

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 1145

**OTIMIZAÇÃO ROBUSTA APLICADA EM PROJETOS DE ANTENAS
IMPRESSAS**

Fernando José de Souza Magalhães

DATA DA DEFESA: 25/09/2019

Fernando José de Souza Magalhães

Otimização Robusta Aplicada em Projetos de Antenas Impressas

Belo Horizonte, MG

Setembro de 2019

M188o

Magalhães, Fernando José de Souza.

Otimização robusta aplicada em projetos de antenas impressas [recurso eletrônico]/Fernando José de Souza Magalhães. - 2019. 1 recurso online (80 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Diogo Batista de Oliveira.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f.75-77.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia Elétrica - Teses. 2. MATLAB (Programa de computador) - Teses. 3. Otimização combinatória - Teses. 4. Antenas (Eletrônica) - Teses. I. Oliveira, Diogo Batista de. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621.3(043)

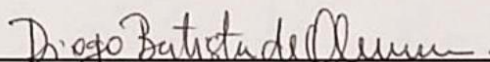
"Otimização Robusta Aplicada em Projetos de Antenas Impressas"

Fernando José de Souza Magalhães

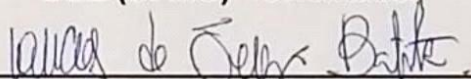
Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 25 de setembro de 2019.

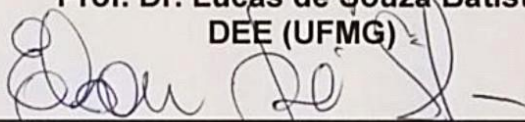
Por:



Prof. Dr. Diogo Batista de Oliveira
DEE (UFMG) - Orientador



Prof. Dr. Lucas de Souza Batista
DEE (UFMG)



Prof. Dr. Elson José da Silva
DEE (UFMG)

Fernando José de Souza Magalhães

Otimização Robusta Aplicada em Projetos de Antenas Impressas

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Universidade Federal de Minas Gerais

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Diogo Batista de Oliveira

Belo Horizonte, MG

Setembro de 2019

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 1145

**OTIMIZAÇÃO ROBUSTA APLICADA EM PROJETOS DE ANTENAS
IMPRESSAS**

Fernando José de Souza Magalhães

DATA DA DEFESA: 25/09/2019

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer à minha família por todo apoio durante o tempo em que estive fazendo o mestrado, em especial a minha mãe por sempre estar ao meu lado nos momentos mais difíceis.

Ao meu orientador Diogo Batista, pela orientação e apoio durante todo o processo de elaboração desta pesquisa. Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG pela dedicação de lecionar as disciplinas do programa com extrema qualidade.

Aos colegas do laboratório LEA, pela companhia durante esta jornada.

E em especial à todos que conheci pelo Ministério Universidades Renovadas presente na UFMG, por despertarem em mim o desejo de cada vez ficar mais próximo de Deus e da Igreja.

RESUMO

Neste trabalho é proposto um projeto de antenas impressas utilizando otimização robusta, a fim de obter antenas que são menos sensíveis às incertezas existentes nos métodos de fabricação e nas características elétricas dos materiais utilizados. Métodos e materiais de baixo custo podem possuir incertezas significativas que influenciam no desempenho final de uma antena impressa e uma abordagem de otimização robusta pode ser uma das formas de tratar tais incertezas a fim de reduzir o custo em projetos de antenas impressas.

Duas abordagens de otimização robusta são propostas: uma utilizando a metodologia mono-objetivo com algoritmos genéticos e outra a utilizando a metodologia multiobjetivo com o algoritmo NSGAI. Ambas as metodologias são modificadas para reduzir a sensibilidade dos parâmetros de desempenho da antena às incertezas das variáveis de projeto.

A metodologia proposta foi implementada em dois tipos de antenas, onde foram consideradas as incertezas do método de fabricação e também as incertezas do substrato FR-4. A rotina de otimização foi implementada utilizando o MATLAB[®], onde os parâmetros de desempenho da antena foram obtidos através do programa HFSS[®] da desenvolvedora Ansys.

Dois modelos de antenas foram confeccionados e validados através do uso de equipamentos e da câmara semi anecoica disponibilizados pela universidade, e foi possível observar que houve uma redução da sensibilidade entre as antenas selecionadas e as menos robustas da última geração obtida pelo algoritmo, reduzindo a sensibilidade do ganho realizado em 15,25% para a antena impressa retangular e em 18,07% para a antena impressa de polarização circular. Já a razão axial da antena impressa de polarização circular foi reduzida em 11,89%.

Palavras-chave: HFSS. MATLAB. Otimização. Otimização Robusta. Projeto de Antenas Impressas. Projeto Robusto.

ABSTRACT

This work proposes the design of patch antennas using robust optimization to obtain antennas that are less sensitive to uncertainties in the manufacturing methods and the electrical characteristics of the materials used. Low-cost methods and materials may have significant uncertainties that impact the final performance of a patch antenna and a robust optimization approach may be one way to address such uncertainties to reduce the cost of patch antenna designs.

Two robust optimization approaches are proposed: one using the mono-objective methodology with genetic algorithms and the other using the multi-objective methodology with the NSGAI algorithm. Both methodologies are modified to reduce the sensitivity of antenna performance parameters to the uncertainties of design variables.

The proposed methodology was implemented in two types of antennas, where the uncertainties of the manufacturing method and also the uncertainties of the FR-4 substrate were considered. The optimization routine was implemented using MATLAB ^{textsuperscript}textregistered, where the antenna performance parameters were obtained through the Ansys developer HFSS ^{textsuperscript}textregistered program.

Two antenna models were made and validated through the use of the equipment and semi-anechoic chamber provided by the university, and it was observed that there was a reduction in sensitivity between the selected and less robust antennas of the last generation obtained by the algorithm, reducing the sensitivity. of the gain realized at 15,25% for the rectangular patch antenna and 18,07% for the circular polarization patch antenna. The axial ratio of the circular polarization patch antenna was reduced by 11,89%.

Keywords: HFSS. MATLAB. Optimization. Patch Antenna Design. Robust Design. Robust Optimization.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Exemplo de antena impressa	21
Figura 2 – Eficiência de radiação de uma antena impressa retangular	23
Figura 3 – Exemplo de antenas obtidas através de métodos de otimização, (a) Antena utilizada em microssatélites da missão ST5 da NASA, (b) Antena impressa de alto ganho	28
Figura 4 – Fluxo de potência em uma antena	32
Figura 5 – Elipse de polarização do campo elétrico de uma antena	34
Figura 6 – Espaço de decisão e espaço de objetivos em um problema multiobjetivo	35
Figura 7 – Sensibilidade de uma solução ótima global A e uma solução ótima robusta B em um problema mono-objetivo	36
Figura 8 – Espaço de incertezas sobre uma função representada com contornos de nível.	37
Figura 9 – Exemplo de amostragem pelo método do Hipercubo Latino	38
Figura 10 – Fluxograma do algoritmo de otimização mono-objetivo	40
Figura 11 – Fluxograma do algoritmo de otimização NSGA-II	41
Figura 12 – Diagrama esquemático do procedimento do NSGA-II	41
Figura 13 – Antena impressa retangular	44
Figura 14 – Antena impressa de polarização circular com fendas e chanfros	45
Figura 15 – Fluxograma da abordagem de otimização mono-objetivo	46
Figura 16 – Fluxograma da abordagem de otimização multiobjetivo	47
Figura 17 – Configuração da montagem para medição do ganho realizado das antenas	50
Figura 18 – Configuração da montagem para medição da razão axial das antenas de polarização circular	51
Figura 19 – Fronteiras de não dominância resultantes da otimização mono-objetivo de duas etapas	55
Figura 20 – Fronteiras de não dominância resultantes da otimização multiobjetivo .	56
Figura 21 – Análise da variação do ganho realizado da antena impressa retangular selecionada em função da incerteza na permissividade relativa do substrato FR-4	57
Figura 22 – Análise da variação do ganho realizado da antena impressa retangular selecionada em função da incerteza na tangente de perdas do substrato FR-4	57
Figura 23 – Análise da variação do ganho realizado da antena impressa retangular menos robusta da última geração em função da incerteza na permissividade relativa do substrato FR-4	58

Figura 24 – Análise da variação do ganho realizado da antena impressa retangular menos robusta da última geração em função da incerteza na tangente de perdas do substrato FR-4	59
Figura 25 – Antena impressa retangular fabricada (escala em centímetros)	60
Figura 26 – Gráfico comparativo entre os dados medidos e simulados da perda de retorno $ S_{11} $ da antena impressa retangular	61
Figura 27 – Gráfico comparativo entre os dados medidos e simulados do ganho realizado da antena impressa retangular	61
Figura 28 – Diagramas de caixa feitos a partir da simulação de Monte Carlo para o ganho realizado da antena impressa retangular	62
Figura 29 – Análise da variação do ganho realizado da antena impressa de polarização circular selecionada em função da incerteza na permissividade relativa do substrato FR-4	64
Figura 30 – Análise da variação do ganho realizado da antena impressa de polarização circular selecionada em função da incerteza na tangente de perdas do substrato FR-4	65
Figura 31 – Análise da variação do ganho realizado da antena impressa de polarização circular menos robusta da última geração em função da incerteza na permissividade relativa do substrato FR-4	66
Figura 32 – Análise da variação do ganho realizado da antena impressa de polarização circular menos robusta da última geração em função da incerteza na tangente de perdas do substrato FR-4	67
Figura 33 – Antena impressa de polarização circular fabricada (escala em centímetros)	68
Figura 34 – Gráfico comparativo entre os dados medidos e simulados da perda de retorno $ S_{11} $ da antena impressa de polarização circular	69
Figura 35 – Gráfico comparativo entre os dados medidos e simulados do ganho realizado da antena impressa de polarização circular	69
Figura 36 – Gráfico comparativo entre os dados medidos e simulados da razão axial da antena impressa de polarização circular	70
Figura 37 – Diagramas de caixa feitos a partir da simulação de Monte Carlo para o ganho realizado da antena impressa de polarização circular	70
Figura 38 – Diagramas de caixa feitos a partir da simulação de Monte Carlo para a razão axial da antena impressa de polarização circular	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros dos algoritmos de otimização	53
Tabela 2 – Limites e incertezas da antena impressa retangular na otimização . . .	54
Tabela 3 – Desempenho computacional dos algoritmos de otimização robusta para a antena retangular	56
Tabela 4 – Análise da variação do ganho realizado da antena impressa retangular selecionada em função da incerteza na precisão geométrica da prototipadora	58
Tabela 5 – Análise da variação do ganho realizado antena impressa retangular menos robusta da última geração em função da incerteza na precisão geométrica da prototipadora	59
Tabela 6 – Variáveis de projeto da antena impressa retangular selecionada da otimização	60
Tabela 7 – Limites e incertezas da antena impressa de polarização circular na otimização	63
Tabela 8 – Fronteira de não dominância resultante da otimização multiobjetivo da antena impressa de polarização circular	63
Tabela 9 – Análise da variação do ganho realizado da antena impressa de polarização circular selecionada em função da incerteza na precisão geométrica da prototipadora	65
Tabela 10 – Análise da variação da razão axial da antena impressa de polarização circular selecionada em função da incerteza na precisão geométrica da prototipadora	66
Tabela 11 – Análise da variação do ganho realizado da antena impressa de polarização circular menos robusta da última geração em função das incertezas do projeto	67
Tabela 12 – Análise da variação da razão axial da antena impressa de polarização circular menos robusta da última geração em função das incertezas do projeto	67
Tabela 13 – Variáveis de projeto da antena impressa de polarização circular selecionada da otimização	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FDTD	<i>Finite-Difference Time-Domain</i> (Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo)
FEM	<i>Finite Element Method</i> (Método dos Elementos Finitos)
FNDS	<i>Fast Non-dominated Sorting</i> (Ordenação Rápida Por Não Dominância)
FR-4	<i>Flame Retardant 4</i> (Retardante de Chamas 4)
HFSS	<i>High-Frequency Structure Simulator</i> (Simulador de Estruturas de Alta Frequência)
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i> (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos)
LHCP	<i>Left Hand Circular Polarization</i> (Polarização Circular Mão Esquerda)
MATLAB	<i>Matrix Laboratory</i> (Laboratório de Matrizes)
NSGA-II	<i>Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II</i> (Algoritmo Genético com Organização por Não Dominância II)
RFID	<i>Radio Frequency Identification</i> (Identificação por Rádio Frequência)
RHCP	<i>Right Hand Circular Polarization</i> (Polarização Circular Mão Direita)
SBX	<i>Simulated Binary Crossover</i> (Cruzamento Binário Simulado)
TEAM 22	<i>Testing Electromagnetic Analysis Method 22</i> (Teste de Método de Análise Eletromagnética 22)

LISTA DE SÍMBOLOS

ε_r	Permissividade elétrica relativa
$\tan \delta$	Tangente de perdas
Z	Impedância
R	Resistência
X	Reatância
$ \Gamma $	Coefficiente de reflexão
$ S_{11} $	Coefficiente de reflexão
$ S_{12} $	Coefficiente de transmissão
G_R	Ganho realizado
D	Diretividade
e_{cd}	Eficiência de radiação
e_r	Eficiência de reflexão
RA	Razão Axial
dB	Decibel
σ	Desvio padrão
P_T	Potência transmitida
P_R	Potência recebida
λ	Comprimento de onda

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	Motivação	22
1.2	Objetivos	24
1.3	Contribuição	24
1.4	Estrutura do texto	24
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
2.1	Projeto de antenas impressas	27
2.2	Projeto de antenas impressas com otimização	27
2.3	Projeto de antenas impressas com otimização robusta	28
3	REFERENCIAL TEÓRICO	31
3.1	Antenas impressas	31
3.1.1	Parâmetros de desempenho da antena	31
3.1.1.1	Impedância de Entrada	32
3.1.1.2	Ganho Realizado	32
3.1.1.3	Razão Axial	33
3.2	Otimização	34
3.2.1	Otimização mono-objetivo	34
3.2.2	Otimização multiobjetivo	35
3.2.3	Otimização robusta	36
3.2.4	Algoritmos genéticos	39
3.2.4.1	Algoritmo de otimização mono-objetivo	40
3.2.4.2	Algoritmo de otimização multiobjetivo	40
4	MÉTODO PROPOSTO	43
4.1	Antenas impressas selecionadas para a otimização robusta	43
4.1.1	Antena impressa retangular	44
4.1.2	Antena impressa de polarização circular	44
4.2	Abordagem de otimização	46
4.2.1	Otimização mono-objetivo	46
4.2.2	Otimização multiobjetivo	47
4.2.3	Avaliação dos parâmetros de desempenho das antenas	48
4.2.4	Análise das soluções	49
4.3	Configuração das medições	49
4.3.1	Caracterização da antena	50

4.3.2	Medição do ganho realizado	50
4.3.3	Medição da razão axial	51
5	EXPERIMENTOS E RESULTADOS	53
5.1	Antena impressa retangular	53
5.1.1	Abordagem de otimização	54
5.1.1.1	Mono-objetivo	54
5.1.1.2	Multiobjetivo	55
5.1.2	Análise dos resultados	55
5.1.3	Fabricação e medição da antena	60
5.1.4	Avaliação da robustez	61
5.2	Antena impressa de polarização circular	62
5.2.1	Abordagem de otimização	62
5.2.2	Análise dos resultados	64
5.2.3	Fabricação e medição da antena	68
5.2.4	Avaliação da robustez	70
6	CONCLUSÃO	73
6.1	Considerações Finais	73
6.2	Publicações	75
6.3	Propostas de Continuidade	75
	REFERÊNCIAS	77

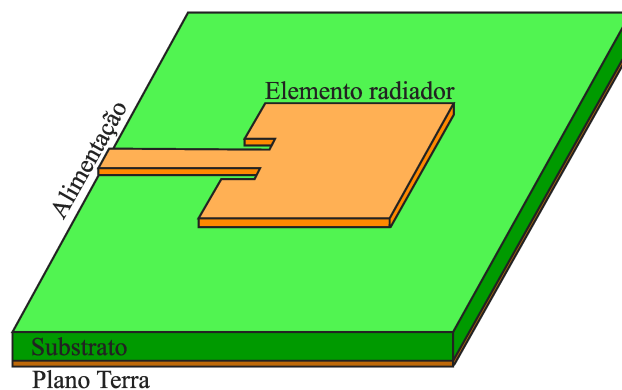
1 INTRODUÇÃO

Segundo o Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE, 2013), antenas são parte de um sistema de transmissão ou recepção que é projetado para irradiar ou receber ondas eletromagnéticas. Em telecomunicações, as antenas são elementos fundamentais para meios de comunicação sem fio que abrangem diversas aplicações como radiodifusão, cobrindo uma grande área de receptores, transmissão de dados, onde é inviável o uso de linhas de transmissão, comunicação entre aparelhos móveis etc. Conforme Stutzman e Thiele (2013), a atual demanda de comunicação por meios eletrônicos tende a fazer com que as pessoas e seus dispositivos estejam livres de fios e esta demanda só é possível com o uso de antenas.

Dentre os diversos modelos de antenas estão as antenas impressas, bastante utilizadas em aparelhos portáteis ou em aplicações onde custo, tamanho e peso sejam características relevantes em um projeto. Grande parte da demanda por antenas compactas vêm de dispositivos portáteis que realizam comunicação sem fio como smartphones, tablets e notebooks (STUTZMAN; THIELE, 2013). A grande vantagem deste tipo de antena é a facilidade de fabricação, que pode ser realizada com processos simples e baratos comparado à outros modelos de antena. Em contrapartida, ela é dependente das características do substrato em que é construída, pois elas influenciam em seu desempenho (BALANIS, 2016).

A Figura 1 apresenta uma antena impressa com elemento radiador retangular em cima do substrato e plano terra embaixo do substrato. Normalmente, estas antenas impressas possuem diretividade máxima normal ao plano do elemento radiador, sendo que idealmente elas não devem irradiar na direção da borda do substrato.

Figura 1 – Exemplo de antena impressa



Fonte: Adaptado de Balanis (2016).

No projeto de antenas impressas de geometria simples, é comum utilizar modelos já

conhecidos como o de linha de transmissão ou o da cavidade ressonante, onde o primeiro não é muito preciso apesar de oferecer uma boa compreensão do funcionamento físico da antena e o segundo é mais preciso porém ao mesmo tempo mais complexo (GARG et al., 2001).

Os métodos de otimização computacional surgem como alternativas às formas tradicionais de projetos na engenharia, onde a partir de operações matemáticas pode-se obter resultados melhores em um projeto desde que seja possível quantificar a característica a ser melhorada (RAO, 2009). A otimização utilizada em antenas é utilizada por exemplo para melhorar o desempenho de antenas com geometria complexa sem a necessidade de um modelo matemático. Para isso, a otimização faz uso de métodos numéricos para a modelagem da antena a ser otimizada, avaliando-se então diferentes parâmetros de desempenho que podem ser melhorados.

A otimização robusta corresponde a diferentes métodos derivados da otimização computacional que além de procurar soluções com bons parâmetros de desempenho, busca soluções que são menos sensíveis às possíveis incertezas que possam influenciar no desempenho de um projeto (LEE; PARK, 2001). Estas incertezas podem ser originadas das condições ambientais e de operação, das tolerâncias e imprecisões de elementos atuadores, da imprecisão da modelagem do sistema otimizado e da imprecisão em manter o projeto dentro da realidade factível em que deveria estar (BEYER; SENDHOFF, 2007).

Nesta dissertação serão tratadas as incertezas das tolerâncias e imprecisão dos elementos que atuam no projeto, que podem surgir no método de fabricação (maquinários, materiais etc.). A grande vantagem no uso de um método de otimização robusta para tratar este tipo de incerteza está na redução de custo, onde por exemplo, pode-se utilizar processos de fabricação mais baratos e ao mesmo tempo atender os requisitos necessários no produto final.

1.1 Motivação

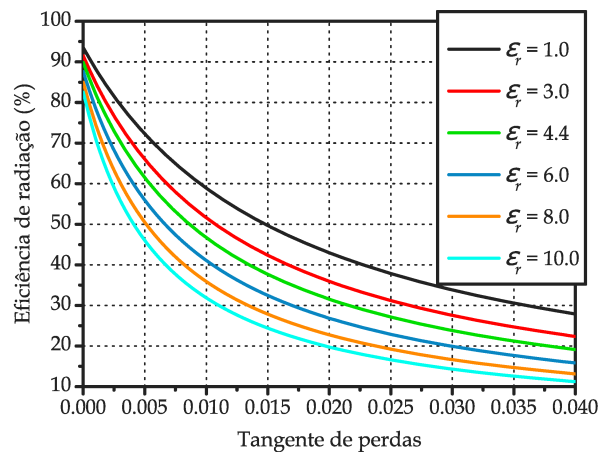
Na confecção de antenas impressas o substrato desempenha um papel importante, pois é nele onde estarão impressos os elementos condutores da antena, sendo responsável pela estrutura da mesma. Conforme Garg et al. (2001), o substrato deve ser a primeira escolha no projeto de uma antena impressa, não só pelas características mecânicas, mas também pelo desempenho da antena. As características elétricas do substrato como constante dielétrica (ϵ_r) e tangente de perdas ($\tan \delta$) são fatores importantes nos parâmetros de desempenho da antena.

Dentre os diversos substratos existentes na confecção de antenas impressas está o FR-4 (*Flame Retardant 4*), um material bastante utilizado na confecção de placas de circuito impresso (IGI GLOBAL, 2019). Pelo fato do FR-4 ser feito de laminados de fibra

de vidro e resina epóxi, suas características elétricas possuem incertezas, onde a constante dielétrica ϵ_r pode variar na faixa 4,16 – 4,75 e a tangente de perdas $\tan \delta$ pode variar na faixa 0,017 – 0,027 (OLIVEIRA et al., 2016). De acordo com Jawitz e Jawitz (2007) existem diferentes combinações de fibra de vidro e resina epóxi que atendem a norma NEMA LI-1, que determina em quais faixas de determinados parâmetros um material composto de fibra de vidro e resina epóxi é classificado como FR-4. Assim, além do método de fabricação, que pode ter incertezas inerentes ao processo (como o posicionamento e densidade das fibras, por exemplo), a própria norma possui uma margem que oferece variação de certas características do material.

Apesar do FR-4 ser um material bastante utilizado em placas de circuitos impressos pelo seu baixo custo, as incertezas na permissividade relativa e o alto valor da tangente de perdas adicionam complexidade no projeto de uma antena (NASCIMENTO; LACAVA, 2011). Conforme Bahl e Bhartia (1980), tais incertezas podem causar discrepâncias na frequência de operação da antena entre o projeto inicial e o real, onde podem ser mais significativas em modelos de antenas impressas que possuem uma banda estreita para as frequências de operação como característica. Para ilustrar a dependência do desempenho em função das características do substrato, a Figura 2 apresenta como a eficiência de radiação de uma antena impressa retangular similar à apresentada na Figura 1 pode variar de acordo com as características do material.

Figura 2 – Eficiência de radiação de uma antena impressa retangular



Fonte: Nascimento e Lacava (2011).

O processo de fabricação de uma antena impressa pode inserir incertezas, seja quando este processo é feito por meios químicos onde é aplicada uma máscara no formato desejado para a antena impressa, ou por meios mecânicos, onde uma fresa remove a superfície condutora impressa no substrato. As incertezas surgem então na tolerância em que o processo de fabricação é capaz de atender, uma vez que a geometria de uma antena impressa pode ter diferentes formas geométricas.

Dos artigos pesquisados para esta dissertação, todos consideram como incertezas apenas a geometria das antenas impressas que podem variar conforme o método utilizado em sua fabricação. Como proposta, nesta dissertação também serão consideradas as incertezas presentes nas características do substrato das antenas a fim de alcançar um projeto robusto que utiliza um material de baixo custo e ao mesmo tempo possui bons parâmetros de desempenho.

1.2 Objetivos

O objetivo principal desta dissertação é o projeto de antenas impressas robustas considerando as incertezas existentes no processo de fabricação e no material utilizado como substrato, visando obter antenas com boas características de desempenho e também pouco sensíveis às incertezas.

Conforme o exposto na motivação, estão definidos também os seguintes objetivos específicos:

- a) Compreender e modelar as incertezas em um projeto de antenas impressas;
- b) Fazer a modelagem de antenas impressas em um software de simulação eletromagnética;
- c) Implementar um algoritmo de otimização robusta para o projeto de antenas impressas;
- d) Fabricar as antenas obtidas a partir do processo de otimização robusta;
- e) Medir as características das antenas fabricadas e comparar com os resultados modelados.

1.3 Contribuição

A principal contribuição desta dissertação foi a otimização robusta em projetos de antenas impressas considerando as incertezas existentes no substrato FR-4, que são bastante significativas e se tratadas adequadamente podem resultar em projetos baratos e confiáveis.

1.4 Estrutura do texto

O texto está estruturado em cinco capítulos. No segundo capítulo é feita a revisão bibliográfica contextualizando o problema a ser tratado nesta dissertação. No terceiro capítulo é feito um estudo das antenas impressas e dos métodos de otimização. No quarto capítulo é apresentada a metodologia para a aplicação da otimização robusta para o projeto

de antenas impressas. No quinto capítulo são apresentados os experimentos e resultados obtidos com a aplicação da metodologia. Por fim, no sexto capítulo a metodologia e os resultados obtidos são discutidos e são feitas propostas de abordagem de continuidade relacionadas ao tema desta dissertação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Ao longo dos anos, diferentes métodos têm sido utilizados para o projeto de antenas impressas, onde inicialmente os métodos consistiam em modelagens matemáticas e com a evolução dos recursos computacionais os métodos de modelagem numérica surgem como alternativa para criar diferentes topologias de antenas. Neste capítulo alguns destes métodos serão apresentados a fim de contextualizar esta dissertação.

2.1 Projeto de antenas impressas

A modelagem matemática dos fenômenos físicos relacionados ao funcionamento das antenas impressas permite a compreensão do comportamento do desempenho delas antes da fabricação das mesmas. Os modelos analíticos foram os primeiros a serem desenvolvidos para o projeto de antenas impressas, utilizando pressupostos de como os campos eletromagnéticos se comportam dentro e fora do substrato da antena (GARG et al., 2001).

A antena impressa com elemento radiador retangular (apresentada na Figura 1) é a mais utilizada na criação de modelos analíticos, podendo ser modelada por linhas de transmissão ou por cavidades ressonantes. O modelo de linha de transmissão é um modelo simplificado e menos preciso, porém oferece uma boa compreensão do funcionamento da antena, enquanto que o modelo de cavidade ressonante é mais complexo e mais preciso (BALANIS, 2016).

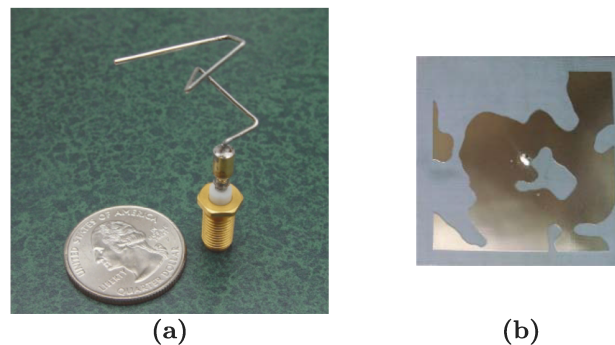
Como último exemplo de projeto estão os métodos de análise de onda completa (*Full Wave Analysis*), onde as equações de Maxwell para o eletromagnetismo são aplicadas sobre a estrutura e condições que se deseja analisar sem nenhuma suposição (BALANIS, 2016). Estes métodos podem ser modelados computacionalmente através de técnicas numéricas como o FDTD (*Finite-Difference Time-Domain*) e o FEM (*Finite Element Method*). Atualmente existem soluções comerciais para a análise e projeto de antenas que fazem uso destes métodos, como o Ansys HFSS[®] (*High-Frequency Structure Simulator*) e o CST Studio Suite[®].

2.2 Projeto de antenas impressas com otimização

O projeto de antenas através de métodos de otimização é bastante utilizado quando a geometria das mesmas possui uma modelagem complexa e os métodos analíticos não são capazes de oferecerem a precisão desejada no projeto. A otimização é então bastante utilizada em conjunto com métodos de análise de onda completa para a caracterização

das funções objetivo utilizadas na otimização, pois além de permitirem uma boa precisão dos resultados desejados é possível que novas geometrias sejam obtidas a fim de que a antena atenda os requisitos de projeto necessários, como apresentado na Figura 3, onde a otimização utilizou de uma geometria arbitrária para produzir antenas que atendiam os critérios de desempenho necessários.

Figura 3 – Exemplo de antenas obtidas através de métodos de otimização, (a) Antena utilizada em microsatélites da missão ST5 da NASA, (b) Antena impressa de alto ganho



Fonte: Hornby et al. (2006) e Yang, Wang e Wang (2017).

Além da obtenção de novos modelos de antenas que não seriam possíveis através de métodos analíticos, a otimização utilizada em antenas tem um grande foco na melhoria dos parâmetros de desempenho. Como exemplo, seguem alguns artigos com diferentes objetivos de otimização: reduzir a perda de retorno em uma determinada faixa de frequências para uma antena impressa com geometria complexa (JOHN; AMMANN, 2009), sintonia de frequência de antenas impressas reconfiguráveis que utilizam componentes discretos (NGUYEN-TRONG; FUMEAUX, 2017), otimização multiobjetivo em diferentes parâmetros de desempenho de uma antena impressa (OLIVEIRA et al., 2016), introduzir pontos nulos no diagrama de radiação da antena e maximizar o ganho em uma dada direção (AL-AZZA; HARACKIEWICZ, 2016), reduzir a perda de retorno da antena (WU et al., 2016), dentre outros.

2.3 Projeto de antenas impressas com otimização robusta

A otimização robusta é uma abordagem mais recente e que está em crescimento sendo aplicada em diversos problemas onde surgem incertezas no projeto e possui um grande potencial em aplicações na engenharia. Um fator importante da otimização robusta é o uso do espaço de incertezas, que é um espaço definido por um conjunto de valores dos parâmetros de incertezas que são levados em consideração no problema a ser resolvido (GORISSEN; YANIKOĞLU; HERTOĞ, 2015). A otimização robusta faz uso de diferentes

estratégias a fim de analisar este espaço de incertezas para obter as soluções robustas desejadas.

Forram encontrados trabalhos que utilizam diferentes métodos para o uso de otimização robusta em antenas impressas. Zhang e Rahmat-Samii (2017) utilizam o método do pior caso para definir a alimentação de um conjunto de antenas a fim de encontrar um melhor padrão de radiação; o mesmo método também é utilizado no modelo analítico da cavidade ressonante para encontrar a melhor geometria de uma antena impressa. Koziel e Bekasiewicz (2018) realizam uma otimização iterativa, onde a cada iteração é feita uma análise do espaço de incertezas do projeto a fim de obter uma antena impressa de polarização circular e banda larga utilizando como ferramenta o programa CST Studio Suite[®]. Lee et al. (2018) propõem o uso da otimização robusta em conjunto com o programa HFSS[®] para o projeto de antenas de aparelhos móveis utilizando o método de Taguchi, criado para avaliar a robustez de um projeto. Por fim, Kim et al. (2011) propõem a otimização de uma antena para RFID (*Radio Frequency Identification*) utilizando também o método de Taguchi para avaliar a robustez e a análise da variância dos resultados no processo de otimização.

Todas estas aplicações de otimização robusta encontradas consideram como incertezas a geometria, onde as incertezas do material são irrelevantes uma vez que os mesmos são robustos e com tolerâncias de fabricação mais restritas comparadas com as do FR-4 apresentadas no capítulo anterior. Um dos métodos para tratar das incertezas no material é através da análise estatística do espaço de incertezas, como proposta por Jin e Sendhoff 2003. Desta forma, todo o projeto tem sua robustez avaliada mesmo que não seja possível determinar o valor das características do material.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo apresenta o referencial teórico utilizado como base da pesquisa apresentada nesta dissertação, introduzindo os conceitos de antenas e otimização que serão utilizados na metodologia do projeto robusto de antenas impressas.

3.1 Antenas impressas

Antenas impressas são antenas compactas, que consistem de um elemento metálico impresso sobre um substrato fino podendo ter um plano terra abaixo deste substrato. Dentre suas vantagens estão o baixo custo de fabricação, volume reduzido, versatilidade de montagem em diferentes superfícies e também em ser alimentada de diferentes formas, seja por um cabo coaxial por trás do plano terra ou então uma linha de transmissão também impressa sobre o substrato. Em contrapartida, suas principais desvantagens são sua baixa eficiência, baixa potência e faixa de frequências estreita. Ainda assim, as antenas impressas são utilizadas em aplicações militares de alto desempenho, comunicação de dispositivos móveis, comunicação sem fio e outras que entrem em conformidade com as características que estas antenas podem oferecer (BALANIS, 2016).

As antenas impressas também possuem a versatilidade de alterar suas características de acordo com a geometria do plano terra e do elemento radiador. É possível por exemplo, ter maior banda de frequência, radiação para trás ou polarização circular com modificações simples no projeto.

Dentre as características que uma antena impressa pode possuir, a polarização circular pode ser desejável pois antenas assim não possuem perdas de sinal significativas relacionadas à polarização e podem ser melhor empregadas em sistemas de transmissão móvel, como o RFID onde as posições do transmissor e receptor não são definidas para realizar a comunicação.

3.1.1 Parâmetros de desempenho da antena

Os parâmetros de desempenho são características importantes tanto para o projeto quanto para a análise de antenas. Estes parâmetros quantificam seu desempenho e podem ser utilizados como funções objetivo para os algoritmos de otimização.

3.1.1.1 Impedância de Entrada

A impedância de entrada de uma antena corresponde à impedância encontrada em seus terminais. Ela é caracterizada por ter uma parte real e imaginária:

$$Z_A = R_A + jX_A \quad (3.1.1)$$

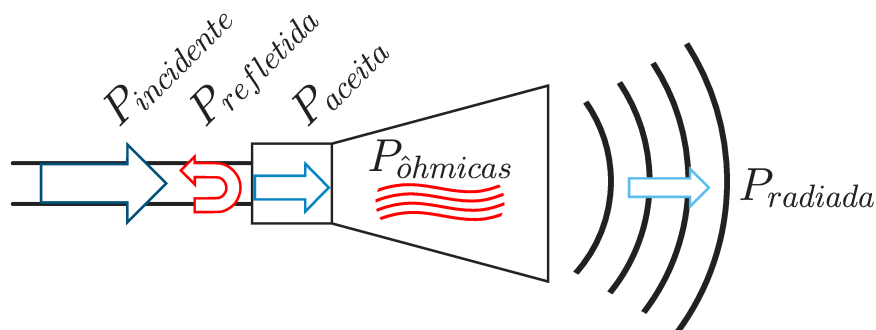
Pela impedância de entrada da antena e impedância do alimentador é possível obter o coeficiente de reflexão da antena $|\Gamma|$, que quantifica o casamento de impedância entre a antena e o alimentador. Este coeficiente, também chamado de $|S_{11}|$ é geralmente dado em função da frequência e o casamento entre a antena e o alimentador se dá em uma determinada faixa de frequências (BALANIS, 2016). A Equação 3.1.2 apresenta o cálculo do coeficiente de reflexão dadas as impedâncias do gerador e da antena:

$$|\Gamma| = |S_{11}| = \frac{|Z_G| - |Z_A|}{|Z_G| + |Z_A|} \quad (3.1.2)$$

3.1.1.2 Ganho Realizado

Em antenas, o ganho é um parâmetro que leva em conta a eficiência de radiação da antena e também sua diretividade (que define a característica de intensidade de radiação da antena). Ele é um parâmetro que depende da direção e normalmente quando esta direção não está especificada compreende-se que o ganho está definido para a direção de máxima radiação da antena. No caso das antenas impressas, é comum a direção de máxima radiação ser perpendicular ao elemento radiador da antena caso esta possua plano terra. Para uma melhor compreensão dos parâmetros de eficiência de uma antena, a Figura 4 apresenta o fluxo de potência em uma antena.

Figura 4 – Fluxo de potência em uma antena



Fonte: Adaptado de Ansys (2015).

Pela Figura 4, observa-se que nem toda a potência que é inserida nos terminais da antena chega a ser transformada em ondas radiadas. A eficiência da antena leva em conta as perdas, que podem ocorrer por reflexões causadas pelo descasamento de impedância

entre a linha de transmissão e a antena, como também perdas ôhmicas que ocorrem na antena pela condução finita dos elementos metálicos da antena e também pela condução de materiais dielétricos da antena.

A eficiência de reflexão é obtida a partir do coeficiente de reflexão da antena Γ pela seguinte equação:

$$e_r = 1 - |\Gamma|^2 \quad (3.1.3)$$

Já a eficiência de radiação é obtida através da razão entre a potência radiada e a potência aceita pela antena pela seguinte equação:

$$e_{cd} = \frac{P_{radiada}}{P_{aceita}} \quad (3.1.4)$$

O ganho da antena leva em conta apenas a eficiência de radiação da antena, enquanto que o ganho realizado também considera as perdas de casamento de impedância entre a antena e a linha de transmissão que a alimenta, sendo um parâmetro útil em momentos em que o descasamento de impedância é inevitável. Ele é dado pela seguinte equação:

$$G_R = e_{cd}e_r D \quad (3.1.5)$$

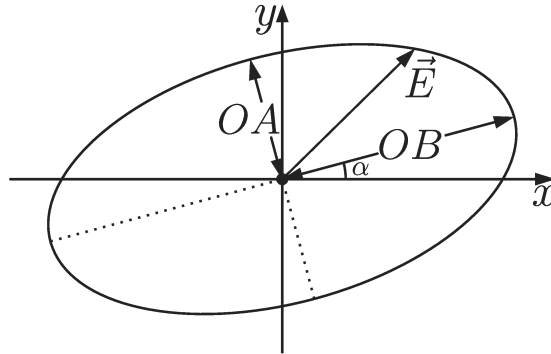
onde e_{cd} corresponde à eficiência de radiação, dada pela razão entre a potência transmitida e a potência recebida pela antena, e_r representa a eficiência de reflexão que quantifica o casamento de impedância do sistema e D representa a diretividade da antena (BALANIS, 2016).

A maior vantagem em verificar este parâmetro de desempenho é que ele possui duas informações importantes (Ganho e casamento de impedância) que podem ser utilizadas como um único objetivo em um algoritmo de otimização.

3.1.1.3 Razão Axial

A razão axial é definida pela razão de componentes ortogonais do campo elétrico irradiado por uma antena com polarização circular. Assim como o ganho, a razão axial varia com a direção de observação. Para uma polarização perfeitamente circular, a razão axial deve ser igual a $0dB$, enquanto que para uma polarização perfeitamente linear ela deve tender para o infinito. Para os valores entre $0dB$ e infinito a polarização é definida como elíptica (BALANIS, 2016). A Figura 5 apresenta o traçado do campo elétrico \vec{E} em uma polarização elíptica, onde o vetor \vec{E} descreve uma elipse em função do tempo. O sentido de rotação do campo elétrico pode determinar as polarizações LHCP (*Left Hand Circular Polarization*) e RHCP (*Right Hand Circular Polarization*).

Figura 5 – Elipse de polarização do campo elétrico de uma antena



Fonte: Adaptado de Balanis (2016).

Em uma polarização elíptica, a razão axial pode ser obtida pela razão entre os eixos da elipse descrita pelo campo elétrico:

$$RA = \frac{\text{Eixo maior}}{\text{Eixo menor}} = \frac{OA}{OB}, \quad 1 \leq RA \leq \infty \quad (3.1.6)$$

3.2 Otimização

Conforme Rao (2009), o conceito de otimização está relacionado à obtenção do melhor resultado sob dadas circunstâncias, onde não há uma forma exclusiva para resolver diferentes problemas de forma eficiente. Ao longo dos anos, diversos métodos de otimização têm sido utilizados para encontrar soluções que minimizem custos de fabricação e produção ou que melhorem características de desempenho em algum projeto (DEB, 2001).

3.2.1 Otimização mono-objetivo

O problema de otimização mono-objetivo é o mais simples de se descrever, pois é caracterizado apenas por uma função objetivo. Este problema pode ser modelado da seguinte forma:

$$\begin{aligned} &\text{Minimize/Maximize } f(\mathbf{x}), \\ &\text{sujeito a } \begin{aligned} g_j(\mathbf{x}) &= 0, & j &= 1, 2, \dots, J; \\ h_k(\mathbf{x}) &\geq 0, & k &= 1, 2, \dots, K; \\ x_i^{(inferior)} &\leq x_i \leq x_i^{(superior)}, & i &= 1, 2, \dots, n. \end{aligned} \end{aligned} \quad (3.2.1)$$

onde \mathbf{x} representa um vetor de n variáveis de projeto, $g_j(\mathbf{x})$ são as funções de restrição de igualdade, $h_k(\mathbf{x})$ são as funções de restrição de desigualdade e $x_i^{(inferior)}$ e $x_i^{(superior)}$ representam os limites das variáveis de decisão.

As funções de restrição tem o propósito de determinar se uma solução é factível ou não, uma vez que em muitos problemas reais não há como escolher as variáveis de projeto de forma arbitrária. As restrições também podem definir um critério mínimo necessário para o projeto ser aceitável (RAO, 2009).

3.2.2 Otimização multiobjetivo

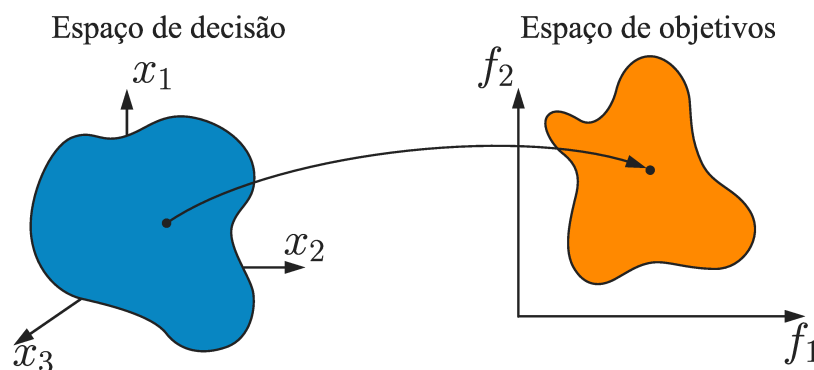
Quando o problema de otimização envolve mais do que uma função objetivo, ele é caracterizado como problema de otimização multiobjetivo. A seguir tem-se a modelagem deste tipo de problema de otimização (DEB, 2001):

$$\begin{aligned}
 &\text{Minimize/Maximize } f_m(\mathbf{x}), && m = 1, 2, \dots, M; \\
 &\text{sujeito a } g_j(\mathbf{x}) = 0, && j = 1, 2, \dots, J; \\
 &h_k(\mathbf{x}) \geq 0, && k = 1, 2, \dots, K; \\
 &x_i^{(inferior)} \leq x_i \leq x_i^{(superior)}, && i = 1, 2, \dots, n.
 \end{aligned} \tag{3.2.2}$$

Nesta modelagem, M é a quantidade de funções objetivo existentes no problema. As demais funções e parâmetros a mesma representação da caracterização do problema mono-objetivo (Equação 3.2.1).

Diferente de um problema de otimização mono-objetivo, a otimização multiobjetivo é caracterizada pelo conflito entre objetivos, por exemplo custo e desempenho, onde um bom desempenho pode significar um custo maior de um produto (um automóvel, por exemplo) enquanto que um baixo custo significa que o desempenho deve ser reduzido. Além deste conflito, no problema multiobjetivo as funções objetivo constituem um espaço multidimensional, onde para cada solução do espaço de decisão existe um vetor no espaço de objetivos, como é apresentado na Figura 6 (DEB, 2001).

Figura 6 – Espaço de decisão e espaço de objetivos em um problema multiobjetivo



Fonte: Adaptado de Deb (2001).

Pelo fato das funções objetivo estarem em um espaço multidimensional, surge o conceito de dominância. Em um problema multiobjetivo, uma solução \mathbf{x}_1 domina outra solução \mathbf{x}_2 se as seguintes condições são satisfeitas (COELLO et al., 2007):

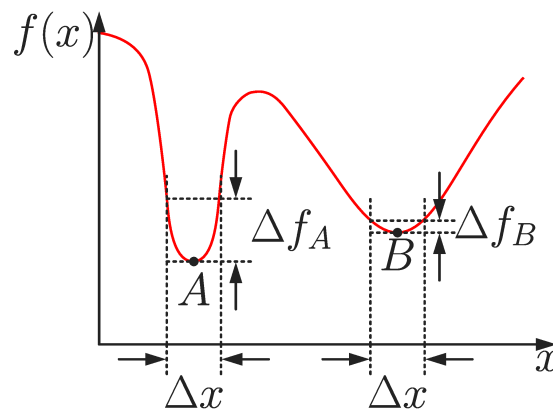
- a) A solução \mathbf{x}_1 ter pelo menos a mesma eficiência da solução \mathbf{x}_2 em todos os objetivos;
- b) A solução \mathbf{x}_1 é melhor do que a solução \mathbf{x}_2 em pelo menos um dos objetivos.

Desta forma, o espaço de objetivos pode ser dividido em fronteiras de não dominância, isto é, conjuntos onde não há soluções que violem as condições apresentadas.

3.2.3 Otimização robusta

A abordagem de otimização robusta proposta nesta dissertação visa encontrar uma solução ótima robusta, que diferente da solução ótima global as possíveis perturbações nas variáveis de projeto não alteram o valor da função objetivo da solução de forma significativa. A Figura 7 apresenta duas soluções em um cenário mono-objetivo:

Figura 7 – Sensibilidade de uma solução ótima global A e uma solução ótima robusta B em um problema mono-objetivo



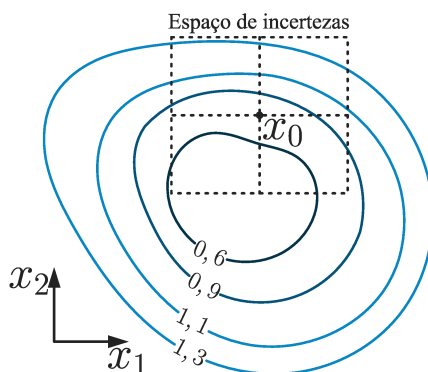
Fonte: Adaptado de Deb e Gupta (2006).

Nesta figura, o ponto A está representando o valor mínimo da função $f(x)$, que normalmente é o valor desejado quando se trata de problemas de otimização para minimizar uma função. O ponto B está representando um valor robusto, isto é, mesmo que o valor de x varie dentro de um espaço de incertezas Δx , a função não terá a mesma variação que teria caso estivesse no ponto A . Contextualizando esta figura em um problema real, a função $f(x)$ poderia representar algum dos parâmetros de desempenho de uma antena, como por exemplo, $|S_{11}|$, que deve ser minimizado. x pode representar as características geométricas ou material da antena e Δx representa as incertezas destas características, sejam elas originadas pela manufatura ou do material dela, por exemplo. Jin e Sendhoff (2003) mostram que a robustez e o valor ótimo de uma função podem caracterizar um

conflito entre os objetivos e faz uma avaliação de algumas funções para observar como o desempenho de um projeto robusto é degradada em relação a um projeto ótimo.

Normalmente, a otimização robusta substitui a avaliação da função objetivo por uma avaliação que considera o chamado espaço de incertezas, apresentado na Figura 8. Nesta representação, o espaço de incertezas corresponde a um hipercubo em torno do valor central \mathbf{x}_0 onde suas dimensões correspondem às incertezas de cada variável.

Figura 8 – Espaço de incertezas sobre uma função representada com contornos de nível.



Fonte: Adaptado de Ren, Pham e Koh (2012).

O uso do espaço de incertezas na otimização robusta é feito através da amostragem de pontos que estão contidos dentro dele para a aplicação de alguma abordagem sobre estes pontos, desta forma, a função objetivo é substituída pela chamada função efetiva, que deve piorar para pontos ótimos que não são robustos e favorecer pontos ótimos robustos. Esta função efetiva também pode ser usada para caracterizar uma restrição, dando ao projetista um poder de decisão de quão robusto o projeto deve ser dado que o desempenho deve ser o melhor possível (DEB; GUPTA, 2006).

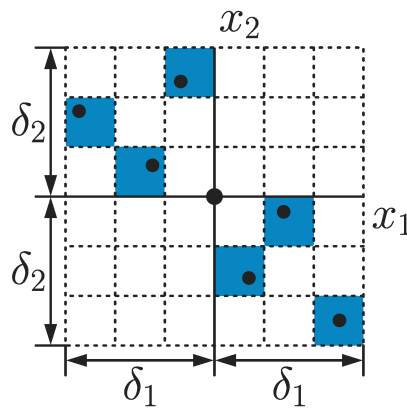
A abordagem de otimização robusta possui diferentes formas na literatura. Lee e Park (2001) reformulam o problema de otimização utilizando cálculo diferencial considerando as incertezas das variáveis de projeto, Jung e Lee (2002) caracterizam a função objetivo como um problema estatístico levando em conta as probabilidades do processo de projeto e Ren, Pham e Koh (2012) apresentam o método do pior caso onde é considerado apenas o pior valor da função objetivo dentro do espaço de incertezas e também outro método aplicável em funções objetivo diferenciáveis.

Branke (2000) realizou um estudo da quantificação da robustez destacando que uma boa amostragem consegue influenciar bastante nos resultados da otimização robusta. Em contrapartida, uma amostragem elevada pode comprometer o desempenho da otimização, pois cada amostra corresponde a uma avaliação da função objetivo. Pela literatura, é comum encontrar métodos que tentam reduzir a amostragem dentro do espaço de incertezas, como por exemplo a avaliação dos vértices, do centro das arestas, amostragem aleatória

distribuída etc.

Como exemplo de método para obter distribuição aleatória do espaço de incertezas com um número reduzido de avaliações de função, existe o hipercubo latino (DEB; GUPTA, 2006). Neste método, o espaço de amostragem de cada variável é dividido em n segmentos (a mesma quantidade de amostras) iguais no domínio $[-\delta_i, +\delta_i]$, que por sua vez criam uma malha com k dimensões e n^k hipercubos. A partir desta divisão, são tomadas n amostras de forma que todos os segmentos em cada dimensão sejam representados. A Figura 9 exemplifica o método de amostragem em um espaço com 2 variáveis.

Figura 9 – Exemplo de amostragem pelo método do Hipercubo Latino



Fonte: Adaptado de Deb e Gupta (2006).

Conforme explicado por (DEB; GUPTA, 2006), a cada iteração do algoritmo de otimização é criado um novo padrão de amostragem de acordo com o método do hipercubo latino, a fim de adicionar aleatoriedade à amostragem.

Uma das formas de avaliar a robustez a partir da amostragem do espaço de incertezas é a quantificação da robustez (DEB; GUPTA, 2006). Como o conceito de robustez significa insensibilidade à variação, o uso de medidas de dispersão são convenientes para quantificar a robustez. O desvio padrão, por exemplo, é uma medida de dispersão em torno da média de um conjunto de amostras que possui valor mínimo igual a 0 (quando todos os valores analisados são iguais).

O desvio padrão é calculado tomando n amostras da função objetivo y que estão dentro do espaço de incertezas de cada variável x_i . A Equação 3.2.3 apresenta o cálculo do desvio padrão, onde \bar{y} representa o valor médio das amostras (MONTGOMERY; RUNGER, 2012).

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (3.2.3)$$

Assim, quanto menor o valor de σ , mais robusto é o indivíduo avaliado. Uma boa quantificação da robustez é alcançada com uma quantidade suficiente de amostras de acordo com o comportamento da função objetivo.

3.2.4 Algoritmos genéticos

Os algoritmos genéticos foram inicialmente desenvolvidos pelo cientista John Holland e seus alunos na Universidade de Michigan com o objetivo de criar programas de computador que fazem uso de mecanismos existentes na seleção natural dos seres vivos (GOLDBERG, 1989). Para se diferenciar dos métodos de otimização determinísticos, os algoritmos genéticos utilizam uma população de soluções e simulam o processo evolutivo desta população a fim de direcioná-la à uma ou mais soluções ótimas estimadas. Por utilizar fatores aleatórios, os algoritmos genéticos são classificados como métodos estocásticos podendo assim obter diferentes resultados a cada execução do algoritmo (DEB, 2001).

Os algoritmos genéticos utilizam os seguintes elementos (RAO, 2009):

- a) Indivíduo: Solução candidata representada pelas variáveis de projeto do problema de otimização;
- b) Função *fitness* (aptidão): Avaliação da função objetivo do indivíduo, representando o valor adaptativo dele no processo de seleção natural que determina a capacidade de sobrevivência e reprodução do indivíduo;
- c) População: Conjunto de indivíduos em que é realizado o procedimento evolutivo;
- d) Operadores de seleção: Funções destinadas a selecionar indivíduos na população para a criação de novos indivíduos;
- e) Operadores de variação: Funções destinadas a alterar as características dos indivíduos, onde os mais comuns são representados pelo cruzamento onde as características de diferentes indivíduos são utilizadas para criar novos indivíduos e a mutação onde as características de um indivíduo é alterada para criar um novo indivíduo;
- f) Geração: Representa uma iteração do algoritmo englobando o ciclo de seleção, variação e avaliação da população resultante.

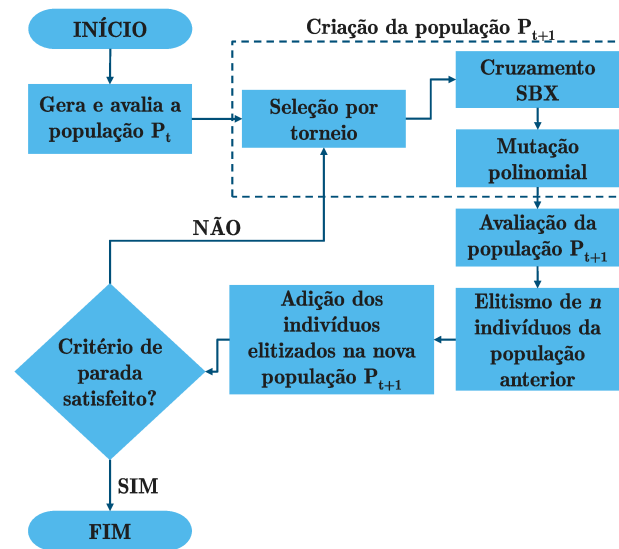
As etapas dos algoritmos genéticos se assemelham ao processo evolutivo da seguinte forma: inicialmente é criada uma população inicial aleatória, onde todos os indivíduos possuem variáveis de projeto diferentes dentre si. Esta população é avaliada com uma função de custo, que serve como parâmetro de avaliação. Operadores de seleção e variação são aplicados na população inicial, gerando uma população nova. A nova população é avaliada, e é feito um processo de elitismo, onde os melhores indivíduos da população original e da resultante dos processos de seleção e variação são preservados. Com exceção

da avaliação da população inicial, este processo descrito anteriormente corresponde à uma geração do algoritmo genético, que pode ter como critério de parada um número fixo de gerações ou outros de acordo com a necessidade e viabilidade do projeto.

3.2.4.1 Algoritmo de otimização mono-objetivo

O uso dos algoritmos genéticos na otimização mono-objetivo é apresentado na sua forma mais convencional no fluxograma da Figura 10:

Figura 10 – Fluxograma do algoritmo de otimização mono-objetivo



Fonte: Elaborado pelo autor.

Neste fluxograma, a seleção por torneio consiste em sempre priorizar o indivíduo que possui melhor valor da função objetivo, enquanto que o cruzamento SBX (*Simulated Binary Crossover*) (DEB; AGRAWAL, 1995) e a mutação polinomial (DEB, 2001) são métodos para criação de novos indivíduos onde suas variáveis de projeto são contínuas. Neste fluxograma, o critério de parada pode ser, por exemplo, o número de gerações ou então a obtenção do valor desejado da função objetivo (DEB, 2001).

3.2.4.2 Algoritmo de otimização multiobjetivo

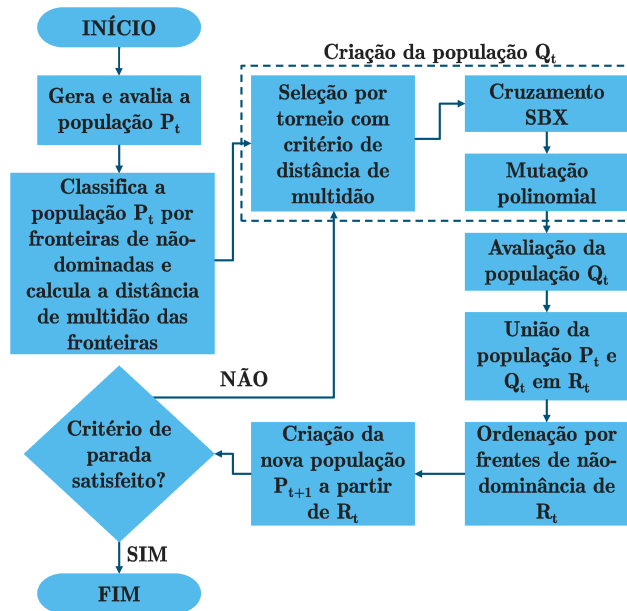
Ao tratar de otimização com mais de um objetivo, é necessária uma abordagem diferente da apresentada no algoritmo mono-objetivo devido ao espaço multidimensional das funções objetivo, como foi apresentado na subseção 3.2.2. Dentre os algoritmos de otimização multiobjetivo está o NSGA-II (Non Dominating Sorting Algorithm II), proposto originalmente por Deb et al. (2002).

Comparado ao algoritmo genético convencional, o NSGA-II implementa o elitismo pela ordenação por fronteiras não-dominadas através do algoritmo FNDS (Fast Non-dominated Sorting). Em conjunto com a ordenação pelas fronteiras não-dominadas, o

NSGA-II implementa o conceito de distância de multidão das soluções que corresponde a uma estimativa da densidade de indivíduos em torno de um indivíduo, desta forma serão menos priorizados aqueles que estão próximos entre si, mantendo a diversidade da população.

O algoritmo NSGA-II é apresentado no seguinte fluxograma:

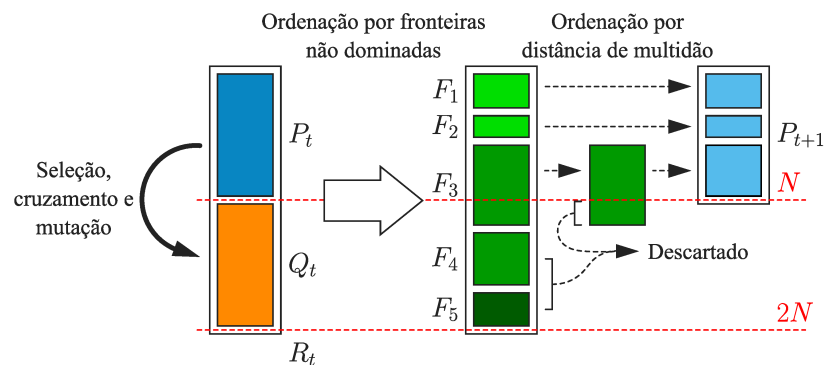
Figura 11 – Fluxograma do algoritmo de otimização NSGA-II



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 12 descreve com mais detalhes as populações criadas no procedimento do NSGA-II, onde a partir de uma população P_t é gerada a população Q_t pelos processos de seleção e variação.

Figura 12 – Diagrama esquemático do procedimento do NSGA-II



Fonte: Deb et al. (2002).

A população P_t e Q_t formam a população R_t , que irá ser ordenada pelo algoritmo FNDS. Após a ordenação, as fronteiras não dominadas são inseridas em uma nova população

P_{t+1} até completar ou exceder o número de soluções da população original P_t . Caso o número de indivíduos inseridos seja excedido, a última fronteira adicionada é ordenada a partir do critério de distância de multidão, a fim de priorizar a diversidade da fronteira. A partir deste critério, são adicionados apenas as soluções que possuem maior distância de multidão até a população P_{t+1} estar completa.

4 MÉTODO PROPOSTO

Como foi apresentado nos capítulos anteriores, a otimização robusta possui métodos que podem ser utilizados para o tratamento de incertezas que existem em projetos. Das diversas abordagens utilizadas na otimização robusta de antenas impressas grande parte das incertezas estavam relacionadas à geometria, onde por exemplo, o processo de fabricação não é capaz de replicar a geometria exata determinada no projeto. Também foi apresentado que o substrato da antena impressa possui uma grande influência no projeto, fazendo com que suas características elétricas sejam parâmetros determinantes no projeto. Materiais de baixo custo, como o FR-4 também possuem incertezas que convém serem tratadas por métodos de otimização robusta.

Diferente da geometria da antena, as características elétricas do substrato correspondem a parâmetros que não podem ser alterados pelo projetista pois são inerentes ao material. Por esta razão é conveniente que o critério de robustez seja obtido através de uma análise estatística do espaço de incertezas que contém a geometria e o material a fim de avaliar a sensibilidade dos parâmetros de desempenho das antenas perante as perturbações das variáveis de projeto.

Neste capítulo será apresentada a abordagem de otimização robusta em antenas impressas implementada, utilizando a quantificação da sensibilidade às incertezas como um objetivo, podendo assim serem consideradas as características elétricas do substrato dentro da otimização.

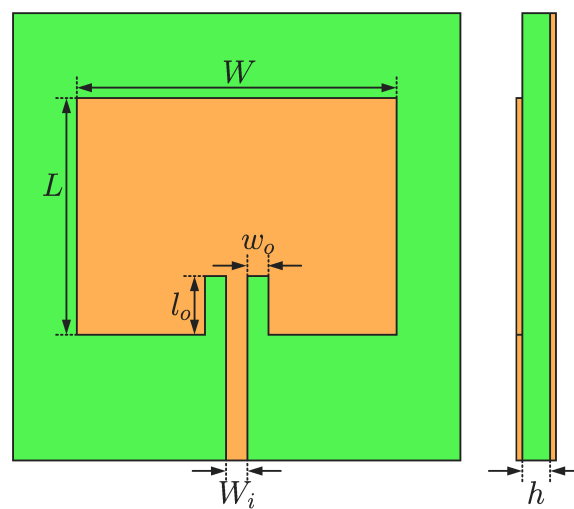
4.1 Antenas impressas selecionadas para a otimização robusta

Para esta dissertação, serão analisados dois tipos de antenas impressas. A primeira antena possui polarização linear e foi selecionada devido à sua geometria simples e para servir de referência de como as incertezas das variáveis de projeto podem influenciar em seu desempenho. A segunda antena possui polarização circular e foi selecionada pela geometria ser mais complexa que a primeira e também pelos autores que a propuseram afirmarem que o modelo é menos sensível à incertezas de fabricação para possuir polarização circular (CHEN; WU; WONG, 2001). As seções a seguir descrevem o projeto dessas antenas de forma a definir os limites e características de projeto que serão utilizadas nos algoritmos de otimização.

4.1.1 Antena impressa retangular

Conforme Garg et al. (2001), a antena impressa retangular é a mais simples de se projetar e mesmo assim podem ser utilizadas em diversas aplicações, onde características como banda larga e polarização circular podem ser obtidas com modificações que partem desta geometria. A Figura 13 apresenta um modelo da antena impressa retangular, modelada em um substrato de altura h com laminado de cobre nos dois lados onde o elemento retangular possui dimensões $W \times L$, a alimentação é feita por uma linha de transmissão de largura W_i que possui uma reentrância de dimensões $w_o \times l_o$.

Figura 13 – Antena impressa retangular



Fonte: Elaborado pelo autor.

A forma mais convencional de projetar esta antena parte do modelo de linha de transmissão, onde o elemento radiador é dimensionado a partir da frequência de ressonância desejada e das características do substrato da antena (BALANIS, 2016).

A reentrância da linha de alimentação da antena serve para aumentar os graus de liberdade para o controle da impedância. Sem ela, a única forma seria pelas dimensões W e L . A impedância do elemento radiador deve estar casada com a linha de transmissão, que por sua vez deve estar casada com o método de alimentação da linha que pode ser por exemplo um conector coaxial.

Deve-se destacar que a linha de alimentação e a antena possuem objetivos conflitantes. Enquanto a linha deve manter as ondas eletromagnéticas presas à ela, a antena deve irradiar estas ondas (STUTZMAN; THIELE, 2013).

4.1.2 Antena impressa de polarização circular

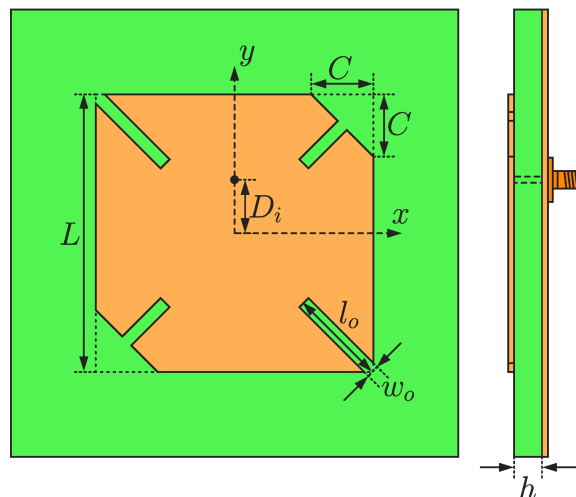
A fim de utilizar o algoritmo para mais objetivos, foi selecionada uma antena de geometria mais complexa que possui como característica a polarização circular, onde além

do ganho será otimizada a razão axial da mesma.

O método mais comum de criar esta antena é através da adição de chanfros em um elemento de radiação quadrado, conforme proposto por Sharma e Gupta (1983). Estes chanfros concedem à antena um melhor valor de razão axial para um bom desempenho da polarização circular, porém esta razão axial possui uma banda estreita. A fim de melhorar a largura de banda da razão axial, Wong e Wu (1997) propõem um modelo onde ao invés de chanfros são inseridas fendas no elemento radiador da antena. Neste modelo, além de melhorar a largura de banda da razão axial, a antena pode ser mais compacta do que o modelo de polarização circular com chanfros.

A partir dos dois modelos de antena de polarização circular apresentados, Chen, Wu e Wong (2001) propõem um modelo onde são adicionados fendas e chanfros, como mostrados na Figura 14. Nesta figura, a antena está modelada em um substrato de altura h com laminado de cobre nos dois lados onde o elemento de radiação possui dimensões $L \times L$, a alimentação é feita por um conector coaxial posicionado à distância de D_i do centro da antena. Neste caso, a antena possui polarização circular RHCP, e para a polarização LHCP a posição do conector deveria estar rotacionada de 90° do centro da antena. As fendas nos cantos da antena possuem as dimensões $w_o \times l_o$ e os chanfros possuem uma largura de dimensão C .

Figura 14 – Antena impressa de polarização circular com fendas e chanfros



Fonte: Adaptado de Chen, Wu e Wong (2001).

Por ter esta geometria, este modelo de antena pode ser mais compacta e ao mesmo tempo possui uma largura de banda da razão axial maior comparada aos modelos apresentados anteriormente. Em uma análise deste modelo no HFSS[®], foi notado que a adição das fendas e chanfros conseguem melhorar a razão axial significativamente, onde os chanfros influenciam mais do que as fendas.

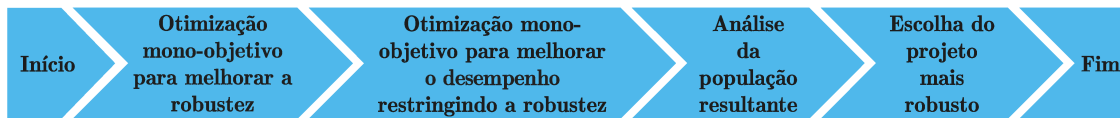
4.2 Abordagem de otimização

Para a otimização robusta das antenas impressas serão aplicados dois métodos: mono-objetivo e multiobjetivo.

4.2.1 Otimização mono-objetivo

A abordagem mono-objetivo será aplicada na antena impressa retangular em duas etapas conforme o fluxograma a seguir:

Figura 15 – Fluxograma da abordagem de otimização mono-objetivo



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na primeira etapa, a otimização é feita para melhorar ao máximo a robustez do ganho realizado da antena, resultando em uma população robusta. O problema mono-objetivo da primeira etapa possui a seguinte formulação:

$$\begin{aligned} \text{Minimize } & \sigma(G_R(\mathbf{x}, \mathbf{u})); \\ & x_i^{(inferior)} \leq x_i \leq x_i^{(superior)}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \end{aligned} \quad (4.2.1)$$

Nesta formulação, o ganho realizado é obtido na direção de máxima radiação da antena impressa retangular ($\theta = 0^\circ$ e $\phi = 0^\circ$ no sistema de coordenadas esféricas), e σ representa a quantificação da sensibilidade do ganho realizado a partir do espaço de incertezas \mathbf{u} em torno das variáveis de projeto \mathbf{x} .

Na segunda etapa, a população robusta obtida na etapa anterior é inserida como população inicial de outra otimização, desta vez com o objetivo de encontrar o melhor ganho realizado considerando a quantificação da sensibilidade como restrição. Este tipo de otimização é baseado na metodologia implementada em (DEB; GUPTA, 2006), onde a função objetivo possui como restrição a quantificação da sensibilidade. Conforme Deb e Gupta (2006), a vantagem deste método é ter um maior controle da sensibilidade desejada no projeto.

$$\begin{aligned} \text{Maximize } & G_R(\mathbf{x}); \\ \text{sujeito a } & \sigma(G_R(\mathbf{x}, \mathbf{u})) \leq C; \\ & x_i^{(inferior)} \leq x_i \leq x_i^{(superior)}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \end{aligned} \quad (4.2.2)$$

Nesta formulação, C é um valor constante pré-definido pelo tomador de decisão a fim de definir o critério de robustez desejada no projeto. A primeira etapa é necessária

para definir o valor de C , pois ela é uma das formas de conhecer o comportamento da sensibilidade da antena.

Na implementação deste algoritmo, o elitismo tem um papel importante pois não serão apenas as soluções que possuem melhor valor da função objetivo, mas sim aquelas que possuem o melhor valor da função objetivo e não violam (ou violam menos levando em conta as primeiras gerações que podem ter uma quantificação da sensibilidade insatisfatória) a restrição do problema.

Como a função $\sigma(G_R(\mathbf{x}, \mathbf{u}))$ é considerada uma restrição na formulação da otimização mono-objetivo, ela será tratada no processo de seleção para a variação conforme é apresentado em (DEB, 1999), onde quando duas soluções são selecionadas para o processo de variação são considerados os seguintes critérios de prioridade:

- a) Uma solução factível é preferida a uma infactível;
- b) Entre duas soluções factíveis, a que possui melhor avaliação da função objetivo é preferida;
- c) Entre duas soluções infactíveis, a que viola menos a restrição é preferida.

Desta forma, a manipulação da restrição evita o uso do método de penalidades, já que a princípio não se sabe a ordem de grandeza e o comportamento da quantificação da sensibilidade das antenas utilizadas nesta dissertação.

4.2.2 Otimização multiobjetivo

A abordagem multiobjetivo será aplicada nas duas antenas, onde na antena impressa retangular será para obter um bom desempenho no ganho realizado e na antena impressa de polarização circular será para obter um bom desempenho tanto no ganho realizado quanto na razão axial. Esta abordagem está apresentada no fluxograma a seguir:

Figura 16 – Fluxograma da abordagem de otimização multiobjetivo



Fonte: Elaborado pelo autor.

A metodologia multiobjetivo que será utilizada nesta dissertação é baseada na proposta de Jin e Sendhoff (2003), onde um ou mais objetivos correspondem a um parâmetro de desempenho a ser otimizado e um ou mais objetivos correspondem à quantificação da sensibilidade dos primeiros objetivos. A principal diferença é que o método de amostragem no algoritmo proposto é feito dentro do espaço de incertezas de cada indivíduo da população,

já que a população utilizada é muito menor do que a proposta no artigo proposto por eles onde a quantificação da sensibilidade é feita considerando toda a população.

Para a antena impressa retangular o problema multiobjetivo é caracterizado pela seguinte formulação para otimizar o ganho realizado:

$$\begin{aligned} & \text{Maximize } G_R(\mathbf{x}); \\ & \text{Minimize } \sigma(G_R(\mathbf{x}, \mathbf{u})); \\ & \text{sujeito a } x_i^{(inferior)} \leq x_i \leq x_i^{(superior)}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \end{aligned} \quad (4.2.3)$$

Já para a antena impressa de polarização circular, será considerada também a razão axial na direção de máxima radiação da antena ($\theta = 0^\circ$ e $\phi = 0^\circ$ no sistema de coordenadas esféricas) e a robustez total será dada pela soma da quantificação da sensibilidade do ganho realizado e da razão axial. A otimização desta antena é caracterizada pela seguinte formulação:

$$\begin{aligned} & \text{Maximize } G_R(\mathbf{x}); \\ & \text{Minimize } RA(\mathbf{x}); \\ & \text{Minimize } \sigma(G_R(\mathbf{x}, \mathbf{u})) + \sigma(RA(\mathbf{x}, \mathbf{u})); \\ & \text{sujeito a } x_i^{(inferior)} \leq x_i \leq x_i^{(superior)}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \end{aligned} \quad (4.2.4)$$

4.2.3 Avaliação dos parâmetros de desempenho das antenas

Em ambos os métodos de otimização, os parâmetros de desempenho serão obtidos a partir da modelagem eletromagnética das antenas no software HFSS[®] da desenvolvedora Ansys que utiliza o método dos elementos finitos para resolver problemas de eletromagnetismo (HFSS, 2015).

O HFSS[®] funcionará em conjunto com o MATLAB[®] (*Matrix Laboratory*) (MATLAB, 2018) através de scripts em Visual Basic que são capazes de realizar a interface entre os dois programas em um sistema operacional Microsoft Windows[®] 10. O MATLAB[®] irá executar a rotina de otimização e para obter os dados de simulação do HFSS[®] irá criar scripts na linguagem de programação Visual Basic onde a execução deles irá realizar comandos automáticos no HFSS[®] a fim de alterar valores de variáveis de projeto, executar a simulação e exportar os dados de forma que possam ser reconhecidos pelo MATLAB[®].

Os modelos das antenas serão feitos considerando as superfícies condutoras como condutores elétricos perfeitos e o substrato com características dielétricas uniformes. A antena estará dentro de uma caixa cujo interior será considerado como vácuo e suas faces terão suas faces consideradas como absorvedoras. Para isto, recomenda-se que as

caixas estejam pelo menos a uma distância de $\lambda/4$ da estrutura da antena, onde λ é o comprimento de onda da frequência de ressonância da antena.

4.2.4 Análise das soluções

Os dois fluxogramas apresentados nas Figuras 15 e 16 contém uma etapa de análise da população final obtida no processo de otimização. Nesta etapa, os parâmetros de desempenho das soluções serão analisados em cada variável de projeto dentro do seu espaço de incertezas de forma a visualizar seu comportamento.

A análise é feita da seguinte forma:

- a) É selecionada uma das variáveis de projeto, podendo ser a geometria da antena ou material do substrato;
- b) Dentro do espaço de incertezas, são feitas avaliações de um dos parâmetros de desempenho da antena, mantendo as demais variáveis de projeto constantes;
- c) O resultado é apresentado na forma de tabela ou gráfico, destacando a diferença entre o valor máximo e mínimo do parâmetro de desempenho naquela variável.

A necessidade desta análise também parte da quantificação da sensibilidade, onde para uma amostragem aleatória em um dado ponto de avaliação da função objetivo pode-se obter diferentes valores nesta quantificação que podem levar ao projetista escolher um projeto com uma boa quantificação numérica da robustez, mas com um desempenho que pode se diferenciar do esperado.

Para comparar como os algoritmos se desempenham em obter projetos mais robustos, será feita também uma análise de Monte Carlo para comparar a sensibilidade das soluções da última geração. Esta análise consiste em fazer uma amostragem aleatória de um número elevado de possíveis projetos de antenas dentro do espaço de incertezas e obter a avaliação dos parâmetros de desempenho, permitindo assim avaliar a sensibilidade do projeto causada pelas suas incertezas (GENTLE, 2006).

4.3 Configuração das medições

Para a validação do algoritmo de otimização, as antenas serão fabricadas em uma prototipadora de circuitos impressos. As antenas fabricadas serão então medidas com os equipamentos disponibilizados pela universidade, e os valores medidos serão comparados com os obtidos em simulação do programa HFSS®.

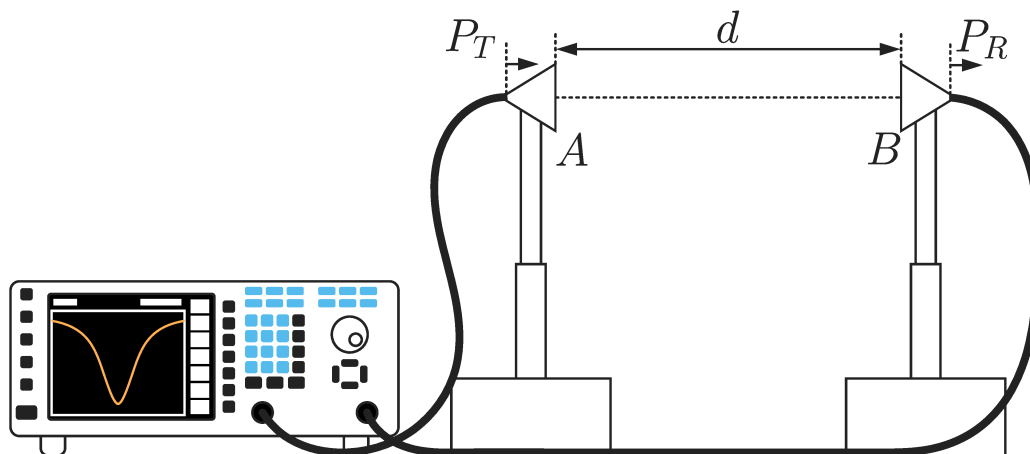
4.3.1 Caracterização da antena

Como as características do substrato influenciam na frequência de operação da antena, será utilizado um analisador de redes para medir o coeficiente de reflexão $|S_{11}|$. O analisador será calibrado de forma que a referência de medição seja o conector do cabo onde a antena será conectada enquanto que na simulação o valor das características elétricas do substrato serão alterados até que as curvas dos valores medidos e simulados fiquem próximas.

4.3.2 Medição do ganho realizado

A medição do ganho realizado será feita conforme a norma IEEE (2008), em uma configuração apresentada na Figura 17.

Figura 17 – Configuração da montagem para medição do ganho realizado das antenas



Fonte: Elaborado pelo autor.

Esta medição é feita na câmara semi anecoica instalada nas dependências da UFMG, utilizando para as medições o analisador de redes que é capaz de medir parâmetros de rede como impedância, reflexão e transmissão de sinais de alta frequência. Nesta configuração, as entradas do analisador de redes estão calibradas na ponta dos cabos, de forma a obter os parâmetros relativos às antenas conectadas neles. Neste trabalho, a distância d será de 50 centímetros nas medições.

Conforme a norma, as antenas a serem medidas devem possuir mesma polarização e estar em visada direta e em uma distância fixa d . A medição parte da fórmula de Friis, onde a partir de um enlace entre duas antenas, como apresentado na Figura 17. A relação entre a potência transmitida P_T e a potência recebida P_R é dada pela seguinte equação:

$$\frac{P_R}{P_T} = G_{R(A)}G_{R(B)} \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (4.3.1)$$

Considerando que as antenas A e B são idênticas, e passando a Equação 4.3.2 para decibéis, obtém-se a seguinte equação:

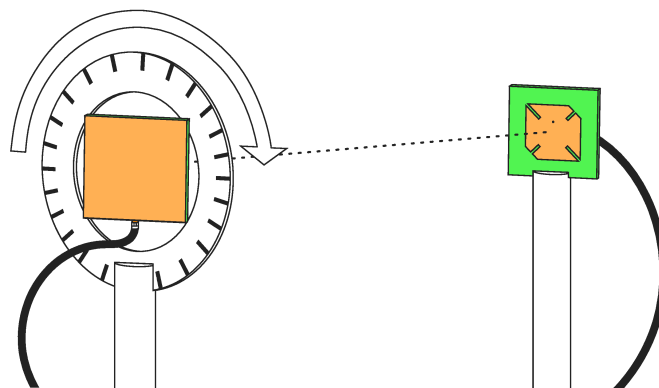
$$(G_{R(A)})_{dB} = (G_{R(B)})_{dB} = \frac{1}{2} \left[20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) - 10 \log_{10} \left(\frac{P_T}{P_R} \right) \right] \quad (4.3.2)$$

Na Equação 4.3.2, a razão entre potência transmitida P_T e a potência recebida P_R pode ser então obtida através da medição do parâmetro S_{12} que também representa esta razão, onde este parâmetro é obtido pelo analisador de redes. Também nesta equação, pelo fato do parâmetro S_{12} já levar em consideração os descasamentos de alimentação, o ganho obtido por este método já é o ganho realizado.

4.3.3 Medição da razão axial

A medição da razão axial será feita na mesma configuração que a medição do ganho, porém uma das antenas terá polarização linear e a outra será a antenna onde a razão axial será avaliada. Nesta medição, a antena de polarização linear será rotacionada em torno de seu centro, a fim de tomar diversas medições do parâmetro S_{12} . A Figura 18 apresenta esta configuração, onde a antena de polarização linear está fixada em um transferidor para auxiliar na rotação da antena.

Figura 18 – Configuração da montagem para medição da razão axial das antenas de polarização circular



Fonte: Elaborado pelo autor.

Esta revolução de 360° é necessária pois não há como saber com certeza a posição das componentes ortogonais da antena de polarização circular em relação à antena de polarização linear. Desta forma, a razão axial será obtida a partir da seguinte equação:

$$RA = \frac{|S_{12}|^{\max}}{|S_{12}|^{\min}} \quad (4.3.3)$$

onde $|\mathbf{S}_{12}|$ corresponde a um vetor contendo todas as medições obtidas no experimento.

Assim, a Equação 4.3.3 determina a razão axial a partir da razão entre o maior e menor $|S_{12}|$ em toda revolução de 360° da antena de polarização linear, de forma que quanto melhor a discretização desta revolução, melhor será a medição da razão axial.

5 EXPERIMENTOS E RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados o processo de otimização e seus resultados, assim como as medidas realizadas conforme apresentado no capítulo anterior. A otimização das antenas será feita utilizando o HFSS[®] versão 2019, instalado em um servidor que possui memória RAM de 128GB DDR4 e dois processadores Intel[®] Xeon[®] OCTA Core modelo E5-2640v3 com 6,8GHz de velocidade. As antenas serão confeccionadas na prototipadora de placas de circuitos impressos PCB-Proto 2 da fabricante brasileira TTP Indústria Mecânica(TTP, 2017), e as medições serão feitas na câmara semi-anecoica da UFMG utilizando as configurações apresentadas no capítulo anterior com o analisador de redes modelo ZVL do fabricante Rohde & Schwarz.

Como as antenas propostas nesta dissertação possuem características de banda estreita, os experimentos serão feitos para a faixa de frequência do Wi-fi compreendida na faixa entre 2,4GHz e 2,5GHz (IEEE, 2016).

O processo de otimização das antenas segue os fluxogramas das Figuras 15 e 16. Em ambos os métodos de otimização a parametrização dos algoritmos utilizados foi feita da mesma forma, com exceção do número de indivíduos selecionados para o elitismo, que só foi aplicado no método mono-objetivo. A Tabela 1 apresenta os parâmetros utilizados que foram obtidos a partir de testes feitos com os algoritmos a fim de observar qual configuração oferecia uma boa convergência e um custo computacional satisfatório.

Tabela 1 – Parâmetros dos algoritmos de otimização

Parâmetros do algoritmo genético	Valor
Número de gerações	30
Número de indivíduos	15
Número de indivíduos elitizados	2
Probabilidade de Cruzamento	0,9
Índice de distribuição do cruzamento SBX	2
Probabilidade de Mutação	0,2
Índice de distribuição da mutação polinomial	2
Número de amostras para a quantificação da robustez	15

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.1 Antena impressa retangular

Para a otimização da antena impressa retangular, os limites de geometria foram definidos a partir do projeto baseado na linha de transmissão apresentado em Balanis (2016).

O projeto inicial parte de uma antena para a frequência de $2.45GHz$, com a geometria limitada pelos valores apresentados na Tabela 2 a fim de oferecer um espaço de busca para o algoritmo de otimização. Quanto ao material do substrato, os valores em que a antena será avaliada são de 4,4 para ϵ_r e 0,02 para $\tan \delta$.

Tabela 2 – Limites e incertezas da antena impressa retangular na otimização

Variável de Projeto	Descrição	Valor mínimo (mm)	Valor Máximo (mm)	Incerteza (mm)
W	Largura do elemento radiador	35	40	$\pm 0,05$
L	Comprimento do elemento radiador	26	31	$\pm 0,05$
w_o	Largura da reentrância	1	3	$\pm 0,05$
l_o	Comprimento da reentrância	5	8	$\pm 0,05$
W_i	Largura da linha de alimentação	2	4	$\pm 0,05$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na etapa de quantificação da sensibilidade, será considerado $\pm 0,05$ de incerteza para os valores de geometria, levando em conta a precisão da prototipadora a ser utilizada. Já para o material, ϵ_r serão variados na faixa de 4,16 – 4,75, e os valores de $\tan \delta$ irão variar na faixa de 0,017 – 0,027 conforme tabela apresentada em (OLIVEIRA et al., 2016). Apesar das incertezas do material serem muito mais significativas do que as da geometria, as incertezas da geometria também foram levadas em consideração devido à influência que as mesmas possuem sobre o comportamento da antena, principalmente na frequência de operação da mesma.

5.1.1 Abordagem de otimização

Para a otimização da antena impressa retangular foram realizados dois métodos de otimização. A seguir estão descritos os métodos e seus resultados.

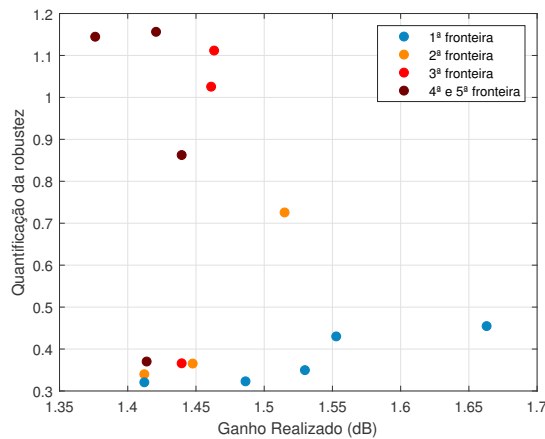
5.1.1.1 Mono-objetivo

A abordagem mono-objetivo foi feita em duas etapas, com a parametrização feita conforme a Tabela 1. Na primeira etapa, a otimização é feita para minimizar ao máximo a quantificação da sensibilidade da antena (Equação 4.2.1), resultando em uma população robusta. Nesta etapa, a população resultante obteve soluções com ganho realizado médio de $1,5dB$ e quantificação da sensibilidade média de 0,56 onde a melhor solução possuía um ganho de $1,4dB$ e quantificação da sensibilidade de 0,30.

A partir da população obtida na primeira etapa, uma nova otimização foi executada tendo ela como população inicial, desta vez com o objetivo de encontrar o melhor ganho realizado e uma restrição onde a quantificação da sensibilidade deve ser igual ou menor do que 0,5, de forma a não deixar o espaço de buscas da otimização muito restrito (Equação 4.2.2).

A Figura 19 apresenta um gráfico da população resultante classificada por fronteiras não-dominadas de forma a comparar com os resultados obtidos na metodologia multiobjetivo. Observa-se que como a otimização mono-objetivo não é focada em melhorar as fronteiras de não dominância, a última geração possui diversas fronteiras encontradas.

Figura 19 – Fronteiras de não dominância resultantes da otimização mono-objetivo de duas etapas



Fonte: Resultados da otimização.

A abordagem mono-objetivo não se mostrou viável por não oferecer diversidade no resultado final uma vez que a segunda etapa parte de uma população pouco diversificada resultante da primeira etapa e também por possuir um alto custo computacional uma vez que necessita de executar dois processos de otimização.

5.1.1.2 Multiobjetivo

Para a antena impressa retangular, a abordagem multiobjetivo foi implementada considerando dois objetivos: o primeiro correspondendo ao ganho realizado e o segundo correspondendo à quantificação da sensibilidade conforme apresentado na Equação 4.2.3.

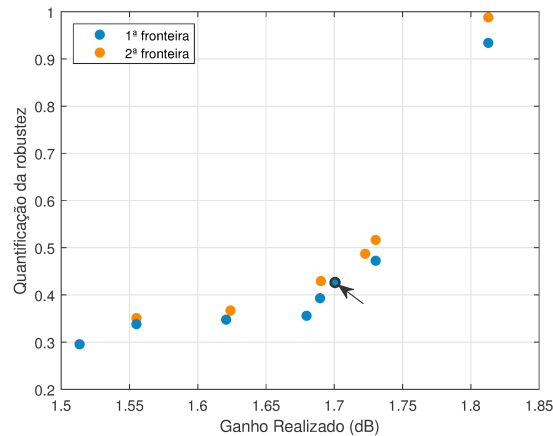
A Figura 20 apresenta o resultado da otimização classificado por fronteiras não dominadas. Observa-se que ao contrário da metodologia mono-objetivo implementada, o algoritmo NSGA-II apresenta resultados mais diversificados e com menos fronteiras não dominadas, conforme a proposta de Deb (2001).

Pelo gráfico apresentado fica evidente que há um conflito entre os objetivos: uma antena com um ganho realizado alto compromete sensibilidade deste ganho provocada pelas incertezas existentes no material e na geometria.

5.1.2 Análise dos resultados

A metodologia mono-objetivo foi feita com 30 gerações em cada etapa de otimização e a multiobjetivo foi feita 30 gerações. Cada indivíduo foi avaliado 16 vezes (1 para a

Figura 20 – Fronteiras de não dominância resultantes da otimização multiobjetivo



Fonte: Resultados da otimização.

avaliação da função objetivo e 15 para a amostragem da quantificação da sensibilidade no espaço de incertezas). Em média, cada chamada do HFSS[®] para a avaliação da antena durou 1 minuto e 40 segundos. A Tabela 3 apresenta um resumo do desempenho computacional destes algoritmos de otimização robusta executados no servidor disponibilizado pela universidade.

Tabela 3 – Desempenho computacional dos algoritmos de otimização robusta para a antena retangular

Metodologia	Número de chamadas	Tempo de execução
Mono-objetivo	14400	16 Dias e 16 horas
Multiobjetivo	7200	8 Dias e 8 horas

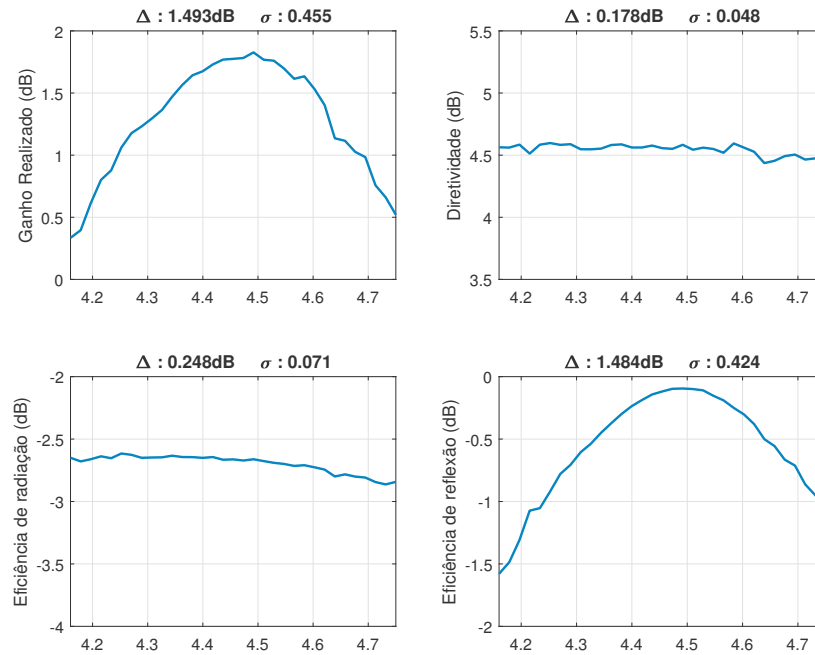
Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir dos resultados obtidos nas duas metodologias, as soluções foram analisadas com 33 amostras para cada variável conforme a análise apresentada na subseção 4.2.4.

Dentre as soluções obtidas nas duas metodologias, foi escolhida a que está destacada com uma seta na Figura 20 da metodologia multiobjetivo, uma vez que a metodologia monoobjetivo não obteve resultados satisfatórios. A solução foi selecionada por ser menos sensível que as outras e também por possuir um bom desempenho para o ganho realizado.

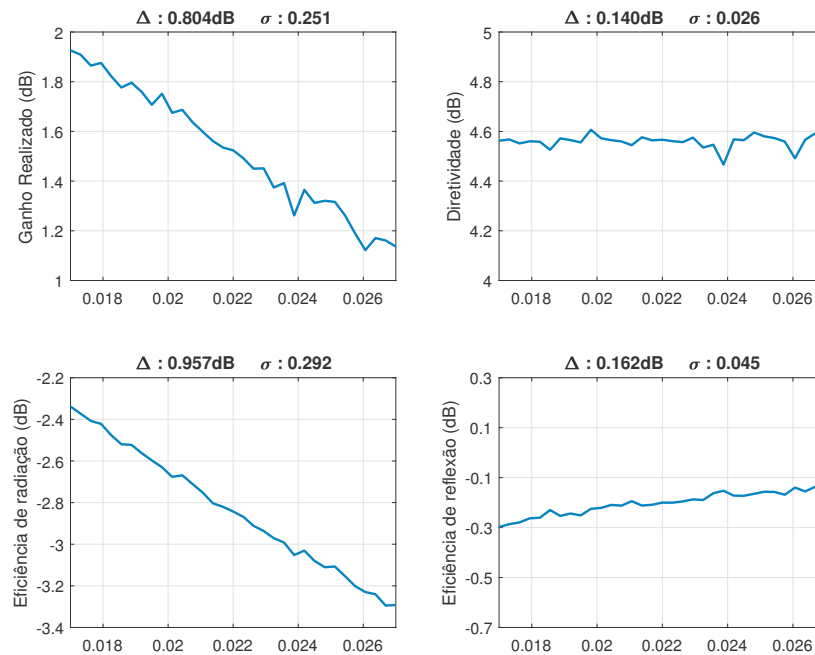
As Figuras 21 e 22 apresentam como o ganho realizado (e as grandezas que são diretamente proporcionais a ele) da antena selecionada se comportam na variação das características elétricas do substrato. Nos gráficos, Δ representa a diferença entre os valores máximo e mínimo obtidos, enquanto que σ representa o desvio padrão de todas as amostras obtidas.

Figura 21 – Análise da variação do ganho realizado da antena impressa retangular selecionada em função da incerteza na permissividade relativa do substrato FR-4



Fonte: Resultados de simulações.

Figura 22 – Análise da variação do ganho realizado da antena impressa retangular selecionada em função da incerteza na tangente de perdas do substrato FR-4



Fonte: Resultados de simulações.

Pelos gráficos apresentados, levando em consideração a Equação 3.1.5, observa-se

que a eficiência de reflexão é a que mais influencia no ganho realizado da antena devido à variação da permissividade relativa do substrato, influenciando bastante no casamento de impedâncias entre a antena e o alimentador. Já a eficiência de radiação é a que mais influencia no ganho realizado da antena devido à variação da tangente de perdas, mostrando que esta está bem relacionada com as perdas internas da antena.

Como a variação do ganho realizado em função da geometria é menos significativa, os demais valores são apresentados na Tabela 4.

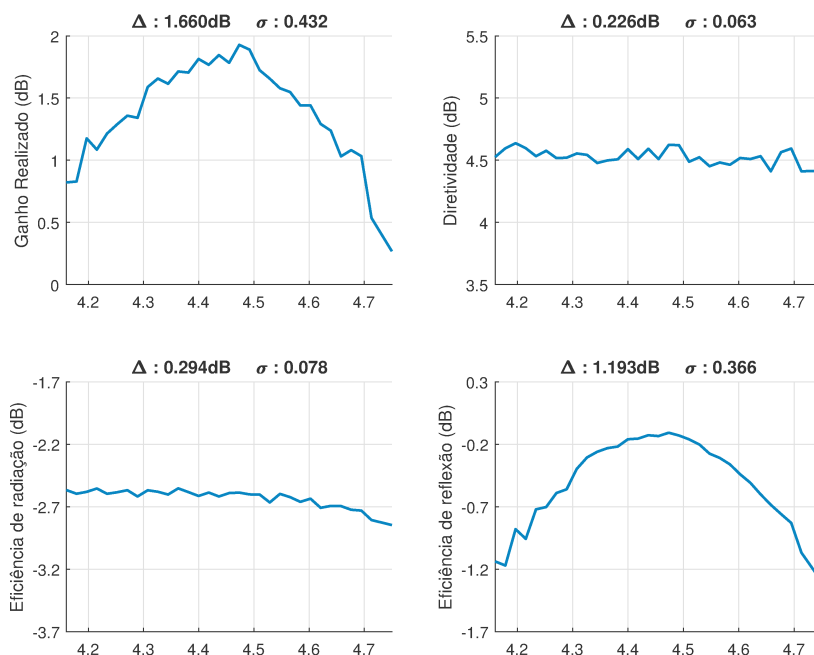
Tabela 4 – Análise da variação do ganho realizado da antena impressa retangular selecionada em função da incerteza na precisão geométrica da prototipadora

Variáveis de Projeto	Ganho Realizado			Diretividade			Eficiência de radiação			Eficiência de reflexão		
	Med (dB)	Δ (dB)	σ	Med (dB)	Δ (dB)	σ	Med (dB)	Δ (dB)	σ	Med (dB)	Δ (dB)	σ
W	1,700	0,063	0,021	4,581	0,049	0,016	-2,649	0,007	0,003	-0,231	0,021	0,008
L	1,686	0,064	0,020	4,565	0,062	0,019	-2,658	0,026	0,010	-0,221	0,028	0,011
w _o	1,705	0,072	0,020	4,579	0,042	0,009	-2,644	0,023	0,008	-0,230	0,023	0,007
l _o	1,712	0,046	0,016	4,591	0,044	0,012	-2,649	0,023	0,009	-0,230	0,012	0,005
W _i	1,696	0,086	0,023	4,573	0,046	0,013	-2,644	0,011	0,005	-0,233	0,030	0,010

Fonte: Resultados de simulações.

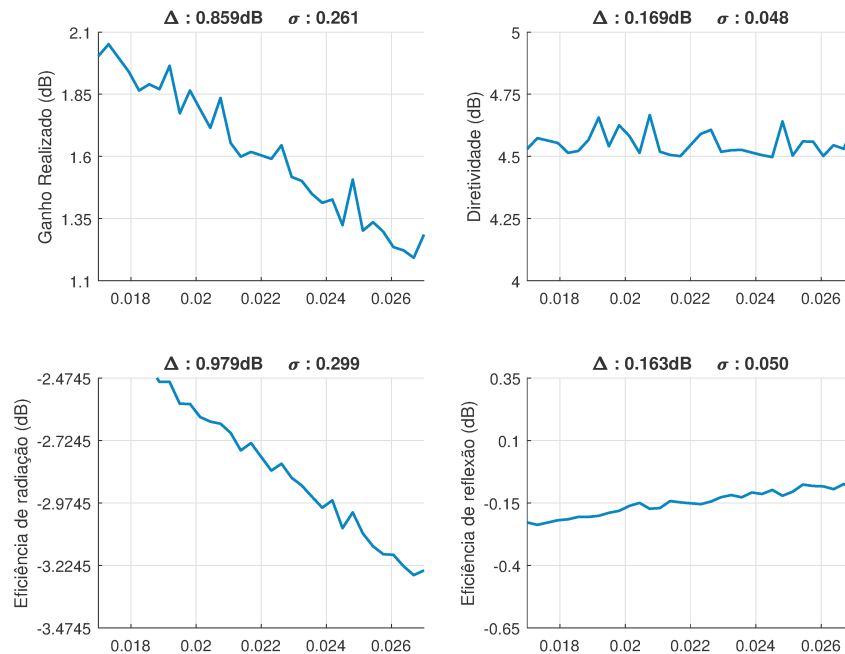
Para a comparação da robustez na última geração do algoritmo, as Figuras 23 e 24 e a Tabela 5 apresentam o indivíduo menos robusto da última geração do algoritmo multi-objetivo.

Figura 23 – Análise da variação do ganho realizado da antena impressa retangular menos robusta da última geração em função da incerteza na permissividade relativa do substrato FR-4



Fonte: Resultados de simulações.

Figura 24 – Análise da variação do ganho realizado da antena impressa retangular menos robusta da última geração em função da incerteza na tangente de perdas do substrato FR-4



Fonte: Resultados de simulações.

Tabela 5 – Análise da variação do ganho realizado antena impressa retangular menos robusta da última geração em função da incerteza na precisão geométrica da prototipadora

Variáveis de Projeto	Ganho Realizado			Diretividade			Eficiência de radiação			Eficiência de reflexão		
	Med (dB)	Δ (dB)	σ	Med (dB)	Δ (dB)	σ	Med (dB)	Δ (dB)	σ	Med (dB)	Δ (dB)	σ
W	1,918	0,054	0,021	4,641	0,043	0,017	-2,550	0,004	0,001	-0,174	0,008	0,003
L	1,832	0,179	0,070	4,602	0,107	0,041	-2,591	0,081	0,032	-0,179	0,034	0,012
w_o	1,873	0,186	0,074	4,620	0,149	0,060	-2,564	0,059	0,021	-0,184	0,024	0,011
l_o	1,815	0,157	0,062	4,578	0,107	0,041	-2,590	0,065	0,024	-0,173	0,015	0,005
W_i	1,836	0,182	0,072	4,606	0,156	0,056	-2,596	0,068	0,025	-0,174	0,012	0,004

Fonte: Resultados de simulações.

Pelos dados apresentados, nota-se que a variação do ganho realizado é maior no indivíduo menos robusto mas não é tão significativa, indicando que a população convergiu para um local comum. Este método de análise também se mostrou útil para poder projetar a antena, uma vez que dá ao projetista uma noção de como o projeto da antena se comporta dadas as incertezas.

5.1.3 Fabricação e medição da antena

A partir da análise feita nas soluções obtidas na otimização, a antena selecionada foi a que possui as variáveis de projeto para a geometria apresentadas na Tabela 6. Como não é possível determinar as características elétricas do substrato, todos os modelos foram feitos a partir da mesma placa de FR-4.

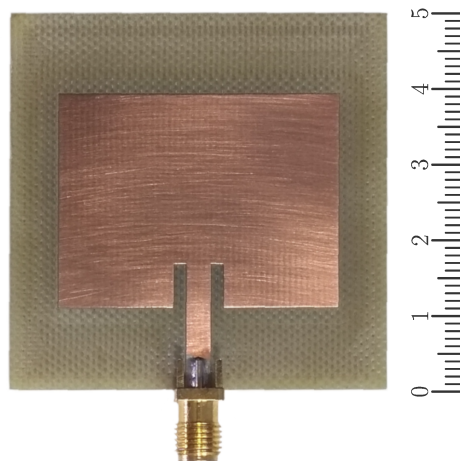
Tabela 6 – Variáveis de projeto da antena impressa retangular selecionada da otimização

Variável de Projeto	Valor otimizado (mm)
W	37,1925
L	28,3375
w_o	1,6950
l_o	0,8000
W_i	3,2475

Fonte: Elaborado pelo autor.

O projeto da antena foi criado seguindo os dados da Tabela 6 e duas unidades foram feitas na prototipadora utilizando o ferramental adequado para a precisão necessária da mesma. Uma das antenas fabricadas está apresentada na Figura 25.

Figura 25 – Antena impressa retangular fabricada (escala em centímetros)

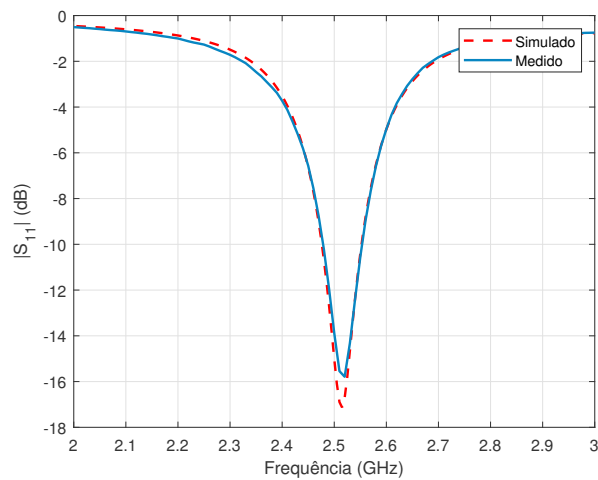


Fonte: Elaborado pelo autor.

A fim de caracterizar o substrato, foram feitas diversas simulações até obter um casamento entre o $|S_{11}|$ medido utilizando o analisador de redes da universidade e o simulado no programa HFSS[®], como apresentado no gráfico da Figura 26. Para o casamento das medidas, a caracterização do substrato foi feita com $\epsilon_r = 4,27$ e $\tan \delta = 0,017$, ambas dentro do espaço de incertezas considerado no projeto.

A partir destes dados foi feito o ajuste do material da antena no HFSS[®] para comparar os valores medidos do ganho realizado feitos conforme apresentado na subseção 4.3.2.

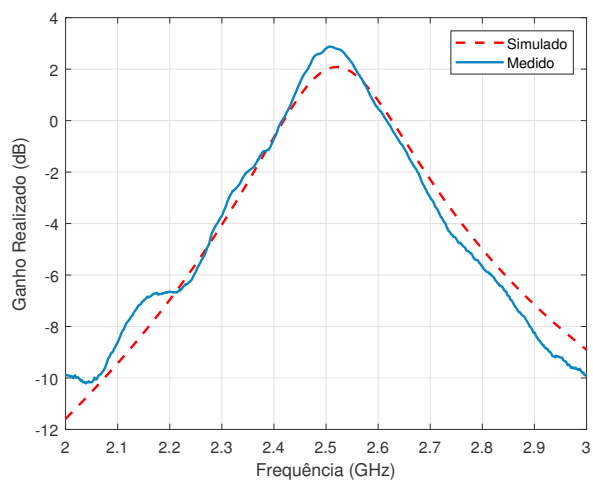
Figura 26 – Gráfico comparativo entre os dados medidos e simulados da perda de retorno $|S_{11}|$ da antena impressa retangular



Fonte: Resultados de simulações e medições.

A Figura 27 apresenta a comparação entre os valores medidos e simulados. Como o método de obtenção do ganho realizado parte da medição com o analisador de redes, os gráficos estão em função da frequência.

Figura 27 – Gráfico comparativo entre os dados medidos e simulados do ganho realizado da antena impressa retangular



Fonte: Resultados de simulações e medições.

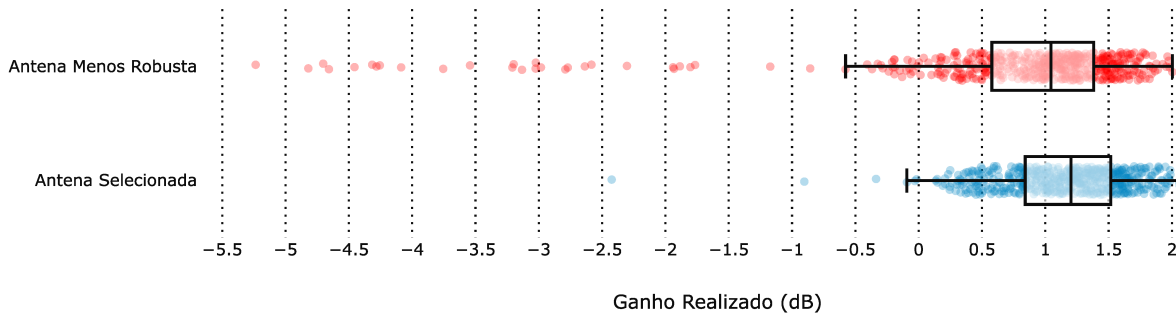
Os valores obtidos foram bem próximos ao da simulação, com o ganho realizado sendo de $1,47dB$ na frequência de $2,45GHz$.

5.1.4 Avaliação da robustez

Como a análise unidimensional não mostra se há um conflito entre a robustez e o desempenho, foi realizada uma simulação de Monte Carlo avaliando 500 antenas diferentes

entre si considerando o espaço de incertezas definido para a antena impressa retangular para a antena mais robusta e menos robusta obtidas pela otimização. A Figura 28 apresenta um diagrama de caixa com a distribuição de pontos amostrados dos resultados para o ganho realizado destas antenas.

Figura 28 – Diagramas de caixa feitos a partir da simulação de Monte Carlo para o ganho realizado da antena impressa retangular



Fonte: Resultados de simulações.

Pelos gráficos, observa-se que a distribuição do ganho realizado da antena selecionada é menor do que a menos robusta e também possui a média em $1,15dB$, estando $0,38dB$ acima da menos robusta. Comparando as caudas dos diagramas de caixa, a antena selecionada é $15,25\%$ menos sensível às incertezas do que a antena menos robusta obtida pelo algoritmo.

5.2 Antena impressa de polarização circular

A antena impressa de polarização circular escolhida para a otimização é baseada no artigo de Chen, Wu e Wong (2001) e assim como a antena impressa retangular o projeto inicial será para a frequência de $2,45GHz$, com a geometria limitada pelos valores apresentados na Tabela 7 que foram obtidos a partir dos resultados obtidos no artigo do autor que propôs a antena, resultando assim em um modelo mais compacto que o da antena impressa retangular.

Quanto ao substrato de material FR-4, os valores em que a antena será avaliada serão os mesmos utilizados para a antena impressa retangular.

5.2.1 Abordagem de otimização

Na otimização desta antena impressa de polarização circular foi utilizada a metodologia multiobjetivo com três objetivos apresentada na subseção 4.2.2: o ganho realizado, a razão axial e a soma da quantificação da sensibilidade dos dois primeiros objetivos. Mesmo tendo mais de um parâmetro de desempenho a ser obtido na otimização, só é necessária

Tabela 7 – Limites e incertezas da antena impressa de polarização circular na otimização

Variável de Projeto	Descrição	Valor mínimo (mm)	Valor Máximo (mm)	Incerteza (mm)
L	Largura do elemento radiador	25	30	$\pm 0,05$
C	Largura do chanfro	1	4	$\pm 0,05$
w_o	Largura da reentrância	0.5	2	$\pm 0,05$
l_o	Comprimento da reentrância	4.5	10	$\pm 0,05$
D_i	Distância da alimentação em relação ao centro	3	10	$\pm 0,05$

Fonte: Elaborado pelo autor.

uma chamada de avaliação do HFSS[®] de forma a não comprometer o custo computacional do processo.

A Tabela 8 apresenta os resultados obtidos na otimização multiobjetivo.

Tabela 8 – Fronteira de não dominância resultante da otimização multiobjetivo da antena impressa de polarização circular

Ganho Realizado (dB)	Razão Axial (dB)	Quantificação da Robustez do Ganho Realizado	Quantificação da Robustez da Razão Axial	Soma das Quantificações da Robustez obtidas
-8,603	34,188	1,408	2,993	4,402
-8,472	36,893	1,262	2,916	4,178
-7,665	36,686	1,401	3,487	4,887
1,369	4,893	0,755	4,310	5,065
1,537	3,556	0,545	4,849	5,395
1,583	3,646	0,545	4,772	5,316
1,591	3,966	0,467	4,987	5,454
1,602	3,765	0,463	4,593	5,057
1,613	3,524	0,463	4,912	5,375
1,627	3,837	0,476	5,141	5,617
1,678	5,283	0,489	5,538	6,027
1,679	5,324	0,430	5,460	5,890
1,683	3,877	0,472	5,178	5,650
1,725	3,152	0,448	4,325	4,773
1,728	6,053	0,468	5,623	6,091

Fonte: Resultado da otimização.

Como os objetivos aumentaram, todas as soluções ficaram na mesma fronteira não-dominada e pelo fato do algoritmo NSGA-II também ter preferência por soluções nos extremos dos objetivos, três delas possuem um alto valor de razão axial. Na tabela, o terceiro objetivo foi separado para poder visualizar a quantificação da sensibilidade de cada parâmetro de desempenho. Além do conflito entre a robustez e o desempenho, nota-se que existe também um conflito entre a robustez do ganho realizado e a robustez da razão axial nas soluções resultantes.

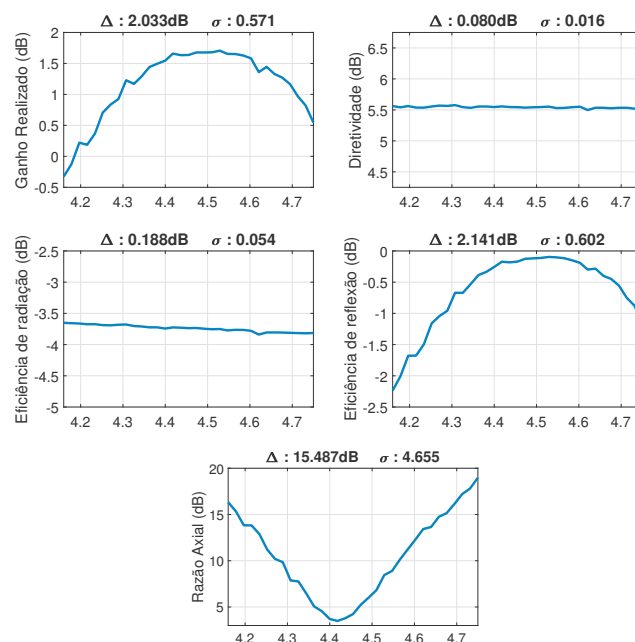
5.2.2 Análise dos resultados

Da mesma forma que a abordagem multiobjetivo da antena impressa retangular, foram necessárias apenas 7200 chamadas de avaliação do HFSS, mantendo o mesmo custo computacional. Em média, cada chamada do HFSS[®] para a avaliação da antena durou em média 1 minuto e 40 segundos, resultando em aproximadamente 8 dias e 8 horas de execução do algoritmo de otimização no servidor disponibilizado pela universidade.

A partir da população obtida na otimização, as soluções foram analisadas com 33 amostras para cada variável conforme a análise apresentada na subseção 4.2.4. Pela análise, o indivíduo selecionado foi o que possuía uma boa quantificação da robustez para os dois objetivos e também um bom desempenho no ganho realizado e na razão axial Tabela 8.

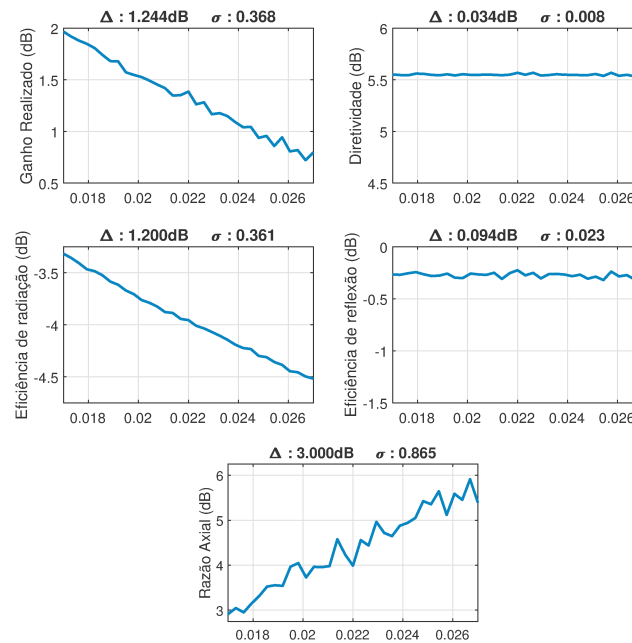
As Figuras 29 e 30 apresentam como o ganho realizado (e as grandezas que são diretamente proporcionais a ele) e a razão axial da antena selecionada se comportam na variação das características elétricas do substrato.

Figura 29 – Análise da variação do ganho realizado da antena impressa de polarização circular selecionada em função da incerteza na permissividade relativa do substrato FR-4



Fonte: Resultados de simulações.

Figura 30 – Análise da variação do ganho realizado da antena impressa de polarização circular selecionada em função da incerteza na tangente de perdas do substrato FR-4



Fonte: Resultados de simulações.

Assim como na antena impressa retangular, observa-se que a eficiência de reflexão é a que mais influencia no ganho realizado da antena devido à variação da permissividade relativa do substrato, enquanto que a eficiência de radiação é a que mais influencia no ganho realizado da antena devido à variação da tangente de perdas. A razão axial por sua vez possui uma variação maior pelas incertezas da permissividade relativa do substrato.

Como a variação do ganho realizado e da razão axial em função da geometria é menos significativa que em função do material, os demais valores são apresentados nas Tabelas 9 e 10.

Tabela 9 – Análise da variação do ganho realizado da antena impressa de polarização circular selecionada em função da incerteza na precisão geométrica da prototipadora

Variáveis de Projeto	Ganho Realizado			Diretividade			Eficiência de radiação			Eficiência de reflexão		
	Med (dB)	Δ (dB)	σ	Med (dB)	Δ (dB)	σ	Med (dB)	Δ (dB)	σ	Med (dB)	Δ (dB)	σ
L	1,570	0,325	0,064	5,552	0,067	0,015	-3,723	0,084	0,017	-0,260	0,224	0,045
C	1,578	0,315	0,069	5,554	0,062	0,017	-3,723	0,076	0,018	-0,253	0,210	0,044
w_o	1,558	0,129	0,032	5,551	0,061	0,016	-3,731	0,042	0,012	-0,262	0,105	0,023
l_o	1,563	0,138	0,037	5,554	0,054	0,012	-3,727	0,065	0,013	-0,264	0,095	0,025
D_i	1,566	0,157	0,032	5,549	0,083	0,017	-3,731	0,059	0,014	-0,252	0,170	0,030

Fonte: Resultados de simulações.

Tabela 10 – Análise da variação da razão axial da antenna impressa de polarização circular selecionada em função da incerteza na precisão geométrica da prototipadora

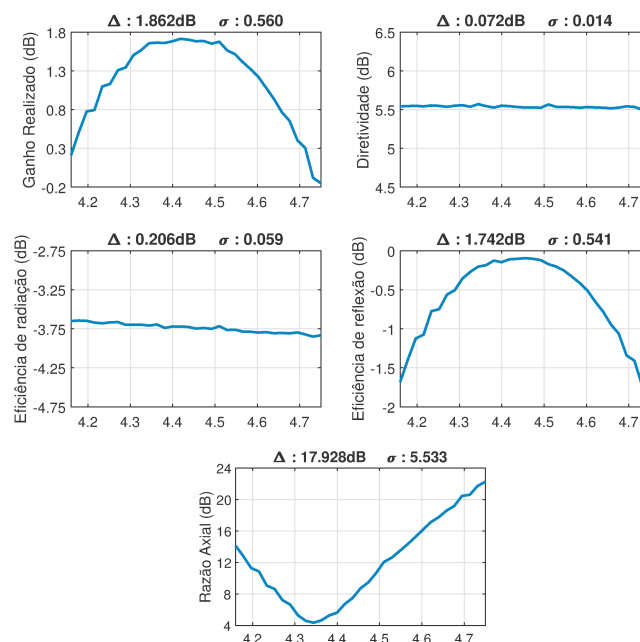
Variáveis de Projeto	Razão Axial		
	Med (dB)	Δ (dB)	σ
L	3,832	1,141	0,300
C	3,758	0,832	0,212
w _o	3,775	0,798	0,174
l _o	3,817	0,986	0,241
D _i	3,729	0,908	0,205

Fonte: Resultados de simulações.

Para o ganho realizado, observa-se o mesmo comportamento da antenna impressa retangular, onde as incertezas da eficiência de reflexão é mais influenciada pelas incertezas da permissividade relativa do substrato e a eficiência de radiação é mais influenciada pelas incertezas da tangente de perdas do substrato. Já a razão axial possui uma sensibilidade significativa em relação às incertezas da tangente de perdas e da geometria mesmo estas sendo pequenas, indicando que a otimização robusta pode ser um método viável para o tratamento delas.

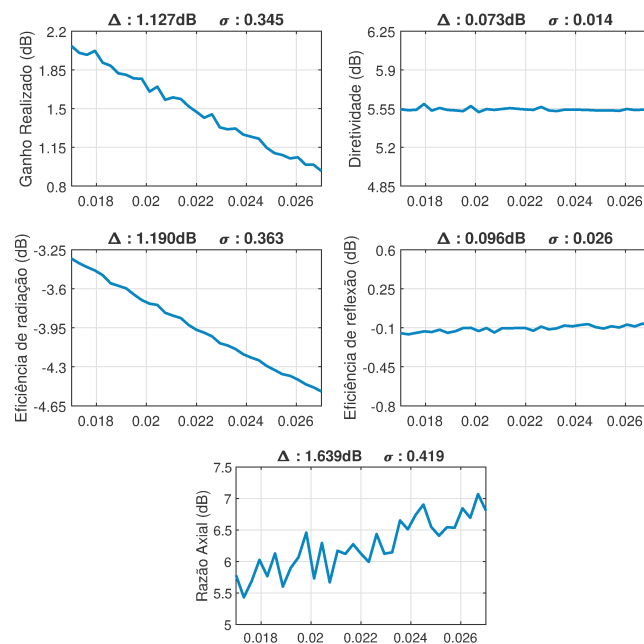
Para a comparação da robustez obtida na última geração do algoritmo, as Figuras 31 e 32 e as Tabelas 11 e 12 apresentam o indivíduo menos robusto da última geração do algoritmo multiobjetivo.

Figura 31 – Análise da variação do ganho realizado da antenna impressa de polarização circular menos robusta da última geração em função da incerteza na permissividade relativa do substrato FR-4



Fonte: Resultados de simulações.

Figura 32 – Análise da variação do ganho realizado da antena impressa de polarização circular menos robusta da última geração em função da incerteza na tangente de perdas do substrato FR-4



Fonte: Resultados de simulações.

Tabela 11 – Análise da variação do ganho realizado da antena impressa de polarização circular menos robusta da última geração em função das incertezas do projeto

Variáveis de Projeto	Ganho Realizado			Diretividade			Eficiência de radiação			Eficiência de reflexão		
	Med (dB)	Δ (dB)	σ	Med (dB)	Δ (dB)	σ	Med (dB)	Δ (dB)	σ	Med (dB)	Δ (dB)	σ
L	1,696	0,130	0,033	5,538	0,044	0,010	-3,716	0,066	0,015	-0,126	0,081	0,022
C	1,698	0,122	0,029	5,536	0,080	0,016	-3,713	0,068	0,017	-0,124	0,045	0,013
w_0	1,702	0,127	0,029	5,541	0,046	0,013	-3,714	0,062	0,016	-0,125	0,055	0,013
l_0	1,691	0,134	0,029	5,534	0,054	0,012	-3,715	0,069	0,016	-0,127	0,063	0,015
D_i	1,692	0,101	0,024	5,533	0,055	0,014	-3,718	0,046	0,012	-0,123	0,063	0,015

Fonte: Resultados de simulações.

Tabela 12 – Análise da variação da razão axial da antena impressa de polarização circular menos robusta da última geração em função das incertezas do projeto

Variáveis de Projeto	Razão Axial		
	Med (dB)	Δ (dB)	σ
L	5,943	2,162	0,574
C	5,933	0,724	0,227
w_0	5,918	0,865	0,215
l_0	5,885	0,826	0,236
D_i	5,939	1,354	0,276

Fonte: Resultados de simulações.

Pelos dados obtidos da análise observa-se que o ganho realizado dos dois indivíduos possui as mesmas características (conferir Tabela 8), porém a maior diferença da sensibilidade está na variação da razão axial dadas as incertezas da permissividade relativa do substrato e da geometria, além deste parâmetro estar com um pior desempenho do que o da antena selecionada.

5.2.3 Fabricação e medição da antena

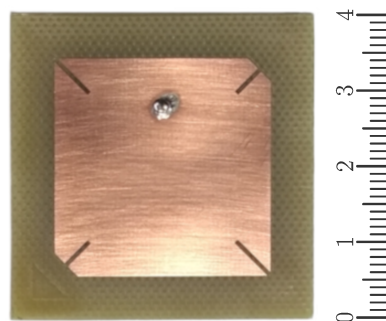
Após a análise das soluções obtidas pelo processo de otimização, duas antenas foram fabricadas com a geometria conforme as variáveis de projeto apresentadas na Tabela 13. Assim como a antena impressa retangular, as antenas de polarização circular foram confeccionadas a partir da mesma placa de FR-4. A Figura 33 apresenta uma das antenas fabricadas.

Tabela 13 – Variáveis de projeto da antena impressa de polarização circular selecionada da otimização

Variável de Projeto	Valor otimizado (mm)
L	28,4700
C	3,0450
w _o	0,5500
l _o	4,5500
D _i	8,0625

Fonte: Elaborado pelo autor.

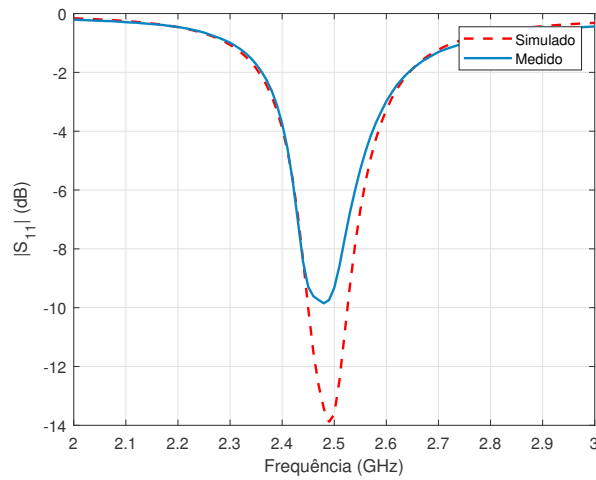
Figura 33 – Antena impressa de polarização circular fabricada (escala em centímetros)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a caracterização do substratos, simulações foram realizadas até obter um casamento entre o $|S_{11}|$ medido com o analisador de redes e simulado com o programa HFSS[®], como está apresentado no gráfico da Figura 34. A partir destes dados foi feito o ajuste do material da antena, onde os valores da caracterização do substrato obtidos foram $\epsilon_r = 4,35$ e $\tan \delta = 0,017$, ambos dentro do espaço de incertezas considerado no projeto.

Figura 34 – Gráfico comparativo entre os dados medidos e simulados da perda de retorno $|S_{11}|$ da antena impressa de polarização circular

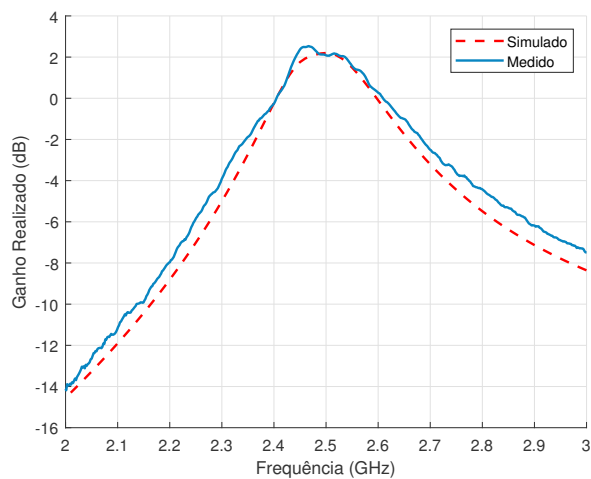


Fonte: Resultados de simulações e medições.

As Figuras 35 e 36 apresentam a comparação entre os valores medidos e simulados. Pelos gráficos apresentados, nota-se que os valores obtidos se aproximaram aos da simulação, com o ganho realizado de $2,367dB$, razão axial de $3,797dB$ e defasamento das componentes ortogonais do campo elétrico de $80,40^\circ$, todos estes dados para a frequência de $2,45GHz$.

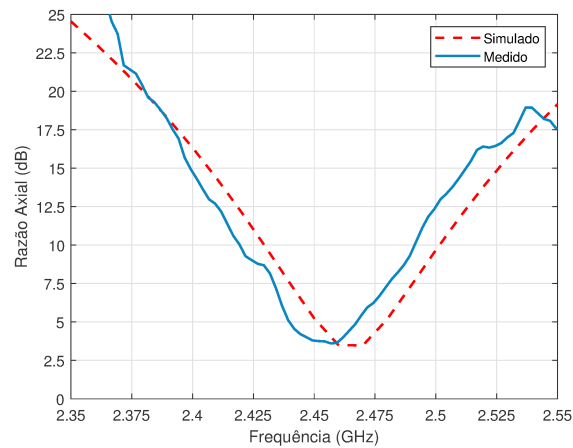
Como os dados simulados não levam em consideração os valores exatos da geometria obtida, observa-se que os gráficos medidos e simulados da razão axial estão deslocados entre si, lembrando que a Tabela 10 destaca que há uma sensibilidade maior da razão axial da antena para as variáveis de projeto de geometria.

Figura 35 – Gráfico comparativo entre os dados medidos e simulados do ganho realizado da antena impressa de polarização circular



Fonte: Resultados de simulações e medições.

Figura 36 – Gráfico comparativo entre os dados medidos e simulados da razão axial da antena impressa de polarização circular

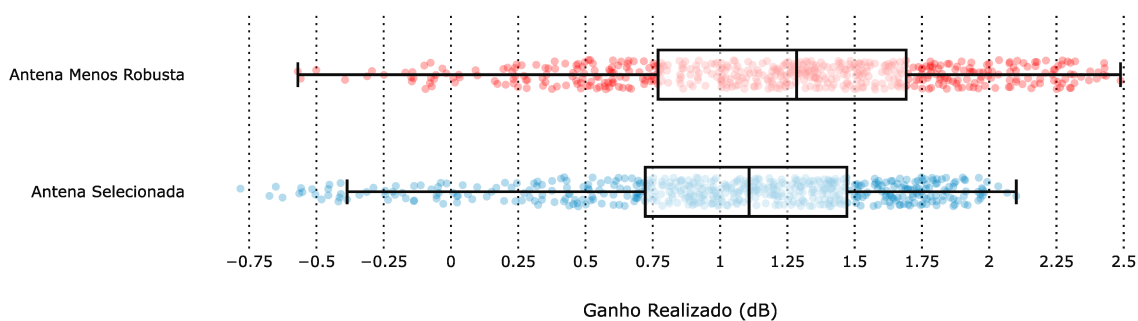


Fonte: Resultados de simulações e medições.

5.2.4 Avaliação da robustez

Para avaliar se houve melhora da robustez, foi realizada uma simulação de Monte Carlo avaliando 500 projetos de antena diferentes entre si considerando o espaço de incertezas definido para a antena impressa de polarização circular. As Figuras 37 apresentam diagramas de caixa contendo os resultados para o ganho realizado da antena selecionada e da menos robusta obtida na última geração do algoritmo.

Figura 37 – Diagramas de caixa feitos a partir da simulação de Monte Carlo para o ganho realizado da antena impressa de polarização circular



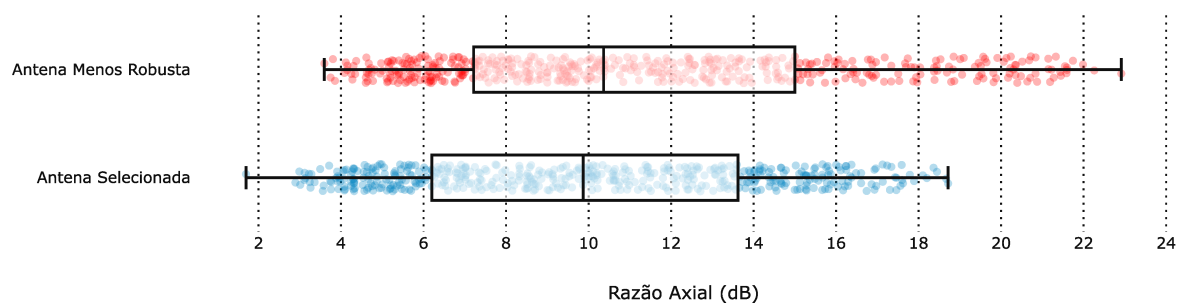
Fonte: Resultados de simulações.

Comparando os gráficos, observa-se que as caudas do diagrama de caixa da antena selecionada compreendem uma faixa menor do que as da antena menos robusta da última geração e que também há uma melhora do valor do ganho realizado. A redução da sensibilidade às incertezas para o ganho realizado foi de aproximadamente 18,07%.

Para a razão axial, as Figuras 38 apresentam diagramas de caixa contendo os resultados da simulação de Monte Carlo da antena selecionada e da antena menos robusta

obtida na última geração do algoritmo de otimização.

Figura 38 – Diagramas de caixa feitos a partir da simulação de Monte Carlo para a razão axial da antena impressa de polarização circular



Fonte: Resultados de simulações.

Comparando os gráficos a antena menos robusta da última geração está com a média a cima da antena seleccionada, e as caudas do diagrama de caixa compreendem uma faixa maior do que as do diagrama da antena seleccionada. A redução da sensibilidade às incertezas para a razão axial foi de aproximadamente 11,89%.

6 CONCLUSÃO

Esta dissertação teve como proposta a otimização robusta aplicada ao projeto de antenas impressas a fim de melhorar o uso do FR-4 como substrato, sendo este um material de baixo custo.

A otimização robusta é um tema que vem crescendo ao longo dos últimos anos em pesquisas científicas onde algumas de suas abordagens possui foco em reduzir o custo de projetos permitindo o uso de processos e materiais com tolerâncias maiores e/ou mais baratos. Diferente de outras abordagens de otimização robusta utilizados para projetos de antenas impressas, esta dissertação utilizou um método de quantificação de robustez a fim de poder avaliar também as características elétricas do substrato.

As antenas otimizadas foram fabricadas e medidas pelos equipamentos e a câmara semi anecoica disponibilizados pela universidade, onde os resultados foram comparados com as simulações feitas no programa HFSS®.

6.1 Considerações Finais

Na dissertação foram analisados dois modelos de antenas impressas, a primeira mais conhecida de geometria retangular e a segunda destinada à polarização circular e de geometria mais complexa.

Para a antena impressa de geometria retangular foram testados duas metodologias de otimização:

- a) Metodologia mono-objetivo com duas etapas, onde a primeira etapa é destinada a encontrar uma população robusta de antenas e a segunda etapa é destinada a otimizar o ganho realizado da antena considerando a quantificação de robustez como restrição utilizando como ponto de partida a população robusta obtida na primeira etapa;
- b) Metodologia multiobjetivo onde o primeiro objetivo é o ganho realizado e o segundo objetivo é a quantificação da robustez do primeiro objetivo.

A partir dos resultados dos algoritmos, foi feita uma análise dos parâmetros de desempenho de cada antena obtida a fim de compreender se estes parâmetros são sensíveis às incertezas das variáveis de projeto e também identificar qual é o indivíduo que possui um bom desempenho e pouca sensibilidade para a fabricação da antena.

Dentre as duas metodologias utilizadas, a que obteve melhor resultado final foi a multiobjetivo com uma boa convergência da fronteira de Pareto, resultando em um projeto

com uma variação do ganho realizado em torno de $1,5dB$ na variação do ε_r , que seria o pior caso nas incertezas do projeto. A metodologia mono-objetivo não se mostrou viável pelo fato da segunda etapa partir de uma população pouco diversificada e também por causa do seu custo computacional.

Para analisar a melhora da sensibilidade, foi realizada uma análise de Monte Carlo na antena selecionada e na antena menos robusta da última geração, onde foram consideradas diversos projetos de antenas que podiam ocorrer dentro do espaço de incertezas das variáveis de projeto. Além da melhora do ganho realizado na antena retangular, foi identificado uma redução de $15,25\%$ na sensibilidade às incertezas na antena impressa retangular.

Na antena impressa de polarização circular foi executado o algoritmo multiobjetivo com três objetivos:

- a) Ganho realizado da antena;
- b) Razão axial da antena;
- c) Soma da quantificação de robustez do ganho realizado e da razão axial da antena.

Para esta antena, foi identificado que a sensibilidade da razão axial para a geometria nesta antena é significativa, inclusive nas variáveis de projeto referentes à geometria. O projeto selecionado obteve uma variação do ganho realizado em torno de $2,03dB$ e da razão axial em torno de $15,48$ na variação do ε_r , que seria o pior caso nas incertezas do projeto.

A partir da análise de Monte Carlo nas antenas impressas de polarização circular, também foi identificado uma melhora nos parâmetros de desempenho comparado com a antena menos robusta da última geração, com o ganho realizado obteve uma redução da sensibilidade às incertezas de $18,07\%$ e a razão axial uma redução da sensibilidade às incertezas de $11,89\%$.

Ao realizar a análise das antenas estudadas nesta dissertação, observou-se que os parâmetros de desempenho são muito sensíveis às incertezas das características do substrato do que às incertezas de geometria, justificando assim a necessidade da otimização robusta nestas antenas. Um método simples de encontrar um projeto ainda mais robusto seria o aumento da população e/ou o aumento de gerações, porém com a desvantagem de aumentar significativamente o custo computacional do algoritmo o que poderia ser resolvido melhorando a eficiência do otimizador com a paralelização do algoritmo, por exemplo.

Um dos problemas significativos foi o custo computacional, onde cada execução completa dos algoritmos de otimização duraram em torno de 8 dias e 8 horas. Também,

os resultados poderiam ser mais satisfatórios se as incertezas inerentes ao substrato FR-4 fossem menores do que as consideradas no projeto. Para isso seria necessária a caracterização de um lote de placas a fim de determinar a incerteza destes substratos com o equipamento e metodologia adequados.

6.2 Publicações

No decorrer desta dissertação, foram aceitos dois artigos em congressos na área de eletromagnetismo. O primeiro no AES (Advanced Electromagnetics Symposium) e o segundo no APCAP (Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation), ambos no ano de 2019.

6.3 Propostas de Continuidade

Tendo em vista os aspectos abordados na seção anterior, como continuação deste dissertação são sugeridas métodos para melhorar a qualidade do processo de otimização como também os resultados obtidos, além de uma melhor análise de diversas antenas feitas com o mesmo lote de substratos devidamente caracterizado a fim de obter dados reais da sensibilidade dos parâmetros de desempenho das antenas.

Para melhorar o processo de otimização, pode-se utilizar metodologias a fim de reduzir o custo computacional resultante da avaliação das antenas pelo HFSS[®]. Para isto pode-se propor o uso de redes neurais artificiais ou de metamodelos, que são algoritmos que poderiam substituir uma avaliação custosa em uma mais simples, onde por exemplo, é possível calibrar estes algoritmos a partir de um método validado que poderia ser o resultado obtido pelo HFSS[®] para uma dada antena, e após esta calibração as simulações do HFSS[®] podem ser substituídas por uma equação numérica que possui um custo computacional baixo fazendo com que o processo de otimização seja mais rápido e ao mesmo tempo mais eficiente, podendo ser executado com muitas gerações.

Para melhorar os resultados obtidos, é proposto a correta caracterização de um lote de substratos FR-4, se em um dado lote as incertezas das características elétricas encontradas forem menores do que as consideradas neste dissertação, pode-se obter resultados mais robustos já que o espaço de busca do método de otimização será reduzido.

Como o método implementado realmente conseguiu encontrar soluções mais robustas, ele pode ser utilizado em outras topologias de antenas impressas e em outros tipos de projeto onde existem incertezas nas características do material utilizado, podendo assim obter outros tipos de projeto de baixo custo.

REFERÊNCIAS

- AL-AZZA, A. A. N.; HARACKIEWICZ, F. J. Optimization of dielectric loaded antenna for 5.8 ghz wireless applications with interference cancellation capability. In: **IEEE. Radio and Wireless Symposium (RWS), 2016 IEEE**. [S.l.], 2016. p. 29–31.
- ANSYS. **Workshop: Antenna post-processing**. 1. ed. Canonsburg, Pennsylvania: Ansys Inc., 2015. 48 p.
- BAHL, I.; BHARTIA, P. Design considerations in microstrip antenna fabrication. In: **IEEE. European Microwave Conference**. [S.l.], 1980. v. 10, p. 122–126.
- BALANIS, C. A. **Antenna Theory: Analysis and design**. 4. ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2016. 1095 p.
- BEYER, H.-G.; SENDHOFF, B. Robust optimization—a comprehensive survey. **Computer methods in applied mechanics and engineering**, Elsevier, v. 196, n. 33-34, p. 3190–3218, 2007.
- BRANKE, J. Efficient evolutionary algorithms for searching robust solutions. In: **Evolutionary Design and Manufacture**. [S.l.]: Springer, 2000. p. 275–285.
- CHEN, W.-S.; WU, C.-K.; WONG, K.-L. Novel compact circularly polarized square microstrip antenna. **IEEE Transactions on Antennas and propagation**, IEEE, v. 49, n. 3, p. 340–342, 2001.
- COELLO, C. A. C. et al. **Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems**. 2. ed. New York: Springer, 2007. 810 p.
- DEB, K. An efficient constraint handling method for genetic algorithms. In: **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**. [S.l.]: Elsevier, 1999. v. 186, n. 2-4, p. 311–338.
- DEB, K. **Multi objective optimization using evolutionary algorithms**. 1. ed. Chichester, New York: John Wiley & Sons, 2001. 515 p.
- DEB, K.; AGRAWAL, R. B. Simulated binary crossover for continuous search space. **Complex systems**, v. 9, n. 2, p. 115–148, 1995.
- DEB, K.; GUPTA, H. Introducing robustness in multi-objective optimization. **Evolutionary computation**, MIT Press, v. 14, n. 4, p. 463–494, 2006.
- DEB, K. et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: Nsga-ii. **IEEE transactions on evolutionary computation**, IEEE, v. 6, n. 2, p. 182–197, 2002.
- GARG, R. et al. **Microstrip Antenna Design Handbook**. Norwood, Massachusetts: Artech House, 2001. 875 p. (Antennas and Propagation Library).
- GENTLE, J. E. **Random number generation and Monte Carlo methods**. 1. ed. New York: Springer Science & Business Media, 2006. 399 p.

GOLDBERG, D. E. **Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning**. 1. ed. Boston, Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, 1989. 432 p.

GORISSEN, B. L.; YANIKOĞLU, İ.; HERTOĞ, D. den. A practical guide to robust optimization. **Omega**, Elsevier, v. 53, p. 124–137, 2015.

HIGH-FREQUENCY STRUCTURE SIMULATOR. **HFSS 15**. Canonsburg, Pennsylvania, 2015. Disponível em: <<http://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss>>. Acesso em: 5 jun. 2019.

HORNBY, G. et al. Automated antenna design with evolutionary algorithms. In: **Space**. [S.l.: s.n.], 2006. p. 7242.

IDEA GROUP INC. PUBLISHING. **What is FR-4**. Hershey, Pennsylvania, 2019. Disponível em: <<https://www.igi-global.com/dictionary/fr4/66341>>. Acesso em: 24 jun. 2019.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE 149**: Standard test procedures for antennas. New York, 2008. 50 p.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE 145**: Standard for definitions of terms for antennas. New York, 2013. 50 p.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE 802.11**: Wireless lan medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications. New York, 2016. 3534 p.

JAWITZ, M. W.; JAWITZ, M. J. **Materials for rigid and flexible printed wiring boards**. Miltn Park, Oxfordshire: Taylor & Francis Group, LLC, 2007. 164 p. (Electrical and Computer Engineering).

JIN, Y.; SENDHOFF, B. Trade-off between performance and robustness: an evolutionary multiobjective approach. In: SPRINGER. **International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization**. [S.l.], 2003. p. 237–251.

JOHN, M.; AMMANN, M. J. Antenna optimization with a computationally efficient multiobjective evolutionary algorithm. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, IEEE, v. 57, n. 1, p. 260–263, 2009.

JUNG, D. H.; LEE, B. C. Development of a simple and efficient method for robust optimization. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, Wiley Online Library, v. 53, n. 9, p. 2201–2215, 2002.

KIM, K.-T. et al. Robust optimum design of pifa for rfid mobile dongle applications. **IEEE Transactions on Magnetics**, IEEE, v. 47, n. 5, p. 962–965, 2011.

KOZIEL, S.; BEKASIEWICZ, A. Statistical analysis and robust design of circularly polarized antennas using sequential approximate optimization. In: IEEE. **2018 22nd International Microwave and Radar Conference (MIKON)**. [S.l.], 2018. p. 424–427.

LEE, K.-H.; PARK, G.-J. Robust optimization considering tolerances of design variables. **Computers & Structures**, Elsevier, v. 79, n. 1, p. 77–86, 2001.

- LEE, S. et al. Hybrid robust optimization for the design of a smartphone metal frame antenna. **International Journal of Antennas and Propagation**, Hindawi, v. 2018, 2018.
- MATRIX LABORATORY. **MATLAB 2018**. Natick, Massachusetts, 2018. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/products/matlab.html>>. Acesso em: 18 mar. 2019.
- MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 5. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2012. 523 p.
- NASCIMENTO, D.; LACAVALA, J. d. S. Design of low-cost probe-fed microstrip antennas. In: **Microstrip antennas**. [S.l.]: IntechOpen, 2011.
- NGUYEN-TRONG, N.; FUMEAUX, C. Tuning range and efficiency optimization of a frequency-reconfigurable patch antenna. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, IEEE, v. 17, n. 1, p. 150–154, 2017.
- OLIVEIRA, D. B. et al. Low-cost antenna design for rfid readers using multiobjective optimization. **Microwave and Optical Technology Letters**, Wiley Online Library, v. 58, n. 4, p. 905–908, 2016.
- RAO, S. S. **Engineering optimization: theory and practice**. 4. ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2009. 830 p.
- REN, Z.; PHAM, M.-T.; KOH, C. S. Robust global optimization of electromagnetic devices with uncertain design parameters: comparison of the worst case optimization methods and multiobjective optimization approach using gradient index. **IEEE Transactions on Magnetics**, IEEE, v. 49, n. 2, p. 851–859, 2012.
- SHARMA, P.; GUPTA, K. Analysis and optimized design of single feed circularly polarized microstrip antennas. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, IEEE, v. 31, n. 6, p. 949–955, 1983.
- STUTZMAN, W. L.; THIELE, G. A. **Antenna theory and design**. 3. ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2013. 822 p.
- TTP INDÚSTRIA MECÂNICA. **TTP**. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2017. Disponível em: <<http://ttp.ind.br/>>. Acesso em: 05 jun. 2019.
- WONG, K.-L.; WU, J.-Y. Single-feed small circularly polarised square microstrip antenna. **Electronics Letters**, IET, v. 33, n. 22, p. 1833–1834, 1997.
- WU, Y. et al. The design and optimization of ultra wideband antenna based on particle swarm algorithm. In: IEEE. **2016 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics (ICCEM)**. [S.l.], 2016. p. 205–207.
- YANG, X.-S.; WANG, J.; WANG, B.-Z. Topology optimization of patch antennas with specified polarization and beam characteristics. In: IEEE. **Sixth Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation**. [S.l.], 2017. p. 1–3.
- ZHANG, B.; RAHMAT-SAMII, Y. Robust optimization with worst case sensitivity analysis applied to array synthesis and antenna designs. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, IEEE, v. 66, n. 1, p. 160–171, 2017.