetros ótimos para a síntese de antenas de microfitas.

Neste estudo, o método Taguchi é aplicado no projeto de antenas de microfita de tipo retangular e circular, apresentando o conceito de arranjo ortogonal, descrevendo o método, listando as principais equações envolvidas no projeto e, finalmente, aplicando o método Taguchi para o problema citado, apresentando os resultados obtidos para diferentes configurações de problemas.

Na realização de projetos para antenas de microfita, algumas considerações devem ser realizadas, tais como:

- Frequência de operação desejada;
- Constante elétrica do substrato;
- Espessura do substrato.

De posse dessas informações e utilizando como ferramenta principal o Método Taguchi, os parâmetros construtivos das antenas são definidos e ajustados, sempre com o objetivo principal de estar em concordância com a frequência de operação desejada em projeto.

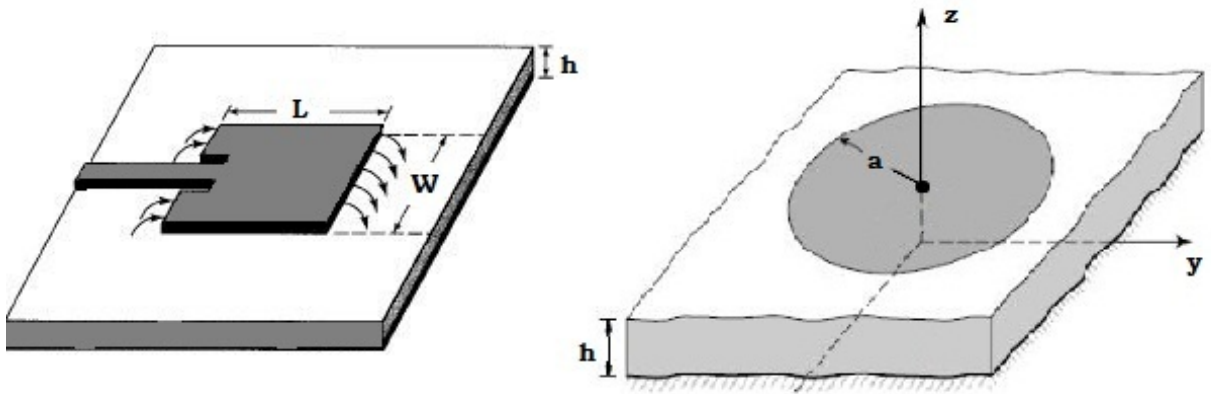
1.1 Estruturas

Antenas de microfita são estudadas desde a década de 1970 e sua idéia inicial é vista na literatura em meados da década de 1950 [12]. Esta antena é simples de fabricar e isso atrai a atenção dos pesquisadores. Basicamente, a antena de microfita consiste em uma tira de metal sobre uma camada dielétrica (substrato) e um plano de terra localizado abaixo do substrato [6]. A frequência de operação da antena depende dos seus parâmetros físicos e

elétricos (característica do substrato) onde, a variação em qualquer um desses parâmetros é capaz de alterar a frequência de ressonância da antena projetada.

As antenas de microfita, também conhecidas como antenas planares, são estruturas simples que podem ser construídas em uma grande variedade de formas (geometrias), mas buscando a simplificação na análise, quando se trata de modelagem matemática, na construção da antena, é muito comum o uso de geometrias simples. Assim, duas estruturas, ilustradas pela figura 3.2, foram utilizadas neste trabalho, uma, com elemento radiante (*patch*) em formato retangular e outra com *patch* em formato circular, estruturas escolhidas por sua simplicidade construtiva, larga utilização e análise matemática relativamente simplificada.

Figura 1.1: Estruturas básicas analisadas.



Fonte: adaptado de [6].

Onde **W** e **L**, que representam respectivamente a largura e o comprimento do *patch*, são os parâmetros construtivos para a antena de elemento quadrado. E **a**, que representa o raio, é o parâmetro construtivo para a antena de elemento circular e **h** representa a espessura do substrato.

1.2 Organização

Este trabalho está organizado em cinco capítulos, onde:

O **capítulo 1** traz uma breve introdução a respeito da ideia central do trabalho.

O **capítulo 2** apresenta um estudo sobre Antena de Microfita. Neste capítulo é dado uma introdução geral, além da descrição da composição das antenas de microfita e os métodos de alimentação utilizados.

O **capítulo 3** apresenta o Método Taguchi de otimização. O capítulo possui uma descrição geral do método, apresentação dos Arranjos Ortogonais e as etapas necessárias para a execução dos processos que compõe o método Taguchi.

O **capítulo 4** demonstra todos os resultados obtidos (validação e construção) através da utilização do método Taguchi na obtenção dos parâmetros construtivos em projetos de antenas de microfita.

Por fim, o **capítulo 5** apresenta conclusões a respeito do trabalho, baseadas no desenvolvimento e resultados apresentados no capítulo 4.

Capítulo 2

Antenas

Antenas são estruturas de composição geralmente metálica que são utilizadas em sistemas de rádio, com o objetivo de propagar as ondas eletromagnéticas e também captá-las. Durante a transmissão, a antena é responsável pela conversão da corrente elétrica em ondas eletromagnéticas, enquanto que durante a recepção é responsável por captar as ondas eletromagnéticas e convertê-las em sinal de corrente elétrica, visando obter a informação transmitida. Desta forma, transforma-se em elementos essenciais para qualquer sistema de comunicação sem fio.

2.1 Tipos de Antenas

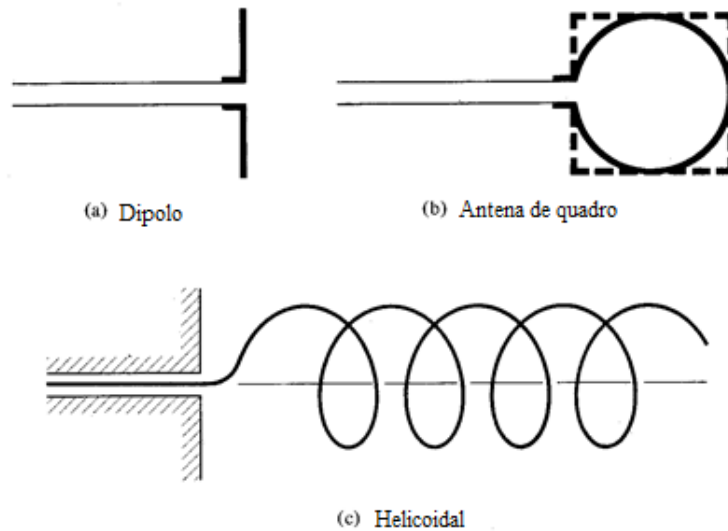
Definida como sendo "Condutor elétrico empregado na telegrafia sem fios, na radiotelefonia, na radiofonia e na radiotelevisão, para facilitar a irradiação e a captação das ondas eletromagnéticas" [36], as antenas podem ser encontradas em formatos distintos para se adaptarem as mais variadas aplicações. Cada aplicação define qual característica uma antena deve possuir como mais significativa.

2.1.1 Antenas Filamentares

É o tipo construtivo de antena mais comum a ser utilizada, podem ser vistas em automóveis, aviões, embarcações, etc. Existem várias especificações, tamanhos e formatos

de antenas filamentosas, das quais se pode citar : dipolos, antenas de quadro, antenas helicoidais [6]. A Figura 2.1 ilustra alguns modelos.

Figura 2.1: Modelos de antenas tipo filamentosas. (a) Dipolo, (b) Antena de quadro, (c) Antena helicoidal.



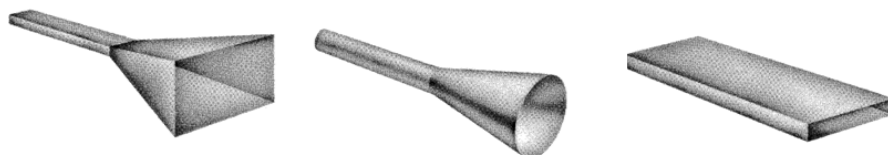
Fonte: retirado de [6].

2.1.2 Antenas de Abertura

Possuem diferentes formas de abertura e são, normalmente, mais utilizadas em aplicações que exige uma melhor diretividade (quando se comparada as antenas planares) [6].

A Figura 2.2 ilustra alguns tipos de antenas de abertura.

Figura 2.2: Modelos de antenas tipo abertura.

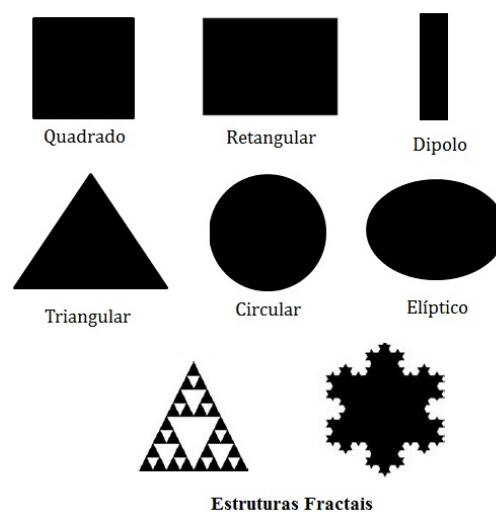


Fonte: adaptado de [6].

2.2 Antenas de Microfita

As antenas de microfita, ou também comumente conhecidas como antenas planares, são estruturas simples que possui um elemento radiante, elemento esse que pode ser representado por diversas geometrias (alguns exemplos podem ser vistos na figura 2.3).

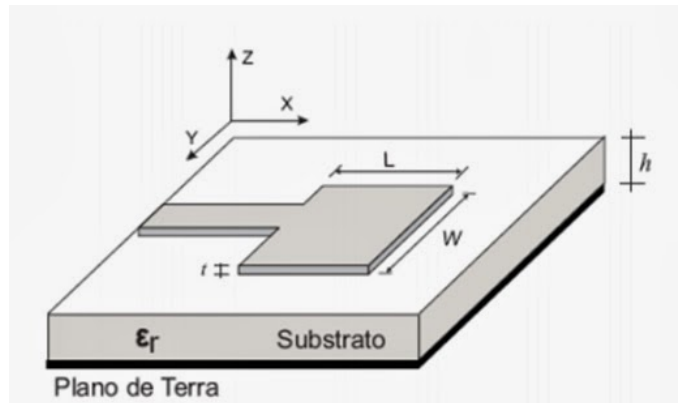
Figura 2.3: Exemplos de geometrias.



Atualmente, a grande maioria das aplicações de antenas de microfita, ou antenas tipo *patch* de microfita encontra-se na área de comunicações sem fio em geral, onde sua tecnologia de fabricação simplificada permite sua integração com diversos tipos de dispositivos e possuem diversas vantagens que viabilizam sua utilização em larga escala, tais como: facilidade na sua fabricação, peso bastante reduzido, baixo custo e dimensões reduzidas [6, 17, 9].

Uma antena de microfita basicamente é formada por duas partes condutoras (o *patch* e plano de terra) separadas por um elemento dielétrico, sendo a parte condutora superior o elemento radiante. A estrutura completa de uma antena de microfita pode ser vista na figura 2.4.

Figura 2.4: Composição de uma antena de microfita.



Fonte: adaptado de [6].

2.2.1 Métodos de Alimentação

Toda antena, para que possa radiar, é alimentada de alguma forma. A técnica empregada para a alimentação das antenas geralmente pode ser dividida em duas: forma direta e forma indireta. A alimentação realizada de forma direta é feita, geralmente, por linha de microfita ou por utilização de cabo coaxial. Já a forma indireta de alimentação é realizada através de acoplamento por proximidade ou acoplamento de abertura.

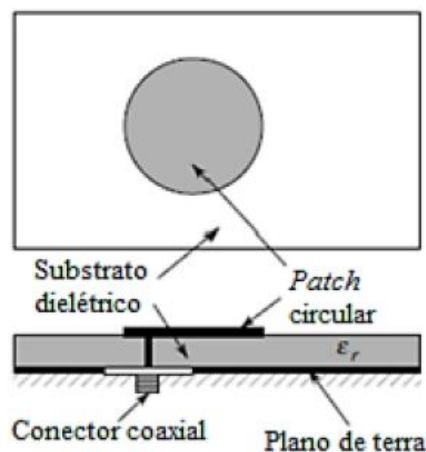
O mecanismo de alimentação da antena é um fator que influencia na largura de banda, onde a técnica de alimentação por linha de microfita e de abertura no plano de terra apresenta largura de banda superior a outras formas de alimentação [6].

Alimentação por Cabo Coaxial

A alimentação feita por cabo coaxial é bastante usual e consiste em utilizar um condutor coaxial que terá sua parte condutora interior conectado ao *patch* radiante, e sua parte condutora exterior conectada ao plano de terra da antena. É de fácil construção e casamento de impedância, evitando problemas com reflexão. Esse tipo de alimentação possui uma baixa radiação espúria, porém apresenta uma largura de banda reduzida e uma modelagem bastante complicada [6].

A Figura 2.5 apresenta uma demonstração de como é utilizada a técnica de alimentação por cabo coaxial em antenas de microfitas.

Figura 2.5: Alimentação por cabo coaxial.



Fonte: retirado de [17].

Alimentação por Acoplamento

As técnicas de alimentação citadas anteriormente apresentam algumas implicações negativas como o aparecimento de modos de propagação de ordens superiores, o que acarreta radiação de polarização cruzada [6]. Com o intuito de minimizar o problema anterior, técnicas de alimentação sem contato podem ser empregadas. Esse tipo de alimentação sem contato é conhecido como acoplamento e possui duas formas mais comum:

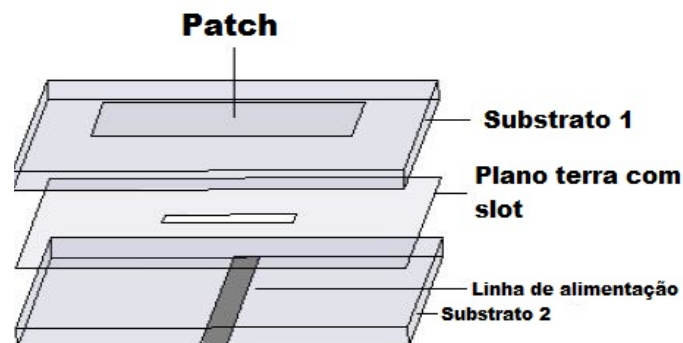
- Acoplamento por abertura;
- Acoplamento por proximidade .

Acoplamento por Abertura

A alimentação do tipo acoplamento por abertura é dentre todas as técnicas de alimentação, citadas neste trabalho, a que possui o processo de fabricação mais oneroso, porém não apresenta modelagem matemática complicada e tem radiação espúria considerada moderada [6].

Essa técnica consiste na utilização de dois substratos, diferentemente das técnicas de alimentação por linha de microfita e de cabo coaxial, os quais são separados por um plano de terra. Geralmente o substrato inferior possui uma constante dielétrica elevada, enquanto que no substrato superior a constante dielétrica é baixa. O substrato abaixo do plano de terra recebe uma linha de microfita em sua face inferior, assim a energia será acoplada ao *patch* por uma abertura localizada no plano de terra [6]. A figura 2.6 demonstra a alimentação de uma antena pela técnica de acoplamento por abertura.

Figura 2.6: Técnica de Acoplamento por Abertura.



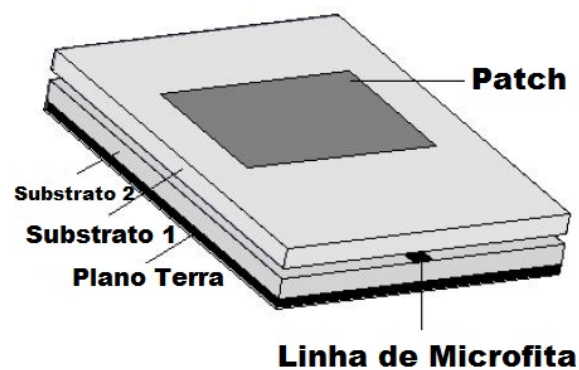
Fonte: retirado de [18].

Acoplamento por Proximidade

A alimentação do tipo acoplamento por proximidade é dentre todas as técnicas de alimentação, citadas neste trabalho, a que insere na antena a maior largura de banda (de até 13%) e da mesma forma que a outra técnica de acoplamento, possui uma modelagem matemática relativamente simplificada, além de ter uma radiação espúria considerada baixa [6].

Essa técnica também faz uso de dois substratos, mas não possui um plano de terra entre eles. Agora o substrato abaixo do plano de terra recebe uma linha de microfita em sua face superior e possui um plano de terra em sua face inferior. A figura 2.7 demonstra a alimentação de uma antena pela técnica de acoplamento por abertura.

Figura 2.7: Técnica de Acoplamento por Proximidade.



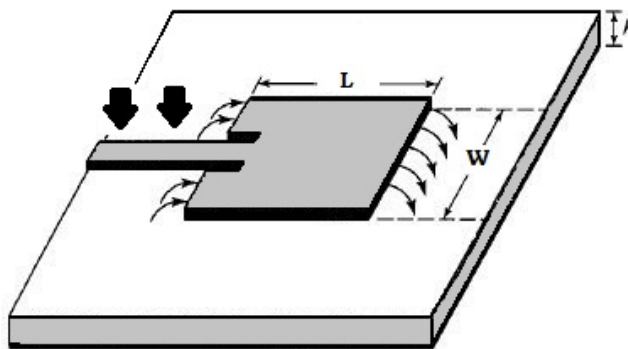
Fonte: retirado de [18].

2.2.2 Alimentação por Linha de Microfita

A alimentação feita através de linha de microfita consiste em utilizar uma fita condutora, de mesmas características do condutor presente no *patch*, porém possui largura muito menor em relação ao *patch* radiante [6].

A inserção da linha de microfita é realizada da mesma forma que a construção do *patch*, fazendo com que esse tipo de alimentação possua fácil fabricação, além de apresentar uma modelagem simplificada [17]. O único inconveniente desse tipo de alimentação está relacionado ao aumento da espessura do substrato dielétrico utilizado na construção da antena, uma vez que, o aumento dessa espessura ocasiona diretamente o acréscimo de ondas superficiais, limitando a largura de banda da antena [6]. A figura 2.8 ilustra como é realizada a alimentação com a utilização da técnica de alimentação por linha de microfita.

Figura 2.8: Alimentação por linha de microfita.



Fonte: adaptado de [6].

O comportamento da impedância de entrada para uma antena alimentada por linha de microfita é realizado, analiticamente, por meio de vários modelos, incluindo o modelo de linha de transmissão e o modelo de cavidade, e por meio da análise de onda completa.

Tomando-se como referência a análise realizada pelo **Modelo de linha de transmissão**, a impedância de entrada de uma antena (resistência de entrada de ressonância) alimentada por uma linha de microfita é descrita por BALANIS, em [6], como sendo:

$$R_{in} = \frac{1}{2(G_1 \pm G_{12})} \quad (2.1)$$

Sendo G_1 a condutância, geralmente expressa como [6]:

$$G_1 = \frac{2P_{rad}}{|V_o|^2} = \frac{I_1}{120\pi^2}, \quad (2.2)$$

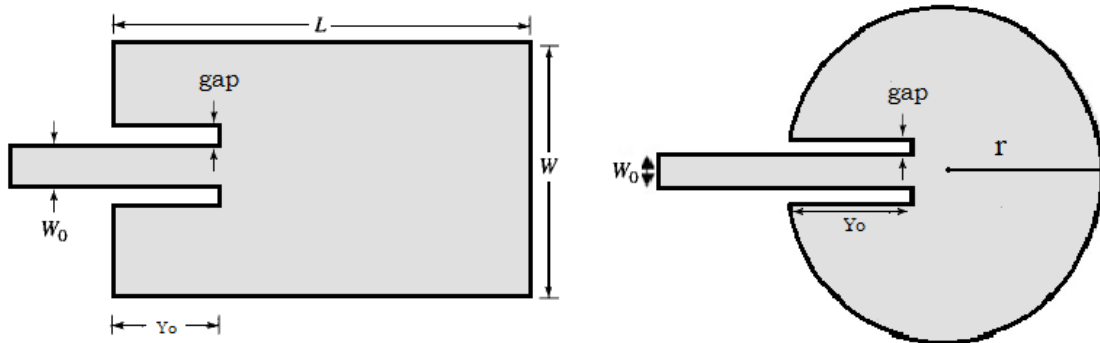
$$I_1 = \int_0^\pi \left[\frac{\sin\left(\frac{k_0 W}{2} \cos\theta\right)}{\cos\theta} \right]^2 \sin\theta d\theta \quad (2.3)$$

E G_{12} a condutância mútua, definida como [6]:

$$G_{12} = \frac{1}{120\pi^2} \int_0^\pi \left[\frac{\sin\left(\frac{k_0 W}{2} \cos\theta\right)}{\cos\theta} \right]^2 J_0(k_0 L \sin\theta) \sin^3\theta d\theta \quad (2.4)$$

A resistência de entrada de ressonância pode ser alterada usando uma alimentação indentada (*inset-feed*), que consiste em uma inserção de y_0 (ranhura) na alimentação da antena, como pode ser visto na Figura 2.9. Esta técnica é empregada eficientemente para a realização do casamento de impedância entre a antena e a alimentação por linha de microfita.

Figura 2.9: Linha de alimentação indentada.



A linha de microfita, utilizada na alimentação, apresenta impedância característica expressa por [6]:

$$Z_c = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{ref}}} \ln \left[\frac{8h}{w_0} + \frac{w_0}{4h} \right], & \frac{w_0}{h} \leq 1 \\ \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{ref}} \left[\frac{w_0}{h} + 1.393 + 0.667 \ln \left(\frac{w_0}{h} + 1.444 \right) \right]}, & \frac{w_0}{h} > 1 \end{cases} \quad (2.5)$$

Onde w_0 é a largura da linha de microfita, como é visto na Figura 2.9. Utilizando-se de uma expansão modal, BALANIS ,em [6], demonstra que a resistência de entrada para a alimentação indentada é dada aproximadamente por:

$$R_{in}(y = y_0) = R_{in}(y = 0) \cos^2 \left(\frac{\pi}{L} y_0 \right) \quad (2.6)$$

$$R_{in}(y = y_0) = \frac{1}{2(G_1 \pm G_{12})} \cos^2 \left(\frac{\pi}{L} y_0 \right) \quad (2.7)$$

2.3 Geometrias Analisadas

No decorrer do trabalho, duas geometrias básicas para o *patch* são analisadas:

- Geometria retangular;
- Geometria circular.

2.3.1 Geometria Retangular

Geometria escolhida por sua larga aplicação, além de possuir uma análise relativamente simples e bastante conhecida. Para a utilização dessa geometria, uma análise pode ser vista em [6] ou também observada em em [10]. Dessa forma a frequência de ressonância da estrutura pode ser descrita como sendo [6]:

$$f_r = \frac{c_o}{2(L + \Delta L) \sqrt{\epsilon_{eff}(W)}} \quad (2.8)$$

Onde c_o representa a velocidade da luz no espaço livre e ϵ_{eff} é a constante dielétrica efetiva expressa por [6]:

$$\epsilon_{eff}(W) = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2(1 + \frac{10}{\mu})^{1/2}} \quad (2.9)$$

Sendo ϵ_r a permissividade elétrica do substrato, $\mu = W/h$ e ΔL definido como [6]:

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_e(W) + 0.300)(W/h + 0.264)}{(\epsilon_e(W) - 0.258)(W/h + 0.813)} \quad (2.10)$$

Para a análise neste trabalho, foi levado em consideração um refinamento realizado por KARA, em [10], sendo ajustado e encontrado uma nova relação para a constante dielétrica efetiva ϵ_{eff} . Assim temos:

$$\epsilon_{eff}(W) = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2(1 + \frac{10}{\mu})^{ab}} \quad (2.11)$$

com:

$$a = 1 + \frac{1}{49} \ln\left(\frac{\mu^4 + (\mu/52)^2}{\mu^4 + 0.432}\right) + \frac{1}{18.7} \ln(1 + (\mu/18.1)^3) \quad (2.12)$$

$$b = 0.564 \left(\frac{\epsilon_r - 0.9}{\epsilon_r + 0.3}\right)^{0.053} \quad (2.13)$$

2.3.2 Geometria Circular

Igualmente a estrutura retangular, a geometria circular tem larga aplicabilidade e possui uma análise relativamente simples e bastante conhecida. Para a utilização da geometria, uma análise pode ser vista em [6] ou também em [17]. Dessa forma a frequência de ressonância (para o modo dominante TM_{110}^z) da estrutura pode ser descrita como sendo [6]:

$$(fr)_{110} = \frac{1.8412}{2\pi a \sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{1.8412v_o}{2\pi a \sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.14)$$

Para geometrias circulares, uma correção é introduzida por meio do raio efetivo (a_e) que substitui o valor do raio (a). Sendo [6]:

$$a_e = a \left(1 + \frac{2h}{\pi a \epsilon_r} \left[\ln\left(\frac{\pi a}{2h}\right) + 1.7726 \right] \right)^{1/2} \quad (2.15)$$

Logo, a frequência de ressonância para o modo dominante TM_{110}^z é expressa como [6]:

$$(fr)_{110} = \frac{1.8412v_o}{2\pi a_e \sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.16)$$

2.3.3 Casamento de Impedância

Para as geometrias utilizadas, o casamento de impedância entre o *patch* e sua alimentação é realizado através da utilização do método *inset-feed*, definindo o quanto a linha de alimentação aprofunda-se no *patch*, utilizando-se da equação 2.7 apresentada por BALANIS em [6], ou da equação 2.17, vista em [8], onde:

$$y_0 = 10^{-4} \left(\begin{matrix} 0,001699\epsilon_r^7 + 0,1376\epsilon_r^6 - 6,1783\epsilon_r^5 + 93,187\epsilon_r^4 \\ -682,69\epsilon_r^3 + 2561,9\epsilon_r^2 - 4043\epsilon_r + 6697 \end{matrix} \right) \frac{L}{2} \quad (2.17)$$

Capítulo 3

Método Taguchi

O método Taguchi tem como objetivo principal melhorar as características de um processo ou de um produto através da identificação e ajuste dos seus parâmetros essenciais. A proposta do método é a determinação da função perda(função custo, ou também função *fitness*) do produto e otimizá-la. Assim é possível identificar os parâmetros ótimos de projeto [33] - [35].

O método foi desenvolvido com base no conceito do Arranjo Ortogonal, que trata-se de uma maneira bastante eficaz de escolha dos parâmetros do projeto em um processo de otimização, reduzindo o número de experimentos necessários na resolução do problema e convergindo rapidamente para a estrutura desejada (determinação dos parâmetros ótimos) [21, 23].

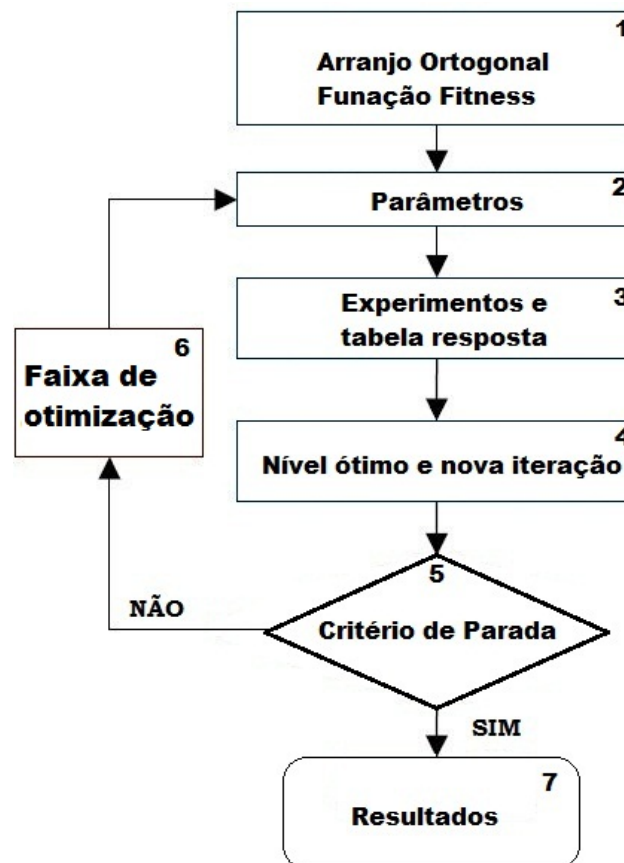
O Método Taguchi tem ampla aplicação nas áreas de Engenharia Química, Mecânica e de Produção. Método desenvolvido pelo Dr. Genechi Taguchi [35], possui como vantagens [15, 19, 21]:

- Rápida convergência;
- Fácil implementação;
- Redução efetiva na quantidade de experimentos;
- Parâmetros independentes entre si.

A inicialização do processo de otimização pelo Método Taguchi é dada pela seleção do Arranjo Ortogonal que será utilizado e da função *fitness* (função responsável pelo ajuste

dos parâmetros). A figura 3.1 apresenta o fluxograma do Método Taguchi, apresentando as etapas para a definição dos parâmetros ótimos.

Figura 3.1: Fluxograma do Método Taguchi.



Fonte: adaptado de [13].

3.1 Etapa 1 - Inicialização

Na etapa de inicialização do método, duas definições são realizadas:

- Arranjo Ortogonal;
- Função *fitness*.

3.1.1 Arranjo Ortogonal

A descrição de um Arranjo Ortogonal é feita por WENG, W. C. et al, em [12]. Sendo S um conjunto de 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 sub arranjo de A , cada t com base em S aparece exatamente às mesmas vezes como uma linha [32, 19, 12].

A representação $AO(N, K, s, t)$ é utilizada na definição de um Arranjo Ortogonal, sendo N o número de linhas do arranjo, K a quantidade de colunas e s a quantidade de níveis. As K colunas representam o número K de parâmetros que serão definidos no processo de otimização e as N linhas representam a quantidade de experimentos presentes em cada iteração [7, 23, 19].

Com base nas estruturas selecionadas para o desenvolvimento do trabalho (antenas com *patch* retangular e circular), tem-se a utilização de no máximo dois parâmetros configuráveis (W e L , para o caso da configuração do *patch* retangular, e apenas a , para o caso da configuração do *patch* circular). Dessa forma a definição de Arranjo Ortogonal foi realizada com 3 níveis (s), 3 parâmetros (K) e 9 experimentos (N). A tabela 3.1 representa o Arranjo Ortogonal utilizado neste trabalho.

Tabela 3.1: Arranjo Ortogonal - $AO(9,3,3,2)$

Experimentos	Parâmetros		
	P_1	P_2	P_3
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 experimento do arranjo, os valores 1, 2 e 3 correspondem aos níveis em que cada parâmetro pode estar alocado, ou seja, cada parâmetro P_1 , P_2 ou P_3 pode estar sendo

representado por um dos três níveis (1, 2 ou 3). Cada parâmetro, em cada nível, assume um valor que é independente dos demais parâmetros.

Cada linha representa uma combinação de níveis entre os parâmetros, por exemplo, o experimento 2 (linha 2) apresenta uma combinação utilizando o nível 1 no parâmetro 1 (P_1), nível 2 para o parâmetro 2 (P_2) e nível 3 para o parâmetro 3 (P_3). Quanto maior a quantidade de parâmetros utilizados, maior será a quantidade de experimentos necessários para a construção do Arranjo Ortogonal.

Como visto na tabela 3.1, a utilização do Arranjo Ortogonal garante ao processo de otimização uma seleção equilibrada dos parâmetros, utilizando todas as combinações possíveis. O Arranjo Ortogonal apresenta três propriedades bastante significativas para a sua utilização no Método Taguchi.

A **primeira propriedade** está relacionada ao **fatorial fracionário**. Utilizando um arranjo como o da tabela 3.1, teríamos $3^3 = 27$ combinações possíveis, ou seja, seria necessária a utilização de 27 experimentos para compor toda a tabela de combinações entre os parâmetros, mas a utilização do Arranjo Ortogonal reduz a quantidade de experimentos para 9.

A **segunda propriedade** é a garantia de que todas as combinações possíveis devem ocorrer de forma igualitária, o que possibilita ao método uma seleção equilibrada em qualquer uma de suas iterações. Para cada parâmetro os níveis 1, 2 e 3 têm a mesma quantidade de ocorrências.

A **terceira propriedade** é utilizada diretamente neste trabalho. Garante que se uma ou mais colunas do Arranjo Ortogonal for excluída, a matriz resultante ainda continuará sendo um Arranjo Ortogonal (na realização do trabalho uma coluna do AO definido é desconsiderada quando se configura o elemento quadrado, e duas colunas do AO definido são desconsideradas quando se configura o elemento circular).

3.1.2 Função fitness

A função *fitness* (**FF**) possui papel importante no processo de otimização do método Taguchi. Sua definição baseia-se na aplicação e tem como objetivo direcionar as iterações realizadas, estando atrelada diretamente a convergência dos parâmetros construtivos. Dessa forma, a função *fitness* utilizada foi selecionada e definida como sendo:

$$\mathbf{FF} = |f_{desejada} - f_{encontrada}| \quad (3.1)$$

Sendo $f_{desejada}$ a frequência desejada em projeto, e $f_{encontrada}$ a frequência encontrada após realização do processo de otimização.

3.2 Etapa 2 - Definição dos parâmetros

Na **iteração inicial**, os valores que cada nível deve assumir são definidos de acordo com a faixa de otimização, ou seja, os valores de **máximo** e **mínimo** que o parâmetro pode atingir. Logo, a definição de cada nível inicialmente é dada por:

$$N_2 = \frac{max + min}{2} \quad (3.2)$$

$$N_1 = N_2 - LD_1 \quad (3.3)$$

$$N_3 = N_2 + LD_1 \quad (3.4)$$

Sendo então o nível N_2 o centro da faixa de otimização (também definido como o nível ótimo), os níveis N_1 e N_3 diretamente dependentes do nível central (N_2) e da variável **LD** (Diferença de Nível).

A variável **LD** é a responsável pela variação da faixa de otimização (etapa 6) e pela verificação do critério de parada (etapa 5). Na iteração inicial **LD** é definida como:

$$LD_1 = \frac{max - min}{num.niveis + 1} \quad (3.5)$$

Nas **iterações futuras**, após a definição do nível ótimo (etapa 4), os valores de N_1 , N_2 e N_3 passam a ser definidos como sendo:

$$N_2|_i = N_{otimo}|_{i-1} \quad (3.6)$$

$$N_1|_i = N_2|_i - LD_i \quad (3.7)$$

$$N_3|_i = N_2|_i + LD_i \quad (3.8)$$

3.3 Etapa 3 - Experimentos e tabela resposta

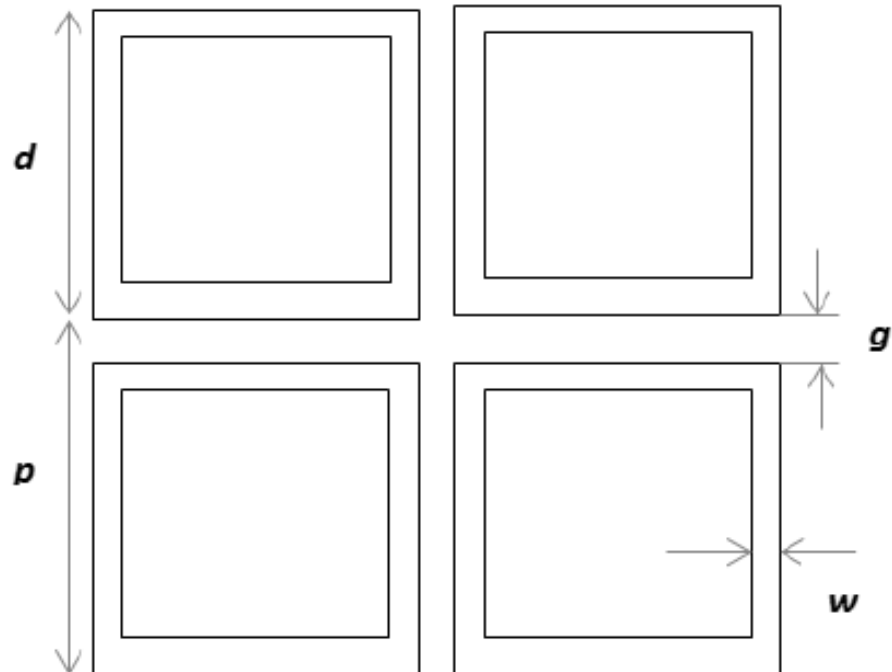
Uma vez definido os valores iniciais de cada nível, distribuídos uniformemente na região de otimização, o próximo passo é o cálculo da função *fitness*. A função *fitness* após calculada será convertida em uma relação sinal-ruído, responsável diretamente pela escolha do nível ótimo da iteração. A conversão é dada por:

$$\eta = -20\log(FF)dB \quad (3.9)$$

Para explicar de forma detalhada a construção da **tabela resposta**, um exemplo da **primeira iteração** do método aplicado a uma estrutura de FSS pode ser visto em [5]. O exemplo consiste na obtenção dos parâmetros **p**, **d** e **w** de uma superfície seletiva em frequência (FSS) e está descrito nas tabelas 3.2 e 3.3 a seguir.

A tabela 3.3 apresenta um resumo da base construtiva da **tabela resposta**, com os valores de cada nível, os valores obtidos para a função *fitness* e seus respectivos valores convertidos na relação Sinal/Ruído.

Figura 3.2: Estrutura FSS utilizada.



Fonte: retirado de [19].

Tabela 3.2: Definição dos parâmetros.

Iteração 1	Parâmetros		
	p(1 - 2.2 cm)	d(0.8 - 2 cm)	w(0.02 - 0.2 cm)
LD	0.3	0.3	0.045
Nível 1	1.3 cm	1.1 cm	0.065 cm
Nível 2	1.6 cm	1.4 cm	0.110 cm
Nível 3	1.9 cm	1.7 cm	0.155 cm

Tabela 3.3: Cálculo da função fitness utilizando a combinação do AO.

Experimentos	Parâmetros			Fitness	η
	p	d	w		
1	1.3	1.1	0.065	6.5772	-16.36
2	1.3	1.4	0.155	13.977	-22.90
3	1.3	1.7	0.110	25.377	-28.08
4	1.6	1.4	0.110	10.077	-20.06
5	1.6	1.7	0.065	25.877	-28.25
6	1.6	1.1	0.155	7.322	-17.29

3.3.1 Tabela Resposta

Com a realização de todos os experimentos, ou seja, todas as combinações possíveis entre os níveis e parâmetros (construção completa da tebla 3.3), a tabela resposta será construída utilizando-se da relação **sinal-ruído média** obtida em todos os experimentos, que é definida como:

$$\bar{\eta}_{m,n} = \frac{S}{N} \sum_{i, Ao(i,n)=m} \eta_i \quad (3.10)$$

Sendo **m** a representação dos níveis e **n** a representação dos parâmetros analisados, a composição da tabela resposta é realizada obtendo todos os valores para as relações **sinal-ruído média**. A tabela resposta e seu cálculo pode ser visto nas tabelas 3.4 e 3.5 respectivamente.

Tabela 3.4: Tabela Resposta.

Iteração 1	Parâmetros		
	p	d	w
Nível 1	$\bar{\eta}_{1,1}$	$\bar{\eta}_{1,2}$	$\bar{\eta}_{1,3}$
Nível 2	$\bar{\eta}_{2,1}$	$\bar{\eta}_{2,2}$	$\bar{\eta}_{2,3}$
Nível 3	$\bar{\eta}_{3,1}$	$\bar{\eta}_{3,2}$	$\bar{\eta}_{3,3}$

Tabela 3.5: Cálculo construtivo da tabela resposta.

$\bar{\eta}_{m,n} = \frac{S}{N} \sum_{i,Ao(i,n)=m} \eta$
$\bar{\eta}_{1,1} = \frac{1}{3} \sum_{i,Ao(i,n)=m} = \frac{1}{3}(\eta_1 + \eta_2 + \eta_3)$
$\bar{\eta}_{1,2} = \frac{1}{3} \sum_{i,Ao(i,n)=m} = \frac{1}{3}(\eta_1 + \eta_6 + \eta_8)$
$\bar{\eta}_{1,3} = \frac{1}{3} \sum_{i,Ao(i,n)=m} = \frac{1}{3}(\eta_1 + \eta_5 + \eta_9)$
$\bar{\eta}_{2,1} = \frac{1}{3} \sum_{i,Ao(i,n)=m} = \frac{1}{3}(\eta_4 + \eta_5 + \eta_6)$
$\bar{\eta}_{2,2} = \frac{1}{3} \sum_{i,Ao(i,n)=m} = \frac{1}{3}(\eta_2 + \eta_4 + \eta_9)$
$\bar{\eta}_{2,3} = \frac{1}{3} \sum_{i,Ao(i,n)=m} = \frac{1}{3}(\eta_3 + \eta_4 + \eta_8)$
$\bar{\eta}_{3,1} = \frac{1}{3} \sum_{i,Ao(i,n)=m} = \frac{1}{3}(\eta_7 + \eta_8 + \eta_9)$
$\bar{\eta}_{3,2} = \frac{1}{3} \sum_{i,Ao(i,n)=m} = \frac{1}{3}(\eta_3 + \eta_5 + \eta_7)$
$\bar{\eta}_{3,3} = \frac{1}{3} \sum_{i,Ao(i,n)=m} = \frac{1}{3}(\eta_2 + \eta_6 + \eta_7)$

3.4 Etapa 4 - Nível ótimo

Com a tabela resposta (3.4) montada, a escolha do nível ótimo, para cada parâmetro, é realizada definindo a relação **sinal-ruído máxima**. O valor correspondente ao nível **m**, que possui a máxima relação sinal-ruído, é definido como o nível ótimo do parâmetro analisado (1, 2 e 3) e associado ao nível N_2 da próxima iteração.

$$\bar{\eta}_{m,1}|_{max} \rightarrow N_{otimo}|_i = N_2|_{i+1}^1 \quad (3.11)$$

$$\bar{\eta}_{m,2}|_{max} \rightarrow N_{otimo}|_i = N_2|_{i+1}^2 \quad (3.12)$$

$$\bar{\eta}_{m,3}|_{max} \rightarrow N_{otimo}|_i = N_2|_{i+1}^3 \quad (3.13)$$

3.4.1 Tratamento de Limites

No processo de otimização, existe a possibilidade de que o valor ótimo de uma iteração apresente-se fora da faixa construtiva, ou seja, acima do valor **máximo** ou abaixo do valor **mínimo** definido pelo usuário ao inicializar o processo de otimização.

Caso ocorra o descrito anteriormente, é realizado um processo denominado de **tratamento dos limites**, para que na próxima iteração, nenhum nível assuma valor fora da faixa de máximo e mínimo desejado. Dessa forma, os níveis N_1 , N_2 e N_3 , de cada parâmetro, são recalculados seguindo [12, 13]:

- Se o valor ótimo (representado pelo nível N_2) estiver abaixo do **mínimo**

$$N_1|_{i+1} = \min; \quad (3.14)$$

$$N_2|_{i+1} = \min + LD_{i+1}; \quad (3.15)$$

$$N_3|_{i+1} = \min + 2 * LD_{i+1}. \quad (3.16)$$

- Se o valor ótimo (representado pelo nível N_2) estiver acima do **máximo**

$$N_3|_{i+1} = \max; \quad (3.17)$$

$$N_2|_{i+1} = \max - LD_{i+1}; \quad (3.18)$$

$$N_1|_{i+1} = \max - 2 * LD_{i+1}. \quad (3.19)$$

3.5 Etapa 5 - Critério de Parada

O critério de parada adotado pelo método Taguchi é definido como:

$$\frac{LD_i}{LD_1} < \text{valor de convergência} \quad (3.20)$$

O valor de convergência é usualmente definido na literatura entre 0.001 - 0.01, dependendo da aplicação. Para o desenvolvimento do trabalho, buscando um processo de otimização mais suavizado, o valor de convergência foi setado como 0.001. Quando o critério de parada é atendido, o processo de otimização é direcionado para a etapa 7, onde os resultados são definidos pela iteração atual, caso contrário (critério de parada **não** atendido), o processo de otimização é direcionado para a etapa 6, onde trata-se a faixa de otimização.

3.6 Etapa 6 - Faixa de otimização

Durante a realização das iterações, quando não atendido o critério de parada, a faixa de otimização (norteadado pela variável **LD**) decai até atender o critério de parada. Para cada iteração realizada a variável LD_i é multiplicada por uma taxa (**taxa de redução**), definida como **rr**, para obtenção do seu próximo valor (LD_{i+1}). Assim:

$$LD_{i+1} = rr * LD_i \quad (3.21)$$

Com **rr** geralmente definido na literatura entre 0,5 - 1.

Buscando uma redução suave da faixa de otimização, uma vez que a **rr** representa o quanto sua faixa de otimização atual (LD_{i+1}) representa percentualmente a faixa anterior (LD_i), **rr** foi definida como 0,75, ou seja, a cada iteração a redução de **LD** sera feita em 25%.

Capítulo 4

Resultados Experimentais e Numéricos

Como já mencionado, é possível encontrar na literatura alguns trabalhos que utilizam o método Taguchi para potencializar o desempenho de estruturas como Arranjo de Antena [23, 28], Antenas de banda larga (UWB) [9, 22, 24] e Filtros [5].

Visando a concordância dos resultados, o trabalho passou por duas validações:

- Validação da implementação do Método Taguchi;
- Validação das estruturas projetadas.

4.1 Validação da Implementação

Como experimentos de validação, o método foi aplicado em estruturas propostas por SALKIM e YILMAZ, em [7], para a geometria retangular, e estruturas propostas por BALANIS, em [6] no exemplo 14.4, para a geometria circular.

4.1.1 Validação Retangular

Algumas estruturas propostas por SALKIM e YILMAZ, em [7], e suas definições básicas estão listadas na tabela a seguir.

Tabela 4.1: Estruturas proposta em [7].

Problemas	Entradas			Saídas		
	Frequência desejada (GHz)	ϵ_r	h (mm)	L (mm)	W (mm)	Frequência encontrada (GHz)
1	7.740	2.22	0.17	12.909	19.996	7.740
2	5.060	2.33	1.57	18.618	21.144	5.060
3	5.600	2.55	1.63	16.014	7.291	5.600
4	4.805	2.33	1.57	19.655	17.278	4.805

Uma observação importante a ser feita é que, em momento algum, os autores citados definem sua faixa de otimização (valores de máximo e mínimo que os parâmetros construtivos podem assumir) para os problemas resolvidos, o que influencia diretamente nos valores de convergência para os parâmetros construtivos (W e L).

Considerando os parâmetros de entrada, permissividade do dielétrico (ϵ_r) e sua espessura (h), para a geometria retangular, o problema torna-se de natureza bidimensional, em que os dois parâmetros do patch (i.e., L e W) são determinados. Para esta geometria, o intervalo de otimização, isto é, os valores de máximo e mínimo que os parâmetros de saída podem assumir, foram definidos como **Máximo = 25 mm** e **Mínimo = 5 mm**. Dois problemas, dos quatro apresentados, foram escolhidos para a validação, são eles:

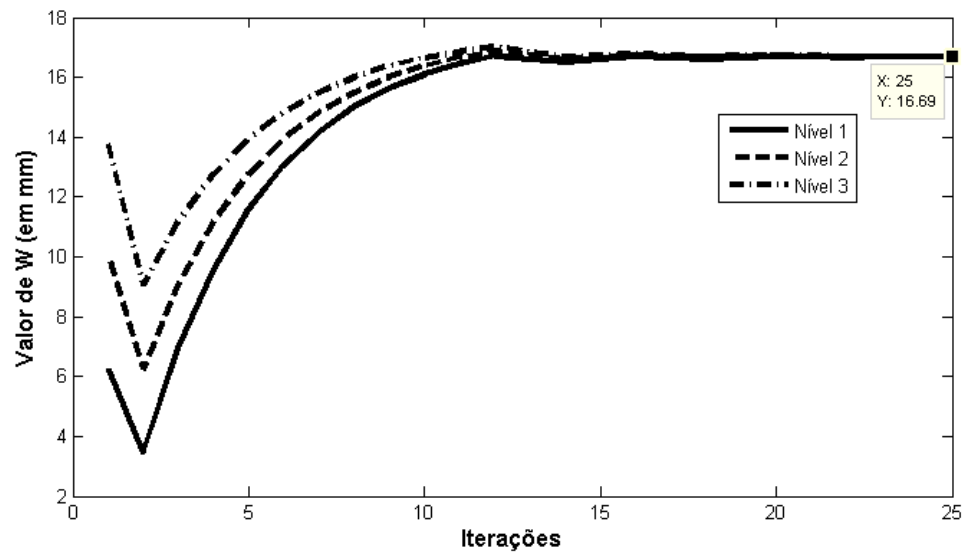
Problema 1

- Frequência desejada - 7.74 GHz;
- ϵ_r - 2.22;
- h - 0.17 mm.

As figuras 4.1 e 4.2, apresentam a convergência dos parâmetros construtivos **W** e **L**. Uma análise do desempenho do método de otimização, a cada iteração, pode ser realizada através das figuras 4.3 e 4.4. Pela figura 4.4 é perceptível ainda que o erro relativo à frequência desejada é inferior a 5% já na sexta iteração. É visível que, se em algum momento o valor de máximo ou mínimo é ultrapassado (figura 4.2, possui valor menor do

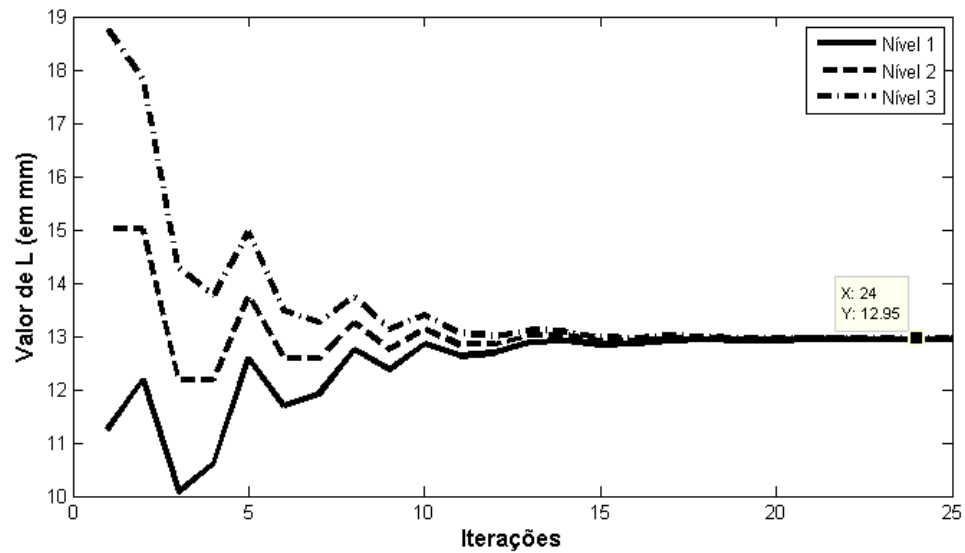
que o mínimo de 5mm), é realizado o tratamento de limites para o parâmetro, reajustando o valor para dentro da faixa de máximo e mínimo definida.

Figura 4.1: Convergência para W - Problema 1.



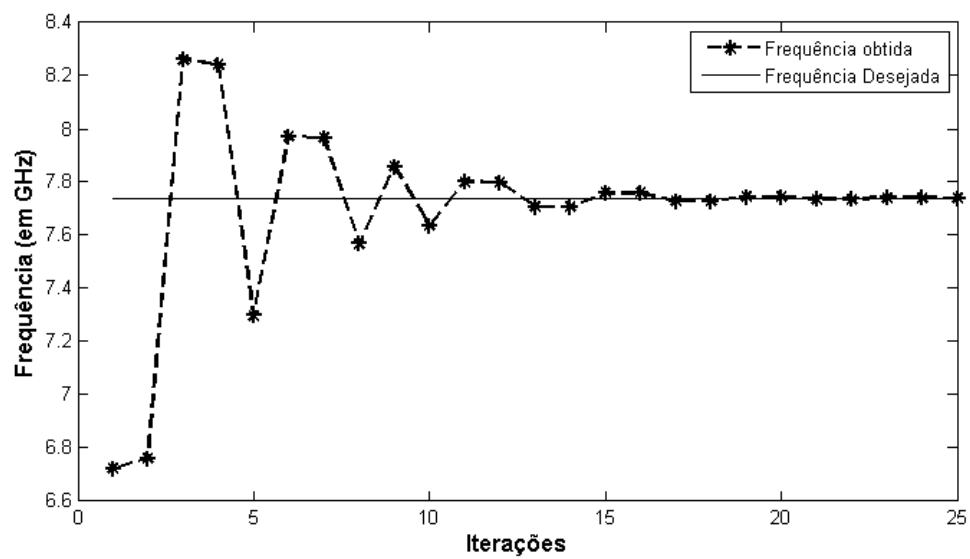
Fonte: o próprio autor.

Figura 4.2: Convergência para L - Problema 1.

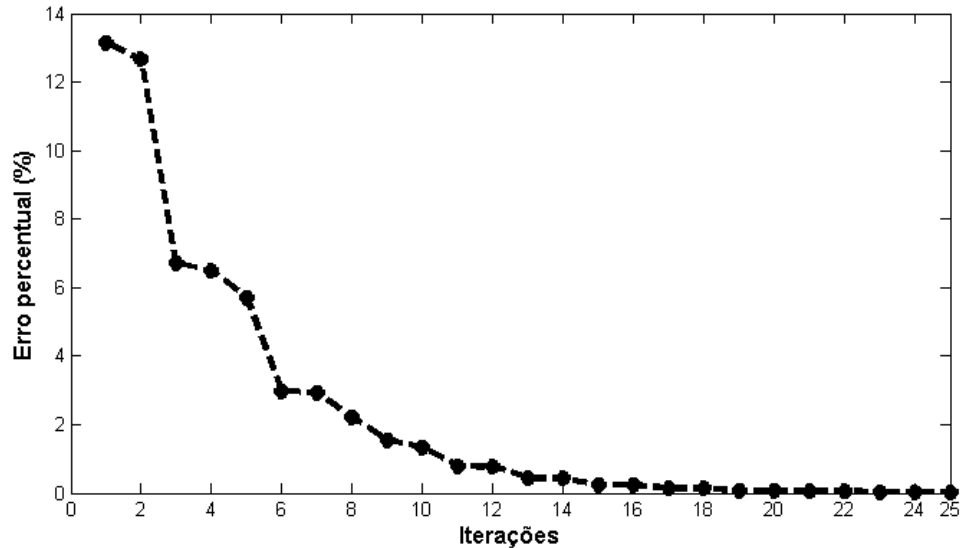


Fonte: o próprio autor.

Figura 4.3: Convergência para Frequência - Problema 1.



Fonte: o próprio autor.

Figura 4.4: Erro relativo à função *fitness* - Problema 1.

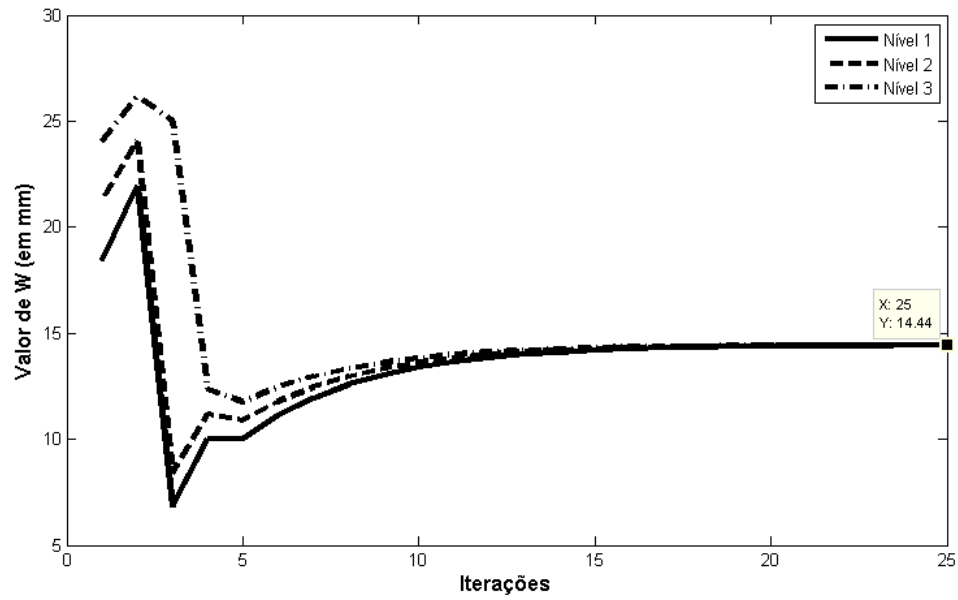
Fonte: o próprio autor.

Problema 2

- Frequência desejada - 5.06 GHz;
- ϵ_r - 2.33;
- h - 1.57 mm.

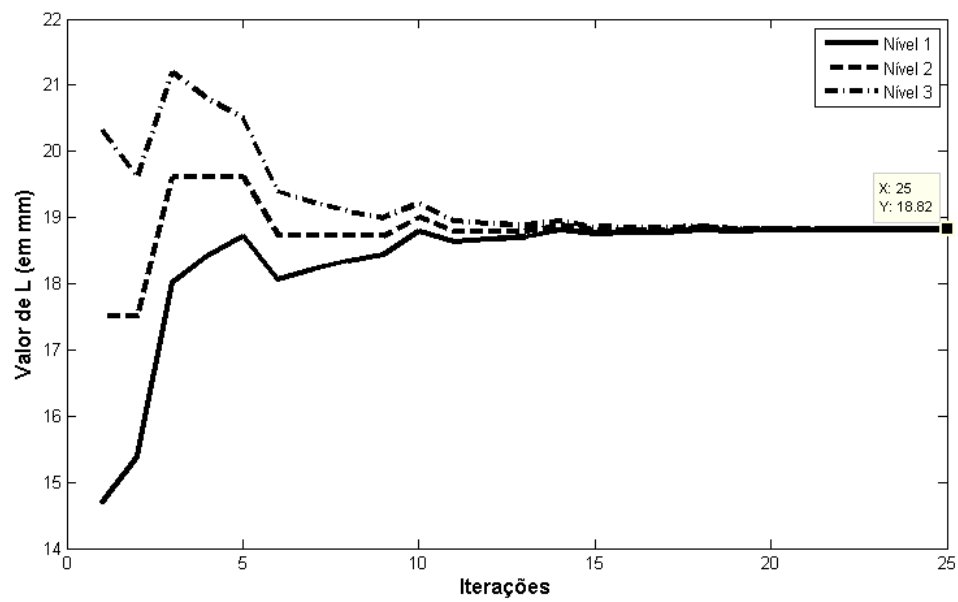
As figuras 4.5 e 4.6, apresentam a convergência dos parâmetros construtivos **W** e **L**. Uma análise do desempenho do método de otimização, a cada iteração, pode ser realizada através das figuras 4.7 e 4.8. Pela figura 4.8 é perceptível ainda que o erro relativo à frequência desejada é inferior a 5% já na quarta iteração. É visível que, se em algum momento o valor de máximo ou mínimo é ultrapassado (figura 4.5, possui valor maior do que o máximo de 25mm), é realizado o tratamento de limites para o parâmetro, reajustando o valor para dentro da faixa de máximo e mínimo definida.

Figura 4.5: Convergência para W - Problema 2.



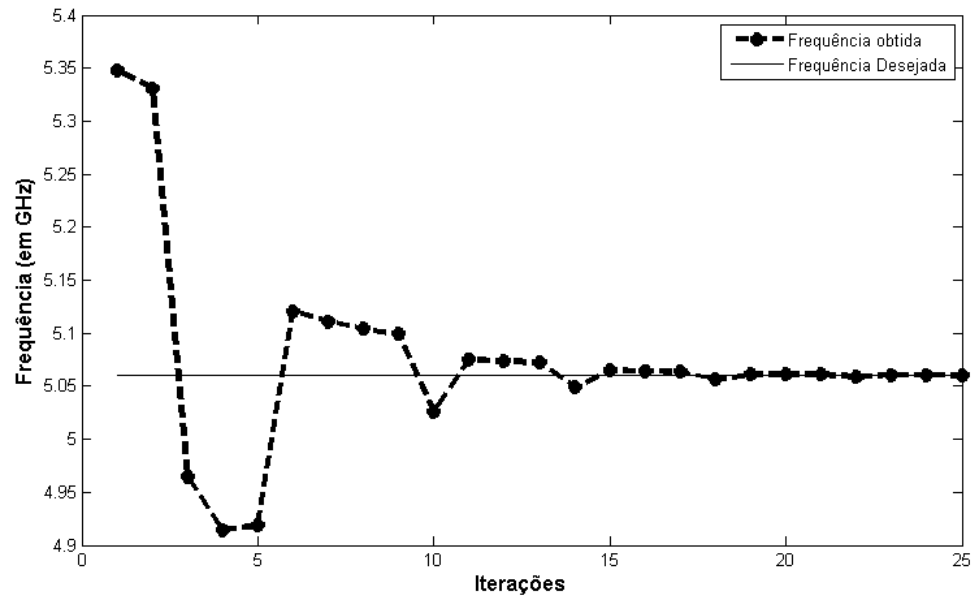
Fonte: o próprio autor.

Figura 4.6: Convergência para L - Problema 2.

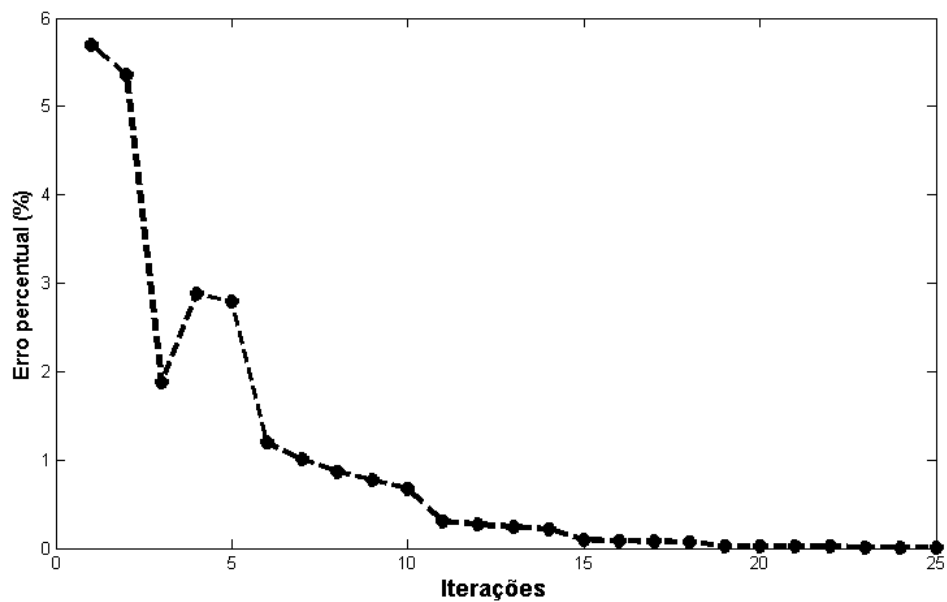


Fonte: o próprio autor.

Figura 4.7: Convergência para Frequência - Problema 2.



Fonte: o próprio autor.

Figura 4.8: Erro relativo à função *fitness* (retangular) - Problema 2.

Fonte: o próprio autor.

De posse de todos os resultados exibidos anteriormente, a tabela 4.2 apresenta um

comparativo dos parâmetros construtivos obtidos por ambos (em [7] e neste trabalho).

Tabela 4.2: Comparativo

Saídas [7]			Resultados obtidos		
L (mm)	W (mm)	Frequência encontrada (GHz)	L (mm)	W (mm)	Frequência encontrada (GHz)
12.909	19.996	7.740	12.92	16.69	7.740
18.618	21.144	5.060	18.82	14.44	5.060
16.014	7.291	5.600	16.62	7.04	5.600
19.655	17.278	4.805	20.01	12.65	4.805

4.1.2 Validação Circular

As estruturas propostas por BALANIS, em [6], e suas definições básicas estão listadas na tabela a seguir.

Tabela 4.3: Estruturas proposta em [6].

Problemas	Entradas			Saídas [6]	
	Frequência desejada (GHz)	ϵ_r	h (mm)	Raio (mm)	Frequência encontrada (GHz)
1	10	2.2	1.588	5.25	10
2	5	2.2	1.588	10.98	5

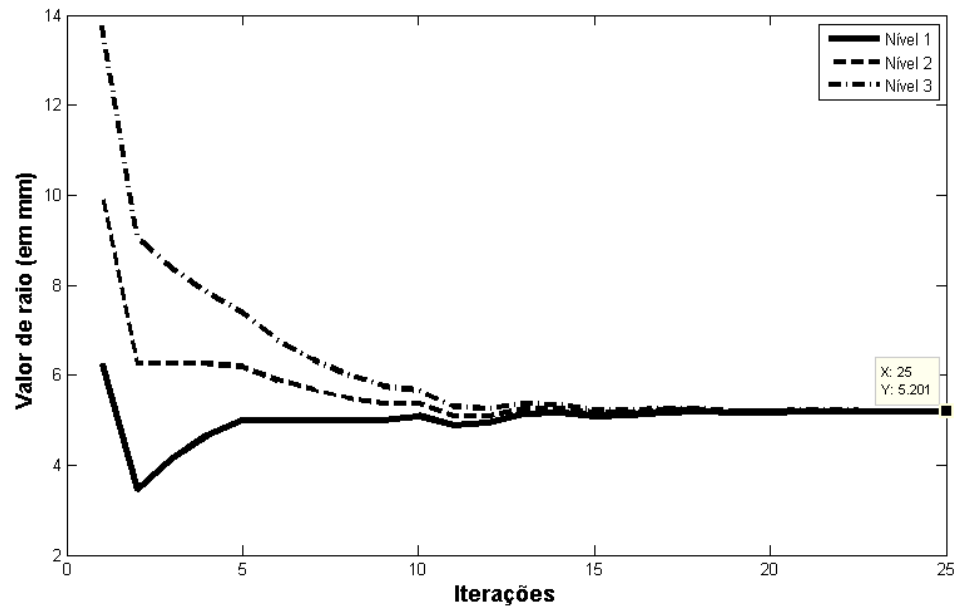
Considerando os parâmetros de entrada, permissividade do dielétrico (ϵ_r) e sua espessura (h), para a geometria circular, o problema agora se torna de natureza unidimensional, em que o parâmetro do patch (i.e., r) é determinado. Para esta geometria, o intervalo de otimização, isto é, os valores máximos e mínimos que os parâmetros de saída podem assumir, são definidos como **Máximo = 15 mm** e **Mínimo = 2 mm**.

Problema 1

- Frequência desejada - 10 GHz;
- ϵ_r - 2.2;
- h - 1.588 mm.

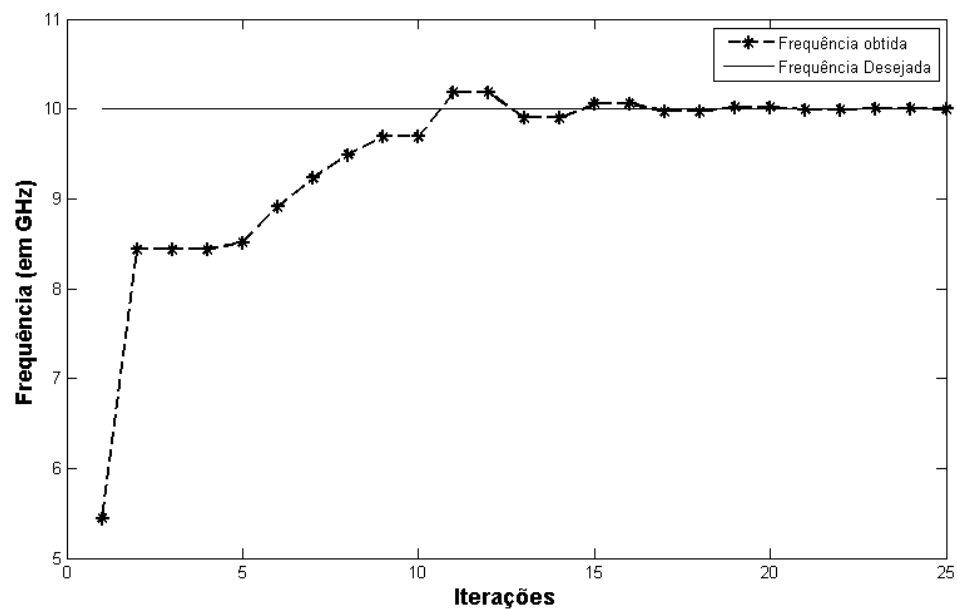
A figura 4.9 apresenta a convergência do parâmetro construtivo **r**. Uma análise do desempenho do método de otimização, a cada iteração, pode ser realizada através das figuras 4.10 e 4.11. Pela figura 4.11 é perceptível ainda que o erro relativo à frequência desejada é inferior a 5% já na quarta iteração.

Figura 4.9: Convergência do Raio - Problema 1.

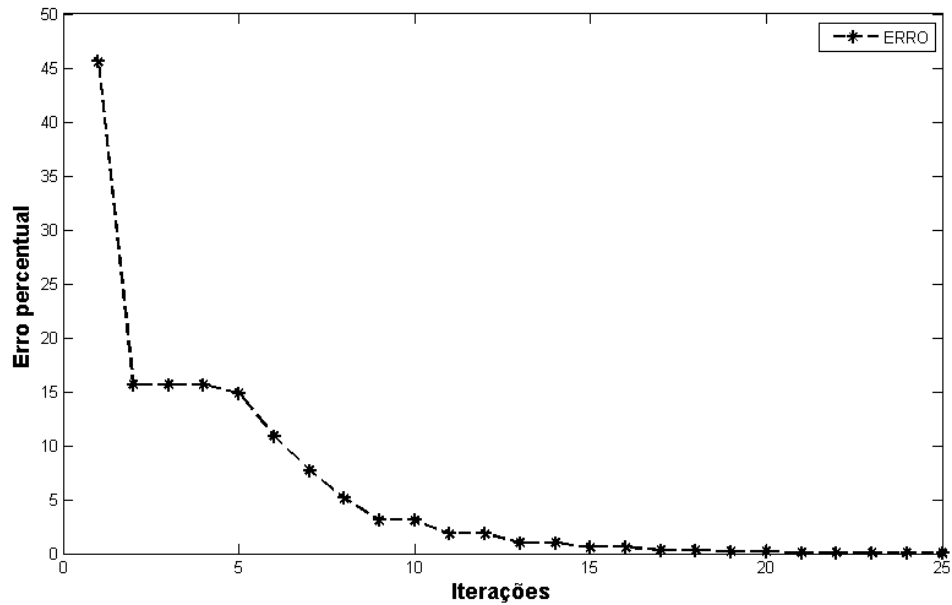


Fonte: o próprio autor.

Figura 4.10: Convergência para Frequência (circular) - Problema 1.



Fonte: o próprio autor.

Figura 4.11: Erro relativo à função *fitness* (circular) - Problema 1.

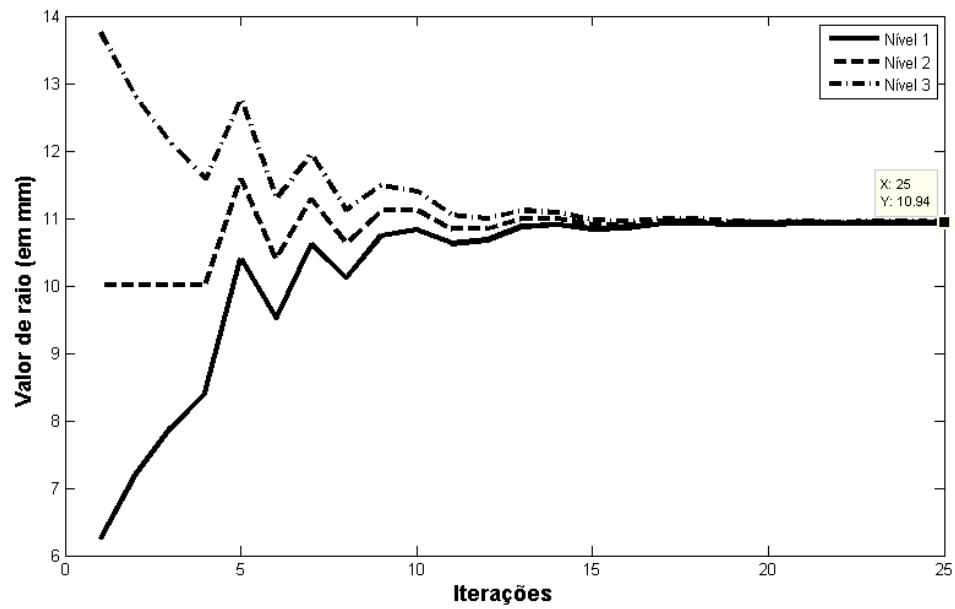
Fonte: o próprio autor.

Problema 2

- Frequência desejada - 5 GHz;
- ϵ_r - 2.2;
- h - 1.588 mm.

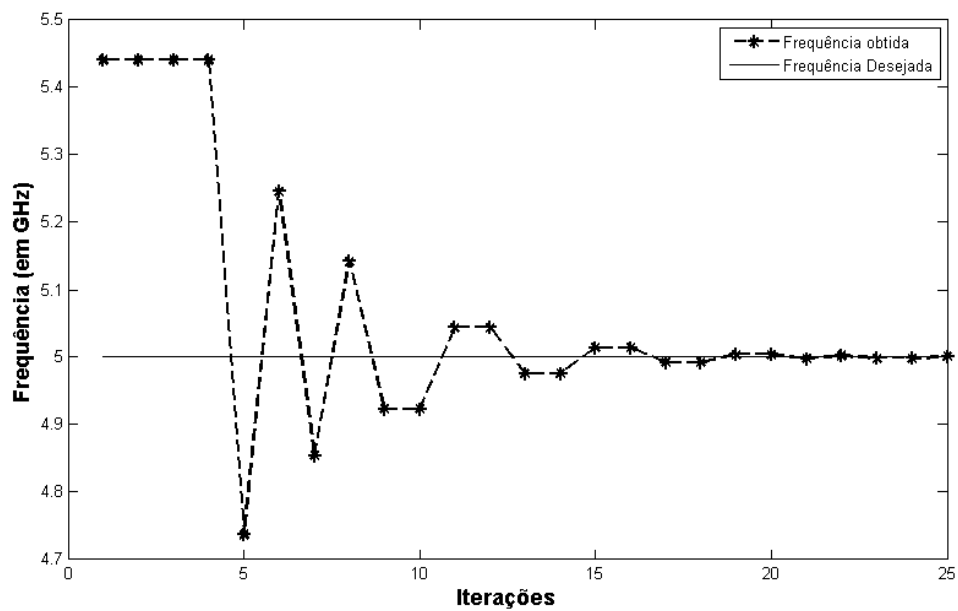
A figura 4.12 apresenta a convergência do parâmetro construtivo r . Uma análise do desempenho do método de otimização, a cada iteração, pode ser realizada através das figuras 4.13 e 4.14. Pela figura 4.14 é perceptível ainda que o erro relativo à frequência desejada é inferior a 5% já na quinta iteração.

Figura 4.12: Convergência do Raio - Problema 2.

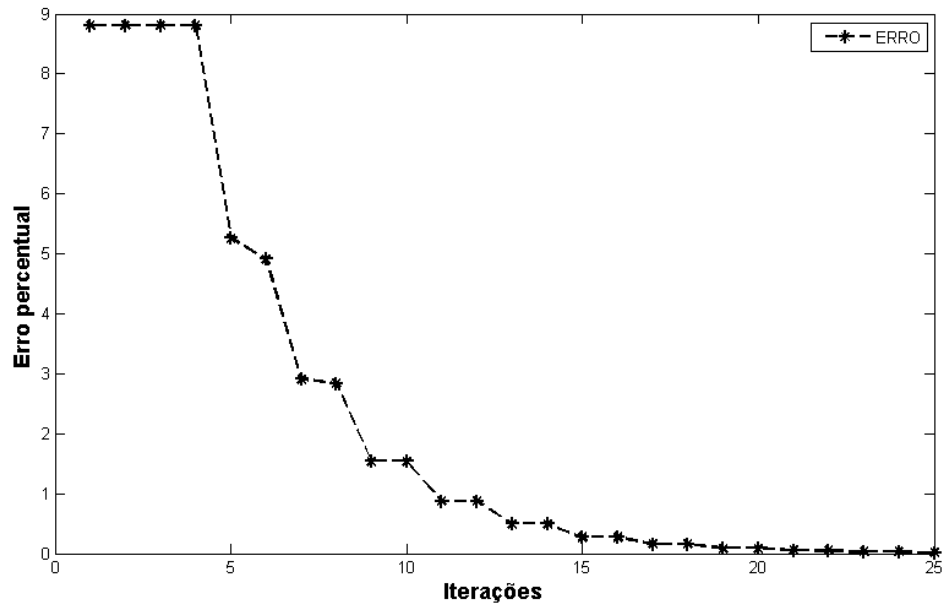


Fonte: o próprio autor.

Figura 4.13: Convergência para Frequência (circular) - Problema 2.



Fonte: o próprio autor.

Figura 4.14: Erro relativo à função *fitness* (circular) - Problema 2.

Fonte: o próprio autor.

De posse de todos os resultados exibidos anteriormente, a tabela 4.4 apresenta um comparativo do parâmetro construtivo obtido por ambos (em [6] e neste trabalho).

Tabela 4.4: Comparativo

Saídas [6]		Resultados Obtidos	
Raio (mm)	Frequência encontrada (GHz)	Raio (mm)	Frequência encontrada (GHz)
5.25	10	5.20	10
10.98	5	10.94	5

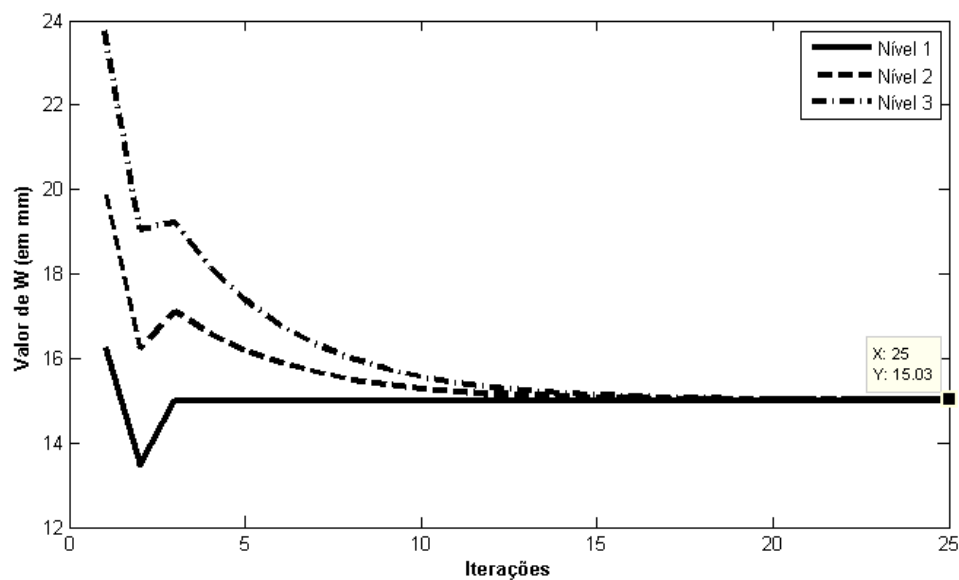
4.2 Validação das Estruturas

Como forma de validação das estruturas (retangular e circular), foi definida a frequência de ressonância desejada em projeto como 2.45 GHz. Além da frequência, foram definidos:

- $\epsilon_r = 4.4$;
- $h = 0.8mm$;
- Máximo = 45 mm;
- Mínimo = 10 mm.

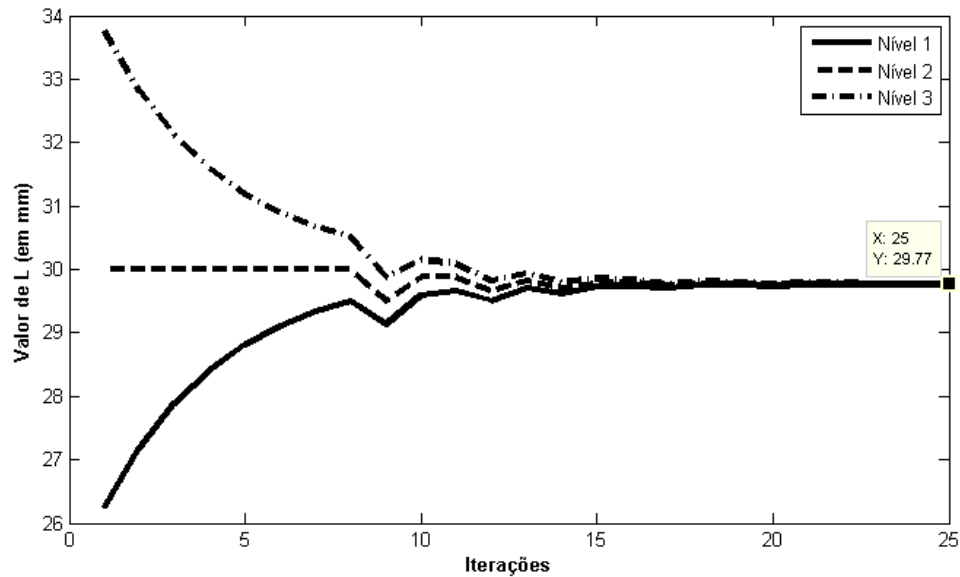
4.2.1 Estrutura Retangular

Figura 4.15: Convergência para W.



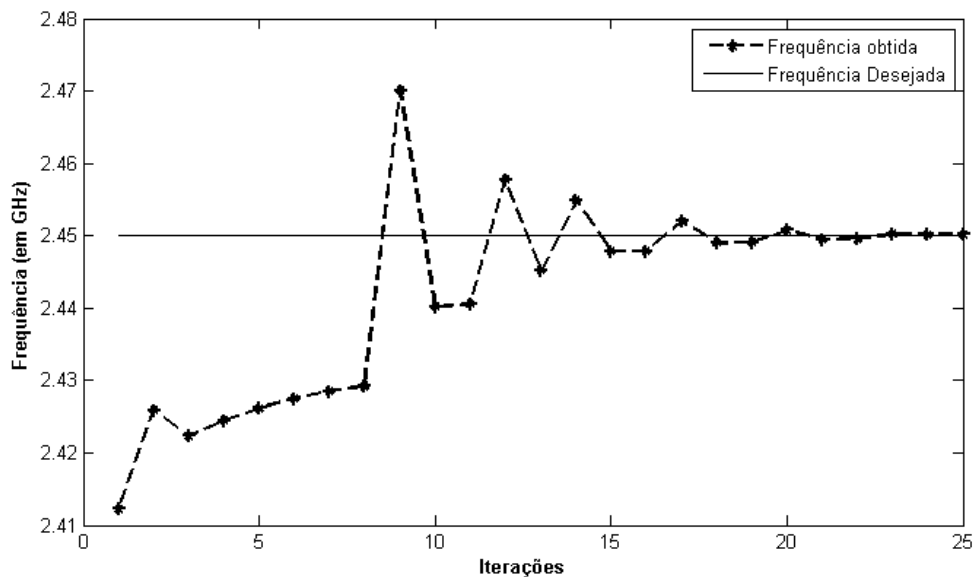
Fonte: o próprio autor.

Figura 4.16: Convergência para L.



Fonte: o próprio autor.

Figura 4.17: Convergência para Frequência.

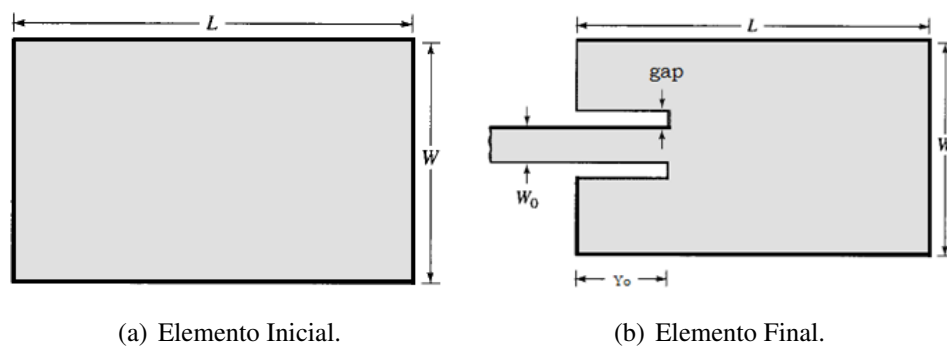


Fonte: o próprio autor.

Observando as figuras 4.15 e 4.16, as quais demonstram os valores obtidos para W e L, uma estrutura inicial é concebida. Buscando realizar o casamento de impedância da

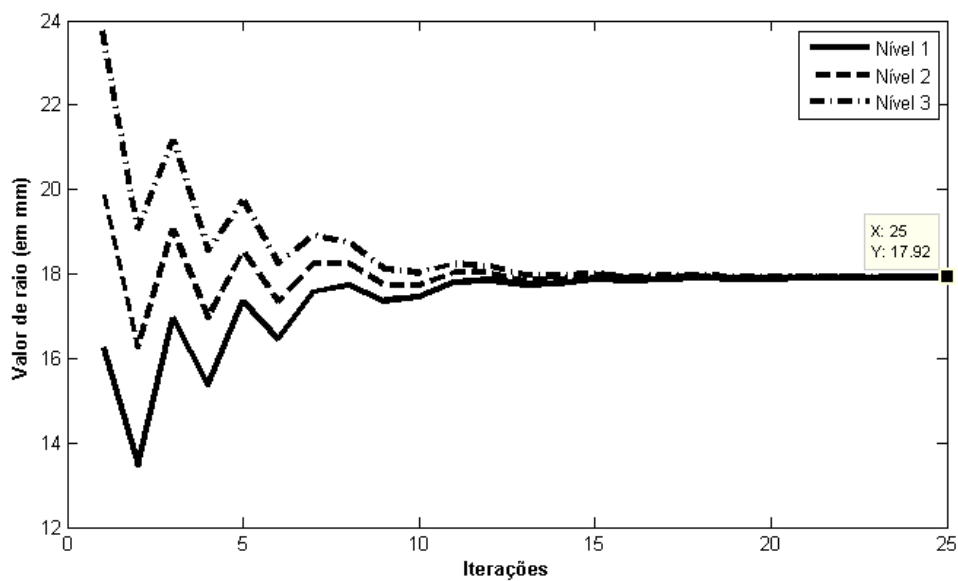
estrutura para uma alimentação por linha de microfita, a antena é submetida ao método *inset-feed*. A estrutura retangular final é construída partindo-se da atribuição dos valores **gap = 1mm**, **$Y_o = 10\text{mm}$** , **$W_o = 1.8\text{mm}$** , **$W = 15.03\text{mm}$** e **$L = 29.77\text{mm}$** . A estrutura inicialmente concebida e pós *inset-feed* é vista na figura a seguir.

Figura 4.18: Estrutura Retangular.



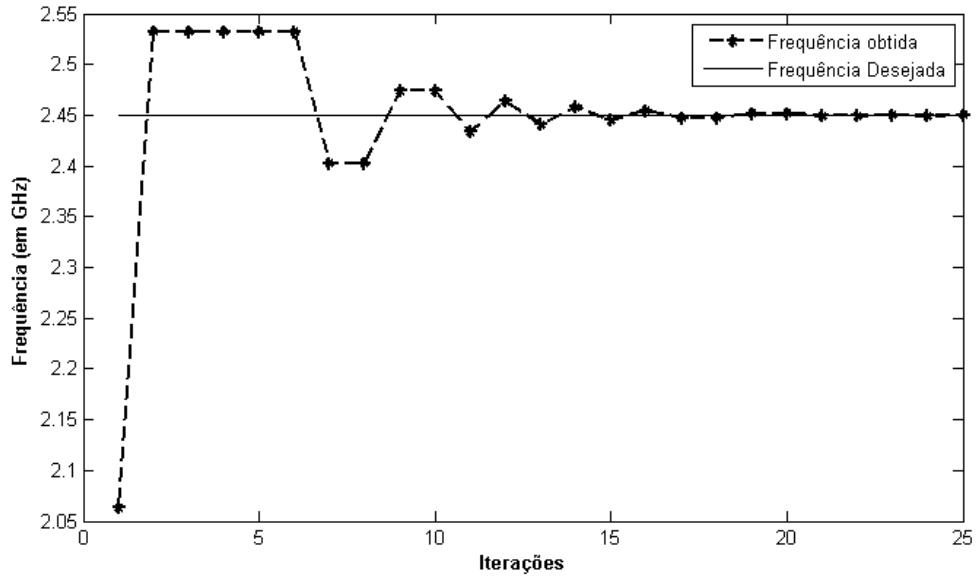
4.2.2 Estrutura Circular

Figura 4.19: Convergência para o raio.



Fonte: o próprio autor.

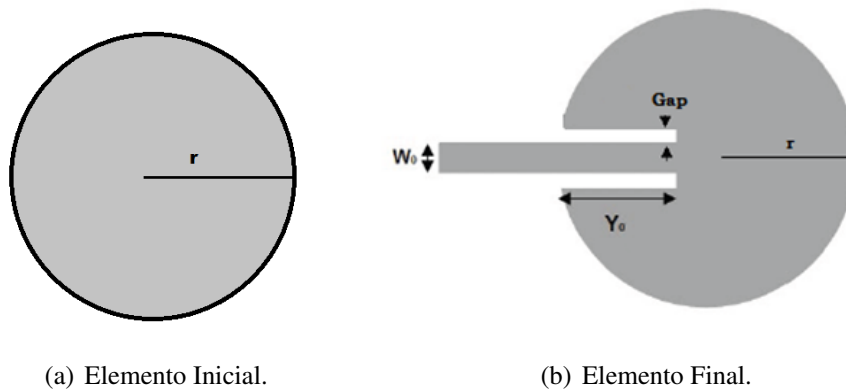
Figura 4.20: Convergência para Frequência.



Fonte: o próprio autor.

Observando a figura 4.19, a qual demonstra o valor obtido para r , uma estrutura inicial é concebida. Buscando realizar o casamento de impedância da estrutura para uma alimentação por linha de microfita, a antena é submetida ao método *inset-feed*. A estrutura circular final é construída partindo-se da atribuição dos valores **gap = 1mm**, **$Y_0 = 10\text{mm}$** , **$W_0 = 1.8\text{mm}$** e **$r = 17.92\text{mm}$** . A estrutura inicialmente concebida e pós *inset-feed* é vista na figura a seguir.

Figura 4.21: Estrutura Circular.

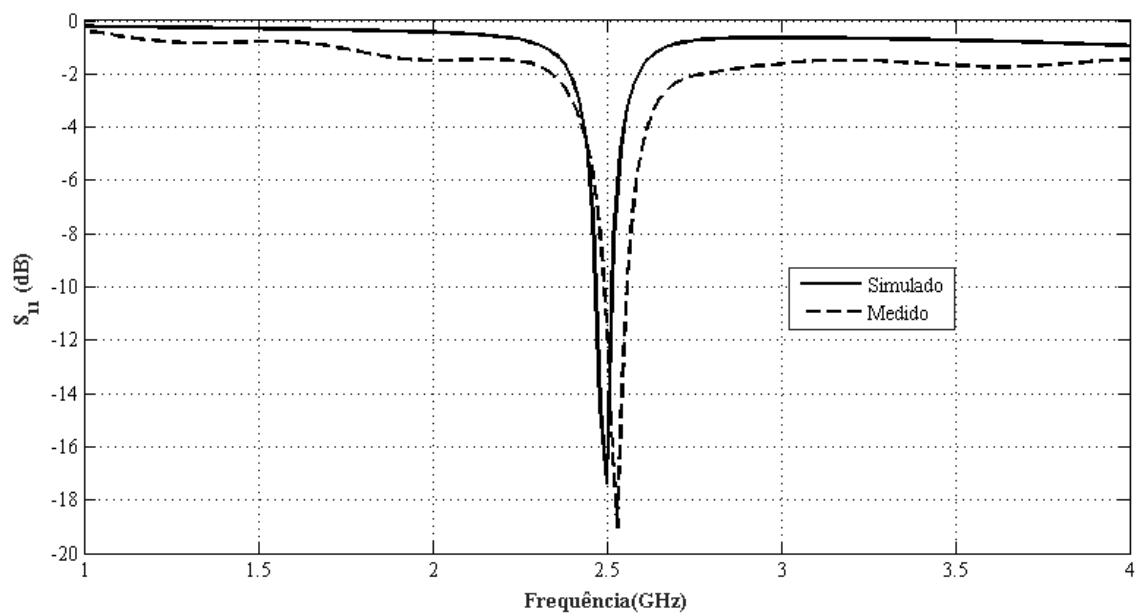


4.3 Construção das Estruturas

4.3.1 Retangular

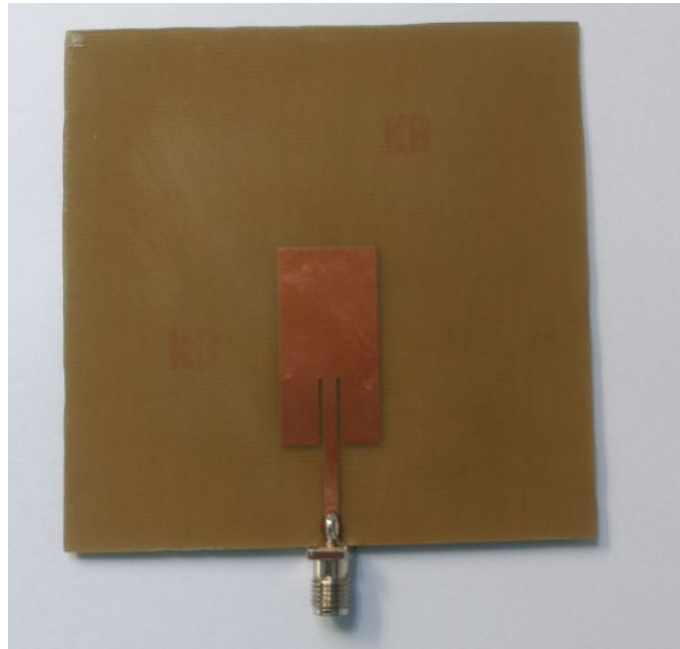
A antena retangular foi inicialmente simulada via ANSYS HFSS e posteriormente construída e medida. Um comparativo dos resultados simulado e medido é visto na Figura 4.22. A frequência de ressonância **simulada** é de 2,5 GHz (com erro de 2.4% relativo à frequência de projeto) e a **medida** foi de 2,53 GHz (com erro de 3.2% relativo à frequência de projeto), apresentando um erro de 1.2% entre a estrutura simulada e a medida.

Figura 4.22: Comparativo - Frequência de ressonância (retangular).



Fonte: o próprio autor.

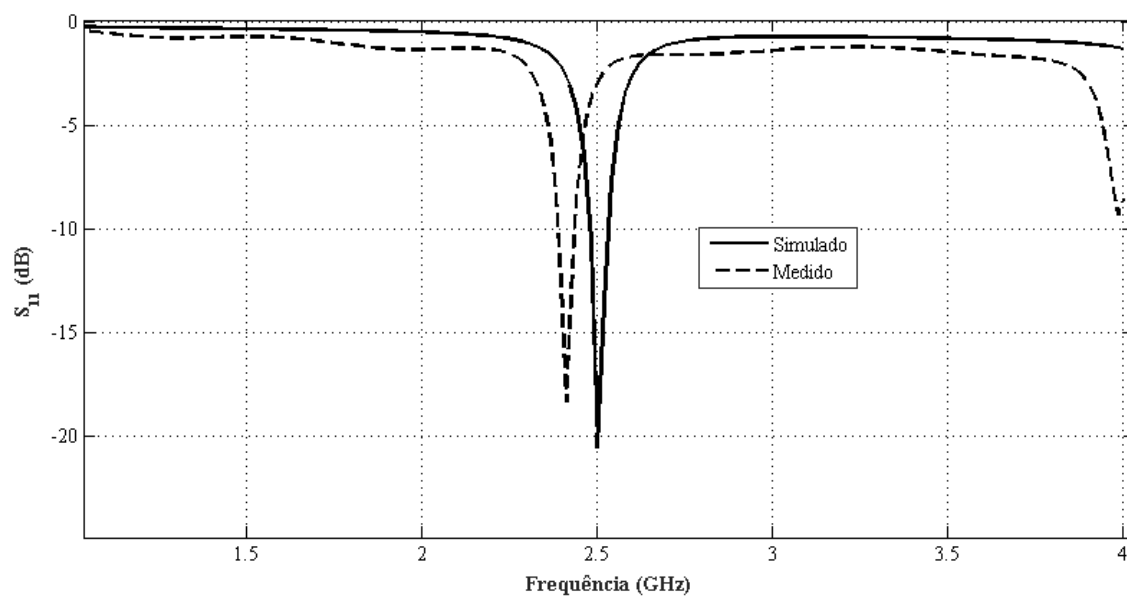
Figura 4.23: Estrutura Construída.



4.3.2 Circular

A antena circular foi inicialmente simulada via ANSYS HFSS e posteriormente construída e medida. Um comparativo dos resultados simulado e medido é visto na Figura 4.24. A frequência de ressonância **simulada** é de 2,5 GHz (com erro de 2.4% relativo à frequência do projeto) e a **medida** foi de 2,41 GHz (com erro de 1.63% relativo à frequência de projeto), apresentando um erro de 3.6% entre a estrutura simulada e a medida.

Figura 4.24: Comparativo - Frequência de ressonância (circular).



Fonte: o próprio autor.

Figura 4.25: Estrutura Construída.

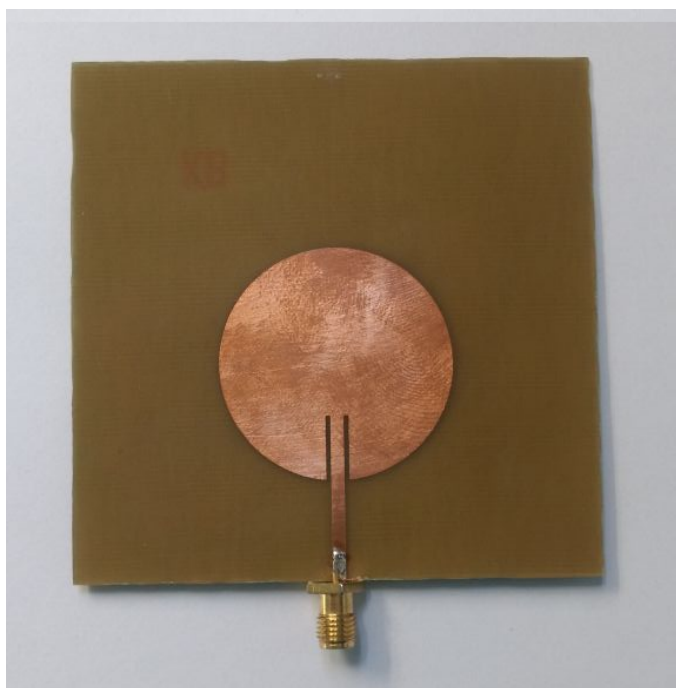
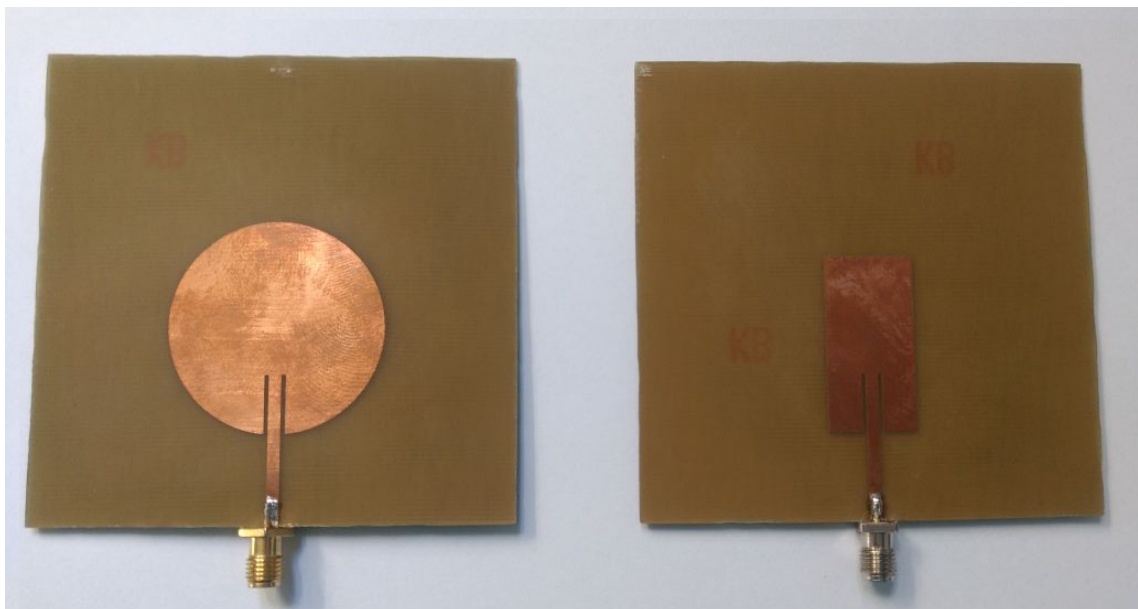


Tabela 4.5: Apresentação dos Resultados Construtivos.

Elementos	Resultados		
	$f_{desejada}(GHz)$	$f_{medida}(GHz)$	Erro (%)
Retangular	2.45	2.53	3.2
Circular	2.45	2.41	1.6

Figura 4.26: Estrutura retangular e circular construídas.



Fonte: o próprio autor.

Capítulo 5

Conclusões

Nesta pesquisa foi apresentado o Método Taguchi e as etapas inerentes ao seu processo de otimização. Com o objetivo de demonstrar a validade e eficácia do método, foi apresentado a resolução do problema de projeto de antena de microfita com *patch* em geometria retangular e circular, realizando uma análise da convergência, dos parâmetros construtivos e do erro percentual atrelado à frequência de ressonância desejada.

Durante o desenvolvimento deste trabalho, ficou evidente que o método Taguchi trata-se de um **algoritmo sistemático, eficiente e de fácil implementação**, que pode resolver problemas utilizando-se de uma pequena quantidade de experimentos em seu processo de otimização. Em todo o trabalho, o método apresentou uma boa concordância com os resultados esperados, necessitando apenas 24 iteração para atingir uma boa convergência relativa à frequência desejada em projeto. Se considerado apenas o nível ótimo de cada parâmetro, a necessidade de iterações é reduzida para 15, e o método já é capaz de apresentar erro percentual muito próximo a zero.

As estruturas geradas a partir dos parâmetros construtivos, obtidos pelo processo de otimização do método Taguchi, foram simuladas, via *ANSYS HFSS*, e construídas. Os resultados medidos e simulados foram comparados (figuras 4.22 e 4.24), apresentando erro percentual de 1.2%, entre as estruturas simulada e medida retangular, e de 3.6%, entre as estruturas simulada e medida circular.

Durante a validação e construção das estruturas (retangular e circular), a capacidade

de convergência do método Taguchi pode ser vista nas figuras 4.15 à 4.20, e sua eficácia observada nas medições das estruturas construídas (figuras 4.22 e 4.24, tabela 4.5), das quais apresetaram como erro percentual 3.2% para a estrutura retangular e 1.6% para a estrutura circular, referente à frequência de projeto.

Pode-se considerar como principais contribuições deste trabalho, no que se diz respeito ao problema de projeto de antena de microfita utilizando o método Taguchi, a realização do tratamento de limites (de essencial importância para aplicações de estruturas limitadas em espaço físico) e a inserção do casamento de impedância ao método, realizado via *inset-feed*.

Como sugestão para trabalhos futuros, a aplicação do método Taguchi a outros elementos de complexidade estrutural mais elevada, como fractais, analisando e comparando os resultados obtidos com outros métodos de otimização propostos em literaturas atuais, realizando uma relação custo/benefício do método Taguchi comparado a outros métodos ou técnicas de otimização.

Referências Bibliográficas

- [1] Yilmaz, A. E. and Kuzuoglu, M., “Design of the Square Loop Frequency Selective Surfaces with Particle Swarm Optimization via the Equivalent Circuit Model”, *Radioengineering*, 2009, 18, (2), pp 95-102.
- [2] Alcantara Neto, M. C., et al., “Bioinspired Multiobjective Synthesis of X-band FSS via General Regression Neural Network and Cuckoo Search Algorithm”. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2015, 57, (10), pp 2400–2405.
- [3] Silva, P. H. da F., Cruz, R. M. S. and d’Assunção, A. G., “Blending PSO and ANN for Optimal Design of FSS Filters with Koch Island Patch Elements”, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2010, 46, (8), pp 1-4.
- [4] Campos, A. L. P. S., Martins, A. M. and Almeida Filho, V. A., “Synthesis of Frequency Selective Surfaces Using Genetic Algorithm Combined with The Equivalent Circuit Method”. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2012, 54, (8), pp 1893–1897.
- [5] Filgueira, J. D. B., Campos, A. L. P. S., Gomes Neto, A., and Maniçoba, R. H. C., “Calculation of optimized parameters for the frequency selective surfaces by means of Taguchi’s method”. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2016, 58, (8), pp 1984–1989.
- [6] Constantine, A. Balanis. "Antenna theory analysis and design." *MICROSTRIP ANTENNAS*, third edition, John wiley and sons (2005).

- [7] Salkim, Ismail, and Asim Egemen Yilmaz. "Calculation of optimized parameters for the rectangular microstrip antennas by means of Taguchi method." *Przegląd Elektrotechniczny* 87.11 (2011): 314-317.
- [8] Silva, Jefferson Costa e. "Análise experimental do efeito de diversas configurações de *inset-feed* na alimentação de antenas planares dos tipos retangular, circular e triangular." *Revista Principia, Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB* 2014, No 24.
- [9] Weng, Wei-Chung, Fan Yang, and Atef Elsherbeni. "Electromagnetics and antenna optimization using Taguchi's method." *Synthesis Lectures on Computational Electromagnetics* 2.1 (2007): 1-94.
- [10] Kara, Mehmet. "The resonant frequency of rectangular microstrip antenna elements with various substrate thicknesses." *Microwave and Optical Technology Letters* 11.2 (1996): 55-59.
- [11] Kara M., "Formulas for the Computation of the Physical Properties of Rectangular Microstrip Antenna Elements with Various Substrate Thicknesses." *Microwave and Optical Technology Letters* 12 (1996), No. 4, 234–239.
- [12] Weng, Wei-Chung, Fan Yang, and Atef Elsherbeni. "Electromagnetics and antenna optimization using Taguchi's method." *Synthesis Lectures on Computational Electromagnetics* 2.1 (2007): 1-94.
- [13] Weng, Wei-Chung, et al. "Optimization using Taguchi method for electromagnetic applications." *2006 First European Conference on Antennas and Propagation. IEEE*, 2006.
- [14] 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).

- [15] Yang, WH P., and Y. S. Tarng. "Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method." *Journal of materials processing technology* 84.1 (1998): 122-129.
- [16] Deschamps, Georges A. "Microstrip microwave antennas." 3rd USAF Symposium on Antennas. 1953.
- [17] Balanis, Constantine A. "Teoria Das Antenas: Análise E Síntese." Volume 2 . Grupo Gen-LTC, 2000.
- [18] Moraes, José Haroldo Cavalcante de. "Estudo de Antenas Patches de Microfita Miniaturizadas em Banda Larga para Aplicação em dispositivos móveis e portáteis." (2011).
- [19] Filgueira, Jannayna Domingues Barros. "Cálculo de Parâmetros Otimizados para Superfícies Seletivas de Frequência por meio do Método de Otimização Taguchi." (2016).
- [20] W. C. Weng, F. Yang, and A. Elsherbeni. "Electromagnetics and Antenna Optimization Using Taguchi Method.", Morgan and Claypool Publishers(2007).
- [21] 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.
- [22] Ko, Jae-Hyeong, et al. "Robust design of dual band/polarization patch antenna using sensitivity analysis and Taguchi's method." *IEEE Transactions on Magnetics* 47.5 (2011): 1258-1261.
- [23] 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.

- [24] Khidre, Ahmed, et al. "Wideband circularly polarized E-shaped patch antenna for wireless applications [wireless corner]." *IEEE Antennas and Propagation Magazine* 52.5 (2010): 219-229.
- [25] Alves De Oliveira, Maciel and Batista, Fabricio and Carneiro De Oliveira, Elder-vitch and Henrique, Paulo and Fonseca, Da and Silva Jr, Paulo and Júnior, Silva and Carlos, Raimundo and Freire, Silvério and Jean, Alexandre and Serres, René "Técnicas de Casamento de Impedâncias por Linha de Microfita em Antenas Patch Circular para Tecnologia ISM em 2,4 GHz" 2016.
- [26] Guo, Y. J., et al. "A circular patch antenna for radio LAN's." *IEEE Transactions on antennas and propagation* 45.1 (1997): 177-178.
- [27] Spasos, M., et al. "Optimization of a 12.5 GHz microstrip antenna array using taguchi's method." *International Journal of Antennas and Propagation* 2011 (2011).
- [28] Weng, Wei-Chung, Fan Yang, and Atef Z. Elsherbeni. "Linear antenna array synthesis using Taguchi's method: A novel optimization technique in electromagnetics." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 55.3 (2007): 723-730.
- [29] Awada, Ahmad, et al. "A joint optimization of antenna parameters in a cellular network using Taguchi's method." *Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2011 IEEE 73rd. IEEE*, 2011.
- [30] Dib, Nihad I., Sotirios K. Goudos, and Hani Muhsen. "Application of Taguchi's optimization method and self-adaptive differential evolution to the synthesis of linear antenna arrays." *Progress In Electromagnetics Research* 102 (2010): 159-180.
- [31] Weng, Wei-Chung, et al. "Optimization using Taguchi method for electromagnetic applications." *Antennas and Propagation, 2006. EuCAP 2006. First European Conference on. IEEE*, 2006.

- [32] A. S. Hedayat, N. J. A. Sloane, and J. Stufken, Orthogonal Arrays: Theory and Applications. New York: Springer-Verlag, 1999.
- [33] Taguchi, Genichi. System of experimental design: engineering methods to optimize quality and minimize costs. UNIPUB/Kraus International Publications, 1987.
- [34] Taguchi, Genichi, Elsayed A. Elsayed, and Thomas C. Hsiang. Quality engineering in production systems. McGraw-Hill College, 1989.
- [35] TAGUCHI, Genichi. Introduction to quality engineering: designing quality into products and processes. 1986.
- [36] AURELIO, O mini dicionário da língua portuguesa. edição 4 revista e ampliada do mini dicionário Aurélio. Rio de Janeiro, 2002.