

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA ELÉTRICA E BIOMÉDICA**

**PROJETO E SÍNTESE DE SUPERFÍCIE SELETIVA DE  
FREQUÊNCIAS PARA O PADRÃO IEEE 802.15.3c VIA  
TÉCNICA DE OTIMIZAÇÃO HÍBRIDA  
MULTIOBJETIVO DE ALTA PRECISÃO**

**RAIMUNDO JOSÉ SANTOS MOTA**

**TD 34/2019**

UFPA / ITEC / PPGE  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DO GUAMÁ  
BELÉM - PARÁ - BRASIL  
2019

---

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA ELÉTRICA E BIOMÉDICA

TESE DE DOUTORADO

PROJETO E SÍNTESE DE SUPERFÍCIE SELETIVA DE  
FREQUÊNCIAS PARA O PADRÃO IEEE 802.15.3c VIA  
TÉCNICA DE OTIMIZAÇÃO HÍBRIDA  
MULTIOBJETIVO DE ALTA PRECISÃO

RAIMUNDO JOSÉ SANTOS MOTA

Proposta de tese de Doutorado  
submetida à Banca Examinadora  
do Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Elétrica e Biomé-  
dica da Universidade Federal do  
Pará.

Belém  
2019

---

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
ELÉTRICA E BIOMÉDICA

PROJETO E SÍNTESE DE SUPERFÍCIE SELETIVA DE  
FREQUÊNCIAS PARA O PADRÃO IEEE 802.15.3c VIA  
TÉCNICA DE OTIMIZAÇÃO HÍBRIDA  
MULTIOBJETIVO DE ALTA PRECISÃO

AUTOR: RAIMUNDO JOSÉ SANTOS MOTA

BANCA EXAMINADORA

.....  
*Prof. Dr. Gervásio Protásio S. Cavalcante (ORIENTADOR - PPGEE/UFPA)*

.....  
*Prof. Dr. Fabrício José Brito Barros (Avaliador Interno - PPGEE/UFPA)*

.....  
*Prof. Dr. Miércio C. de Alcântara Neto (Avaliador Externo ao Programa - FEEB-ITEC-UFPA)*

.....  
*Prof. Dr. Bruno Sousa Lyra Castro (Avaliador Externo - CCAST/UFPA)*

.....  
*Prof. Dr. Ugo Silva Dias (Avaliador Externo - UNB/BR)*

VISTO:

.....  
*Profa. Dra. Maria Emilia de Lima Tostes*

Coordenadora do PPGEE/ITEC/UFPA

## DEDICATÓRIA

**Dedico este trabalho, a minha família, pelo suporte e confiança**

a minha esposa Bela, com toda a dedicação do mundo;

aos meus filhos Nicholas, Karoena e Yamila; o quem espero dar sempre um exemplo de vida;

aos meu netos, Yasmin, Caio, Luis Felipe, Ian e Liz, tesouros preciosos da minha vida.

aos meus irmãos e cunhados, pelos momentos necessários para desaparecer preocupações;

e *In Memoriam*

aos meus pais e sogros, pelo legado de sua construção, que é a minha pessoa.

*"Que nenhuma dificuldade barre os nossos sonhos.  
Que nenhuma dor estanque os nossos projetos.  
Que nenhuma provação permita que se abata sobre nós o desânimo ou o pessimismo.  
Mas, que as circunstâncias complexas nos amadureçam ainda mais, a ponto de nos entusiasmos frente aos obstáculos.  
Pois, com fé na Divina Providência, e com o nosso empenho sempre renovado, as nossas maiores dificuldades se transformarão em nossas maiores conquistas.  
Não coloquemos nossa última confiança no que é efêmero, parcial e imperfeito.  
É Deus a realização de nossa vida, somente Ele é capaz de nos amar até o fim porque isto, é fruto de sua santidade".*

Casa da Juventude

---

## AGRADECIMENTOS

Para chegar ao final deste trabalho muitas pessoas e instituições me ajudaram sobremaneira. A estas pessoas e a estes grupos, tenho um grande débito. Desta forma, agradeço:

A minha instituição UFPA, e em particular a minha faculdade de Engenharia Elétrica (FEEB), pois foram muitos e muitos anos de convivência. A todos os meus colegas e amigos, que me fizeram, mesmo dentro da instituição, sentir um gosto especial de trabalhar em ambiente familiar, a todos o meu sincero reconhecimento de capacidade e honestidade profissional. Quero aproveitar esses agradecimentos para também, homenagear de forma carinhosa aos que "já se foram", e que deixaram muitas saudades, como os professores (as) prof. Manoel Guacelis, prof. Raimundo Nazareno, profa. Hermantine, prof. Antonio Borgônio e prof. Miguel Wanzeller, pela geração 2G. Da geração anterior a esta, e com mais saudades ainda, do professores Jurandyr Garcez, Luis Carlos Freitas, Lemos e Campos.

Ao meu amigo, parceiro e Orientador prof. Dr. Gervásio Protásio dos Santos Cavalcante que, durante muitos anos, sempre pudemos compartilhar opiniões nas nossas áreas de atuação, de forma coordata, franca e de mútua troca de ideias. Também agradeço de forma bem marcante, o meu amigo e "pseudo-coorientador" prof. Dr. Miércio Cardoso de Alcântara Neto, que muito tem de responsabilidade, não só por eu ter conseguido atingir, porém de me dar, principalmente, a certeza de chegar a esta meta. Quero agradecer com muita distinção, aos companheiros que trabalharam comigo para alcançar os objetivos proposto na tese, como a profa. Dra. Jasmine Pryscila Leite de Araújo e os professores Dr. Fabrício José Brito Barros, Dr. Bruno Sousa Lyra Castro e ao discente Flávio Henry C. S. Ferreira.

E de forma particular, ao meu amigo e colega, prof. Dr. Ugo Silva Dias, não só por compor a banca de avaliação, mas pelo apoio, sugestões, informações e considerações para tornar este trabalho bem melhor do que eu poderia ser capaz de fazê-lo.

A Deus, que com sua imensa sabedoria, me presenteou ingressar na Comunidade Casa da Juventude. Em nome dela e dos seus componentes, agradeço ao Cônego Raul Tavares, atestando que este espaço vem representando em minha vida o entendimento do que é verdadeiro na sociedade e, do que é sagrado no seio de minha igreja, me moldando a ser uma pessoa do bem.

A alguns professores que me ajudaram de forma direta e intensa também tenho uma enorme gratidão, entre eles quero carinhosamente citar os nomes do: Prof. Dr. José Augusto Lima Barreiros, por parte de orientação em outros projetos; do Prof. Dr. Márcio Lima Nascimento, da mesma maneira, por termos trabalhado em outras pesquisas e que me foram muito proveitosas e finalmente, do Prof. Euripedes Pereira, que sempre surgiu nas horas de dúvidas e incertezas

para trocarmos idéias e sugestões.

Alguns discentes, também merecem parte de meus agradecimentos pois me ajudaram, tanto nas programações como nas apresentações. Em particular, Lucas Arruda e Frederick Sales. E a todas as outras pessoas que, de forma direta ou indireta, me fizeram alcançar este objetivo, meu eterno obrigado.

Por último, e acima de tudo, à minha família, que sempre esteve ao meu lado compreendendo as minhas insatisfações e agonias no desenvolvimento do trabalho e tolerando minhas ausências nos eventos sociais que não tinha tempo de comparecer. De igual maneira, na intranquilidade nas férias, pois tinha sempre que carregar o peso morto de uma âncora difícil de arrastar e uma pedra-de-moinho que me afundava nas preocupações. Mas, acredito que, com muita bondade e compreensão deles, me perdoaram essas faltas para que eu pudesse atingir o tão sonhado objetivo.

– Obrigado a você, mulher, obrigado a vocês, meus filhos, eu os amo demais, e que Deus sempre os abençoe e os protejam.

---

## RESUMO

As Redes Neurais Artificiais (*Artificial Neural Networks* – ANN) são inspiradas na estrutura e nos aspectos funcionais nas redes neurais biológicas. Elas são treinadas através de mecanismos obtidos das propriedades físicas dos processos envolvidos, por exemplo, ondas eletromagnéticas. Do conhecimento adquirido através dessa experiência e aprendizagem, elas podem ser capazes de fornecer soluções prevendo comportamentos de usuários e fornecendo, dentro de uma região de interesse, dados de estratégias precisas para projetos e dimensionamentos. Aqueles que criticaram a aplicação de algoritmos obtidos das ANN, argumentavam que os problemas a serem encarados eram normalmente sem grandes complexidades. Entretanto, os métodos convencionais que foram propostos para resolverem estes mesmos problemas não se mostraram eficientes. Alguns sucessos espúrios ocorreram em certos ambientes bem comportados, mas sem a flexibilidade quando se encontra restrições diversificadas. Em concordância a estes desenvolvimentos, também se teve a abertura evolutiva das ferramentas computacionais, que tem dado um suporte extraordinário para o aprofundamento de técnicas para resolver e otimizar problemas antes impensados. Em muitos problemas de otimização, a qualidade de uma solução é definida por seu desempenho em relação a vários objetivos conflitantes. Tais objetivos, não podem ser sensivelmente reduzido a um único valor, por exemplo, usando uma soma ponderada de todos eles ou outra metodologia pertinente, mas deve se considerar a solução dominadora, independentemente uma do outra. Para atingir soluções precisas com redução de custos computacionais, menor tempo de processamento, se apresentam os Algoritmos Evolucionários Multi-Objetivos (*Multiobjective Evolutionary Algorithms* – MOEA), somada com a Computação Bioinspirada (*Bioinspired Computation* – BIC). Combinando as vantagens dos algoritmos clássicos, surgiram de forma irreversível os Algoritmos Metaheurísticos. Nesses moldes, é apresentado neste trabalho, uma técnica de otimização híbrida Bioinspirada que associa uma Rede Neural de Regressão Geral (*General Regression Neural Networks* – GRNN) em combinação com o Algoritmo Multiobjetivo do Morcego (*Multiobjective Bat Algorithm* – MOBA), para projeto e síntese de Superfícies Seletivas de Frequência (*Surfaces Selective Frequency* – FSS) objetivando sua aplicação no sistema de comunicação de dados, por difusão de ondas milimétricas, especificamente, no padrão IEEE 802.15.3c. O dispositivo projetado consiste em arranjos planares de metalizações (*patches*), na forma geométrica de losango, dispostos sobre substratos do dielétrico RO4003. A FSS proposta e definida neste estudo apresenta resultados e resposta com característica de banda ultra larga. A FSS *patch* losango projetada é capaz de cobrir a faixa de 40.0 GHz a 70.0 GHz, ou seja, com largura de banda de 30.0 GHz e frequência de Ressonância em 60.0 GHz. As frequências de corte inferior e superior, para o caso da matriz de espalhamento, referente ao coeficiente de transmissão é dado em decibéis (dB), e foram obtidas no limiar de corte em -10dB para controle da banda de operação do dispositivo.

*Palavras chave:* técnica híbrida, computação bioinspirada, redes neurais em regressão geral, algoritmo multiobjetivo do morcego, superfície seletivas de frequência.

---

## ABSTRACT

Artificial Neural Networks (ANN) are inspired by the structure and functional aspects in biological neural networks. They are trained through mechanisms obtained from the physical properties of the processes involved, for example, electromagnetic waves. From the knowledge acquired through that experience and learning, they may be able to provide solutions for predicting users behavior and providing, within a region of interest, accurate strategy data for projects and sizing. Those who criticized the application of ANN acquired by nature-inspired algorithms, argued that the problems to be faced were usually without complexities, although the conventional methods that were proposed to solve these same problems were not efficient. Some spurious successes have occurred in certain well-behaved environments, but without flexibility when encountering diverse constraints. Adding to these developments, there is the evolutionary openness of computational tools, which has given extraordinary support for deepening techniques to solve and optimize previously unthought problems. In many optimization issues, the quality of a solution is defined by its performance against several conflicting goals. Such conflicting objectives cannot be significantly reduced to a single value, for example using a weighted sum or other methodology, but must be considered independently of each other. To achieve accurate solutions with reduced computational costs and shorter processing times, we present the Multi-Objective Evolutionary Algorithms (MOEA), as well as Bioinspired Computation (BIC). Combining the advantages of the classical algorithms, the Metaheuristic Algorithms emerged irreversibly. In many optimization problems, the quality of a solution is defined by its performance in relation to several, conflicting objectives. Such conflicting goals cannot be sensibly reduced to a single value using a weighted sum or another aggregate function, but rather they must be considered independently from each other. Multi-Objective Evolutionary Algorithms (MOEAs) are a natural answer of this kind of evolution. In this work is presented a hybrid bioinspired optimization technique that associates a General Regression Neural Network – GRNN with the Multi-Objective Bat Algorithm – MOBA, for the design and synthesis of the Frequency Selective Surfaces – FSS, aiming its application in data communication systems by diffusion of millimeter waves, specifically, in the IEEE 802.15.3c standard. The designed device consists of planar arrangements of metallizations (patches), diamond-shaped, arranged over a RO4003 substrate. The FSS proposed in this study presents an operation with ultra-wide band characteristics, its patch designed to cover the range of 40.0 GHz at 70.0 GHz, i.e., 30.0 GHz bandwidth and 60.0 GHz resonance. The upper and lower cutoff frequencies, referring to the transmission coefficients scattering matrix (dB), were obtained at the cutoff threshold at -10dB, to control the bandwidth of the device.

*Index Terms* – hybrid technique, bioinspired computation (BIC), general regression neural network (GRNN), multiobjective bat algorithm (MOBA), Frequency Selective Surfaces (FSS).



---

## Lista de Figuras

---

2.1	Tipos de substratos e seus parametros. Balanis, página 784 [27] . . . . .	11
2.2	Exemplo de uma FSS com suas distribuições de campos incidentes [34] . . . . .	12
2.3	Alguns tipos de configurações geométricas de FSS [1] . . . . .	13
2.4	FSS com <i>patch</i> forma de anel triangular. (a) célula unitária e (b) geometria do arranjo, (c) fotografia da FSS . . . . .	14
2.5	FSS com <i>patch</i> forma triangular (a) célula unitária e (b) geometria do arranjo, (c) fotografia da FSS . . . . .	15
3.1	Atenuação atmosférica na faixa de frequência de ondas milimétricas pelo ITU [44] . . . . .	17
5.1	Fluxograma de técnica híbrida desenvolvida [16] . . . . .	27
5.2	Relação de dominação para a função custo do problema [16] . . . . .	33
5.3	Evolução do fitness no processo de síntese via MOBA, estrutura otimizada para $f_r = 60,0$ GHz e $BW = 30,0$ GHz [16] . . . . .	34
5.4	Configuração da GNRR . . . . .	36
6.1	FSS com <i>patch</i> na forma de losango (a) célula unitária e (b) arranjo da FSS com a metalização, na indicação 1, e o substrato RO4003, na indicação 2 . . . . .	40
6.2	Capacidade de aprendizado e dados de mapeamento de entrada da GRNN [16] . . . . .	41
6.3	Resultados da frequência de ressonância para a rede GRNN [16] . . . . .	43
6.4	Resultados da largura de banda para a FSS em função dos parâmetros $W$ e $T$ da rede GRNN [16] . . . . .	44
6.5	Coefficiente de transmissão para a FSS na forma losango com frequência de ressonância $f_r = 60,0$ GHz e largura de faixa $BW = 30,0$ GHz otimizada através da técnica MOBA. Os parametros estruturais da FSS são $\epsilon_r = 3,55$ ; $h = 0,5$ mm; $T_x = 1,85$ mm; $T_y = 3,7$ mm; $W_x = 1,75$ mm; e $T_y = 3,5$ mm [16] . . . . .	45
6.6	Comportamento da mudança que ocorre quando o ângulo de incidência $\phi$ varia ao atingir a FSS. . . . .	46
6.7	Efeito da dispersão dos campos em elementos de células unitárias de FSS . . . . .	46
6.8	Substrato de espessura 0,203 mm . . . . .	48
6.9	Substrato de espessura 0,305 mm . . . . .	48

---

6.10	Substrato de espessura 0,406 mm . . . . .	49
6.11	Substrato de espessura 0,508 mm . . . . .	49
6.12	Substrato de espessura 0,813 mm . . . . .	50
6.13	Substrato de espessura 1,524 mm . . . . .	50
6.14	Valores ótimos com substrato de espessura 0,203 mm . . . . .	51
6.15	Valores ótimos com substrato de espessura 0,305 mm . . . . .	51
6.16	Valores ótimos com substrato de espessura 0,406 mm . . . . .	52
6.17	Valores ótimos com substrato de espessura 0,508 mm . . . . .	52
6.18	Valores ótimos com substrato de espessura 0,813 mm . . . . .	53
6.19	Valores ótimos com substrato de espessura 1,524 mm . . . . .	53
6.20	Diagrama mostrando a relação da variação entre a espessura e a frequência de ressonância para esta FSS. . . . .	54

---

## Lista de Tabelas

---

5.1	Tempo de execução do processo . . . . .	34
5.2	Pseudo-código . . . . .	37
6.1	Parâmetros estruturais da FSS com patch de forma losango. . . . .	41
6.2	Frequência de ressonância ( $f_R$ ) e largura de banda ( $BW$ ) para cada espessura do substrato . . . . .	47
6.3	Frequência de ressonância ( $f_R$ ) e largura de banda ( $BW$ ) para cada espessura do substrato para valores ótimos . . . . .	54

---

# Lista de Símbolos

---

ACRÔNIMO	DEFINIÇÃO
ANN	Artificial Neural Networks
BIC	Bioinspired Computation
CP	Circular Polarization
CST	Computer Simulation Technology
EMI	Electromagnetic Interference
FEM	Finite Element Method
FIT	Finite Integration Technique
FSS	Frequency Selective Surfaces
GA	Genetic Algorithm
GRNN	General Regression Neural Network
HFSS	High Frequency Structure Simulator
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineerings
LC	Linear Polarization
MFA	Multiple Functions Antenna
MIMO	Multiple Input/Multiple Output
MLP	Multilayer Perceptron
mm-WAVE	Millimeter Wave
MOBA	Multiobjective Bat Algorithm
MOCS	Multiobjective Cuckoo Search
MOEA	Multiobjective Evolutionary Algorithm
MoM	Method of Moments
PCS	Personal Communication Systems
QoS	Quality of Service
RBNN	Radial Based Neural Network
RBFNN	Radial Based Function Neural Network
RCS	Radar Cross Sention
RF	Radio Frequency
RoF	Radio-over-Fiber
RoI	Region of Interest

UWB  
WPAN

Ultra Wide Band  
Wireless Personal Area Network

---

# Sumário

---

<b>Lista de Figuras</b>	<b>ix</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xi</b>
<b>Lista de Símbolos</b>	<b>xii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>2</b>
1.1 Prolegômenos . . . . .	2
1.2 Motivação e Justificativa . . . . .	4
1.3 Objetivos . . . . .	5
1.3.1 Objetivo Geral: . . . . .	5
1.3.2 Objetivos Específicos: . . . . .	6
1.4 Estrutura e organização da Tese . . . . .	6
<b>2 Superfícies Seletivas de Frequências</b>	<b>8</b>
2.1 Introdução . . . . .	8
2.2 Estruturas de Microfitas . . . . .	9
2.2.1 Aplicações Típicas das FSS . . . . .	10
2.2.2 Variantes de FSS . . . . .	12
2.3 Considerações Finais . . . . .	15
<b>3 Ondas Milimétricas - IEEE 802.15.3c</b>	<b>16</b>
3.1 Introdução . . . . .	16
3.2 Software de simulação – CST . . . . .	18
3.3 Considerações Finais . . . . .	19
<b>4 Trabalhos Correlatos</b>	<b>20</b>
4.1 Introdução . . . . .	20
4.2 Dinâmica da Síntese . . . . .	21
4.3 Revisão Analítica . . . . .	21
4.4 Considerações Finais . . . . .	22

---

<b>5</b>	<b>Técnicas de Otimização</b>	<b>24</b>
5.1	Introdução . . . . .	24
5.2	Algoritmos Evolucionários Multiobjetivos – MOEA . . . . .	25
5.3	Técnicas de Otimização Metaheurística Híbrida . . . . .	26
5.3.1	Algoritmo Multiobjetivo do Morcego - MOBA . . . . .	28
5.3.2	Regressão Generalizada de Redes Neurais . . . . .	34
5.4	Considerações Finais . . . . .	36
<b>6</b>	<b>Resultados e Discussão</b>	<b>38</b>
6.1	Introdução . . . . .	38
6.2	Resultados das Simulações da Técnica de Otimização Híbrida . . . . .	39
6.3	Análise e Discussão . . . . .	40
6.3.1	Correção do efeito de borda através de corrente de franja . . . . .	43
6.4	Análise da influência da variação da espessura do substrato . . . . .	45
<b>7</b>	<b>Conclusões e Trabalhos Futuros</b>	<b>55</b>
7.1	Conclusões . . . . .	55
7.2	Propostas para Trabalhos Futuros . . . . .	56
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>58</b>

# Introdução

---

*A filosofia por trás do raciocínio sobre o processo de transformação que é submetido toda e qualquer situação ou estado de coisas, é atribuída ao filósofo alemão G. W. F. Hegel (1770-1831). Este processo de mudança é contínuo e se apresenta de forma iterativa. Esta mudança é causada pelo fato de que tudo, seja ideia, ou algo real é identificado como **Tese**, contém dentro de si um conflito exigindo modificações que é a **Antítese**. Então, finalmente após a realização de mudanças **Síntese**, resulta em uma nova ideia ou um novo estado de coisas. E após este processo, se tem estabelecido uma nova **Tese***

## 1.1 Prolegômenos

Esta tese de doutorado trata de avaliar a dinâmica do processo denominado Síntese. Basicamente ele é definido como uma modificação em uma superfície dielétrica ao receber uma série de placas metálicas distribuídas de forma periódica, que tem a denominação de Superfícies Seletivas de Frequências. Este conjunto de elementos idênticos arranjados nesta superfície, em 2D e 3D, pode exercer vários efeitos em uma onda eletromagnética incidente. Nas últimas décadas, a tecnologia das FSS tinha sido amplamente utilizada em várias áreas, como engenharia aeroespacial, sistemas de comunicação, instrumentação médica, e micro-ondas de sistemas de alta potência. Na engenharia aeroespacial, o FSS é usado como um filtro espacial para melhorar o desempenho de radomes, RAS, placas dielétricas, e antenas refletoras [1, 2]. Em edifícios e meios ferroviários modernos, a FSS é empregada para controlar o sinal propagação e interferência eletromagnética (*Electromagnetic Interference* – EMI) e como blindagem para se ter uma compatibilidade dentro de ambientes construídos [3].

O comportamento devido tais modificações são ou devem ser implementadas em um sistema, por exemplo, Antenas, para obtenção de propriedades diferenciadas das que se tinha no projeto original. No presente contexto e de forma bem ampla, a real situação é se ter um anteparo à frente de um elemento que opera, por exemplo, em recepção de ondas eletromagnéticas carregando informações embutidas em uma determinada faixa de frequências, a qual se quer separar do pacote geral de ondas que chegam. Esta sistemática tem sido utilizada de forma bastante corrente nos últimos anos, e que, por isso, contém uma quantidade grande de propostas de



projetos contendo tipos variados de técnicas e principalmente de aplicações [3, 4].

É interessante reforçar que as FSS já tem uma longa história, muitas pesquisas e aplicações bem como lançamentos de muitas inovações. Pode-se dizer que seu introito se deu há uns 40 anos, com publicações que tinham como objetivos, tatear as técnicas de estudo e das aplicações desta inovação [5]. Desde a década de 50 o dinamismo nas telecomunicações tinha tomado um grande impulso no mundo inteiro. E estas evoluções enfrentam novos desafios, dando como exemplo os casos de sistemas de comunicações 5G que remete a um gerenciamento relevante tanto no ponto de vista técnico, mas principalmente nos negócios.

Em vista disso, aplicações e requisitos específicos são descritos e os potenciais benefícios do mercado para as operadoras são analisados sob de vista da tecnologia que vem agregada. Enquanto os problemas começam a se tornar mais complexos, alguns custos começam a se tornar mais insustentáveis. Sejam na forma de demandas computacionais, que é uma das grandes prioridades, quanto aos ranges de faixas de frequências em que pese a quantidade de informações a serem distribuídas. Então, o interesse pelas FSS tem crescido nestes últimos anos e consequentemente muitas variações nelas servirão para dar o suporte necessário para suprir os inúmeros casos que tem aparecido recentemente.

Finalmente se tem buscado muitas técnicas em outras áreas que tem servido de grande anteparo para estas necessidades. Principalmente nas área dos Algoritmos Genéticos (*Genetic Algorithms* – GA) que são otimizadores consolidados, e que podem ser usados através de métodos estocásticos baseado em princípios e conceitos na seleção e evolução natural. Os resultados obtidos tem sido de qualidade excelente para resolver problemas complexos em processos de otimização combinacional de forma híbrida, inclusive nas áreas de engenharia do eletromagnetismo, telecomunicações através de projetos de arranjos de antenas e absorvedores de micro-ondas [6].

Outra técnica também muito promissora, são os algoritmos das Redes Neurais Artificiais (*Artificial Neural Networks* – ANN) que são processadores de sistemas de informação inspirados na forma da aprendizagem do cérebro humano e com outras habilidades inerentes. Nas aplicações, as redes neurais também podem ser treinadas para usos em vários campos relacionados as transmissões de sinais, tais como antenas, mecanismos de propagação, reconhecimento de padrões de sinais, aplicações médicas, modelamento de circuitos de rádio frequência (*Radio Frequency* – RF) e estruturas planares [7].

Porém muitas das técnicas citadas acima, e com peculiaridades bastante próprias, foram de forma mais brilhantemente utilizadas quando se conseguiu hibridizá-las. Trabalhando-as de maneira conjunta com outras e extraíndo o que melhor cada uma delas possuía. Ou seja,

utilizando-as de forma multi-objetiva, surgiu então, as técnicas denominadas Algoritmos Evolucionários Multiobjetivos (*Multiobjective Evolutionary Algorithms* – MOEA).

## 1.2 Motivação e Justificativa

Na busca de combinar as principais vantagens dos algoritmos clássicos, pesquisadores estão propondo novos algoritmos ditos meta-heurísticos, quer sejam para acelerar os processos de desenvolvimentos de projetos, quer para melhorar as características físicas dos dispositivos projetados. Especificamente na área das comunicações, se tem [8]; ganho, largura de banda, diagrama de radiação, etc. Principalmente nas geometrias de dimensões reduzidas, que são mais adequadas para o projeto de antenas e FSS. Dessa forma, originando novos algoritmos de otimização, dentre os quais se pode destacar os algoritmos de Busca Cuco proposto por Yang e Deb [9] em 2009 e o Algoritmo de Ecolocalização do Morcego (*Bat Algorithm* – BA) que também foi desenvolvido por Yang em 2010 [10] o qual é utilizado neste trabalho.

Ao explorar as potencialidades dessas ferramentas computacionais, pesquisadores planejam redes neurais artificiais (ANN) que trabalhem em conjunto com algoritmos de otimização (método híbrido) [11, 12]. Nesta disposição, as ANN, após serem treinadas com os dados do eletromagnetismo, e calculados pelo método numérico empregado naquele projeto, cria um espaço de busca denominado de região de interesse (*Region of Interest* – ROI) e, nessa região, os algoritmos de otimização realizam buscas pelas melhores soluções, as quais atendam de maneira ótima a função objetivo (ou função custo) do projeto [13].

Esse processo viabiliza maior robustez e flexibilidade ao projeto, garantindo resultados ainda mais precisos e, em alguns casos, minimiza substancialmente o tempo demandado para processamento computacional de estruturas, o que tem contribuído bastante para o aumento no emprego desta técnica à projetos em áreas específica como as das micro-ondas [13].

No âmbito das comunicações por rádio difusão, os filtros FSS têm sido largamente empregados devido seu baixo custo de fabricação, peso reduzido e possibilidades de se integrar junto a outros circuitos de micro-ondas [14]. Uma das aplicações mais importantes das FSS em telecomunicações é projetar estruturas com características de filtragem do tipo passa-faixa ou rejeita-faixa, usando elementos do tipo *slot* ou *patch*, sendo elas especialmente importantes para diversas aplicações, como suporte a comunicação de aviões, foguetes, mísseis, radomes, sistemas de antenas, entre outras [15, 8].

Pesquisadores da área do eletromagnetismo aplicado, recentemente, tem direcionado seus esforços para pesquisas de estruturas ressonantes capazes de operar em sistemas de comunicação

Redes de Área Pessoal Sem-Fio (*Wireless Personal Area Network* – WPAN) em ondas milimétricas (*Millimeter Wave* – mm-Wave). Ou seja, em frequências que já estão sendo contempladas pelo padrão IEEE 802.15.3c. Até porque, as pesquisas voltadas a área de radio difusão, tradicionalmente, têm sido desenvolvidas somente pela comunidade de micro-ondas onde se tem inúmeros projetos de circuitos integrados para esta faixa de rádio frequência (*Radio Frequency* – RF) [8].

É neste contexto que este estudo traz como escopo o desenvolvimento de um algoritmo meta-heurístico voltado para otimização de dispositivo ressonante em mm-Wave a exemplo daqueles aplicados com sucesso em micro-ondas. Para isso, foi desenvolvido um código para otimização das dimensões geométricas da FSS investigada, a qual foi projetada para sintonizar frequência e largura de banda indicadas na função objetivo dos algoritmos de otimização.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Objetivo Geral:

Como objetivo geral, se busca minimizar o esforço computacional e o tempo demandado para processamento das propriedades eletromagnéticas durante o processo de otimização da FSS losango.

A metodologia aplicada consiste na utilização de técnica híbrida, na qual uma Rede Neural de Regressão Geral (*General Regression Neural Networks* – GRNN) será desenvolvida para modelagem das estruturas e para criação da região de interesse, substituindo assim a necessidade da análise de onda completa por parte de uma determinada técnica numérica. Nesta região, o algoritmo de otimização do morcego (*Multiobjective Bat Algorithm* – MOBA) realizará o tratamento dos dados eletromagnéticos e identificará as melhores soluções.

Também, se busca minimizar o esforço computacional e o tempo demandado para processamento das propriedades eletromagnéticas durante o processo de otimização das FSS aqui investigadas. Para tal, se utilizará uma técnica híbrida, na qual uma ANN do tipo GRNN será desenvolvida para criação do espaço de busca. Nesta região, os algoritmos de otimização deverão realizar o tratamento das melhores soluções [16].

Este estudo traz como contribuição o desenvolvimento de uma nova técnica híbrida, que associa a GRNN ao MOBA, para otimização de uma FSS de banda ultra larga para aplicações em mm-Wave, especificamente no padrão IEEE 802.15.3c, e que poderá, possivelmente, ser aplicada ao novo padrão de comunicações móveis 5G. Para verificação dos resultados calculados pela técnica híbrida desenvolvida, GRNN+MOBA, para as dimensões ótimas da célula unitária

da FSS *patch* losango, foram realizadas simulações computacionais usando o FEM e o *software* (*High Frequency Structure Simulator* – HFSS). A partir da Técnica numérica de Integração Finita (*Finite Integration Technique* – FIT), e com o auxílio do *software* CST®<sup>®</sup>, foi observada uma boa concordância entre todos os resultados calculados. E desta maneira, assegurar a estabilidade e precisão do código desenvolvido, bem como os resultados alcançados neste estudo [16].

### 1.3.2 Objetivos Específicos:

Dentro do quadro de possíveis aplicações e que podem surgir como propostas de trabalhos vindouros, se tem as seguintes possibilidades:

- ✓ Desenvolver nova geometria para FSS que seja capaz de operar como filtros espacial de banda ultra larga para aplicações em ondas-milimétricas nas frequências pertencentes ao padrão IEEE 802.15.3c;
- ✓ Reduzir o esforço computacional e o tempo para processamento exigido por programas comerciais durante o processo de otimização de FSS, substituindo-os por ferramentas de otimização meta-heurísticas, a saber: rede neural artificial para modelagem das FSS e algoritmo de otimização multiobjetivo bioinspirado como o algoritmo de busca cuco;
- ✓ Utilização de outros tipos de materiais, quer seja como substratos a exemplo das ferrites em busca de circuladores magnetizados, quer seja com materiais tipo grafeno, em busca de outros dispositivos para utilizar em outros padrões a serem desenvolvidos em tecnologias futuras;
- ✓ Incentivar/fortalecer a cooperação entre os diversos grupos e pesquisadores da Universidade Federal do Pará (UFPA) e outros grupos;
- ✓ Treinar recursos humanos na área, com habilidades de programação de algoritmos de otimização e que possam dar suporte aos temas de pesquisas relacionadas neste projeto.

## 1.4 Estrutura e organização da Tese

A organização proposta na tese, bem como o seu desenvolvimento, será feito da seguinte maneira:

CAP. 2 → Desenvolver parâmetros para uma nova geometria de FSS capaz de operar como filtros espaciais para aplicações em ondas milimétricas nas frequências pertencentes à banda banda ultra larga; será apresentado uma definição correspondente à dinâmica da síntese

utilizada nos moldes mais atuais nos recentes trabalhos via uma revisão analítica das vantagens e desvantagens deste tipo de dispositivo;

- CAP. 3 → Apresentar as características de propagação e dos serviços – no presente caso, do sistema *Wireless* tipo Banda Ultra Larga (*Ultra Wide Band* – UWB) – dentro do padrão da norma IEEE 802.15.3c, que estão atualmente associados às faixas de frequências desta norma e determinação de parâmetros através das metodologias computacionais mais promissoras;
- CAP. 4 → Analisar alguns trabalhos que estão interessados nas respostas das FSS quando submetidas a alterações de seus parâmetros geométricos ou seja, dentro de uma síntese, no sentido de propor mudanças de como avaliar técnicas de resolução ou buscar os mecanismos adequados do que se pretende ter como uma fundamentação teórica do problema;
- CAP. 5 → Dentro das técnicas existentes, procurar atingir os objetivos, como reduzir o esforço computacional e o tempo para processamento exigido por programas comerciais durante o processo de otimização de FSS, substituindo-os por ferramentas meta-heurísticas, tais como: rede neural artificial para modelagem das FSS e algoritmos de otimização multiobjetivos como os algoritmos genéticos e do algoritmo de ecolocalização do morcego (MOBA);
- CAP. 6 → Apresentar os resultados, análises críticas e discussão final;
- CAP. 7 → Finalmente, as conclusões finais e sugestões de propostas para possíveis trabalhos futuros.

# Superfícies Seletivas de Frequências

---

*Este capítulo analisa os desenvolvimentos recentes no campo de estruturas eletromagnéticas (EM) avançadas baseadas em superfície seletiva de frequências (surfaces selective frequency – FSS). FSS são estruturas periódicas planares que consistem em elementos condutores, geralmente impressos em um substrato dielétrico. Eles se comportam como filtros eletromagnéticos passivos, seletivamente refletindo ou transmitindo uma banda de frequência desejada. Sendo que um dos mais importantes fatores que influenciam a resposta da difusão da FSS é a configuração do elemento.*

## 2.1 Introdução

As FSS têm sido objeto de intensas investigações de aplicações em aplicações eletromagnéticas distintas por mais de quatro décadas. Uma FSS é um tipo de filtro que consiste em uma matriz de pequenas placas metálicas denominadas *patches* ou perfurações ou fendas, denominadas *slots*, que são distribuídas periodicamente, com configurações variadas. Aquelas são impressas em um substrato dielétrico, enquanto, as fendas são perfurações no substrato. Vários tipos de materiais podem ser utilizados [17].

As superfícies seletivas de frequências (FSS) tem tido, nas últimas décadas, não só um grande interesse, porém, um amplo espectro de aplicações em plataformas aéreas, sistemas de comunicações sem fio, instrumentação em comunicação médica e de imagem, sistemas de micro-ondas em alta potência, basicamente pela sua atuação como filtros espaciais, alguns trabalhos seminais de Raj Mittra estão dispostos na literatura [5, 18]. Para empregar em escala eletricamente pequenas ou grandes e conforme tais aplicações, a necessidade de um desenvolvimento de uma técnica eletromagnética eficiente de *design* é essencial, o que é um desafio em termos de complexidade computacional requerida.

Tendo em vista avaliar as eficácias de várias técnicas eletromagnéticas para o projeto e análise das estruturas FSS empregadas, uma vasta revisão pode ser acompanhada nos artigos de Narayan [19] e de Anwar *et al* [20]. Além disso, as estratégias empregadas de projeto e dimensionamento para as estruturas FSS incluindo metamateriais são discutidas para aplicações

específicas como alto desempenho em radomes, absorvedores de radar e outros tipos de estruturas que podem ser sumarizadas como:

1. A realização de sistemas de antena refletora que permitem que duas ou mais alimentações compartilhem o mesmo refletor principal parabólico simultaneamente.
2. Projeto de radome, a FSS usado com um radome de proteção para reduzir a seção transversal do radar (*Radar Cross Section* – RCS) da antena fechada fora de sua faixa de operação [21].
3. Na fabricação de polarizadores por exemplo, a polarização circular (*Circular Polarization* – CP) a qual é usada em aplicações de radar. As vantagens deste tipo de polarização em relação à polarização linear (*Linear Polarization* – LP) é que ele tem menor suscetibilidade aos efeitos de múltiplos caminhos, absorção atmosférica e reflexões [22].
4. Para reduzir a interferência do canal adjacente nos sistemas de comunicação devido ao congestionamento do espectro eletromagnético, várias estruturas metalizadas de FSS como dipolo, cruz de Jerusalém, anel, tripé e loop quadrado foram desenvolvidas [23].
5. Projetos de filtros para instrumentos de sensoriamento remoto de observação da Terra, separando a radiação da cena em canais de frequência separados [24]. Ao fornecer a divisão de feixe seletivo de frequência no trilho de alimentação, reduzindo enormemente o tamanho e a massa do sistema de antena e minimizando a perda de inserção do filtro [25].
6. Uma aplicação importante é a proteção de sinais móveis principalmente em ambientes de muita atenção no compartilhamento de informações, como hospitais, escritórios de empresas de segurança, prisões, e locais afins [26].

## 2.2 Estruturas de Microfitas

O emprego das microfitas (*Microstrip*) na determinação do comportamento das FSS tem sido muito estimulado por vários pesquisadores [27, 28, 29]. Entretanto, uma primeira e grande diferença deve ser tomada, que é separar o que se denomina de Antenas de Microfita e são normalmente alimentadas pelas Linhas de Transmissão de Microfitas. Esta alimentação de maneira geral é efetuada através de conexões físicas entre os dispositivos e circuitos eletrônicos que vão compor o sistema irradiante[30].

Por outro lado, daí a diferença, é que as linhas de Microfitas podem desempenhar através

de um conjunto devidamente projetado, modificações reflexivas, refrativas ou outro comportamento eletromagnético a base de difrações, difusão, para redirecionar ondas EM dependendo da faixa de frequência e de outras configurações, formando verdadeiros filtros [5, 1, 31].

As primeiras tem desempenho bem definidas como antenas e a *grosso modo*, portanto, aplicações aeronáuticas, aeroespaciais, de satélite e de mísseis de alto desempenho, onde tamanho, peso, custo, desempenho, facilidade de instalação e perfil aerodinâmico são limitantes e que antenas que tem estes requisitos, podem ser necessárias. Isto sem falar em aplicações governamentais e comerciais, que utilizam de forma expressiva o rádio móvel e comunicação sem fio. Para atender esses requisitos antenas de microfita ganham uma importância nestas aplicações e seus projetos e dimensionamento são bastante conhecidos.

Existe excelentes artigos e textos atuais que apresentam pesquisas e projetos em FSS na literatura aberta [5, 2, 32]. Tratando de FSS dos tipos tradicionais, incluindo FSS ativas, FSS fractais, FSS tri-dimensionais, FSS multicamadas, etc. Em concordância com estes avanços, outras configurações estão sendo propostas, em que se utilizam FSS com metamateriais, FSS miniaturizadas, FSS utilizando Grafenos, ferrites, lâminas chirais, etc. Todas estas estruturas fornecem uma grau maior de liberdade, inclusive com variações dos seus parâmetros.

Dentre estas variações de materiais no projeto de microfitas conjugadas com FSS, podem ser utilizados espessuras de substratos, que podem levar à configurações expressivas. Valores típicos de constantes dielétricas destes materiais tem valores de  $2 \leq \epsilon_r \leq 12$ , que podem ser observadas nas fornecidas pelas indústrias, conforme a figura 6.5.

### 2.2.1 Aplicações Típicas das FSS

A percepção dos fenômenos que envolvem o processo de filtragem e da difração das FSS foi observada, um pouco ao acaso pelo físico americano David Rittenhouse [33]. Um exemplo de uma configuração de FSS onde se observa os campos agindo na estrutura é mostrado na Figura 2.2.

As aplicações das FSS são muitas e variadas e podem ser projetadas para utilização em grande parte do espectro de frequências.

Exemplificando, operando na região de micro-ondas, principalmente em sistemas de comunicações que utilizam refletores, as FSS são instaladas na recepção geralmente em forma matricial, atuando como dispositivos espaciais e podem filtrar bandas de frequências, tipo rejeição de faixas (*stopband*), ou como passa-faixas (*passband*). Também nos casos de sensores infra-vermelho, o objetivo é absorver desejadas frequências no material do substrato, ou como telas de FSS que podem projetar dispositivos que atuam como polarizadores, bifurcadores de feixes de ondas,



Company	Substrate	Thickness (mm)	Frequency (GHz)	$\epsilon_r$	$\tan\delta$
Rogers Corporation	Duroid <sup>®</sup> 5880	0.127	0 – 40	2.20	0.0009
	RO 3003	1.575	0 – 40	3.00	0.0010
	RO 3010	3.175	0 – 10	10.2	0.0022
	RO 4350	0.168	0 – 10	3.48	0.0037
		0.508			
		1.524			
—	FR4	0.05 – 100	0.001	4.70	—
DuPont	HK 04J	0.025	0.001	3.50	0.005
Isola	IS 410	0.05 – 3.2	0.1	5.40	0.035
Arlon	DiClad 870	0.091	0 – 10	2.33	0.0013
Polyflon	Polyguide	0.102	0 – 10	2.32	0.0005
Neltec	NH 9320	3.175	0 – 10	3.20	0.0024
Taconic	RF-60A	0.102	0 – 10	6.15	0.0038

Figura 2.1 *Tipos de substratos e seus parametros. Balanis, página 784 [27]*

bem como espelhos para melhorar eficiências. Da mesma forma, um espelho de cavidade usado em laser, pode ser construído com FSS, tal que, é possível uma reflexão total em determinado comprimento de ondas e permitir a passagem de energia parcial em outras frequências.

Estas modificações que são denominadas de Sínteses, terá um comportamento diferenciado para aquela frequência, porém ele dependerá principalmente da geometria dos elementos, do tamanho da célula unitária, do material dielétrico usado na fabricação e da espessura do substrato. É essa a forma de microfitas com aplicação em FSS que se vai utilizar neste trabalho.

Um tópico interessante nas aplicações das FSS e que vem sendo estendida a outros casos similares é a proteção de edificações. Como os sinais de rádio podem se propagar através de vários mecanismos como reflexões, refrações, difrações e espalhamento, as componentes dos sinais transmitidos chegam na recepção através de várias trajetórias.

Em um ambiente *indoor*, o sinal recebido é atenuado principalmente devido a reflexões e transmissões através de materiais de construção. Mas não só, a perda de penetração do edifício também depende de diversas variáveis associados à arquitetura do edifício, ou da periodicidade das paredes do edifício, suas propriedades elétricas, do ângulo de incidência etc. Ou seja, pode haver confinamento com atenuações indesejadas nos sinais também em tuneis e minas. Existe a possibilidade de minimização dessas perdas por métodos convencionais, com uso de repetidoras

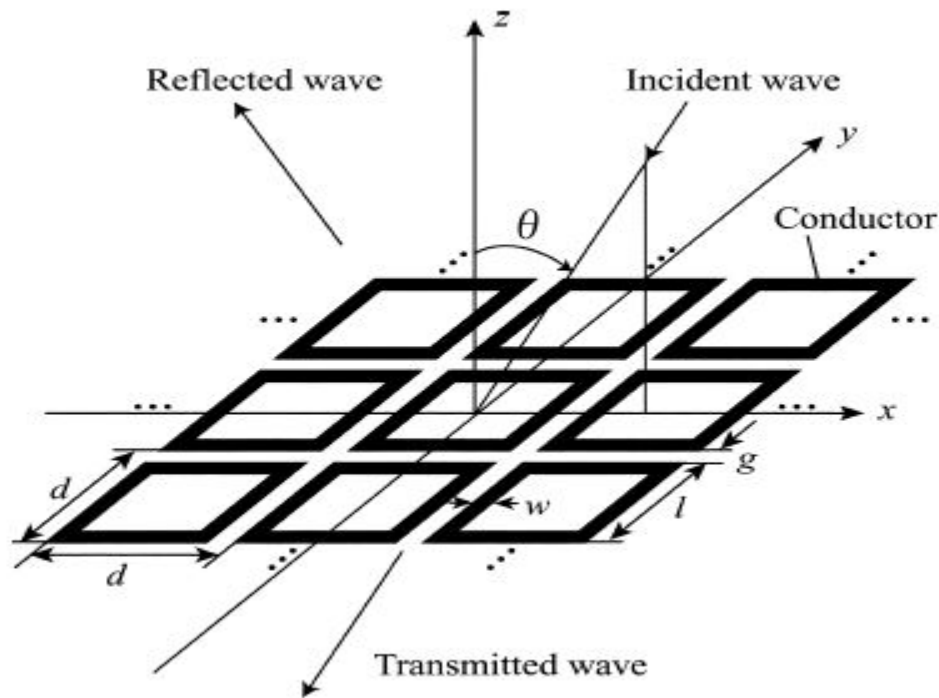


Figura 2.2 Exemplo de uma FSS com suas distribuições de campos incidentes [34]

ou antenas diretivas, etc., entretanto, uma outra técnica é a utilização de dispositivos a base de FSS. Neste ambiente, a amplificação passiva das capacidades da FSS podem ser demonstradas [35].

### 2.2.2 Variantes de FSS

Existe no projeto e dimensionamento de uma FSS alguns aspectos básicos de restrições a determinados objetivos. Dependendo do tipo de grade ou configuração a ser utilizada, as FSS podem ter tipos de respostas distintas. Como disposições capacitivas, indutivas, híbridas e etc [1, 31, 2]. Aqui será analisada tão somente a geometria dos elementos metálicos que serão fotolitografados no substrato e que terão uma sequência dentro deste estudo.

As manipulações nas configurações adotadas nas FSS, tinham como premissas, mudanças principalmente nos tipos e formas das estruturas metalizadas. Alguns dos mais típicos modelos

foram sugeridos por Munk em 2000 [1] e estão apresentados na Figura 2.3.

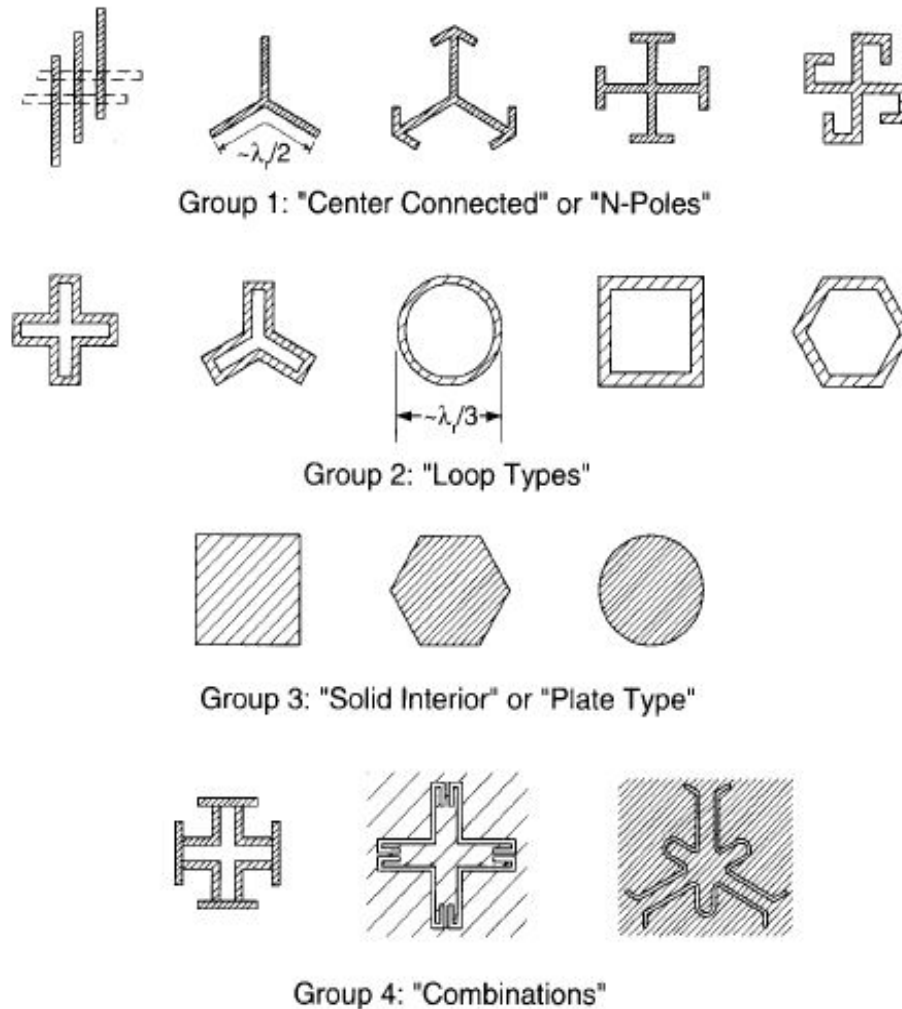


Figura 2.3 Alguns tipos de configurações geométricas de FSS [1]

Em 2015, Alcântara Neto *et al* [11] apresentaram um estudo em que utilizaram uma FSS no formato espira triangular como célula unitária conforme Figura 2.4. Para analisar as propriedades eletromagnéticas desta estrutura foi aplicada técnicas de otimização na célula unitária das FSS, com o objetivo de estudar processos de filtragem para a faixa de frequência de micro-ondas.

A técnica que foi desenvolvida provou ser rápida e precisa, consistindo em uma ferramenta bastante viável para o desenvolvimento de circuitos de radiodifusão tais como filtros e ressonadores. Os resultados simulados obtidos para determinação da frequência de ressonância e largura de banda, foram comparados com o aplicativo CST® da Microwave Studio e estes resultados comparados com os medidos foram bastante compatíveis.

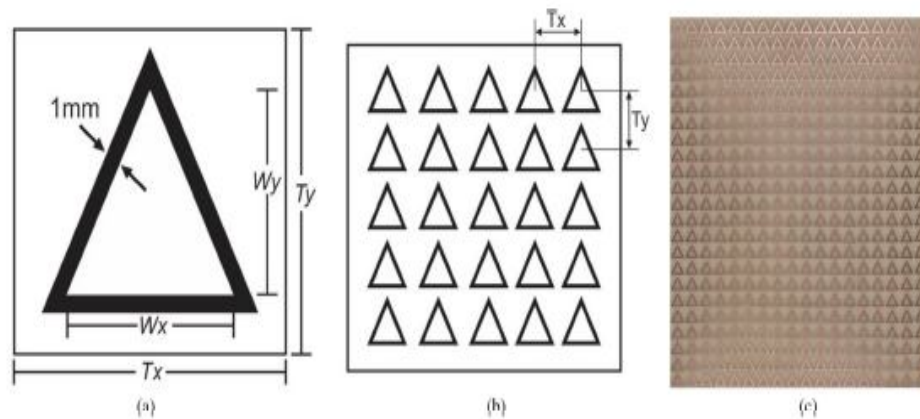


Figura 2.4 *FSS com patch forma de anel triangular. (a) célula unitária e (b) geometria do arranjo, (c) fotografia da FSS*

Ainda em 2015, e dando prosseguimento a estas pesquisas, Alcântara Neto *et al* [36] buscaram outro tratamento com modificações um pouco diferente. Desta vez, a ideia básica estava na mudança da metalização, que agora era uma variante daquela anterior, conforme a Figura 2.5 . Neste trabalho, também, foi desenvolvida uma técnica híbrida distinta, nela foi utilizada uma ANN do tipo Perceptron de múltiplas camadas (*Multilayer Perceptron – MLP*) em conjunção com o Algoritmo Genético (*Genetic Algorithm – GA*), apresentou uma avaliação eficiente da função custos nas iterações do GA. A ideia básica era avaliar as vantagens do *design* ideal da FSS através da técnica proposta e discutir, em termos de convergência, o custo computacional. E os resultados obtidos apresentaram uma boa concordância na comparação entre valores teóricos e os resultados experimentais.

No capítulo 6, será apresentado como resultado deste trabalho, um projeto e dimensionamento de uma FSS do tipo *patch* losango, através do processo de síntese. Este processo quis analisar não só a evolução das duas estruturas, porém apresentar um filtro rejeita-faixa para aplicações no padrão IEEE 802.15.3c. Nas simulações computacionais, a FSS *patch* losango foi idealizada como sendo impressa em substrato RO4003, que é caracterizado por  $\epsilon_r = 3,55$ .

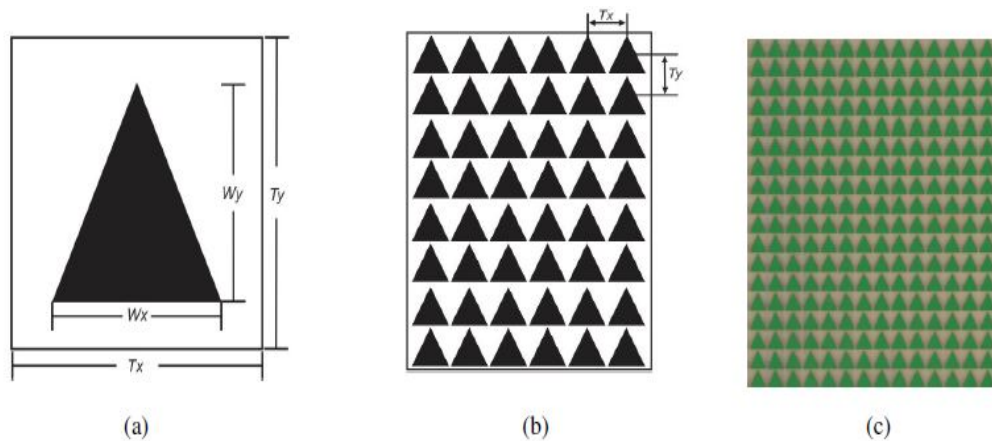


Figura 2.5 FSS com patch forma triangular (a) célula unitária e (b) geometria do arranjo, (c) fotografia da FSS

## 2.3 Considerações Finais

As FSS convencionais, simples ou tradicionais são dispositivos fáceis de serem construídos. Entretanto, as FSS que possuem estruturas mais complexas, principalmente as tri-dimensionais são muito difíceis de serem fabricadas, principalmente quando comparadas com as que são geradas de combinações em cascata do tipo 2D. Todavia, essa dificuldade pode ser compensada por seu desempenho superior. Muitos tópicos promissores de pesquisa também foram sugeridos para resolver problemas de demanda para utilizações específicas. E isto pode ser estendido para todos os casos em que se necessita ter serviços mais sofisticados.

E falando em complexidade, aqui vale lembrar o regime de ressonância denominado de *trapped mode* que é um cenário em que as FSS podem vir a ser destaque no controle da propagação através de uma nova visão de aplicação da síntese [37].

## Ondas Milimétricas - IEEE 802.15.3c

---

*A utilização do espectro entre 30 e 300 GHz, recentemente, chamou atenção considerável porque fornece uma largura de banda muito alta para transmissão de dados em alta velocidade. Pelo fato dos comprimentos de onda para essas frequências serem da ordem milimétrica, ela é chamada de ondas milimétricas (Millimeter Wave – mm-Wave). A Comissão Federal de Comunicações (Federal Communications Commission – FCC) através do grupo denominado Espectro Comum de Acesso Flexível (Flexible Access Common Spectrum – FACS), alocou a banda mmWave de 57 a 64 GHz para os Estados Unidos, Canadá e Korea, e 59 a 66 GHz para o Japão, além de permitir a utilização de bandas não licenciadas e diferenciadas para outros países [38].*

### 3.1 Introdução

As ondas milimétricas e ondas terahertz são ondas eletromagnéticas na faixa de frequências acima das micro-ondas. Suas ondas de rádio, possuem características muito parecidas com aquelas, apesar de serem mais elevadas e estarem muito próximas da luz visível e a infravermelha. Ondas milimétricas é a região de frequência de 30 a 300 GHz cujos comprimentos de onda vão de 1 a 10 mm e recebem seu nome porque seus comprimentos de onda são da ordem dos milímetros. Já as ondas de Terahertz estão na região de 300 GHz a 3 THz, possuindo comprimentos de onda que estão entre 100  $\mu\text{m}$  e 1 nm. Recebem este nome porque suas frequências são da ordem terahertz, onde Tera significa  $10^{12}$ . A norma que regulariza e coordena as ações de trabalhos em sistemas que operam em Ondas Milimétricas é a norma IEEE 802.15.3c [39].

Um dos problemas mais sérios na utilização das frequências na região milimétrica, é a atenuação específica devido a absorção dessas ondas pelos gases da atmosfera, conforme se pode observar as perdas em função da faixa de frequência, mostrada na Figura 3.1, onde se verifica que existem faixas altamente proibidas e outras denominadas de "janelas" que pesquisadores tentam obter um pequeno espaço de frequências para determinadas aplicações [40]. De qualquer forma, a ampliação do uso das fibras ópticas tem gerado uma boa expectativa para se operar nas faixas impróprias [41].

Por exemplo, a faixa de frequências próxima a 60 GHz está sendo direcionada para comunica-

ções sem fio de curto alcance. Entretanto, é necessário pensar nos vários formatos para este uso, os quais estão agora em estudo no IEEE 802.15.3c, no grupo de trabalho para a área pessoal sem fio (*Wireless Local Area Networks – WLAN*).

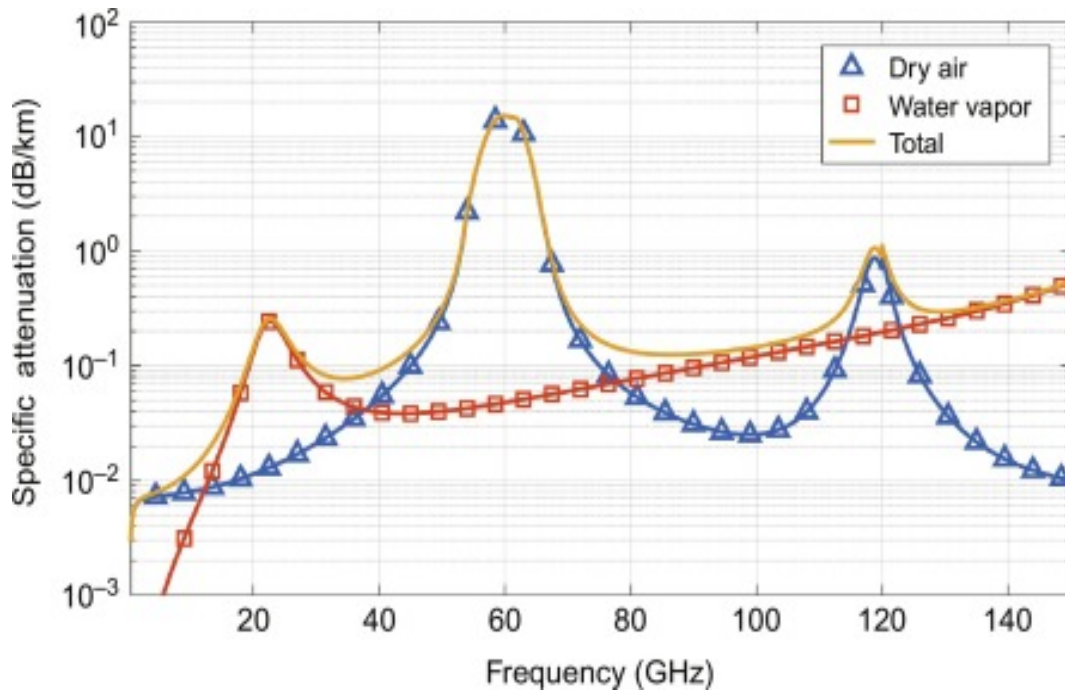


Figura 3.1 Atenuação atmosférica na faixa de frequência de ondas milimétricas pelo ITU [44]

Por outro lado, estas faixas de frequências (das ondas milimétricas até a faixa de terahertz) ainda são campos imaturos de um ponto de vista de serviços e de tecnologia de medição para avaliar características que ainda não foram desenvolvidas. Portanto, além da tecnologia de simulação baseada na análise de campos elétricos e magnéticos, um importante tópico de pesquisa é a medição e avaliação de antenas de altas frequências por sensores de campo elétrico usando o efeito eletro-óptico que possuem características de banda larga.[39].

É dentro desse cenário que as FSS buscam e se destacam [42], devido a sua capacidade de controlar características como intensidade, polarização e fase de propagação da onda em determinadas faixas de frequência [37]. Isso justifica o desenvolvimento de técnicas para análise, projeto e o desenvolvimento de novas formas geométricas de FSS para aplicações em diferentes padrões de frequências e sistemas [8].

As comunicações em ondas milimétricas, recentemente, tem atraído um grande interesse no desenvolvimento de serviços nesta área, já que a enorme largura de banda pode levar a taxas de múltiplos Gbps (gigabit por segundo) por usuário. Embora as mm-Wave possam ser prontamente utilizadas em cenários limitados ou estacionários, como *hotspots* internos ou em *backhaul* [45], é um desafio usar esta faixa de frequência em redes móveis, onde os nós de transmissão/recepção podem estar em movimento, os canais podem ter uma estrutura complicada e a coordenação entre estes múltiplos nós, também é difícil [40]. Para explorar plenamente as altas taxas do potencial das mm-Wave em redes móveis, muitos problemas técnicos devem ser encarados e resolvidos. Principalmente quando se está as portas dos sistemas de comunicações em redes móveis tipo 5G, 6G e além.

Para atender à demanda futura por grande volume de tráfego de serviços de dados sem fio, a pesquisa sobre a nova geração dos sistemas de comunicação móvel denominada de 5G, tem efetuado muitos testes nos últimos anos. Espera-se que os problemas de usos espectrais e de energia, em sistemas de comunicação móvel 5G, devam ser dez vezes maiores do que as dos sistemas de comunicação móvel de quarta geração (4G). Portanto, é importante explorar ainda mais o potencial de multiplexação espacial de múltiplas antenas existente [40].

Nos últimos vinte anos, as técnicas de comunicações denominadas Múltiplas Saídas de Múltiplas Entradas (*Multiple-Input/Multiple-Output* – MIMO), têm sido consideradas como as principais técnicas para aumentar a capacidade de sistemas de comunicação. Para suportar aplicações em comunicações de alta taxa de dados o espectro não licenciado de 5 GHz na faixa de 60 GHz, tem se tornado um atraente candidato para o acesso sem fio em ambiente interno (WLAN). Um dos principais problemas desta banda é o custo de implantação, pois o alcance dos enlaces só vão de 10 a 15 metros, ver Venkatesha *et al* [41].

Neste artigo citado, eles investigam a viabilidade para suportar aplicações do protocolo de Controle de Acesso ao Meio (*Medium Access Control* – MAC) no sistema de RoF nesta frequência. Os resultados analíticos mostram que o efeito da rede de fibra óptica causa uma ligeira queda no rendimento, mas ainda assim, pode facilmente ser aplicado.

## 3.2 Software de simulação – CST

Em vários ramos da engenharia, principalmente na engenharia elétrica no ramo das telecomunicações, o emprego de ferramentas computacionais, tem se tornado frequente em simulações. A procura de estruturas requisitadas em projetos e dimensionamentos, faz parte da atual tecnologia a ser obtida por estes serviços. Entre elas, se encontram as FSS.



Como tais simulações requerem um esforço computacional de qualidade, buscam-se sistemas que possuem este perfil. Existem já, comercialmente alguns (softwares para grandes aplicações, que suprem esta demanda. Estes simuladores utilizam técnicas numéricas conceituadas e muito utilizadas no eletromagnetismo, no caso das FSS. Após o modelamento destes dispositivos, é necessário que, por exemplo, utilizando uma técnica híbrida tipo RGNN+MOBA, treinada e corrigida com as restrições de projeto, se obtenha estruturas robustas e eficazes.

Os projetos e simulações desta tese são baseados no *Microwave Studio Suite* da (*Computer Simulation Technology – CST*) \*, que é um software de simulação eletromagnética de alto desempenho.

### 3.3 Considerações Finais

As antenas de microfita podem ser projetadas de forma a favorecer uma variedade de parâmetros de interesse. Caso se queira maior ganho, uma largura de banda maior, tipos diferentes de polarizações ou ser um sistema que opere em banda dupla ou mesmo uma antena de banda ultra larga.

Em anos recentes a procura de antenas de alto ganho tem apresentado problemas para aquelas que não utilizam FSS com *patches*, por apresentarem baixa diretividade e banda estreita devido as perdas no dielétrico do substrato devido as ondas de superfícies. Então para melhorar o ganho (diretividade), muitas pesquisas vem tendo este foco tem e esta melhoria tem sido obtida com antenas de elementos periódicos, ou seja FSS [46].

---

\* cst.com, "CST -Computer Simulation Technology", 2016. [Online]. Available: <https://www.cst.com/>. [Accessed: 08- Jan- 2016]

## Trabalhos Correlatos

---

*A maioria dos tipos de problemas de engenharia pode ser classificada como problemas de análise ou de síntese. No campo das Antenas também não é diferente. A análise de uma antena aborda um projeto, dimensionamento em busca de uma determinada aplicação e objetivo para uso em determinado serviço. Utiliza-se técnicas vigentes conhecidas, com formulação analítica adequada, simulações e/ou medições, entende-se sua operação e características de desempenho. A síntese da antena é o reverso da análise, ou seja, na verdade se tem algo definido a priori e bem conhecido, porém é necessário modificações daquilo existente, para aplicações em outras situações.*

### 4.1 Introdução

A otimização aplicada com os métodos de síntese, é um ramo da matemática e da análise numérica. Quase todo problema de engenharia, ciência, economia e mesmo social pode ser formulado como um processo de busca otimizada. Sendo ele um problema de pesquisa simples e desta forma podendo ser resolvido por métodos tradicionais de otimização baseados em análise matemática. Por outro lado, a maioria dos problemas é muito difícil e deve ser resolvido usando abordagens baseadas em análise [47]. Logo, um método que minimize o tempo demandado para simulação dos projetos, pode assim, economizar tempo e dinheiro [48].

Este desenvolvimento tem possibilitado avanços substanciais inclusive em áreas mais tradicionais da engenharia, especialmente, em engenharia de antenas, caracterizando um crescente emprego de modelos de otimização como paradigmas para problemas de tomada de decisão em projetos de estruturas eletromagnéticas, tais como, superfícies seletivas de frequência (FSS), atuando principalmente como filtros. Também se destacam os simuladores de campo eletromagnético tridimensional de onda completa, que possibilitam a análise de estruturas complexas, e viabilizam a substituição do processo de projeto experimental iterativo [11].

Dentro deste contexto, a Computação Bio-inspirada (*Bioinspired Computing* – BIC) se apresenta promissora e eficiente, onde muitos métodos computacionais tradicionais falham e consiste em novo mecanismo para suprir as dificuldades impostas no desenvolvimento de determinado

projeto [49, 50]. Com isso, este trabalho apresenta um estudo acerca de um dos algoritmos BIC mais utilizados na atualidade, que é o Algoritmo Multiobjetivo do Morcego (*Multiobjective Bat Algorithm* – MOBA), proposto em 2011 por Xin-She Yang [10].

O controle da propagação de ondas eletromagnéticas (EM), através de superfícies ou camadas de fronteira, é um assunto de grande interesse em pesquisas no âmbito do eletromagnetismo aplicado [17]. É nesse cenário que as Superfícies Seletivas de Frequências (FSS) se destacam [51, 52], devido a sua capacidade de controlar características como intensidade, polarização e fase de propagação da onda em determinadas faixas de frequência. Isso justifica o desenvolvimento de técnicas para análise, projeto e o desenvolvimento de novas formas geométricas de FSS para aplicações em diferentes padrões de frequências e sistemas [53, 54]. O fato desses algoritmos lidarem eficientemente com problemas arbitrários de otimização e, serem quase sempre, auto organizáveis, adaptáveis e tolerantes a defeitos aleatórios, justifica o crescente interesse por parte dos pesquisadores da comunidade do eletromagnetismo [55].

## 4.2 Dinâmica da Síntese

No estado da arte, existe uma vasta literatura na qual é possível se verificar que as técnicas híbridas multiobjetivo de otimização bioinspirada são capazes de prover rápida convergência para a solução da função objetivo. E que também, viabilizam a redução substancial no tempo demandado para processamento computacional das propriedades eletromagnéticas dos dispositivos investigados, o que possibilita maior flexibilidade e precisão nos resultados obtidos [11, 12, 13, 15, 48, 56].

Estas técnicas de otimização, no entanto, são bastante exploradas em projetos na faixa de micro-ondas, sendo ainda pouco exploradas em sistemas que operem em frequências mais elevadas. Dessa forma, os objetivos do processo de síntese desenvolvido nesta pesquisa, consistem em sintonizar a frequência de ressonância e a largura de banda de operação da FSS *patch* losango para aplicações no sistema de comunicação por difusão de mm-Wave, padrão IEEE 802.15.3c, onde objetiva-se que este dispositivo seja capaz de ressonar em  $f_r = 60$  GHz com uma largura de banda de  $BW = 30$  GHz. Contudo, esta faixa de frequências é bastante explorada para possíveis aplicações do novo padrão de comunicação de dados de quinta geração celular, sistema 5G [57]–[62].

## 4.3 Revisão Analítica

As redes sem fio de última geração devem oferecer suporte as comunicações e confiabilidade de baixa latência para gerenciar inteligentemente um grande número de dispositivos da Internet

das Coisas (*Internet of Things* – IoT), em tempo real, e dentro de um ambiente dinâmico. Essa necessidade de requisitos rigorosos de qualidade de serviço (*Quality of Service* – QoS) de comunicação, só podem ser alcançadas através da integração de noções fundamentais de inteligência artificial (*Artificial Intelligence* – AI) e aprendizado de máquina na infraestrutura sem fio e nos dispositivos do usuário final. Neste contexto, se torna necessário um conhecimento abrangente que forneça os principais conceitos de máquina de Redes Neurais Artificiais (*Artificial Neural Networks* – ANN) e suas possíveis aplicações nas comunicações sem fio [63].

As ANN têm atraído o interesse de pesquisadores da área de engenharia de antenas, com perfil modificado por FSS, para projeto de suas dimensões físicas. Bem como, para dimensionar arranjos de dispositivos ressonantes por possibilitar um tratamento simultâneo de diversos parâmetros da estrutura. E, a partir de um conjunto de restrições, atender aos objetivos do projeto, garantindo uma modelagem precisa e com baixo custo computacional.

Apesar de existirem redes neurais mais simples para modelagens de arranjos de FSS, para melhorar a eficiência do projeto e na fase de otimização das estruturas, novas abordagens mais apuradas, para estes projetos tem sido desenvolvidas e, dentre elas, surges as redes neurais com função de base radial (*Radial Basis Function Neural Network* – RBFNN) [64] e as redes neurais de regressão geral (*General Regression Neural Networks* – GRNN). Dentro deste contexto, ambas as redes neurais buscam possibilitar redução drástica no tempo do processamento computacional e mantendo a precisão da solução.

Além destas metodologias, algoritmos meta-heurísticos multiobjetivos também se destacam em projetos de FSS, tal como investigado por C. Moreno *et al* [65], no qual foi aplicado um algoritmo genético multiobjetivo para projeto de uma nova estrutura de antena bowtie, com aplicação em banda ultra larga (*Ultra Wide Band* – UWB), isso foi alcançado através da otimização do perfil da impedância de carga e do ângulo de sinalização da antena. Ao final do projeto, foi fabricado um protótipo e as simulações numéricas foram validadas através de medições.

## 4.4 Considerações Finais

Os algoritmos de inspiração biológica (BIC) recentemente, tornaram-se ferramentas de otimização usuais para lidar com problemas complexos de dimensionamento, principalmente em sistemas de telecomunicações. Com o avanço constante das propostas computacionais, tanto os cientistas e engenheiros, já começaram a utilizar estes algoritmos devido a suas vantagens sobre os métodos convencionais. Sendo que, uma das mais importantes características, é pelo fato de serem flexíveis e diretos em aplicações em engenharia [66]. Estes tipos de projetos em

telecomunicações tendem a ser complexos e de larga escala, portanto com alto consumo de computação, conforme é analisado por Yang *et al* [67]. Tais questões se tornam sempre mais desafiadoras devido às crescentes demandas de largura de banda, bem como serviços sem interrupção em comunicações de redes sem fio, além das restrições de qualidade de serviço (QoS) para assinantes.

# Técnicas de Otimização

---

*Algoritmos meta-heurísticos são muitas vezes inspirados na natureza, e agora eles estão entre os algoritmos mais utilizados para otimização, pois possuem muitas vantagens sobre os algoritmos de otimização convencionais. A eficiência dos algoritmos meta-heurísticos pode ser atribuída ao mimetismo dos melhores recursos da natureza, especialmente a seleção dos mais aptos em sistemas biológicos que evoluíram pela seleção natural ao longo de milhões de anos. Estas abordagens meta-heurísticas demonstraram uma grande expectativa e notoriedade nos últimos anos [68].*

## 5.1 Introdução

Os algoritmos metaheurísticos, inspirados na natureza, são abordagens econômicas bem conhecidas para resolver vários problemas difíceis de otimização. A inspiração dos algoritmos pode ser do sistema biológico natural, evolução e/ou atividades humanas, comportamento em grupo de animais, etc. Por exemplo, o cérebro humano biológico inspirou a proposta de rede neural artificial (ANA). Esses algoritmos tem sido muito eficazes e eficientes na solução de problemas de otimização do mundo real, melhor do que os algoritmos convencionais. Principalmente, devido à sua capacidade de lidar efetivamente com problemas altamente não-lineares e complexos, especialmente em ciências e engenharia [69].

A otimização de um projeto na engenharia, geralmente diz respeito a vários objetivos, os quais são geralmente complexos, altamente restritivos e que normalmente, possuem metas tão diferentes que freqüentemente conflitam entre si. Que às vezes, e ainda assim, são realmente ótimas soluções que existem, mesmo que algumas trocas e aproximações são frequentemente necessárias [70]. Além dessa complexidade, um problema em determinado projeto está sujeito a várias restrições limitadas por códigos de projeto, por padrões, por propriedades do material ou por escolha dos recursos e custos disponíveis. Algoritmos meta-heurísticos são muito poderosos ao lidar com esse tipo de otimização [70, 71, 72].

A evolução da computação, por outro lado, tem possibilitado avanços substanciais em pes-

quisas relacionadas à engenharia e em projetos industriais. Nestas áreas, o emprego destas ferramentas tem se intensificado para simulação e obtenção de determinados parâmetros dos sistemas e dispositivos investigados [66]. Todavia, a crescente demanda por precisão e o aumento gradativo da complexidade das estruturas e sistemas, resulta num processo de simulação cada vez mais demorado, pois a avaliação de um único critério pode consumir várias horas, vários dias ou até mesmo semanas. Logo, um método que minimize o tempo demanda para simulação e otimização dos projetos, pode assim, economizar tempo e dinheiro [49].

É dentro deste contexto que a computação bioinspirada (BIC) se apresenta precisa e eficiente, onde muitos métodos computacionais tradicionais falharam e consiste em um novo mecanismo para suprir as dificuldades impostas no desenvolvimento de determinado projeto [73, 74]. Com isso, este trabalho apresenta um estudo acerca de um dos algoritmos BIC mais utilizados na atualidade, o algoritmo multi-objetivo do morcego (*Multiobjective Bat Algorithm* – MOBA), proposto em 2011 por Xin-She Yang [70].

## 5.2 Algoritmos Evolucionários Multiobjetivos – MOEA

Em otimização e síntese de FSS e de outras estruturas eletromagnéticas, normalmente se trata, com funções objetivo altamente não lineares e com um grande número de parâmetros de otimização. Além disso, para muitos problemas eletromagnéticos, as funções objetivo se manifestam com comportamento epistático (que se sobrepõe ao outro) devido ao forte acoplamento mútuo e outras efeitos de propagação, exigindo uma otimização simultânea dos parâmetros de *design* [75].

Além disso, a maioria dos sistemas eletromagnéticos complexos precisam ser modelados numericamente, resultando em funções objetivo que não têm derivadas prontamente disponíveis. Para tais problemas, as técnicas computacionais evolutivas podem produzir soluções robustas otimizadas globalmente que, de outra forma, não seria possível, usando a otimização de pesquisa local tradicional baseada em métodos com gradiente, por exemplo. Essas técnicas probabilísticas, coletivamente são conhecidas como algoritmos evolutivos (*Evolutionary Algorithms* – EA), e tendem emular, de uma maneira ou de outra, o modelo da evolução natural em computador.

O processo de Otimização trabalha em torno de um problema complexo em busca da solução ideal. A grosso modo, existem três mecanismos de procura que são: as técnicas Analítica, de Enumeração e Heurística. A técnica Analítica se baseia em análise de cálculo. Os algoritmos de busca podem ser guiados pelo uso do gradiente levando a uma solução mínima local. Pesquisa aleatória e de Enumeração são métodos de pesquisa não guiados, que simplesmente enumeram

o espaço de pesquisa e procura exaustivamente a solução ideal. E por último, tem-se a pesquisa Heurística, a qual é guiada por diversos processos e que, na maioria dos casos, produz soluções de alta qualidade [76]. Os métodos Heurísticos, se referem as técnicas baseadas na experiência para resolver problemas com aprendizagem. Entre estes últimos, pode-se incluir o conjunto de métodos computacionais inspirado na natureza.

Esta pesquisa apresenta um Algoritmo Evolucionário Multiobjetivo (*Evolutionary Algorithm* – MOEA) desenvolvido a partir do MOBA [70]. Inicialmente, foi realizada uma investigação eletromagnética (EM) acerca da nova geometria para o filtro, denominado de FSS *patch* losango, onde foram realizadas simulações computacionais utilizando o software computacional HFSS, que aplica o método (FEM) para análise de onda completa das propriedades EM de estruturas ressonantes.

Os passos seguintes do processo de projeto e síntese da estrutura consistem na otimização das dimensões geométricas da célula unitária do dispositivo, que traz por objetivos sintonizar sua frequência de ressonância em  $fr = 60.0$  GHz e largura de banda em  $BW = 30.0$  GHz, especificamente, para aplicações nas frequências pertencentes ao padrão IEEE 802.15.3c [77].

## 5.3 Técnicas de Otimização Metaheurística Híbrida

O processo de otimização, basicamente, consiste em minimizar o esforço computacional requerido para maximizar as vantagens desejadas no projeto [78], ou seja, se busca por soluções que resultem no valor mínimo ou máximo da função custo (ou função objetivo). A metodologia empregada no processo de otimização desenvolvido neste estudo, consiste no emprego de uma rede neural (*General Regression Neural Network* – GRNN) [79], que será treinada pelos dados EM calculados pela técnica numérica empregada, neste caso, o FEM. Nesta disposição, a GRNN torna-se responsável pela operação de análise das propriedades EM da FSS *patch* losango, posteriormente, a rede criará um espaço de busca denominado Região de Interesse (*Region of Interest* – RoI) e nesta região, o MOBA realizará buscas pelas melhores soluções, ou seja, as que atendam a função custo do projeto, caracterizando assim a técnica híbrida.

O processo de otimização desenvolvido neste trabalho, possui uma fase de busca e uma fase de análise, sendo o algoritmo de otimização multiobjetivo (MOBA) o responsável pela operação de busca e a rede neural (GRNN), após ser treinada, é responsável pela operação de análise, resultando em uma interação contínua nesta etapa, como pode ser observado no fluxograma da Figura 5.1. Assim, para cada novo conjunto de parâmetros do projeto que o MOBA retorna, a GRNN efetua a computação necessária e determina o valor de um novo ponto no espaço de



busca na região de interesse. Dessa forma, o objetivo é minimizar a diferença entre a resposta dada pela rede e os valores especificados para o projeto, ou seja [73, 74]:

$$F = [f_1(x), f_2(x)] \quad (5.1)$$

onde,

$$f_1(x) = \|f_{r,desejado} - f_{r,obtido}\| \quad (5.2)$$

e

$$f_2(x) = \|BW_{desejado} - BW_{obtido}\| \quad (5.3)$$

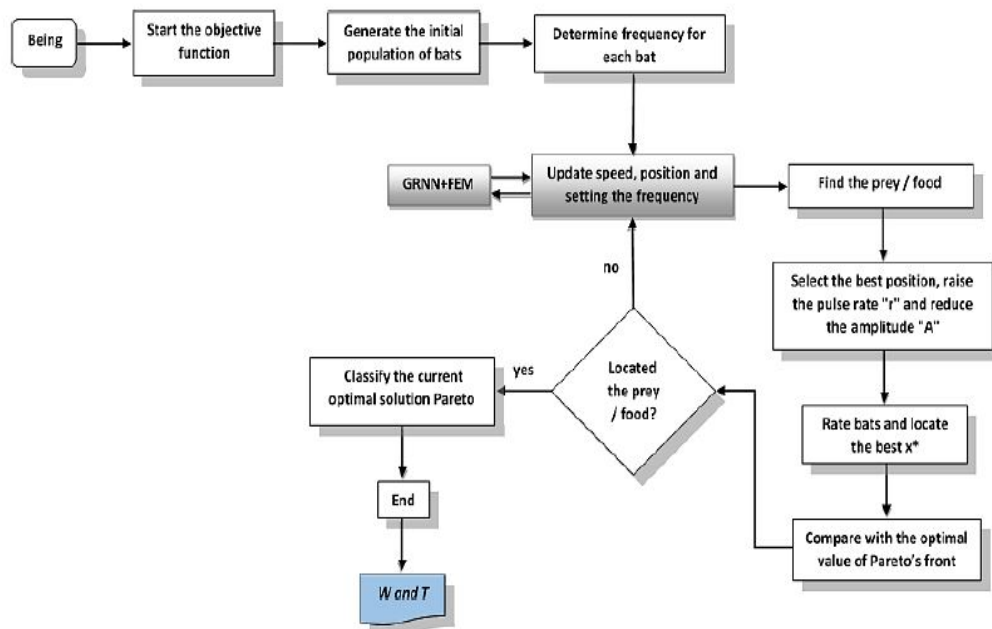


Figura 5.1 Fluxograma de técnica híbrida desenvolvida [16]

A computação evolutiva busca, espelhando-se na evolução natural, melhorar a adaptação dos indivíduos ao ambiente, no decorrer de várias gerações, como no Genetic Algorithm (GA), por meio da análise das propriedades emergentes do voo alçado por algumas espécies de morcegos, nas quais o percurso realizado por esses mamíferos, quando utilizam seu dispositivo de sonar

para ecolocalização, se aproxima da ideia da inteligência de enxames de partículas, muito semelhante ao Particle Swarm Optimization (PSO).

### 5.3.1 Algoritmo Multiobjetivo do Morcego - MOBA

Um exemplo bastante interessante de representação do conhecimento em uma rede neural é encontrado no sistema de sonar biológico de morcegos que ecolocam. A maioria dos morcegos utilizam modulação de frequência (FM) ou sinais *Chirp* para fins de imagem acústica; num sinal FM, a frequência instantânea do sinal varia com o tempo. Especificamente, o morcego usa sua boca para transmitir FM de curta duração o sonar sinaliza e usa seu sistema auditivo como receptor do sonar. Ecos de alvos de interesse são representados no sistema auditivo pela atividade de neurônios que são seletivos para diferentes combinações de parâmetros acústicos. Existem três dimensões neurais principais do sistema auditivo do morcego representação [80]:

Frequência de eco: que é codificada por "local"originário do mapa de frequência da cóclea; ele é preservado por toda a via auditiva como um arranjo ordenado em certas neurônios sintonizados em diferentes frequências.

Amplitude de eco: que é codificada por outros neurônios com diferentes faixas dinâmicas; isto é manifestado tanto como ajuste de amplitude quanto como o número de descargas por estímulo.

Atraso de eco: que é codificado através de cálculos neurais (com base na correlação cruzada) que produzem respostas seletivas de atraso; manifesta-se como ajuste de alcance do alvo.

As duas principais características de um eco alvo para fins de formação de imagem são espectro para a forma do alvo e atraso para o alcance do alvo. A formação de feixe é usada para distinguir entre as propriedades espaciais de um sinal alvo e ruído de fundo. O morcego ecolocalizador ilumina o ambiente circundante transmitindo curta duração sinais de sonar modulados em frequência (FM) e, em seguida, usa seu sistema auditivo um par de orelhas para focar a atenção em suas presas, por exemplo, insetos voadores.

O algoritmo do morcego foi introduzido por Yang em 2010 [69], e se baseia na ecolocalização, ou seja, localização por eco durante voo de algumas espécies de morcegos. Nestas, o morcego emite ondas ultrassônicas, geralmente na ordem de 25 kHz a 150 kHz, pelas narinas ou pela boca, dependendo da espécie, essas ondas atingem obstáculos no ambiente e retornam na forma de eco com frequência superior a emitida, pois as velocidades do morcego e do eco se somam.

Com base no tempo de atraso e na frequência relativa dos ecos, os morcegos percebem se

há obstáculos no caminho, assim como suas distâncias, formas e velocidades relativas, o que é especialmente útil para caçar insetos voadores. Entretanto, espécies de morcegos com outros hábitos alimentares, também se utilizam bastante desse sentido.

Por questões de simplicidade, foram idealizadas as seguintes regras para desenvolvimento do código computacional:

- i Todos os morcegos fazem uso da ecolocalização para perceber e calcular a distância além de conhecer a diferença entre sua comida (presa) e condições de limite no espaço onde ele se encontra;
- ii Os morcegos percorrem o espaço de busca com velocidade  $v_i$  e na posição  $x_i$  (onde  $x_i$  é uma solução para o problema), com uma frequência fixa,  $f_{\min}$  ou comprimento de onda  $\lambda$ , variando o comprimento de onda  $\lambda$  (ou a frequência  $f$ ), e amplitude do som emitido  $A_{\min}$ , ao se buscar por presas. Eles podem ajustar automaticamente o comprimento de onda  $\lambda$  (ou frequência) de seus pulsos emitidos e ajustar a taxa de emissão de pulso  $r \in [0, 1]$  dependendo da proximidade do alvo.

Embora a amplitude possa variar de várias maneiras, assume-se normalmente que a amplitude varia na faixa  $[A_{\min}, A_{\max}]$ .

#### A - Movimento Computacional dos Morcegos

É gerada aleatoriamente uma população de morcegos, inicialmente, respeitando as regras de posicionamento,  $x_i$ , e velocidade,  $v_i$ , no espaço de busca n-dimensional.

Tal como ocorre no Algoritmo Genético (GA), a população é avaliada e classificada de acordo com sua aptidão para solução da função objetivo especificada.

As novas soluções,  $x_i^t$ , e velocidades,  $v_i^t$ , na iteração,  $t$ , são dadas por [4]:

$$f_i = f_{\min} + (f_{\max} - f_{\min})\beta \quad (5.4)$$

$$v_i^t = v_i^{(t-1)} + (x_i^t - x_*)f_i \quad (5.5)$$

$$x_i^{(t-1)} = x_i^{(t-1)} + v_i^t \quad (5.6)$$

onde  $\beta$  é um valor escalar aleatório com distribuição uniforme,  $\beta \in [0, 1]$  e  $x_*$  é a melhor

localização (solução) encontrada após a comparação com as outras soluções entre todos os morcegos na iteração corrente. Inicialmente, a frequência de cada morcego é distribuída aleatoriamente entre  $[f_{min}, f_{max}]$ .

Com os parâmetros de frequência, velocidade e posição dos morcegos sendo atualizados, a próxima etapa é avaliar a taxa de emissão de pulso emitida por cada morcego. Em seguida, é realizada uma comparação da taxa de emissão de pulso,  $r_i$ , com um ruído aleatório (gerado pela função *rand*), se a taxa de emissão de pulso possuir um valor inferior a este ruído aleatório, quer dizer que o  $i$ -ésimo morcego está distante da solução. Assim, se executa uma busca local, dessa forma, atribuindo flexibilidade ao projeto, esta pode ser implementada utilizando diversas estratégias, de acordo com a adequação ao projeto.

A busca local, neste caso, sorteia uma solução entre as melhores e uma nova solução para cada morcego é gerada localmente através do chamado passeio aleatório:

$$x_{novo} = x_{anterior} + \xi A^t \quad (5.7)$$

onde  $\xi \in [-1, 1]$  é um número aleatório uniformemente distribuído e  $A^t$  é a média da amplitude de todos os morcegos na iteração  $t$ .

Semelhante a Otimização de Partículas de Enxame (*Particle Swarm Optimization* - PSO), o procedimento de atualização das velocidades e posições dos morcegos é similar ao padrão de controle do ritmo e amplitude do movimento das partículas, porém, o algoritmo do morcego considera uma combinação equilibrada da otimização por exame de partículas e a pesquisa por intensidade sonora, controlados pelo volume e taxa de pulsação. Além disso, compara a solução anterior com a atual, para selecionar a melhor solução (melhor valor de aptidão). Compara, também, o valor da amplitude do pulso (volume) com um volume aleatório (*rand*), caso o valor do volume aleatório seja menor do que o valor do volume,  $A_i$  do  $i$ -ésimo morcego, isso significa que este morcego (solução) está mais próximo da presa/alvo (melhor solução).

Com isso, as soluções são aceitas e são atualizadas as taxas de emissão  $r_i$  e amplitude,  $A_i$  na iteração  $t$ , segundo as expressões:

$$r_i^{(t+1)} = r_i^0 [1 - e^{-\gamma t}] \quad (5.8)$$

$$A_i^{(t+1)} = \alpha A_i^t \quad (5.9)$$

onde  $\alpha$  e  $\gamma$  são constantes no intervalo  $0 < \alpha < 1$  e  $\gamma > 1$ , isto é:

$$A_i^t \rightarrow 0, \quad r_i^t \rightarrow r_i^0, \quad \text{com } t \rightarrow \infty.$$

Conforme o morcego se aproxima do alvo, logo, a amplitude  $A$ , do pulso emitido diminui enquanto sua taxa de emissão  $r$ , aumenta. Assim, com  $A_{min} = 0$ , tem-se o momento em que o morcego chegou ao alvo e temporariamente parou de emitir qualquer som. Com isso, os parâmetros  $A$  e  $r$  são atualizados somente se as novas soluções forem melhores que as anteriores, o que significa que os morcegos estão se deslocando no espaço de busca em direção à solução ótima.

A frequência,  $f$ , em uma determinada faixa de frequência  $[f_{min}, f_{max}]$ , de maneira geral, corresponde à faixa do comprimento de onda  $[\lambda_{min}, \lambda_{max}]$ , por exemplo, para [20 kHz, 500 kHz] tem-se a faixa de comprimento de onda variando de 0,7 mm até 17 mm. Por questões práticas de implementação, se utiliza  $[0, f_{max}]$ , e a taxa de emissão de pulso está no intervalo  $r \in [0, 1]$  onde 0 significa que não há emissão e 1 significa valor máximo de emissão.

#### B - Algoritmo Multiobjetivo do Morcego.

O Algoritmo do Morcego Multiobjetivo (*Multiobjective Bat Algorithm* - MOBA) foi reformulado por Xin-She Yang e apresentado em 2010[69]. Por se tratar de um algoritmo que lida com problemas multiobjetivos, duas ou mais soluções são consideradas, tem-se aí que algumas delas podem ser melhores que outras em relação a todos os objetivos considerados, tais soluções são chamadas de soluções não dominadas. Em geral, problemas de otimização multiobjetivo requerem a definição alternativa do “valor ótimo” ou valor de referência. Podendo este “valor ótimo”, ou estes “valores ótimos”, serem aproximados por frentes de “otimalidade”, sendo a frente de Pareto [81] o parâmetro mais aplicado neste tipo de problema.

Como o problema de otimização tratado neste trabalho é referente a minimização da diferença entre os objetivos do projeto e as soluções ótimas constantes na frente de Pareto, as seguintes restrições foram consideradas [73, 74]:

$$Max \quad f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x) \quad \forall x \in \Omega \subset \mathbf{R}^m \quad (5.10)$$

Se  $x_0 \in \Omega$ , tal que  $f_i(x_0) \geq f(x) \forall x \neq x_0 \in \Omega$ , para algum  $i$ , então  $x_0$  é dito não dominado em  $\Omega$ . Todos os pontos  $x_0$  que satisfaçam a propriedade acima são denominados Frente de Pareto.

Na relação de dominação, se  $x_1$  e  $x_2 \in \mathbf{R}$ , onde  $\mathbf{R}$  é uma região de soluções realizáveis, e tem-se que  $x_2$  domina  $x_1$  se  $f(x_2)$  é tomado como sendo parcialmente maior ou maior que  $f(x_1)$ , ou seja,

$$f_1(x_1) \geq f_i(x_2), \quad \forall i = 1, 2, \dots, n \quad (5.11)$$

e,

$$f_1(x_1) < f_i(x_2), \quad \exists i = 1, 2, \dots, n \quad (5.12)$$

caso não haja algum  $x_i \in \mathbb{R}$  que domine  $x_2$ , então  $x_2$  é assumido como uma solução ótima de Pareto.

A Figura 5.2 mostra um exemplo dessa relação de dominação para o problema de otimização investigado neste trabalho. Nela, é possível verificar pontos na forma de cruz que servem para identificar o cruzamento entre largura de banda e frequência de ressonância por iteração da execução do algoritmo. Outrossim, percebe-se dois pontos em destaque, um circundado por um quadrado que corresponde a solução dominada (ou pior caso), e outro circundado por um círculo, que indica a solução não dominada (ou melhor caso), sendo esta a solução dominante de todas as demais, e que corresponde a solução ótima da frente de Pareto.

O conjunto de todas as soluções não dominadas definem a fronteira ótima de Pareto, obtida essa fronteira, o “decisor” escolhe a solução mais adequada (ou solução *tradoff*) que atenda aos objetivos do projeto.

Por simplicidade, foram realizadas somas ponderadas para combinar os objetivos do projeto [70]:

$$f = \sum_{k=1}^K W_k f_k, \quad \sum_{k=1}^K W_k = 1 \quad (5.13)$$

Os pesos são gerados aleatoriamente a partir de uma distribuição uniforme, com isso, há variação de pesos suficiente para se garantir a diversidade nas soluções e, conseqüentemente, a correta aproximação em relação a frente de Pareto.

Os seguintes parâmetros de ajuste do algoritmo foram utilizados para configuração do MOBA:  $\alpha = \gamma = 0,9$ ,  $N_{Pareto} = 60$  (número de pontos na frente de Pareto),  $f_{min} = 1,5$  (frequência mínima),  $f_{max} = 3,0$  (frequência máxima),  $d = 2$  (dimensão das variáveis de procura), e  $n = 50$  (tamanho da população).

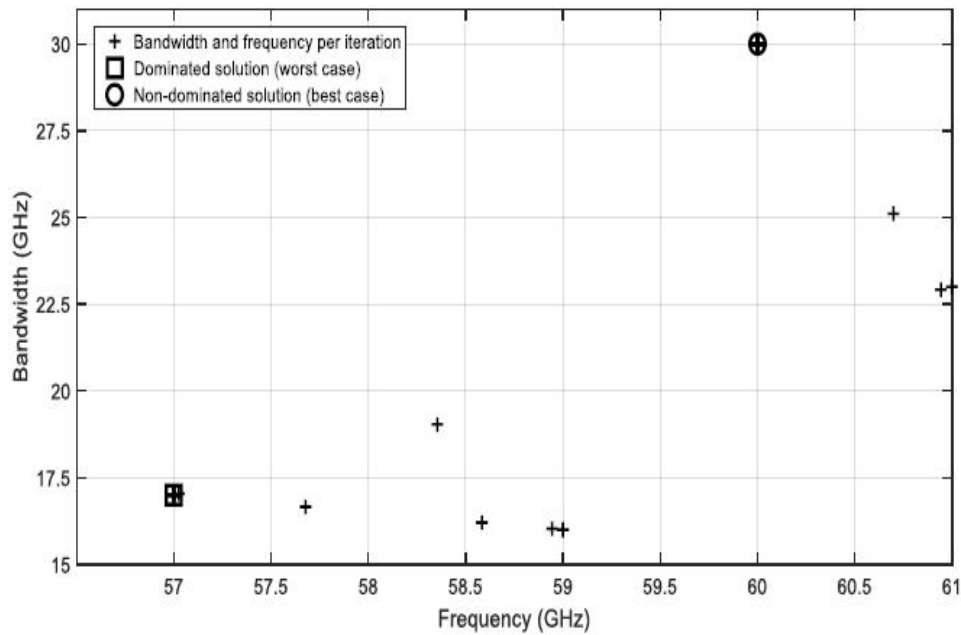


Figura 5.2 *Relação de dominação para a função custo do problema* [16]

A Figura 5.3 mostra a evolução do fitness no processo de síntese via MOBA para a estrutura investigada. Durante esse processo, o valor da função custo apresenta uma diminuição gradativa em relação ao seu valor inicial, o que remete a aproximação da solução ótima para a função custo. A linha pontilhada representa a média do fitness para a população de morcegos e a linha sólida representa a melhor solução individual. O algoritmo necessitou de apenas 38 iterações para convergir para solução ótima. O tempo total de pra rodar a técnica híbrida desenvolvida (GRNN + MOBA) foi de  $\approx 327,966$  s.

A Tabela 5.1 apresenta alguns detalhes do tempo de execução de alguns passos do código. As simulações foram realizadas em computador com CPU Clock 2,53 GHz e 6 GB de RAM.

Os parâmetros ótimos retornados pelo MOBA para as dimensões da célula unitária da FSS *patch* losango, foram:  $T_x = 1,85$  mm e  $T_y = 3,7$  mm;  $W_x = 1,75$  mm e  $W_y = 1,75$  mm.

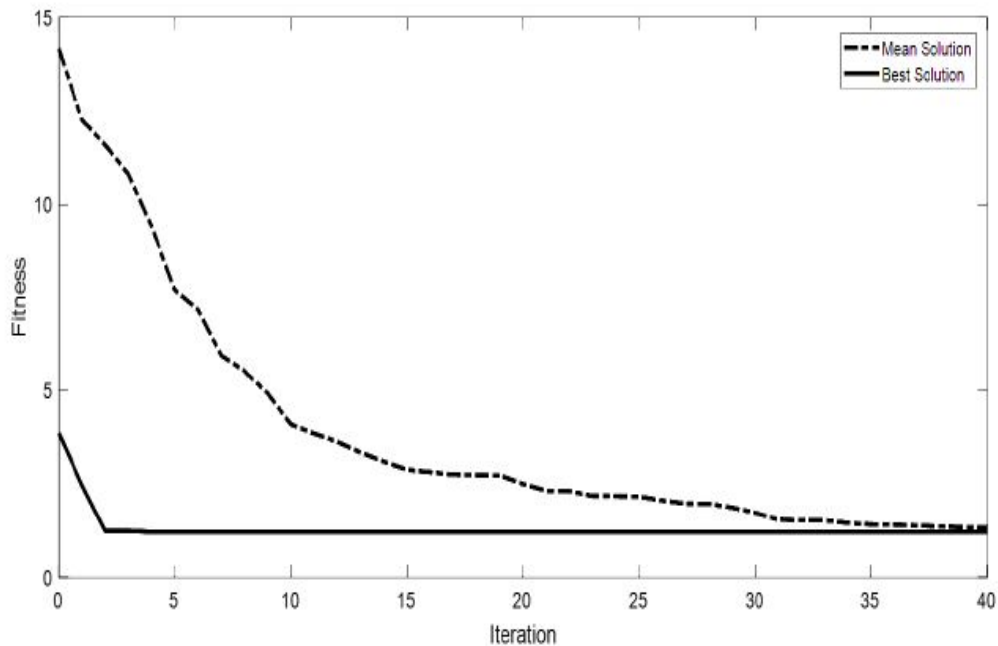


Figura 5.3 Evolução do fitness no processo de síntese via MOBA, estrutura otimizada para  $f_r = 60,0$  GHz e  $BW = 30,0$  GHz [16]

Tabela 5.1 Tempo de execução do processo

Função	Chamadas	Tempo Total (s)
GRNN	38185	30,831
Ajuste de frequência para cada morcego	38185	5,338
Procura por presa (alimento)	60	291,797
Tempo Total de Execução	–	327,966

### 5.3.2 Regressão Generalizada de Redes Neurais

Em 1964 foi introduzida a Generalized Regression Neural Network por Nadaraya [82] e Watson [83], separadamente. E, em 1991, essa rede foi remodelada por Specht [84] para reali-



zar regressões gerais (linear ou não linear), originando a General Regression Neural Network (GRNN), que é derivada das Radial Basis Neural Network (RBFN). A fundamentação teórica da GRNN se baseia no conceito da estimativa não paramétrica, comumente utilizada em estatística [85, 86, 87, 88].

A função de base radial (RBF) forma uma classe de redes neurais artificiais (ANN), que tem certas vantagens sobre outros tipos de redes neurais, como melhor aproximação e recursos, estruturas de rede mais simples e algoritmos de aprendizado mais rápidos. A rede RBF é uma rede de alimentação direta de três camadas totalmente conectada e estabelece a não linearidade os neurônios da camada oculta. A camada de saída não possui linearidade e as conexões da camada de saída tem apenas pesos [89].

Neste tipo de rede, o conhecimento adicional necessário para o ajuste satisfatório da GRNN aos parâmetros de entrada, é relativamente pequeno e pode ser feito sem a inserção de novos dados de entrada por parte do programador [84], ou seja, a GRNN necessita apenas de parte dos dados de entrada para treinamento da rede, sendo desnecessária a backpropagation [90]. Isto faz da GRNN uma ferramenta muito útil para realizar aproximações de funções, previsões e comparações de desempenho em sistemas práticos.

Para o projeto da FSS *patch* losango proposta neste estudo, foi utilizada uma rede GRNN com seis entradas na primeira camada, uma camada intermediária oculta com cinco neurônios e, dois nós de saída referentes à frequência de ressonância e a largura de banda desejada.

A arquitetura da rede desenvolvida é exibida na Figura 5.4.

Para o modelo de GRNN desenvolvido neste trabalho, as entradas e as saídas podem ser representadas como vetores:

$$x = [T_x, T_y, W_x, W_y, \epsilon_r, h]^T \quad (5.14)$$

$$y = [f_r, BW]^T \quad (5.15)$$

O aprendizado da GRNN desenvolvida neste estudo consiste no treinamento da unidade de saída, assim, a rede deve responder ao conjunto de restrições inseridos nas entradas, ou seja, devem ser apresentadas nas saídas valores de  $T_x$  e  $T_y$ , periodicidade da célula unitária, e  $W_x$  e  $W_y$ , altura/largura *patches* losango (metalizações), que atendam aos objetivos do projeto.

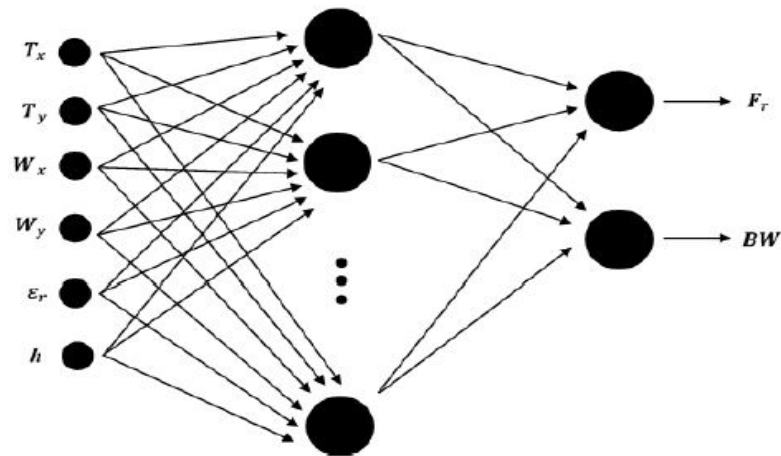


Figura 5.4 Configuração da GNRN

Neste paradigma, o sistema é disposto para descobrir estatisticamente características salientes da população de entrada criando, assim, uma região de interesse (RoI), na qual o MOBA realizará buscas pelos dados estruturais ótimos para a célula unitária da FSS *patch* losango.

A Tabela 5.2 apresenta o pseudocódigo da técnica híbrida (GRNN + MOBA) desenvolvida neste trabalho.

## 5.4 Considerações Finais

Como toda inteligência baseada em algoritmos de enxame, o seu mecanismo de pesquisa é governado pelo seguinte procedimento: um primeiro passo é a capacidade de exploração do espaço de pesquisa (região de interesse) em busca de regiões novas e desconhecidas, para depois ter a capacidade de melhorar as soluções explorando as informações obtidas das soluções existentes. Sendo este algoritmo de otimização um processo iterativo, ele começa com uma semente inicial com o objetivo de alcançar a melhor solução ou a solução ótima do problema em questão [91]. Sabendo-se que o desempenho dependerá em grande parte da configuração de seus parâmetros.

A configuração ideal deve permitir que o algoritmo atinja o melhor desempenho para resolver uma variedade de problemas de otimização. No entanto, os seus parâmetros, para se ter um ajuste promissor, já é em si, um difícil problema de otimização. Embora o algoritmo do morcego

Tabela 5.2 *Pseudo-código*


---

1	<b>Início</b>
2	Inicialize a função objetivo $f(x)$ , $x = (x_1, \dots, x_d)$
3	Inicialize as restrições do projeto
4	Inicialize aleatoriamente a população dada pelas posições dos morcegos $x_i (i = 1, 2, 3, \dots, n)$
5	Determine a frequência $f_i$ para a posição $x_i$
6	Inicialize a taxa de emissão do pulso $n$ e amplitude $A_i$
7	<b>Enquanto</b> $t <$ número máximo de gerações (ou qualquer outro valor de convergência)
8	Consulte a rol gerada pela GRNN
9	Gere novas soluções ajustando a frequência e atualize a velocidade e localização/solução
10	Localize a presa/comida
11	<b>Se</b> $rand > n$
12	Selecione uma solução entre as melhores
13	Gere uma solução local próxima da melhor já escolhida
14	<b>Fim Se</b>
15	Gerar uma nova solução através do voo aleatório
16	<b>Se</b> $rand < A_i \& f(x_i) < f(x_0)$
17	Aceite as novas soluções
18	Eleve o valor de $r_i$ e diminua o valor de $A_i$
19	compare com valor ótimo da frente de Pareto
20	<b>Fim Se</b>
21	Organize os morcegos e selecione o melhor $x$
22	<b>Fim Enquanto</b>
23	Pós-processamentodos resultados e visualização

---

tenha sido proposto recentemente, é uma algoritmo muito poderoso o qual pode apresentar soluções robustas para problemas de baixa dimensão, já existe uma razoável quantidade de variantes deste esquema na literatura [68, 92]. Pois, da mesma forma que como outros algoritmos como o Genético e o PSO, seu desempenho diminui significativamente quando a dimensão do problema aumenta. Entretanto, vários estudos relataram que este algoritmo pode ser eficiente para resolver uma gama diversificada de problemas [93].

## Resultados e Discussão

---

*A metodologia que envolve redes neurais artificiais e eletromagnetismo foi aplicada para modelar o comportamento da FSS patch losango, onde um banco de dados calculado pelo FEM, se fez necessário para garantir o aprendizado da rede, assim, disponibilizando o conhecimento adquirido para futuras utilizações. A junção de redes neurais artificiais a algoritmos de otimização natural, consiste em um método alternativo de otimização de estruturas eletromagnéticas, caracterizando a técnica denominada de Método Híbrido, que tem por fim, viabilizar características como: eficácia, flexibilidade e eficiência computacional. Resultando em uma poderosa ferramenta de otimização na solução de problemas de espalhamento eletromagnético.*

### 6.1 Introdução

Neste trabalho, foi utilizado uma FSS constituída de elementos no formato de *patches* losangos, os quais são distribuídos de maneira a formar uma tela composta de arranjos periódicos de elementos, em dimensões 2D, dispostos sobre um substrato dielétrico. A análise do comportamento desta estrutura, que, mesmo, devido sua simplicidade geométrica, ela pode produzir efeitos eletromagnéticos bastante inesperados e que podem responder como filtros de ondas EM incidentes na mesma. Atuando de forma a bloquear ou deixar passar determinadas faixas de frequências.

A análise eletromagnética, para dar o amparo técnico de seu comportamento, foi realizado através do método numérico das integrações finitas (*Finite Integration Technique* -- FIT) e com o auxílio do software comercial CST®. A metodologia de redes neurais artificiais e o eletromagnetismo foi aplicada para projetar a FSS losango, tendo como base, sua resposta no domínio da frequência, onde um banco de dados, com estas respostas, calculado pelo método numérico empregado, é necessário para garantir o aprendizado da rede, disponibilizando o conhecimento adquirido para futuras utilizações.

Além disso, os modelos de GRNN desenvolvidos proporcionaram soluções rápidas e precisas, com um baixo custo computacional, tornando-se uma técnica atrativa para a síntese de estru-

turas cuja formulação teórica é inexistente ou demanda um elevado custo computacional de implementação e simulação.

Desta forma, foi realizada a síntese da FSS com os elementos previamente definidos, para operação na faixa de frequências pertencentes ao padrão IEEE 802.15.3c, com frequência de ressonância centrada em 60,0 GHz, de maneira a possibilitar operação em banda ultra larga, com largura de banda de 30,0 GHz, a partir da variação da periodicidade do arranjo e do comprimento do lado do losango.

Uma FSS é composta de uma série de elementos que são distribuídos periodicamente com simetria ou não. E que pode ser analisado tecnicamente como *patches* de microfita. Estes elementos servem como células básicas de um arranjo ou conjunto. As características básicas e outras informações pertinentes a projetos, como tipos de configurações, e tipos de substratos são fornecidas em [27].

Estes arranjos de unidades de microfitas, estão sendo amplamente utilizadas nos últimos anos por causa de suas boas características, eles são eletricamente; finos, leves, de baixo custo, flexíveis, etc. No entanto, o desempenho elétrico destas estruturas, sofre de algumas desvantagens, incluindo largura de banda estreita, perdas em rede de alta alimentação, alta polarização cruzada e baixa capacidade de manuseio de energia. Todavia, através de progressos em pesquisas em teoria e tecnologia, algumas dessas desvantagens foram superadas, ou pelo menos aliviadas até certo ponto. Os mercados em rápido desenvolvimento, especialmente na comunicação pessoal (*Personal Communications Systems* – PCS), comunicações móveis via satélite, transmissão direta, área local sem fio redes (WLAN) e sistemas inteligentes de auto-estradas, sugerem que a demanda para antenas em arranjos tipo FSS aumentará ainda mais. Entretanto, a crescente demanda exigirá um maior desenvolvimento deles [28].

A análise apropriada para este tipo de dispositivo, pode ser elaborada para definir o método de dimensionamento que seja bom o suficiente em algumas aplicações de engenharia ou derivar modelos mais gerais através de síntese que são necessárias na otimização através do espaço técnica de configurações de mapeamento de suas dimensões.

## 6.2 Resultados das Simulações da Técnica de Otimização Híbrida

A FSS projetada é do tipo *patch* losango, logo, se trata de um filtro rejeita-faixa para aplicações no padrão IEEE 802.15.3c. Nas simulações computacionais, esta FSS foi considerada, para efeitos de simulações, como sendo impressa em um substrato RO4003 que é um material caracterizado por constante dielétrica  $\epsilon_r = 3,55$  e com tangente de perda  $\delta = 0,0027$  e

as metalizações foram consideradas como condutores perfeitos (PEC). As Figuras 6.1(a) e (b) apresentam os esquemas da célula unitária e o arranjo do dispositivo projetado.

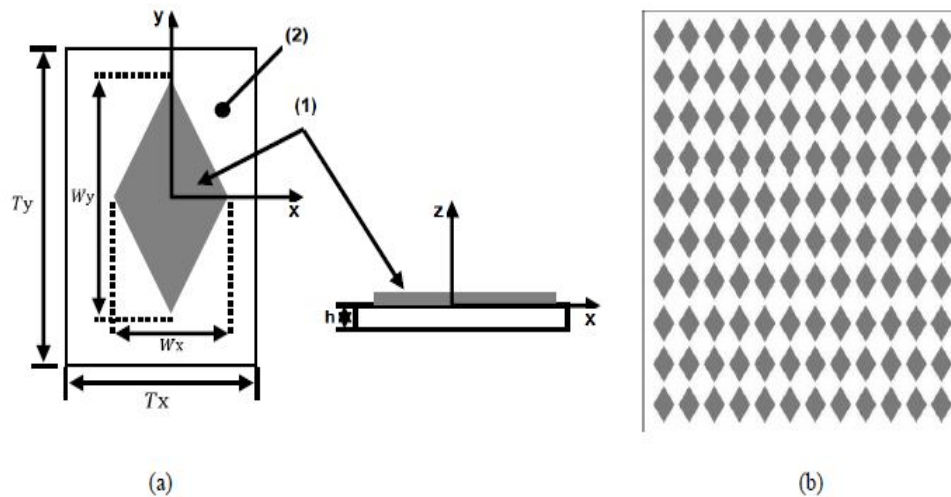


Figura 6.1 *FSS com patch na forma de losango (a) célula unitária e (b) arranjo da FSS com a metalização, na indicação 1, e o substrato RO4003, na indicação 2*

Os parâmetros considerados para o projeto da estrutura são mostrados na Tabela 6.1, onde é possível verificar como foram variados os parâmetros geométricos bidimensionais da célula unitária,  $W$  e  $T$ , bem como o passo considerado na simulação computacional.

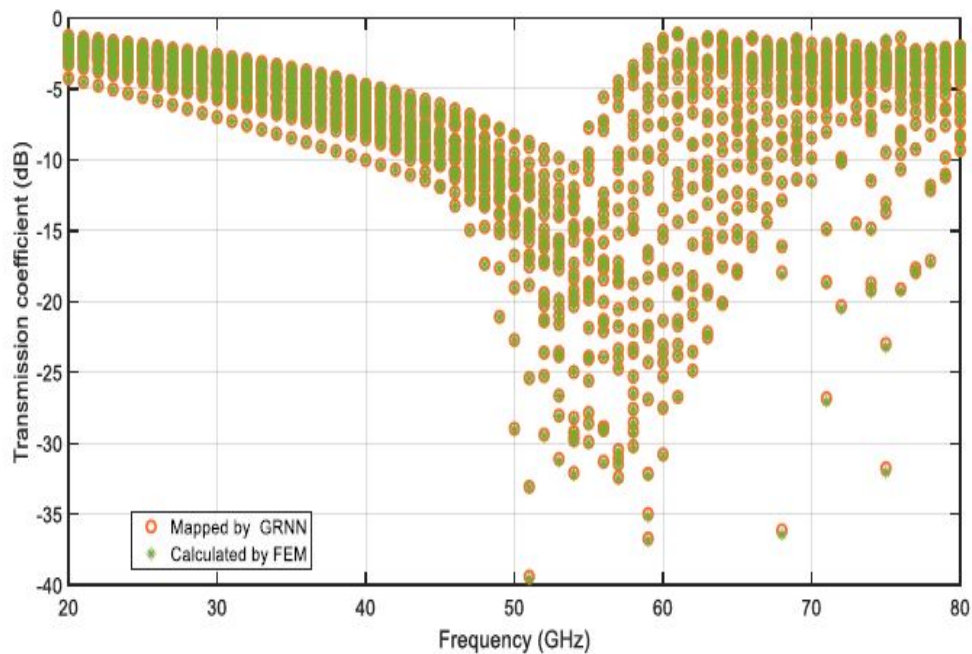
## 6.3 Análise e Discussão

A Figura 6.3 apresenta os dados de entrada referente a matriz de espalhamento do coeficiente de transmissão da FSS *patch* losango, de acordo com os parâmetros estruturais apresentados na Tabela 6.1 e que foram calculados pelo Método dos Elementos Finitos (*Finite Element Method* – FEM). Na figura, a cruz destaca os dados EM que caracterizam a operação da FSS *patch* losango para a faixa de frequências desejada. Outrossim, na mesma figura, é possível se verificar a alta capacidade de mapeamento destes dados e aprendizagem apresentada pela GRNN desenvolvida neste estudo, como pode ser percebido pelos círculos que circundam as cruzes.

Técnicas de inteligência computacional Bioinspirada (BIC) buscam, espelhando-se na evolução natural, melhorar a adaptação dos indivíduos ao ambiente no decorrer de várias gerações. De

Tabela 6.1 *Parâmetros estruturais da FSS com patch de forma losango.*

Parâmetros	Unidades	Valores
Periodicidade do Arranjo	mm	$T_x = [1, 85; 1, 95; 2, 05; 2, 15; 2, 25; 2, 35]$
Periodicidade do Arranjo	mm	$T_y = [3, 7; 3, 9; 4, 1; 4, 3; 4, 5; 4, 7]$
Dimensão do <i>patch</i> (x)	mm	$W_x = [1, 45; 1, 55; 1, 65; 1, 75]$
Dimensão do <i>patch</i> (y)	mm	$W_y = [2, 9; 3, 1; 3, 3; 3, 5]$
Altura do substrato	mm	$h = 0, 5$
Permissividade relativa		$\epsilon_r = 3, 55$

Figura 6.2 *Capacidade de aprendizado e dados de mapeamento de entrada da GRNN [16]*

igual maneira, as técnicas dos Algoritmos Genéticos (*Genetic Algorithms* – GA) por meio da análise das propriedades emergentes do voo alçado de algumas espécies de morcegos, em que o percurso realizado por esses mamíferos, quando utilizam seu dispositivo de sonar para ecolocalização, se aproxima da ideia da Inteligência de Enxames de Partículas (*Particle Swarm Optimization* – PSO).

Dentro deste paradigma, este estudo apresenta uma nova técnica BIC de otimização híbrida multiobjetivo, a qual associa a técnica de Redes Neurais de Regressão Geral (GRNN) ao Algoritmo Multiobjetivo do Morcego (MOBA) aplicada ao projeto e síntese de uma Superfície Seletiva de Frequências (FSS com elementos na forma geométrica de losango. Sendo esta estrutura um arranjo constituído por elementos *patch* o que caracteriza o dispositivo como um filtro rejeita-faixa.

Nas simulações computacionais, o arranjo periódico foi considerado como sendo impresso sobre substrato dielétrico isotrópico RO4303. Este desenvolvimento se deu pela simplicidade da geometria investigada, baixo custo do material do substrato para futura fabricação de protótipos do dispositivo, e por permitir operação em faixa ultra larga de frequências. Os dados eletromagnéticos obtidos para treinamento da GRNN, foram calculados pela análise de onda completa realizada pelo método numérico dos elementos finitos (FEM), com o auxílio do software comercial (High Frequency Structure Simulator – HFSS).

Para validação dos resultados e verificação da consistência computacional da técnica de otimização desenvolvida, foram realizadas novas simulações computacionais usando a mesma técnica do FEM, e a comparação foi feita a partir da Técnica numérica da Integralção Finita (*Finite Integration Technique* – FIT) e com o auxílio do *software CST*®<sup>®</sup>, utilizando os parâmetros estruturais ótimos da célula unitária da FSS *patch* losango, os quais foram calculados pela técnica híbrida GRNN+MOBA, que são:  $W_y = 3,7$  mm;  $W_x = 1,85$  mm;  $T_y = 3,5$  mm e  $T_x = 1,75$  mm.

A Figura 6.3 e a Figura 6.4 apresentam os resultados obtidos pela GRNN desenvolvida para a FSS *patch* losango investigada. Nesta, as linhas pontilhadas indicam a resposta da rede e as demais linhas, diferenciadas por símbolos, representam o conjunto de treinamento da rede. Com isso, verificou-se uma boa concordância entre os resultados obtidos pela técnica híbrida desenvolvida e os calculados pelos métodos FEM e FIT.

A Figura 6.5 mostra o resultado das duas simulações: (1) Método dos Elementos Finitos (*Finite Element Method* – FEM) e (2) Técnica de Integração Finita (*Finite Integration Technique* – FIT). Bem como a técnica híbrida desenvolvida neste estudo para o coeficiente de transmissão da FSS em dB otimizadas em função da frequência de ressonância  $fr = 60,0$  GHz e da largura de banda  $BW = 30,0$  GHz. Os parâmetros ótimos estão apresentados na legenda da figura citada.

A Figura 6.6 mostra o comportamento da variação do comportamento bastante estável quando



se provoca uma mudança no ângulo de incidência da onda, com variação azimutal, ou seja, da incidência que atinge a FSS com o eixo  $x$ . Foi tomado o caso em que a FSS opera em seu estado ótimo.

### 6.3.1 Correção do efeito de borda através de corrente de franja

Uma das características mais marcantes nas configurações de microfita, pelas suas dimensões limitadas, principalmente quando se tem estes elementos atuando como componentes de FSS é o conhecido efeito de bordas. Onde os campos eletromagnéticos sofrem uma dispersão como se fosse uma franja, conforme se observa na Figura 6.7. Este efeito se faz notar ao longo da estrutura metálica do *patch*, e que por conta de suas formas serem variadas, a quantificação deste efeito, de maneira analítica, é muito complexo. O que se pode considerar é que a quantidade de energia dispersa neste franjamento é função, além das dimensões do *patch*, como também da espessura do substrato [27, 29, 94].

Desta forma a frequência de ressonância  $f_r$  e a constante de propagação  $\beta$  ao longo da direção de

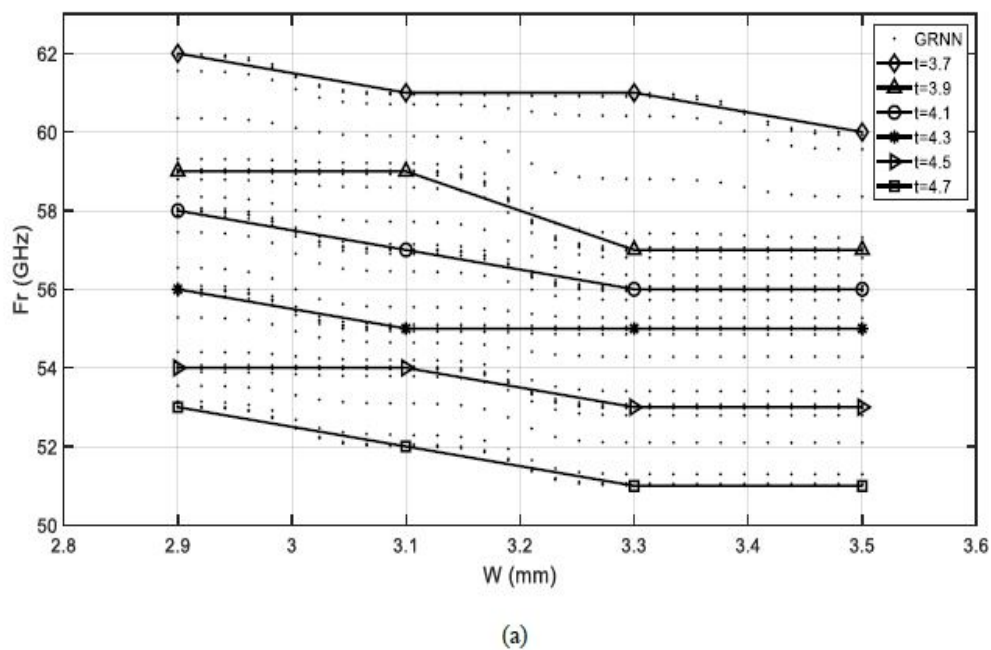
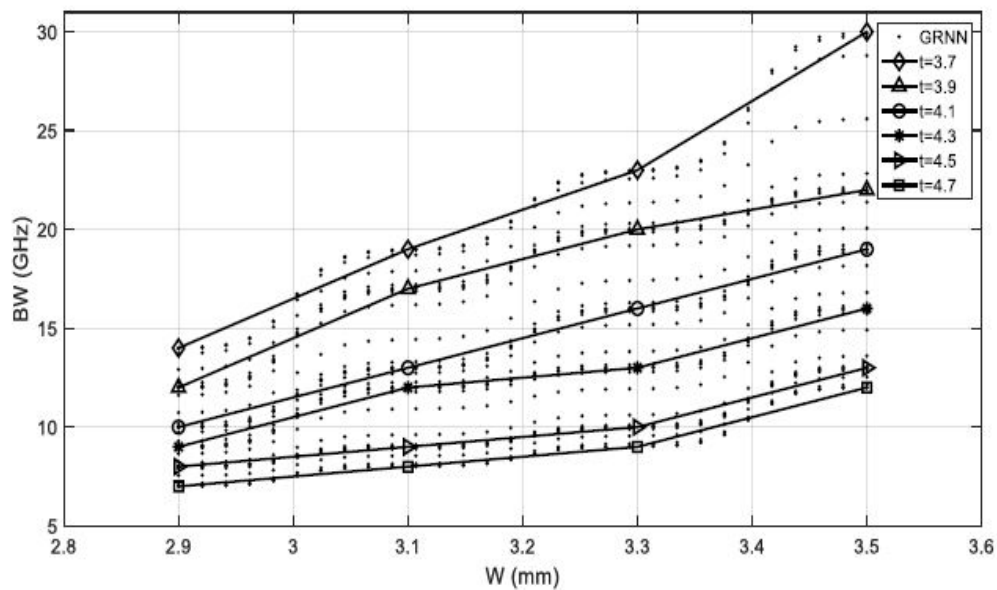


Figura 6.3 Resultados da frequência de ressonância para a rede GRNN [16]

onda é diferente da cavidade ideal devido ao efeito de borda. Os valores reais, frequentemente chamados de eficazes, podem ser obtidos através da correção do efeito de borda. Uma linha coaxial tem efeito nas ondas ao longo da direção longitudinal, porém também surgem efeitos estáticos (*Direct Current* – DC) no plano transversal, por exemplo, capacitância distribuída e indutância; mesmo em altas frequências de micro-ondas até próximo a 30 GHz. Claro que isso é um consequência da distância de separação na solução geral da onda.

Por conseguinte, essa consequência da separação, pode ser aplicada aqui em microfitas. Para um *patch* ressonador a espessura do substrato e sua alta constante dielétrica, garantem que os efeitos nas ondas ocorrem apenas no plano em que o *patch* está localizado. Os efeitos estáticos significam que a distribuição vertical de um campo de franja elétrica nas bordas de um ressonador de *patch* na frequência de micro-ondas, pode ser aproximado pela distribuição vertical do campo da franja elétrica nas bordas do *patch* do capacitor aterrado em DC. Portanto, o problema é encontrar essa capacitância estática que explica os efeitos de borda.

Um dos pontos de partida das formulações é a raiz da fórmula de capacitância de área desenvolvida por Chow *et al* [95]



(b)

Figura 6.4 Resultados da largura de banda para a FSS em função dos parâmetros  $W$  e  $T$  da rede GRNN [16]

$$C = C_f \epsilon_0 \sqrt{4\pi S} \quad (6.1)$$

onde  $S$  é a área da superfície e é igual a  $2A$  onde  $A$  é a área de uma placa,  $C_f$  é o "fator da forma" que para um formato quadrado  $C_f = 0,9$ .

## 6.4 Análise da influência da variação da espessura do substrato

Existe uma certa notoriedade do tipo de influência quanto as formas dos *patches/slots* na formação das FSS. Também, é muito relevante o tipo dos substratos, seja pelo tipo de materiais, sejam dielétricos isotrópicos ou não, sejam variações nas espessuras.

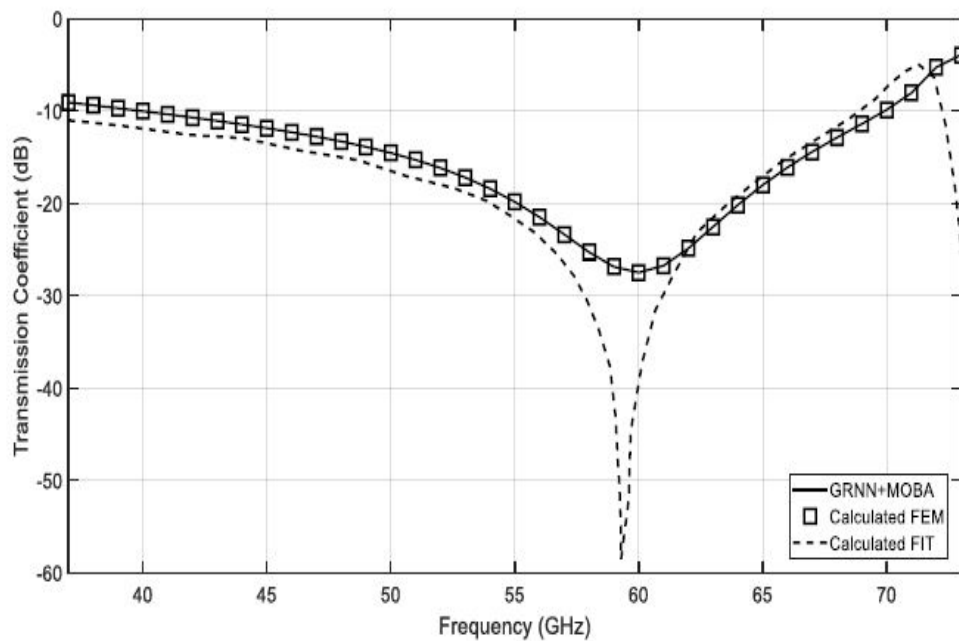


Figura 6.5 Coeficiente de transmissão para a FSS na forma losango com frequência de ressonância  $f_r = 60,0$  GHz e largura de faixa  $BW = 30,0$  GHz otimizada através da técnica MOBA. Os parâmetros estruturais da FSS são  $\epsilon_r = 3,55$ ;  $h = 0,5$  mm;  $T_x = 1,85$  mm;  $T_y = 3,7$  mm;  $W_x = 1,75$  mm; e  $T_y = 3,5$  mm [16]

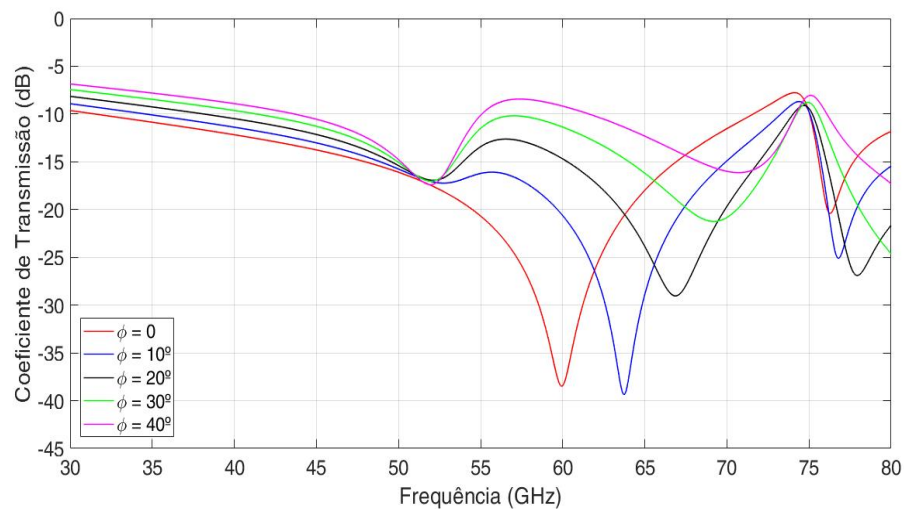


Figura 6.6 Comportamento da mudança que ocorre quando o ângulo de incidência  $\phi$  varia ao atingir a FSS.

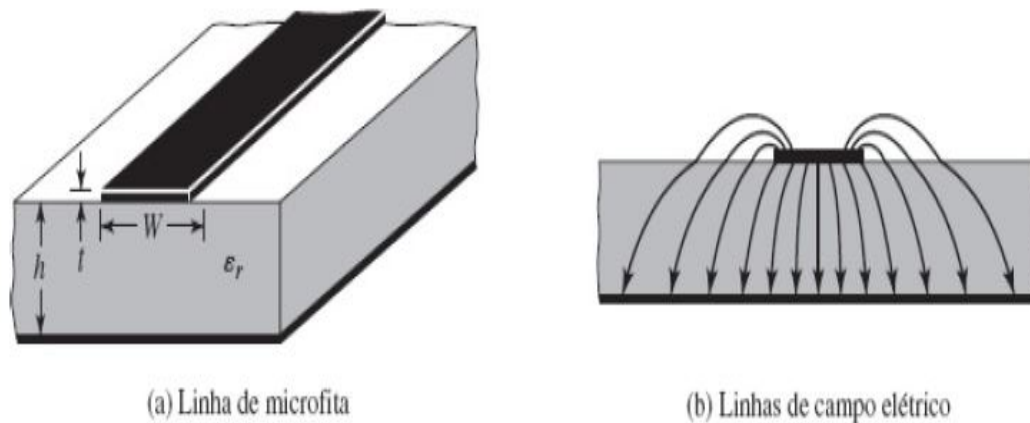


Figura 6.7 Efeito da dispersão dos campos em elementos de células unitárias de FSS

A estrutura da unidade celular a qual podem ser *patches* ou perfurações (*slots*) no substrato, sendo que os primeiros são fixados no substrato é a base para as FSS. Estas estruturas podem ser distribuídas em repetições simétricas ou não e atuam eletromagneticamente em ondas incidentes dando efeitos e configurações bastante diversificada. Isto foi tratado no Capítulo 2, e agora se apresenta uma análise da sua influência quanto a espessura.

Neste trabalho, apresenta-se também resultados obtidos, da variação da espessura do substrato, que é um material dielétrico RO4003 cuja constante dielétrica é 3,55 e possui tangente de perda  $\delta = 0,0027$ , na configuração da FSS que se está utilizando.

Na Tabela 6.2 é apresentada as simulações da FSS projetada, em que se observa as variações conforme o aumento gradual da espessura da camada do substrato.

Tabela 6.2 *Frequência de ressonância ( $f_R$ ) e largura de banda ( $BW$ ) para cada espessura do substrato*

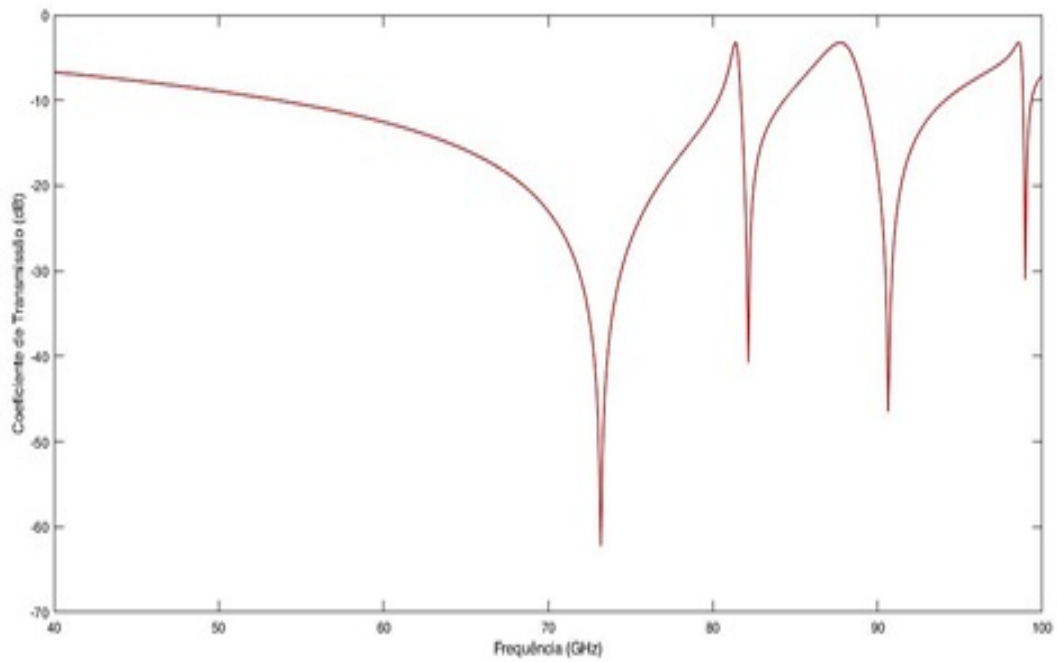
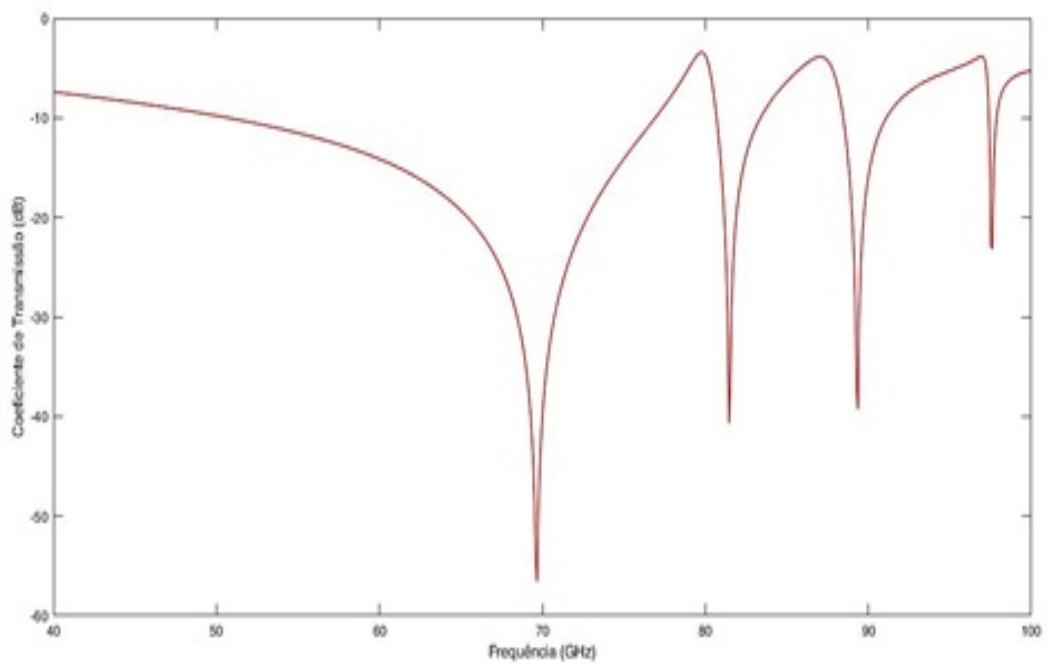
<b>Espessura</b>	<b><math>f_{R1}</math> (GHz)</b>	<b><math>WB_1</math> (GHz)</b>	<b><math>f_{R2}</math> (GHz)</b>	<b><math>WB_2</math> (GHz)</b>	<b><math>f_{R3}</math> (GHz)</b>	<b><math>WB_3</math> (GHz)</b>
0,203 mm	73,200	26,796	82,160	2,619	90,640	4,842
0,305 mm	69,680	26,248	81,440	2,703	89,360	2,647
0,406 mm	66,640	24,114	80,800	3,283	88,320	1,786
0,508 mm	63,680	21,410	80,080	4,631	87,520	1,690
0,813 mm	57,200	13,786	77,920	10,213	85,440	1,800
1,524 mm	50,080	10,818	71,440	13,286	80,480	3,231

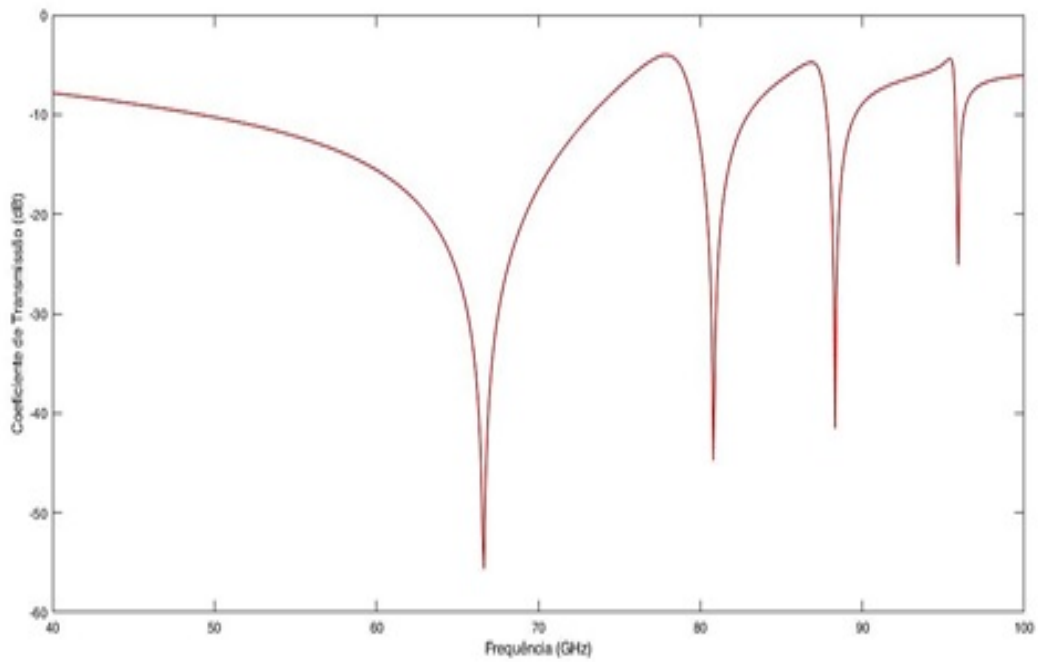
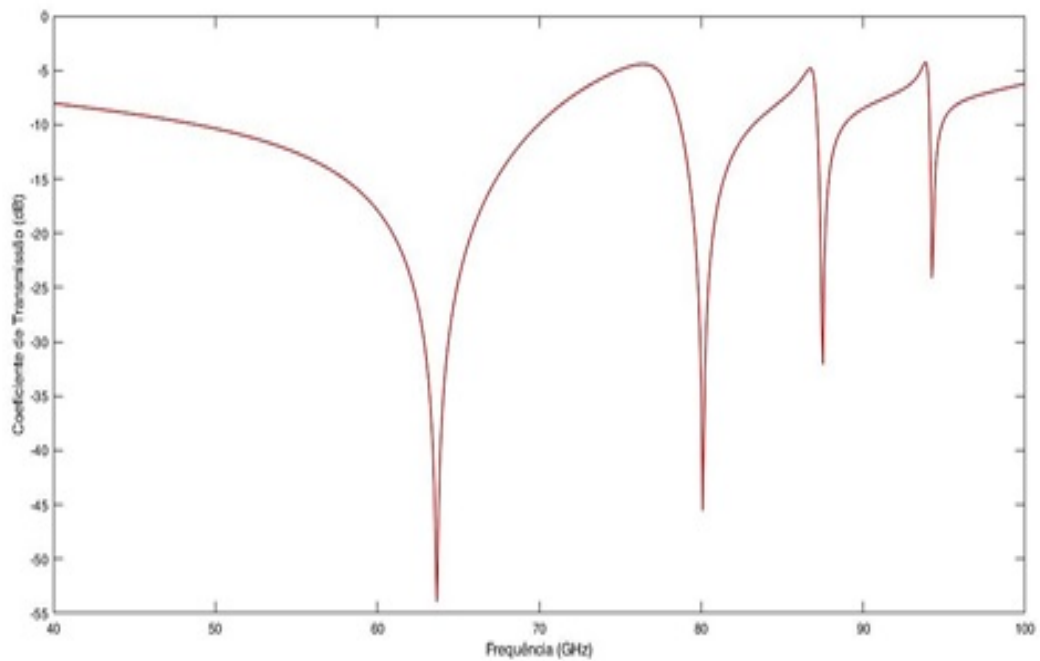
Na Tabela 6.3 é apresentada as influências da variação do substrato para a FSS, dentro dos parâmetros ótimos.

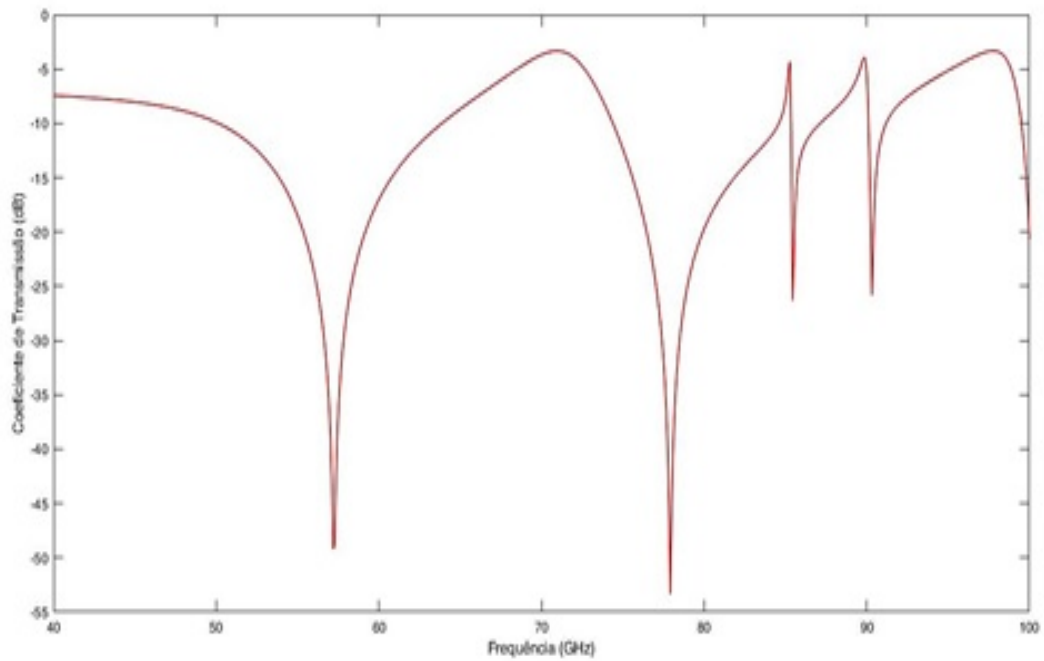
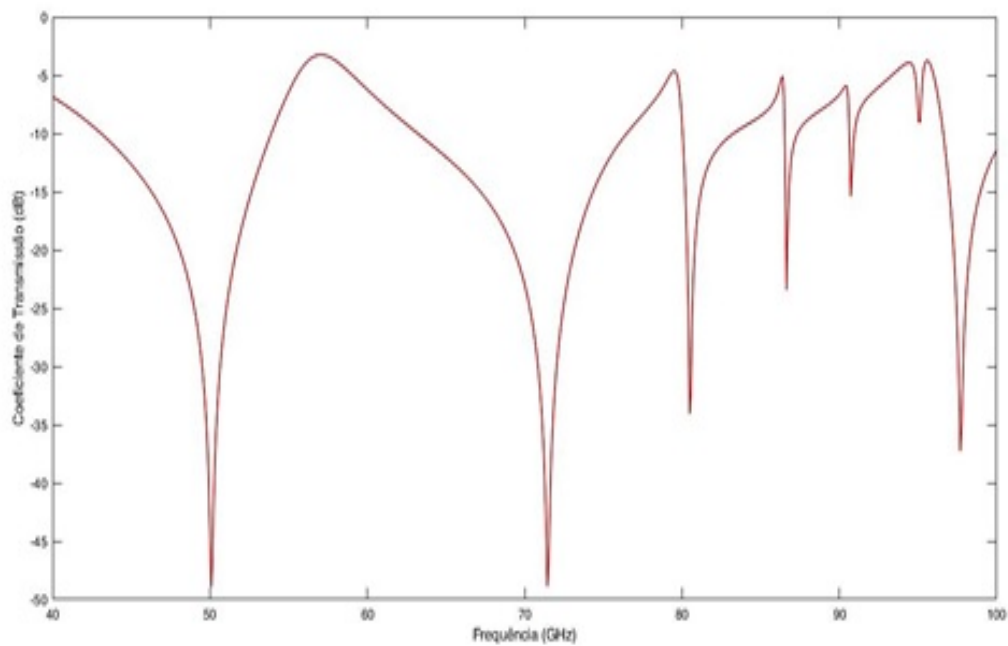
Este comportamento é observado nas Figuras 6.8, 6.9, 6.10, 6.11, 6.12 e 6.13, e desta forma, ou seja, a resposta da variação da espessura do substrato, é que foi sintetizado na Tabela 6.2.

Nas Figuras 6.14, 6.15, 6.16, 6.17, 6.18 e 6.19), observa-se este comportamneto da variação da espessura do substrato e que está sintetizado na Tabela 6.3, ou seja utilizando os valores otimizados.

A Figura 6.20 mostra o comportamento da variação entre a frequência de ressonância da FSS e a espessura do substrato, para a estrutura em análise.

Figura 6.8 *Substrato de espessura 0,203 mm*Figura 6.9 *Substrato de espessura 0,305 mm*

Figura 6.10 *Substrato de espessura 0,406 mm*Figura 6.11 *Substrato de espessura 0,508 mm*

Figura 6.12 *Substrato de espessura 0,813 mm*Figura 6.13 *Substrato de espessura 1,524 mm*



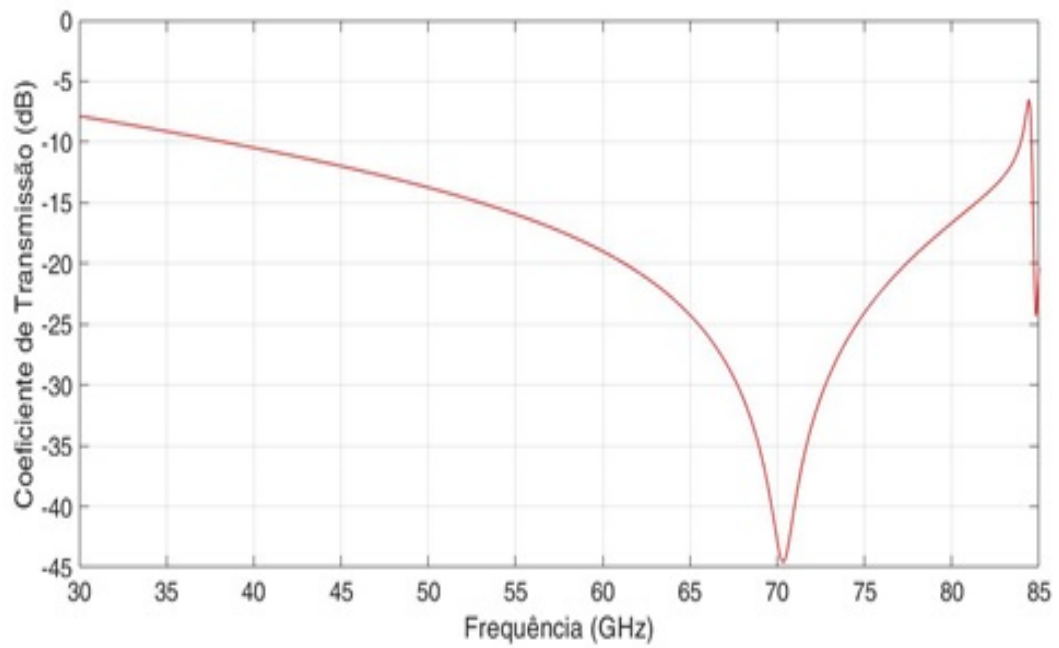


Figura 6.14 Valores ótimos com substrato de espessura 0,203 mm

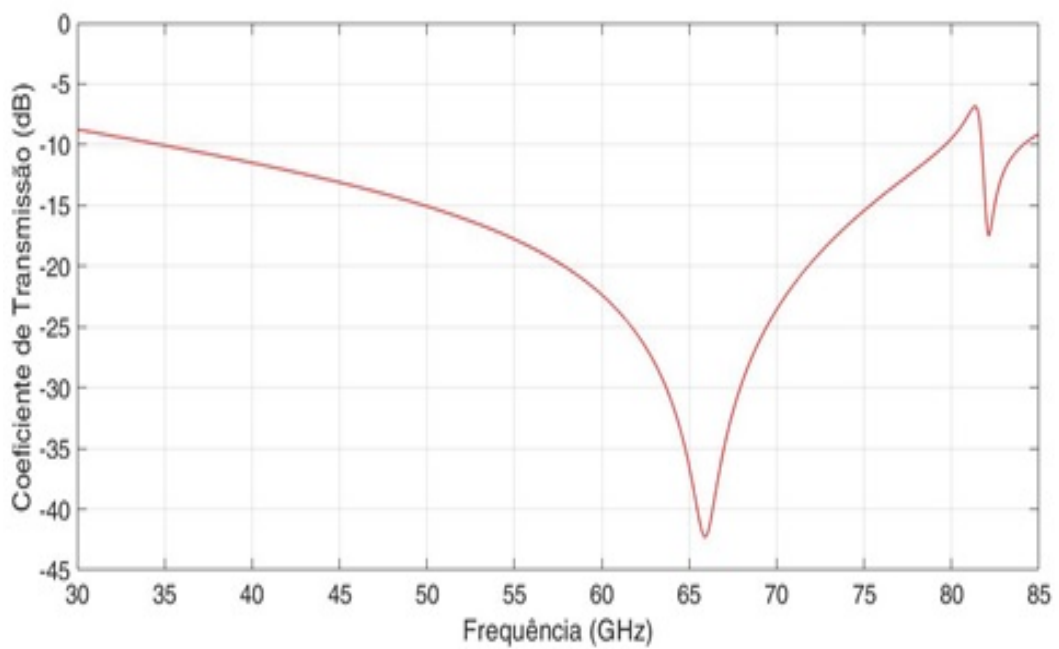


Figura 6.15 Valores ótimos com substrato de espessura 0,305 mm

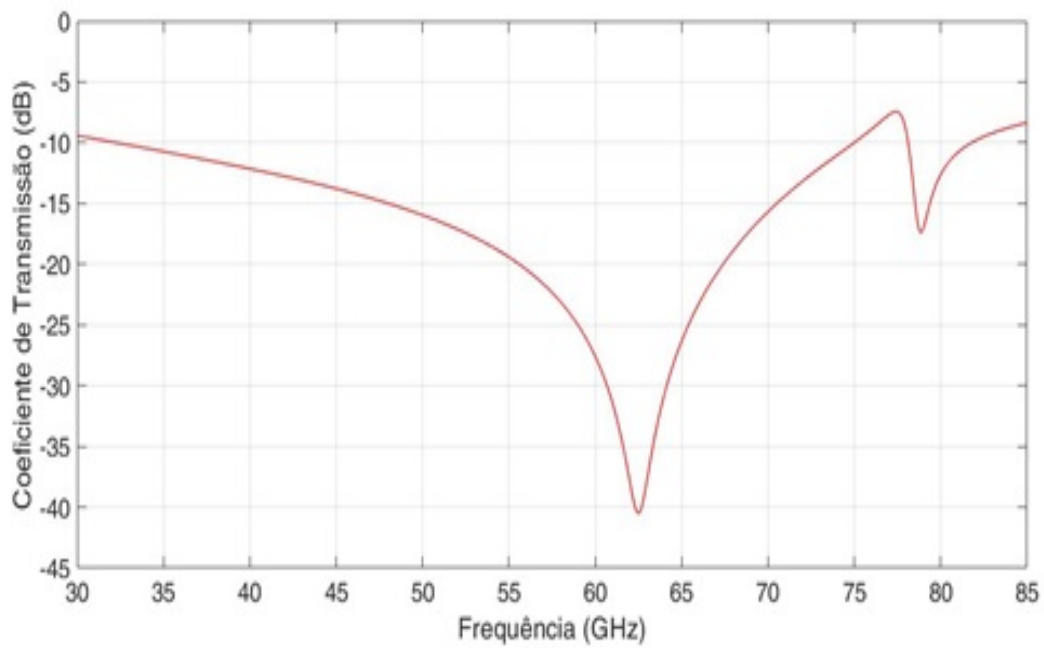


Figura 6.16 Valores ótimos com substrato de espessura 0,406 mm

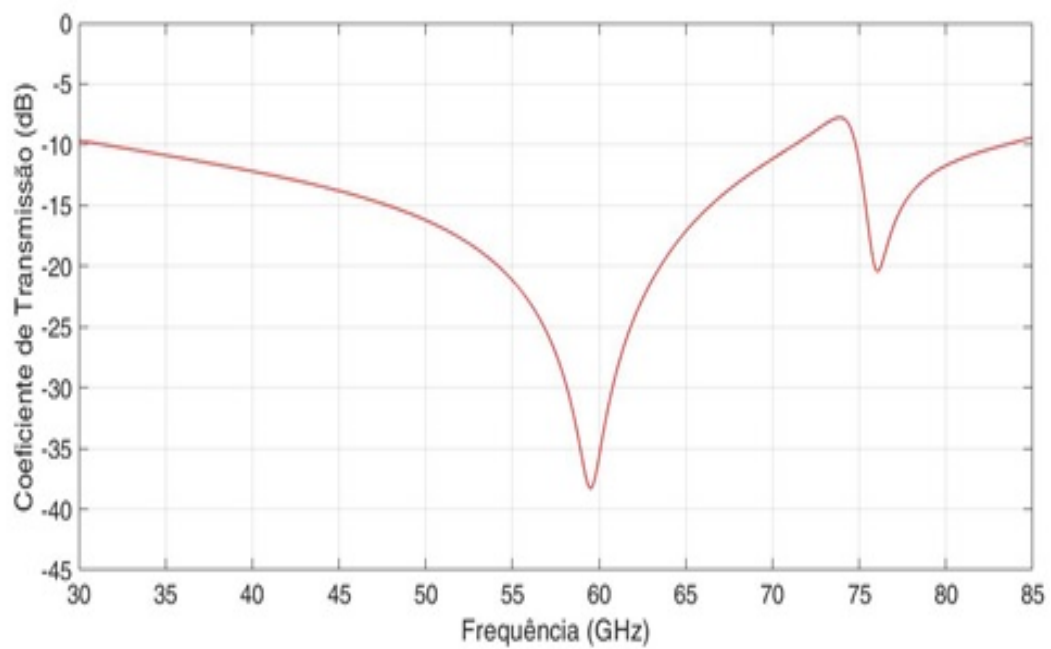


Figura 6.17 Valores ótimos com substrato de espessura 0,508 mm

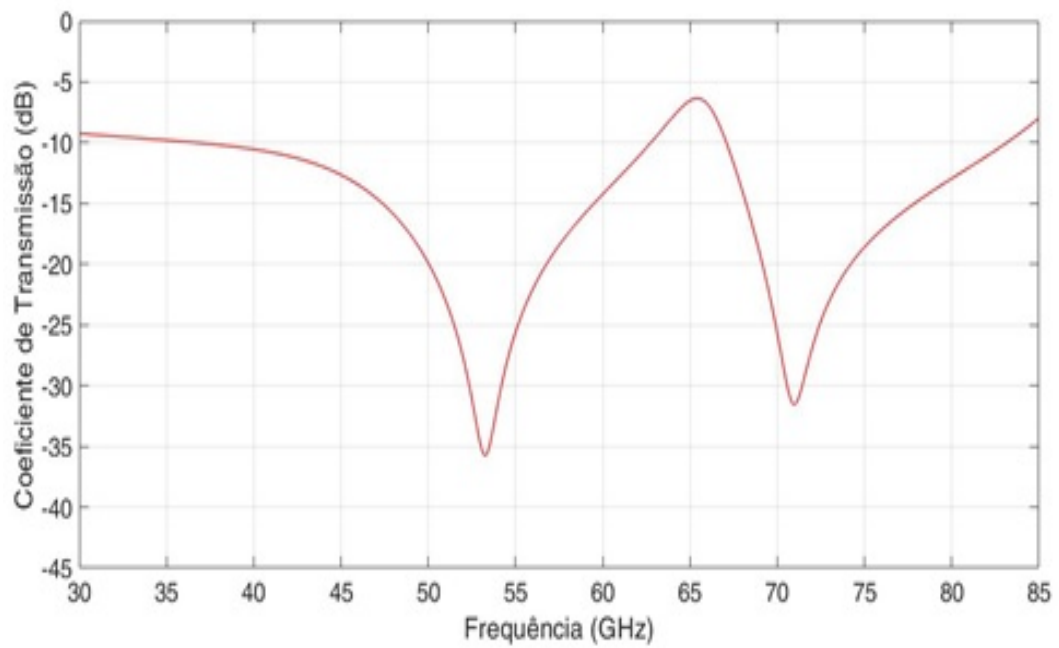


Figura 6.18 Valores ótimos com substrato de espessura 0,813 mm

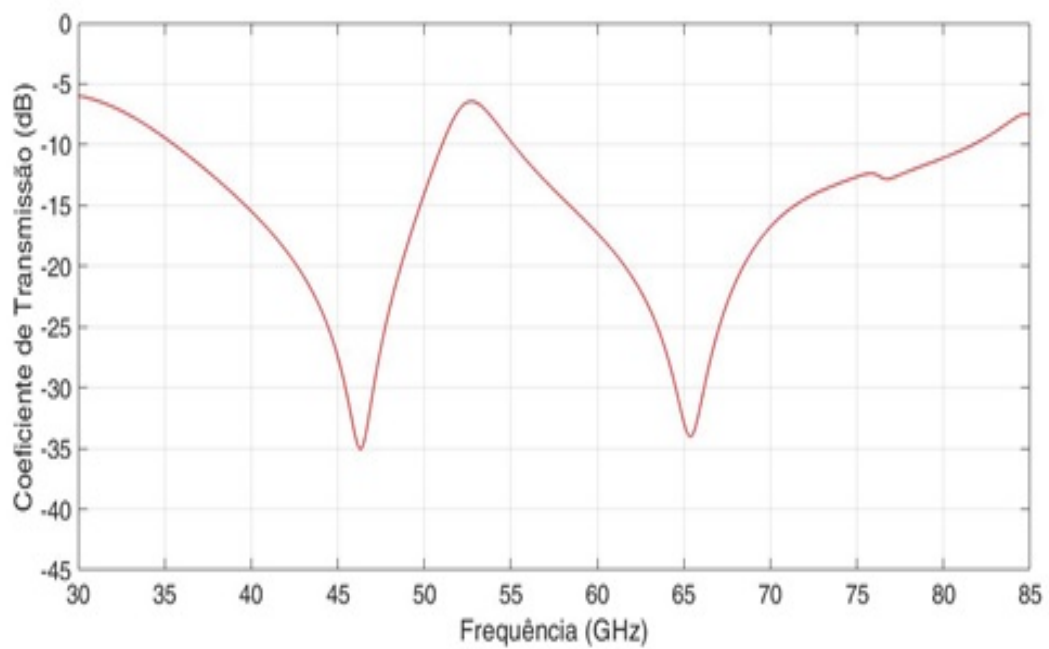
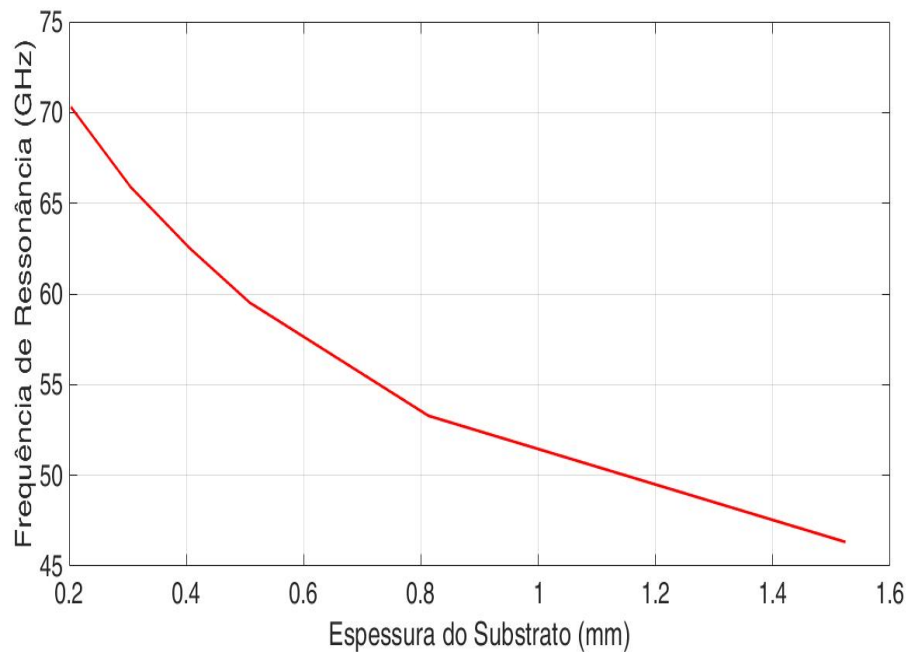


Figura 6.19 Valores ótimos com substrato de espessura 1,524 mm

Tabela 6.3 *Frequência de ressonância ( $f_R$ ) e largura de banda ( $BW$ ) para cada espessura do substrato para valores ótimos*

Espessura	$f_{R1}$ (GHz)	$WB_1$ (GHz)	$f_{R2}$ (GHz)	$WB_2$ (GHz)
0,203 mm	70,310	45,728		
0,305 mm	65,890	44,933	82,140	2,379
0,406 mm	62,510	42,763	78,825	3,685
0,508 mm	59,520	39,856	76,030	8,678
0,813 mm	53,280	26,092	70,960	16,066
1,524 mm	46,325	15,492	65,370	26,585

Figura 6.20 *Diagrama mostrando a relação da variação entre a espessura e a frequência de ressonância para esta FSS.*

## Conclusões e Trabalhos Futuros

---

*Neste trabalho, foi desenvolvida uma técnica de inteligência computacional Bioinspirada (BIC) de otimização híbrida multiobjetivo, que associa uma Rede Neural de Regressão Generalizada (General Regression Neural Network – GRNN) ao Algoritmo Multiobjetivo do Morcego (Multiobjective Bat Algorithm – MOBA), no projeto e síntese de uma Superfície Seletiva de Frequência (Frequency Selective Surfaces – FSS) com elementos metálicos na forma geométrica de losango. O arranjo é constituído por patches, o que caracteriza o dispositivo como filtro rejeita-faixa. Nas simulações computacionais realizadas, o arranjo periódico foi considerado como sendo impresso sobre substrato dielétrico isotrópico RO4303. Esta configuração foi idealizada pela simplicidade da geometria investigada, baixo custo do material do substrato para futura fabricação e por permitirem operação em faixas ultra larga de frequências. A análise eletromagnética foi realizada por meio do método numérico dos Método dos elementos finitos (Finite Element Method – FEM), com o auxílio do software comercial HFSS.*

### 7.1 Conclusões

A metodologia que envolve redes neurais artificiais e eletromagnetismo foi aplicada para modelar o comportamento da FSS *patch* losango, onde um banco de dados calculado pelo FEM, se fez necessário para garantir o aprendizado da rede, assim, disponibilizando o conhecimento adquirido para futuras utilizações. A junção de redes neurais artificiais a algoritmos de otimização natural, consiste em um método alternativo de otimização de estruturas eletromagnéticas, caracterizando a técnica denominada de Método Híbrido, que tem por fim viabilizar características como: eficácia, flexibilidade e eficiência computacional. Resultando em uma poderosa ferramenta de otimização na solução de problemas de espalhamento eletromagnético.

A síntese da FSS utilizando um patch losango, foi realizada com fins de operar na faixa de frequências pertencentes ao padrão IEEE 802.15.3c. A partir de variação da periodicidade da célula unitária e, também do comprimento do lado da metalização, e das restrições do sistema, foram configuradas de maneira a se ter uma função custo de frequência de ressonância em  $f_r = 60.0$  GHz e largura de banda ultra larga de  $BW = 30.0$  GHz.

Para validação dos resultados e verificação da consistência computacional da técnica de otimização desenvolvida, foram realizadas novas simulações no HFSS com os parâmetros estruturais ótimos para a célula unitária da FSS patch losango calculados pela técnica híbrida GRNN+MOBA, que são:  $W_y = 3,7$  mm;  $W_x = 1,85$  mm;  $T_y = 3,5$  mm e  $T_x = 1,75$  mm. Com isso, verificou-se boa concordância entre os resultados obtidos pela técnica híbrida desenvolvida e os calculados pelo HFSS. Vale ressaltar que redes do tipo GRNN, ao se verificar o estado da arte, ainda não haviam sido aplicadas no processo de otimização de FSS para mm-Wave, bem como o MOBA.

## 7.2 Propostas para Trabalhos Futuros

Ainda existe lacunas significativas entre teoria e prática nas aplicações das técnicas de otimização. A maioria dos algoritmos metaheurísticos tem sucesso nas aplicações, ou seja, na prática, mas sua análise matemática fica um pouco aquém. De fato, além de alguns resultados limitados sobre a convergência e estabilidade utilizando a Otimização do Enxame de Partículas, Algoritmos Genéticos, *Annealing* Simulado e outros, muitos algoritmos não possuem uma teoria analítica consistente na literatura: Portanto, podemos saber que eles na prática, mal entendemos como e porquê eles trabalham e como melhorá-los através do entendimento dos seu mecanismos.

Há muitos problemas importantes que precisam ser abordados no contexto da inteligência computacional e nos algoritmos metaheurísticos Para listar todos esses problemas, pode ser necessário um longo trabalho para fornecer os detalhes suficientes para cada questão-chave. Contudo, acredita-se que os seguintes problemas, que estão abertos valem a pena serem enfatizados:

- ✓ **Métodos computacionais extensos:** a maioria das aplicações atuais são computacionalmente extensas e caras por causa dos valores de dimensionamento, objetivos e demais tarefas;
- ✓ **Aplicações intensivas de dados:** da mesma forma que os dados estão aumentando dramaticamente, devido ao fluxo da tecnologia da informação e meios sociais, isto se torna muito importante. Técnicas de mineração de dados tem se tornado muito relevante e métodos bioinspirados tais como PSO, Busca cuco e outros como o algoritmo do vagalume estão se tornando crescentemente populares em tais aplicações;
- ✓ **Aplicações complexas no mundo-real:** principalmente em projetos e dimensionamento de alguns vários setores de engenharia e processos industriais.
- ✓ **Redes e sistemas:** atividades de pesquisa hoje em dia tem também focado em modelamento e simulação redes complexas e sistemas tipo redes de computadores, grades de eletricidade e energia sistemas biológicos;

- ✓ **Aplicações biológicas:** computação bioinspirada tem sido aplicada na área biológica tais bioinformática e engenharia genética;
- ✓ **Problemas de larga escala:** as aplicações correntes tendem a serem problemas muito maiores que os atuais, envolvendo milhares a mais de variáveis de projetos.

Como se acabou de observar, a computação bioinspirada, é hoje uma área muito ativa e muitos desafios ainda permanecem. É portanto de se esperar que muita atividade de pesquisas excitantes será vista em futuro vindouro.

---

## Referências Bibliográficas

---

- [1] B. A. Munk, *Frequency Selective Surfaces – Theory and Design*, John Wiley and Sons, New York, 2000.
- [2] B. A. Munk, *Finite Antenna Arrays and FSS*, Hoboken, NJ., Wiley-Interscience, 2003.
- [3] Narayan, S. and R. Mohan Jha, "Electromagnetic Techniques and Design Strategies for FSS Structure Applications", *IEEE Antennas Propagation Magazine*, Issue Oct, 2015, pages 135-158.
- [4] B. Lu, X. Gong, J. Ling, and H. W. Yuan, "Radar cross section reduction of antennas using stop-band frequency selective surfaces," *Microwave Journal*, vol. 52, p. 16, Aug. 2009.
- [5] Raj Mittra, Chi H. Chan and Tom Cwik, "Techniques for Analyzing Frequency Selective Surfaces - A Review", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 76, no.12, Dec. 1988.
- [6] Y. Rahmat-Samii and E. Michielssen, Eds., *Electromagnetic Optimization by Genetic Algorithms*. John Wiley and Sons, 1999.
- [7] K. C. Gupta and Q. J. Zhang, *Neural Networks for RF and Microwave Design*. Artech House Publishers, 2000.
- [8] L. Ragan, A. Hassibi, T. S. Rappaport and C. L. Christianson, "Novel on-chip antenna structures and frequency selective surface (FSS) approaches for millimeter wave devices", *Vehicular Technology Conference (VTC)*, 66th IEEE Conference, pp 2051 – 2055, 2007.
- [9] X. S. Yang e S. Deb, "Cuckoo search via Lévy flights", in Proc. of World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing (NaBic 2009), *IEEE Publications*, USA, pages. 2010-2014, 2009.
- [10] X. S. Yang, *A new metaheuristic bat-inspired algorithm*, Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization, Springer Berlin, vol. 284, pages. 65-74, 2010.
- [11] M. C. Alcantara Neto, J. P. L. Araújo, F. J. B. Barros, A. N. Silva, G. P. S. Cavalcante, and A. G. D'Assunção, "Bioinspired multiobjective synthesis of x-band fss



- via general regression neural network and cuckoo search algorithm", *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 57, No. 10, pages 2400-24005, 2015.
- [12] W. C. Araújo, H. W. C. Lins, A. G. D'Assunção Jr., J. L. G. Medeiros and A. G. D'Assunção, "A bioinspired hybrid optimization algorithm for designing broadband frequency selective surfaces", *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 56, no. 2, 2014.
- [13] A. Hoorfar, "Evolutionary programming in electromagnetic optimization: a review", *IEEE Trans. Antenna and Propag.*, pages 523–537, 2007.
- [14] R. H. C. Maniçoba, "Estudo do acoplamento entre superfícies seletivas de frequência assimétrica em estruturas de multicamadas", Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, Brasil, 2012.
- [15] T. L. Silva, "Análise de onda completa de superfície seletiva em frequência do tipo anteparo duplo", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, Brasil, 2011.
- [16] M. C. Alcântara Neto , J. P. L. Araújo, R. J. S. Mota , F. J. B. Barros , F. H. C. S. Ferreira , G. P. S. Cavalcante and B. S. L. Castro, "Design and Synthesis of an Ultra Wide Band FSS for mm-Wave Application via General Regression Neural Network and Multiobjective Bat Algorithm", *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/2179-10742019v18i41729>, 2019.
- [17] Te-Kao Wu, "Frequency selective surfaces", *Shankar rameshvp/Art*, No. eme133, pages 1-7, 2016.
- [18] Chi H. Chan and Raj. Mittra, "On the Analysis of Frequency Selective Surfaces Using Subdomain Basis Functions", *IEEE Trans. on Anten. and Prop.*, Vol. 38, no. 1, Jan., 1990.
- [19] Narayan, S. and R. Mohan Jha, "Electromagnetic Techniques and Design Strategies for FSS Structure Applications", *IEEE Antennas Propagation Magazine*, Issue Oct, 2015, pages 135-158.
- [20] Anwar, R. S., Mao, L. and H. Ning, "Frequency Selective Surfaces: A Review", *Appl. Sci.*, 2018, 8, 1689.
- [21] Haiyan Chen, Xinyu Hou and Longjiang Deng, "Design of Frequency-Selective Surfaces Radome for a Planar Slotted Waveguide Antenna", *Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 8, pages 1231-1233, 2009.
- [22] G. Kiani and V. Dyadyuk, "Low loss FSS polarizer for 70 GHz applications", *Proceedings of the IEEE International Symposium on Antennas and Propagation*, 2012.

- [23] K. R. Jha, G. Singh, and R. Jyoti, "A simple synthesis technique of single square loop frequency selective surface", *Progress In Electromagnetics Research B*, vol. 45, pages. 165–185, 2012.
- [24] R. Dickie, R. Cahill, V. Fusco, H. Gamble and N. Mitchell, "THz Frequency Selective Surface Filters for Earth Observation Remote Sensing Instruments", *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 1, no. 2, pages. 450-461, 2011.
- [25] R. Dickie, R. Cahill, H. Gamble, V. Fusco, B. Moyna, P. Huggard, N. Grant and C. Philpot, "Micromachined 300 GHz high Q resonant slot frequency selective surface filter", *IEE Proceedings - Microwaves, Antennas and Propagation*, vol. 151, no. 1, p. 31, 2004.
- [26] Mohammed T. Al Haddad, "Design of Frequency Selective Surface (FSS) for Mobile Signal Shielding", *A Thesis Submitted to the Islamic University Of Gaza for the Degree of Master in communication Engineering*, The Islamic University Of Gaza, Palestine, 2016.
- [27] Balanis, C. C., *Antenna Theory and Analysis*, 4 Ed., John Wiley and Sons, 2016.
- [28] Garg, R., Bhartia, P., Bahl, I. and A. Ittipiboon, *Antenna Design Handbook*, Artech House, Inc., Boston, (2001).
- [29] D. H. Schaubert, D. M. Pozar, and A. Adrian, "Effect of Microstrip Antenna Substrate Thickness and Permittivity: Comparison of Theories and Experiment," *IEEE Trans. Antennas Propagation.*, Vol. AP-37, No. 6, pages 677–682, June 1989.
- [30] Balanis, A. C.(ed.), *Antenna Modern Handbook*, John Wiley Sons, Inc. 2008.
- [31] J. C. Vardaxoglou, *Frequency Selective Surfaces*, Taunton, U.K. Research Studies Press, 1997.
- [32] M. Sesay, X. Jin, and Z. Ouyang, "Frequency Selective Surface with Arbitrary Shapes and Its Application to Filter Design", *Progress In Electromagnetics Research B*, Vol. 57, pages 75-85, 2014.
- [33] D. Rittenhouse, "An optical problem proposed by Mr. Hopkinson and solved by Mr. Rittenhouse", *Trans. Amer. Phil. Soc.*, Vol. 2, pages 201-206, 1786.
- [34] M. Ohira, H. Deguchi, M. Tsuji and H. Shigesawa, "Analysis of Frequency Selective Surface with Arbitrarily Shaped Element by Equivalent Circuit Model", *Electronics and Communications in Japan*, Part 2, Vol. 88, No. 6, 2005.
- [35] F. A. Chaudhry, M. Raspopoulos and S. Stavrou, "Effect of Frequency Selective Surfaces on radio wave propagation in indoor environments", *11th European Wireless Conference 2005*, Nicosia, Cyprus, pages 732-736, April 2005.

- [36] M. C. Alcântara Neto, F. J. B. Barros, J. P. L. Araújo, H. S. Gomes, G. P. S. Cavalcante, A. G. D'Assunção, "A Metaheuristic Hybrid Optimization Technique for Designing Broadband FSS", *SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, pages 1-5, November 2015.
- [37] M. N. Kawakatsu, "Superfícies eletromagnéticas de micro-ondas com controle do regime de trapped-mode", Tese de Doutorado, Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia (ITEC), Pará, 2012.
- [38] Meejoung Kim and Wooyong Lee, "Optimal contention window size for IEEE 802.15.3c mmWave WPANs", *Wireless Network*, 20:1335–1347, 2014, DOI 10.1007/s11276-013-0682-x.
- [39] N. Kukutsu and Y. Kado, "Overview of Millimeter and Terahertz Wave Application Research", *NTT Review - Microsystem Integration Laboratories*, Vol. 7 No. 3 Mar. 2009.
- [40] M. Xiao, S. Mumtaz, Y. Huang, L. Dai, Y. Li, M. Matthaiou, G. K. Karagiannidis, E. Björnson, K. Yang, I. Chih-Lin and A. Ghosh, "Millimeter Wave Communications for Future Mobile Networks", Part I, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 35, No. 7, May, 2017.
- [41] Venkatesha, P., B. Van Quangy, K. Chandray, X. Anz, I. G. M. M. Niemegeersy and H. Nguyen, "Analysing IEEE 802.15.3c Protocol in Fi-Wi Hybrid Networks", *IEEE 10th Consumer Communications and Networking Conference (CCNC)*, 2013.
- [42] Y. Ma, W. Wu, Y. Yuan, W. Yuan and N. Yuan, "A High-Selective Frequency Selective Surface With Hybrid Unit Cells", *IEEE Access*, October 2018.
- [43] C. C. Chen, "Transmission through a conducting screen perforated periodically with apertures," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-18, 1970, pages 627-632.
- [44] ITU-R, Rec. ITU-R P.676-9, *Attenuation by Atmospheric Gases*, P Series, Radiowave Propagation.
- [45] J. Rodriguez, Editor, *Fundamentals of 5G Mobile Networks*, John Wiley Sons, Ltd., 2015.
- [46] D. P. Varma, R. P. Dwivedi and UshaKiran K., "Comparative Analysis of Microstrip Antenna for High Gain using FSS", DOI: 10.1109/ICNETS2.2017.8067960, Conference Paper, March 2017.
- [47] Du, K. L. and M. N. S. Swamy, *Search and Optimization by Metaheuristics – Techniques and Algorithms Inspired by Nature*, Springer International Publishing, AG Switzerland, 2010.
- [48] W. C. Araújo, H. W. C. Lins, A. G. D'Assunção Jr., J. L. G. Medeiros and A. G. D'Assunção, "A bioinspired hybrid optimization algorithm for designing broadband

- frequency selective surfaces", *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 56, no. 2, 2014.
- [49] M. C. Alcântara Neto, "Síntese de Superfícies Seletivas de Frequência para Micro-Ondas Utilizando Otimização Multiobjetiva Bioinspirada", Tese de Doutorado, UFPA, ITEC, PPGEE, 2015.
- [50] M. C. Alcântara Neto, J. P. L. Araújo, F. J. B. Barros, A. N. Silva, G. P. S. Cavalcante, and A. G. D'Assunção, *Bioinspired Multiobjective Synthesis of X-Band FSS via General Regression Neural Network and Cuckoo Search Algorithm*, *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 57, No. 10, pages 2400-24005, October 2015.
- [51] Ravi Panwar and Jung Ryul Leeb, "Progress in frequency selective surface-based smart electromagnetic structures: A critical review", *Aerospace Science and Technology*, Vol. 66, pages 216–234, 2017.
- [52] R. S. Anwar, L. Mao and H. Ning, "Surface Selective Frequency: A Review", *Applied Science*, 8, 1689, 2018.; doi:10.3390/app8091689
- [53] R. Mittra, C. Chan, and T. Cwik, "Techniques for analyzing frequency selective surfaces — a review", *IEEE Proceedings*, 76(23): pages 1593–1615, Dec., 1988.
- [54] C. C. Chen, "Transmission of microwave through perforated flat plates of finite thickness", *IEEE Trans. MTT*,21(1): pages 1–6, Jan., 1973.
- [55] K. Bencherif, M. Titaouine, R. Saidi, A. Djouimaa, I. Adoui, T. R. de Sousa, A. G. Neto and Henri Baudrand, "Multiband FSS Analysis and Synthesis Based on Parallel Non Coupled Metallic Strips Using WCIP Method", *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, Vol. 17, No. 4, December, 2018.
- [56] H. W. C. Lins, E. L. F. Barreto and A. G. D'Assunção, "Enhanced wideband performance of coupled frequency selective surfaces using metaheuristics", *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 55, no. 4, 2013.
- [57] G. R. MacCartney Jr. and T. S. Rappaport, "Study on 3GPP Rural Macrocell Path Loss Models for Millimeter Wave Wireless Communications," *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Paris, France, May 2017, pages 1-7.
- [58] S. Sun, G. R. MacCartney Jr., and T. S. Rappaport, "A Novel Millimeter-Wave Channel Simulator and Applications for 5G Wireless Communications," *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, May 2017.
- [59] S. Sun, H. Yan, G. R. MacCartney Jr., and T. S. Rappaport, "Millimeter Wave Small-Scale Spatial Statistics in an Urban Microcell Scenario," *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, May 2017.

- [60] S. Sun and T. S. Rappaport, "Millimeter Wave MIMO Channel Estimation Based on Adaptive Compressed Sensing", *IEEE International Conference on Communications Workshop (ICCW)*, May 2017.
- [61] J. Ryan, G. R. MacCartney Jr. and T. S. Rappaport, "Indoor Office Wideband Penetration Loss Measurements at 73 GHz", *IEEE International Conference on Communications Workshop (ICCW)*, Paris, France, pages 1-6, May 2017.
- [62] G. R. MacCartney Jr., H. Yan, S. Sun and T. S. Rappaport, "A Flexible Wideband Millimeter-Wave Channel Sounder with Local Area and NLOS to LOS Transition Measurements", in *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Paris, France, pages 1-7, May 2017.
- [63] C. Mingzhe, C. Ursula, S. Walid, Y. Changchuan and M. Debbah, "Machine Learning for Wireless Networks with Artificial Intelligence: A Tutorial on Neural Networks", arXiv:1710.02913v1, [cs.IT] 9 Oct, 2017.
- [64] B. R. S. Reddy, D. Vakula and N. V. S. N. Sarma, "Design of multiple function antenna array using radial basis function neural network", *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, vol. 12, no. 1, 2013.
- [65] C. M. J. V. Coevorden, M. F. Pantoja, S. G. García, A. R. Bretones, R. G. Martín and K. Palmer, "Multiobjective-optimized design of a new UWB antenna for UWB applications", *International Journal of Antennas and Propagation*, article ID 476878, 2013.
- [66] X. S. Yang and S. Koziel, *Computational Optimization and Applications in Engineering and Industry*, Springer, 2011.
- [67] X. S. Yang (Ed.), *Bio-Inspired Computation in Telecommunications*, DOI.org/10.1016/B978-0-12-801538-4.00001-X, Elsevier Inc, 2015.
- [68] S. Yilmaz, E. U. Kucuksille and Y. Cengiz, "Modified Bat Algorithm", *Elektronika ir Elektrotechnika*, ISSN pages 1392-1215, Vol. 20, No. 2, 2014.
- [69] X.-S. Yang, "A New Metaheuristic Bat-Inspired Algorithm", in: *Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization (NISCO 2010)* (Eds. J. R. Gonzalez et al.), *Studies in Computational Intelligence*, Springer Berlin, 284, Springer, pages 65-74, 2010.
- [70] X. S. Yang, "Bat Algorithm for Multiobjective Optimization", *Int. J. Bio-Inspired Computation*, Vol. 3, No. 5, 2011, pages 267-274.
- [71] K. Hussain, M. N. M. Salleh, S. Cheng and Y. Shi, "Metaheuristic research: a comprehensive survey", Springer Science+Business Media B.V., part of Springer Nature, 2018.

- [72] I. Boussaid, J. Lepagnot and P. Siarry, "A survey on optimization metaheuristics", *Information Science*, Vol. 237, pages 82-117, 2013.
- [73] M. C. Alcântara Neto, J. P. L. Araújo, F. J. B. Barros, A. N. Silva, G. P. S. Cavalcante, and A. G. D'Assunção, "Bioinspired multiobjective synthesis of x-band fss via general regression neural network and cuckoo search algorithm", *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 57, No. 10, pages 2400-24005, October, 2015.
- [74] M. C. Alcântara Neto, F. J. B. Barros, J. P. L. Araújo, H. S. Gomes, G. P. S. Cavalcante, A. G. D'Assunção, "A Metaheuristic Hybrid Optimization Technique for Designing Broadband FSS", *SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, pages 1-5, November, 2015.
- [75] A. Hoorfar, "Evolutionary Programming in Electromagnetic Optimization: A Review", *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, Vol. 55, No. 3, March, 2007.
- [76] KL. Du and M.N.S. Swamy, *Search and Optimization by Metaheuristics –Techniques and Algorithms Inspired by Nature*, Springer International Publishing Switzerland 2016.
- [77] *Amendment of Parts 2.15 and 97 of the Commission's Rules to Permit Use of Radio Frequencies Above 40 GHz for New Radio Applications*, FCC 95–499 ET Docket no. 94-124 RM-8308, Dec. 1995.
- [78] J. P. L. Araújo, J. C. Rodrigues, S. G. C. Fraiha, H. Gomes, G. P. S. Cavalcante e C. e R. L. Francês, "A WLAN planning proposal through computational intelligence and genetic algorithms hybrid approach", *The International Conference on Mobile Technology, Applications Systems (Mobility Conference)*, pages 10-12, Ilan, Taiwan, 2008.
- [79] S. Samarasinghe, *Neural Networks Applied Sciences and Engineerings*, Auerbach Pub., Boca Raton NY-US, 2007.
- [80] J. A. Simmons, P.A. Saillant and S.P. Dear, "Through a bat's ear", *IEEE Spectrum*, vol. 29, issue 3, pages 46–48, March 1992.
- [81] V. Pareto, *Cours d'Economie Politique*, Rouge, 1886.
- [82] E. A. Nadaraya, "On estimating regression", *Theory of Probab. Applicat.*, vol. 9, pages 141–142, 1964.
- [83] G. S. Watson, "Smooth regression analysis", *Sankhya Series A*, vol. 26, pages 359–372, 1964.
- [84] D. F. Specht, "A general regression neural network", *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 2, no. 6, 1991.
- [85] L. P. Devroye and L. Györfi, *Nonparametric density estimation: the L-1 view*, U.K., Wiley, 1983.

- [86] R. L. Eubank, *Spline smoothing and nonparametric regression*, New York and Basel: Marcel Dekker, 1988.
- [87] R. L. Rutkowski, "Sequential estimates of probability densities by orthogonal series and their application in pattern classification", *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.*, vol. SMC-10, no. 12, pages 918–920, 1980.
- [88] R. L. Rutkowski, "Sequential estimates of a regression function by orthogonal series with applications in discrimination", *Lectures Notes in Statistics*, vol. 8. New York, pages 236–244, 1981.
- [89] J. A. Leonard and M. A. Kramer, "Radial Basis Function Networks for Classifying Process Faults". *Control Systems Magazine*, 11(3), pages 31–38, 1991.
- [90] D. E. Rumelhart, G. E. Hinton, and R.J. Williams, *Learning internal representations by error Propagation*, D. E. Rumelhart, J. L. McClelland and The PDP Research Group, Parallel distributed processing: Explorations in the Microstructure of Cognition, Foundations, MIT Press, vol. 1, pages 318–362, Cambridge, MA, 1986.
- [91] X. S. Yang, S. Deb, M. Loomes and M. Karamanoglu, "A framework for self-tuning optimization algorithm", *Neural Comput. Appl*, in press, 2013, <http://dx.doi.org/10.1007/s00521-013-1498-4>.
- [92] A. Chakri, R. Khelif, M. Benouaret and X. S. Yang, "New directional bat algorithm for continuous optimization problems", *Expert Systems with Applications*, Vo. 69, No 1, pages 159-175, 2017.
- [93] I. J. Fister, X. S. Yang, S. Fong and Z. Yan, "Bat algorithm: Recent advances". Paper presented at the Computational Intelligence and Informatics (CINTI), *IEEE 15th International Symposium*, on 2014.
- [94] W. C. Chew and J. A. Kong, "Effects of Fringing Fields on the Capacitance of Circular Microstrip Disk", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, vol. 28, no.2 pages 98-102, Feb. 1980.
- [95] Y. L. Chow and M. M. Yovanovich, "The shape factor of the capacitance of a conductor", *Journal of Appl. Physics*, vol. 53, pages 8470-8475, 1982.